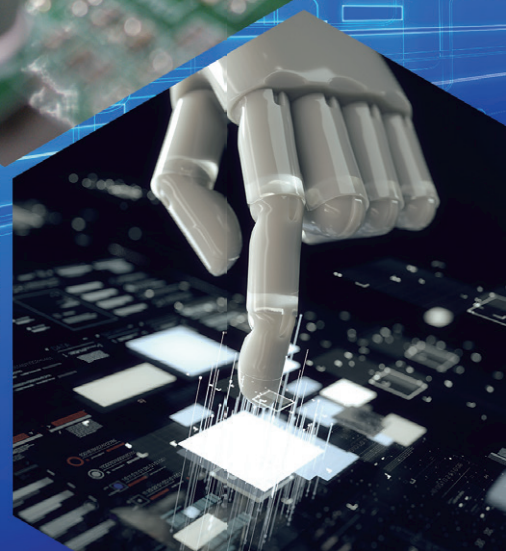
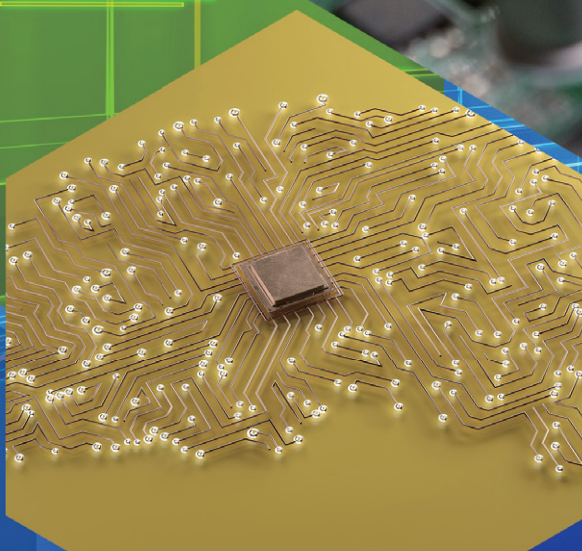
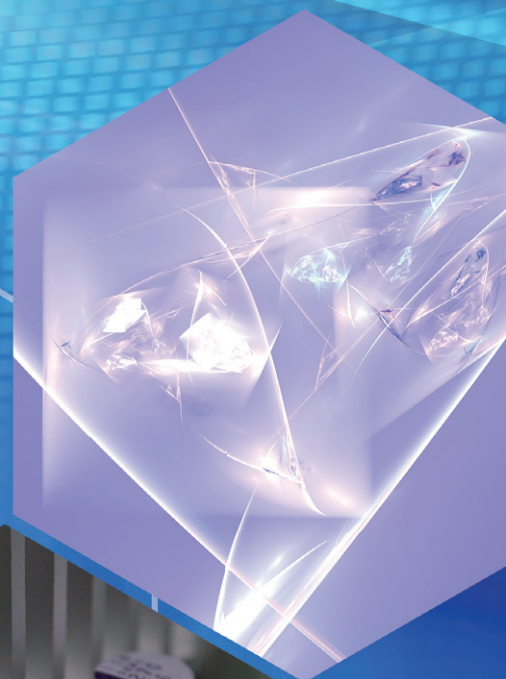


March 2021

神奈川大学

# 工学研究

No. **4**







# 目 次

## 1. 巻頭言

工学部のさらなる発展を目指して .....	中尾 陽一 .....	1
-----------------------	-------------	---

## 2. 新任者の研究紹介

2-1 マスカスタマイゼーションに対応した次世代生産・受注システムの開発—工作機械を例に— .....	赤坂 信悟、翁 嘉華 .....	3
2-2 特異な生物活性を示す新規生物活性天然物 Minnamide A の単離と構造決定 .....	澄本 慎平 .....	8
2-3 Performance Analysis for Lossy-Forwarding Relaying in Nakagami-m Fading Channels .....	Shen Qian .....	13
2-4 Co-W シアノ架橋配位高分子磁性体における湿度誘起構造および磁気相転移 .....	織作 恵子 .....	19
2-5 可積分ハミルトン力学系とその摂動問題 .....	伊藤 秀一 .....	23
2-6 固有振動数成分除去法による天井走行クレーンの制振 .....	栗原 海 .....	28
2-7 温度差表面張力流と流れの可視化に関する微小重力実験 .....	矢野 大志 .....	32
2-8 経路最適化問題と解法アルゴリズムの研究 .....	李 嘉誠 .....	40
2-9 ナビエ・ストークス方程式の幾何的正則性判定法及び双曲型流数値計算 .....	許 本源 .....	43
2-10 宇宙線ミュオンによる地震断層の透視 .....	池田 大輔 .....	46
2-11 銀河系中心領域における中間質量ブラックホール候補の発見 .....	竹川 俊也 .....	51

## 3. 受賞研究の紹介

3-1 水素化アモルファスシリコン／結晶シリコンヘテロ接合太陽電池の陽電子消滅法に基づく界面近傍微細構造評価 .....	松木 伸行 .....	55
--	-------------	----

## 4. 工学部重要機器整備費関連研究

4-1 光学特性測定システム .....	松木 伸行 .....	59
4-2 スパッタリング法による磁性薄膜の作製とその応用 .....	渡邊 騎通、中山 明芳 .....	62

## 5. 工学研究所共同研究

5-1 ハイブリッドロケットエンジンの軽量化、大推力化および高燃焼効率化（2019） .....	高野 敦、船見 祐揮、喜多村 竜太、正井 卓馬 .....	65
5-2 DNA のレーザー分子線堆積に基づくニューパラダイム：新奇ハイブリッド薄膜材料の創製 .....	松木 伸行、有賀 克彦、小野 晶、亀山 敦、佐藤 知正、山口 栄雄、横澤 勉 .....	70
5-3 新バリア材料を有するジョセフソン接合の作製と二次元磁界変調特性の測定による接合の評価 .....	渡邊 騎通、穴田 哲夫、中山 明芳 .....	75
5-4 曲げ履歴を受けた鋼材の機械的性質に関する研究 .....	藤田 正則、中村 慎 .....	79
5-5 遺伝子組換えを利用したシーバリー雌雄識別 DNA マーカーの開発 .....	朝倉 史明、中川 理絵、河合 義隆、森 直樹 .....	84

## 6. 工学研究所プロジェクト研究

6-1 まちづくり研究所 2019 年度までの活動より .....	山家 京子、上野 正也、中井 邦夫、石田 敏明、内田 青蔵、曾我部 昌史、須崎 文代、 吉岡 寛之、田野 耕平、重村 力、丸山 美紀、長谷川 明、鈴木 成也 .....	89
6-2 高周波回路の解析・設計理論の整備と対応ソフト開発—短絡境界平行平板平面回路のインピーダンス型等価回路導出と妥当性— .....	平岡 隆晴、許 瑞邦 .....	91
6-3 Investigation of Relationship Between the Response and Fourier Spectral Ratios Based on Statistical Analyses of Strong Motion Records .....	Haizhong ZHANG、Yan-Gang ZHAO .....	93
6-4 “新たな低炭素エネルギー社会に対応した新型電池の開発(5)” .....	松本 太、池原 飛之、郡司 貴雄、大坂 武男、入井 友海太、安東 信雄 .....	97
6-5 振動エネルギー伝達特性に基づく低周波振動の低減 .....	山崎 徹、片岡 大雄 .....	100
6-6 振動を用いた DNA 増幅法 .....	山口 栄雄、米田 征司、鈴木 温 .....	102
6-7 パルスレーザー光を利用した反応開発および機構解析 .....	岩倉 いずみ、岡本 専太郎、織作 恵子、赤井 昭二、岡田 繁、小林 孝嘉、岡村 幸太郎、橋本 征奈、簗下 篤史 .....	103

6-8	企業ロボット研究へのモデリング&シミュレーションの活用	石井 信明、松井 正之	105
6-9	ポリペプチドのフォールディングと集積化により形成される高次構造と機能	亀山 敦、森井 尚之、岩岡 道夫、高橋 明	107
6-10	戸建住宅における全館空調の一次エネルギー消費量に関する研究 (3)	岩本 静男、傳法谷 郁乃、児保 茂樹	109
6-11	不確定状況下でのプロジェクトマネジメントの定量的評価の概念	石井 信明、横山 真一郎、劉 功義	111
6-12	機械学習を用いた倒産予測モデルの研究	片桐 英樹、平井 裕久、松丸 正延	113
6-13	次世代無線通信を支えるマイクロ波・ミリ波・テラヘルツ・光パッシブデバイスの理論設計と応用 (第1報)	陳 春平、武田 重喜、穴田 哲夫	115
6-14	医療従事者用感染対策防護服に関する研究 (1)	傳法谷 郁乃、内田 幸子、岩本 静男	117
6-15	超小型ロケット向け低コスト複合構造の開発	正井 卓馬、高野 敦、喜多村 竜太	118
7. 工学研究所テクノサークル			
7-1	テクノサークル「けんちくをつくる会」2019年度活動報告	吉岡 寛之、林 淳平	121
7-2	テクノサークル KURAFT 2019-20 シーズン報告	山崎 徹、山口 光弘	123
7-3	「神奈川大学宇宙ロケット部」活動報告 (2019)	高野 敦	125
7-4	神奈川大学ロボットプロジェクト活動報告	江上 正、谷村 草太、野中 祐太郎	127
7-5	2020年度ものづくり・電子工作テクノサークル活動報告	土屋 健伸	129
8. 随想			
8-1	神奈川大学における25年の奮闘	新中 新二	131
8-2	「建築デザイン研究室 8-68A」	石田 敏明	136
9. 工学部通信			
1.	研究活動 (2019年10月～2020年9月)		A-1
2.	講演会開催記録 (2019年10月～2020年9月)		A-37
3.	研究分野紹介および2019年度博士論文・修士論文・卒業研究テーマ一覧		A-39
10.	工学研究所 2019年度 (令和元年度) 年次報告		A-59
11. 神奈川大学工学研究執筆規程			
12. 「神奈川大学工学研究」原稿執筆要領			
13. 編集後記			



## 工学部のさらなる発展を目指して

中 尾 陽 一\*

### Towards further developments of Faculty of Engineering

Yohichi NAKAO\*

2020 年は、世界各国が新型コロナウイルスの対応に終始した。工学部においても、すべての教育と研究指導を遠隔環境で実施することになった直後から、教育委員会が中心となって、学部全体での対応策をご議論いただいた。その結果、学部ご関係各位のご尽力により、講義科目に加え実習実験系の科目も、滞りなく遠隔環境で実施されたことは、工学部の大きな成果であったといえる。すべての工学部構成員の皆様に加え、慣れない遠隔授業に対応してくれた学生諸君に心より感謝したい。

遠隔環境で授業を実施するための一連の準備には、多くの時間と教職員の努力を要したわけであるが、その甲斐もあって、我々はネット環境を最大限に活用した新しい教育手法を身につけられた。これは、コロナ禍における大きな副産物といえ、今後の教育に活かしたいものである。

さて、最近の技術動向に目を向けてみたい。日本政府によって、未来社会のコンセプトとして提唱された **Society 5.0** は、経済発展と社会的課題の解決をイノベーションによって実現し、新たな未来の創造を目指すものである。具体的には、人工知能、ロボット、IoT、ビッグデータなどに代表される先端技術を産業や社会生活に取り入れ、経済発展と社会的課題の解決を成し遂げようとするものである。いうまでもなく、**Society 5.0** の実現に求められる先端技術のほぼすべては、われわれ工学部が研究対象にできる。

最近、話題となっている技術動向には、環境・エネルギー問題、さらにこれに関連して大きな産業構造変革が予測されるガソリン車から電気自動車への転換もある。英国が 2030 年までにガソリン車、ディーゼル車の新車販売を禁じるというニュースは、今後の電気自動車への転換を強く象徴づける出来事であった。また、電気自動車の普及によって、2050 年には電力需要が倍加するとの予測もある一方、SDGs にも直結する持続可能な発展、環境問題への対応、あるいはカーボンゼロの実現にむけて、再生可能エネルギーの拡大と普及がこれまで以上に求められる状況にある。また、エネルギー創出と併にエネルギー消費の削減、エネルギーの有効利用と分配などに必要な新技術創出も必要になる。

以上のような技術開発には、広範な分野における研究の取り組み

が必要であり、工学部の貢献が期待される場所である。特に、新技術創出には、異分野協働をこれまで以上に推し進めることが肝要に思われる。幸いにも、工学部は各分野の有能多彩なスタッフを擁している。未来の社会形成に貢献しうる学部一体となった研究活動が求められるように思う。工学部、工学研究所への期待は大きい。本誌「工学研究」に寄せて、社会貢献に直結する研究推進を工学部一丸で実現したい希望を述べさせていただいた。

さて、教育についても一言申し述べさせていただく。工学部でも重要なミッションは、研究成果に裏打ちされた教育を学生に提供し、学生の満足を得ることである。その結果として、実学である工学各分野の基礎教育を受けた人材を社会、産業界に輩出し、その人材が各分野で活躍することをもって、教育機関としての社会貢献をなすことである。

しばしば経験するように、必ずしもすべての学生が学業に積極的とはいえない。しかしながら、学生を学業に向かわせる知的刺激を与えられるかどうかは、我々教員の腕の見せ所ともいえる。しかしながら、まさに言うは易く行うは難し、私の場合、思うようにはならず挫折の日々が続いている。教育の難しさは、研究活動とは異なり、その成果が表れにくいことが一要因と思うが、教育への取り組みを諦めることは、最も重要なミッションを放棄することに他ならない。我々の活動が学生からの学費納付金で支えられていることを、自ら思い出しては、学生と接するように心がけている。

全国で工学部を志願する受験生は増加傾向にある。さらに、**Society 5.0** などにも代表されるように、未来の適正な社会構築に繋がる先端技術開発には高い期待があり、これを担う工学教育を受けた優秀な人材が社会の各分野で求められている。つまり工学部は、研究と教育の両面でその活動成果が期待されている。

多くの学生にとって工学の専門分野を学ぶことは容易ではない。教員が学生に工学教育を授けることもまた然りである。新型コロナウイルスへの対応を強いられて、われわれは様々なデジタルツールによる教育手法を身につけた。これらを活用すれば、在来教育方法に革新的な変革をもたらせる可能性がある。ポストコロナになって、非常事態時に身につけた授業実施手法を学生の学習意欲を喚起するように、学生の学修時間を増やすように、最大限にこれを活用して教育効果向上に利用するべく、工学部構成員が知恵を出し合い、これを実践してはどうだろうか。在来教育方法に完全回帰することは避けたいものである。

---

\*工学部長、教授 機械工学科  
Dean of Faculty of Engineering,  
Professor, Dept. of Mechanical Engineering





## 2. 新任者の研究紹介

2-1	マスカスタマイゼーションに対応した次世代生産・受注システムの開発 ―工作機械を例に―	赤坂 信悟、翁 嘉華
2-2	特異な生物活性を示す新規生物活性天然物 Minnamide A の単離と構造決定	澄本 慎平
2-3	Performance Analysis for Lossy-Forwarding Relaying in Nakagami-m Fading Channels	Shen Qian
2-4	Co-W シアノ架橋配位高分子磁性体における湿度誘起構造および磁気相転移	織作 恵子
2-5	可積分ハミルトン力学系とその摂動問題	伊藤 秀一
2-6	固有振動数成分除去法による天井走行クレーンの制振	栗原 海
2-7	温度差表面張力流と流れの可視化に関する微小重力実験	矢野 大志
2-8	経路最適化問題と解法アルゴリズムの研究	李 嘉誠
2-9	ナビエ・ストークス方程式の幾何的正則性判定法及び双曲型流数値計算	許 本源
2-10	宇宙線ミューオンによる地震断層の透視	池田 大輔
2-11	銀河系中心領域における中間質量ブラックホール候補の発見	竹川 俊也





# マスカスタマイゼーションに対応した次世代生産・受注システムの開発

## -工作機械を例に-

赤坂 信悟\*      翁 嘉華\*\*

### Production and management methodologies for mass customization

#### -A Case Study on Machine Tools-

Shingo AKASAKA \*      Jiahua WENG \*\*

#### 1. はじめに

グローバル競争時代を生き抜くために、企業は、国内外の顧客を対象に、新しい付加価値を創造すると共に、個々の顧客のニーズに合わせた製品・サービスを提供する必要がある。

一方、少子高齢化や雇用形態の変化により、企業は自動設備の導入や、様々な形での技術者の受け入れが余儀なくされ、異なる能力を持つリソースを運用し生産活動をしなければならない。さらに、「一人一人のニーズに合わせる形で社会的課題を解決する新たな社会を作る為に」[1]、企業は ICT, IoT などあらゆる技術を活用し、サプライチェーン上の協力他社だけでなく、同業他社とも連携し、顧客・地域・社会に貢献しなければならない。このため、熟練者技能のデジタル化や WIN-WIN の関係を築ける取引交渉仕組みの開発など、「スマートモノづくり」も大切になる。

したがって、筆者らの研究グループは、マスカスタマイゼーションでも高いサービス及び生産性を維持できる新しい生産方式の開発や、グローバル生産・販売・流通マネジメントシステムの構築とその効率的な運営方法などの研究を行っている。今回は、個別仕様受注生産を対象に行って来た研究成果の一部を報告する。

#### 2. 個別仕様受注 (ETO) 生産のための新生産方式

工作機械等の受注設計 (Engineer-to-Order, 以下 ETO) 生産における受注方式を対象とする。工作機械等の生産設備は顧客の使用環境に合わせて製品の機能や性能値を選択する必要があり、機能・性能値の組合せが莫大な数になる。このため、予め設定された製品品種ではなく、顧客の用途に合わせて機能ごとの性能値を設定して受注仕様とする。

また、需要 (注文) は顧客企業の設備導入計画を受けた形で、景気の動向が把握できる直前になって発生するために、短期間の生

産・納品が求められる。一方、生産期間が顧客から要求される期間より長い場合、予め部品を用意しておき、準備した部品を使って受注し生産を行っている。

上記の ETO 企業が、生産能力に対して十分な需要 (注文の引合) があるにも関わらず、十分な量の注文がとれていないことに着目し、受注率の向上を目指した新生産方式 (営業支援方式) を提供することを目的とする。

#### 2.1 新生産方式の概要

ETO 企業を対象に調査した結果、目標とする注文がとれない理由は、大きく 2 つ挙げられる。

第一に、ETO 企業が引き合いを受けてから受注仕様と納期を提案するまでに時間がかかりすぎる。通常、営業部門が顧客から希望を聞き、その情報を設計部門に伝達し、更に設計部門から提供される部品などの情報を基に、生産部門が生産負荷や部品在庫を確認するといったように、多部門に渡って見積を行う必要があるため、場合によって 10 週間も要する場合がある。その他、設計段階になって必要な情報に不備があった場合や、顧客の要求が技術上に矛盾があることが判明した場合など、再度営業スタッフが顧客に確認をするような手戻りも多発している。したがって、結果的に顧客の要求納期に製品を提供できなく、失注になってしまう。

第二に、営業スタッフが顧客との商談中に、その場に製品仕様・納期の代案を提示することが出来ていないことが挙げられる。実は、受注仕様を提案する際には、顧客の要求を満たす仕様は複数存在するが、現状では設計者が経験または直近の設計案から最小手間で設計できるように、単一の受注仕様のみを設計している。このため、部品が存在し生産可能な受注仕様があったとしてもこれに気付かず要望を満たす仕様案の提示が出来ない。さらに、注文 (引合) 毎、到着順に、個別に部品在庫の引当を行い受注案件とするため、部品在庫の利用効率の向上を考えた注文の選択ができていない[2][3]。

以上の問題点を解決するために、本研究では、顧客ニーズの把握から受注仕様・納期の見積までを、営業スタッフが顧客と対面しながら

\*助教 経営工学科

Assistant Professor, Dept. of Industrial Engineering and Management

\*\*准教授 経営工学科

Associate Professor, Dept. of Industrial Engineering and Management

ら、その場で、迅速に見積を行えるように、受注プロセスを改善し、営業支援方式を開発した。その基本コンセプトを図1に示す。

まず、受注プロセスのリードタイムを長大化させている最大の原因である、多部署の分業で行っている見積作業を、営業スタッフのみで1週間以内に完了できるようにする。これを実現するために、従来、不正確な顧客ニーズの把握により手戻りを無くす必要がある。さらに、手作業で時間をかけて行っていた受注仕様設計作業を、営業が顧客との対話の現場で、要求内容に応じて迅速に受注仕様を決定できるようにする必要がある。

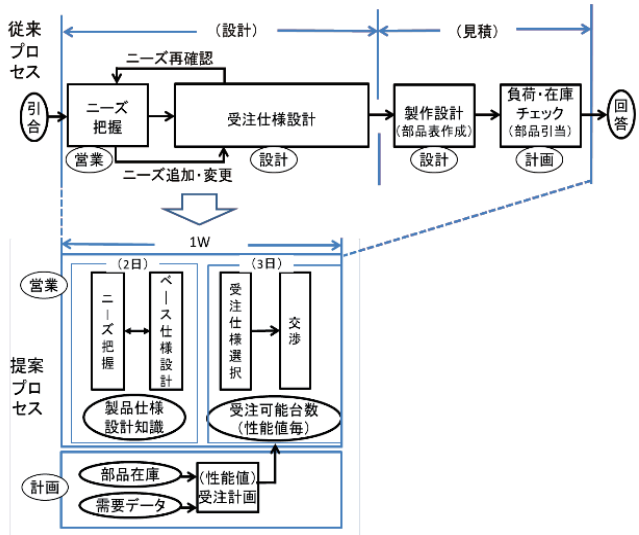


図1 受注プロセスの改善

したがって、本研究はまず、顧客の要求仕様を受注製品仕様が決出来る詳細度で、かつ漏れなく顧客ニーズ(用途)仕様を体系化し仕様項目として設計する。次に、用途仕様を製品仕様に変換する設計知識を仕様間の関係規則(制約ネットワーク)として抽出し体系化する。さらに、用途仕様値を入力として、適合する機能仕様値を設定する受注仕様の設計作業の自動化(ロジック開発)を行なう。その詳細を次節に示す。

次に、受注仕様案を複数案提示できるように、受注可能枠(部品在庫の効率の利用を考えた)を事前に計画し、前記の自動システムによって設計された製品仕様ベース案を基に、受注可能枠を参照しながら受注見積(提案を含む)を提示する。

これを実現するためには、本研究はまず、受注座席を用いた見積作業方法の全体設計を行なう。次に、需要(注文)の仮データ設定方法を設計する。さらに、受注座席数を自動的に計画するロジック開発する。それらの詳細を2.3節に示す。

前記のコンテンツで構成される新方式によって顧客への見積が迅速・正確にでき、且つその場で複数の提案を提示でき、受注率の向上に寄与できると考えられる。したがって、その効果検証も2.3節に記す。

2.2 製品仕様ベース提案の自動生成

前節に示した方式について、図2に示すような穴明加工機を事例として開発を行った[4][5][6][7]。穴明加工機とは加工対象のワークをテーブル上に設置しておきNCデータにより穴明位置を指定す

ることにより、テーブルをX軸・Y軸方向に移動し、ドリルが装着された主軸をZ軸方向に下降し、ワークに穴明加工を行う機械である。穴明加工機は、加工範囲、加工速度といった機能によって製品が表される機能型製品である。

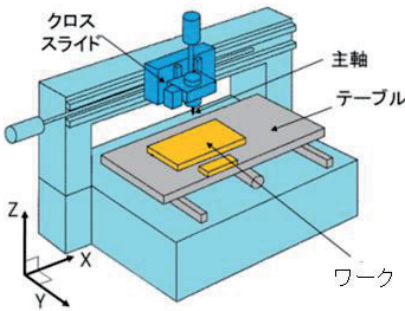


図2 穴明加工機(イメージ図)

2.2.1 顧客用途仕様の提案

顧客ニーズ(用途仕様)の設計では、まず、対象製品領域(切削加工機械)に関するニーズ情報を抽象化しておき、5W1Hの観点からのカテゴリ化を行った。そして、カテゴリ毎のニーズ情報と機能仕様項目とを突合せ、必要十分性を確認しながら用途仕様を定義する手順で体系化を行った。その結果、穴明加工機の場合、8カテゴリ24項目の用途仕様を定義することができた。製品機能仕様との対応性が確認でき、機能・性能値の設計に必要な情報を漏れがなく表現できることを確認した。また、後述する用途仕様と製品機能仕様との対応関係等を考慮して、各用途仕様に対して実現可能な範囲(最小値と最大値)を設定し、実現不可能な用途仕様値を最初に検出できるようにした。表1に用途仕様項目の設計結果を示す。

表1 用途仕様項目の設計

用途仕様項目の分類		用途仕様項目	単位	項目値の範囲
what	入力	ワークの寸法(X)	mm	30~550
		ワークの寸法(Y)	mm	30~550
		ワークの寸法(Z)	mm	0.4~3.6
	出力	穴径	mm	0.3~5.0
		穴の数	個	50~10,000
		穴の位置	-	-
where	稼働環境	内壁粗さ	μm	5~25
		加工精度	μm	0.15~0.4
		電源電圧	V	100~480
		電源周波数	Hz	50~60
	設置環境	気温	°C	15~25
		湿度	%	40~60
		設置場所寸法(X)	mm	2,000~2,500
		設置場所寸法(Y)	mm	1,200~4,200
	搬入環境	設置場所寸法(Z)	mm	1,500~2,000
		床耐圧	kg/m <sup>2</sup>	500~2,000
		搬入可能な横幅	mm	1,200~2,500
		搬入可能な高さ	mm	1,500~2,000
how	生産性	月間の生産枚数	枚	10,000~25,000
		基板重ね加工枚数	枚	1~5
	コスト	稼働シフト	直	1~3
		購入価格	円	-
when	納期	ランニングコスト	円	54,000~82,000
		納期	-	-

2.2.2 顧客用途仕様と製品仕様との関係整理

機能仕様の設計知識は、用途仕様と製品機能仕様の対応関係を仕様項目間の関係規則(制約)を用いて表現する制約ネットワーク形式により体系化した。具体的な制約は、切削理論などの技術情報



を参照に制約式の形を決定した。工作機械のような機能型製品においては機能・性能の上位互換が成り立つ為、制約式の表現形式は全て「不等式」とした。図3に用途仕様と製品仕様との関係例を示す。穴明加工機では、3タイプ22種類の制約式を抽出することができた。22種類のうち5種類の制約式は、複数の用途仕様値によって複数の製品機能仕様値が決まるタイプである。さらに、複数の制約式によって値が決まる製品機能仕様項目が存在しており、仕様値の決定を複雑にしている。

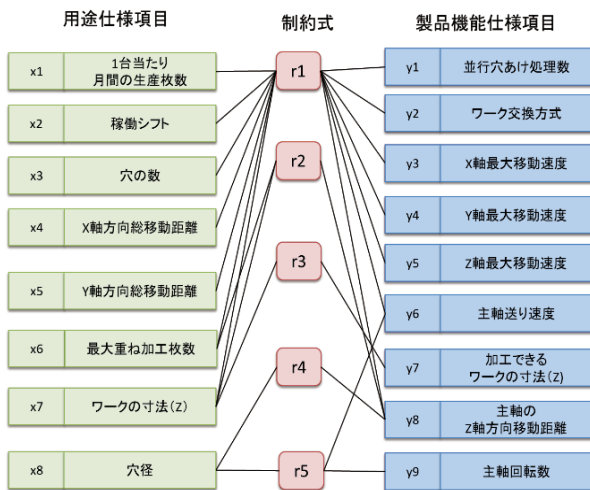


図3 用途仕様と製品仕様との関係例  
(制約ネットワーク表現)

例えば図3のr1制約式は、加工サイクル時間は機能仕様から求められるサイクル時間より短い必要があることを示す（式(1)）。

$$\frac{9600}{x_1} \times \frac{x_2 x_6 y_1}{x_3} - y_2 \geq x_3 \times \left( \frac{2y_8 - x_6 x_7}{y_5} + \frac{x_6 x_7}{y_6} \right) + \frac{x_4}{y_3} + \frac{x_5}{y_4} \quad (1)$$

### 2.2.3 バックトラック法を用いたベース製品仕様の自動生成

製品ベース仕様自動設計の概要を図4に示す。

設計処理システムは入力された用途仕様項目の値に対して、制約関係規則の矛盾の有無をチェックする。その際に、用意できる機能仕様の最良（大）値を用いて判定を行なう。最良（大）値でも対応できない場合に、顧客へ用途仕様項目の値を変更するアドバイスを行なう[8]。

受注仕様の仕様値決定の自動化アルゴリズムは、前述の「機能・性能の上位互換性」を前提に、顧客の要求を満足する最も廉価な仕様（低い性能値の仕様）をベース仕様として出力可能な方式とした。入力された用途仕様値に対して、機能仕様項目を順次に、性能が低い仕様値から制約式を満たせるか深さ優先探索にて解を求める。なお、目的関数は、最下位性能値との乖離距離の最小化とした。得られた初期解に対して、バックトラック方式による解の改善探索を行うことにより、最廉価仕様をベース仕様として探索できる。さらに、処理時間を短縮する為に、制約式との関連度の高い仕様項目順に値の探索を行なうようにし、仕様項目のチェック回数を少なくする工夫をした。1.2×10<sup>7</sup>通りの解候補がある工作機械の事例では、解が数秒で算出可能なことを確認した。図5に仕様決定アルゴリズムの

概要を示す。

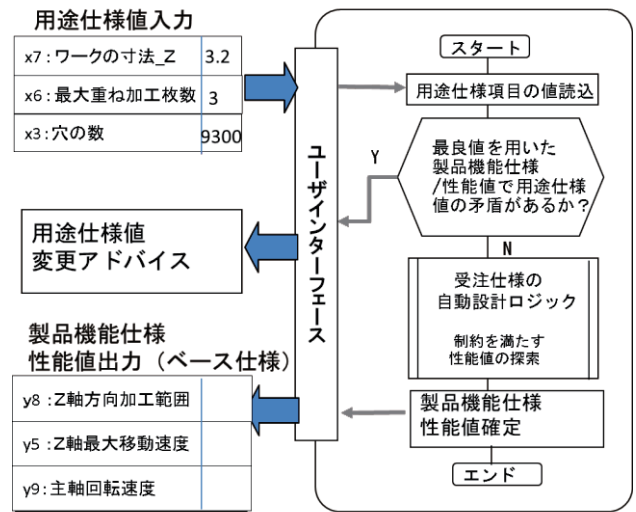


図4 受注仕様の設計処理の概要

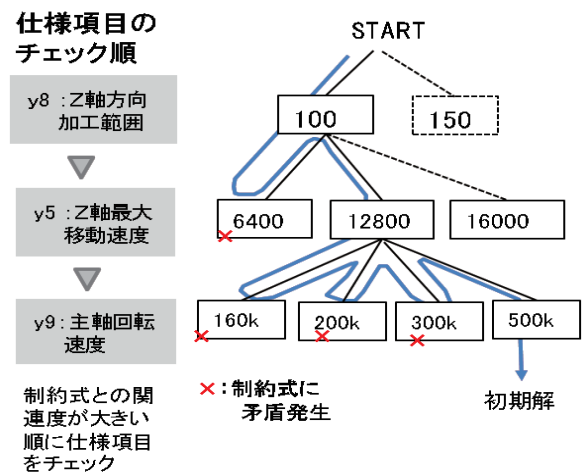


図5 仕様値決定アルゴリズムの概要

### 2.3 ベース仕様を用いた見積提案

#### 2.3.1 座席方式を用いた受注見積システムの概要

受注見積に関して、見積業務の全体設計を行った。その際に、列車・飛行機の切符予約システムと同じ考え方で、提供可能な製品について受注座席を作成した。ただし、対象製品の仕様が何は数百万通りにもあり得るため、製品単位の代わりに、長期・短期の需要予測から得られる需要台数と製品機能仕様・性能値毎の比率に基づき、機能仕様・性能値毎の目標生産台数を受注座席として設定する。次に、直近の疑似注文を想定し受注座席の補正を行なう。さらに、受注座席に対して在庫部品の配分（保証）を事前に行なっておく。以上により計画された受注座席を参照し、前述の受注仕様設計システムにより得られる受注仕様をベースに、複数の仕様・納期案が提示できる受注見積の枠組みを設計した[9][10][11]。図6に受注見積の概要を示す。

ベース受注仕様およびニーズ把握段階で明らかになる顧客の要求納期情報に基づき、受注予約枠への引き当てにより、複数仕様・

納期の検討を行い受注仕様を選択する。選択された複数の仕様に関して顧客と交渉し、受注仕様・納期を迅速に決めることができるようになる。

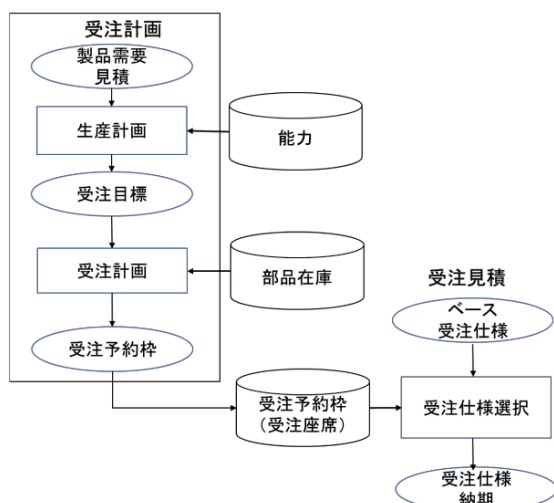


図6 見積提案の枠組み

図7に受注予約枠を用いた受注仕様交渉の例を示す。受注予約枠により、納期・仕様の一覧が分かるので、例えば、ベース受注仕様 X 軸移動範囲 600、X 軸移動速度 6400 が希望納期 t 期になかった場合、代案として納期をずらした案2、X 軸移動速度 6400 の代わりに上位機能である 12800 を使う案3などの複数案を取り入れた交渉を行うことができる。

機能仕様項目	性能値	受注可能台数(台)		
		t期	t+1期	...
X軸移動速度	16000	10	5	...
	12800	3	10	...
	6400	0	8	...
X軸移動範囲	700	8	5	...
	600	7	10	...
	500	5	10	...
...	...	...	...	...

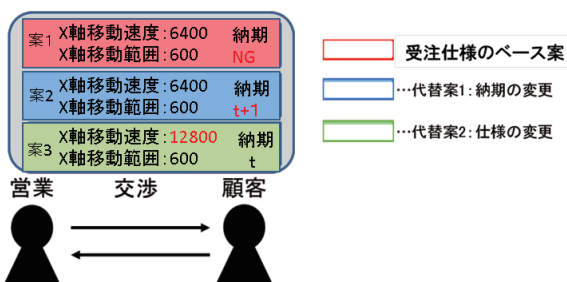


図7 受注予約枠を用いた受注仕様交渉の例

### 2.3.2 受注目標と受注可能枠の設定

受注座席（目標）に対して部品在庫を保証する受注座席の設定アルゴリズムを開発した。機能仕様・性能値区分毎に設定された目標台数に対して利用可能な部品在庫を配分し、目標受注台数に最も近い受注可能台数を設定する。対象である受注可能台数は整数の決定変数である為、整数計画法を用いることにした[12][13]。

図8に整数計画法を用いた機能仕様値毎の受注可能台数の最大化の概要を示す。需要予測値として与えられる機能仕様項目・性能値の比率を用いて、機能仕様-部品の対応関係から得られる部品所要量

と部品在庫数との関係を示す制約式を用いて受注可能台数を最大化する。

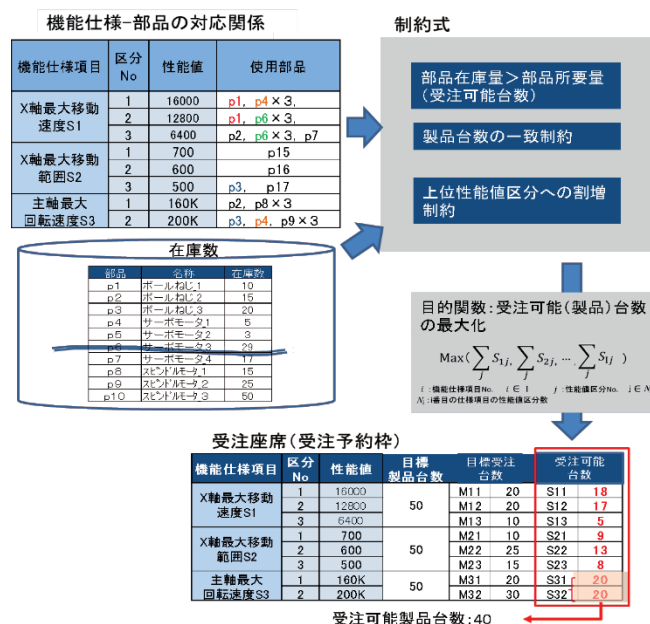


図8 整数計画法を用いた受注可能台数の最大化

提案の計画アルゴリズムの結果と、不足部品を利用する機能仕様値を特定し受注座席数を減らす方法とを比較し、受注座席数を10%程度増やせることを確認した。さらに、実製品の需要データを参考に、誤差を伴う注文データを発生させた受失注シミュレーションを行った。受注座席を用いて受注仕様・納期を見積る提案方式と、従来方式（受注座席を用いずに注文の到着順に逐次部品引当を行う）との比較を行い、受注率が30%程度向上可能なことを確認した（図9）。なお、受注座席を用いた受失注判定には、1) ベース仕様に固定し性能値区分単位で予約枠に引当てるケース（予約枠に受注可能台数があれば受注となる）2) ベース仕様に加え上位性能値区分も引き当ての対象とする2ケースを評価した。

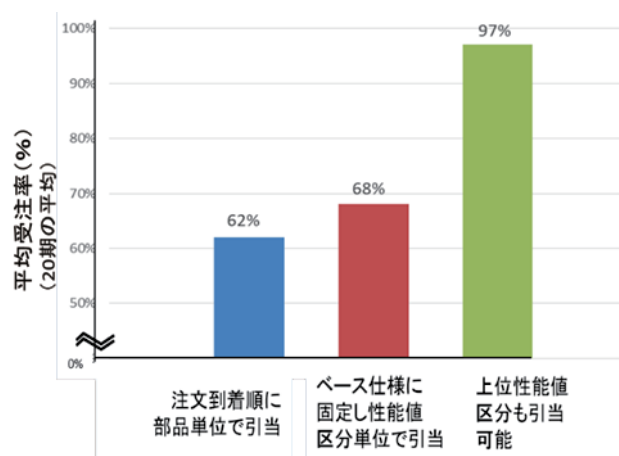


図9 受注予約枠を用いた受注率向上効果

注文到着順に部品単位で引当（現状に相当）とベース仕様に固定し性能値区分単位で予約枠を引当とでは、約6%の受注率差異が

ある。これは受注予約枠を計画する際に、予め想定される注文を予測して必要な部品を確保した効果（注文の選択による効果）と考えられる。また、上位性能値区分も引当可能にした場合とベース仕様で固定した引当の差は 29%あるが、これは複数仕様の選択が出来ることによる受注率向上効果である。

## 2.4 新生産方式の纏めと今後の課題

提案した新生産方式を活用することにより、営業が顧客との商談中に用途仕様を確認しながら受注仕様案を作成することができ、提案時間が大幅に短縮可能である。従来対応できなかった短納期引合に対応できるようになり、さらに、在庫部品の活用効率を上げることで 3 割程度の受注率向上が見込まれる。受注プロセスリードタイムの短縮と部品の活用効率向上の効果を合計すると受注率の倍増が期待できる。

本研究では、受注製品仕様提案における「仕様」「納期」を対象に検討を進めたが、今後は、さらに「コスト/価格」を評価の要因に取り上げ、製品コストと製品機能仕様の関係モデルに基づいた、利益最大化が図れる受注方式への拡張を図る。

## 3. おわりに

今回は、個別仕様受注生産を対象に行った研究の一例を簡単に紹介した。今後も 2.4 節で述べた課題の解決と共に、開発した諸仕組みが工作機械以外の業界で適用できるかの検証を行う予定である。

それと同時に、企業が様々な地域・国に事業を展開していることを考え、消費者動向や雇用環境等の変化、為替や関税など政策の変化、さらにはコロナショックで顕著に表れるように、サプライチェーン寸断リスクなどを分析した上で、生産・販売体制の見直しや収益計画の立案をサポートできる仕組みの開発も行っている[14][15]。また、サプライチェーン全体の価値を高めるために、社内外の組織間の情報共有や取引価格決定の仕方[16][17]なども研究としている。それらについて、また別の機会で紹介ができればと思う。

## 参考文献

- [1] 「Society 5.0 とは」、内閣府ホームページ、<https://www8.cao.go.jp/cstp/panhu/csti2017/p7-8.pdf> (2020.12.20 アクセス)
- [2] Hicks, C. and Braiden, P.M.: “Computer-aided production management issues in the engineer-to-order production of complex capital goods explored using a simulation approach”, *International Journal of Production Research*, Vol.38, No.18, pp.4783-4810 (2000)
- [3] Weng, J. Akasaka, S. Hoshino, A. Onari, H.:” A Study on Value Setting of Product Functional Specifications with Consideration of Parts and Inventory Costs for Engineer-to-Order Production”, *Asian Journal of Management Science and Applications*, Vol.2, No.1, pp.33-47 (2015)
- [4] 赤坂信悟, 翁嘉華, 大成尚: “ETO 生産における製品機能モデルに関する研究”, *日本経営工学会論文誌*, Vol.66, No.1, pp.59-66 (2015)
- [5] Weng, J. Akasaka, S. Onari, H.:” Acquiring Orders using Requirement Specifications for Engineer-to-Order Production”, *Journal of Japan Industrial Management Association*, Vol.64, No.4E, pp.620-627(2014)
- [6] Akasaka, S. Weng, J. Onari, H.:” Product Functional Structure Model for Engineer-to-Order Production: A Case study on Drilling Machines”, *Journal of Japan Industrial Management Association*, Vol.66, No.4E, pp.443-447 (2016)
- [7] 福村莉慶, 翁嘉華, 赤坂信悟, 大成尚: “ドリル式穴明け加工機の個別受注仕様の決定に用いる製品機能構造モデルの設計”, *日本経営工学会春季大会予稿集*, Vol.2014, pp.32-33 (2014)
- [8] 翁嘉華, 大久保寛基, 赤坂信悟, : “生産座席方式に用いる製品グループ設定に関する研究”, *生産管理*, Vol.20, No.2, pp.19-28 (2014)
- [9] 翁嘉華, 赤坂信悟: “部品仕込製品受注生産における生産座席を用いた受注方法の提案”, *日本生産管理学会第 45 回全国大会* (2017)
- [10] Weng, J. Akasaka, S. Onari, H.:”A Study on Production Seat Planning for Make-to-Order Production with Make-to-Stock Parts”, *Proceedings of the 12th International Conference of Decision Sciences Institute and the 18th Annual Conference of Asia-Pacific Decision Sciences Institute*, pp. 668-674 (2013)
- [11] 下田篤, 小杉秀則, 狩野隆文, 薦田憲久: “製品の仕様代替性と部品消費バランスを考慮した受注生産製品の推奨方式”, *電気学会論文誌 C*, Vol.130, No.5, pp.895-902, (2010)
- [12] 今野 浩: 「線形計画法」, 日科技連出版社 (1987)
- [13] 山下洋史, 諸上茂登, 村田潔, グローバル SCM サプライチェーン・マネジメントの新しい潮流, 有斐閣 (2003)
- [14] 翁嘉華, 黄茜, “海運による物流を考慮したグローバル生産計画に関する研究”, *日本生産管理学会第 45 回全国大会*, *日本生産管理学会第 45 回全国大会論文集*, Vol.2017, pp.297-300, (2017)
- [15] Q. Huang, J. Weng, W. Li and H. Onari: *Global Production Planning Considering Marine Transportation Factors*, *日本経営工学会論文誌*, Vol. 69, No. 2E (2018)
- [16] S. Wu, J. Weng and S. Ryu, “A Study on Coordinated Trading System for Product Sales of Consumer Electronics Manufacturers”, *Proceedings of the 20th Asia Pacific Industrial Engineering and Management Systems Conference* (2019)
- [17] S. Wu, S. Ryu and J. Weng, “Proposal of Coordinated Trading System for Eliminating Double Marginalization”, *Proceedings of the 2019 INFORMS Annual Meeting* (2019)



# 特異な生物活性を示す新規生物活性天然物 Minnamide A の単離と構造決定

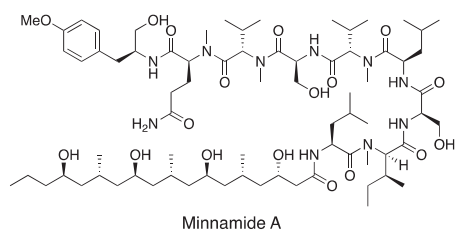
澄本 慎平\*

## Isolation and structure determination of minnamide A which has unique biological activity

Shimpei SUMIMOTO\*

### 1. 緒言

微生物の生産する二次代謝産物は多彩な生物活性を示すことで知られている。このため、微生物から発見される天然物(二次代謝産物)をもとにした医薬品や農薬の開発が行われている。酸素発生型光合成を行う原核生物であるシアノバクテリアは約 25 億年も昔から存在しており<sup>(1)</sup>、長い年月をかけて様々な環境に適応していった。このため、シアノバクテリアは海水や淡水、温泉、砂漠、南極、高塩分、強アルカリといった幅広い環境に生育しており、極めて多様性の高い微生物である。しかしながら、近年でも新たな属や種が多数報告され続けており、その多様性の全貌は未だ明らかとなっていない<sup>(2-4)</sup>。我々の研究グループは、近年新たに報告された属であり二次代謝産物生産能が高いことが知られている *Okeania* や *Moorea*、*Dapis* を主な対象として新規生物活性物質の探索を行ってきた<sup>(5-7)</sup>。本報では、特異な化学構造と生物活性を有する minnamide A の構造決定と生物活性について紹介する。



### 2. Minnamide A の単離と構造決定

沖縄県水納島にて採集した *Okeania hirsuta* に対してメタノールによる抽出を行った。得られたメタノール抽出物より、ヒト子宮頸がん由来の HeLa 細胞に対する増殖阻害活性を指標として有用天然物の探索を行ったところ、新規生物活性物質である minnamide A が得られた<sup>(7)</sup>。

Minnamide A の平面構造は各種 NMR スペクトルを解析することで行った。COSY および TOCSY スペクトルにより明らかとなった部分構造を HMBC および ROESY スペクトルで確認された相関をもとに連結したところ、minnamide A の平面構造が図 1 のように明ら

かになった。Minnamide A は水酸基と  $\beta$ -branch 型メチル基の繰り返し構造からなる脂肪酸を有する直鎖リポペプチドであり、この繰り返し構造は天然物としては初の報告であった。

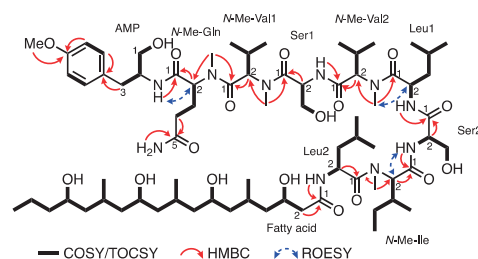


図 1. Minnamide A の平面構造

次に、minnamide A の酸加水分解を行い、得られたアミノ酸をキラルカラム HPLC 分析もしくは Marfey 法<sup>(8)</sup>による分析を行うことで構成アミノ酸の立体化学を決定した。脂肪酸部位に含まれる 4 つの水酸基の立体化学は改良 Mosher 法<sup>(9)</sup>によって決定した。初めに、minnamide A を塩酸で処理することで部分酸加水分解物 1 と 2 へと誘導し、得られた 1 に対して 0.4 mol 等量の (*R*)-MTPA chloride もしくは (*S*)-MTPA chloride を作用させることで 8 種類のモノ MTPA エステルへ 3a-6b と誘導した(図 2)。得られた MTPA エステルの化学

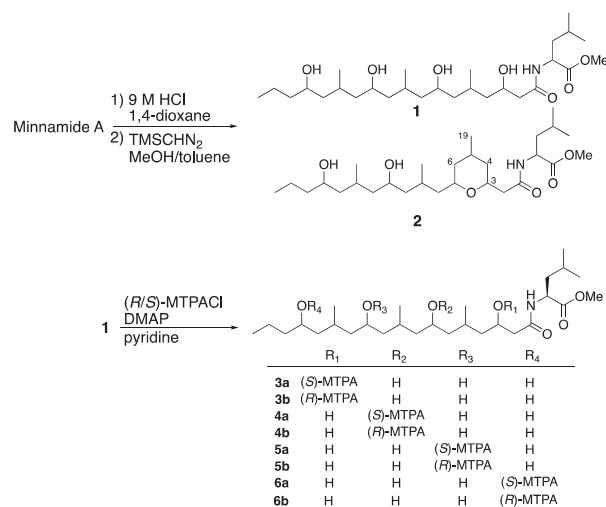


図 2. Minnamide A の酸加水分解と MTPA エステル体の調整

\*助教 物質生命化学科

Assistant Professor, Dept. of Material and Life Chemistry

シフトを比較した結果、C3、C7、C11、C15 の周辺において  $\Delta\delta$  ( $\delta_S - \delta_R$ ) 値の正負が分かれたため、脂肪酸部位に含まれる 4 つの水酸基の絶対立体配置は 3*S*、7*R*、11*R*、15*R* であると決定した (図 3)。

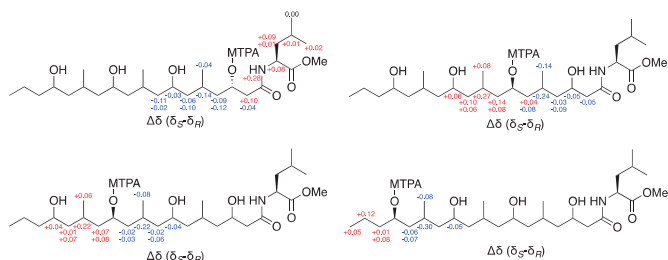


図 3. 調整した MTPA エステル体への改良 Mosher 法の適用

Minnamide A の酸加水分解により得られた環状エーテル **2** の相対立体配置を決定することで脂肪酸 C5 位の立体化学を決定した。環状エーテル **2** はカルボニル基の  $\beta$  位の水酸基が脱水し、引き続きオキシマイケル付加により生成されたものと考えられた。相対立体配置は NOESY の相関と結合定数により決定した (図 4)。はじめに、得られた NOESY の相関 (H-3/H-19、H-19/H-6b、H-4a/H-7) によりエーテル環に存在する 3 つの水素 (H-3、H-19、H-6b) と 2 つの水素 (H-4a、H-7) がそれぞれ同じ面に配置することが示された。また、結合定数 ( $J_{H5-H6a} = 11.0$  Hz、 $J_{H4a-H5} = 3.0$  Hz) と NOESY の相関 (H-4a、H-7) により H-5 と H-6a はシンペリプラナーの関係にあることが判明した。これらの結果をまとめると、**2** に含まれるエーテル環は「ねじれ舟形」の立体配座であり、相対立体配置を図 4 の通りに決定した。このため、先に決定した C7 位の立体化学に基づき、C5 位の絶対立体配置を *S* と決定した。

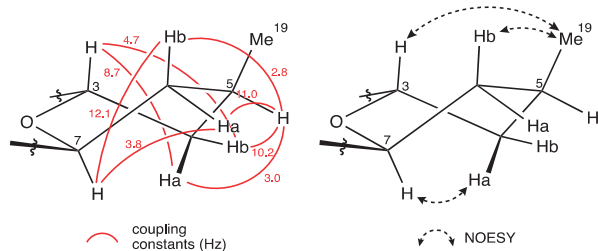


図 4. 環状エーテル **5** におけるエーテル環部位の相対立体配置

続いて、**1** のモノメシル化を行い、単離したメシル体 **7** を環化することで環状エーテル **8** を合成し、先ほどと同様に NOESY の相関と結合定数によりエーテル環部の相対立体配置を決定した (図 5)。大きな値の結合定数 ( $J_{H11-H12b} = 12.1$  Hz、 $J_{H12b-H13} = 12.1$  Hz、 $J_{H13-H14b} = 12.3$  Hz) と NOESY の相関 (H-11/H-13、H-12b/H-14b) により H-11 と H-12b、H-13、H-14b がアキシアルに位置することが示された。このことから、**8** に含まれるエーテル環の相対立体配置を図 5 の通りに決定した。環状エーテル **8** の生成には C15 の立体配置反転を伴うことから、C11 位の絶対立体配置を *S* と決定した。

### 3. 化学合成的手法による立体化学の決定

残る脂肪酸 C9 位の立体化学は天然物誘導体から決定することが困難であったため、minnamide A の酸加水分解物 **1** を MOM 保護

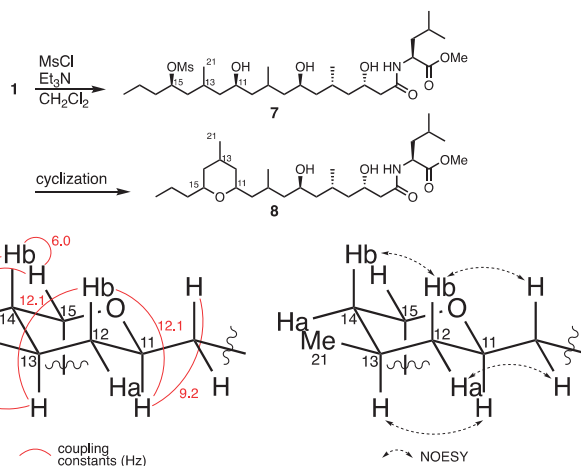


図 5. 環状エーテル **8** の合成とエーテル環部位の相対立体配置

体 **9** へと誘導し (図 6)、予想される 2 つの立体異性体 (9*R*)-**9** と (9*S*)-**9** を合成し、NMR データを比較することとした。

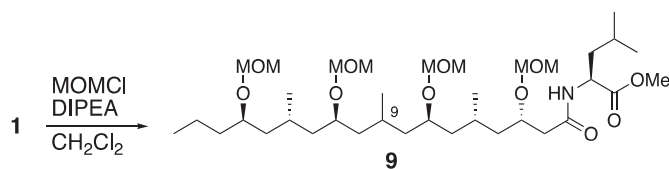


図 6. MOM 保護体 **9** の合成

既知の方法で調整した  $\alpha,\beta$ -不飽和ラクトン **10**<sup>(10)</sup> に対してギルマン試薬を作用させることで立体選択的なメチル化を行いラクトン **11** を得た。ラクトン **11** を Weinreb アミドへと誘導した後に MOM 保護を行い、Weinreb アミドを還元することでアルデヒド **13** を合成した。Brown のアリル化<sup>(11)</sup>によりホモアリルアルコール **14** (ジアステレオマー比 7.4:1) を合成した。ホモアリルアルコール **14** を塩化アクリロイルによりアシル化し、閉環メタセシスを行うことで  $\alpha,\beta$ -不飽和ラクトン **15** を得た。 $\alpha,\beta$ -不飽和ラクトン **15** は同様の手法で立体選択的なメチル化、Weinreb アミド化、MOM 保護を行い Weinreb アミド **16a** へ変換した。

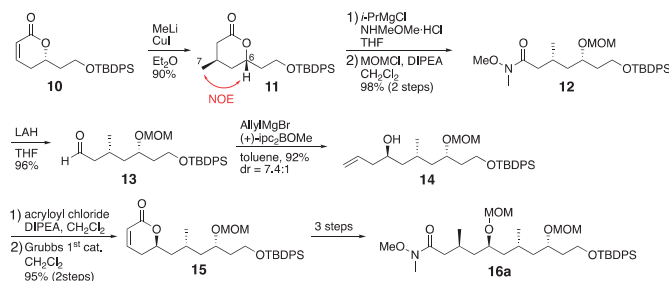


図 7. 立体選択的な Weinreb アミド **16a** の合成

既知の方法で調整したチアゾリジン **17**<sup>(12)</sup> にアルデヒド **13** を作用させることでアミド **18** が単一の異性体として得られた。アミド **18** を Weinreb アミドへと変換し、MeMgBr を作用させることで  $\beta$ -ヒドロキシケトン **19** を得た。 $\beta$ -ヒドロキシケトン **19** のプロモアセチル

化と引き続く Michaelis-Arvuzov 反応によりホスホン酸エステル **20** を合成し、分子内 Horner-Wadsworth-Emmons 反応を行うことで  $\alpha,\beta$ -不飽和ラクトン **21** を得た。 $\alpha,\beta$ -不飽和ラクトン **21** に対して水素添加を行うことで立体選択的にラクトン **22** を合成した。ラクトン **22** を Weinreb アミド化、MOM 保護を行い Weinreb アミド **16b** へ変換した。

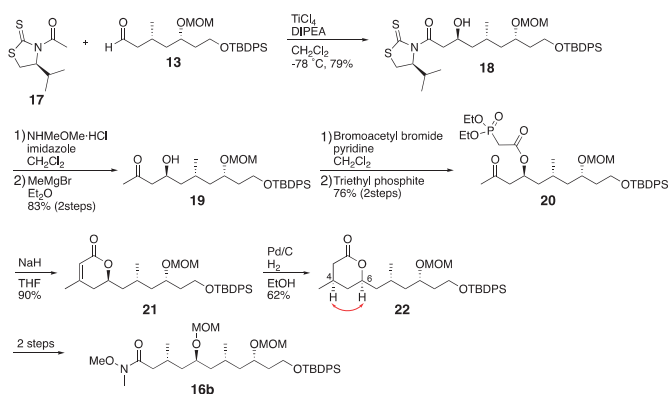


図 7. 立体選択的な Weinreb アミド **16a** の合成

(*R*)-ロシェエステルより合成した臭化物 **23** を *t*-BuLi で処理し Weinreb アミド **16a** と作用させることで得られたケトン還元し、HPLC にて分離することでアルコール **24a** と **24b** を得た。アルコール **24a** の PMB 基の除去、MOM 保護、TBDPS 基の除去を行いアルコール **25** を得た。アルコール **25** を酸化し得られたカルボン酸を L 体のロイシンメチルエステルと縮合することで目的とする(*9R*)-**9** を合成した。もう一方の立体異性体である (*9S*)-**9** は **16b** を原料として同様の反応により合成した。

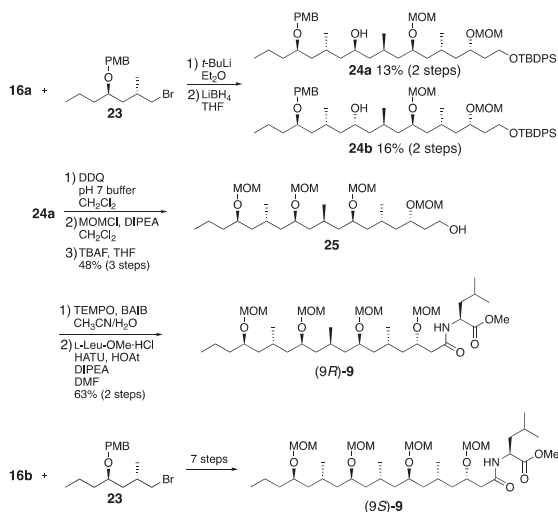


図 8. MOM 保護体アミド(*9R*)-**9** および(*9S*)-**9** の合成

合成した (*9R*)-**9** と(*9S*)-**9** の  $^1\text{H}$  NMR スペクトルを天然物由来の **9** と比較した結果、(*9S*)-**9** と一致し、(*9R*)-**9** とは一致しなかった (図 9)。このため、脂肪酸 C9 位の絶対立体配置を *S* と決定した。以上の結果より minnamide A の全ての絶対立体配置を以下に示す通りに決

定した。

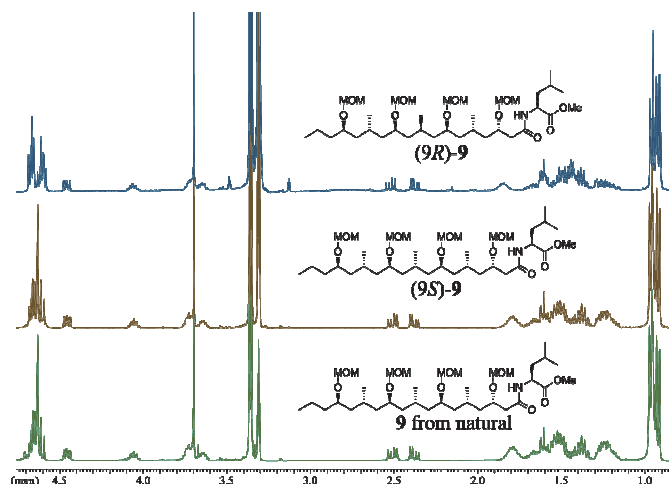
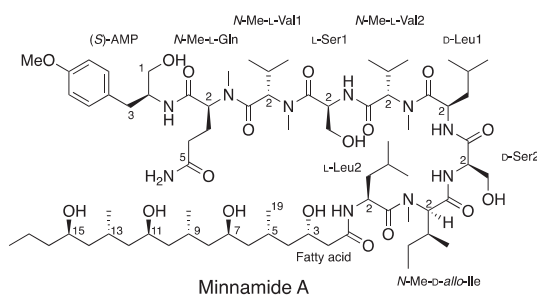


図 9. MOM 保護体アミド(*9R*)-**9** および(*9S*)-**9** の合成



#### 4. Minnamide A の生物活性

Minnamide A は HeLa 細胞の増殖阻害活性を示し、その 50%増殖阻害濃度( $\text{IC}_{50}$ )は  $0.17 \mu\text{M}$  であった。この時、minnamide A で処理した HeLa 細胞を顕微鏡にて観察したところ、細胞死が誘導される際に細胞の膨張が確認された(図 10)。このような形態変化を示す細胞死はネクローシスとして知られ、制御(プログラム)された細胞死として知られるアポトーシスとは対照的にネクローシスは偶発的な細胞死と考えられてきた。しかしながら、ネクローシスやパイローシス、フェロトーシスといったネクローシス様の「制御された細胞死(Regulated Cell Death (RCD))」が近年知られている<sup>(13)</sup>。

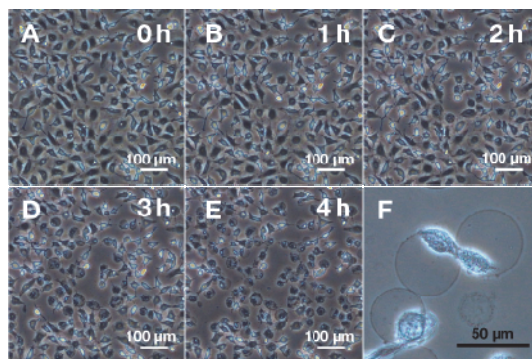


図 10. Minnamide A により誘導された HeLa 細胞の細胞死 (A-E) Minnamide A 処理における各時間経過後の HeLa 細胞、(F) Minnamide A により誘導された細胞死の形態

そこで、minnamide A の誘導する細胞死も制御された細胞死であると考え、細胞死の阻害剤を探索した。その結果、minnamide A の誘導する細胞死は抗酸化剤 ( $\alpha$ -tocopherol: Toc, coenzyme Q<sub>10</sub>: CoQ<sub>10</sub>、N-acetyl-L-cysteine: NAC、thiourea: TU) と銅キレーター (bathocuproinedisulfonic acid: BCPS、ammonium tetrathiomolybdate: TTM)、鉄キレーター (deferoxamine: DFOM)、金属キレーター (EDTA, CDTA, DMSA) により阻害されることが明らかとなった(図 11)。このため、minnamide A の誘導する細胞死は活性酸素と金属イオンの 2 つの要因が関与していることが示唆された。

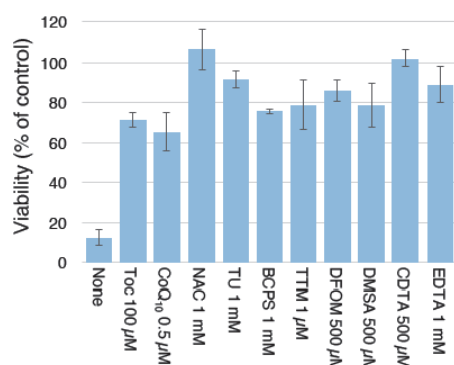


図 11. 阻害剤と minnamide A の併用処理による HeLa 細胞の生存率

次に、細胞死に関与する金属イオンの種類を評価するために、種々の金属イオンを minnamide A と併用して処理し、細胞の生存率を評価した(図 12)。Minnamide A の濃度を細胞毒性を示さない濃度 (0.9  $\mu$ M) に固定し、金属イオンの濃度を変化させたところ、銅イオンとマンガンイオンは minnamide A の併用処理により細胞毒性が顕著に増加し、互いに相乗的に作用していることが示された。これに対して、鉄イオンや亜鉛イオンでは minnamide A による細胞毒性の増加は弱く、マグネシウムイオンやコバルトイオンでは全く細胞毒性を増加させなかった。このことから、minnamide A の誘導する細胞死は銅イオンやマンガンイオンといった複数の金属イオンが関与することが示唆された。

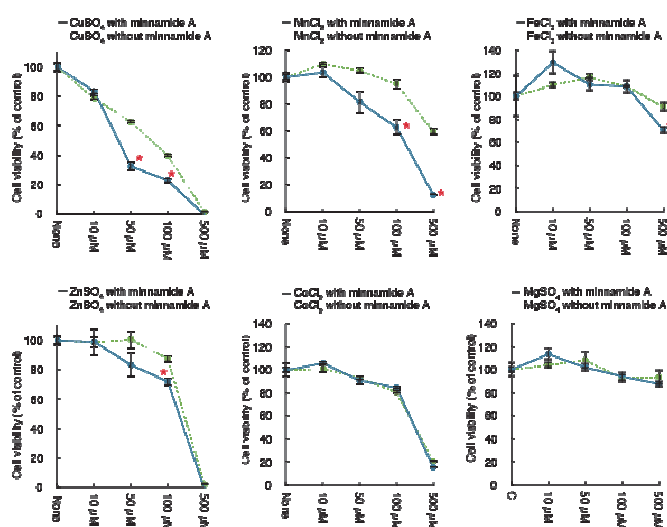


図 12. 金属塩の HeLa 細胞に対する細胞毒性への minnamide A の影響

## 5. 金属イオンと活性酸素の関連性

金属イオンと活性酸素の関連性はフェルトーシスでよく知られている<sup>(14)</sup>。フェルトーシスは近年明らかとなった RCD の 1 つであり、その名の通り鉄依存的な細胞死である。フェルトーシスでは鉄依存的に細胞内で過酸化脂質の蓄積が促進され、これが原因となって細胞死が誘導される。つまり、細胞内で鉄イオンが関与した過酸化脂質の発生と、発生した過酸化脂質の除去のバランスが崩れることで引き起こされる RCD と言える。

Minnamide A による RCD もフェルトーシスと同様のメカニズムで引き起こされていると考え、細胞内の過酸化脂質の定量を蛍光プローブ C11-BODIPY を用いて行なった(図 13)。その結果、minnamide A の濃度依存的に HeLa 細胞内の過酸化脂質の増加が確認された。また、抗酸化剤である Toc を minnamide A と併用して処理すると過酸化脂質の増加が抑えられた。さらに、銅キレーターである BCPS を併用した場合でも minnamide A による過酸化脂質の増加が抑制された。このことから、minnamide A の誘導する過酸化脂質の蓄積には銅イオンが関与することが明らかとなった。以上の結果より、minnamide A は銅イオンが関与した細胞内の過酸化脂質の蓄積を誘導し、その結果、細胞死が引き起こされることが示された。

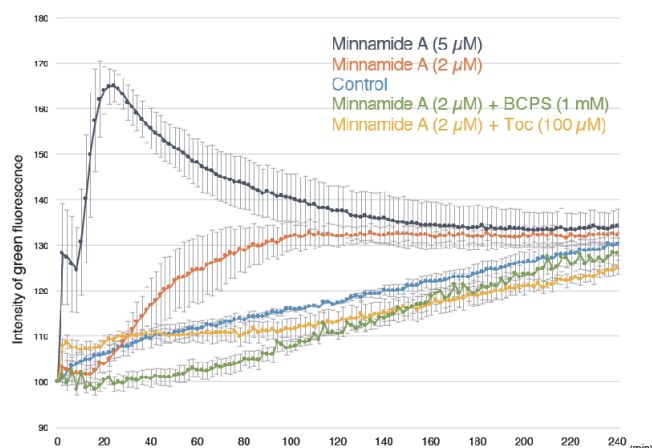


図 13. HeLa 細胞における細胞内過酸化脂質の定量

今回明らかとなった minnamide A による RCD はフェルトーシスとよく類似している。抗酸化酵素の 1 つであるグルタチオンペルオキシターゼ 4 (GPx4) は過酸化脂質の除去を行うが、フェルトーシスの誘導剤である RSL3 や erastin は GPx4 の働きを直接もしくは間接的に阻害する<sup>(14, 15)</sup>。このため、RSL3 や erastin を細胞に投与すると細胞内では過酸化脂質が除去できず徐々に蓄積され、これが引き金となり細胞死へと至る。Minnamide A による RCD は、細胞内での過酸化脂質の蓄積を伴う点でフェルトーシスと同じであるが、過酸化脂質の発生方法が両者では異なる。フェルトーシスでは過酸化脂質の発生が鉄依存的であり、他の金属イオンの影響は受けにくい<sup>(14)</sup>。一方で、minnamide A による RCD は、過酸化脂質の発生に銅イオンが関与しており、フェルトーシスと minnamide A による RCD とでは過酸化脂質の発生に関与する金属イオンの種類が異なっている。このため、minnamide A による RCD はフェルトーシスと同様に、生体内での過酸化脂質の発生と消去のバランスが崩れることで引き起こされ



ると考えられるが、関連する過酸化脂質の種類が異なることが想定される。Minnamide A の誘導する細胞死はフェロトーシスに類似した新たな RCD であると考えられる。

## 6. 緒言

近年では、アポトーシス以外の新たな RCD が次々と発見されている<sup>(13)</sup>。新たな RCD の発見と作用機序解明は対応する疾患の発症メカニズムの理解や創薬研究において重要である。例えば、フェロトーシスは急性臓器障害や神経変性疾患に関与することが知られており、フェロトーシスの阻害剤がこれらの治療薬となることが期待されている。銅イオンが関与する活性酸素は一部の神経変性疾患で知られており<sup>(15-17)</sup>、minnamide A の誘導する細胞死の詳細を明らかにすることで、これらの神経変性疾患の発症メカニズムの解明と治療薬の開発への展開が期待される。

## 7. 参考文献

- (1) P. M. Shih, J. Hemp, L. M. Ward, N. J. Matzke and W. W. Fisher, Crown group Oxyphotobacteria postdate the rise of oxygen, *Geobiology*, **15**, 19-29 (2017).
- (2) N. Engene, E. C. Rottacker, J. Kaštovský, T. Byrum, H. Choi, M. H. Ellisman, J. Komárek and W. H. Gerwick, *Moorea producens* gen. nov., sp. nov. and *Moorea bouillonii* comb. nov., tropical marine cyanobacteria rich in bioactive secondary metabolites, *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.*, **62**, 1171-1178 (2012).
- (3) N. Engene, V. J. Paul, T. Byrum, W. H. Gerwick, A. Thor and M. H. Ellisman, FIVE CHEMICALLY RICH SPECIES OF TROPICAL MARINE CYANOBACTERIA OF THE GENUS *OKEANIA* GEN. NOV. (OSCILLATORIALES, CYANOPROKARYOTA), *J. Phycol.*, **49**, 1095-1106 (2013).
- (4) N. Engene, A. Tronholm and V. J. Paul, UNCOVERING CRYPTIC DIVERSITY OF LYNGBYA: THE NEW TROPICAL MARINE CYANOBACTERIAL GENUS *DAPIS* (OSCILLATORIALES), *J. Phycol.*, **54**, 435-446 (2018).
- (5) S. Sumimoto, A. Iwasaki, O. Ohno, K. Sueyoshi, T. Teruya and K. Suenaga, Kanamienamide, an Enamide with an Enol Ether from the Marine Cyanobacterium *Moorea bouillonii*, *Org. Lett.*, **18**, 4884-4887 (2016).
- (6) A. Iwasaki, H. Fujimura, S. Okamoto, T. Kudo, S. Hoshina, S. Sumimoto, T. Teruya and K. Suenaga, Isolation of Jahanene and Jahanane, and Total Synthesis of the Jahanyne Family, *J. Org. Chem.*, **83**, 9592 (2018).
- (7) S. Sumimoto, M. Kobayashi, R. Sato, S. Shinomiya, A. Iwasaki, S. Suda, T. Teruya, T. Inuzuka, O. Osamu and K. Suenaga, Minnamide A, a Linear Lipopeptide from the Marine Cyanobacterium *Okeania hirsuta*, *Org. Lett.*, **21**, 1187-1190 (2019).
- (8) P. Marfey, DETERMINATION OF D-AMINO ACIDS. II. USE OF A BIFUNCTIONAL REAGENT, 1,5-DIFLUORO-2,4-DINITROBENZENE, *Carlsberg Res. Commun.*, **49**, 591-596 (1984).
- (9) I. Ohtani, T. Kusumi, Y. Kashman and H. Kakisawa, High-Field FT NMR Application of Mosher's Method. The Absolute Configurations of Marine Terpenoids, *J. Am. Chem. Soc.* **113**, 4092-4096 (1991).
- (10) C. I. Grove, J. C. Fetting and J. T. Shaw, Second-Generation Synthesis of (–)-Viriditoxin, *Synthesis* **44**, 362-371 (2012).
- (11) H. C. Brown and P. K. Jadhav, Asymmetric Carbon-Carbon Bond Formation via *B* - Allyldiisopinocampheylborane. Simple Synthesis of Secondary Homoallylic Alcohols with Excellent Enantiomeric Purities, *J. Am. Chem. Soc.* **105**, 2092-2093 (1893).
- (12) N. Chen, W. Jia and J. Xu, A Versatile Synthesis of Various Substituted Taurines from Vicinal Amino Alcohols and Aziridines, *Eur. J. Org. Chem.* **33**, 5841-5846 (2009).
- (13) L. Galluzzi, I. Vitale et al., Molecular mechanisms of cell death: recommendations of the Nomenclature Committee on Cell Death 2018, *Cell Death Differ.*, **25** 486-541 (2018).
- (14) S. J. Dixon, K. M. Lemberg, M. R. Lamprecht, R. Skouta, E. M. Zaitsev, C. E. Gleason, D. N. Patel, A. J. Bauer, A. M. Cantley, W. S. Yang, B. Morrison III and B. R. Stockwell, Ferroptosis: An Iron-Dependent Form of Nonapoptotic Cell Death, *Cell*, **149**, 1060-1072 (2012).
- (15) W. S. Yang, R. SriRamaratnam, M. E. Welsch, K. Shimada, R. Skouta, V. S. Viswanathan, J. H. Cheah, P. A. Clemons, A. F. Shamji, C. B. Clish, L. M. Brown, A. W. Girotti, V. W. Cornish, S. L. Schreiber and B. R. Stockwell, Regulation of Ferroptotic Cancer Cell Death by GPX4, *Cell*, **156**, 317-331 (2014).
- (16) C. Cheignon, M. Jones, E. Atrián-Blasco, I. Kieffer, P. Faller, F. Collin and C. Hureau, Identification of key structural features of the elusive Cu–Aβ complex that generates ROS in Alzheimer's disease. *Chem. Sci.* **8**, 5107-5118 (2017).
- (17) A. P. Lan, J. Chen, Z. F. Chai and Y. Hu, The neurotoxicity of iron, copper and cobalt in Parkinson's disease through ROS-mediated mechanisms, *Biometals*, **29**, 665-678 (2016).
- (18) A. Ahuja, K. Dev, R. S. Tanwar, K. K. Selwal and P. K. Tyagi, Copper mediated neurological disorder: Visions into amyotrophic lateral sclerosis, Alzheimer and Menkes disease, *J. Trace Elem. Med. Biol.*, **29**, 11-23 (2015).



# Performance Analysis for Lossy-Forwarding Relaying in Nakagami-m Fading Channels

Shen Qian\*

騫 申

**Abstract**—Lossy decode-and-forward (DF) relaying, also known as lossy forwarding (LF), has attracted much attention since it can significantly enhance the transmission reliability and expand the communication coverage at a small increase on computational effort compared to its DF counterpart. Meanwhile, it can further simplify the operations at the relay node by removing the error-detecting operation, e.g., cyclic redundancy check, which is usually encompassed in the conventional DF. Due to these advantages, LF has been intensively investigated with the aim of its applications to various cooperative communication networks having different topologies. This paper offers a comprehensive analysis on the LF relaying strategy and makes comparisons between LF and DF. As expected, the performance enhancement of LF over DF has been demonstrated in the exemplifying scenario. LF has great potential to be applied in future 5G wireless communication networks, e.g., device-to-device, vehicle-to-vehicle, and machine-to-machine communications.

## I. INTRODUCTION

A promising cooperative technique called lossy forwarding (LF) relaying [1] has gained a lot of attention recently, since it improves throughput efficiency and reduces the outage probability, compared to the conventional decode-and-forward (DF) relaying [2]. Unlike the conventional DF strategy [3], the decoded information sequence at the relay (R) is interleaved, re-encoded, and transmitted to destination (D), even though errors may be detected in the information sequence after decoding at R. Iterative processing between two decoders at the destination, one for decoding the signal received via the source (S)-D link and the other for that via the R-D link, with log-likelihood ratio (LLR) exchange via a LLR modification function improves decoding performance. The LF technique can be viewed as a distributed joint source-channel coding system with side information [4], [5]. It has been found that LF can achieve turbo-cliff-like bit error rate (BER) performance over additive white Gaussian noise (AWGN) channels [6].

In [7], the initial idea for LF is provided by utilizing Slepian-Wolf type cooperation for wireless communications. The coding algorithms are proposed for fading relay channel in [8] with the purpose of achieving the turbo processing gain. The key concept of the coding technique for LF is introduced in [1], where it assumes that the relay does not need to necessarily recover the information sent from S perfectly. In [9], a three-node LF relaying over Rayleigh fading channels is studied by identifying the relationship between the DF protocol and Slepian-Wolf coding [10]. However, a drawback of [1], [9] is that the admissible rate region is determined by the Slepian-Wolf theorem which does not perfectly match the problem

setup, since only the information of S needs to be recovered at the destination. Zhou *et al.* [2] eliminate the aforementioned drawback by utilizing the theorem of the source coding with side information in the network information theory. Based on [2], the technique is further extended to multiple access relay channel (MARC) [11], where a pair of correlated sources are transmitted to a destination with the aid of one relay. Furthermore, He *et al.* [12] and Qian *et al.* [13] apply the LF technique to multi-source multi-relay systems.

This paper discusses in detail the theoretical performance limits of LF relaying, including theoretical performance limits and comparisons among different relaying schemes. In the paper, we provide a general study of the state-of-the-art in LF cooperative relaying. More specifically, we start by introducing some information-theoretic preliminaries, e.g., distributed lossless source coding and distributed lossless source coding with a helper.

## II. INFORMATION-THEORETIC PRELIMINARIES

In this section, we present some important information-theoretic preliminaries, which will be utilized in the performance limit analyses of LF. To be specific, we provide the achievable rate region for distributed lossless source coding and distributed lossless source coding with a helper. Also, we introduce Shannon's lossy source-channel separation theorem, which is used to measure the lower bound of distortion, occurred in the S-R links.

### A. Distributed Lossless Source Coding

In this subsection, we introduce two important theories related to distributed lossless source coding. The first one considers the transmission of correlated sources, where all the sources need to be perfectly recovered at the destination. The second one considers the transmission of correlated sources with a helper. The difference in the two cases lies in that the helper does not need to be recovered in the second case. Its functionality is just to help the recovery of the correlated sources.

1) *Slepian-Wolf Coding*: Distributed lossless source coding system is depicted in Fig. 1. Let  $\{X_1^i, X_2^i, \dots, X_N^i\}_{i=1}^{\infty}$  be a sequence of jointly independent and identically distributed (i.i.d) discrete random tuples generated by the sources  $X_1, X_2, \dots, X_N$  with a joint probability density function (pdf)  $p(x_1, x_2, \dots, x_N)$ . According to the source coding theorem, if all the sources are encoded together, a sum rate  $H(X_1, X_2, \dots, X_N)$  is sufficient to achieve lossless decoding. However, if the sources are independently encoded with rates

---

\*Assistant Professor, Dept. of of Information Systems Creation

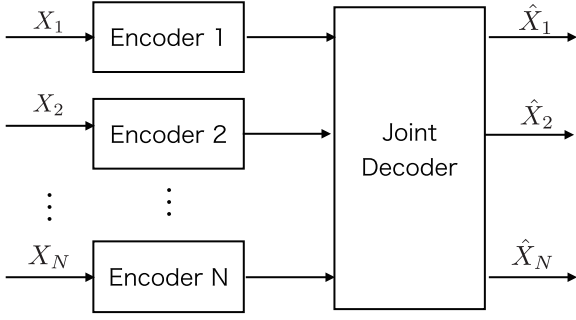


Fig. 1. Distributed lossless source coding.

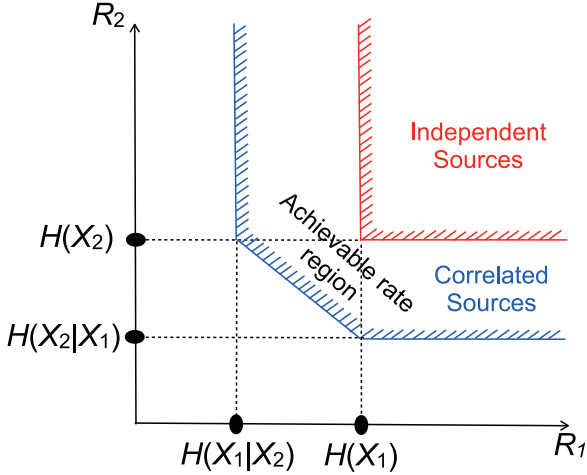


Fig. 2. The achievable Slepian-Wolf rate region for two sources.

$R_1, R_2, \dots, R_N$ , we get the following achievable rate region originally introduced in [14]:

**Theorem 1 (Slepian-Wolf Theorem):** Let  $H(X(\mathcal{S}))$  denotes the joint entropy of the tuple  $(X_j : j \in \mathcal{S})$  and  $\mathcal{S}^c$  denotes the complement of the set  $\mathcal{S}$ . A sequence  $\{X_1^i, X_2^i, \dots, X_N^i\}_{i=1}^\infty$  of discrete random tuples is drawn according to  $(X_1, X_2, \dots, X_N) \sim p(x_1, x_2, \dots, x_N)$ , where  $X_n^i \in \mathcal{X}_n$ ,  $n = 1, 2, \dots, N$ . Then, for any rate tuples  $(R_1, R_2, \dots, R_N)$  that satisfy

$$\sum_{j \in \mathcal{S}} R_j \geq H(X(\mathcal{S})|X(\mathcal{S}^c)), \quad \forall \mathcal{S} \subseteq \{1, 2, \dots, N\}, \quad (1)$$

the error probability of joint decoding (JD) at the destination can be made arbitrarily small.

An achievable Slepian-Wolf rate region for two correlated sources, i.e.,  $X_1$  and  $X_2$ , is illustrated in Fig. 2. It can be observed that the rate region achieved by applying JD is larger compared to independent decoding and the improvement depends on the correlation between the two sources.

2) *Distributed Lossless Source Coding with a Helper:* The Slepian-Wolf coding assumes that all the correlated sources need to be recovered at the destination. However, in cooperative relaying with the aim of higher diversity, relay(s) is

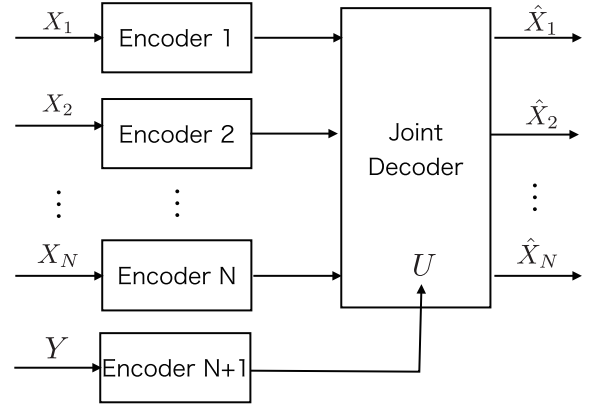


Fig. 3. Distributed lossless source coding of an arbitrary number of sources with a helper.

(are) only serving as helper(s), see Fig. 3, where the helper  $Y$  can be the network-coded version of the estimates of  $X_1, X_2, \dots, X_N$  in multiple access relay channel (MARC), for instance. In the presence of the helper, the achievable rate region will be further enlarged compared to that without any helpers by following the theorem of conditioning reduces entropy. More details on this are offered in the following theorem:

**Theorem 2 (Distributed Lossless Source Coding with a Helper):**

Let  $\{X_1^i, X_2^i, \dots, X_N^i, Y^i\}_{i=1}^\infty$  be a sequence of jointly i.i.d discrete random tuples generated by the sources  $X_1, X_2, \dots, X_N, Y$ . The achievable rate region for the lossless recovery of  $(X_1, X_2, \dots, X_N)$  with a helper  $Y$  is the set of rate tuples  $(R_1, R_2, \dots, R_{N+1})$  that satisfy

$$\begin{cases} \sum_{j \in \mathcal{S}} R_j \geq H(X(\mathcal{S})|U, X(\mathcal{S}^c)), \quad \forall \mathcal{S} \subseteq \{1, 2, \dots, N\}, \\ R_{N+1} \geq I(Y; U), \end{cases} \quad (2)$$

for some conditional probability mass function (pmf)  $p(u|y)$  with  $|\mathcal{U}| \leq |\mathcal{Y}| + 2^N - 1$ .

The achievable rate region for lossless source coding of one source with a helper is shown in Fig. 4. It can be seen that the achievable rate region is larger than that of Slepian-Wolf coding (referring to Fig. 2) because there is no need to recover  $Y$ . The achievable rate region for distributed lossless source coding with more than one helper is unknown in general even in the case of single source.

### B. Shannon's Lossy Source-Channel Separation Theorem

The concept of LF allows intra-link errors in the network. The information transmission in the source-to-relay (S-R) and relay-to-destination (R-D) links can therefore be modeled by Shannon's lossy source-channel separation theorem. The theorem states that the transmission of a message from a transmitter to a receiver with a distortion  $D$ , needs to satisfy

$$R_c R(D) \leq C(\gamma), \quad (3)$$

where  $R_c$  is the spectral efficiency including the channel code rate and modulation order,  $R(D)$  is the rate-distortion function,

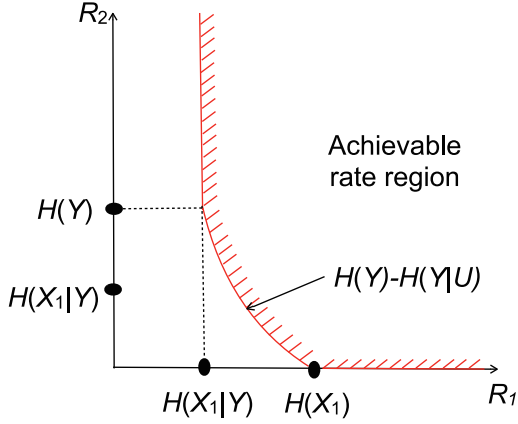


Fig. 4. The achievable rate region for lossless source coding of one source with a helper.

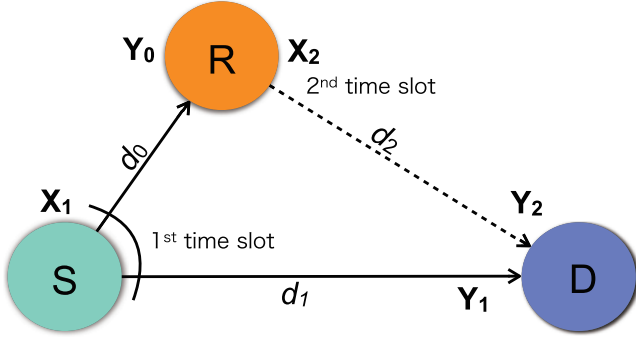


Fig. 5. The block diagram of the three-node one-way relay system.

and  $C(\gamma)$  denotes the channel capacity (Gaussian capacity or constellation constrained capacity) as a function of receive SNR  $\gamma$ .

In LF, we focus on discrete binary sources and therefore, the distortion is expressed as:

$$R(D) = 1 - H_2(D), \quad (4)$$

where  $H_2(D) = -D \log_2(D) - (1 - D) \log_2(1 - D)$  is the binary entropy function. With the help of (3) and (4), we can derive the relationship between the distortion and receive SNR:

$$D_{min} = \begin{cases} H_2^{-1}(1 - C(\gamma)/R_c), & \text{for } 0 \leq \gamma < \gamma^* \\ 0, & \text{for } \gamma \geq \gamma^*, \end{cases} \quad (5)$$

where  $\gamma^*$  is the minimum SNR required for zero distortion.

### III. ONE-WAY RELAY NETWORK

In this section, we focus on the theoretical performance limits of the three-node LF relaying system, as shown in Fig. 5.

#### A. System Model

1) *LF System*: In the three-node one-way half-duplex relay system, the source S and relay R cooperatively transmit a message to the destination D, as shown in Fig. 5. To allow transmission orthogonality, we assume that a time-division channel allocation is considered. Therefore, two time slots are needed for one transmission round. During the first time slot, S first performs channel coding and modulation, denoted as  $\mathcal{E}_1(\cdot)$ , on the original information sequence  $\mathbf{u}_1$ . The coded and modulated signal  $\mathbf{x}_1 = \mathcal{E}_1(\mathbf{u}_1)$  is then broadcast to both R and D. During the second time slot, R first conducts signal demodulation and decoding, denoted as  $\mathcal{D}_1(\cdot)$ , on the received signal  $\mathbf{y}_0$ . The estimate of  $\mathbf{u}_1$ , i.e.,  $\mathbf{u}_2 = \mathcal{D}_1(\mathbf{y}_0)$ , is then interleaved, re-encoded, and modulated to signal  $\mathbf{x}_2$ . According to principle of LF relaying, the coded and modulated signal  $\mathbf{x}_2$  is always transmitted to D, no matter whether  $\mathbf{u}_2$  contains decoding errors (such errors are referred to as intra-link errors) or not. It should be noted that the decoder output at R is correlated with the original information sequence sent from S, which is referred to as *source-relay correlation* and represented by bit-flipping model (equivalent to binary symmetric channel (BSC)).

2) *Channel Model*: The S-R, S-D, and R-D links are assumed to suffer from independent Rayleigh block fading or Nakagami- $m$  block fading. Therefore, the channel gains keep constant within one transmission block but vary transmission-by-transmission. The received signals at R and D can be expressed as

$$\mathbf{y}_0 = \sqrt{G_0} \cdot h_0 \cdot \mathbf{x}_1 + \mathbf{n}_0, \quad (6)$$

$$\mathbf{y}_1 = \sqrt{G_1} \cdot h_1 \cdot \mathbf{x}_1 + \mathbf{n}_1, \quad (7)$$

$$\mathbf{y}_2 = \sqrt{G_2} \cdot h_2 \cdot \mathbf{x}_2 + \mathbf{n}_2, \quad (8)$$

where  $h_i$  and  $\mathbf{n}_i$  denote the complex channel gain and the zero-mean AWGN vector with the variance  $\sigma_i^2$  per dimension, with  $i \in \{0, 1, 2\}$  denotes the S-R, S-D, and R-D links, respectively. Without loss of generality, it is assumed that  $\sigma_0^2 = \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = N_0/2$ . We also take into consideration of the geometric gain of each link, which is denoted by  $G_i$ . With  $d_i$  denoting the distance of the corresponding link (referring to Fig. 5) and  $G_1$  being normalized to the unity,  $G_0$  and  $G_2$  can be defined as  $G_0 = (d_1/d_0)^l$  and  $G_2 = (d_1/d_2)^l$ , respectively, where  $l$  is the pathloss exponent and empirically set to 3.52. The geometric gain between two nodes with distance  $d$  is written as  $G = (\frac{1}{d})^l$ . Note that we assume the transmit power per symbol at S and R is the equal, denoted as  $E_s$ .

With the definitions introduced above, the instantaneous and average receive SNRs of S-D link are expressed as  $\gamma_1 = G_1 |h_1|^2 E_s / N_0$  and  $\bar{\gamma}_1 = G_1 E_s / N_0$ , respectively. Similar definitions apply to  $\gamma_0, \bar{\gamma}_0, \gamma_2$  and  $\bar{\gamma}_2$ .

#### B. Achievable Rate Region Analysis

Similar to the channel gain in block fading, the intra-link error probability  $p$  stays constant over one transmission block, but varies transmission-by-transmission. The relationship between  $p$  and the instantaneous intra-link SNR can be found in (5). The correlation between  $\mathbf{u}_1$  and  $\mathbf{u}_2$  is purely

characterized by  $p$ , where  $p = 0$  indicates perfect decoding at R, and  $0 < p \leq 0.5$  indicates that intra-link errors appear. Assuming that  $\mathbf{u}_1$  and  $\mathbf{u}_2$  are described with rates  $R_1$  and  $R_2$ , respectively, the evolution of the achievable rate region for  $R_1$  and  $R_2$  is provided in Fig. 6.

1) *Exact Rate Region:* According to Theorem 2, successful recovery of  $\mathbf{u}_1$  via JD at D can be achieved if  $R_1$  and  $R_2$  satisfies

$$\begin{cases} R_1 \geq H(\mathbf{u}_1|\hat{\mathbf{u}}_2), \\ R_2 \geq I(\mathbf{u}_2;\hat{\mathbf{u}}_2), \end{cases} \quad (9)$$

where  $\hat{\mathbf{u}}_2$  is the estimate of  $\mathbf{u}_2$  at D. Let  $H(\mathbf{u}_1|\hat{\mathbf{u}}_2)$  and  $I(\mathbf{u}_2;\hat{\mathbf{u}}_2)$  denote the entropy of  $\mathbf{u}_1$  conditioned on  $\hat{\mathbf{u}}_2$  and the mutual information between  $\mathbf{u}_2$  and  $\hat{\mathbf{u}}_2$ , respectively. The relationship between  $\mathbf{u}_2$  and  $\hat{\mathbf{u}}_2$  can also be expressed as a bit-flipping model with a error probability  $\alpha$ , where  $\alpha \in [0, 0.5]$ . It is easily found that  $H(\mathbf{u}_1|\hat{\mathbf{u}}_2) = H_2(\alpha * p)$  and  $I(\mathbf{u}_2;\hat{\mathbf{u}}_2) = H(\hat{\mathbf{u}}_2) - H(\hat{\mathbf{u}}_2|\mathbf{u}_2) = 1 - H_2(\alpha)$ , where  $\alpha * p = (1 - \alpha)p + \alpha(1 - p)$  is the binary convolution of  $\alpha$  and  $p$ .

Let  $\mathcal{R}_{LF}$  denotes the achievable rate region defined by (9). For the purpose of better illustration, we divide the entire rate region into five sub-regions,  $\mathcal{R}_a, \mathcal{R}_b, \mathcal{R}_c, \mathcal{R}_d$  and  $\mathcal{R}_e$ , as shown in Fig. 7. From this figure, we have  $\mathcal{R}_{LF} = \mathcal{R}_c \cup \mathcal{R}_d \cup \mathcal{R}_e$ . According to the discussions presented above,  $\mathcal{R}_{LF}$  can be expressed even in an explicit way as

$$R_1 \geq \begin{cases} H_2(p), & \text{for } R_2 \geq 1, \\ H_2[H_2^{-1}(1 - R_2) * p], & \text{for } 0 \leq R_2 \leq 1. \end{cases} \quad (10)$$

### C. Outage Probability Analysis

1) *Relationship Between  $R_1, R_2$  and Their Corresponding Instantaneous Channel SNRs:* Following Shannon's source-channel separation theorem, if the *total* information transmission rates satisfy

$$\begin{cases} R_1 R_{c,1} \leq C(\gamma_1), \\ R_2 R_{c,2} \leq C(\gamma_2), \end{cases} \quad (11)$$

the error probability over S-D and R-D links can be made arbitrarily small.

In the theoretical analysis, we only consider the equality of (11). The relationship between rate  $R_i$  and its corresponding instantaneous SNR  $\gamma_i$  is given by  $R_i = \Phi_i(\gamma_i) = \frac{C(\gamma_i)}{R_{c,i}}$ , with its inverse function  $\gamma_i = \Phi_i^{-1}(R_i) = C^{-1}(R_i R_{c,i})$ , where  $i = 1, 2$  and  $C^{-1}(\cdot)$  denotes the inverse function of channel capacity.

2) *Outage Probability Calculation:* Based on the exact achievable rate regions, the exact outage probability can be

defined as

$$\begin{aligned} P_{\text{out}}^{LF} &= \Pr\{0 \leq p \leq 0.5, (R_1, R_2) \notin \mathcal{R}_{LF}(p)\} \\ &= \Pr\{p = 0, (R_1, R_2) \in \mathcal{R}_a \cup \mathcal{R}_b\} \\ &\quad + \Pr\{0 < p \leq 0.5, (R_1, R_2) \in \mathcal{R}_a \cup \mathcal{R}_b\} \\ &= \underbrace{\Pr\{p = 0, (R_1, R_2) \in \mathcal{R}_a\}}_{P_{1,a}} + \underbrace{\Pr\{p = 0, (R_1, R_2) \in \mathcal{R}_b\}}_{P_{1,b}} \\ &\quad + \underbrace{\Pr\{0 < p \leq 0.5, (R_1, R_2) \in \mathcal{R}_a\}}_{P_{2,a}} \\ &\quad + \underbrace{\Pr\{0 < p \leq 0.5, (R_1, R_2) \in \mathcal{R}_b\}}_{P_{2,b}}, \end{aligned} \quad (12)$$

$P_{1,a}, P_{1,b}, P_{2,a}, P_{2,b}, P_{1,ab'}, P_{1,b''c}, P_{2,ab'}$  and  $P_{2,b''c}$  can be further expressed as

$$P_{1,a} = 0, \quad (13)$$

$$\begin{aligned} P_{1,b} &= \frac{1}{\bar{\gamma}_2} \exp\left[-\frac{\Phi_1^{-1}(1)}{\bar{\gamma}_0}\right] \int_0^{\Phi_1^{-1}(1)} \exp\left(-\frac{\gamma_2}{\bar{\gamma}_2}\right) \\ &\quad \times \left[1 - \exp\left(-\frac{\Phi_1^{-1}[1 - \Phi_2(\gamma_2)]}{\bar{\gamma}_1}\right)\right] d\gamma_2, \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} P_{2,a} &= \frac{1}{\bar{\gamma}_0} \exp\left[-\frac{\Phi_2^{-1}(1)}{\bar{\gamma}_2}\right] \int_0^{\Phi_2^{-1}(1)} \exp\left(-\frac{\gamma_0}{\bar{\gamma}_0}\right) \\ &\quad \times \left[1 - \exp\left(-\frac{\Phi_1^{-1}[1 - \Phi_1(\gamma_0)]}{\bar{\gamma}_1}\right)\right] d\gamma_0, \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} P_{2,b} &= \frac{1}{\bar{\gamma}_0 \bar{\gamma}_2} \int_0^{\Phi_1^{-1}(1)} \int_0^{\Phi_2^{-1}(1)} \exp\left(-\frac{\gamma_0}{\bar{\gamma}_0} - \frac{\gamma_2}{\bar{\gamma}_2}\right) \\ &\quad \times \left\{1 - \exp\left[-\frac{\Phi_1^{-1}[\Psi(\gamma_0, \gamma_2)]}{\bar{\gamma}_1}\right]\right\} d\gamma_0 d\gamma_2, \end{aligned} \quad (16)$$

$$P_{1,ab'} = 0, \quad (17)$$

$$\begin{aligned} P_{1,b''c} &= \frac{1}{\bar{\gamma}_1} \exp\left[-\frac{\Phi_1^{-1}(1)}{\bar{\gamma}_0}\right] \int_0^{\Phi_1^{-1}(1)} \exp\left(-\frac{\gamma_1}{\bar{\gamma}_1}\right) \\ &\quad \times \left[1 - \exp\left(-\frac{\Phi_2^{-1}[1 - \Phi_1(\gamma_1)]}{\bar{\gamma}_2}\right)\right] d\gamma_1, \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} P_{2,ab'} &= \frac{1}{\bar{\gamma}_0} \int_0^{\Phi_1^{-1}(1)} \exp\left(-\frac{\gamma_0}{\bar{\gamma}_0}\right) \\ &\quad \times \left[1 - \exp\left(-\frac{\Phi_1^{-1}[1 - \Phi_1(\gamma_0)]}{\bar{\gamma}_1}\right)\right] d\gamma_0, \end{aligned} \quad (19)$$

and

$$\begin{aligned} P_{2,b''c} &= \frac{1}{\bar{\gamma}_0 \bar{\gamma}_1} \int_0^{\Phi_1^{-1}(1)} \int_0^{\Phi_1^{-1}(1)} \exp\left(-\frac{\gamma_0}{\bar{\gamma}_0} - \frac{\gamma_1}{\bar{\gamma}_1}\right) \\ &\quad \times \left[1 - \exp\left(-\frac{\Phi_2^{-1}[2 - \Phi_1(\gamma_0) - \Phi_1(\gamma_1)]}{\bar{\gamma}_2}\right)\right] d\gamma_1 d\gamma_0. \end{aligned} \quad (20)$$

respectively, with  $\Psi(\gamma_0, \gamma_2) = H_2\{H_2^{-1}[1 - \Phi_1(\gamma_0)] * H_2^{-1}[1 - \Phi_2(\gamma_2)]\}$ .

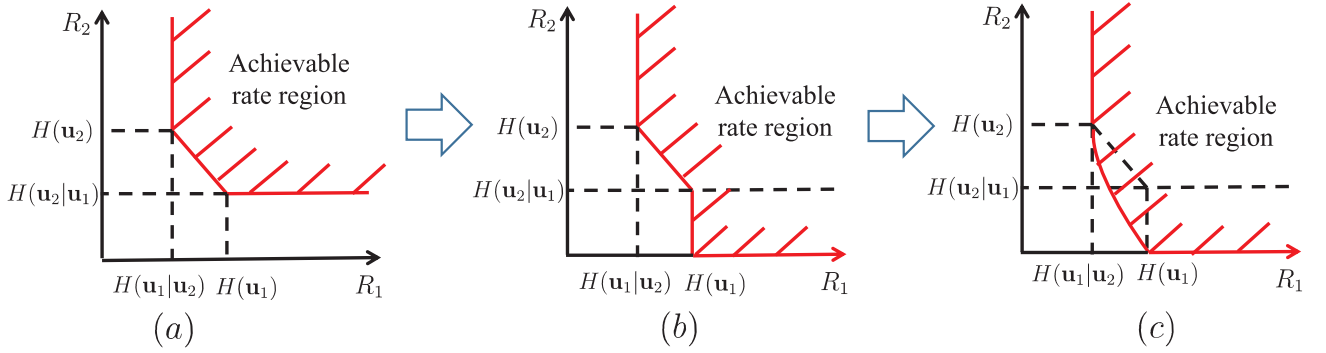


Fig. 6. The evolution of achievable rate region: (a) Slepian-Wolf rate region, (b) Extended Slepian-Wolf rate region, and (c) rate region of source coding with a helper.

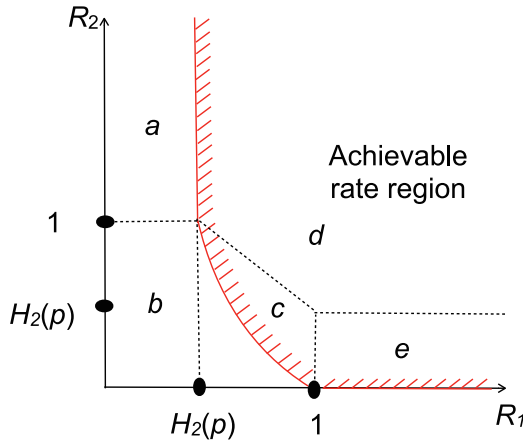


Fig. 7. The achievable rate region for S and R, divided into five sub-regions.

#### D. Nakagami- $m$ Fading Channels

In this subsection, we investigate the outage performance of the three-node LF relaying network over independent Nakagami- $m$  block fading channels. The outage probability of LF relaying with Gaussian codebook capacity over Nakagami- $m$  block fading channels can be calculated in the same way as in the Rayleigh block fading case only by replacing the Rayleigh distribution with Nakagami- $m$  distribution.

Fig. 8 presents the outage performances of LF relaying based on Gaussian codebook capacity and constellation constrained capacity, denoted by “ $P_{\text{out}}^{\text{LF}}, \text{GCC}$ ” and “ $P_{\text{out}}^{\text{LF}}, \text{CCC}$ ” in the legend, respectively. The Monte Carlo simulation results well match the theoretical outage probabilities. The gap between the curves of “ $P_{\text{out}}^{\text{LF}}, \text{GCC}$ ” and “ $P_{\text{out}}^{\text{LF}}, \text{CCC}$ ” is minimal. This is because that, in the low SNR region, the difference between Gaussian codebook capacity and constellation constrained capacity is negligible. Moreover, in the high SNR regime, even though the difference between Gaussian codebook capacity and constellation constrained capacity increases,

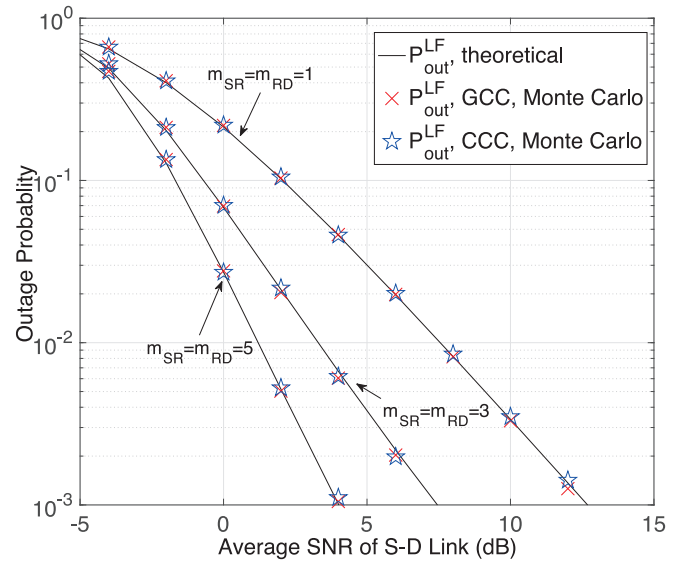


Fig. 8. Comparison between the Gaussian codebook capacity and quaternary constellation constrained capacity based outage probability of the LF relaying, where  $m_0 = m_2$ ,  $m_1 = 1$ , and  $G_0 = G_1 = G_2$ .

the S-R link error probability  $p$  approaches 0, resulting in lossless transmission over the S-R link.

1) *Optimal Relay Location*: Fig. 9 shows the impact of the location of the relay on the outage performance, where  $\bar{\gamma}_1 = 1$  dB. R is assumed to be located in a line parallel to the S-D link. R moves between  $x = 0$  and  $x = 1$ , as shown in Fig. 9. The distance between the relay and the line connecting S and D is set at  $\frac{1}{10}$  of the length of the S-D link. It is found that when R is closer to S, LF and DF show the same performance. This is because it is less likely that errors happen in reliable S-R transmission. Therefore, R becomes active in DF relaying in almost all the transmission rounds, which makes DF and LF relaying exhibit almost the same outage performance.

On the contrary, when R moves closer to D, the probability that error occur during S-R transmission increases with



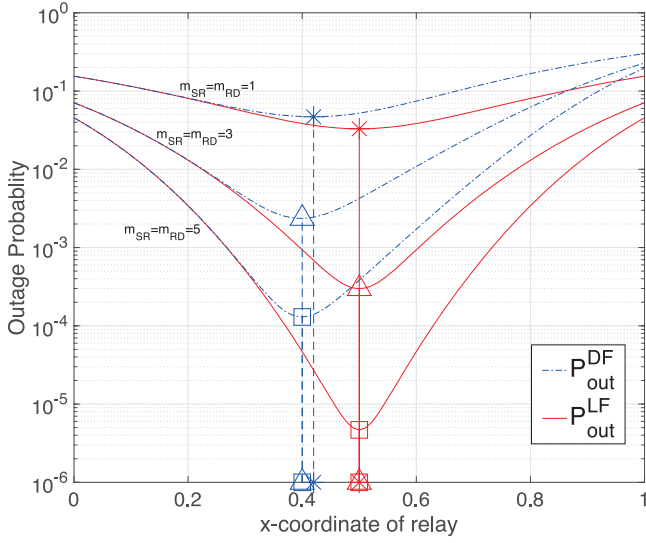


Fig. 9. The optimal relay positions of the LF and DF relaying where  $m_1 = 1$ . The vertical lines indicate the points where the outage probabilities are smallest.

degraded S-R link quality. In this case, R keeps silence in DF relaying with a high probability, which results in better performance of LF relaying over DF relaying. With LF, so long as  $m_0 = m_2$ , the midpoint is optimal for R (R has the same distance to S and D) in terms of outage probability.

From Fig. 9, it also can be found that, with LF relaying, the outage curves are symmetric to the midpoint between S and D. Since the errors happened in the S-R transmission can be corrected at D with JD, the quality of the S-R and R-D links becomes equally important, which results in the midpoint for R being the optimal. Moreover, for guaranteeing the same outage performance, LF relaying can search for (or locate) a relay in a larger range than DF relaying. This is a significant advantage especially in natural disaster situations.

#### IV. CONCLUDING REMARKS

In the paper, we have provided a comprehensive study on the achievable rate regions and outage analyses, where LF is adopted at the relay nodes. We have exploited the theorem of source coding with a helper to determine the achievable rate region of the three-node network while we have leveraged Slepian-Wolf theorem as an approximation. Source coding with multiple helpers remains a challenging problem in the performance limit analysis for multi-relay scenario. The simulation results has demonstrated that LF outperforms DF in general regarding the outage probability at the sacrifice of slightly more power consumption.

#### REFERENCES

[1] K. Anwar and T. Matsumoto, "Accumulator-assisted distributed turbo codes for relay systems exploiting source-relay correlation," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 16, no. 7, pp. 1114–1117, July 2012.

[2] X. Zhou, M. Cheng, X. He, and T. Matsumoto, "Exact and approximated outage probability analyses for decode-and-forward relaying system allowing intra-link errors," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 13, no. 12, pp. 7062–7071, Dec. 2014.

[3] J. Laneman, D. Tse, and G. W. Wornell, "Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 50, no. 12, pp. 3062–3080, Dec 2004.

[4] S. Qian, X. Zhou, X. He, J. He, M. Juntti, and T. Matsumoto, "Performance analysis for lossy-forward relaying over nakagami-  $m$  fading channels," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, no. 11, pp. 10035–10043, Nov 2017.

[5] I. Shahid and P. Yahampath, "Distributed joint source-channel coding using unequal error protection LDPC codes," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 61, no. 8, pp. 3472–3482, August 2013.

[6] A. J. Aljohani, S. X. Ng, and L. Hanzo, "Distributed source coding and its applications in relaying-based transmission," *IEEE Trans. Adv. Packag.*, vol. 4, pp. 1940–1970, 2016.

[7] R. Hu and J. Li, "Exploiting Slepian-Wolf codes in wireless user cooperation," in *Proc. IEEE Works. on Sign. Proc. Adv. in Wirel. Comms.*, June 2005, pp. 275–279.

[8] B. Zhao and M. C. Valenti, "Distributed turbo coded diversity for relay channel," *Electronics Letters*, vol. 39, no. 10, pp. 786–787, May 2003.

[9] M. Cheng, K. Anwar, and T. Matsumoto, "Outage probability of a relay strategy allowing intra-link errors utilizing Slepian-Wolf theorem," *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, vol. 2013, no. 1, p. 34, 2013.

[10] D. Slepian and J. Wolf, "Noiseless coding of correlated information sources," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 19, no. 4, pp. 471–480, Jul 1973.

[11] P.-S. Lu, X. Zhou, and T. Matsumoto, "Outage probabilities of orthogonal multiple-access relaying techniques with imperfect source-relay links," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 14, no. 4, pp. 2269–2280, Apr. 2015.

[12] J. He, I. Hussain, M. Juntti, and T. Matsumoto, "End-to-end outage probability analysis for multi-source multi-relay systems," in *Proc. of IEEE International Conference on Communications (ICC)*, May 2016, pp. 1–6.

[13] S. Qian, J. He, M. Juntti, and T. Matsumoto, "Performance analysis for multi-source multi-relay transmission over kappa-mu fading channels," in *Proc. Annual Asilomar Conf. Signals, Syst., Comp.*, May 2016, pp. 1–6.

[14] D. Slepian and J. Wolf, "Noiseless coding of correlated information sources," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 19, no. 4, pp. 471–480, Jul. 1973.

# Co-W シアノ架橋配位高分子磁性体における湿度誘起構造および磁気相転移

織作 恵子\*

## Humidity-Induced Magnetic and Structural Phases Transition in a Cyano-bridged Co-W Assembly

Keiko Komori-ORISAKU\*

### 1. はじめに

配位高分子は種々の金属イオンと多様な有機架橋配位子を組み合わせるにより、配位数や配位構造を様々に設計することが可能であり、設計された構造から発光性や磁性、伝導性などの種々の物性が発現する<sup>1</sup>。また、これらの物性の光や圧力などの外部刺激に対する応答性<sup>2</sup>はスイッチ機能や記憶媒体への応用が期待され、配位高分子における重要な検討事項の一つである。さらに、構造体中に均一かつ多様な細孔をもつ多孔性配位高分子ではその表面積を利用した触媒機能<sup>3</sup>や孔径による気体分子などの選択的蓄蔵機能<sup>4</sup>だけでなく、その空孔の物性に適合した物質の包摂-放出<sup>5</sup>による新たな機能性の発現や外部刺激応答性が期待される。

一方、柔軟な配位形式を持つオクタシアノメタレートは種々の金属塩を組み合わせると自己組織化によりシアノ架橋型金属集積体を形成し、さらに種々の有機配位子を組み合わせるにより外部刺激応答性を含む多様な磁性を発現する<sup>6,7,8</sup>。また、これらの有機配位子の大きさや配位様式に柔軟に対応して金属間距離維持をすることにより空孔を形成し、この空孔内へのアルコール分子の包括によって磁性が発現することなども報告されている<sup>9</sup>。

本稿では、最近の研究としてコバルト(II)と purine およびオクタシアノタングステン(V)酸塩の自己組織化による 3 次元配位高分子  $\text{Co}_3[\text{W}(\text{CN})_8]_2(\text{purine})_2(\text{H}_2\text{O}) \cdot 8.5\text{H}_2\text{O}$  (**1**) の形成と、湿度による結晶水分子数の変化により **1** が示す可逆的な構造相転移および構造相転移に呼応する長距離強磁性秩序の変化を報告する。

### 2. $\text{Co}_3[\text{W}(\text{CN})_8]_2(\text{purine})_2(\text{H}_2\text{O}) \cdot 8.5\text{H}_2\text{O}$ (**1**) 及び $\text{Co}_3[\text{W}(\text{CN})_8]_2(\text{purine})_2 \cdot 4.3\text{H}_2\text{O}$ (**1-deh**) の結晶構造

単結晶 X 線構造解析により化合物 **1** の結晶は斜方晶系 ( $a = 22.102(6) \text{ \AA}$ ,  $b = 13.393(3) \text{ \AA}$ ,  $c = 14.767(4) \text{ \AA}$ ,  $Z = 4$ ) で space group は  $Pbam$  であることが示された (Figure 1)。非対称単位には  $[\text{Co}(\text{H}_2\text{O})]$  cation と  $[\text{Co}(\text{purine})_2]$  cation、 $[\text{W}(\text{CN})_8]$  anion が 1:0.5:1 の割合で含まれ、さらに非配位の結晶水分子が存在した。独立の 2 つの Co 金属中心の配位形式はいずれも 6 配位、octahedron であった。また、非対称単位中には 2 つの独立した W 原子、W1 と W2 が存在し、

$[\text{W1}(\text{CN})_8]$  の金属中心の配位形式は 8 配位 square antiprism であり、 $[\text{W2}(\text{CN})_8]$  は bicapped trigonal prism であった。2 つの Co 原子、Co1 と Co2 は架橋している purine 分子により  $ab$  面に沿って結び合わされており、 $b$  軸方向から見ると、W 原子が並んだ層と purine 環と Co 原子で形成された層が交互に積層しており (Figure 1c)、さらに、各 Co 原子は 4 つの架橋シアノ配位子により、上下の 4 つの異なる W 原子に結び合わされ、3 次元ネットワーク構造を形成している。

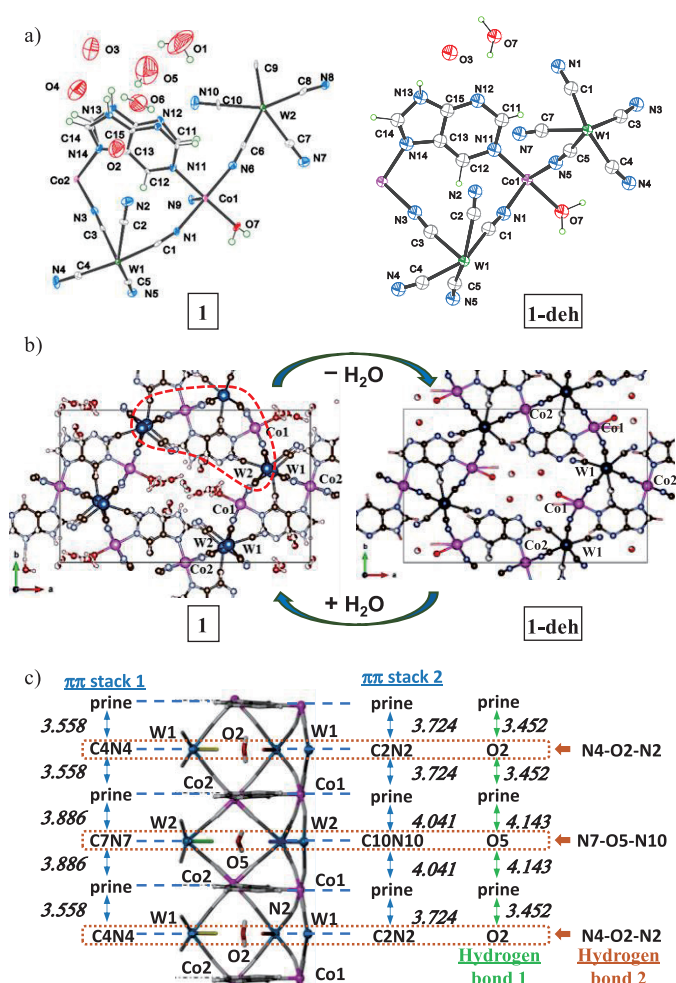


Figure 1. **1**(左)と **1-deh**(右)の(a) 非対称ユニットと(b) 結晶構造  
c) **1** の  $\pi$ - $\pi$ 相互作用と水素結合ネットワーク (点線部分  $c$  軸方向)  
(凡例 C:灰色, N:青, O:赤, W:濃紺, Co:ピンク)

\*特任准教授 物質生命化学科

Associate Professor, Dept. of Material and Life Chemistry,

*ab*-plane 方向に広がっている purine 環平面は *c* 軸方向に層間距離 7-8 Å で重なり、重なった 2 つの purine 環の中央に、purine 環とほぼ平行に 4 つの非架橋のシアノ配位子 (C2N2, C4N4, C7N7, C10N10) が交互に位置している (Figure 1c)。4 つの CN 基はいずれも purine 環平面とほぼ平行であり、また、purine 平均平面との距離が 3.62 ~ 4.05 Å であることから、これらの CN 基と purine 環には  $\pi$ - $\pi$  相互作用<sup>10</sup> が働いていると推定され、*c*-axis 方向にシアノ基と purine 環が交互に重なった 2 系統 (purine-C4N4-purine-C7N7 及び purine-C2N2-purine-C10N10) の層構造 ( $\pi$ - $\pi$  stacking<sup>11</sup>) を形成している。

さらに、酸素原子 O2 及び O5 を含む 2 つの水分子が 2 つの purine 環の間に交互に並んで存在しており、各パラメータからこれらの水分子は各々上下の purine 環と *c*-軸方向に  $\sigma$ - $\pi$  相互作用 (Type V)<sup>12</sup> による水素結合を形成していることが示唆された。また、これらの 2 つの水分子はそれぞれ水素結合と short contact<sup>13</sup> によるネットワーク I (N2-O2-O6-N4) とネットワーク II (N7-O5-N10-O1) で *ab*-平面方向に固定されている。さらにネットワーク I および II は 3 つの水の酸素原子 (O3, O4 および O7) と *c*-軸方向に水素ネットワークを形成し、*c*-軸方向に 2 つの purine 環で囲まれて形成された大きな空孔を支えている。

高高い平面配位子を用いたことにより、**1** は結晶格子中に大きな空間を形成した。2 つの purine 環に囲まれた空間は *c*-軸方向に重なる大きな空孔となり、purine 2 分子あたり、7.5 分子の結晶水を含んでいた。空間の大きさは結晶水分子の体積を除くと 891 Å<sup>3</sup> となり、単位格子 (4371 Å<sup>3</sup>) の約 20% に相当する。この結晶体積の 20% を占める大きな空間を持つ構造の安定化には前述のようにシアノ基と purine 環による 2 つのタイプの  $\pi$ - $\pi$  スタッキング、 $\sigma$ - $\pi$  水素結合および水分子を介したネットワークが寄与していると考えられる。

低湿度状態で保存した粉末サンプルの XRD パターンからのリートベルト解析により、低湿度相 **1-deh** の構造を解析した (Figure 1a, b)。低湿度下において脱水したサンプル **1-deh** の構造は **1** と同様に斜方晶系、空間群 *Pbam* であった。低湿度相 **1-deh** では高湿度状態の **1** と比較すると、格子定数は *a*-軸がわずかに収縮 (22.102 → 21.641 Å) し、*b*-軸がわずかに増大 (13.393 → 13.827 Å) していた。また、*c*-軸方向の格子定数はほぼ半分 (7.348 Å) になり、purine 環の積層距離は 7.383 Å (= 14.767/2 Å) からわずかに縮小した。非対称単位は高湿度相 **1** と同様に [Co(H<sub>2</sub>O)] cation, [Co(purine)<sub>2</sub>] cation 及び [W(CN)<sub>8</sub>] anion を 1:0.5:1 の割合で含んでいるが、**1-deh** の非対称単位では構成成分量は **1** の半分になっている。また、**1** の場合は、W<sub>2</sub>Co<sub>3</sub> ユニットあたり、7.5 個の非配位水分子が結晶水として存在していたが、**1-deh** では W<sub>2</sub>Co<sub>3</sub> ユニットあたりの非配位水分子は 3 個になっていた。

低湿度相 **1-deh** の基本的な結晶構造は高湿度相 **1** の結晶構造とほぼ同じである。しかし、高湿度相 **1** では W1 と W2 にそれぞれ 2 つの非架橋 CN 基が 120 度の角で結合していたが、低湿度相 **1-deh** では独立な W 原子は 1 つとなり、この W 原子から 2 つ分の非架橋 CN 基が 3 つの CN 基、C2N2, C4N4 および C10N10 に、占有率 14%、94% 及び 92% で、ディスオーダーしていた。この 3 方向にディスオーダーした非架橋 CN 基 (C2N2-purine, C4N4-purine, C10N10-purine)

を形成していた。purine 環とこれらの  $\pi$ - $\pi$  スタッキングによって形成される空間は **1** と同様、*c* 軸方向に重なる空孔となり、単位結晶格子 (2197 Å<sup>3</sup>) あたり、約 367 Å<sup>3</sup> (約 16%) となった。この大きさは高湿度状態の構造と比較すると約 4 分の 3 になっており、中には W<sub>2</sub>Co<sub>3</sub> ユニットあたり、ディスオーダーした約 3 分子の結晶水が含まれている。

このような構造変化は湿度低下に伴って格子中の結晶水が減少することにより起こったと考えられる。これらの構造を元に、**1** の粉末サンプルに対して熱重量分析を行い、RH が 80% から 10% (25°C) のサンプル中の水分子の数を決定した。試料の重量変化を湿度変化に対してプロットしたところ、水の分子数は湿度の上昇に伴って 8.5 (50%RH) から 10 (80% RH) に増加した。また、湿度を低下させると、10%RH では 7.5 にまで減少し、湿度の変化に伴って、2.5 分子の水が可逆的に脱着することが示された。

### 3. 湿度に対応する構造の変化

粉末サンプルを用いて、異なる湿度条件 (80%RH ~ 0%RH) における XRD パターンを連続的に測定した。得られた結果は、結晶構造が湿度によって徐々に変化することを示している (Figure 2)。高湿度下での XRD パターンは単結晶構造からのシミュレーションパターンと一致しており、高湿度での結晶構造は単結晶と同じであることが確認された。徐々に湿度を下げていくと、粉末 XRD パターンはミラー指数 (110)、(210)、および (212) のピークを除いて、ほとんどの回折ピークの強度が変化し、さらに  $8 \leq 2\theta \leq 24$  には新たな反射が現れた。注目すべきことは、湿度の変動により既存の回折ピークの位置が連続的にシフトするのではなく、湿度の変動により回折ピークの強度が変化し、さらに新たなピークが出現したことである。含水量の変化により多数の中間相を形成する場合には、ピーク位置の連続的な変化が見られるが、この場合にはほとんど観察されない。これは既存の構造が徐々に中間相を経由して変形したのではなく、湿度の変化により新たな部分構造が形成されたことを示している。即ち、低湿度状態での水分子の放出によって構造相転移が引き起こされると考えられる。

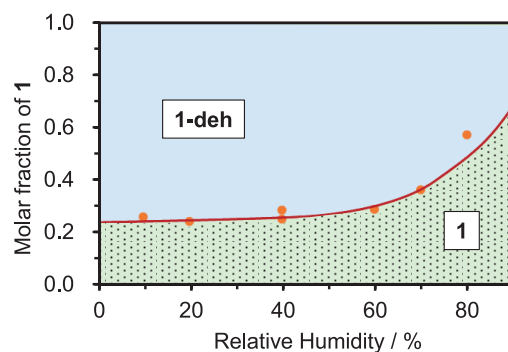
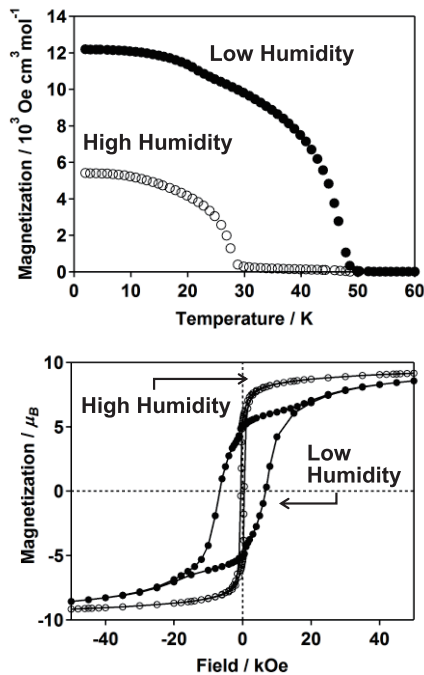


Figure 2. 高湿度相 **1** と低湿度相 **1-deh** のモル分率 (各湿度における XRD データの Rietveld 解析から)

### 4. Co<sub>3</sub>[W(CN)<sub>8</sub>]<sub>2</sub>(purine)<sub>2</sub>(H<sub>2</sub>O)·8.5H<sub>2</sub>O (**1**) の磁性特性

直流磁場下 (5 kOe)、**1** の粉末サンプルの磁化率 ( $\chi_M$ ) の温度依存性を、2 ~ 300 K の温度範囲で測定した。300 K での  $\chi_M T$  値は 9.1 K cm<sup>3</sup> mol<sup>-1</sup> となり、これは、3 つの Co<sup>II</sup> ( $S_{Co(II)} = 3/2$ ,  $g_{Co(II)} = 2.44$ ) および 2 つの W<sup>V</sup> ( $S_{W(V)} = 1/2$ ,  $g_{W(V)} = 2.0$ ) のスピンのみの値に対応す



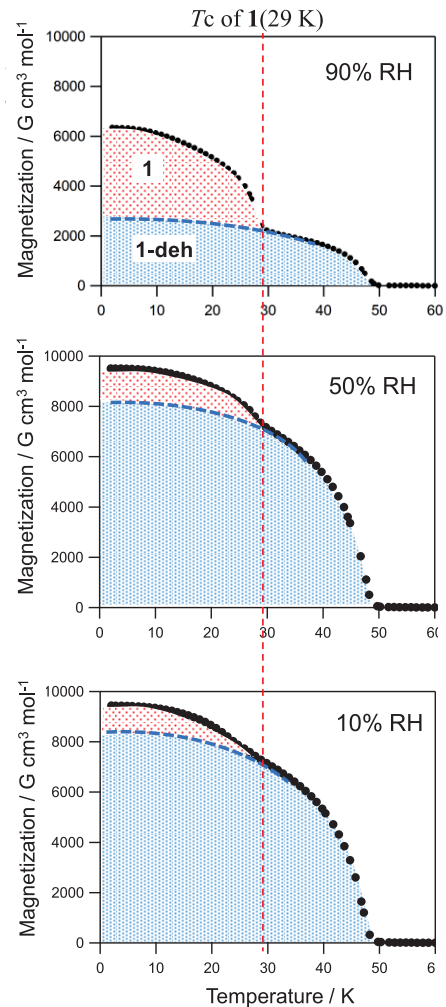


**Figure 3.** 高湿度相 **1** と低湿度相 **1-deh** の磁化特性  
(上) 磁場中冷却磁化 (FCM) 曲線 (外部磁場 10 Oe)  
(下) 磁化ヒステリシス (磁化対外部磁場) 曲線 (2 K)

る。10 Oe の外部磁場下での磁場中冷却磁化 (FCM) 曲線からは、29 K で自発磁化が観測された (Figure 3)。外部磁場 50 kOe での磁化対外部磁場 (2 K) のプロットでは、保磁力 ( $H_c$ ) 0.5 kOe、飽和磁化 ( $M_s$ ) 9.1  $\mu_B$  を観測した。強磁性秩序の推定  $M_s$  値は 8.5  $\mu_B$  であり、観測された  $M_s$  値 9.1  $\mu_B$  はこれよりもわずかに高い。

錯体 **1** は構造中に複数の非配位水分子を含むことから、これらの水分子の脱着による磁気特性の湿度応答性が期待された。湿度を変化させて磁気特性の測定を行ったところ、湿度の低下により FCM 曲線の 2 番目のステップが観測され (Figure 4)、別の磁性相 **1-deh** (キュリー温度  $T_C$  49 K) の形成が示唆された。さらに、湿度を下げると、磁気特性へのこの成分の寄与が増加した。また、 $H_c$  は湿度が低下するに従って増大した。湿度を 10% RH まで下げた後、90% RH まで湿度を戻したところ、再び  $H_c$  は減少し、可逆性を示した。合成直後、水洗せずに乾燥空气中に保存した場合、低湿度成分 **1-deh** は  $T_C = 49$  K、最大 6600 Oe の  $H_c$  (Figure 3) を示した。この錯体 **1-deh** は低湿度で良好な磁気特性 (高いキュリー温度、大きな保持力) を示したが、 $M_s$  と  $\chi_M T$  の値は 高湿度でも低湿度でもほとんど変化しないことから、 $\text{Co}^{\text{II}}$  および  $\text{W}^{\text{V}}$  の電子状態および強磁性は湿度により変化しないと結論した。

これまで、常温常圧下で機能する湿度応答性複合体はほとんど報告されておらず<sup>6</sup>、多くの場合、湿度に回答して徐々に構造変化や磁化率変化が進行する。しかし、以前の研究とは対照的に、**1** の磁化率曲線の変化からは、湿度変化に対して磁化率が徐々に変化するのはではなく、2 つの成分の磁化が足し合わされたと推定される FCM 曲線が得られており、この化合物が特定の磁気応答を伴う 2 相システムのまれな例であることを示している。湿度変化に対し、2 成分の割合が徐々に変化していることが示唆され、即ち、水分子を十分含んだ構造状態 **1** と不足している構造状態 **1-deh** の 2 つの



**Figure 4.** 各湿度における磁化変化 (外部磁場 10 Oe)  
(高湿度相 **1** (赤) と低湿度相 **1-deh** (青) に対応)

成分しか存在せず、それぞれが対応する磁化曲線を持つため、FCM 曲線は湿度によって制御される 2 つの成分比による磁化の合計として得られたと考えられる。

## 5. **1** 及び **1-deh** における超交換相互作用

シアノ基および purine によって架橋した  $\text{Co}^{\text{II}}$  ( $S_{\text{Co(II)}} = 1/2$ ,  $g_{\text{Co(II)}} = 13/3$ ) と  $\text{W}^{\text{V}}$  ( $S_{\text{W}} = 1/2$ ,  $g_{\text{W}} = 2.0$ ) の間の磁気軌道結合によって **1** および **1-deh** の磁気特性が説明できる。**1** では、 $\text{W}^{\text{V}}\text{-CN-Co}^{\text{II}}$  を介した 6 系統の交換相互作用と 1 つの  $\text{Co}^{\text{II}}\text{-purine-Co}^{\text{II}}$  交換相互作用がある。**1-deh** では  $\text{Co}^{\text{II}}\text{-purine-Co}^{\text{II}}$  は変わらないが、シアノ基架橋の数が 3 系統に減少する。この違いは湿度が変化したときに磁性が変化する主な要因の 1 つと考えられる。そこで、**1** および **1-deh** の結晶構造について、結合角の変化から導かれる  $[\text{W}(\text{CN})_8]^{3-}$  アニオン及び  $\text{Co}^{\text{II}}$  中心の軌道対称性を考慮して、 $\text{W}^{\text{V}}\text{-CN-Co}^{\text{II}}$  分子軌道の重なり積分の可能性をそれぞれの対称性の組み合わせで推定した<sup>6,14</sup>。

その結果、**1** ではシアノ基架橋による 6 系統 ( $\text{C1N1}$ ,  $\text{C3N3}$ ,  $\text{C5N5}$ ,  $\text{C6N6}$ ,  $\text{C8N8}$  および  $\text{C9N9}$ ) の  $\text{W}^{\text{V}}\text{-CN-Co}^{\text{II}}$  分子軌道の内、 $\text{W-C6N6-Co}$  以外は弱い軌道の重なりを持つため、弱い強磁性相互作用を誘起し、重なり積分がゼロの  $\text{W-C6N6-Co}$  は強い強磁性相互作用を誘起すると推定された。それに対し、**1-deh** の 3 系統 ( $\text{C1N1}$ ,  $\text{C3N3}$  および

C5N5) の  $W^V$ -CN-Co<sup>II</sup> 分子軌道のうち、2 系統 (W-C1N1-Co および W-C5N5-Co) は、重なり積分がゼロであるために強い強磁性結合を示し、W-C3N3-Co のみが非常に弱い重なりを持ち、弱い強磁性相互作用を誘起する。即ち、**1** では 6 分の 1 であった  $W^V$ -CN-Co<sup>II</sup> の強い強磁性相互作用が、**1-deh** では 3 分の 2 に増加したことになる (Figure 5)。purine 環を介した Co<sup>II</sup>-purine-Co<sup>II</sup> の交換相互作用は 2 つの常磁性中心間の距離が長い為、**1** と **1-deh** のいずれの場合も極めて小さいと推定される。

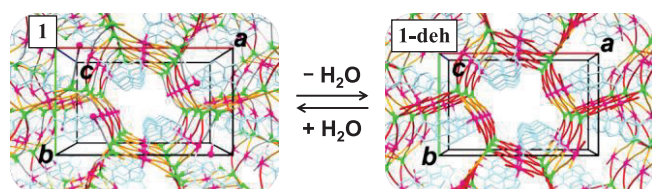


Figure 5. 結晶構造中の磁気相互作用 (左) **1** (右) **1-deh** (赤線：強い強磁性相互作用、黄線：弱い強磁性相互作用)。

大きな面積を持つ平面配位子を用いることにより、**1** では水素結合とシアノ基を含んだ  $\pi$ - $\pi$  スタッキングが広範囲に形成された。このフレームワークによって支えられた構造は水分子を包括する空間を形成し、さらに水分子の出入りによっても強固に保持された。そのため、構造に起因する磁化特性も部分的な水の着脱では変化せず、限界まで保持された。さらに、水分子が減少すると局部的、可逆的な構造相転移が生じ、僅かな結合角の違いが軌道の重なりを変化させ、**1-deh** における磁性変化を誘起した。

## 6. まとめ

大きな多座配位子である purine を用いた分子磁性体 **1** は 3 次元のネットワーク構造を持ち、構造中に結晶水を含む大きな空間を形成した。この錯体は磁性及び構造の可逆的な湿度応答性を示し、高湿度状態 **1** と低湿度状態 **1-deh** の 2 つの独立した状態を生成した。磁性特性は湿度により高湿度状態 **1** と低湿度状態 **1-deh** の割合に相関し、それぞれの状態に対応する磁性の和となって現れた。既知の湿度応答性磁性体においては、ほとんどの事例で構造と磁性特性の変化は湿度に対して連続的な変化を示している。湿度に対応して可逆的な構造変化を伴い、さらに、磁性特性が連続的に変化せず、このように不連続な変化を示す湿度応答性磁性体は初めての例である。

## 7. 謝辞

本稿は筆者が東京大学大学院理学系研究科物性研究室で行なった研究 (Chem. Eur. J. 2019, 25, 11066 – 11073) から抜粋したものである。本研究は東京大学大学院理学系研究科大越慎一教授のご支援ご指導のもとに行われたものであり、ここに厚く御礼申し上げる。

## 8. 参考文献

- 1) a) J. Jiang, Y. Zhao, Omar M. Yaghi, J. Am. Chem. Soc., 138, 3255 (2016). b) S. Kitagawa, R. Kitaura and S. Noro, Angew. Chem. Int. Ed., 43, 2334 (2004).
- 2) a) S. Ohkoshi, S. Yoroze, O. Sato, T. Iyoda, A. Fujishima and K. Hashimoto, Appl. Phys. Lett. 70, 1040 (1997). b) E. Coronado, M. C.

- Gimenez-Lopez, G. Levchenko, F. M. Romero, V. Garcia-Baonza, A. Milner and M. Paz-Pasternak, Pressure-Tuning of Magnetism and Linkage Isomerism in Iron(II) Hexacyanochromate. J. Am. Chem. Soc., 127, 4580–4581 (2005). c) S. Ohkoshi, H. Tokoro, T. Matsuda, H. Takahashi, H. Irie and Hashimoto, K., Angew. Chem., Int. Ed., 46, 3238 (2007).
- 3) M. Yoon, R. Srirambalaji, K. Kim, Chem. Rev., 112, 1196 (2012).
  - 4) a) S. S. Kaye, J. R. Long, J. Am. Chem. Soc., 127, 6506 (2005). b) R. B. Getman, Y.-S. Bae, C. E. Wilmer, R. Q. Snurr, Chem. Rev., 112, 703 (2012).
  - 5) a) Y.-C. He, J. Guo, H.-M. Zhang, J.-F. Ma, Y.-Y. Liu, CrystEngComm, 16, 5450–5457 (2014). b) S. Chorazy, A. Hoczek, M. Kubicki, H. Tokoro, S. Ohkoshi, B. Sieklucka, R. Podgajny, CrystEngComm, 18, 1495 (2016).
  - 6) a) S. Ohkoshi, K. Arai, Y. Sato, K. Hashimoto, Nat. Mater., 3, 857-861 (2004). b) N. Ozaki, H. Tokoro, Y. Miyamoto, S. Ohkoshi, New J. Chem., 38, 1950 (2014). c) K. Imoto, D. Takahashi, Y. Tsunobuchi, W. Kosaka, M. Arai, H. Tokoro, S. Ohkoshi, Eur. J. Inorg. Chem., 4079 (2010).
  - 7) S. Ohkoshi, H. Tokoro, Acc. Chem. Res., 45, 1749 (2012), and references therein.
  - 8) a) S. Ohkoshi, S. Takano, K. Imoto, M. Yoshikiyo, A. Namai, H. Tokoro, Nat. Photon. 8, 65 (2014). b) N. Ozaki, H. Tokoro, Y. Hamada, A. Namai, T. Matsuda, S. Kaneko, S. Ohkoshi, Adv. Funct. Mater., 22, 2089 (2012). c) P. Przygodzien, T. Korzeniak, R. Podgajny, B. Sieklucka, Coord. Chem. Rev., 250, 2234 (2006).
  - 9) S. Ohkoshi, Y. Tsunobuchi, H. Takahashi, T. Hozumi, M. Shiro, K. Hashimoto, J. Am. Chem. Soc., 129, 3084 (2007).
  - 10) a) S. Wang, P. Day, L. M. Toma, M. Julve, J. D. Wallis, Inorg. Chim. Acta, 359, 3283 (2006). b) S. H. Etaiw, D. M. Abd El-Aziz, A. S. Badr El-din, Polyhedron, 28, 873 (2009).
  - 11) K. Avasthi, L. Shukla, R. Kant, K. Ravikumar, Acta Cryst., C70, 555 (2014).
  - 12) J. F. Malone, C. M. Murray, M. H. Charlton, R. Docherty, A. J. Lavery, J. Chem. Soc., Faraday Trans., 93, 3429 (1997).
  - 13) a) S. Alvarez, Dalton Trans., 42, 8617 (2012). b) Y. V. Nelyubina, K. A. Lyssenko, Chem. Eur. J., 18, 12633 (2012).
  - 14) M. Verdager, G. S. Girolami, Magnetism: Molecules to Materials V (Eds.: J. S. Miller, M. Drillon), Wiley-VCH, Weinheim, 283–346 (2005).



# 可積分ハミルトン力学系とその摂動問題

伊藤 秀一 \*

## Integrable Hamiltonian systems and their perturbation problems

Hidekazu ITO \*

### 1. はじめに

人工衛星の打ち上げに始まる宇宙開発が始まってから 60 年以上が経ち、今日では国際宇宙ステーションでの宇宙飛行士たちの活動が報じられたり、また昨年（2020 年）12 月には探査機「はやぶさ 2」が小惑星リュウグウの石を持ち帰り、その成功に日本中が沸いたことは記憶に新しいことと思います。それらの背景にはさまざまな技術の裏付けがあることは間違いありませんが、天体も宇宙船も、その運動を支配している基本法則は「万有引力の法則」にあり、これらの成果の根底には 17 世紀に遡るニュートン力学があります。ニュートンは力学法則とともに、数学においても今日の科学技術の発展の基礎となった微積分法を創り出しており、数学と物理学、さらには機械工学などの工学分野は互いに影響を与えあいながら発展してきました。

数学の研究分野のなかに力学系（Dynamical systems）と呼ばれる分野があります。ニュートンの運動法則は、万有引力によってお互いに影響する太陽系の天体が、時間に関する 2 階微分（加速度）を含んだ複数の式（微分方程式系）に従って運動することを教えてくれます。これは「決定論」の世界であり、考えているシステム（たとえば惑星系）を構成するすべての要素（質点系）のある時刻での位置と速度が与えられれば、その構成要素の運動は一意的に定まります。これらの運動の理解は、われわれの一生のような「短い」時間の間なら難しいものではありませんが、何千万年といった長時間の間の運動となるとそう話しは簡単ではありません。

力学系とは、このような決定論的法則によって支配されるシステムのことで、典型的には微分方程式系の解の時間発展（連続時間の場合）、あるいは写像の繰り返し（離散時間の場合）を指します。そして、それらの軌道の構造を数学的に追求する研究分野を力学系理論、あるいは簡潔に力学系と呼びます。簡単な微分方程式は求積法と呼ばれる手法によって具体的に解を求めることができ、それは微積分法の威力そのものなわけですが、残念ながらそのような微分方程式は例外的で、実際の自然現象を記述している微分方程式のほとんどは具体的に解くことができません。

したがって、力学系の問題とは、このような具体的に解くことのできない微分方程式の解の挙動がどのようなものかを明らかにすることにあるともいえます。

本稿では、天体の運動をめぐる数学からのアプローチを題材として力学系という分野の紹介を行うとともに、筆者の研究成果についての紹介を行いたいと思います。

### 2. 天体力学とハミルトン力学系

$n$  個の天体が万有引力の法則によって相互作用を及ぼしあうときの運動方程式は、質量  $m_k$  の天体  $\mathbf{P}_k$  の位置を  $\mathbf{q}_k = (x_k, y_k, z_k) \in \mathbf{R}^3$  とすると、次のように書けます。

$$(1) \quad m_k \ddot{\mathbf{q}}_k = - \sum_{l \neq k} \frac{G m_k m_l (\mathbf{q}_k - \mathbf{q}_l)}{|\mathbf{q}_k - \mathbf{q}_l|^3} \quad (k = 1, \dots, n)$$

ここで、 $G$  は万有引力定数、ドット  $(\cdot)$  は時間微分を表し、 $\ddot{\mathbf{q}}_k = d^2 \mathbf{q}_k / dt^2$ 、 $|\mathbf{q}_k - \mathbf{q}_l|$  はベクトル  $\mathbf{q}_k - \mathbf{q}_l$  のノルム（長さ）を表します。これが天体力学における  $n$  体問題の方程式です。太陽系の場合、太陽の質量は他の惑星に比べて圧倒的に大きいので（次に大きいのは木星で、その質量は太陽の約千分の 1）、 $\mathbf{P}_1$  を太陽とし、他の天体の質量を 0 とする近似を行うと、(1) の両辺を  $m_k$  で割れば

$$(2) \quad \ddot{\mathbf{q}}_1 = 0, \quad \ddot{\mathbf{q}}_k = - \frac{m_l (\mathbf{q}_k - \mathbf{q}_1)}{|\mathbf{q}_k - \mathbf{q}_1|^3} \quad (k = 2, \dots, n)$$

となり、第 1 式は  $\mathbf{P}_1$  が等速直線運動をすることを意味し、太陽が静止しているとみなせる座標系では、第 2 式は第 1 式も合わせれば、残りの天体と太陽との相対位置  $\mathbf{q}_k - \mathbf{q}_1$  は中心力場（ケプラー運動）に従い、太陽を焦点とする楕円軌道を描くことがわかります。これは「求積できる」系であり、これを可積分系とも呼ぶ（ただしただちにその解が時間の関数として表せるわけではない）。この近似を行なって考えると、惑星は未来永劫、太陽の周りの楕円軌道を描くことになり、これはケプラーの法則に相当します（惑星の中で、火星の離心率は大きいので、それがケプラーの法則の発見につながったと考えられています）。しかし、きわめて長い時間の間の運動を考えると、いま無視した天体の質量は

無視できないものになります。このように「可積分系に近い」系を近可積分系と呼びます。なお、(1)において $n=2$ の場合は以上のような近似をしなくても、 $q_2 - q_1$  がケプラー問題の運動方程式を満たし、 $P_1$  と  $P_2$  の質量中心  $x = (m_1 q_1 + m_2 q_2)/(m_1 + m_2)$  が  $\ddot{x} = 0$  を満たすことから求積できます。

このような近可積分系を扱う手法として、摂動論と呼ばれる手法が開発され数学や力学の研究に大きな影響を与えてきました。また、ニュートンの運動方程式の表現形式を追求する中で、ラグランジュ形式やハミルトン形式と呼ばれる定式化が行われました。ちなみに、(1) は  $p_k = m_k \dot{q}_k$  (運動量) とおくと、

$$(3) \quad \begin{cases} \dot{q}_k = \frac{\partial H}{\partial p_k}, & \dot{p}_k = -\frac{\partial H}{\partial q_k} \quad (k=1, \dots, n) \\ H(q, p) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \frac{1}{m_k} |p_k|^2 - \sum_{k>l} \frac{Gm_k m_l}{|q_k - q_l|} \end{cases}$$

と書けます。この1行目の微分方程式系を  $H$  をハミルトニアンとするハミルトン系と呼び、この方程式の形だけから  $H$  の値が解  $(q(t), p(t))$  に沿って不変なことがわかります。今の場合、 $H(q, p)$  の第1項は系の運動エネルギー、第2項はポテンシャルエネルギーであり、 $H$  はそれらを合わせた全エネルギーを表しています。 $q_k, p_k$  は3次元ベクトルなので、(3) は  $6n$  連立の1階常微分方程式であり、系の位置は  $3n$  個の変数  $q_1, \dots, q_n$  によって表されることから、これを自由度  $3n$  のハミルトン系であるといえます。先に述べたように2体問題は求積できます。ということは12次元の連立系が解けるわけで、われわれが微分方程式の求積として経験する単純な方程式からは思いもよらない連立系が求積できるわけです。もちろん、定数係数の線形微分方程式系のように、線形代数の知識で容易に求積できる系もあります。が、(1) (あるいは(3)) は非線形の微分方程式です。このことは、 $n=3$  の場合、つまり3体問題も求積できるのではないかという期待につながるのですが、そのような方法はみつかりません。実際、19世紀末にポアンカレ (H. Poincaré) はハミルトン系の形で書かれた近可積分系を考察し、それを通じて  $n(\geq 3)$  体問題は求積できる見込みがないことを示しました<sup>14), 3), 15)</sup>。ポアンカレはさまざまな分野で大きな足跡を残した大数学者で「ポアンカレ予想」などでも有名ですが、微分方程式の解の定性的研究という、幾何学的な観点からの研究を推進し、それが今日の力学系という研究分野に発展しています<sup>7), 10), 17)</sup>。

本論からは少し脱線してしましますが、微分方程式をハミルトン系(3)の形で書くことにはさまざまな利点があります。それは、正準変換というある範疇の座標変換によって方程式の形が変わらないことにあります。つまり変数の変換を行うと、一般に微分方程式の形は全く変わってしましますが、ハミルトン系では単にハミルトニアン  $H$  を新しい変数によって書き直せばよいのです。これはラグランジュ形式でも同様で、解析力学を学んだ方の常識でもあります。数学的には何らかの「構造」があって、それが不変に保たれるような変換を考えている、といえます。今の場合、シンプレクティック構造 (正準構造) と呼ばれ、1980年代以降にシンプレクティック幾何学と呼ばれる分野が誕生しています<sup>2), 7), 12), 15)</sup>。また、ハミルトン系やオイラー・ラグランジュ方程式の解はある変分原理、すなわち2点を結ぶ曲線全体の集

合の上で定義されたある関数が停留するという条件を満たします<sup>7), 15)</sup>。このような変分問題の研究は数学のみならず、物理学や工学などさまざまな分野に影響を及ぼしています。

### 3. 共鳴現象と小分母の困難

一般的な理論の話が続いたので、ここで簡単な微分方程式をめぐら問題に目を向けてみましょう。壁につながれた振動数  $\omega > 0$  のバネの振動で、壁が振動数  $\nu > 0$  で振動するような「強制振動」を考えると、その運動はバネの伸びを  $x$  とし、壁の振動の振幅を  $\varepsilon > 0$  とすると、 $x$  の運動は微分方程式

$$(4) \quad \ddot{x} = -\omega^2 x + \varepsilon \cos \nu t$$

に従います。これは  $\varepsilon = 0$  ならば単振動として、一般解が  $\cos \omega t$  と  $\sin \omega t$  の1次結合として与えられ、 $\varepsilon > 0$  の場合の一般解は

$$x(t) = C_1 \cos \omega t + C_2 \sin \omega t + \frac{\varepsilon}{\omega^2 - \nu^2} \cos \nu t$$

と求まります。そして、 $t=0$  で  $x=\xi$ ,  $\dot{x}=\eta$  となる解は

$$(5) \quad \begin{aligned} x(t) &= \xi \cos \omega t + \frac{\eta}{\omega} \sin \omega t + \frac{\varepsilon}{\omega^2 - \nu^2} (\cos \nu t - \cos \omega t) \\ &\rightarrow \xi \cos \omega t + \frac{\eta}{\omega} \sin \omega t + \frac{\varepsilon t}{2\omega} \sin \omega t \quad (\nu \rightarrow \omega) \end{aligned}$$

となり、 $\varepsilon$  がどんなに小さくても、振動数  $\nu$  が  $\omega$  に近づくにつれて振動の振幅は増大することがわかります。これは共鳴現象 (共振) と呼ばれ、地震などの揺れに対する建築物の強度に影響を及ぼすことはよく知られています。

同じようなことは宇宙でも起きないでしょうか? 例えば、土星と木星の公転周期 (太陽の周りを回る周期) は 5:2 に近く、地球時間の約 60 年でほぼ前と同じ位置関係になります。これが完全に周期的に起こるとすると、今述べた単純なモデルと同じような現象が生じて、惑星が徐々に遠ざかったり、逆に徐々に近づいて衝突を起こす?! と心配することもそんなに荒唐無稽とはいえないのです。実際、火星と木星の間に数多く存在する小惑星は主に太陽と木星からの引力によって運動しているとモデル化することができますが、小惑星の分布の中でその公転周期が木星の公転周期と 1:1 や 1:2, 1:3, 2:3 など短い整数比に近いものは極端に少ないことが知られています。これは19世紀に発見され、カークウッドの間隙 (Kirkwood's gap) と呼ばれています。また、土星の環にもそのような間隙があり、それらも土星の衛星との間の共鳴が何らかの役割を果たしていると考えられます<sup>1)</sup>。

上述した強制振動の解を表す式(5)では、分母に  $\omega^2 - \nu^2$  が現れ、これは  $\nu$  が  $\omega$  に近づくとき 0 に収束します。その意味で「小さな分母」として解の不安定化との関係が予想されます。小惑星の運動の場合、その解を摂動パラメータに関して展開して、その係数をフーリエ級数として表すと、その係数について同様の小分母が現れます。これは天体力学における「小分母の困難」として長く知られているものですが、一見単純な問題でありながら、数学的な取り扱いの難しい問題なのです。これについては20世紀後半になりようやく、公転周期が「有理数によって近似しにくい」という条件を満たす無理数比の小惑星は安定的に存在し得ることの数学的な裏付けが得られました。このシステムとしての解は準周期解 (quasi-periodic solution) と呼ばれるものになります。この結果は、1950年代にコルモゴロフ (A.N. Kolmogorov) によ

り提唱され、アーノルド (V.I. Arnold) とモーザー (J. Moser) によって別々にその理論の基礎部分が構築されたもので<sup>2),3),11),16)</sup>, 彼らの頭文字を冠して KAM 理論と呼ばれ、その後今日までさまざまな方向に発展を続けています<sup>8),9),15)</sup>。ここで証明された準周期解はすべての時間  $-\infty < t < \infty$  にわたり存在し続けるもので、自由度 2 の近可積分ハミルトン系の場合は、ここで示される準周期解の初期条件をわずかにだけ変化させても解はその準周期解の近くに留まることが数学的に証明されます<sup>16)</sup>。例えば、小惑星の運動を記述する平面上の典型的な制限 3 体問題は自由度 2 の近可積分系になり、この結果の適用できるケースになります。が、実際には数学的に存在が保証されるためには、摂動パラメータは極めて小さいことが必要で、現実には適用できません。この弱点を開する理論として、ネホロシヨフ (N.N. Nekhoroshev) は、その初期条件が準周期解のものと十分近いとき、解は十分長い時間の間 (ただし有限時間) その近くにとどまることを数学的に保証し得る理論を構築しました<sup>13)</sup>。これら KAM 理論や Nekhoroshev 理論、さらには数値積分法の発展に基づくさまざまな数値計算によって、太陽系はこの先 10 億年程度は惑星間の衝突や系外に惑星が消え去るようなことはなく、その大まかな姿は変わらないであろうと考えられています<sup>1)</sup>。ただし、小惑星の地球への衝突といったより身近な問題が起こらないと保証しているわけではありません。また、数十億年以上の時間スケールでは惑星間の衝突を含むさまざまな不安定化が起こり得るとも考えられています。このような、解の挙動の複雑さを理解するには、強制振動のときのような線形系に対する理解の拡張では不十分で、解明されていないさまざまな問題があります。天体力学のような複雑な系でなくても、3 次元の簡単な非線形微分方程式系では、(4) のような線形系からは予想もできないことが起こり得ます。それらはハミルトン力学系ひいては力学系一般の中心的問題ともいえます<sup>10),17)</sup>。

#### 4. 力学系の標準形理論

求積できない微分方程式系の解を研究するためには、まず構造のよくわかった解を見つけ、さらにその近傍での解の挙動を調べる、という考え方が基本的です。その場合、対象になる系はハミルトン系 (3) のように 1 階の微分方程式系に直して考えるのが普通で、(3) の場合の  $q_k, p_k$  ( $k = 1, \dots, n$ ) のすべての変数を合わせた  $6n$  次元空間を相空間 (phase space) といいます。数学以外では位相空間と呼ぶことも多いかもしれません。その相空間において平衡解 (静止している解) や周期解 (ある時間  $T > 0$  で初期点に戻ってくる解で、この周期  $T$  で同じ運動が繰り返される解) が「構造のよくわかった解」の代表です。 $n$  体問題には平衡解は存在しませんが、平面 3 体問題では 3 体の重心のまわりを角速度一定で回転する周期解があり、それは回転座標系では平衡解になります<sup>16)</sup>。

これらの解の近傍での解の振る舞いを解析するための道具として、座標変換によって微分方程式をより簡単な形 (標準形) に変換するというアイデアがあります。これはポアンカレが創始し、バーコフ (G. D. Birkhoff) によってハミルトン系の場合に拡張されたもので<sup>4)</sup>、現代の力学系研究でも基礎になっている

ものです。この結果を平衡点の近傍でのハミルトン系の場合に述べると以下ようになります。

あらためてその座標が<sup>8)</sup>  $(q_1, \dots, q_n, p_1, \dots, p_n) \in \mathbf{R}^{2n} = \mathbf{R}^n \times \mathbf{R}^n$  で与えられる  $2n$  次元相空間で、原点  $(q, p) = (0, 0) \in \mathbf{R}^{2n}$  を平衡点にもつハミルトン系

$$(6) \quad \begin{cases} \dot{q}_k = H_{p_k}, & \dot{p}_k = -H_{q_k} & (k = 1, \dots, n), \\ H(q, p) = H_2(q, p) + H_3(q, p) + \dots \end{cases}$$

を考えます。ここで、 $H_d(q, p)$  ( $d = 2, 3, \dots$ ) は  $q_1, \dots, q_n, p_1, \dots, p_n$  に関する  $d$  次同次式です。 $H_{q_k}(0, 0) = H_{p_k}(0, 0) = 0$  なので、確かに  $(q, p) = (0, 0)$  は平衡解です。とくに、

$$(7) \quad H_2(q, p) = \sum_{k=1}^n \frac{\omega_k}{2} (q_k^2 + p_k^2)$$

の場合を考えると、(6) のハミルトニアン  $H$  をこの  $H_2$  で置き換えた線形系は

$$(8) \quad \dot{q}_k = \omega_k p_k, \quad \dot{p}_k = -\omega_k q_k \quad (k = 1, \dots, n)$$

となり、これは  $n$  個の分離された単振動であり、その解は

$$q_k(t) = C_1 \cos \omega_k t + C_2 \sin \omega_k t, \quad p_k(t) = -C_1 \sin \omega_k t + C_2 \cos \omega_k t,$$

となり、各  $(q_k(t), p_k(t))$  は円周  $q_k^2 + p_k^2 = \text{定数}$  上を周期的に動きます。したがって、 $k = 1, \dots, n$  すべてを合わせると、解  $(q(t), p(t))$  は相空間  $\mathbf{R}^{2n}$  上で

$$q_k^2 + p_k^2 = c_k \geq 0 (\text{定数}) \quad (k = 1, \dots, n)$$

によって定義される集合上を動きます。これは  $c_k > 0$  となる  $k$  が  $d$  個だとすると、 $d$  次元トーラスをつくり、システムとしての解  $(q(t), p(t))$  は  $d$  次元トーラス上の軌道になります。 $n = d = 2$  の場合であれば、 $\omega_1$  と  $\omega_2$  が有理数比ならば、ある時刻  $T > 0$  が存在して、 $q(t+T) = q(t)$ ,  $p(t+T) = p(t)$  となる周期軌道ですが、 $\omega_1$  と  $\omega_2$  が無理数比ならば、解は決して周期的にはならず、2 次元トーラス上を稠密に埋め尽くす軌道になります。これを準周期軌道と呼びます。

以上は線形系 (8) についての考察ですが、非線形系 (6) に対しては、正準変換 (シンプレクティック変換)  $(q, p) = \varphi(x, y)$  を行なって (6) を次のように変換することができます。

**定理 1** (G.D. Birkhoff<sup>4),7),15)</sup> ハミルトン系 (6)-(7) に対して、線形化した系 (8) の振動数  $\omega_1, \dots, \omega_n$  が条件

$$(9) \quad \begin{cases} 0 < \sum_{j=1}^n |k_j| \leq d \text{ を満たす任意の整数 } k_1, \dots, k_n \text{ に対して} \\ \sum_{j=1}^n k_j \omega_j \neq 0 \end{cases}$$

を満たすならば、恒等変換に近い解析的な正準変換  $(q, p) = \varphi(x, y) = (x, y) + \dots$  が存在して

$$(10) \quad \begin{cases} H(\varphi(x, y)) = h(\tau) + O(|x| + |y|^{d+1}) \\ \tau = (\tau_1, \dots, \tau_n), \quad \tau_k = \frac{1}{2} (x_k^2 + y_k^2) \end{cases}$$

とできる。□

以上で、解析的とは変換の各成分関数が絶対収束するべき級数として表されることをいいます。これは複素微分可能ということ



と同じです。また、条件 (9) は  $d$  次の非共鳴条件と呼ばれます。 $h(\tau)$  をハミルトニアンとするハミルトン系は

$$(11) \quad \dot{x}_k = \frac{\partial h}{\partial y_k} = h_{\tau_k} y_k, \quad \dot{y}_k = -\frac{\partial h}{\partial x_k} = -h_{\tau_k} x_k \quad (k=1, \dots, n)$$

となり、解  $(x(t), y(t))$  に沿って

$$\frac{d\tau_k}{dt} = x_k \dot{x}_k + y_k \dot{y}_k = 0$$

となります。したがって、 $\tau_k$  は解に沿って不変なので、(10) の解は線形系のときと同様に、 $n$  以下の次元のトーラス上を動く周期軌道または準周期軌道になります。この事実を、 $h$  をハミルトニアンとするハミルトン系は可積分であるといいます。したがって、 $H$  をハミルトニアンとする系は近可積分系と似た状況になっているとみなせるのです。(10) の形で書かれたハミルトニアン  $H$  を  $d$  次のパーコフ標準形と呼びます。とくに、 $\omega_1, \dots, \omega_n$  が有理的に独立、すなわち  $k_1, \dots, k_n$  を整数とすると、

$$(12) \quad \sum_{j=1}^n k_j \omega_j = 0 \text{ となるのは } k_j = 0 \ (j=1, \dots, n) \text{ のときのみ}$$

となるならば、どれだけでも高い次数まで  $H$  を可積分なハミルトニアン  $h(\tau)$  で近似できることになります。ただし、このときの  $\varphi$  の各成分は  $(x, y)$  のベキ級数になり、収束するとは限らないので、 $H$  をハミルトニアンとする系の解が周期軌道や準周期軌道になることが示されたわけではありません。実際、正準変換  $\varphi$  の各成分関数を多変数ベキ級数として表すとき、係数の分母には  $\sum_{j=1}^n k_j \omega_j$  が現れ、非共鳴条件 (12) が成り立ったとしても、この小分母は 0 に集積するので小分母の困難が生じるのです。また、実際の解の挙動としても、 $H$  がどんなに高次の可積分ハミルトニアン  $h(\tau)$  で近似できたとしても、「カオス的」と呼ばれる複雑で予測不可能な振る舞いを示す解が現れると考えられています。

このような微妙な状況において、解析的なハミルトニアン  $H(q, p)$  に対して条件 (12) が成り立つとしたとき、解析的な正準変換  $(q, p) = \varphi(x, y)$  によって  $H(\varphi(x, y)) = h(\tau)$  とできるのはいかなるときでしょうか？これについて次の結果が成り立ちます。

**定理 2<sup>5)</sup>** 解析的ハミルトニアン系 (6)-(7) に対して、条件 (12) が成り立つとする。このとき、 $H(\varphi(x, y)) = h(\tau)$  となるような解析的正準変換  $(q, p) = \varphi(x, y)$  が存在するためには、系 (6)-(7) が  $n$  個の関数的に独立な解析的第一積分を持つことが必要かつ十分である。□

ここで、系 (6) の第一積分とは、(6) の解  $(q(t), p(t))$  に沿ってその値が不変な関数  $G(q, p)$  のことです。また、それらが関数的に独立とは行列  $(\partial G_i / \partial z_j)$  が定義域の稠密な部分集合上で階数  $n$  をもつことを意味します。ただし  $(q, p) = (z_1, \dots, z_n, z_{n+1}, \dots, z_{2n})$  です。(時間によらない) ハミルトン系のハミルトニアンはその系の第一積分です。 $n$  体問題 (1) の場合、ハミルトニアンは全エネルギーでしたが、このほかに、運動量ベクトル、角運動量ベクトルのそれぞれ 3 つの成分も (1) の第一積分になっています。これらはそれぞれ運動の保存則に対応しています。

$h(\tau)$  をハミルトニアンとする系に対しては、 $\tau_k$  が  $n$  個の第一積分になるので、定理 2 の正準変換が収束するためには  $n$  個の

第一積分の存在が必要なことは明らかですが、それは十分条件にもなるわけです。この結果はそれまではある種の付加条件を課した上で示されていましたが、その付加条件を取り除いて証明することに成功したもので、さまざまな一般化もなされています<sup>6), 18), 19)</sup>。また、パーコフ標準形は非線形偏微分方程式に対する準周期解の存在を考える際の基礎になります<sup>9)</sup>。

なお、この定理に現れる  $n$  個の第一積分は非共鳴条件のもとでは、ポアソン可換<sup>7), 15)</sup> という性質をもち、じつはハミルトン系のリウビル (Liouville) の意味での可積分性と呼ばれる定義を満たします。このとき、 $G_1, \dots, G_n$  の特異点でない点 (正則点という) では、より簡単な考察によって解はすでに述べた周期軌道または準周期軌道と呼ばれるものになることが示されます (リウビル・アーノルドの定理)<sup>7), 15)</sup>。(求積できる系の代表的な例として紹介した 2 体問題 (あるいはケプラー問題) もこの意味で可積分になります)。定理 2 はその結果を特異点にまで拡張したものになっており、可積分系ではその特異点における標準形への変換の際に小分母が現れるにも関わらず、幾何学的制約によって座標変換の収束性が得られることを示した自然な結果になっています。また、ハミルトン系がリウビルの意味で可積分ならば、その特異点の近くでも「解ける座標」が見つかり、摂動問題を扱うための基礎づけを与えたことになります。

本稿では、天体力学の方程式を近可積分という観点から紹介し、最後に標準形理論に関する筆者の研究を紹介しました。力学系の研究の目的は自然現象を記述する微分方程式や写像の繰り返しに対して、解の振る舞いをより深く理解することにあります。ここで取り上げた話題以外にも、決定論にもとづくダイナミクスが重要な役割を果たす問題は数学はじめ諸科学で広く現れ、さまざまな角度から研究が行われています。

## 参考文献

- [1] V.I. アーノルド, 数理解析のパイオニアたち (蟹江幸博訳), シュブリンガー東京 (1999)。
- [2] V. I. Arnold, *Mathematical Methods of Classical Mechanics* (2nd Ed.), Springer-Verlag (1989).
- [3] V. I. Arnold, V. V. Kozlov and A. I. Neishtadt, *Mathematical Aspects of Classical and Celestial Mechanics* (3rd Ed.), Springer-Verlag (2006).
- [4] G. D. Birkhoff, *Dynamical Systems*, Amer. Math. Soc. (1927, 1966).
- [5] H. Ito, Convergence of Birkhoff normal forms for integrable systems, *Comment. Math. Helvetici* 64, 412–461 (1989).
- [6] H. Ito, Birkhoff normalization and superintegrability of Hamiltonian systems, *Ergod. Th. & Dynam. Sys.* 29, 1853–1880 (2009).
- [7] 伊藤秀一, 常微分方程式と解析力学, 共立出版, (1998).
- [8] 伊藤秀一, 三体問題と摂動論, 数学セミナー 59(1), 28–32 (2020).
- [9] T. Kappeler and J. Pöschel, *KdV & KAM*, Springer-Verlag, (2003).
- [10] 國府寛司, 力学系の基礎, 朝倉書店, (2000).
- [11] J. Moser, Stable and random motions in dynamical systems - with special emphasis on celestial mechanics-, *Ann. of Math. Studies* 77, Princeton Univ. Press. (1973).
- [12] J. Moser and E. Zehnder, *Notes on Dynamical Systems*, Amer. Math. Soc. (2005).
- [13] N. N. Nekhoroshev, An exponential estimate of the time of stability of nearly integrable Hamiltonian systems, *Russian Math. Surveys* 32, 1-65 (1977).



- [14] H. Poincaré, *Méthodes nouvelles de la mécanique céleste*, tome I (1883), II (1893), III (1899), Gauthier-Villars, 英訳 (D. I. Goroff 解説) : “New methods of celestial mechanics Vol.1–3, History of Modern Physics and Astronomy 13, Amer. Inst. Phys (1993). 第 3 巻の和訳 : 「ポアンカレ : 常微分方程式」 福原満州雄・浦太郎訳・解説, 共立出版 (1970).
- [15] 柴山允瑠, 重点解説「ハミルトン力学系」 - 可積分系と KAM 理論を中心として -, サイエンス社, (2016).
- [16] C.L. Siegel and J.K. Moser, *Lectures on Celestial Mechanics*, Springer-Verlag, (1972).
- [17] M. W. Hirsch, S. Smale and R. L. Devaney (桐木, 三波, 谷川, 辻井訳), *力学系入門 - 微分方程式からカオスまで -* (原著第 3 版), 共立出版 (2017).
- [18] L. Stolovitch, Normalization holomorphe d’algèbres de type Cartan de champs de vecteurs holomorphes singuliers, *Ann. of Math.* 161, 589–612 (2005).
- [19] Nguyen Tien Zung : Convergence versus integrability in Birkhoff normal form, *Ann. of Math.* 161, 141–156 (2005).

# 固有振動数成分除去法による天井走行クレーンの制振

栗原 海\*

## Vibration control of an overhead crane by elimination of the natural frequency component

Kai KURIHARA\*

### 1. 緒言

工場等で用いられている天井走行クレーンの運転は、高速かつ正確な位置決めを求められている。現状ではそのような運転の実現を長年の経験に基づいた熟練者に頼らざるをえないが、物流が年々拡大傾向にある中で、安全性の向上や作業の効率化のため、天井走行クレーンを自動化することへの要望は強くなっている。自動化を行うにあたっては、目標位置における吊り荷の残留振動を抑制するための手法が必要となる。この問題に対しては多くの研究が行われており、Abdel-Rahman ら<sup>(1)</sup>は 2001 年以前の、Ramli ら<sup>(2)</sup>は 2000 年から 2016 年までの、クレーンのモデリングおよび制御に関する研究を取りまとめている。

研究は主にクローズドループ制御とオープンループ制御に大別できる。クローズドループ制御は制御系のパラメータ変化に対するロバスト性が高く、外乱にも対応できるという長所がある一方で、吊り荷の振れ角を測定するための計測機器が必要となるという短所もある。計測機器にはその設置費用やメンテナンス費用がかかり、また、計測機器が故障した際に信頼性が低下してしまうリスクもはらんでいる。一方、オープンループ制御にはクローズドループ制御で必要となる計測機器が不要なため、上述したような問題点は生じない。

本研究では、オープンループ制御による天井走行クレーンの残留振動抑制を目的として、台車軌道の設計手法に固有振動数成分除去法を提案している。この手法は、不減衰線形系に関して外力が系の固有振動数の成分を持たなければ残留振動は生じない、という性質<sup>(3,4)</sup>を利用したものである。Bhat ら<sup>(5)</sup>および山浦ら<sup>(3)</sup>はこの性質を利用したオープンループ制御による多自由度系の制振について検討しており、さらに、山浦ら<sup>(3)</sup>は固有振動数付近の複数の振動数成分を除去することによって、固有振動数の同定誤差に対するロバスト性の向上を図っている。しかし、両者とも適用対象は線形系に留まっているため、実際の機械への適用を考えると不十分である。これに対して、本報で提案する固有振動数成分除去法では線形系のみならず非線形系に対しても上記の性質を利用した制振が可能である。

本報では、天井走行クレーンに固有振動数成分除去法を適用して

台車軌道を設計する方法について述べる。まず、線形不減衰系を用いて固有振動数成分除去法の基本概念を示す。次に、天井走行クレーンモデルを提示し、固有振動数成分除去法を用いた台車軌道の設計方法について述べる。最後に、数値シミュレーションによって本手法の有効性を検証する。

### 2. 固有振動数成分除去法の基本概念

本章では、質量  $m$  の質点とばね定数  $k$  のばねから成る線形不減衰 1 自由度系に対して有限時間だけ外力が作用するときの残留振動を例に、固有振動数成分除去法の基本概念について述べる。外力  $f(t)$  が  $t = 0$  から  $t = T$  まで作用するときの系の運動方程式は、質点の変位を  $x$  とし、固有角振動数  $\omega_n = \sqrt{k/m}$  を用いて次のように表される。

$$\ddot{x} + \omega_n^2 x = \frac{f(t)h(t)}{m}, \quad h(t) = \begin{cases} 1 & (0 \leq t \leq T) \\ 0 & (t < 0, T < t) \end{cases} \quad (1)$$

ここで、系は  $t=0$  で静的平衡状態にあるものとする。  $0 \leq t \leq T$  で定義された外力  $f(t)$  の複素フーリエ変換  $F(\omega)$  を考えると、外力  $f(t)$  が固有角振動数  $\omega_n$  の成分を持たない条件は次のように示される。

$$\begin{aligned} F(\omega_n) &= \int_0^T f(t) \cos \omega_n t \, dt - i \int_0^T f(t) \sin \omega_n t \, dt = 0 \\ \Leftrightarrow \int_0^T f(t) \cos \omega_n t \, dt &= 0 \quad \wedge \quad \int_0^T f(t) \sin \omega_n t \, dt = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

また、式(2)が満足されるとき、 $t=T$  (強制外力が作用し終わった時間) における質点の変位  $x(T)$  および速度  $\dot{x}(T)$  は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} x(T) &= \frac{\sin \omega_n T}{m \omega_n} \int_0^T f(\tau) \cos \omega_n \tau \, d\tau \\ &\quad - \frac{\cos \omega_n T}{m \omega_n} \int_0^T f(\tau) \sin \omega_n \tau \, d\tau = 0 \\ \dot{x}(T) &= \frac{\cos \omega_n T}{m} \int_0^T f(\tau) \cos \omega_n \tau \, d\tau \\ &\quad + \frac{\sin \omega_n T}{m} \int_0^T f(\tau) \sin \omega_n \tau \, d\tau = 0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

このように、系に作用する外力  $f(t)$  に固有角振動数の成分が含ま

\*助教 機械工学科  
Assistant Professor, Dept. of Mechanical Engineering

れない場合には  $x(T) = 0$ ,  $\dot{x}(T) = 0$  が成立し,  $t > T$  で振動が発生しないことがわかる.

### 3. 天井走行クレーンモデル

本報では, 図1に示すような天井走行クレーンモデルを取り扱う. この系は, 質量  $M$  の台車, 質量  $m$  の吊り荷, 長さ  $l$  のロープで構成されている. ここで, 吊り荷は質点であると仮定し, 台車と吊り荷を連結するロープは質量が無視でき, かつ伸縮せずたわまないものとする. 台車は水平方向の外力  $f_x$  によって直線状のレール上を移動可能であり, 台車と吊り荷の運動はレールを含む鉛直平面内に拘束される. 台車および吊り荷の並進運動に関する粘性減衰係数をそれぞれ  $C$  および  $c$  とし, 重力加速度を  $g$  とする. 台車の変位を  $x$  (右向きを正) および台車に対する吊り荷の振れ角を  $\theta$  (反時計回りを正) とすると,  $x$  および  $\theta$  に関する運動方程式は次のように導出される.

$$(M + m)\ddot{x} + ml \cos \theta \cdot \ddot{\theta} + (C + c)\dot{x} + cl \cos \theta \cdot \dot{\theta} - ml \sin \theta \cdot \dot{\theta}^2 = f_x \quad (4)$$

$$ml^2\ddot{\theta} + ml \cos \theta \cdot \ddot{x} + cl^2\dot{\theta} + cl \cos \theta \cdot \dot{x} + mgl \sin \theta = 0 \quad (5)$$

ここに,  $\dot{\phantom{x}} = d/dt$  である.

制御目標は, 目標到達時間  $t = T$  で台車を  $x = d$  まで移動させ, かつ吊り荷の残留振動を抑制することである. ここで, 実時間  $t$  を目標到達時間  $T$  で除した無次元時間  $\tau = t/T$  を導入し, いくつかの無次元パラメータを用いて, 上の運動方程式を次のように書き換える.

$$(1 + \mu)\xi'' + \mu\rho \cos \theta \cdot \theta'' + 2\mu(\zeta_\xi + \zeta_\theta)\omega_a \xi' + 2\mu\rho\zeta_\theta\omega_a \cos \theta \cdot \theta' - \mu\rho \sin \theta \cdot \theta'^2 = \sigma_\xi \quad (6)$$

$$\rho^2\theta'' + \rho \cos \theta \cdot \xi'' + 2\rho^2\zeta_\theta\omega_a\theta' + 2\rho\zeta_\theta\omega_a \cos \theta \cdot \xi' + \rho^2\omega_a^2 \sin \theta = 0 \quad (7)$$

ここに,  $\dot{\phantom{x}} = d/d\tau$  であり,  $L$  を代表長さとして, 次のような変数および無次元パラメータを用いた.

$$\left. \begin{aligned} \xi &= \frac{x}{L}, \quad \mu = \frac{m}{M}, \quad \omega_a = T\tilde{\omega}_a, \quad \tilde{\omega}_a = \sqrt{\frac{g}{l}} \\ \zeta_\xi &= \frac{C}{2m\tilde{\omega}_a}, \quad \zeta_\theta = \frac{c}{2m\tilde{\omega}_a}, \quad \sigma_\xi = \frac{f_x T^2}{ML}, \quad \rho = \frac{l}{L} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

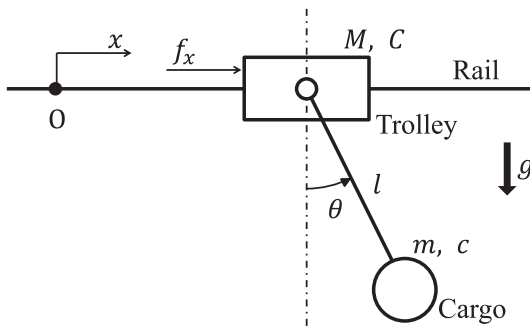


Fig.1 Analytical model of overhead crane

このうち,  $\omega_a$  は無次元固有角振動数を表す. また, 制御入力  $\sigma_\xi$  は, 目標到達位置における台車の位置決め精度を保証するために, 台車変位のフィードバックを用いて次のように与える.

$$\sigma_\xi = G(\xi_t - \xi) \quad (9)$$

ここに,  $\xi_t$  は台車が追従すべき目標軌道,  $G$  はフィードバックゲインである.

### 4. 固有振動数成分除去法の天井走行クレーンへの適用

#### 4.1 台車の目標軌道の設計

固有振動数成分除去法は, 線形不減衰系に関して外力が系の固有振動数成分を持たなければ残留振動は生じないという性質を, みなし外力を用いることにより非線形減衰系にも適用可能にしようという手法である. 固有振動数成分除去法を適用する運動方程式は, 式(6), (7)および(9)より次のようになる.

$$\left. \begin{aligned} (1 + \mu)\xi'' + \mu\rho \cos \theta \cdot \theta'' + 2\mu(\zeta_\xi + \zeta_\theta)\omega_a \xi' + 2\mu\rho\zeta_\theta\omega_a \cos \theta \cdot \theta' - \mu\rho \sin \theta \cdot \theta'^2 &= G(\xi_t - \xi) \\ \theta'' + \omega_a^2 \theta &= \sigma_\theta \\ \sigma_\theta &= \omega_a^2 (\theta - \sin \theta) \\ &- \frac{\cos \theta \cdot \xi'' + 2\rho\zeta_\theta\omega_a\theta' + 2\zeta_\theta\omega_a \cos \theta \cdot \xi'}{\rho} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

ここに,  $\sigma_\theta$  は吊り荷に対するみなし外力であり, 吊り荷に作用する非線形性および減衰の影響を無次元固有角振動数が  $\omega_a$  の線形不減衰系に作用する外力として捉えたものである. 2.1 節で示した性質より, 線形不減衰系に外力が有限時間作用する場合, 残留振動が生じないための必要十分条件は作用する外力が系の固有振動数の成分を持たないことである. したがって, 無次元固有角振動数が  $\omega_a$  の系では,  $\sigma_\theta$  が  $\omega_a$  の成分を持たなければ吊り荷に残留振動は生じない. この条件は次式で与えられる.

$$\int_0^1 \sigma_\theta \cos \omega_a \tau \, d\tau = 0 \quad \wedge \quad \int_0^1 \sigma_\theta \sin \omega_a \tau \, d\tau = 0 \quad (11)$$

式(10)から,  $\sigma_\theta$  は台車の変位  $\xi$  および吊り荷の振れ角  $\theta$  を含む関数であることがわかる. これら  $\xi$  および  $\theta$  は, 台車の目標軌道  $\xi_t$  を時間関数として与えると, 式(10)を数値積分することによって求められる. したがって, 吊り荷の残留振動を抑制する問題は, 式(11)を満足するような  $\xi_t$  を導出する問題となる.

台車の軌道を導出するにあたり, 式(11)の条件に加えて, 制御時間  $0 \leq \tau \leq 1$  の間に台車が初期位置 ( $\xi = 0$ ) から目標到達位置 ( $\xi = \delta = d/L$ ) まで移動する条件, 制御開始時と終了時に台車が静止している条件, および無理のない始動と停止を実現する条件として, 台車軌道に関する以下の境界条件を与える. なお, 制御入力を式(9)のように変位のフィードバックで与えていることから, 台車は目標軌道に完全には追従しないため, 実際の台車軌道と目標軌道との間にはずれが生じる. そこで, 制御開始時は  $\xi_t$ , 制御終了時は  $\xi$  を境

界条件に用いている.

$$\left. \begin{aligned} \xi_t(0) &= 0, \quad \xi(1) = \delta \\ \xi_t'(0) &= \xi'(1) = 0 \\ \xi_t''(0) &= \xi''(1) = 0 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

$\xi_t$ としては, 関数形を次式で与える.

$$\left. \begin{aligned} \xi_t &= \sum_{n=0}^{N_a} a_n P_n(\tau) \\ P_n(\tau) &= \frac{1}{n!} \frac{1}{\tau^3} \frac{d^n}{d\tau^n} [\tau^6(\tau^2 - \tau)^n] \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式(13)の $a_n$ は未定係数,  $P_n(\tau)$ は目標軌道 $\xi_t(\tau)$ を構成する基底関数であり,  $P_n(\tau)$ は次式を満足する.

$$\int_0^1 P_n(\tau) \cdot P_m(\tau) d\tau = \begin{cases} 0 & (n \neq m) \\ \frac{1}{2n+7} & (n = m) \end{cases} \quad (14)$$

$$P_n(0) = 0, \quad P_n'(0) = 0, \quad P_n''(0) = 0 \quad (15)$$

式(14)は $0 \leq \tau \leq 1$ の範囲において異なる $P_n$ が互いに独立であり, 直交していることを表す. 式(15)は $P_n, P_n', P_n''$ が $\tau = 0$ で零となり, あらかじめ式(12)における $\tau = 0$ の3個の条件が満足されることを表す. したがって,  $\xi_t$ が満たすべき条件は式(11)の条件2個と式(12)のうち $\tau = 1$ の条件3個を合わせた5個となるため,  $N_a = 4$ になる.

以上より, 式(11)および式(12)の条件を満足する未定係数 $a_n (n = 0 \sim 4)$ を求めることにより残留振動を抑制する台車軌道を決定することができる. なお, 非線形性および減衰の影響を考慮する場合には未定係数を解析的に求めることは不可能であるため, 本報では固有振動数成分除去の条件である式(11)および境界条件である式(12)を満足する未定係数 $a_n$ をニュートン法により求めた.

基底関数 $P_n$ としては他にも多数考えられるが, 種々検討した結果, 本手法で未定係数 $a_n$ を求める際に用いるニュートン法の収束性に基底関数の直交性が大きな影響を及ぼすことがわかったため, ルジャンドル多項式を参考にして, 式(12)における $\tau = 0$ の3個の境界条件をあらかじめ満足するように作成した直交多項式を用いることとした. ここでは, この $P_n(\tau)$ を修正ルジャンドル多項式と呼ぶ.  $n = 0 \sim 4$ の $P_n$ について, 表1にはそれぞれの具体的な式を, 図2には関数形状を示す.

Table 1 Modified Legendre polynomials

$n$	$P_n(\tau)$
0	$\tau^3$
1	$8\tau^4 - 7\tau^3$
2	$45\tau^5 - 72\tau^4 + 28\tau^3$
3	$220\tau^6 - 495\tau^5 + 360\tau^4 - 84\tau^3$
4	$1001\tau^7 - 2860\tau^6 + 2970\tau^5 - 1320\tau^4 + 210\tau^3$

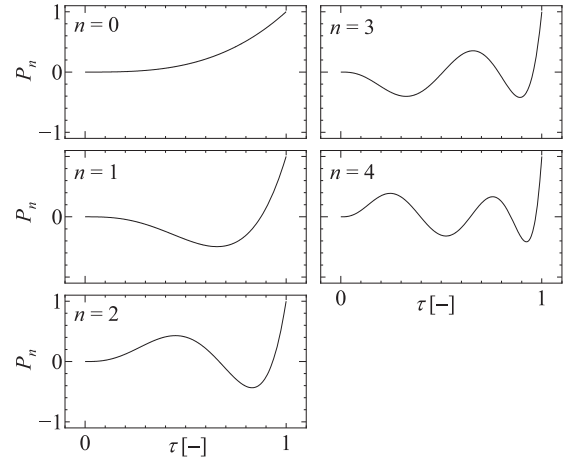


Fig. 2 Graphs of modified Legendre polynomials

#### 4.2 数値シミュレーション結果

本節では, 前節で提案した手法を天井走行クレーンモデルの制振制御へ適用したときの有効性を数値シミュレーションによって検証する. 数値シミュレーションには式(6), 式(7)および式(9)を用いた.

これらの数値積分にはいずれも Runge-Kutta-Gill 法を利用し, 制御時間 $0 \leq \tau \leq 1$ の分割数を 1024 とした. 数値シミュレーションに用いた系パラメータを表2に示す. さらに, 制御時間の長短を表すために次のような無次元パラメータ $\nu$ を導入する.

$$\nu = \frac{T}{2\pi/\tilde{\omega}_a} \quad (16)$$

ここに,  $\nu$ は制御時間 $t = T$ と吊り荷の固有周期 $2\pi/\tilde{\omega}_a$  ( $\omega_a = T\tilde{\omega}_a$ )の比であり, この値が小さいほど短い時間で台車が目標位置まで移動することを意味する.

$\nu = 0.8$ および $\nu = 1.2$ の場合の数値シミュレーション結果を図3に示す. 比較として, 固有振動数成分を除去する式(11)を用いず, 境界条件である式(12)のみを用いて台車軌道を設計した場合の結果を破線で示している. 式(11)を用いた結果は実線で示している. 図の上段が左から台車の位置 $\xi$ , 台車に対する吊り荷の振れ角 $\theta$ , 下段が左から $\xi$ 方向の吊り荷の位置 $\xi_c = \xi + \rho \sin \theta$ , 台車への入力 $\sigma_\xi$ である. 図3(a)が $\nu = 0.8$ , 図3(b)が $\nu = 1.2$ の場合である.

図3より,  $\nu = 0.8$ および $\nu = 1.2$ の両方の場合で, みなし外力から固有振動数成分を除去していない破線では, 吊り荷の振れ角 $\theta$ が制御終了以降 ( $\tau > 1$ ) で大きく変動しており, 残留振動を抑制できていないことがわかる. 一方, 除去した実線では変動していないことから, 本設計法の残留振動抑制に対する有効性が確認された. また, 搬送中 ( $0 \leq \tau \leq 1$ ) の吊り荷の振れ角は大きいにもかかわらず, 吊り荷の位置 $\xi_c$ は比較的滑らかに動いていることがわかる.

Table 2 Dimensionless parameters

$\mu$	$\zeta_\xi$	$\zeta_\theta$	$G$	$\delta$	$\rho$
1.0	5.00	0.05	$1.0 \times 10^5$	1.0	1.0



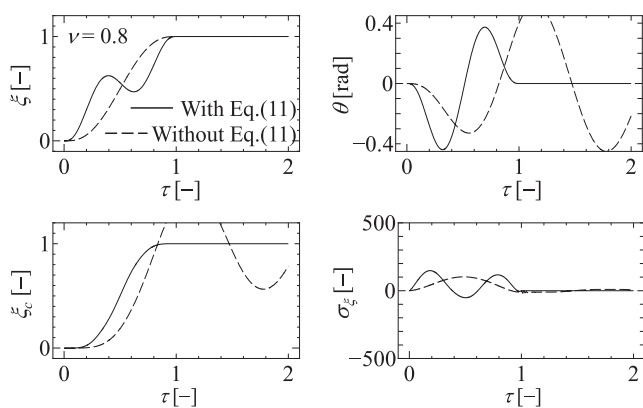
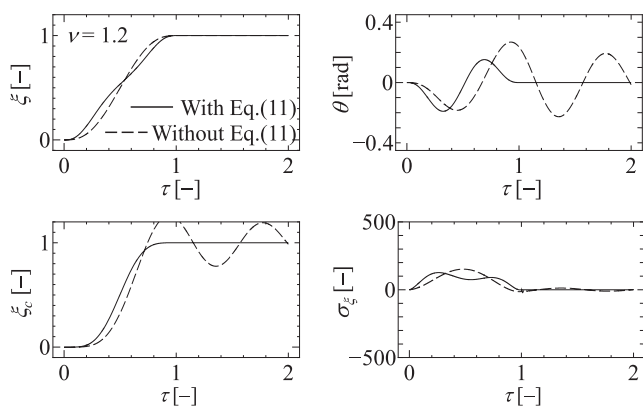
(a)  $\nu = 0.8$ (b)  $\nu = 1.2$ 

Fig. 3 Simulations using target trolley trajectories which derive apparent external forces not having the natural frequency component.

## 5. 結言

本報では、固有振動数成分除去法を用いて台車軌道の設計を行い、オープンループ制御による天井走行クレーンの残留振動抑制を行った。吊り荷の運動方程式における非線形性や減衰の影響をすべて線形不減衰系に作用するみなし外力として考慮し、そのみなし外力から固有振動数成分を除去する固有振動数成分除去法について述べ、その有効性を数値シミュレーションにより検証した。その結果、非線形性や減衰を考慮した残留振動の抑制が可能であることを示した。

## 参考文献

- [1] Abdel-Rahman, E.M., Nayfeh, A.H. and Masoud, Z.N., Dynamics and control of cranes: a review, *Journal of Vibration and Control*, Vol.9, No.7, 863-908 (2003).
- [2] Ramli, L., Mohamed, Z., Abdullahi, A.M., Jaafar, H.I. and Lazim, I.M., Control strategies for crane systems: a comprehensive review, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol.95, 1-23 (2017).
- [3] 山浦弘, 小野京右, 長瀬徹, ロバスト性を有する制振アクセス制御, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.58, No.549, 1399-1405 (1992).
- [4] 佐藤勇一, 振動の捉え方, 58, オーム社 (2010).
- [5] Bhat, S.P. and Miu, D.K., Precise point-to-point positioning control of flexible structures, *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol.112, 667-674 (1990).

# 温度差表面張力流と流れの可視化に関する微小重力実験

矢野 大志\*

## Microgravity Experiment on Thermocapillary Convection and Flow Visualization

Taishi YANO\*

### 1. 緒言

#### 1.1. 表面張力

自由表面（気液界面）を有する液体には、その面積を小さくするように表面張力（界面張力）が作用する。表面張力の効果は日常生活においても観察することができ、例えば、コップに水を注いだとき、コップの縁を超えてもすぐに水がこぼれないのは、表面張力の効果によるものである（図 1(1)）。液体中の分子は分子間力によって互いに引き合っているが、その様相は液体の内部と表面で異なる。図 1(2)の模式図に示されているように、液体内部にある分子には、その周囲全方向から分子間力が作用する。分子はあらゆる方向から力を受けるが、その力は互いに打ち消しあい、そのため液体内部の分子に作用する正味の力はゼロになる。一方、自由表面付近の分子の場合、液体内部からの力を受けるものの、自由表面外側には液体が存在しないため、外向きの力は働かない（厳密には気体分子との間に力が作用するが、これは液体分子間に働く力に比べてはるかに小さい）。結果として、自由表面付近の液体分子に作用する正味の力は、自由表面に対して法線方向内向きであり、液体の表面積を小さくするように働く。これが表面張力である。

表面張力の大きさは、液体中の溶液濃度<sup>[1]</sup>、液体温度<sup>[2]</sup>、電荷密度<sup>[3]</sup>などに依存することが知られている。そのため、これらの物理量が自由表面上で不均一に分布しているとき、表面張力の分布も不均一となる。その結果、表面張力差によって自由表面に対して接線方向の力が生じ、流れが誘起される。例えば、油が浮いた水面上に洗剤を垂らしたとき、油が外側に広がるのも表面張力差に関係している。水の表面張力<sup>[1]</sup>は約 70 mN/m と比較的大きいが、洗剤が滴下された場所では、不純物が混ざったことにより、局部的に表面張力が低下する。そのため、表面張力の弱い場所（洗剤の滴下部）から表面張力の強い場所（外側）に向かって流れが生じるのである。また、多くの液体の場合、温度が高いと表面張力が弱く、温度が低いと表面張力が強くなるため、自由表面上に温度分布が存在するときには高温部から低温部へと向かう流れが生じる。また、自由表面上に電位差を与えた場合にも表面張力差が生じ、流れが駆動されることがある。

表面張力差によって生じる液体の移動が注目されるようになった

のは 1800 年代のことであり、ジェームズ・トムソン<sup>[4]</sup>やカルロ・マランゴニ<sup>[5]</sup>がこの現象に関する研究の先駆者として知られている。表面張力の濃度、温度、電位依存性に起因して生じる流れは、それぞれ濃度差表面張力流（solutocapillary flow）、温度差表面張力流（thermocapillary flow）、電位差表面張力流（electrocapillary flow）などと呼ばれている。また、当該分野の先駆的研究者であるカルロ・マランゴニ（Carlo Marangoni）の名を冠し、これらの効果をまとめてマランゴニ効果（Marangoni effect）と呼ぶこともある<sup>[5,6]</sup>。これまで、表面張力差に起因した流れに関する多くの研究成果が報告されているが、本稿では温度差表面張力流に焦点を当てて研究を紹介する。そのため、以降は温度差表面張力流のことを単に表面張力流と記述する。また、温度差に起因する表面張力差の効果をサーモキャピラリー効果（以下、TC 効果）と記述する。

#### 1.2. 温度差駆動表面張力流

液体の温度が上昇すると、自由エネルギーが増加するため、分子の運動が活発になる。そのため、分子間力による凝集の効果が弱まり、ほとんどの液体の場合、表面張力が弱くなる。ここで表面張力を  $\sigma$ 、温度を  $T$  とすると、 $\partial\sigma/\partial T < 0$  と表すことができ、自由表面上に温度差が存在する場合、 $\sigma$  の小さい高温部から  $\sigma$  の大きい低温部へと向かう表面張力流が生じる（液体は表面張力の大きい方へと引っ張られる）。世の中には温度に対する表面張力の変化率が正（ $\partial\sigma/\partial T > 0$ ）となる液体も存在し<sup>[7]</sup>、そのような液体では表面張力流は低温部から高温部へと向かうが、ここではそのような流れは取り扱わないことにする。

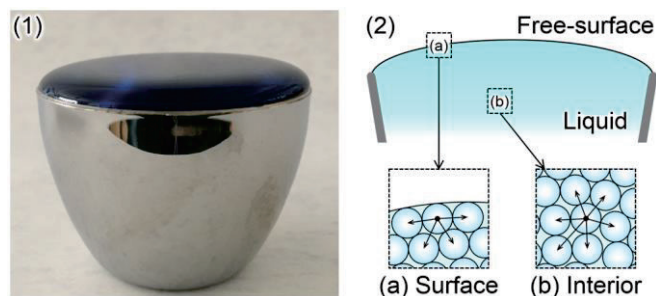


図 1 (1)コップに注がれた水と(2)液体中の分子に作用する力の模式図。表面張力の効果によって、コップの縁を超えても水がこぼれない。

\*助教 機械工学科  
Assistant Professor, Dept. of Mechanical Engineering

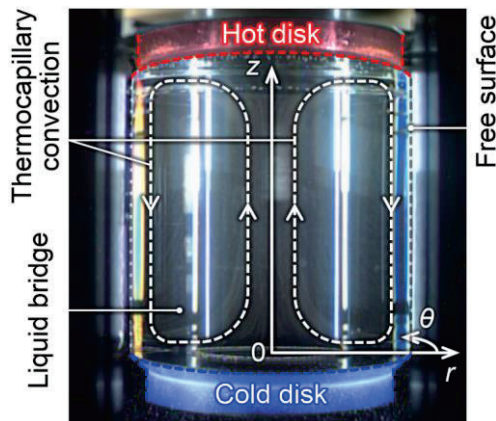


図2 ディスク間に形成された液柱. 上側のディスク (hot disk) は下側のディスク (cold disk) よりも温度が高い.

表面張力流に関する研究は、液膜や液滴など、さまざまなモデルを用いて行われているが、ここでは液柱内に生じる表面張力流に着目する. ここでいう液柱 (liquid bridge) とは、一對の固体壁間に懸架された液体の柱のことであり、表面張力流の研究によく使用されるモデルである. 図2は実際に形成された液柱の画像である. 同じ直径の一對のディスクを一定の距離だけ離して端面が平行になるように配置し、その隙間を液体で満たす. 液体は両端のディスクとしか接触していないが、自由表面には表面張力による保持力が働き、液体は円柱形状に保たれる. このようなモデルにおいて、二つのディスクの温度が異なる時、液柱内には表面張力流が生じる. 図2の場合、下側のディスク (cold disk) は上側のディスク (hot disk) より温度が低くなるように設定されているため、下にいくほど自由表面の温度が低下する. そのため、下にいくほど表面張力が強くなり、自由表面では上から下に向かう流れが生じる. 下端には固体壁が存在するため、液体はそこを通過することができない. そのため、下側のディスク付近で流れは向きを変え、液体は中心部へと集まり、そして液柱内部では下から上へと向かう流れが生じる. 液柱内部で上側のディスク付近に到達した液体も固体壁を通過できないため、今度は外側に広がり、再び TC 効果によって上から下に流れる. このようにして、液柱内では円環状の対流が形成される (図2の破線矢印). この対流はマランゴニ対流 (Marangoni convection) として広く知られているが、本稿では表面張力流 (thermocapillary convection) という呼び方で統一する.

液柱内の表面張力流の重要な特徴として、流れの不安定性があげられる. ここで上下のディスク間の温度差を  $\Delta T$  とすると、 $\Delta T$  の増加とともに流れの駆動力も大きくなり、流速も増加する. そして  $\Delta T$  がある臨界条件を超えると、不安定性が発現し、流れのパターンが変化する<sup>[8]</sup>. 表面張力流の不安定性は液体の物性値に依存し、とくにプラントル数 (Prandtl number) の影響を強く受けることが知られている<sup>[9]</sup>. プラントル数は熱拡散率  $\alpha$  と動粘度  $\nu$  を用いて以下のように定義される無次元数であり、温度拡散に対する粘性拡散の割合を意味する.

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (1)$$

$\Delta T$  が十分に小さい場合、プラントル数によらず液柱内の流れは定

常で軸対称である. 低プラントル数の液柱の場合 ( $Pr < 1$ , 液体金属など),  $\Delta T$  を大きくすると流れは定常で非軸対称なものとなり、さらに  $\Delta T$  を大きくすると流れは非定常なものへと遷移する. 一方、高プラントル数の液柱の場合 ( $Pr > 1$ , オイルなど),  $\Delta T$  を大きくすると流れは定常で軸対称なものから直接、非定常なものへと遷移する. これは、低プラントル数と高プラントル数の液柱の場合で、流れの不安定化機構が異なるためであることが知られている<sup>[9, 10]</sup>. また、表面張力流の不安定性は、液体の物性値のみならず液柱の大きさや形状、自由表面における熱的条件、重力の有無など、さまざまな要因に依存することが知られており、これまでに多くの研究が行われている<sup>[11]</sup>.

ここまで自由表面上の温度差によって生じる表面張力流について述べてきたが、液体中の温度差は表面張力流以外の流れも駆動する. 液体の密度は温度の上昇とともに減少するため、温度の高い液体には重力に対して逆向きの浮力が働き、浮力対流 (自然対流や密度差対流とも呼ばれる) が生じる. 通常の重力環境下で実験を行う場合、液柱内には表面張力流と浮力対流が混在し、純粋な表面張力流に関する研究を行うのは困難である. この問題への対策として、主に二つの方法が取られている. 一つ目の方法は液柱の小型化である. ここで説明のため、いくつかの無次元数を導入する<sup>[12]</sup>.

$$Re = \frac{|\sigma_T| \Delta T l}{\rho \nu^2} \quad (2)$$

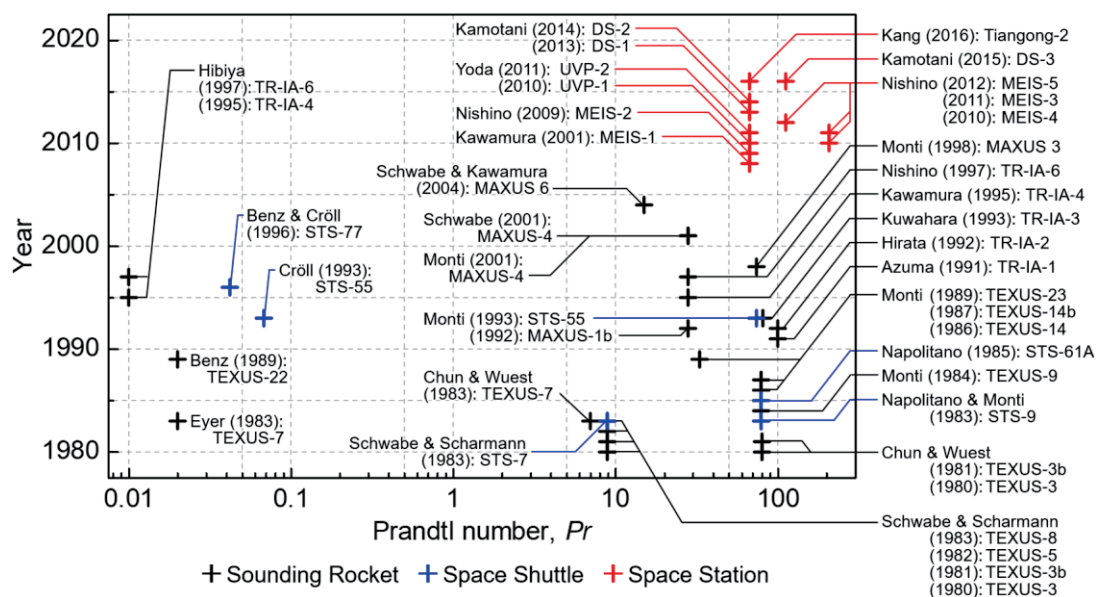
$$Gr = \frac{g \beta \Delta T l^3}{\nu^2} \quad (3)$$

上式において、 $l$  は代表長さ、 $\sigma_T (= \partial \sigma / \partial T)$  は表面張力温度係数、 $\rho$  は密度、 $g$  は重力加速度、 $\beta$  は熱膨張係数である.  $Re$  はレイノルズ数 (Reynolds number) であり、ここでは粘性力に対する TC 効果による力の大きさを表す (一般的に用いられるレイノルズ数の定義と異なるので注意されたい). また、 $Gr$  はグラフホフ数 (Grashof number) であり、粘性力に対する浮力の大きさを表す. これら、グラフホフ数とレイノルズ数の比を取ったものが動的ボンド数 (dynamic Bond number) であり、TC 効果による力に対する浮力の大きさを表す.

$$Bd = \frac{Gr}{Re} = \frac{\rho g \beta l^2}{|\sigma_T|} \quad (4)$$

$Bd < 1$  では表面張力流が支配的となり、 $Bd > 1$  では自然対流が支配的になるため、 $l$  を小さくすることで浮力対流の影響を相対的に弱めることができる. ただし、通常の重力環境 ( $g \approx 9.8 \text{ m/s}^2$ ) で浮力対流の影響を十分に小さくするためには、ディスク直径を数ミリメートル (通常、5 mm 以下) にする必要があり、そのような小さい液柱で実験を行うには熟練の技術が必要となる. また、小さな液柱では流れの観察が困難になる、実験中に液体が蒸発してしまう、などの難しさもある.

浮力対流の影響を抑えるための二つ目の方法は、微小重力環境で実験を行うことである. 浮力は重力に起因した力であり、重力が存在しない宇宙空間や、重力の影響が打ち消される自由落下中に実験を行うことで、浮力対流の存在しない純粋な表面張力流に関する研究を行うことができる. このような試みが最初に行われたのは、今から 40 年も前のことであり、1980 年に観測ロケット TEXUS-03 を用いて Schwabe & Scharmann や Chun & Wuest が表面張力流に関する



微小重力実験を行っている<sup>[13]</sup>。それ以来、観測ロケット、スペースシャトル、宇宙ステーションなどを利用した表面張力流に関する微小重力実験が数多く行われている。図3はそれらを年代、プラントル数、代表研究者、プロジェクト名で整理したものである（過去に著者がまとめたもの<sup>[14]</sup>を更新）。また、これら以外にも、パラボリックフライトや落下塔による微小重力実験も数多く行われており、これまでにさまざまな成果が報告されている。

日本も表面張力流に関する微小重力実験に力を注いでおり、とくに 2008 年に諸外国に先駆けて国際宇宙ステーション (International Space Station, 以下, ISS) での実験を開始した<sup>[15]</sup>。このプロジェクト「Marangoni Experiment in Space (通称, MEIS)」は ISS に搭載された日本実験棟「きぼう」初の科学実験として注目を集め、2008 年から 2013 年までの間に累計 130 日にも及ぶ実験が行われた。また、「MEIS」以外にも、「Marangoni UVP」、「Dynamic Surf」<sup>[14]</sup>といったプロジェクトが「きぼう」で実施されている。近年では、中国も独自の宇宙ステーションである天宮 2 号 (Taigong-2) で表面張力流に関する実験を行っており、現象の解明が進んでいる<sup>[16]</sup>。著者は「MEIS」と「Dynamic Surf」において表面張力流に関する微小重力実験を行っており、本稿ではこれらのプロジェクトで得られた成果を紹介する。なお、「きぼう」で行われた実験では高プラントル数条件をターゲットとしており、以降は高プラントル数の液柱内の表面張力流について議論する。

### 1.3. 流れの可視化計測

前述のとおり、高プラントル数の液柱内の表面張力流は、ディスク間の温度差  $\Delta T$  が大きくなると非定常な流れとなる。不安定性発現の臨界条件よりも  $\Delta T$  が少し大きいときには、流れは速度や方向を周期的に変え、このような流れは振動流と呼ばれている。振動流にはさまざまなパターンが存在し<sup>[17]</sup>、複雑な構造をもっているため、この現象を理解するためには、液柱内でどのような流れが生じているかを知る必要がある。流れの速度を計測する手法は数多く存在するが、表面張力流は外乱の影響に対して非常に敏感であるため、液

体中にセンサーやプローブを挿入する必要があるような計測手法はあまり有効ではない。そのため、表面張力流の速度場の計測には、流れを乱さずに速度分布を知ることができる PTV (particle tracking velocimetry) や PIV (particle image velocimetry) がよく用いられる<sup>[18]</sup>。

PTV や PIV では、流れ場に微小な粒子（トレーサ粒子と呼ばれる）を散布し、それをレーザーやストロボランプで照明し、短い時間間隔で連続した二枚の画像を撮影する（図 4）。大きさや密度が適切なものを選択すれば、トレーサ粒子は流れに対してよく追従するため、トレーサ粒子の速度を流れの速度とみなすことができる。例えば、時間間隔  $\Delta t$  で画像を撮影し、それら二枚の画像間でのトレーサ粒子の変位が  $\Delta \mathbf{X}$  であるとき、トレーサ粒子がいた場所での流速が  $\Delta \mathbf{X} / \Delta t$  と求まる。ここで、 $\Delta \mathbf{X}$  は画像上のベクトル量としての変位であるため、PTV、PIV で得られる速度情報もベクトル量である（カメラが一台の場合は二次元）。PTV と PIV の違いは、画像上のトレーサ粒子の変位の求め方である。PTV では、個々のトレーサ粒子を識別し、それら一つ一つの動きに対して変位を得る。それに対して PIV では、複数（通常は 5 個以上）のトレーサ粒子群に対して一つの変位を得る。

これらの可視化計測手法では通常，多数のトレーサ粒子を流れ場に散布するため，多点同時計測が可能であり，上手に計測を行えば，数百点から数千点の速度情報が同時に得られる．また，複数の

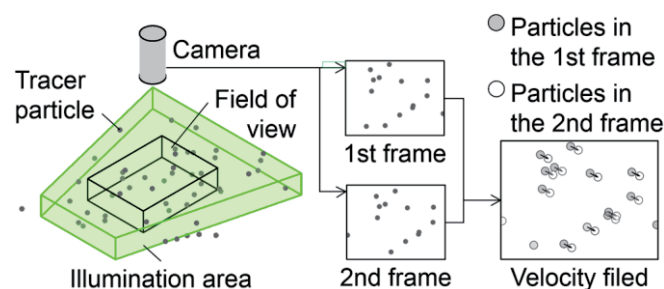


図4 トレーサ粒子を用いた流れの可視化計測手法の模式図.



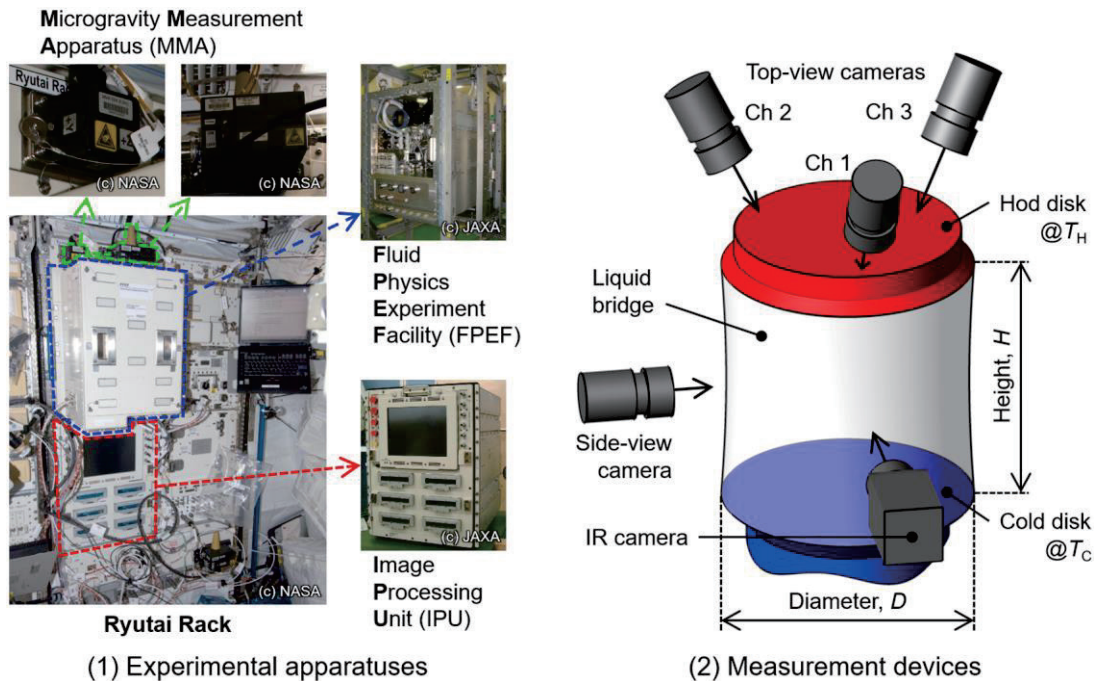


図5 (1)実験装置全体の写真と(2)主な計測装置

カメラを同時に使用すれば、三次元の空間的な速度情報を得ることもできる<sup>[19,20]</sup>。PTVやPIVのこれらの利点は、空間的に複雑な構造を有する液柱内の表面張力流の速度計測において有効である。そのため「MEIS」や「Dynamic Surf」においても、これらの計測手法が採用され、流れの速度計測が行われており、本稿ではそれらの結果の一部を紹介する。

## 2. 研究方法

### 2.1. 実験装置

ISSの日本実験棟「きぼう」には、さまざまな実験用のラックが搭載されており、その中には流体科学実験に特化したものもある。これはRyutaiラックと呼ばれており、表面張力流に関する微小重力実験もここで行われた。Ryutaiラックには、流体物理実験装置 (Fluid Physics Experiment Facility, 以下、FPEF) や画像取得処理装置 (Image Processing Unit, 以下 IPU)、微小重力計測装置 (Microgravity Measurement Apparatus, 以下 MMA) などを取り付けることができ、これらの装置を駆使して実験が行われた (図5(1))。

図5(2)は主な計測装置の模式図である。液柱はFPEF内のアルミニウムディスクとサファイアディスクの間に形成され、前者はペルチェ素子によって冷却、後者はITO (indium tin oxide) 膜のヒーターによって加熱される。そのため、以降はアルミニウムディスクを冷却ディスク (cold disk)、サファイアディスクを加熱ディスク (hot disk) と呼ぶ。それぞれの温度を  $T_c$ 、 $T_h$  とすると、ディスク間の温度差は  $\Delta T = T_h - T_c$  と定義され、これが表面張力流の駆動力となる。本微小重力実験で使用されたディスクの直径  $D$  は 10, 30, 50 mm のいずれかであり、液柱の高さ  $H$  は最大で 62.5 mm である。地上実験で形成可能な液柱の高さは、最大でも 5 mm 程度であり、これほど巨大な液柱を用いた研究は微小重力実験ならではのものである。

試料にはプラントル数の異なる三種類のシリコンオイルが使用

された。それぞれのプラントル数は、 $Pr = 67, 112, 207$  である<sup>[21,22]</sup>。これらのシリコンオイル中には、流れ場の計測のために、金-ニッケル合金で被膜されたアクリル製のトレーサー粒子が懸濁されている。流れ場の観察は、複数のカメラを用いて行われた。加熱ディスクは無色透明で、その上部に取り付けられた三台の CCD カメラ (top-view cameras) が、液柱の自由表面の曲率の影響を受けることなく、トレーサー粒子の動きを撮影することができる。液柱の側面にはもう一つ、CCD カメラが取り付けられており (side-view camera)、これは液柱形状と全体的な流れの観察のために使用された。また、液柱の自由表面の温度を計測するための赤外線放射温度計 (IR camera) も取り付けられている。これらのカメラで撮影された画像データは、IPU を介して地上に送られてくる。IPU からは、ほぼリアルタイムで画像が転送されるため、地上にいないが時間のずれを気にすることなく、宇宙で実験が行える。

### 2.2. 実験運用

ISS には g-ジッター (g-jitter) と呼ばれるランダムな加速度の揺らぎが存在する。その原因は、ISS 内の機械の振動、クルーの活動、輸送機のドッキングなどであり、船内の g-ジッターを完全になくすることは不可能といってよい。液柱は上下のディスクのみと接触し、円柱形状を保持するのは自身の表面張力のみである。そのため、外部から大きな力が加わると、液柱は円柱形状を保てず、崩壊してしまう恐れがある。実験中は常に、MMA で FPEF 付近の加速度データをモニタリングし、強い振動を検知したら、液柱を短くするなどの対策を取って安全に実験が運用された (「MEIS」では一度だけ、実験中に液柱が崩壊してしまうトラブルがあったが、その原因はいまだに不明である)。

ISS 内の g-ジッター環境は時間によって大きく変化し、とくにクルーの活動に起因する g-ジッターは昼と夜の時間帯で大きく異なる。クルーの活動による g-ジッターの周波数は 0.06~4 Hz 程度<sup>[23]</sup>である

が、この周波数帯は本微小重力実験の液柱の固有振動数に近いものである<sup>[24]</sup>。そのため、できるだけ g-ジッターの影響を抑えるために、本微小重力実験はクルーの就寝時間中に行われた。ここで、ISS ではグリニッジ標準時 (Greenwich Mean Time, 以下, GMT) が採用されており、本実験は GMT 21:00~6:00 ごろに実施された。GMT と日本標準時 (Japanese Standard Time, 以下, JST) の間には 9 時間のずれがあり、つまり JST 6:00~15:00 ごろに実験が行われたことになる。

本微小重力実験はすべて、茨城県にある筑波宇宙センターから遠隔で行われた。実験はまず、液柱の形成から始まる。実験開始時、両ディスクは閉じた状態であり、これらを移動させながら隙間にシリコンオイルを満たす。このとき、気泡が混入することがあるが、その場合は液体から気泡を除去する必要がある<sup>[15]</sup>。その方法は、ディスク間に温度差を印加して対流を発生させ、その流れによって気泡を外側に追いやり、ディスクを閉じて気泡を破裂させる、というものである。言葉にすると簡単に聞こえるが、これらのプロセスをすべて遠隔で行わなくてはならず、ここに微小重力実験特有の困難さがある。液柱形成後は、各ディスクの温度が所定の値になるように調節し、液柱内の流れと温度分布が十分に発達するまで待機する。その後、カメラなどで流れを観察し、解析用のデータを取得する。時間が許す限り、ディスク温度の調節と観察を繰り返し、さまざまな条件のデータを取得する。最後に液体を回収し、両ディスクを閉じて一日の実験が終了となる<sup>[15]</sup>。

### 3. 結果と考察

#### 3.1. 不安定性発現の臨界条件

高プラントル数液柱内の表面張力流は、ディスク間の温度差  $\Delta T$  が増加し、ある臨界条件を超えると定常流から振動流に移移する。「きぼう」で行われた微小重力実験では、さまざまな条件でこの臨界条件を計測しており、図 6 はその中から  $T_c = 20^\circ\text{C}$  の結果を抜粋してプロットしたものである<sup>[21, 22]</sup>。ここで、横軸はもっとも代表的な実験パラメータであるアスペクト比 (aspect ratio) であり、以下のようにディスク直径に対する液柱高さとして定義される。

$$A = \frac{H}{D} \quad (5)$$

また、図 6(1)の縦軸は臨界マランゴニ数 (critical Marangoni number) と呼ばれる無次元数であり、式(1)のプラントル数と式(2)のレイノルズ数の積として以下のように定義される。

$$Ma_c = Re_c Pr = \frac{|\sigma_T| \Delta T (D/2)}{\rho \bar{\nu} \alpha} \quad (6)$$

ここで、振動流遷移の臨界条件における  $\Delta T$  を臨界ディスク間温度差  $\Delta T_c$  と呼び、このときのレイノルズ数は臨界レイノルズ数  $Re_c$  である。本研究で使用されたシリコンオイルの動粘度は、温度に対する変化が大きいため、その代表値として、以下のように両ディスク温度に対する動粘度の平均値を用いた。

$$\bar{\nu} = \frac{\nu(T_c) + \nu(T_H)}{2} \quad (7)$$

ここで、任意の温度  $T$  に対する動粘度は、

$$\nu(T) = \nu(25^\circ\text{C}) \times \exp\left(\frac{25 - T}{273.15 + T}\right) \quad (8)$$

で評価することができる。ここで、 $\nu(25^\circ\text{C})$  は  $25^\circ\text{C}$  におけるシリ

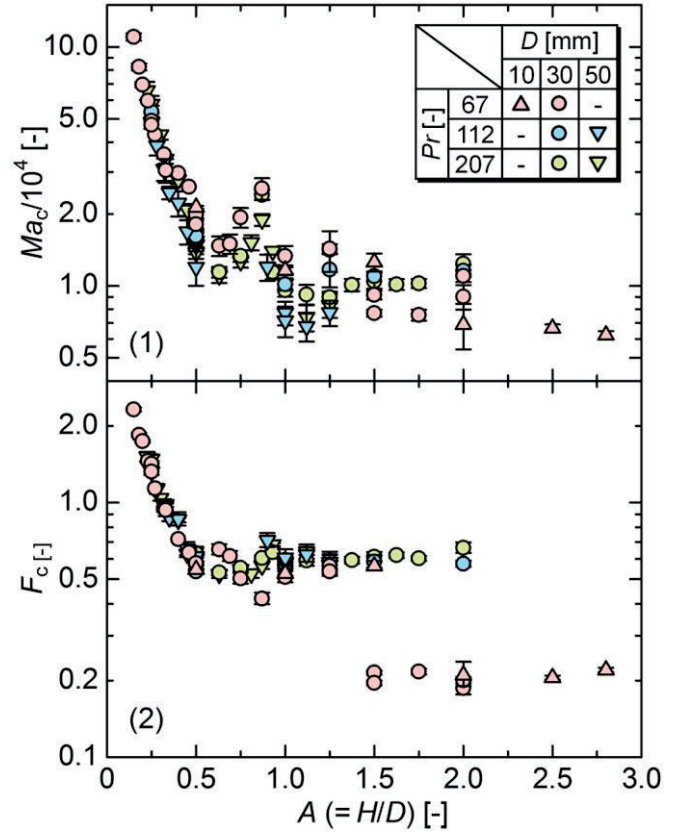


図 6 液柱のアスペクト比  $A$  に対する (1) 臨界マランゴニ数  $Ma_c$  と (2) 臨界振動周波数  $F_c$  のプロット。

コンオイルの動粘度である。動粘度以外の物性値は、すべて一定と仮定し、ここでは製造元 (信越化学工業株式会社) のカタログ値を用いた。また、代表長さにはディスク半径  $D/2$  が採用されている。液柱内の表面張力流が振動流に移移すると、流れは周期的に振動する。その周波数  $f_c$  を以下の式で無次元化し<sup>[25]</sup>、アスペクト比に対してプロットしたものが図 6(2)である。

$$F_c = \frac{(D/2)^2}{\alpha \sqrt{Ma_c}} f_c \quad (9)$$

図 6(1)において、 $Ma_c$  を結んだ線は中立安定曲線と呼ばれており、これより下の領域では流れは定常、上の領域では流れは非定常となり、中立安定曲線において流れの不安定性が発現する。図 6 は、さまざまなプラントル数 ( $25^\circ\text{C}$  において  $Pr = 67, 112, 207$ ) とディスク直径 ( $D = 10, 30, 50$  mm) の結果をまとめたものであるが、適切な無次元数を用いることによって、表面張力流の不安定性を整理することができる。

$A \leq 0.5$  の短い液柱においては、どの条件に対する  $Ma_c$  も  $A$  の増加とともに単調に減少していることがわかる。式(6)から、この変化は  $\Delta T_c$  か  $\bar{\nu}$  のどちらか、あるいは両方が原因であることが予想できるが、 $\bar{\nu}$  の変化は  $\Delta T_c$  の変化に比べて小さいため、 $Ma_c$  の減少は  $\Delta T_c$  の減少が主たる理由であることがわかっている。つまり、液柱の相対的な高さが増加すると、より小さい駆動力で表面張力流が不安定化するといえる。図 6(2)において、 $A \leq 0.5$  の短い液柱では  $F_c$  も単調に減少していることがわかるが、このとき、振動周波数以外にも液



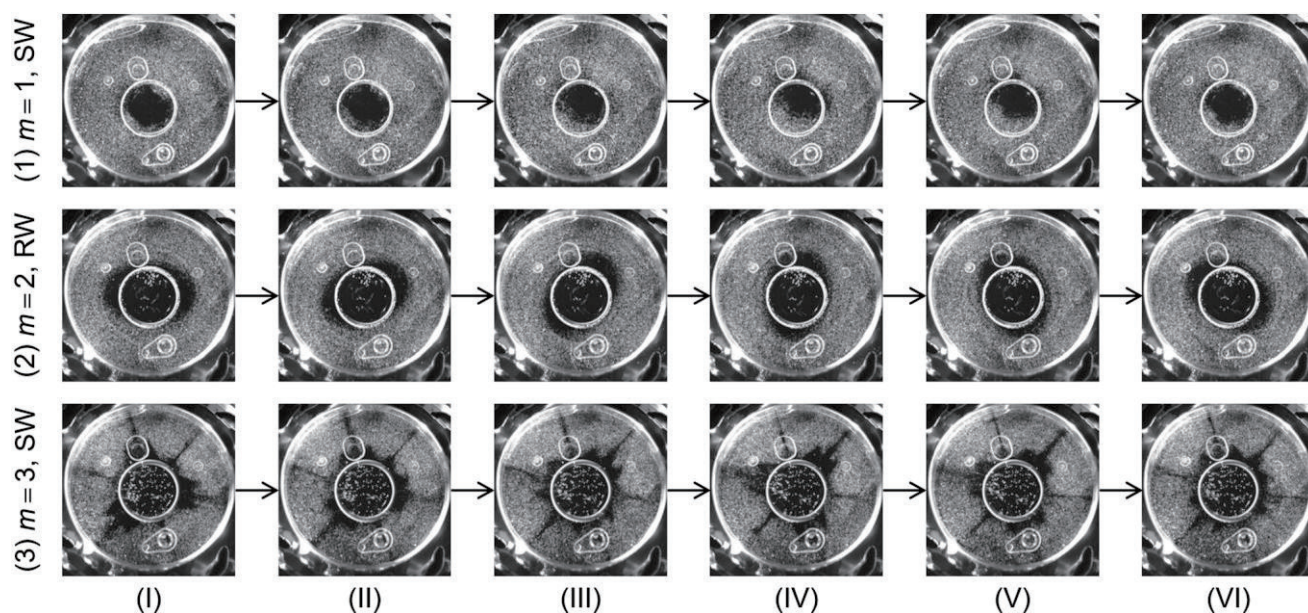


図7 高プラントル数液柱内の表面張力流のさまざまな振動様式

柱内の流れは大きく変化していることが確認されている。

振動流には様々な種類があり、振動タイプと周方向モード数  $m$  などで特徴づけられている<sup>[17]</sup>。振動タイプには脈動型 (standing-wave type, 以下, SW 型) と回転型 (rotating-wave type, 以下, RW 型) の二つがある。SW 型の振動流では、中心軸を通る特定の断面で流れが往復振動する。一方, RW 型の振動流では、全体が周方向に回転する。これらの振動タイプの名称に「wave (波)」という単語が用いられているのは、振動流状態では液柱の自由表面上を低温流体の波 (hydrothermal wave) が伝播するためであるが、その詳細についてはここでは述べないことにする。 $m$  は液柱の周方向に存在する構造の数であり、整数値を取る。

図7はさまざまな振動流を可視化した結果である。液柱内のトレーサー粒子を加熱ディスク越しに CCD カメラで撮影し、1/6 振動周期ごとの時間変化を示している。液柱の中心部は流速が遅く、そのような部分にはトレーサー粒子が侵入することができず、粒子不在領域が形成される。この粒子不在領域の挙動や形状から、振動タイプと周方向モード数を見極めることが出来る。図7(1)–(3)の粒子不在領域の形状は円形、楕円形、三角形であり、対応する周方向モード数はそれぞれ  $m=1, 2, 3$  である。また、図7(1)では粒子不在領域全体が、図7(3)では三角形の粒子不在領域の各頂点が往復しているため、SW 型の振動流が生じていることがわかる。図7(2)では楕円形の粒子不在領域が反時計方向に回転しているため、RW 型の振動流に分類される。これらの結果から、ひとえに振動流といってもさまざまな種類が存在していることがわかる。周方向モード数  $m$  は液柱の高さに依存し、 $A$  が小さいと  $m$  が大きく、 $A$  が大きいと  $m$  が小さくなる傾向があることが知られている。図6の  $A \leq 0.5$  の条件では、 $A$  の増加とともに  $m$  が4から1まで減少することが確認されている<sup>[21]</sup>。また、中立安定曲線付近では、RW 型の振動流よりも SW 型の振動流のほうが出現しやすいことが本微小重力実験や過去の地上実験で確認されているが、明確な規則性はまだ明らかにされていない。

$A \leq 0.5$  の短い液柱では、プラントル数とディスク直径が異なっても  $Ma_c$  と  $F_c$  の  $A$  に対する傾向に違いは確認できない。一方、 $A \geq 0.5$  の長い液柱では、実験条件によって表面張力流の不安定化の傾向が大きく異なり、とくに  $A \geq 1.50$  においてプラントル数の影響が顕著である。プラントル数が  $Pr=112, 207$  の場合には振動周波数はあまり変化せず、 $F_c \approx 0.6$  で一定となっている。それに対してプラントル数が  $Pr=67$  の場合、 $A \approx 1.5$  で振動周波数が約 1/3 に急落し、 $F_c \approx 0.2$  で一定となっている。このような違いが表れたのは、軸方向の流れの構造の違いに原因があることが本研究で明らかになったが、その詳細については後述する。

### 3. 2. 流れの可視化計測結果

本微小重力実験で使用された装置には、加熱ディスク上部に三台の CCD カメラが取り付けられているが、これらのカメラは液柱内の表面張力流を三次元的に計測するために使用された。図8は計測結果の一例であり、 $Pr=207$ ,  $D=50$  mm,  $H=25$  mm ( $A=0.5$ ) の定常状態 ( $\Delta T < \Delta T_c$ ) の表面張力流の速度場のベクトル図を示している。液柱内には軸対称な流れが生じており、同じ半径-軸方向断面にすべての結果を投影すると、円環状の対流が生じていることが

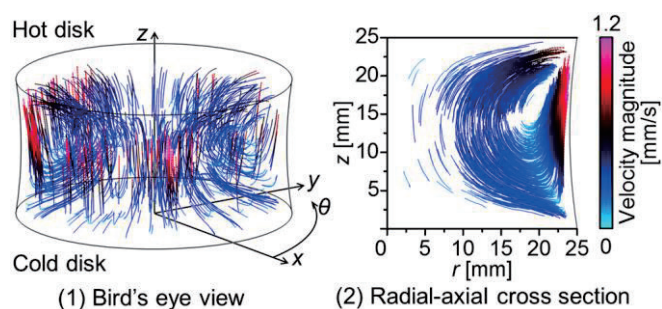


図8 3-D PTVによる可視化計測の結果：(1)鳥瞰図と(2)半径-軸方向断面への投影図。

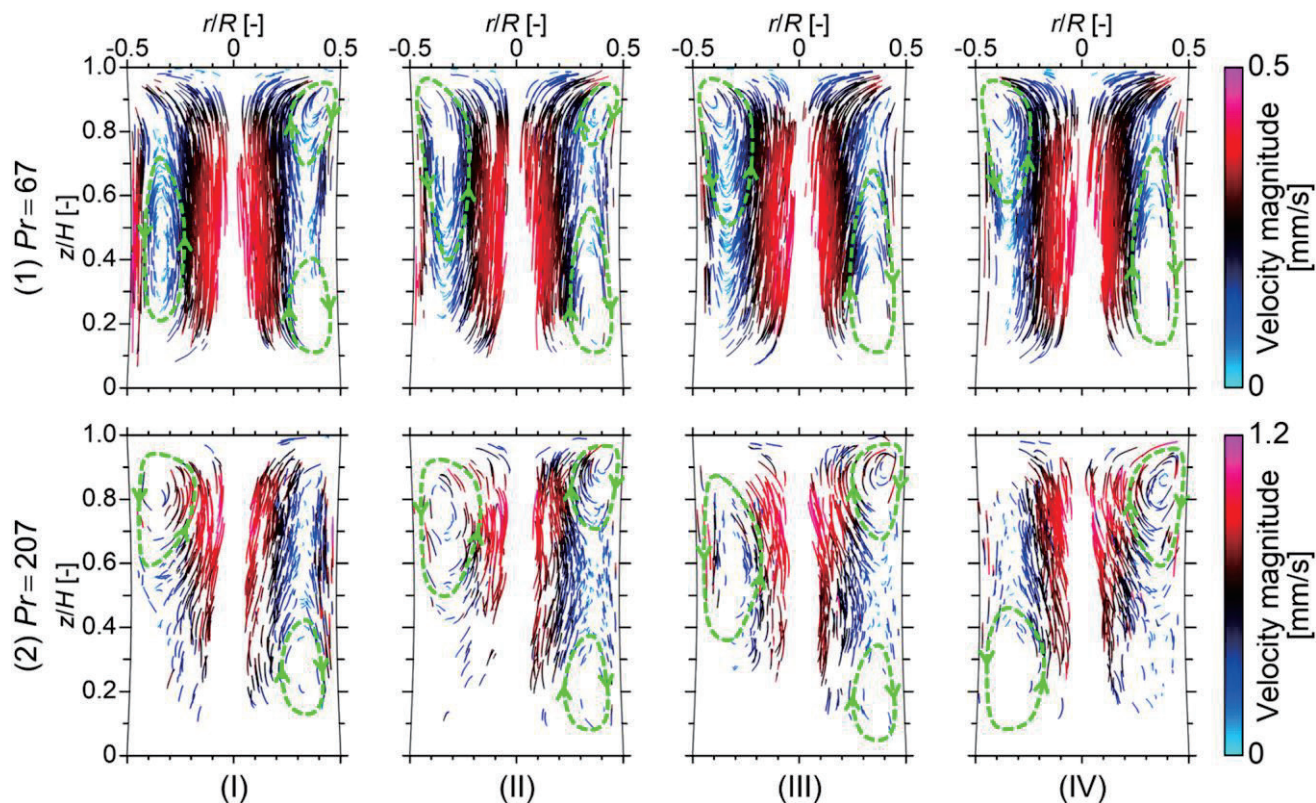


図9 振動流状態の表面張力流の3-D PTV計測結果：(1)  $Pr = 67$  と(2)  $Pr = 207$ 。

確認できる(図8(2))。この結果は三次元のPTV<sup>[19]</sup>(以下、3-D PTV)によって得られたものである。

3-D PTVは、流れ場に投入されたトレーサ粒子を複数台のカメラでステレオ撮影することで、トレーサ粒子の動きを空間的に計測するものであり、その主な解析プロセスは(1)カメラ校正、(2)粒子検出、(3)粒子追跡、(4)三次元再構築である<sup>[19]</sup>。カメラ校正では、液柱内に配置された基準点をカメラで撮影し、それらの画像上の座標(ピクセル単位)と空間内の座標(メートル単位)を関係付けるためのカメラパラメータを算出する。次に各カメラで撮影された画像上でトレーサ粒子を検出し、そしてそれらの動きを追跡する。最後に、カメラ校正で算出したカメラパラメータを用いて、画像上のトレーサ粒子の動きを、三次元の空間内の動きに再構築する。詳細については省略するが、本実験で計測した表面張力流の速度情報は、数値シミュレーション結果ともよく一致しており、精度の高い計測が行われた<sup>[20]</sup>。

図9は振動流状態の表面張力流を3-D PTVで計測した結果であり、速度ベクトル分布の1/6振動周期ごとの時間変化を示している。実験条件は $D = 30$  mm,  $H = 45$  mm ( $A = 1.5$ )であり、 $\Delta T$ は $\Delta T_c$ よりもわずかに大きい。液柱のプラントル数は(1)  $Pr = 67$  と(2)  $Pr = 207$ であり、それぞれ図6で振動周波数 $F_c$ が急落した条件とそうでない条件に対応している。これらの流れはどちらも周方向モード数 $m = 1$ のSW型の振動流であり、流れは単一の半径-軸方向断面で振動している。図9は、この断面上に速度ベクトルを投影したものである。この断面上ではロール状の構造を確認することができ(緑色の破線矢印)、それが時間とともに軸方向に動いていることがわかる。図9(1)の $Pr = 67$ の結果では、ロール状の構造は冷却ディスク側から加熱

ディスク側(下から上)に向かって伝播しているが、図9(2)の $Pr = 207$ の結果では、ロール状の構造が加熱ディスク側から冷却ディスク側(上から下)に伝播しており、このような軸方向の構造の違いが図6の振動周波数 $F_c$ の違いの原因であることが本研究で明らかになった。この結果は、液柱内の表面張力流の軸方向の構造がプラントル数に依存することを示唆している。

液柱内の流れを正確に計測するためには、ある程度大きなディスク(直径10mm以上)を使用する必要があるが、大きなディスクで高アスペクト比の液柱を形成するには微小重力環境は必須である。本研究で得られた結果はまさに微小重力環境の恩恵を受けたものであり、微小重力実験により液柱内の表面張力流の不安定性現象の解明に近づいたといえる。

#### 4. 結言

本稿は高プラントル数液柱内の表面張力流に関する微小重力実験を紹介するものである。表面張力流に関する研究は世界中の科学者によって長きにわたり行われているが、まだ不明なことも多く、現在も多くの研究が行われている。日本も表面張力流に関する研究に力を入れており、国際宇宙ステーションの日本実験棟「きぼう」では大規模なプロジェクトが実施された。本プロジェクトはさまざまな成果をあげており、表面張力流の不安定性の発現条件の計測、液柱内の流れの三次元的な計測などが行われた。現在、表面張力流に関する日欧共同の宇宙実験プロジェクト「Japanese-European Research Experiment on Marangoni Instability (通称、JEREMI)」も計画され<sup>[27, 28]</sup>、2021年以降の実施に向けて準備中であり、ますますの研究発展が期待されている。



## 謝辞

本稿は国際宇宙ステーションの日本実験棟「きぼう」で実施された微小重力実験を紹介するものである。多くの関係者の協力なしには本研究は成功しえず、ここに記して謝意を表する。

## 参考文献

- [1] G. Vázquez, E. Alvarez and J. M. Navaza, Surface tension of alcohol + water from 20 to 50 °C, *Journal of Chemical and Engineering Data*, 40 (3), 611–614 (1995).
- [2] 大坪史明, 桑原啓一, 土井隆雄, シリコンオイルおよびフロリナートの表面張力の温度依存性と経時変化について, *日本マイクログラビティ応用学会誌*, 18 (1), 29–34 (2001).
- [3] A. Bateni, A. Ababneh, J. A. W. Elliott, A. W. Neumann, A. Amirfazli, Effect of gravity and electric field on shape and surface tension of drops, *Advances in Space Research*, 36 (1), 64–69 (2005).
- [4] J. Thomson, On certain curious motions observable at the surfaces of wine and other alcoholic liquors, *Philosophical Magazine Series 4*, 10 (67), 330–333 (1855).
- [5] C. Marangoni, Ueber die ausbreitung der tropfen einer flüddigkeit auf der oberfläche einer anderen, *Annalen der Physik und Chemie*, 143, 337–354 (1871) (in Germany).
- [6] L. E. Scriven and C. V. Sternling, The Marangoni effects, *Nature*, 187 (4733), 186–188 (1960).
- [7] R. Vochten and G. Petre, Study of the heat of reversible absorption at the air-solution interface. II. Experimental determination of the heat of reversible absorption of some alcohols, *Journal of Colloid and Interface Science*, 42 (2), 320–327 (1973).
- [8] D. Schwabe and A. Scharmann, Some evidence for the existence and magnitude of a critical Marangoni number for the onset of oscillatory flow in crystal growth melts, *Journal of Crystal Growth*, 46 (1), 125–131 (1979).
- [9] 今石宣之, マランゴニ対流の基礎, *International Journal of Microgravity Science and Application*, 31, S5–S12 (2014).
- [10] M. Wanschura, V. M. Shevtsova, H. C. Kuhlmann and H. J. Rath, Convective instability mechanism in thermocapillary liquid bridges, *Physics of Fluids*, 7 (5), 912–925 (1995).
- [11] H. C. Kuhlmann, *Thermocapillary Convection in Models of Crystal Growth*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg (1999).
- [12] J. Masud, Y. Kamotani, S. Ostrach, Oscillatory thermocapillary flow in cylindrical columns of high Prandtl number fluids, *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 11 (1), 105–111 (1997).
- [13] D. Schwabe, Thermocapillary liquid bridges and Marangoni convection under microgravity—Results and lessons learned, *Microgravity Science and Technology*, 26 (1), 1–10 (2014).
- [14] T. Yano, K. Nishino, S. Matsumoto, I. Ueno, A. Komiya, Y. Kamotani and N. Imaishi, Overview of “Dynamic Surf” project in Kibo—Dynamic behavior of large-scale thermocapillary liquid bridge in microgravity, *International Journal of Microgravity Science and Application*, 35 (1), 35102 (2018).
- [15] H. Kawamura, K. Nishino, S. Matsumoto and I. Ueno, Report on microgravity experiments of Marangoni convection aboard International Space Station, *Transactions of the ASME, Journal of Heat Transfer*, 134 (3), 031005 (2012).
- [16] Q. Kang, D. Wi, L. Duan, L. Hu, J. Wang, P. Zhang and W. Hu, The effects of geometry and heating rate on thermocapillary convection in the liquid bridge, *Journal of Fluid Mechanics*, 881, 951–982 (2019).
- [17] I. Ueno, S. Tanaka and H. Kawamura, Oscillatory and chaotic thermocapillary convection in a half-zone liquid bridge, *Physics of Fluids*, 15 (2), 408–416 (2003).
- [18] 可視化情報学会編, *PIV ハンドブック (第 2 版)*, 森北出版 (2018).
- [19] K. Nishino, N. Kasagi and M. Hirata, Three-dimensional particle tracking velocimetry based on automated digital image processing, *Transactions of the ASME, Journal of Fluids Engineering*, 111 (4), 384–391 (1989).
- [20] G. E. Elsinga, F. Scarano, B. Wieneke and B. W. van Oudheusden, Tomographic particle image velocimetry, *Experiments in Fluids*, 41 (6), 933–947 (2006).
- [21] K. Nishino, T. Yano, H. Kawamura, S. Matsumoto, I. Ueno and M. K. Ermakov, Instability of thermocapillary convection in long liquid bridges of high Prandtl number fluids in microgravity, *Journal of Crystal Growth*, 420, 57–63 (2015).
- [22] T. Yano, K. Nishino, S. Matsumoto, I. Ueno, A. Komiya, Y. Kamotani and N. Imaishi, Report on microgravity experiments of dynamic surface deformation effects on Marangoni instability in high-Prandtl-number liquid bridges, *Microgravity Science and Technology*, 30 (5), 599–610 (2018).
- [23] 後藤雅享, 村上敬司, 大熊隼人, 「きぼう」の実験環境と生活振動, *日本マイクログラビティ応用学会誌*, 28 (1), 8–12 (2011).
- [24] A. Sanz and J. L. Diez, Non-axisymmetric oscillations of liquid bridges, *Journal of Fluid Mechanics*, 205, 503–521 (1989).
- [25] F. Preisser, D. Schwabe and A. Scharmann, Steady and oscillatory thermocapillary convection in liquid columns with free cylindrical surface, *Journal of Fluid Mechanics*, 126, 545–567 (1983).
- [26] T. Yano, K. Nishino, H. Kawamura, I. Ueno, S. Matsumoto, M. Ohnishi and M. Sakurai, 3-D PTV measurement of Marangoni convection in liquid bridge in space experiment, *Experiments in Fluids*, 53 (1), 9–20 (2012).
- [27] H. C. Kuhlmann, M. Lappa, D. Melnikov, R. Mukin, F. H. Muldoon, D. Pushkin, V. Shevtsova and I. Ueno, The JEREMI-project on thermocapillary convection in liquid bridges. Part A: Overview of particle accumulation structures, *Fluid Dynamics & Material Processing*, 10 (1), 1–36 (2014).
- [28] V. Shevtsova, Y. Gaponenko, H. C. Kuhlmann, M. Lappa, M. Lukasser, S. Matsumoto, A. Mialdun, J. M. Montanero, K. Nishino and I. Ueno, The JEREMI-project on thermocapillary convection in liquid bridge. Part B: Overview on impact of co-axial gas flow, *Fluid Dynamics & Material Processing*, 10 (2), 197–240 (2014).

# 経路最適化問題と解法アルゴリズムの研究

李 嘉誠\*\*

## Research on Path Optimization Problem and Evolutionary Algorithm

Jiacheng LI\*\*

### 1. 緒言

この研究では、輸送ロジスティクスに関係する主要因に注目し、ロジスティクスに影響を与える主要因を最適化し、最終的にはコストを削減し、利益を向上させることを目的とする。経済のグローバル化と情報技術の急速な発展に伴い、社会のあらゆる分野で急速な変化が起こっている。現代社会における生産と商品の流通では、現代のロジスティクス産業の地位向上は、生産と製造、商品流通、商品取引と管理方法の大きな変化を伴って、ますます顕著になっている。物流コストは GDP の大部分を占めており、これは国民経済の状況と規模を反映し、企業の物流コストを削減し、利益を大幅に増加させることができる。科学技術の急速な発展に伴い、現代の電子商取引環境では、企業の製品自体からの収益が大幅に減少している。したがって、ロジスティクスと輸送のコストを削減することによって、ロジスティクスシステム全体のコストを大幅に削減することができる[1-3]。

### 2. 研究背景について

経済のグローバル化と電子商取引の発展に伴い、第3の利益源としてのロジスティクスはますます重要になっている。ロジスティクスの概念は、1920年代にアメリカの学者クラークによって最初に提案され、1984年にアメリカロジスティクス管理協会によって「ロジスティクス」に名前が変更された。ロジスティクスも、当初の輸送機能から、情報技術と管理を中心としたより充実した統合ロジスティクスシステムに変更された。ロジスティクスは、商品やサービスなどが生産側から消費者側にうまく流れるようにすることを保証する、国民経済の活力を支える社会的血液輸血システムと言っても過言ではない。

ロジスティクスコストは国の GDP の大部分を占めており、国民経済の状況と規模を反映することができる。企業のロジスティクスコストを削減すると、利益率を大幅に高めることができる。特に経済のグローバル化の中で、企業間の競争はますます激しくなり、企業

の競争力に対するロジスティクスの影響もますます明白になっている。E コマースは企業競争の重要な戦場になった。優れたロジスティクスシステムのサポートがなければ、オンラインで購入した製品をタイムリーかつ完全に消費者に届けることができず、消費者の利益や企業の評判に悪影響を与える可能性がある。ロジスティクスのサポートがなければ、ビジネスフローも空論になる。

また、現代の電子商取引環境では、科学技術は日々変化しており、企業の製品自体からの収益は大幅に減少している。コストを削減し、利益を可能な限り増やすために、企業はロジスティクス競争に焦点を合わせる。ロジスティクスシステム全体で、輸送は特に重要なリンクとなる。したがって、物流輸送のコストを削減することで、物流システム全体のコストを大幅に削減することができる[4-5]。

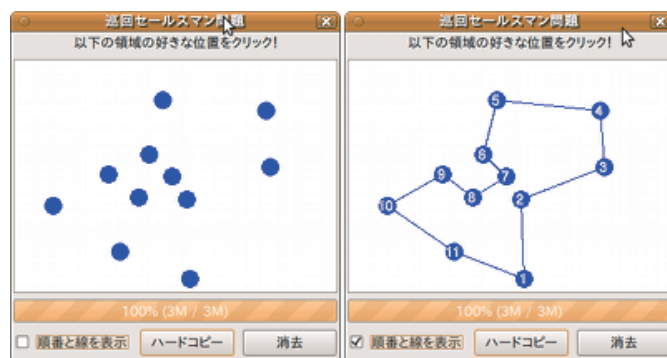


図 1. 巡回セールスマン問題の計算例(10 都市).

### 3. 本研究の目的及び学術的独自性と創造性

経路最適化の問題は学際的研究であり、この問題には管理学、ロジスティクス科学、オペレーションリサーチ、数学、コンピューターアプリケーション、グラフ理論などの分野が含まれる。これは NP 困難の一つであることが認められており、解決がより難しいと考えられている。日常生活では、非常に幅広く応用され、ロジスティクス業界の輸送車両の流通ルートの問題、航空会社の航空機のスケジューリングの問題、およびシャトルルートの計画を解決するため

\*\*助教 電気電子情報工学科

Assistant Professor, Dept. of Electrical, Electronics and Information Engineering

に使用できる。情報技術の発展に伴い、最適化の理論と手法は、エンジニアリング設計、経済計画、輸送、社会的生産で広く使用されており、非常に活発な研究分野となっている。ここ数十年で、人工知能技術は最適化の分野に新しい活力を注入した。遺伝的アルゴリズム、焼きなまし法、タブリサーチなど、自然の現象またはプロセスをシミュレートすることによるバイオニック原理に基づく一連のヒューリスティック最適化方法が相次いで提案されてきた。これらの方法は、従来の最適化方法では解決できない、または解決が難しい複雑な問題で成果を上げている。

国際ロジスティクスの発展に伴い、経路最適化の問題に国境を越えた輸送やマルチモーダル輸送が出現した。これは企業の発展における必然的な結果でありながら、グリーン流通を実現する手段である。配送における資源の共有、ネットワークの合理的な構成、ツールの効率的な構成を通じて、配布リソースのコストを削減するという目標を達成する。

人員、車両、ルートは3つの要素としてロジスティクスを構成し、配送の最適化アルゴリズムは3つの要素を合理的に計画するための方法である。人材の疲労と合理的な人員配置、多種類車両の問題、マルチモーダル輸送の問題、アルゴリズムの問題は、大手のロジスティクス企業の発展を困らせている大きな問題であった。合理的なロジスティクス流通ネットワークの構築には、人員、車両、ルート、アルゴリズムに基づく研究が不可欠であり、企業の物流コストを軽減し、競争力を高めることは非常に重要である<sup>[6-7]</sup>。

#### 4. 本研究で何をどのように、どこまで明らかにしようとするのか

本研究では、人員の疲労制限と人員配置の問題における経路最適化について考慮する。

車が一般的な輸送手段になるにつれて、道路交通事故がますます増えており、ドライバーの疲労運転が道路交通事故の主な原因の一つであるということが実証的な研究によって証明されている。したがって、疲労運転を避けることが重要で、ドライバーの運転行動を制御する方法を研究する必要がある。

次に、顧客の立場から、本研究は顧客の生活の質を改善するのに役立つ。物流の流通は、顧客の食料、衣類、住居、輸送に関連しており、住民の生活と密接に関連している。サプライヤーから顧客への商品をスムーズに転送し完了させることは、顧客の日常生活を確保するための基本となる。電子商取引環境では、顧客が購入した商品が時間内に顧客に配達されない場合、顧客に悪影響を及ぼし、電子商取引会社や速達会社に対する顧客の不満を引き起こし、製品の購入意欲を弱める可能性がある。苦情や返品などの状況が現れ、顧客と企業の両方に不必要なトラブルを引き起こす。

最後に、都市環境の観点から、優れた配送システムは、都市の交通負担を軽減し、騒音と都市からの排気ガスを削減するのに役立つ。

Segalou は、都市内の貨物輸送からの窒素酸化物とエアロゾルの排出量が、都市輸送からの総排出量の40%~45%を占めると指摘した。そのため、配送ルートを最適化することで、お客様のニーズに応えることを前提に、走行回数、走行距離、空積載率を削減し、最終的には交通渋滞や騒音などの現象を軽減し、排気ガスを削減することができる。

ルート最適化の研究は、国内外の学界やビジネス界で常に主流であり、ロジスティクス業界の急速な発展のために緊急に解決する必要がある実際的な問題でもある。以上のことから、ロジスティクスと流通の3つの要素とアルゴリズムの最適化には、高い学術研究価値と重要な実践的意義があることがわかる。

#### 5. 本研究の着想に至った経緯

これまでも最適化に関する研究を行ってきた。関連分野のサーベイを行う中で日頃感じることは、最適化問題に関する手法があまりにも多いという点である。新しい手法を論文発表するためには、適切な評価実験を行い、他の手法に対して優位性を主張することが必要である。ところが、提案モデルがうまく動作するような問題を見つけることは比較的容易であるため、提案モデルの優位性を主張できる都合の良いベンチマーク問題を見つけることができってしまう。この問題を根本的に解決するためには、アルゴリズムを適切に評価するための基盤が必要であると考え、本研究の着想に至った。

##### 5. 1 関連する国内外の研究動向と本研究の位置づけ

本研究は、最適化問題におけるアルゴリズムの評価基盤を明らかにする研究である。したがって、関連する研究は同様の問題に対する評価基盤についての研究である。

組合せ最適化問題の代表例である巡回セールスマン問題(TSP)の研究においては、TSPLIBと呼ばれる標準的なベンチマーク問題群が存在する。アルゴリズムにおいても、評価に用いられる標準的なベンチマーク関数が与えられている。現状、最適化における研究の多くは、標準的なベンチマーク関数の部分集合に対する評価値によってアルゴリズムの性能評価を行うのが一般的である。

これに対して本研究では、最適化関数を「点」ではなく連続的な「面」として捉える「最適化問題の探索曲面」を考え、その空間上でアルゴリズムの性能を議論することを可能としている。このような関数空間上で「相転移面」や「未開の領域」を議論することにより、これまで曖昧であった個々のアルゴリズムの特性や差異が定性的に明らかになり、最適化問題研究のさらなる進展が期待できる。

本研究は、学術的に重要なだけでなく、社会問題への貢献にも役立つと考えている。本テーマによる課題達成により、たとえば、自動運転の最適制御に応用すれば、より安全性向上に役立つと思われる。また、エネルギー管理問題に応用すれば、これまで以上の省エネルギー、効率的なパフォーマンスを発揮するなど、

各課題に適した最適アルゴリズム創出のための評価基盤として、今後のIoT 社会の発展に大きなインパクトをもたらすと期待できる。

## 6. これまでの研究活動

従来から最適化問題に興味を持ち、ルート最適化やその解法アルゴリズムの研究を続けてきた。研究対象とする分野は、主に人員、車両、ルートなど、物流の流通効率や品質であり、該当分野の専門的知識を持ち研究業績を有している。従来のルート最適化問題と比較して、さまざまな角度から検討し、物流輸送におけるさまざまな要素の最適化をまとめた。これらの研究のモチベーションは、「社会で役立つ実システムを構築するためには、最適化問題と人工知能技術の有機的な融合が重要である」との考えに基づいている。その結果、IoT や自動運転の実用化も現実的なものとなっており、今後も我々が研究してきた成果が必要不可欠な技術となることが期待される。

以下では、この研究に関連するこれまでの研究活動について、代表的な論文の概要を紹介する。

### 進化的アルゴリズムの基礎研究

局所最適に容易に陥る従来の遺伝的アルゴリズムの欠点を克服するために、この研究は、情報エントロピーとゲーム理論に基づくハイブリッド遺伝的アルゴリズムを提案した。まず、初期集団は、集団の多様性が情報エントロピーによって計算される方法によって生成された。並列遺伝的アルゴリズムと組み合わせ、標準遺伝的アルゴリズム、パルテノ遺伝的アルゴリズム、および標準遺伝的アルゴリズムとパルテノ遺伝的アルゴリズムを統合したハイブリッド遺伝的アルゴリズムを採用することにより、進化的操作を実行した。次に、母集団全体を最適化することを期待して、各サブ母集団の情報エントロピーと適合度の値に従って、並列ノードの母集団に完全な情報のゲームを操作した。最後に、アルゴリズムのパフォーマンスの優位性を分析するために、3つのプログラム検証関数が導入された。その結果、従来の遺伝的アルゴリズムと比較した場合、このアルゴリズムは優れた最適化能力と解の精度を誇り、高い収束率と安定性を特徴としていることがわかった。

### インターモーダル輸送問題研究

石炭は世界の主要なエネルギー源である。世界中の石炭の流通と産業レイアウトは不均一であるため、優れた石炭ロジスティクスネットワークを持つことが特に重要である。従来の遺伝的アルゴリズムメカニズムから始めて、早熟性や不十分な局所探索能力などのロジスティクス輸送経路最適化の問題における従来の遺伝的アルゴリズムの欠点を明らかにし、本研究は、パルテノ遺伝的アルゴリズムと従来の遺伝的アルゴリズムを組み合わせたハイブリッド遺伝的アルゴリズムを提案する遺伝的的操作で、元の遺伝学に基づいてそれを最適化した。数理モデルを通じて、実際の交通網データに基づいてシミュレーション実験を行った。実験結果は、ハイブリッド遺伝

的アルゴリズムがアルゴリズムの大域的最適化能力と収束速度を改善することを示している。したがって、ハイブリッド遺伝的アルゴリズムは、ロジスティクス流通ルートの最適化に関して、より効果的であり、より適切であることが証明されている。

### 新型輸送モデルの実問題への適用

物流・流通問題の解決と顧客満足度の向上を図り、総コストの最小化を目指し、モデルにドライバーの疲労運転を制限する変数を追加し、異種車両に基づくルート最適化モデルを構築し、このモデルの遺伝的アルゴリズムを設計し、日本の宅急便の納品事例によってアルゴリズムを検証した。数値結果は、ひとり親遺伝的アルゴリズムに基づくロジスティクス流通ルート最適化スキームが、顧客の貨物と時間の要件を満たし、車両の使用コストを削減し、早期または後期のペナルティコストを節約し、会社の経済性を向上させることができることを示している。この研究は、配信の問題を改善するための新しいソリューションのアイデアを提供した<sup>[8-10]</sup>。

### 参考文献

- [1] Howe, Jeff. "The rise of crowdsourcing." *Wired magazine* 14.6 (2006): 1-4.
- [2] Tse, David K., and Peter C. Wilton. "Models of consumer satisfaction formation: An extension." *Journal of marketing research* 25.2 (1988): 204-212.
- [3] O. Toubia "Idea generation, creativity, and incentives." *Marketing Science* 25.5 (2006): 411-425.
- [4] Hillenbrand, Margaret. "Selling the crypto sphere in China." *Cultural Studies* 34.4 (2020): 625-655.
- [5] Klapp, Mathias A., Alan L. Erera, and Alejandro Toriello. "The one-dimensional dynamic dispatch waves problem." *Transportation Science* 52.2 (2018): 402-415.
- [6] Voccia, Stacy A., Ann Melissa Campbell, and Barrett W. Thomas. "The same-day delivery problem for online purchases." *Transportation Science* 53.1 (2019): 167-184.
- [7] Arslan, Alp M., et al. "Crowdsourced delivery—A dynamic pickup and delivery problem with ad hoc drivers." *Transportation Science* 53.1 (2019): 222-235.
- [8] Bortolini, Marco, et al. "Fresh food sustainable distribution: cost, delivery time and carbon footprint three-objective optimization." *Journal of Food Engineering* 174 (2016): 56-67.
- [9] Calvete, Herminia I., Carmen Galé, and José A. Iranzo. "Planning of a decentralized distribution network using bilevel optimization." *Omega* 49 (2014): 30-41.
- [10] Wang, Yong, et al. "Two-echelon logistics distribution region partitioning problem based on a hybrid particle swarm optimization-genetic algorithm." *Expert Systems with Applications* 42.12 (2015): 5019-5031.



# ナビエ・ストークス方程式の幾何的正則性判定法及び双曲型流数値計算

許 本源\*

## Geometric Regularity Criterion for the Navier-Stokes Equations and the Simulations for Hyperbolic Flow

Penyuan HSU\*

### 1. はじめに

流体力学における基礎方程式のナビエ・ストークス方程式は非圧縮性粘性流体の運動を記述する方程式として広く用いられる。古くから理学、工学の各分野から数学的解析、実験及び数値的シミュレーションなど、色々な方法で盛んに研究されてきた。しかしながら、粘性により引き起こされる拡散効果及び強い非線形性の効果で、あるところの流体運動は局所的な構造が現れながら、全体の流体運動に複雑に影響される非局所性を持っている。そのため、例えば3次元ナビエ・ストークス方程式に対して、有限時間で解が爆発するか(時間大域的可解性)というミレニアム問題をはじめ、今なお解明されていない問題が多い。

この爆発問題に対して、数学解析的なアプローチは様々で、例えば弱解の正則性からの挑戦、時間局所的な解の延長可能性が挙げられる。そのほかフィールズ賞の受賞者である Fefferman 氏及び Constantin 氏が提案した幾何的正則性判定法は渦度の方向の振る舞いに着目し、渦度の方向が安定していると有限時間の爆発は起こらないという手法が現在の主流の一つになっている<sup>[2]</sup>。しかしこれらの結果は強い条件を仮定されたにもかかわらず、一部の領域でしか解明されていない。一方、計算科学においては数値シミュレーションで解の急遽増大などの漸近挙動及び局所的な構造の特徴を把握するための研究が進んでいるが、無限大や極限操作など数学解析固有な手法が扱えない。ほかにも血流及び竜巻など具体的な現象を解明するため、実験が設けられている。各分野ではそれぞれ多彩な途中成果が上げられたが、流体運動を解明するには異なる分野の協働及び分野を超える統合的な発想が望まれる。筆者は途中成果を踏まえて、実際に起きている現象への応用を意識しつつ科学計算で流体運動の振る舞いを考察し数学理論を構築してきた。具体的に「幾何的正則性判定法」など解の正則性及び関連問題の数学解析を行い、その結果を基に数値計算を展開し、成果を上げた。その成果の概略を以下に述べる。

### 2. 幾何的正則性判定法

二次元半平面において以下のナビエ・ストークス方程式のバック

ワードの解を考える。

$$\partial_t V + \operatorname{div} (V \otimes V) - \Delta V + \nabla p = 0, \operatorname{div} V = 0 \quad (1)$$

全平面の場合、渦度場についての強最大値原理より、過去無限時刻から2次元全平面で満たす解(マイルド解)は定数しかないことが知られているが<sup>[6][9]</sup>、半平面における粘着境界条件下では全く結果がなかった。粘着条件では境界上渦度が発生することによって、最大値原理から直接渦度場に対する先験的評価(アプリアリ評価)が得られない。そのため、筆者は最大値原理の代わりに、渦度場の境界条件に着目して解析することによってマイルド解は定数解しかないというリウヴィル型定理を構築できた<sup>[8]</sup>。

**定理1 (半平面における粘着境界条件下でのリウヴィル定理)**

$(V, p)$  は半平面における粘着境界条件下で(1)式をみたすとする。以下の仮定(2)から(5)をみたしていれば、 $V$ は恒等的に0となる。

$$\sup_{-\infty < t < 0} \left( \|V(t)\|_{C^{2+\mu}} + \|\partial_t V(t)\|_{C^\mu} \right) < \infty, \mu \in (0, 1) \quad (2)$$

$$p = p_F + p_H \quad (3)$$

$$\sup_{-\infty < t < 0} (-t)^{1/2} \left( \|V(t)\|_\infty \right) < \infty \quad (4)$$

$$\omega \geq 0 \quad (5)$$

(2)式と(4)式はそれぞれ速度 $V$ に対する正則性の条件とI型爆発条件で、(5)式は渦度 $\omega$ の方向に関する仮定である。(3)式は圧力 $p$ の構造についての条件で、 $p_F$ と $p_H$ はそれぞれ対流圧力項とストークス圧力項という(ポアソン方程式とラプラス方程式の解である)。

定理1の応用として半空間の幾何的正則性判定法を確立した。

**定理2 (半空間における幾何的正則性判定法)**

$V$ はナビエ・ストークス方程式の空間的に有界なマイルド解とする。 $V$ は  $\sup_{x,t} (-t)^{1/2} |V(t, x)| < \infty$  をみたすと仮定する。さらに渦度方向  $\xi = \omega/|\omega|$  が以下をみたすとき、 $V$ は  $t=0$  において爆発しない：

ある  $d > 0$ ,  $\eta$  (modulus of continuity) に対して、 $(t, x), (t, y) \in \Omega_d = \{(t, x) | |\omega(t, x)| > d\}$  のところに、

$$|\xi(t, x) - \xi(t, y)| \leq \eta(|x - y|) \quad (6)$$

(6)式は渦度方向に対する連続性の条件である。定理2は渦度方向をコントロールできればI型爆発の可能性を除外できると主張している。

現在に至るまでミレニアム問題に対して、爆発が起きないための十分条件が調べられた結果は様々あるが、その多くは速度など特定な量が小さければ爆発しないと言った条件である。それに対して、

\*助教 数学教室

Assistant Professor, Dept. of Mathematics

Fefferman 氏らが 3 次元全空間で「渦度場の方向が空間変数に対して、一様に連続であれば、たとえ渦度が大きくても爆発しない」という幾何的正則性判定法と言われる判定法を提唱した。この判定法を半空間で粘着境界条件の場合に示すのは全空間の場合と比べると更なる多くの付帯条件が必要であったが、筆者の構築したリウヴィル型定理により幾何的正則性判定法を全空間と同じ仮定の下で初めて確立した。その後、圧力評価の構築ができ、有界領域でも全空間と同じ仮定の下で初めて確立した<sup>〔7〕</sup>。

### 3. 双曲型流の数値計算

ナビエ・ストークス方程式の軸対称双曲型流（背景の線型的流れが  $xy$  平面無限直方から流入し、 $z$  軸の遠方に流出するような流れ）に対して、旋回のある場合と旋回なしの場合を考察し、前節の結果と比較しながら、有限要素法<sup>〔15〕〔16〕〔17〕〔18〕</sup>で数値シミュレーションをし、旋回のある場合に特有な現象を観察した<sup>〔12〕</sup>。概念的に言うと、「爆発（的な流速）が生じる⇒軸上でのみ起こりうる」<sup>〔11〕</sup>と「爆発（的な流速）が生じる⇒旋回あり」<sup>〔19〕</sup>などの数学解析の代表結果から着想を得て数値計算を展開した。前節の定理 2 の結果「渦度が大きくても、渦度場の方向をある程度コントロールできたら（連続性）、爆発解はありえない」ことに対し、本結果は渦度が大きいところに（図 1 の下の境界付近、<sup>〔12〕</sup>）、ある程度不安定なら（渦度方向の著しい変化）（図 2、<sup>〔12〕</sup>）、速度が急速増加するような不安定な現象が起こることを観察した（図 3、<sup>〔12〕</sup>）。この結果は竜巻の 2 セル構造及び核付近の下降気流<sup>〔13〕</sup>に深く関連して、渦度場の瞬間的な挙動がどのように竜巻の構造に影響するかを新たな視点で突破口を切り開いた。

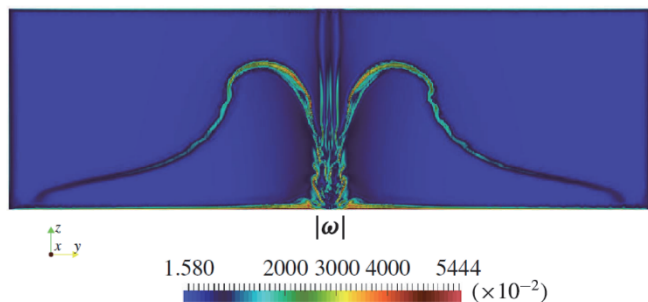


図 1 渦度のノルムの断面図

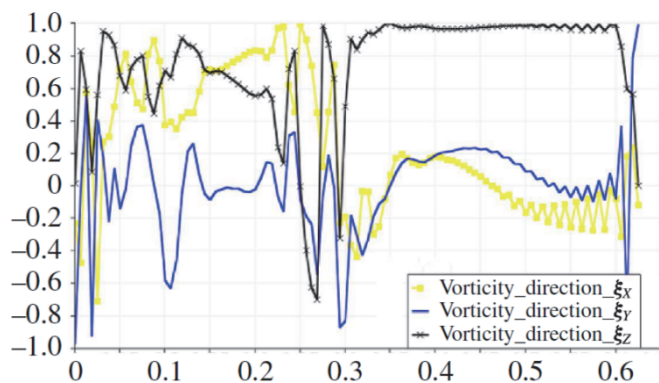


図 2 渦度方向各成分。縦軸は値で横軸は下の境界との距離

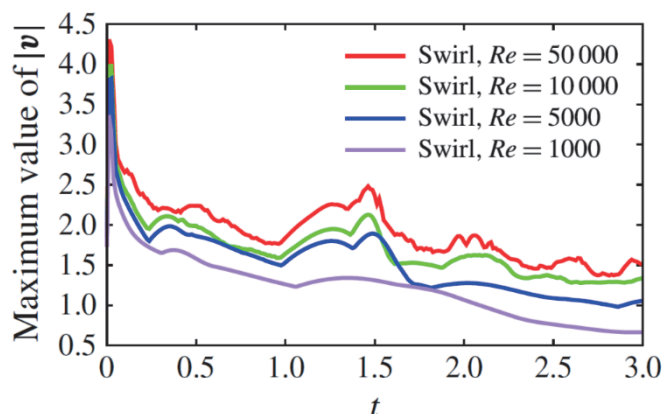


図 3 旋回のある場合に速度ノルムの時間発展

### 4. そのほかのアプローチ

幾何的正則性判定法以外、解の正則性に関するほかのアプローチにも挑戦した。Serrin 条件を満たしている強解が存在するための初期値に対する必要十分条件及びその強解の一意性は、Leray 氏（以下ルレイ）及び Hopf 氏以来、様々な研究結果が上げられた<sup>〔14〕〔10〕</sup>。筆者は最初の Serrin 条件と強解に対して、初期値に対する条件に時間変数の重みをつけることによって、時間的局所強解のクラスを拡張した。言い換えると、元々の強解のクラスに属さないような解も拡張された強解（重み付き強解）のクラスに入っていれば、同じような解析は可能で、延長可能性も考えられる。筆者は拡張された強解（重み付き強解）が存在するための必要十分条件を示し、同クラスでの一意性も考察した<sup>〔3〕〔4〕〔5〕</sup>。

そのほか、難問であった全空間におけるルレイ問題の一般化にも挑戦した<sup>〔11〕</sup>。3 節に述べた双曲型流が背景流とした定常流は、例えばバーガーズ渦という非自明解が知られている。背景流が逆のパターン（ $z$  軸から流入し、他の二つの軸へ流出する）の場合は非自明解が存在しにくいと思われる。筆者が解に対する有界性以外の弱い減衰性を課すことによって、この場合に対して非自明解の非存在を初めて数学解析的に証明をあげた。爆発型自己相似解の構成問題であるルレイ問題は、等方的線形の流れを背景流とする解の存在問題に帰着される。従って筆者の考案した背景流を伴う定常ナビエ・ストークス方程式の解の存在問題は一般化されたルレイ問題とみなせる。背景流が違ふとかなり異なってくるため、ルレイ問題（ルレイ方程式）を扱った多くの文献の方法（エネルギー法など）とは別に、ストークス半群をはじめ、新たな手法によって、リウヴィル型定理を構築することに成功した。

### 5. 今後の展望

非線形楕円形方程式の空間全域における有界の解は定数解かといった問題に対し、ラプラス方程式の場合に、有界の解は定数解のみと知られ、リウヴィル定理と言われている。Fefferman 氏が提唱された幾何的正則性判定法を確立するためにふくらまし法（blow-up argument）を用い、3 次元ナビエ・ストークス方程式の解の正則性問題をリウヴィル型問題に帰着される。

これからの目標は様々な領域での幾何的正則性判定法の確立である。本質的に困難な点は任意の領域においてのストークス半群の

考察及び圧力に対する  $L^\infty$  評価の導出がまだ完全ではないということが挙げられる．領域の性質に合わせて  $L^\infty$  評価の導出がキーと考えている．別のアプローチとして，正則性問題に対し Serrin 氏が提唱した強解のアプローチ及び幾何的的正則性判定法と関連している手法の開発も考えられる．

そのほか，竜巻構造の解明に向けた双曲型流の数値解析及び旋回を伴う軸対称双曲型流の渦度に関する解析を行う．双曲型流にある程度旋回が加わる場合は竜巻の 2 セル構造に深く関連している．前述幾何的的正則性判定法など具体的な数学理論を基に，有限要素法で数値計算を行うことが本研究の手法である．時間平均速度ではなく，各瞬間の速度と渦度などの量に対する計算によって，全体的な印象だけでなく，瞬間的な漸近挙動をより理解することを目標とする．さらに，軸対称ではない場合も考察し，深く関連している大気現象の一つである竜巻の仕組みの解明及び日々重要視されてきた防災対策に貢献していきたい．

## 参考文献

- [1] L. Caffarelli, R. Kohn and L. Nirenberg, Partial regularity of suitable weak solutions of the Navier-Stokes equations, *Communications on Pure and Applied Mathematics*, 35, 771-831 (1982).
- [2] P. Constantin, C. Fefferman, Direction of vorticity and the problem of global regularity for the Navier-Stokes equations, *Indiana Univ. Math. J.*, 42, 775-789 (1993).
- [3] R. Farwig, Y. Giga and P.-Y. Hsu, Initial values for the Navier-Stokes equations in spaces with weights in time, *FUNKCIALAJ EKVACIOJ*, 59, 199-216 (2016).
- [4] R. Farwig, Y. Giga, and P.-Y. Hsu, The Navier-Stokes equations with initial values in Besov spaces of type  $B^{-1+3/q}_{q,\infty}$ , *Journal of the Korean Mathematical Society*, 54 (5), 1483-1504 (2017).
- [5] R. Farwig, Y. Giga, and P.-Y. Hsu, On the continuity of the solutions to the Navier-Stokes equations with initial data in critical Besov spaces, *Annali di Matematica Pura ed Applicata*, 198 (5), 1495-1511 (2019).
- [6] Y. Giga, A remark on a Liouville problem with boundary for the Stokes and the Navier-Stokes equations, *Discrete Contin. Dyn. Syst. Ser. S* 6, 1277-1289 (2013).
- [7] Y. Giga, Z. Gu and P.-Y. Hsu, Continuous alignment of vorticity direction prevents the blow-up of the Navier-Stokes flow under the no-slip boundary condition, *Nonlinear Analysis, Theory, Methods and Applications*, 189, 111579 (2019).
- [8] Y. Giga, P.-Y. Hsu and Y. Maekawa, A Liouville theorem for the planar Navier-Stokes equations with the no-slip boundary condition and its application to a geometric regularity criterion, *Communications in Partial Differential Equations*, 39, 1906-1935 (2014).
- [9] Y. Giga, H. Miura, On vorticity directions near singularities for the Navier-Stokes flows with infinite energy, *Comm. Math. Phys.* 303, 289-300 (2011).
- [10] E. Hopf, Über die Anfangswertaufgabe für die hydrodynamischen Grundgleichungen, *Math. Nachr.*, 4, 213-231 (1951).
- [11] P.-Y. Hsu and Y. Maekawa, On nonexistence for stationary solutions to the Navier-Stokes equations with a linear strain, *Journal of Mathematical Fluid Mechanics*, 15, 317-333 (2013).
- [12] P.-Y. Hsu, H. Notsu and T. Yoneda, A local analysis of the axisymmetric Navier-Stokes flow near a saddle point and no-slip flat boundary, *Journal of Fluid Mechanics*, 794, 444-459 (2016).
- [13] T. Ishihara, S. Oh and Y. Tokuyama, Numerical study on flow fields of tornado-like vortices using the LES turbulence model, *J. Wind Engng Ind. Aerodyn.* 99, 239-248 (2011).
- [14] J. Leray, Sur le mouvement d'un liquide visqueux emplissant l'espace, *Acta Math.*, 63, 193-248 (1934).
- [15] H. Notsu, Numerical computations of cavity flow problems by a pressure stabilized characteristic-curve finite element scheme, *Trans. Japan. Soc. Comput. Engng Sci.* 2008, 20080032 (2008).
- [16] H. Notsu and M. Tabata, A combined finite element scheme with a pressure stabilization and a characteristic-curve method for the Navier-Stokes equations (in Japanese), *Trans. Japan. Soc. Ind. Appl. Maths* 18, 427-445 (2008).
- [17] H. Notsu and M. Tabata, Error estimates of a pressure-stabilized characteristics finite element scheme for the Oseen equations, *J. Sci. Comput.* 65, 940-955 (2015).
- [18] H. Notsu and M. Tabata, Error estimates of a stabilized Lagrange-Galerkin scheme for the Navier-Stokes equations, *ESAIM: Proc. M2AN* 50, 361-380 (2015).
- [19] M. R. Ukhovskii and V. I. Ludovich, Axially symmetric flows of ideal and viscous fluids filling the whole space, *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 32, 52-62 (1968).

# 宇宙線ミュオンによる地震断層の透視

池田 大輔\*

## Tomography for seismic fault by cosmic ray muons

Daisuke IKEDA\*

### 1. はじめに

地表には、宇宙空間より飛来した宇宙線によって生成された様々な粒子が降り注いでいる。特にミュオンと呼ばれる粒子は非常に透過力が高く、これを用いると山体のような巨大な構造物に対してレントゲン撮影のように内部を透視することができる。この手法はミュオグラフィと呼ばれ、近年、火山内部のマグマ[1]、クフ王のピラミッド[2]、アルプス氷河の基盤岩[3]など、様々な対象の透視に成功し、新たな観測技術として期待されている。

本研究では、この手法を地震断層に応用し、ミュオンを用いて地震断層を透視することで、断層の位置や姿勢、断層面の粗さを測定する、新たな測定手法の確立を目指している。断層の姿勢は、その断層で過去に起こった、もしくはこれから起きる地震や津波の規模を推定する上で必須の情報である。既存の主な断層姿勢測定手法としては、掘削孔（ボアホール）の検層、弾性波探査などがある。直径 10cm 程度の穴を掘削するボアホールによる検層は、ボアホールと断層が交差する面において正確な姿勢を得ることができる上、物性情報を知ることでもある。しかし、10cm 程度の領域の情報が断層全体を代表するとは限らないため、より広範囲の情報を得るためには複数のボアホールを掘削する必要がある。弾性波探査は広範囲・大深度（数十 km）までの断層姿勢の測定が可能であるが、多くの測定では断層の粗さを測定するのに十分な分解能を得ることは難しい。本手法では、測定の空白域となることの多い、断層浅部における 10m から数 100m スケールの断層の姿勢の測定が可能である。これらの情報を用いて、詳細な断層モデルを構築することで、より現実的な地震、津波の被害予測ができると期待される。

### 2. ミュオンを用いた地震断層の透視

宇宙線によって生成されたミュオンは、地表ではだいたい手の平を秒間 1 個程度通過する頻度で到来する。ミュオンは経路長と経路上の物質の平均密度の積である密度長に応じて数を減らす。地表でのミュオンのエネルギースペクトルや物質中でのミュオンのエネルギー損失はよく理解されており、これらを用いて得られた

通過密度長に対するミュオン数は観測値を良く説明する（図 1）。つまり、各方向からのミュオンの到来数を測定し、その方向の物質の経路長を与えることで、経路上の平均密度を得ることができる。これがミュオンを用いた透視の基本的な原理である。

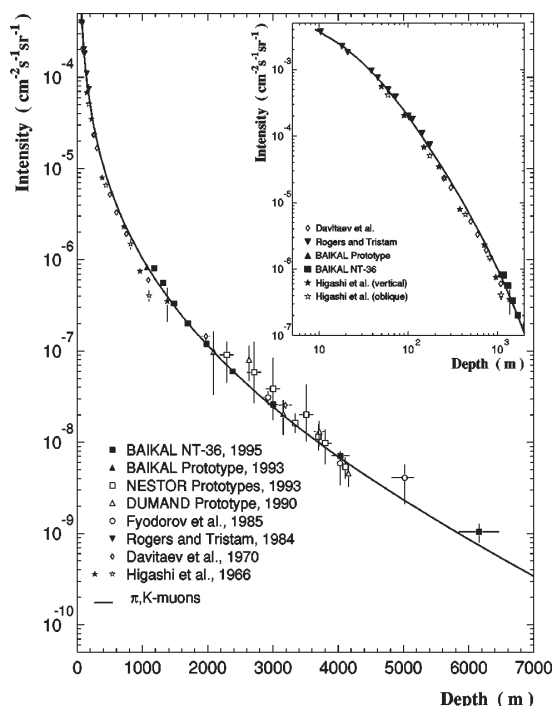


図 1 水等量の深さに対するミュオン到来頻度の実験値及び理論値 [4]

密度に感度がある測定となるため、本手法を用いて密度に特徴がある断層を測定することができる。具体的には、断層運動によって破壊された断層破砕帯と呼ばれる低密度領域を伴う断層や、上盤下盤で密度差のある断層が測定対象となる。

一方、ミュオンは上空から飛来するため、測定対象よりも下方にミュオン検出機を設置する必要がある。この制約のため、地下の断層を測定する場合、図 2 に示すように地中深くにミュオン検出機を設置する必要がある。しかし既存のミュオン検出器は一辺 1-2m 程度の大きさがあることから、トンネルの周辺や、断層が地表

\*助教 物理学教室  
Assistant Professor, Institute of Physics



に露出していてかつそれを見上げる位置に検出器を設置できる場合[5]など、測定対象が限られるという問題点があった。

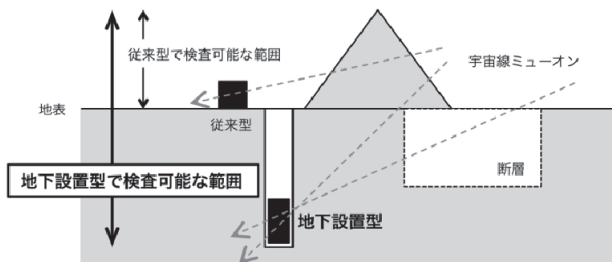


図2 地下設置型ミュオン検出器による断層測定の様式図

そこで本研究では、直径 10cm 程度のボアホール内部という極小のスペースに設置可能な小径縦長のミュオン検出器を開発した。ミュオンを用いた透視を行なうためには到来したミュオンの方向を知る必要があるが、このような形状の検出器を地下で運用する場合、到来するミュオンの天頂角分布は特定方向(～40度)にピークを持つことが分かっている。これは地表におけるミュオンの天頂角分布は垂直方向が多く、検出器は縦長であることから水平方向の感度が良く、地中でのミュオンの減衰は垂直方向の方が少ないためである。このような検出器を用いて、ボアホール内で深さを変えながら測定することで、ボアホール周囲 100m 程度の地下の密度構造を 3 次元的にスキャンすることができる(図3)。

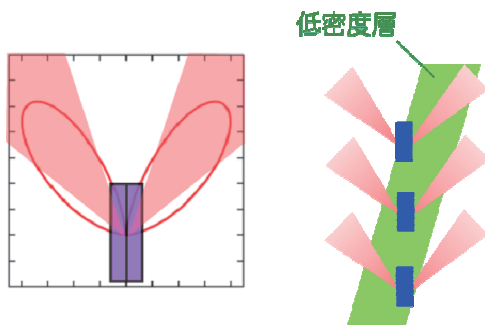


図3 ボアホール埋設型ミュオン検出器で観測されるミュオンの天頂角分布(左)と、地下密度構造スキャンの様式図(右)

### 3. ボアホール埋設型ミュオン検出器

本研究で開発したボアホール埋設型ミュオン検出器の様式図と内部写真を図4に示す。長さ 2m の耐圧容器内に長さ 1m のプラスチックシンチレータ 16 本を断面が内外 2 つの 8 角形を構成するように設置されている。ミュオンがシンチレータを通過する際、その通過距離に比例した光量でシンチレータは発光する。その光をシンチレータに這わせた波長変換ファイバーにより上下 2 つの 16ch マルチアノード型光電子増倍管(MAPMT)に導き、電気信号に変換する。信号は耐圧容器内に設置された測定用エレクトロニクス(Cosmo-Z, 特殊電子回路株式会社)上の FADC (12bit, 80MSps) を

用いてデジタル化する。ペダスタルを差し引いた ADC 合計値が 100 以上のチャンネルが 2 つ以上存在した事象のみ波形として記録する。検出器から地上まではケーブルで接続されており、光ファイバを経由したデータ通信や電力供給を行なうことができる。

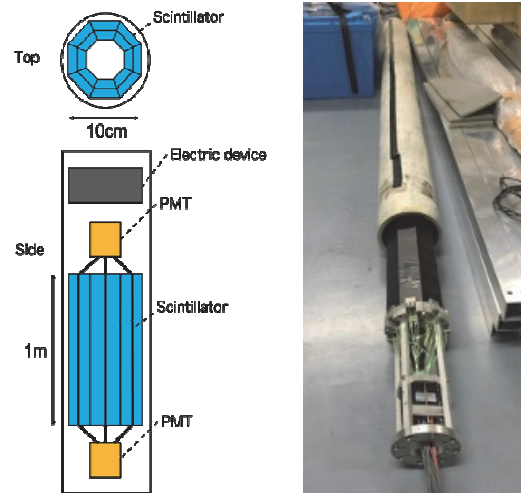


図4 ボアホール埋設型ミュオン検出器の様式図(左)及び検出器内部の外観(右)

### 4. 跡津川断層における測定

本手法の実証試験として、岐阜県飛騨市の跡津川断層を貫くボアホールで測定を行なった。跡津川断層及びボアホールの位置と、観測の様子を図5に示す。跡津川断層は岐阜県から富山県に跨がる全長約 70km に及ぶ横ずれの A 級活断層である。このボアホールは防災科学技術研究所が跡津川断層ドリリングプロジェクト[6][7]として掘削した物で、掘削コアのサンプリングやγ線検層が行われている。これらの測定から、このボアホールは断層破砕帯を貫いていることが分かっている。

測定は 2016 年から 2017 年にかけて行われ、深さ 10m から 100m まで 10m 刻みの観測データを取得した。

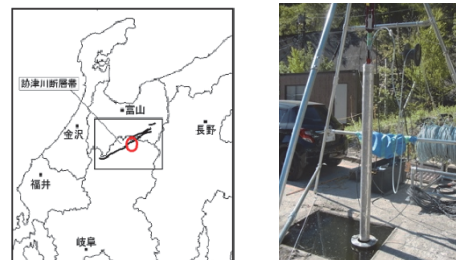


図5 跡津川断層(黒線)とボアホールの位置(赤丸)(左)とボアホール挿入直前の測定の外観(右)

### 5. 解析手法

データ解析の流れを図6に示す。最終的に、観測された各深さ、



較する．トレンチ調査[12]や断層露頭調査[13]からこの地域の走向は N60-70° E, 傾斜角は 70-90° であることが分かっており, 本測定結果と一致している．この露頭の位置は, 得られた断層破砕帯と地上面が交わる面にあり, こちらも矛盾がない．またボアホール掘削時に行われたγ線検層の結果, ボアホール近辺の密度は, 破砕帯に到達していないと思われる深さ 22-40m の密度が 2.46 g/cm<sup>3</sup>, 深さ 40m-350m の加重平均が 2.28 g/cm<sup>3</sup>であることが分かっており, こちらも本測定結果と良く一致している．結果として, ミューオンを用いて得られた断層パラメータは, 既知の走向, 傾斜角, 密度, 露頭の位置において良く一致しており, 本測定で確かに断層が観測されたという傍証と言える．

一方で, 断層の厚みに関する情報はこれまでに余り得られておらず, 新たな知見となる可能性がある．現在の測定では約 140m と想定よりも大きい値が得られているが, 誤差も 39m と大きい．これは破砕帯のボアホール側の位置に関しては良く拘束されるが, 逆側の面は検出器の主要な視野の外側となっていることから拘束が強くないためである．

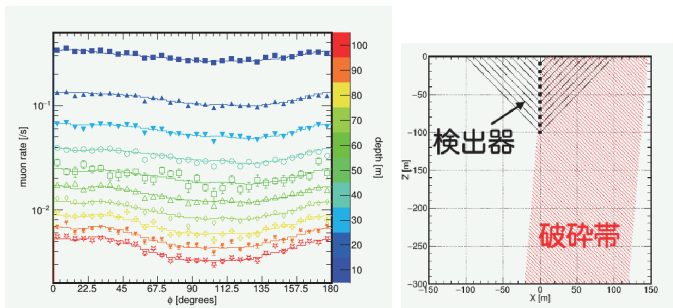


図 9 (左) 表 1 のパラメータにおける実データと期待値の比較．点が観測値, 線が期待値, 色が測定深さを示す．横軸は方位角で 0 度が東西方向, 90 度が南北方向であり, 縦軸は観測されたミューオン到来頻度を検出器の感度で補正した物である．(右) 得られた断層破砕帯の断面図．横軸は破砕帯を断面で切った場合の長さで縦軸は深さを示す．黒点が検出器位置, 黒線が観測されるミューオンの天頂角, 赤斜線の領域が本測定で得られた破砕帯を示す．

表 1 断層破砕帯を 1 枚板であると仮定した場合に実データを最も再現するパラメータ．誤差は統計誤差を示す．

パラメータ	値
走向	N 72.5 ± 0.4° E
傾斜角	85.1 ± 0.4° N
断層とボアホールの交点 (上端)	-57.5 ± 3.3 m
断層の厚さ	140.2 ± 38.7 m
密度 (断層)	2.33 ± 0.01 g/cm <sup>3</sup>
密度 (断層以外)	2.48 ± 0.01 g/cm <sup>3</sup>

## 7. 今後の展望

今回は断層破砕帯を 1 枚板であると仮定したモデルについての解析を行なったが, 破砕帯内部の厚み方向の密度プロファイルや, 複数枚の板モデルの評価などを調べることで, 断層に関するより詳細な情報が得られる可能性がある．しかし現在の手法では, モデルを複雑にすると,  $\chi^2$  が最小となるパラメータを探索する際に局所最小点に落ちてしまう問題があることが分かっている．これは測定による拘束が不十分であることも理由であると考えられるが, パラメータ探索の方法の工夫で改善する可能性があるため, マルコフ連鎖モンテカルロ法, 特にレプリカ交換法など, より工夫された手法を取り入れる予定である．

また 6 節で述べたように, 断層破砕帯の幅についての情報は有用となる可能性があるが, 現在の測定では強く拘束されていない．これはより深部まで測定範囲を伸ばすか, 近傍に掘削したボアホールで測定する方法により改善されるはずである．

また本手法は 2 節で述べたように, 今回測定を行った断層破砕帯と呼ばれる低密度領域を伴う断層以外に, 上盤下盤で密度差のある断層も測定対象となる．今後, 後者に相当する断層である, 南房総に位置する石堂断層の測定を検討している．

加えて, 現在の検出器は業界標準である 86 コアと呼ばれる 86 mm 径のボアホール内部に埋設するには大きいため, 検出器の小型化を進めている．86 コアに対応することで, より安価に, より多くの条件下における断層の測定が可能となる．本測定手法は本質として地下の密度構造を測定しているため, 断層以外にも様々な応用が期待される．86 コアへの対応はそのような応用の可能性を広げる物でもある．

## 8. まとめ

断層浅部の断層の傾斜角や形状を測定する新たな手法である, ボアホール内部からのミューオンによる断層透視を実証するため, ボアホール埋設型ミューオン検出器を開発し, 跡津川断層の測定を行なった．測定された断層パラメータは既知の値と良く一致していることから, 断層の測定に成功したと言える．本手法は既知の手法と比較して, ボアホールさえあれば安価に広範囲の断層の測定を行なうことが可能であり, より現実に即した断層モデルによる地震や津波の強度予測の高精度化など, 防災という観点での貢献が期待される．また地下密度構造の測定手法という観点から, 断層以外の様々な応用も考えられる．今後, より詳細な断層パラメータの取得や業界標準の 86 コアに対応した新型検出器の開発を進め, 本手法を確立させたい．

## 参考文献

- [1] H. K. M. Tanaka, T. Kusagaya and H. Shinohara, Radiographic visualization of magma dynamics in an erupting volcano, Nature communications, 5, 3381 (2014)
- [2] K. Morishima et al., Discovery of a big void in Khufu's Pyramid by observation of cosmic-ray muons, Nature, 552, 386-390 (2017)
- [3] R. Nishiyama et al., First measurement of ice - bedrock interface of

alpine glaciers by cosmic muon radiography, *Geophysical Research Letters*, 44, 6244-6251 (2017)

[4] E. V. Bugaev et al., Atmospheric muon flux at sea level, underground, and underwater, *Physical Review D*, 58, 054001 (1998)

[5] H. K. M. Tanaka et al., Cosmic muon imaging of hidden seismic fault zones: Rainwater permeation into the mechanical fractured zones in Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line, Japan, *Earth and Planetary Science Letters*, 306, 156-162 (2011)

[6] 小村健太郎, 山下 太, 山田隆二, 松田達生, 福山英一, 久保篤規, 高井香里, 跡津川断層ドリリング (1) —跡津川地区断層破碎帯コアと物理検層—, 地球惑星科学関連学会 2004 年合同大会予稿集, J078-006 (2004)

[7] 松田達生, 小村健太郎, 山田隆二, 田中秀実, 島田耕史, 大谷具幸, 小林健太, 跡津川断層クリーブ域における NIED 活断層掘削, 日本地震学会 2005 年度秋季大会講演予稿集, 236 (2005)

[8] M. Honda et al., Calculation of atmospheric neutrino flux using the interaction model calibrated with atmospheric muon data, *Physical Review D*, 75, 043006 (2007)

[9] D. E. Groom, N. V. Mokhov and S. Striganov, Muon stopping power and range tables 10 MeV-100 TeV, *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 76, 2, LBNL-44742 (2001)

[10] S. Agostinelli et al., Geant4 - a simulation toolkit, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 506, 3, 250-303 (2003)

[11] F. James and M. Roos, Minuit - a system for function minimization and analysis of the parameter errors and correlations, *Computer Physics Communications*, 10, 6, 343-367 (1975)

[12] 跡津川断層発掘調査団, 1982 年跡津川断層(野首地区)トレンチ調査, *活断層研究* 3, 59-64 (1986)

[13] ハスパートル他, 跡津川断層中部で新たに確認された断層露頭, *活断層研究* 20, 46-51 (2001)



# 銀河系中心領域における中間質量ブラックホール候補の発見

竹川 俊也

## Discovery of Intermediate-mass Black Hole Candidates in the Galactic Center

Shunya TAKEKAWA\*

### 1. はじめに

宇宙には少なくとも 1000 億個以上の銀河が存在し、そのほとんどの中心には質量が太陽の 100 万倍から 100 億倍以上にも及ぶ超大質量ブラックホール(supermassive black hole; SMBH)が潜んでいると考えられている。私たち人類の住む天の川銀河(銀河系)も例外ではなく、銀河系の中心核「いて座 A\*」も、その周囲を公転する恒星の軌道運動の長年にわたる解析から、太陽の 400 万倍程度の質量を有する SMBH であることがわかっている<sup>[1]</sup>。

一般に銀河の中心核は、そこにある SMBH に物質が供給されることで様々な活動性を示す。しかし、どのような物理過程で銀河中心核に物質が供給されるのかは未だあまり理解されていない。また、中心核 SMBH がどのように形成されたのかも未解明である。宇宙初期の特殊な環境下で生まれた、太陽の 1000 から 10 万倍程度の質量を持つ中間質量ブラックホール(intermediate-mass black hole; IMBH)が種となり、種ブラックホールへの質量降着やブラックホール同士の合体を繰り返すことで、SMBH が形成されたとするシナリオが提唱されているものの、現状 IMBH の存在を示す決定的な証拠は得られていない<sup>[2]</sup>。

銀河中心核への物質供給過程や SMBH の起源を探る上で、最も詳細な観測が可能な銀河系中心領域は極めて重要な研究対象である。銀河系中心核いて座 A\*から半径 200 pc (1 pc は 3.26 光年)以内の領域は Central Molecular Zone (CMZ)と呼ばれ、銀河円盤部に比べ高温・高密度かつ乱流が卓越した分子ガスが密集した特異な領域である(図 1)。筆者は、銀河系中心核への質量供給過程や中心核の起源解明を目指し、また、CMZ 内の分子ガスの物理状態や運動を調べる目的で、野辺山 45m 望遠鏡(図 2)や Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA)をはじめとした国内外の大型共同利用装置を用いた観測的研究を行なっている。本稿では、CMZ に点在する「高速度コンパクト雲」と呼ばれる特異な分子雲の運動を手がかりに、“見えないブラックホール”を探し出す研究について紹介する。

### 2. 高速度コンパクト雲

星間分子が雲状に密にまとまったものを分子雲という。分子雲の

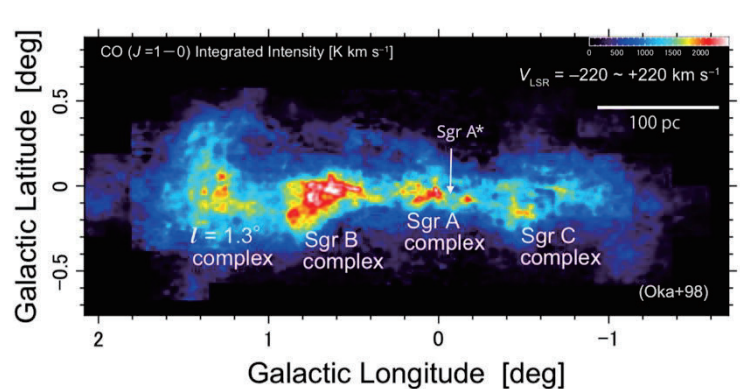


図 1 野辺山 45 m 鏡を用いて一酸化炭素分子スペクトル線(CO  $J=1-0$ )で観測された Central Molecular Zone



図 2 野辺山 45 m 電波望遠鏡

典型的な大きさは 1–10 pc 程度であり、主にミリ波やサブミリ波帯の分子スペクトル線により観測される。一般にそのスペクトル線幅(速度幅)は、分子雲のサイズが小さいほど狭くなることが知られている<sup>[3]</sup>。一方で CMZ 内には、空間的にコンパクト(直径  $d < 5$  pc)であるにもかかわらず、速度幅が異常に広い( $\Delta V > 50$  km s<sup>-1</sup>)分子雲

\*助教 物理学教室  
Assistant Professor, Institute of Physics

が多数発見されている<sup>[4,5]</sup>。これら特異分子雲は「高速度コンパクト雲」と呼ばれ、主に筆者らの研究グループによりその起源が議論されている。図3に、代表的な高速度コンパクト雲 CO-0.40-0.22 について、分子スペクトル線強度の空間分布図(積分強度図)および位置-速度図(横軸に位置座標、縦軸に視線速度をとりスペクトル線強度を図示したもの)を示す。このように、高速度コンパクト雲は空間的には(それほど高くない分解能で観測する限り)シンプルな見かけである一方で(図3a)、位置-速度図上では速度方向に伸びた細長い特徴的な構造として現れる(図3b)。高速度コンパクト雲の起源については、未だ統一的な理解が得られていないが、超新星爆発による影響<sup>[6]</sup>や、分子雲同士の衝突<sup>[7]</sup>、見えない重力源との重力相互作用<sup>[8-12]</sup>などが考えられている。

### 3. 中間質量ブラックホール候補の発見

筆者らは、2016年に実施した東アジア天文台の James Clerk Maxwell Telescope (JCMT)を用いた銀河系中心核周りの分子スペクトル線観測で、新たに2つの高速度コンパクト雲(HCN-0.009-0.044 および HCN-0.085-0.094)を発見した<sup>[13]</sup>。これら2つの高速度コンパクト雲は、大きさが1 pc 程度とそれまでに発見されていた高速度コンパクト雲の中では最小級であり、JCMTの空間分解能(15 秒角程度)

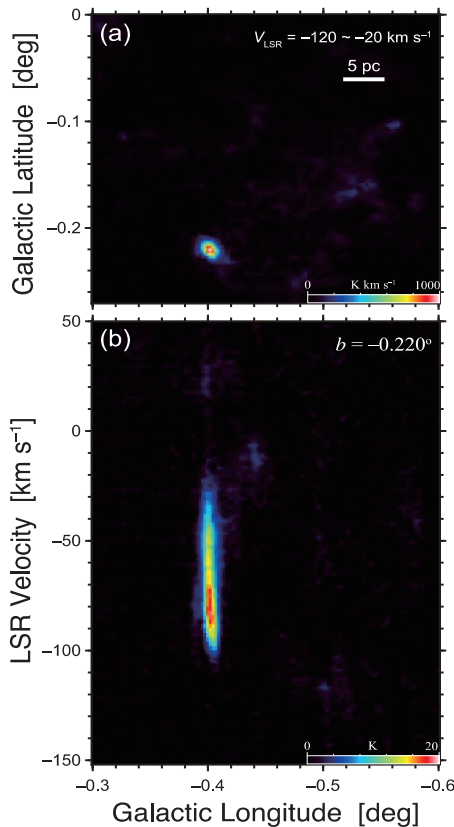


図3 分子スペクトル線(HCN  $J=4-3$ )で観測された高速度コンパクト雲 CO-0.40-0.22 の空間分布図(a)と銀緯-0.220°における位置-速度図(b)

では内部構造や詳細な運動は把握することができない。そこで2018年にALMAを用いて、2つの小型高速度コンパクト雲に対して、空間分解能が約1秒角の詳細な分子スペクトル線観測を行った。

その結果、それまで不明瞭であった空間構造と内部運動が明らかになった。図4(a)に、ALMAで観測された HCN-0.009-0.044 の平均速度図(各位置での分子ガスの視線速度を色付けしたもの)を示す。この速度図には、点状重力源周りを軌道回転運動している天体に典型的な速度の変化パターンが見られる。詳しい運動解析の結果、観測された速度場は、共通の点状重力源(図中の星印)を中心とした2つの異なったケプラー軌道(図中の2つの楕円)上の運動で再現できることがわかった(図4b)。モデルフィットの結果得られた重力源の質量は $(3.2 \pm 0.6) \times 10^4$  太陽質量であった。すなわち、ここには太陽の3万倍にも及ぶ莫大な質量が集中していると考えられる。

このように莫大な質量密度を有する天体としては、ブラックホールもしくは超高密度な星団が可能性として挙げられるが、同方向には明るい天体は検出されず、星団を重力源として考えるのは困難である。以上から、HCN-0.009-0.044 の中には3万太陽質量のIMBHが潜んでいると結論できる<sup>[10]</sup>。

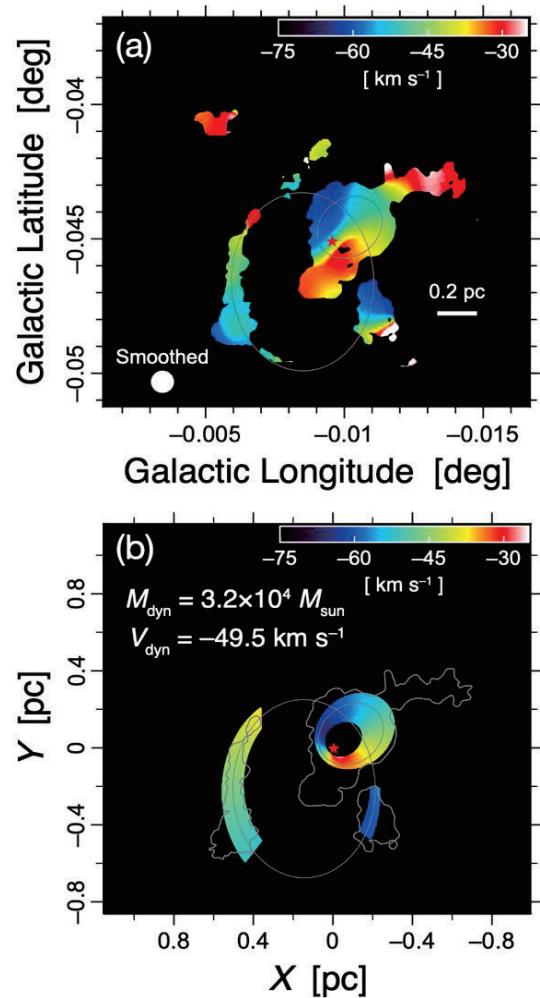


図4 HCN-0.009-0.044 の平均視線速度分布図(a)と観測データを元にモデル化された視線速度分布図

本稿では詳細は割愛するが、HCN-0.009-0.044と同様に、ALMA観測によりHCN-0.085-0.094にも点状重力源周りの軌道回転運動を強く示唆する速度構造が発見され、運動解析からここにも1万太陽質量のIMBHが潜んでいる可能性があることがわかった<sup>[12]</sup>。筆者らは、高速度コンパクト雲の運動に着目することで、現在までに4つのIMBH候補を銀河系中心領域に発見している。

## まとめと今後の展望

高速度コンパクト雲の詳細な観測により、それらの中に潜む“見えない質量”の存在を示唆し、未だ確たる存在証拠が得られていないIMBHの候補天体を新たに銀河系中心核近傍に発見することができた。これらIMBHは将来的には中心核SMBHと合体し、その成長に寄与すると考えられる。また、今回存在が示唆されたような重いIMBHは、SMBHの起源説明や銀河進化の理解の鍵であり、理論的に考えられているSMBH形成シナリオを支持する重要な成果である。

ブラックホールは、ブラックホールに落ち込む物質により形成される降着円盤からの明るい放射を検出することで従来発見されてきた。一方で、筆者らが行っているような分子ガスの特徴的な運動を検出する試みは、十分な質量降着のない暗いブラックホールに対しても有効な新しいブラックホール探索手法である。同様の手法により、銀河系中心領域のみならず銀河系円盤部や系外銀河中にも、今後続々とブラックホール候補天体が発見できることを期待している。

## 参考文献

- [1] A. M. Ghez, B. L. Klein, M. Morris, and E. E. Becklin, "High Proper-Motion Stars in the Vicinity of Sagittarius A\*: Evidence for a Supermassive Black Hole at the Center of Our Galaxy", *Astrophys. J.*, 509, 678-686 (1998)
- [2] M. Mezcuca, "Observational evidence for intermediate-mass black holes", *International Journal of Modern Physics D*, 26, 1730021 (2017)
- [3] R. B. Larson, "Turbulence and star formation in molecular clouds", *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 194, 809-826 (1981)
- [4] T. Oka, T. Hasegawa, F. Sato, M. Tsuboi, and, A. Miyazaki, "A Large-Scale CO Survey of the Galactic Center", *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 118, 455-515 (1998)
- [5] S. Tokuyama, T. Oka, S. Takekawa, Y. Iwata, S. Tsujimoto, M. Yamada, M. Furusawa, and M. Nomura, "High-resolution CO imagings of the Galactic central molecular zone", *Publ. Astron. Soc. Pac.*, 71, 19 (2019)
- [6] S. Tsujimoto, T. Oka, S. Takekawa, M. Yamada, S. Tokuyama, Y. Iwata, and J. A. Roll, "Detection of Another Molecular Bubble in the Galactic Center", *Astrophys. J.*, 856, 91 (2018)
- [7] K. Tanaka, "ALMA Images of the Host Cloud of the Intermediate-mass Black Hole Candidate CO-0.40-0.22\*: No Evidence for Cloud-Black Hole Interaction, but Evidence for a Cloud-Cloud Collision", *Astrophys. J.*, 859, 86 (2018)
- [8] T. Oka, R. Mizuno, K. Miura, and S. Takekawa, "SIGNATURE OF AN INTERMEDIATE-MASS BLACK HOLE IN THE CENTRAL

MOLECULAR ZONE OF OUR GALAXY", *Astrophys. J. Lett.*, 816, L7 (2016)

[9] T. Oka, S. Tsujimoto, Y. Iwata, M. Nomura, and S. Takekawa, "Millimetre-wave emission from an intermediate- mass black hole candidate in the Milky Way", *Nat. Astron.*, 1, 709 (2017)

[10] S. Takekawa, T. Oka, Y. Iwata, S. Tsujimoto, and M. Nomura, "Indication of Another Intermediate-mass Black Hole in the Galactic Center", *Astrophys. J. Lett.*, 871, L1 (2019)

[11] S. Takekawa, T. Oka, S. Tokuyama, K. Tanabe, Y. Iwata, S. Tsujimoto, M. Nomura, and Y. Shibuya, "An energetic high-velocity compact cloud: CO-0.31+0.11", *Publ. Astron. Soc. Pac.*, 71, 21 (2019)

[12] S. Takekawa, T. Oka, Y. Iwata, S. Tsujimoto, and M. Nomura, "The Fifth Candidate for an Intermediate-mass Black Hoke in the Galactic Center", *Astrophys. J.*, 890, 167 (2020)

[13] S. Takekawa, T. Oka, Y. Iwata, S. Tokuyama, and M. Nomura, "Discovery of Two Small High-Velocity Compact Clouds in the Central 10 pc of Our Galaxy", *Astrophys. J. Lett.*, 843, L11 (2017)





### 3. 受賞研究の紹介

3-1 水素化アモルファスシリコン/結晶シリコンヘテロ接合太陽電池の陽電子消滅法に基づく界面近傍微細構造評価

松木 伸行



# 水素化アモルファスシリコン／結晶シリコンヘテロ接合太陽電池の 陽電子消滅法に基づく界面近傍微細構造評価

松本 伸行\*

## Characterization of the near-interface microstructure of a-Si:H/c-Si heterojunction solar cells based on positron annihilation spectroscopy

Nobuyuki MATSUKI\*

### 1. 緒言

筆者は国立大学法人筑波大学大学院 上殿明良教授，国立研究開発法人産業技術総合研究所 大島永康博士，B. E. O'Rourke 博士との共同研究により高効率太陽電池として開発と普及が進んでいる水素化アモルファスシリコン (a-Si:H) / 結晶シリコン (c-Si) ヘテロ接合太陽電池を評価する新規手法の開発を目指してきた。2019年3月，ストックホルムにおいて開催された Advanced Functional Materials Congress (先端機能材料国際会議) で発表した研究 “Characterization of the near-interface microstructure of a-Si:H/c-Si heterojunction solar cells based on positron annihilation spectroscopy” (陽電子消滅法に基づく水素化アモルファスシリコン／結晶シリコンヘテロ接合太陽電池の界面近傍微細構造評価) に対して IAAM (International Association of Advanced Materials) Scientist medal が授与された。本稿では，同研究の概要および今後の展望について紹介する。

### 2. 研究背景

1992年に三洋電機(株)(現：パナソニック(株))によって創始された水素化アモルファスシリコン(a-Si:H)/結晶シリコン(c-Si)ヘテロ接合太陽電池(以下，Si-HJSC)は，HIT(Heterojunction with Intrinsic Thin-Layer)という登録商標で高効率Si太陽電池の代表として進展し[1, 2]，2014年にはそれまで15年間破られなかったSi太陽電池の最高変換効率25.0%を凌駕する25.6%を達成した[3]。2000年代に20年間の特許期間が終了してからは世界各国の他メーカーでもSi-HJSCを製造・販売するようになり，2017年には(株)カネガがバックコンタクト型で世界最高の変換効率26.7%を達成するなど研究開発競争が続いている[4]。また近年，「有機―無機ハイブリッドハライドペロブスカイト(以下，ペロブスカイト)太陽電池」が高効率薄膜太陽電池の新材料として注目されており[5]，ペロブスカイトとSi-HJSCとのタンデム化によって変換効率30%を超える超高効率太陽電池を開発する動きが世界各国の研究機関で活発になっている[6, 7]。すなわち，Si-HJSCは様々な形式の太陽電池の中でも特に重要な位置を占めつつあり，さらなる変換効率の向上へ向けた改良が期待されている。

図1にSi-HJSCの基本構造と対応するエネルギーバンドダイアグラムを示す。Si-HJSCにおいてはc-Si表面に積層させた厚さ10 nm

に満たない Intrinsic a-Si:H 層(i 層)が c-Si 表面欠陥を不動態化(Passivate)すること，および a-Si:H と c-Si のバンドギャップの相違によりバンドオフセットが形成されることにより逆飽和電流が阻止されることが開放電圧(Open-circuit voltage,  $V_{oc}$ )および曲線因子(Fill-factor, FF)の向上に貢献している。したがって，a-Si:H/c-Si ヘテロ接合界面近傍の a-Si:H における構造・物性を解明することがさらなる特性向上の上で重要となる。a-Si:H/c-Si 界面近傍における a-Si:H 内部には Si 原子 1~数 10 個分の微細なボイド(空隙)が存在すると考えられており，このボイドのサイズや分布が太陽電池特性に影響すると考えられている。a-Si:H 中のボイドサイズを推定するためには X 線小角散乱法または陽電子消滅法が従来の方法として挙げられるが，これらの測定にはいずれも 100 nm 以上の膜厚が必要であるため，nm オーダーの極薄膜 a-Si:H に対する評価が極めて困難であった。

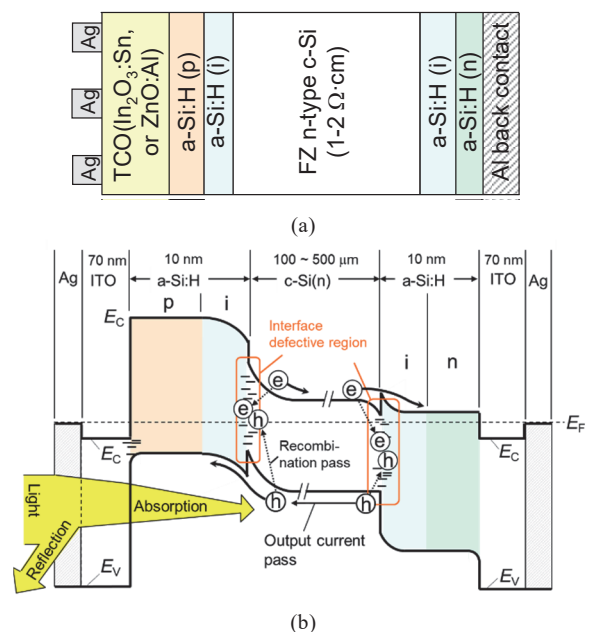


図1 Si-HJSCの (a) 基本構造および  
(b)エネルギーバンドダイアグラム。

そこで筆者は，ボイドサイズの評価に有効な陽電子消滅法と，nm オーダーの極薄膜 a-Si:H の光学物性評価に有効な分光エリブソメトリー法を組み合わせることで，nm オーダーの極薄膜 a-Si:H 内にお

\*准教授 電気電子情報工学科  
Associate Professor, Dept. of Electrical, Electronics and Information Engineering

るボイドサイズを評価可能な新しい手法を提案し、その実証を目指して本研究を進めてきた。

### 3. 実験方法

W19 mm×L50 mm×t0.28mm の鏡面 FZ-Si(111)基板を RCA クリーニングプロセスにより化学洗浄・表面水素終端した後、プラズマ化学気相成長 (CVD) 法により a-Si:H 層を 150 nm 厚製膜し、a-Si:H/c-Si ヘテロ接合構造を作製した。製膜時圧力は 6.5 Pa, RF 出力は 13 mW/cm<sup>2</sup> とした。膜中ボイド構造を系統的に変化させた試料を複数作製するため、基板温度 ( $T_s$ ) は 80, 130, 180, 130, 280 °C とした。プラズマ CVD 装置には J. A. Woollam M-2000 回転補償子型エリプソメータが設置されており、基板鉛直から 70° の入射角・反射角で Si 基板表面を in-situ 観察可能な構造となっている。製膜中、実時間で SE データを取得した。陽電子寿命は、(国)産業技術総合研究所の陽電子欠陥測定装置により陽電子エネルギーを 2 keV (侵入深さピーク 53 nm) として測定した。

### 4. 実験結果および考察

a-Si:H 内に形成されるボイドが Si 原子空孔の集合として成る球形と近似してその直径を  $D_{\text{void}}$  とすると、Si 原子 1 個の体積を  $V_{\text{Si}}$ 、また、原子空孔数を  $N_{\text{VSi}}$  として次の関係が導かれる：

$$D_{\text{void}} = (6N_{\text{VSi}} \cdot V_{\text{Si}}/\pi)^{1/3} \quad (1)$$

測定された 150 nm 厚 a-Si:H の陽電子寿命  $\tau$  から Tuomisto [8] と Amarendra [9] らの第一原理計算と実験とに基づく相関性により a-Si:H 内に形成されたボイドの原子空孔数  $N_{\text{VSi}}$  を算出することによって  $D_{\text{void}}$  を求めることができる。また、分光エリプソメトリの測定結果から、多層構造光学モデルを用いて a-Si:H の誘電関数  $\epsilon(E) = \epsilon_1(E) - i\epsilon_2(E)$  を求めると光吸収に関する項  $\epsilon_2(E)$  が  $E \sim 3.8$  eV に最大値を持つ。この最大値を  $\epsilon_2^{\text{peak}}$  と定義する。製膜条件の異なる各試料に対して求めた  $D_{\text{void}}$  と  $\epsilon_2^{\text{peak}}$  とを同じグラフ内にプロットすると、図 2 に示すような非常にきれいな線形関係となることを筆者は見出した。なお、グラフ中には Mahan らによって小角 X 線散乱により求められた a-Si:H 中ボイド直径 [10] の範囲が示してあるが、同様のサイズオーダーであり、本結果の妥当性を表している。

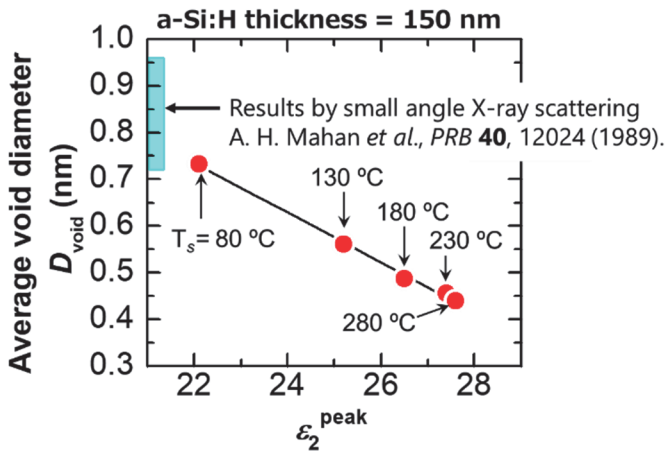


図 2 製膜温度の異なる a-Si:H による  $D_{\text{void}} - \epsilon_2^{\text{peak}}$  グラフ。

この線形関係から、分光エリプソメトリの測定結果から決定し

た  $\epsilon_2^{\text{peak}}$  を用いて間接的に a-Si:H 内のボイドサイズを求めることができるようになる。すると、陽電子消滅では計測することが極めて困難であった nm オーダーの極薄膜 a-Si:H に対して膜中ボイドサイズを推定できるようになるので、分光エリプソメトリによってボイドサイズの製膜中「その場観察」が可能になる。このことが本研究の最大の開発ポイントである。

図 2 で得られた線形性がより広範囲の  $\epsilon_2^{\text{peak}}$  にも成り立つと仮定して外挿したグラフを図 3(a) に示す。図 3(a) の相関関係を用いて、a-Si:H 膜厚  $t_{\text{a-Si:H}} = 0.8 \sim 150$  nm までの種々の膜厚に対して  $D_{\text{void}}$  を求めプロットしたものが図 3(b) である。プロットの過程をわかりやすくするため、a-Si:H の厚みが 0.8, 6.7, 100 nm の 3 例について膜厚の模式図とプロットとの対応関係も図示している。

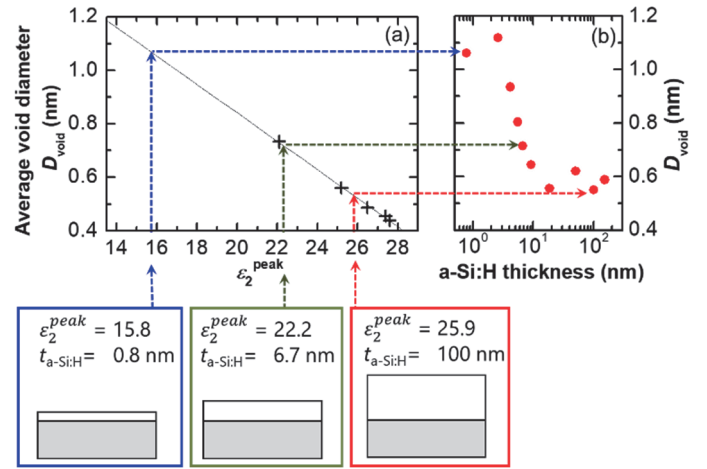


図 3 a-Si:H 膜厚とボイドサイズとの関係。(a) 図 2 の  $D_{\text{void}} - \epsilon_2^{\text{peak}}$  グラフにおいて最小二乗フィット直線をより広範囲まで外挿した図 (b)  $D_{\text{void}}$  の a-Si:H 膜厚に対する依存性。

図 3(b) で横軸 (a-Si:H thickness) を対数表示にしているのは、 $D_{\text{void}}$  が  $t_{\text{a-Si:H}} < 10$  nm の領域で極めて急峻に減少し一定値 ( $\sim 0.6$  nm) に収束しているため、実数表示にすると傾向の詳細が見づらくなるからである。興味深いことに、この  $D_{\text{void}}$  が変化するいわば「臨界膜厚」である 10 nm という数値は、a-Si:H/c-Si ヘテロ接合試料における少数キャリアタイムが a-Si:H 膜厚が 10~15 nm 以下で急激に減少する、という他の異なる実験報告における臨界膜厚とも一致している [11, 12]。この一致は、a-Si:H におけるボイドサイズと Si-HJSC の特性が緊密に関係していることを示唆しているとともに、本研究によって推定されたボイドサイズ推移の証左となっている。

### 5. 結言

陽電子消滅法に基づく Si-HJSC の新たな界面近傍微細構造評価法について紹介した。今後は、同評価法で得られた a-Si:H 中ボイド構造と Si-HJSC の太陽電池特性との相関関係を明らかにするとともに、分光エリプソメトリの長所であるリアルタイム測定を太陽電池製造の現場へ適用する技術開発へ研究を展開していきたい。

### 6. 謝辞

本成果は、国立大学法人筑波大学大学院 上殿明良教授、国立研究開発法人産業技術総合研究所 大島永康博士、B. E. O'Rourke 博士と



の共同研究によって得られたものであり、多大なるご協力に深く感謝申し上げます。また、本研究は文部科学省科学研究費助成事業基盤研究(C) 15K04663 の助成により実施された。

Phys. Stat. Solidi RRL, 8, 831-835 (2014).

## 参考文献

- [1] M. Tanaka, M. Taguchi, T. Matsuyama, T. Sawada, S. Tsuda, S. Nakano, H. Hanafusa and Y. Kuwano, Development of new a-Si/c-Si heterojunction solar cells: ACJ-HIT (Artificially Constructed Junction-Heterojunction with Intrinsic Thin-Layer), Jpn. J. Appl. Phys., 31 (1), 3518-3522 (1992).
- [2] 田口幹朗, 高濱豪, 光起電力装置の製造方法, 三洋電機株式会社, 特許第 2841335 号 (1998).
- [3] K. Masuko, M. Shigematsu, T. Hashiguchi, D. Fujishima, M. Kai, N. Yoshimura, T. Yamaguchi, Y. Ichihashi, T. Yamanishi, T. Takahama, M. Taguchi, E. Maruyama, S. Okamoto, Achievement of more than 25% conversion efficiency with crystalline silicon heterojunction solar cell, IEEE Journal of Photovoltaics, 4, 1433-1435 (2014).
- [4] K. Yoshikawa, H. Kawasaki, W. Yoshida, T. Irie, K. Konishi, K. Nakano, T. Uto, D. Adachi, M. Kanematsu and K. Yamamoto, Silicon heterojunction solar cell with interdigitated back contacts for a photoconversion efficiency over 26%, Nature Energy, 2, 17032 (2017).
- [5] T. Miyasaka, A. Kulkarni, G. M. Kim, S. Öz and A. K. Jena, Perovskite solar cells: Can we go organic-free, lead-free, and dopant-free?, Adv. Energy. Mater., 2020, 10, 1902500 (2020).
- [6] M. Hutchins, Tandem cells approaching 30% efficiency, PV Magazine, <https://www.pv-magazine.com/2020/01/30/tandem-cells-approaching-30-efficiency/>, 30 January (2020).
- [7] M. Green, E. Dunlop, J. Hohl-Ebinger, M. Yoshita N. Kopidakis and X. Hao, Solar cell efficiency tables (version 57), Prog. Photovolt. Res. Appl., 29, 3-15 (2021).
- [8] F. Tuomisto, I. Makkonen, Defect identification in semiconductors with positron annihilation: experiment and theory, Rev. Mod. Phys., 85, 1583-1631 (2013).
- [9] G. Amarendra, R. Rajaraman, G. V. Rao, K. G. M. Nair, B. Viswanathan, R. Suzuki, T. Ohdaira, T. Mikado, Identification of open-volume defects in disordered and amorphized Si: A depth-resolved positron annihilation study, Phys. Rev. B, 63, 224112 (2001).
- [10] A. H. Mahan, D. L. Williamson, B. P. Nelson and R. S. Crandall, Small-angle X-ray scattering studies of microvoids in a-SiC:H and a-Si:H, Solar Cells, 27, 465-476 (1989).
- [11] D. Deligiannis, V. Mariolas, R. Vasudevan, C. C. G. Visser, R. A. C. M.M. van Swaaij and M. Zeman, Understanding the thickness-dependent effective lifetime of crystalline silicon passivated with a thin layer of intrinsic hydrogenated amorphous silicon using a nanometer-accurate wet-etching method, J. Appl. Phys., 119, 235307 (2016).
- [12] M. Mews, C. Leendertz, M. Algasinger, S. Koynov and L. Korte,



## 4. 工学部重要機器整備費関連研究

4-1 光学特性測定システム

松木 伸行

4-2 スパッタリング法による磁性薄膜の作製とその応用

渡邊 騎通、中山 明芳





# 光学特性測定システム

松本 伸行\*

## Optical Properties Measurement System

Nobuyuki MATSUKI\*

### 1. 緒言

デバイス応用を目指した新奇な機能性薄膜材料開発において、光学特性の評価は特に重要な対象の一つである。広義の意味での「光」とは波長範囲が  $10^{-9} \sim 10^{-3} \text{ m}$  ( $10^0 \sim 10^6 \text{ nm}$ )、遠紫外から遠赤外までの電磁波のことを指し、一般に狭義の意味での「光」は  $380 \sim 780 \text{ nm}$  の可視光を指す。波長、種類区分、応用例をまとめると、表 1 のようになる。

表 1 光の波長、種類区分と応用例

波長 (nm)	種類区分	応用例
10 - 380	遠紫外～近紫外	半導体露光, 殺菌, 蛍光励起
380- 780	可視光	照明, カメラ, 表示装置, 太陽電池
780 - $10^6$	近赤外～遠赤外	光通信, 加熱, 温度計測, 人感知

光によって生じる物理現象は、反射・透過・吸収・散乱・屈折・回折・偏光およびその変化・電子励起・電子放出・加熱（原子振動）などが主要なものとして挙げられる。これらの現象は全て、原子と結合した電子あるいは自由電子が物質に入射した光（＝電磁波）の振動エネルギーを得ては光（＝電磁波）を再放射あるいは原子が振動したり、電子が原子核や正イオンによるクーロン引力の束縛を逃れて乖離・放出したりする結果生ずる。したがって、物質に光を入射させて応答した光現象には、物質の形状・原子の結合構造・電子状態密度・電子の束縛状態に関する情報が含まれている。そして、含まれる情報の種類は光の波長、すなわちエネルギーに依存する。

物質には固体・液体・気体・プラズマの 4 状態があるが、本研究室では固体で、かつ  $100 \text{ nm} \sim 10 \text{ }\mu\text{m}$  程度の薄膜材料を研究対象としている。薄膜に対する透過スペクトルと反射スペクトル、もしくは偏光スペクトルからは膜厚・表面ラフネス・透過率・屈折率・誘電関数・吸収係数とそこから算出されるバンドギャップや、赤外領域では電子濃度や電子移動度を算出することができる。また光照射励起発光（フォトルミネッセンス）スペクトルを得られると、不純物等による欠陥準位の分布に関する情報が得られる。すなわち、(1) 透過・反射スペクトル (2) 光照射励起発光スペクトルを得ることができる光学特性測定システムを構成すれば、上記の光学特性の取得をほぼカバーすることができるようになる。

2018 年度工学部内重要機器整備助成制度によって、上記の様々な光学特性を取得できる「光学特性測定システム」の基本構成を構築することを行った。光学特性測定システムを構成するために必要な要素は A. 分光スペクトル測定器 B. 励起光／参照光・測定光の照射・

収光を行う光学系と試料固定基台 C. 励起光源（紫外レーザー）D. 近紫外～可視光源 である。今回、A., B.を新たに構築し、既存の C. (He-Cd レーザー発振器, 発振波長:  $325 \text{ nm}$ ) と組み合わせてまずはフォトルミネッセンス (PL) を測定できる基本構成を構築した。

### 2. 光学特性測定システム測定機構の構成

図 1 に作製した光学特性測定システムの(a) 配置図（上面図）、(b) 全体外観写真および(c)上面外観写真を示す。

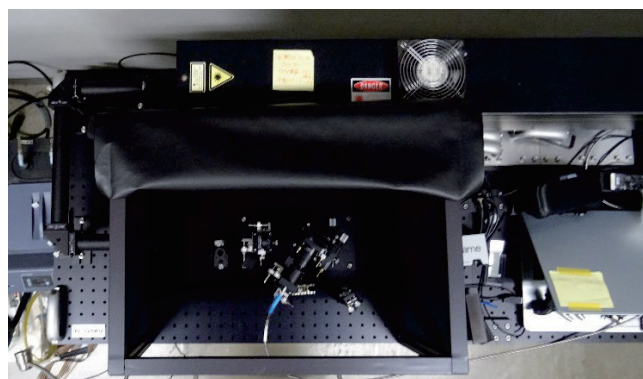
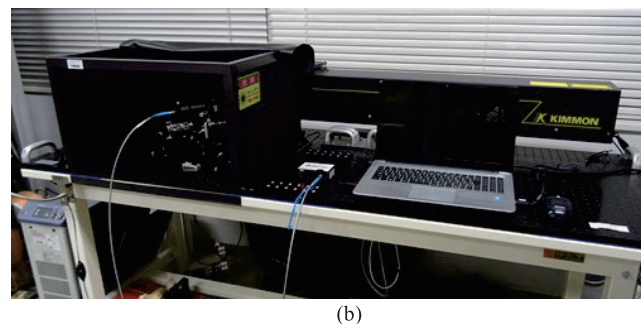
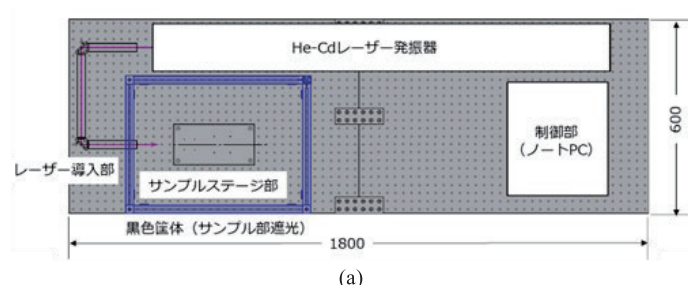


図 1 光学特性測定システム (a) 配置図（上面図）  
(b)全体外観写真 (c) 上面外観写真

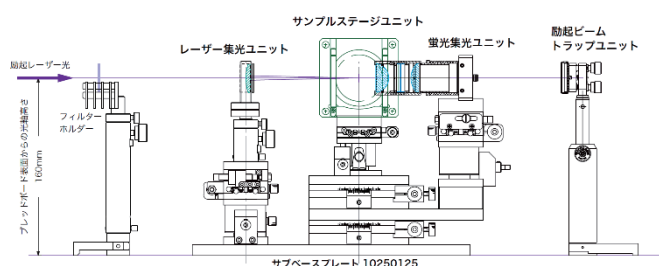
\*准教授 電気電子情報工学科

Associate Professor, Dept. of Electrical, Electronics and Information Engineering

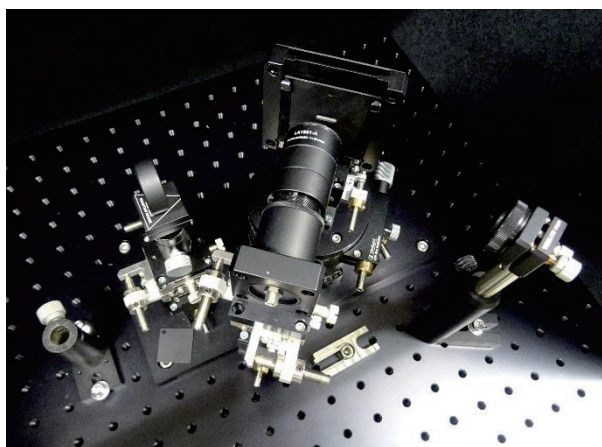
レーザー導入部は以下の部材により構成した。

1. レーザー用固定台 2 式
2. UV 域強化アルミミラー 2 式
3. 直角キネマティックミラーマウント 2 式
4. ミラーマウント固定用ロッド, ロッドスタンド, ベースプレート 2 式
5. UV 溶融石英反射型 ND フィルター OD : 0.5
6. UV 溶融石英反射型 ND フィルター OD : 1.3
7. フィルターホルダー
8. シャッター板
9. レーザー光路カバー (安全対策)

図 2 にサンプルステージ部の(a)構成図および(b)外観写真を示す。



(a)



(b)

図 2 サンプルステージ部 (a) 構成図 (b) 外観写真

サンプルステージ部は、以下の部材により構成した。

1. サブベースプレート 250×125×10t mm
2. レーザー集光ユニット (XYZ 手動ステージ, 着脱式 25 mm 角ベースセット, UV レンズ, レンズホルダー, ロッド, ロッドスタンド)
- 3.
4. サンプルステージユニット (XZ 手動ステージ, サンプル回転ステージ, サンプル板ホルダー)
5. 50 mm 角サンプル板 3 式
6. 黒色ハードボード筐体 (サンプル部遮光) 内寸 : 525(W)×

375(D)×300(H) mm

7. 黒色ハードボード筐体用固定ブラケット 4 式
8. 遮光用暗幕
9. 蛍光集光ユニット (XYZ 手動ステージ, 受光部回転ステージ, ロングウェーブパスフィルター,
10. SMA レセプタクル, 集光レンズ, フォーカス調整機構)
11. 励起ビームトラップユニット (凹面ミラー, カイネティックミラーマウント, ロッド, ロッドスタンド)

図 3 に本システムに用いた CCD 分光器の外観写真を示す。



図 3 CCD 分光器の外観写真

CCD 分光器の仕様詳細は以下のとおりである。

分光器機種 : CCD 分光器 FLAME-S

形式 : ツェルニー・ターナー型, f/4

焦点距離 : 入射 : 42 mm, 出射 : 68 mm

受光素子 : 2048 素子リニアシリコン CCD アレイ (SONY ILX511B)

ピクセルサイズ : 14×200 μm

グレーティング : 600 本/mm, ブレーズ波長 : 400 nm

入射スリット : 50 μm, 100 μm (スリット交換式)

測定波長範囲 : 約 250 ~ 800 nm

波長分解能 : 約 2.06 nm (スリット幅 : 50 μm), 約 3.81 nm (スリット幅 : 100 μm)

SN 比 : 250 : 1 (full signal 時)

積算時間 1 ms ~ 65 s

PC インターフェース : USB2.0

A/D 分解能 : 16 bit

光ファイバー接続 : SMA905 コネクタ接続

また、同システム専用のノート PC に分光測定用氷人ソフトウェア OPWave+をインストールして CCD 分光器からのデータ出力をモニタリング・記録した。

### 3. フォトルミネッセンス分光測定結果

構築した光学特性測定システムを用いて、それぞれ以下の試料 1~3 について室温で PL スペクトルを計測した結果をそれぞれ図 4, 5, 6 に示す。

試料 1 : 図 4 にサファイア基板 C 面上に有機金属化学気相成長 (MOCVD) によって成長したヘテロエピタキシャル GaN 薄膜 (膜厚 : 3 μm) の PL スペクトルを示す。結晶性が高く, GaN のバンド端が観察され, また低温 GaN パッファー層の欠陥によると考えられるブ

ロードな黄色発光スペクトルが観察されている。

試料 2: 図 5 に焼結体ノンドープ ZnO ペレットの PL スペクトルを示す。ZnO は結晶性が高い場合 3.37 eV のバンドギャップに相当する 365 nm の発光が観察されるが、この試料は ZnO の粉体を焼結したペレットであるため、550 nm 付近にピークを有する欠陥準位によるブロードな緑色発光スペクトルが現れている。また、わずかに励起光スペクトルと、390 nm 付近に由来不明のピークが現れているが、ZnO のバンド端発光にしては波長が長すぎるので何らかの不純物または欠陥に由来する発光ピークであると考えられる。

試料 3: 図 6 に上記の焼結体ノンドープ ZnO ペレットを用いて電子ビーム (EB) 蒸着法により石英基板上に製膜した ZnO 薄膜の PL スペクトルを示す。薄膜のため全体に発光強度と S/N 比が小さいスペクトルであるが、試料 2 の結果と同様 550 nm 付近にピークを有する欠陥準位によるブロードな緑色発光スペクトルが現れている。

以上の測定結果より、今回構築した光学特性測定システムにより種々の試料による PL スペクトルを高感度に計測することが可能であることが確認された。

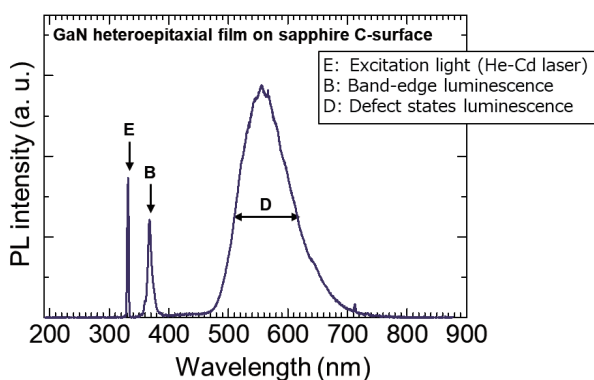


図 4 サファイア上 MOCVD エピタキシャル GaN 薄膜の室温 PL 発光スペクトル

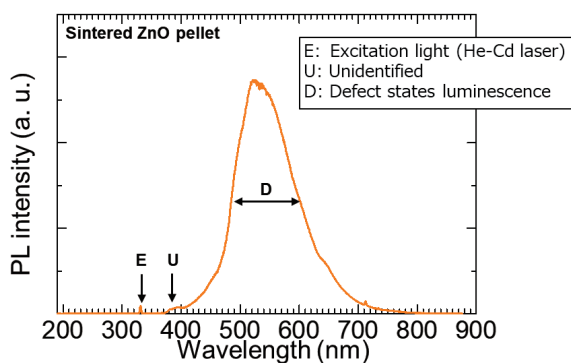


図 5 ZnO 焼結体ペレットによる室温 PL 発光スペクトル

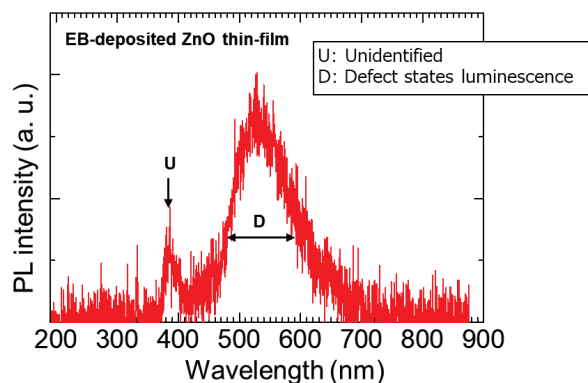


図 6 EB 蒸着 ZnO 薄膜による室温 PL 発光スペクトル

#### 4. 今後の展開

今回は PL スペクトルを評価する機構を構成したが、本システムは光学ブレッドボード上に構築されているため、レイアウトの変更も任意となっており、様々な光学特性測定を実施できる可能性を有している。次のステップとしては、このシステムに近紫外～可視光光源と透過・反射スペクトルを計測可能な試料台を増設し、さらに光学特性測定システムとしての機能を充足させることを検討している。

#### 5. 結言

新奇な機能性薄膜材料開発に重要な評価装置である光学特性測定システムを構築し、その基本性能を確認した。機能拡張性の高い本システムを発展的に再構築することによって、光学特性の評価機能を高めていくことを継続する。

#### 6. 謝辞

本稿で紹介した光学特性測定システム測定システムは 2018 年度工学部内重要機器整備助成制度を受けて構築された。



# スパッタリング法による磁性薄膜の作製とその応用

渡邊 騎通\* 中山 明芳\*\*

## Fabrication and Application of Magnetic Thin Films Prepared by Sputtering

Norimichi WATANABE\* Akiyoshi NAKAYAMA\*\*

### 1. 緒言

超伝導体をエレクトロニクスに応用する際には、ジョセフソン接合と呼ばれている超伝導デバイスを作製することが基本になる。ジョセフソン接合は、二つの超伝導体で薄い絶縁層を挟んだ構造をしているが、我々は、超伝導体に Nb、絶縁層に酸化アルミニウムを用いた Nb/Al-AlO<sub>x</sub>/Nb ジョセフソン接合を作製し、その磁界特性について調べてきた[1, 2]。試料作製には、Nb と Al を成膜するスパッタリング室と Al 表面を酸化させるための酸化室を有するロードロック方式の dc マグネトロンスパッタリング装置を用いて、Nb/Al-AlO<sub>x</sub>/Nb の積層膜を成膜することによりジョセフソン接合の作製を行ってきた。このトンネル接合型の超伝導体/絶縁体/超伝導体ジョセフソン接合は、Nb/Al-AlO<sub>x</sub>/Nb の材料の組み合わせで作製したものが、素子作製の歩留まりもよく、超伝導特性の再現性もよいことから最も多く作製されている[3]。しかしながら、近年、トンネルバリア層に酸化アルミニウムに変えて、希釈磁性である銅ニッケル (CuNi) やパラジウムニッケル合金 (PdNi) を用いた磁性ジョセフソン接合の研究が精力的に行われている。磁性ジョセフソン接合では、超伝導体間における超伝導巨視的波動関数の位相差を直接制御できるようになるため、新たなメモリ素子の開発や超伝導量子ビットへの応用が研究されている[4-6]。当研究室でも、Nb/Al-AlO<sub>x</sub>/Nb ジョセフソン接合の電気的磁気的特性の研究に加え、磁性ジョセフソン接合の研究を始めるため、磁性薄膜を作製するための新たなスパッタリング装置を製作することを考え、工学部重要機器整備費で RF スパッタ装置プラットフォームを購入した。磁性薄膜の作製が可能になると、磁性ジョセフソン接合の研究に加え、磁性薄膜を用いた磁気デバイスの研究を始めることも可能になる。

### 2. 実験装置

図 1 に、RF スパッタ装置プラットフォームを示す。スパッタ室とロードロック (LL) 室を有し、スパッタ室および LL 室への基板搬送が可能な手動トランスファーロードが取り付けられている。スパ

ッタ室のマグネトロンスパッタソースは、取り付けフランジが ICF-152、ターゲット固定はリテーナー式、マグネット材質が SmCo のスパッタソースを採用している。また、スパッタ室を新たに増設することが可能な仕様になっている。ドライポンプとターボ分子ポンプで真空排気を行い、到達真空度は  $1.0 \times 10^{-5}$  Pa 程度である。

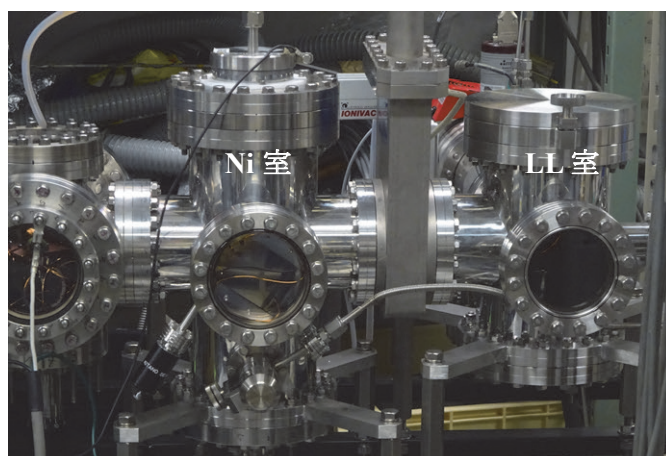


図 1 RF スパッタ装置プラットフォーム

### 3. 実験

スパッタソースに、Ni ターゲットを取り付け、各スパッタガス圧におけるスパッタリングレート求めた。スパッタリングガス圧 1 Pa、3 Pa、5 Pa の各ガス圧において、時間を変えて 3 回成膜し、その膜厚を触針式表面荒さ計で測定した。結果を図 2 に示す。Ni の場合は、スパッタリング時のアルゴンガス圧を大きくしていくと、スパッタリングレートが小さくなっていくことがわかった。次に、スパッタリング時のアルゴンガス圧を、2 Pa にして成膜したものと、5 Pa にして成膜したもの 2 種類の Ni 薄膜を作製し、薄膜の表面を走査型電子顕微鏡 (SEM) で観察して比較した。Ni 薄膜の膜厚は 300 nm に統一した。アルゴンガス圧 2 Pa で成膜した Ni 薄膜の表面を、SEM で観察した結果を図 3(a)に示す。SEM 像では、試料表面の凹凸が明暗のコントラストで表されるが、2 Pa で成膜した試料では、明瞭な表面形態が観測されていないことから、薄膜の結晶粒は小さく、試料表面は平坦であると考えられる。図 3(b)に、アルゴンガス圧 5 Pa で成膜した Ni 薄膜の表面を SEM で観察した

\*特別助教 電気電子情報工学科

Assistant Professor, Dept. of Electrical, Electronics, and Information Engineering

\*\*教授 電気電子情報工学科

Professor, Dept. of Electrical, Electronics, and Information Engineering



結果を示す。図 3(a)と比較して、薄膜の結晶粒が明瞭に観測されている。以上より、Ni 磁性薄膜をスパッタリングで成膜した場合、アルゴンガス圧が大きくなると、薄膜の結晶粒が大きくなり、表面粗さが大きくなることがわかった。スパッタリングによって作製される薄膜には、スパッタガス圧の値によって引張り性応力や圧縮性応力が生じる[7]。ジョセフソン接合の作製においては、電極となる Nb の成膜時にストレスフリーとなるスパッタガス圧で Nb を成

膜すると、優れた超伝導特性を持つジョセフソン接合が作製できることが知られている[8]。また、磁性ジョセフソン接合のバリア層に用いる磁性薄膜も、スパッタガス圧を変えて成膜することにより磁化特性が変化し、磁性ジョセフソン接合の超伝導特性に影響を与えることが予想される。さらに、磁気デバイスの研究においては、スパッタガス圧を変えて成膜した 50 パーマロイの積層膜において、各層の内部応力の違いを利用して、回転検出センサを作製する研究が行われている[9]。当研究室においても、スパッタガス圧と磁性薄膜の内部応力の関係を調べていく予定である。

#### 4. 結言

RF スパッタ装置プラットフォームに、ターボ分子ポンプやスパッタソースを取り付け、Ni 薄膜の成膜を行った。成膜時のアルゴンガス圧が 1 Pa、3 Pa、5 Pa の各ガス圧において、Ni 薄膜のスパッタリングレートを求めた。さらに、アルゴンガス圧 2 Pa、5 Pa で成膜した Ni 薄膜の表面形状を SEM により観察し、スパッタ時のアルゴンガス圧が大きくなると、薄膜の結晶粒と表面粗さが大きくなることがわかった。今後、RF スパッタ装置プラットフォームを利用して、磁性薄膜や磁性ジョセフソン接合の研究を進めていく。

#### 参考文献

- [1] A. Nakayama, S. Abe, N. Watanabe, Two-dimensional magnetic field dependence of Josephson current and resonant current steps at finite voltage of square shape superconducting tunnel junctions, J. Appl. Phys., 111, 113907 (2012).
- [2] N. Watanabe, S. Abe, and A. Nakayama, Modulation of a Josephson current through an Nb/Al-AlO<sub>x</sub>/Nb Josephson junction by a parallel magnetic field and perpendicular magnetic field, J. Appl. Phys., 116, 033920 (2014).
- [3] Y. Tarutani, M. Hirano, U. Kawabe, Niobium-Based Integrated Circuit Technologies, Proc. IEEE, 77, 1164-1176 (1989).
- [4] T. I. Larkin, V. V. Bol'ginov, V. S. Stolyarov, V. V. Ryazanov, Igor V. Vernik, S. K. Tolpygo, O. A. Mukhanov, Ferromagnetic Josephson switching device with high characteristic voltage, Appl. Phys. Lett. 100, 222601 (2012).
- [5] T. Yamashita, H. Terai, Recent Progress in Ferromagnet/Superconductor Hybrid Structure and its Applications to Cryogenic Computing, IEEJ Trans. Fundam. Mater., 136, 728-733 (2016).
- [6] T. Yamashita, A. Kawakami, H. Terai, NbN-Based Ferromagnetic 0 and  $\pi$  Josephson Junctions, Phys. Rev. Appl., 8, 054028 (2017).
- [7] 金原 繁, 吉田 貞史, 近藤 高志, 薄膜工学 第 3 版, 丸善出版 (2016).
- [8] T. Imamura, S. Hasuo, EFFECTS OF INTRINSIC STRESS ON SUBMICROMETER Nb/AlO<sub>x</sub>/Nb JOSEPHSON JUNCTIONS, IEEE Trans. Magn., 25, 1119-1122 (1989).
- [9] 馬場 康壽, 星川 潔, 秋山 賢輔, 栗原 幸男, 根岸 靖, 小山 昌二, 安部 正規, 後藤 章博, 渡邊 騎通, 阿部 晋, 大バルクハウゼン効果を用いた薄膜磁気センサの作製, 日本応用磁気学会誌, 27, 406-409 (2003).

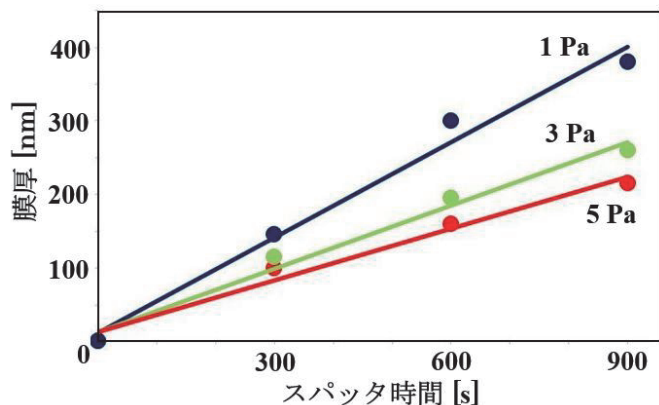


図 2 各スパッタガス圧におけるスパッタ時間と Ni 薄膜の膜厚の関係

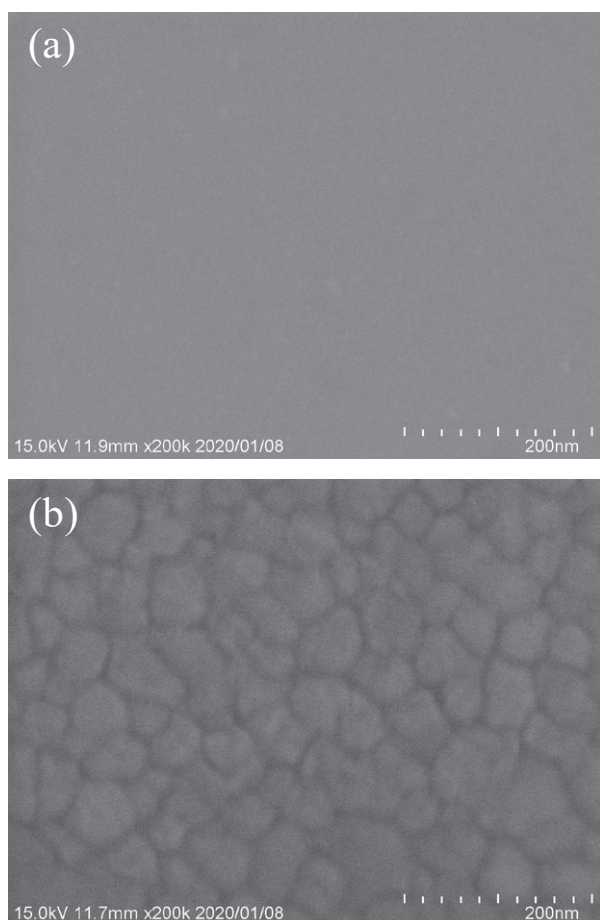


図 3 SEM で観察した Ni 薄膜の表面

- (a) スパッタガス圧 2Pa で成膜  
(b) スパッタガス圧 5Pa で成膜



## 5. 工学研究所共同研究

5-1 ハイブリッドロケットエンジンの軽量化, 大推力化および高燃焼効率化 (2019)

高野 敦、船見 祐揮、喜多村 竜太、正井 卓馬

5-2 DNA のレーザー分子線堆積に基づくニューパラダイム: 新奇ハイブリッド薄膜材料の創製

松木 伸行、有賀 克彦、小野 晶、亀山 敦、佐藤 知正、山口 栄雄、横澤 勉

5-3 新バリア材料を有するジョセフソン接合の作製と二次元磁界変調特性の測定による接合の評価

渡邊 騎通、穴田 哲夫、中山 明芳

5-4 曲げ履歴を受けた鋼材の機械的性質に関する研究

藤田 正則、中村 慎

5-5 遺伝子組換えを利用したシーベリー雌雄識別 DNA マーカーの開発

朝倉 史明、中川 理絵、河合 義隆、森 直樹





# ハイブリッドロケットエンジンの軽量化，大推力化および高燃焼効率化（2019）

高野 敦\* 船見 祐揮\*\* 喜多村 竜太\*\*\* 正井 卓馬\*\*\*\*

## Research and Development of a Light-Weight, High-Thrust and High-Efficiency Hybrid Rocket Engine in 2019

Atsushi TAKANO\* Yuki FUNAMI\*\* Ryuta KITAMURA\*\*\* Takuma MASAI\*\*\*\*

### 1. 緒言

現在，大学や中小企業によって数 kg から数十 kg 程度の超小型衛星が盛んに開発されており，今後一層その開発が活発化することが見込まれている<sup>[1]</sup>．そのような背景の下で，超小型衛星を軌道へ適時投入可能な，かつ，低コストのロケットを求める声が高まっている．その要求に応え得るロケットの候補としてハイブリッドロケットが挙げられる．燃料としてプラスチックを，酸化剤として液体酸素や亜酸化窒素を用いることが一般的であり，火薬を用いないことから安全性が高く，製造や運用の過程で管理費を抑えることが可能である．

著者らもこの点に着目し，ハイブリッドロケットエンジンの開発と研究を行ってきた．エンジンの発生推力を増強するために，固体燃料の表面積を増やして燃料ガス発生量の増加につなげることを意図し，3D プリンタを用いた複雑形状燃料の開発を実施した．星形フラクタル形状燃料における酸化剤供給量と燃料ガス発生速度の関係性の把握<sup>[2]</sup>，星形フラクタル旋回形状燃料の性能評価<sup>[3]</sup>，低損耗ノズル材料の選定<sup>[4]</sup>，構造設計を考慮した酸化剤の選定<sup>[5]</sup>などといった点で成果を得ている．星形フラクタル形状燃料に関しては 2017 年度のロケット打ち上げにて実際に使用された<sup>[6]</sup>．また，星形フラクタル旋回形状燃料に関しては当初の計画推力 2 kN を上回る推力 2.9 kN を達成した．そのエンジンをさらに大型化して 2018 年度の打ち上げに使用し，高度 6.2 km を達成した<sup>[7]</sup>．しかしながら超小型衛星打ち上げ用ハイブリッドロケットの実現を考えると，まだ克服すべき課題は残されている．

本共同研究においては，到達高度 15 km を目標にさらなる推力増強を見据え，酸化剤タンクを含めたエンジンシステム全体を精査した上でエンジン及び酸化剤タンクの大型化・軽量化に取り組んだ．また，レベルセット法を用いた燃料後退速度の評価ツールを改良し，

それを用いて 2019 年度開発エンジンの燃焼試験結果を解析した．

### 2. トータルインパルス 50 kNs 級エンジンの開発<sup>[8]</sup>

目標到達高度 15 km 達成のため，推力 50 kNs 級エンジンを開発した．機体全体に対する概念設計結果において，酸化剤質量は神奈川大学が保有する燃焼試験設備に格納出来る最大限のタンク高さから 26 kg と決定した．酸化剤に合わせてグレインの質量も 2018 年度機体における 3.6 kg の 2 倍である 7.2 kg が必要となった．また機体の外径は酸化剤などの搭載体積と空気抵抗軽減の観点から 150 mm と決定した．モーターケース外径を機体外径と一致させた場合，燃焼中にモーターケースが高温になり，機体に直接接着されたフィンなどの構造物が熱で軟化して強度低下する恐れがあるため，モーターケースの外径は機体外径より 10 mm 細くして 140 mm とした．さらに，モーターケースは厚さ 3 mm，内径 134 mm で，アブレーターの厚さは 3 mm であるので，2019 年度のグレインの外径を 128 mm とした．また，2019 年度のグレイン長さは概念設計の燃料重量を 7.2 kg にした結果により，748 mm とした．

グレインのポート形状は 2018 年度と同様に星形フラクタル旋回形状を採用した．グレイン外径 128 mm，グレイン長さ 748 mm，グレイン重量 7.2 kg を満足するようにポートの寸法を設計した結果，星形フラクタルの外接円径は 72 mm となった．

また，実際に 3D プリンタで造型を試みたが，1 つ作成するのに 36 時間と膨大となり，さらにグレイン密度が目標値よりも低くなってしまふなどの問題が発生した．そこで，グレインを内側と外側に分け，内側のポートを含む部分は 3D プリンタで造型し，外側は市販のプラスチックパイプを用いることで製作時間を 36 時間から 18 時間に短縮することが出来た．

これらを反映した設計結果として，グレインが酸化剤に触れる面積が 2018 エンジンの約 2.55 倍となり，最大推力は 2018 エンジンの約 1.59 倍になった（表 1）．

打ち上げ試験に向けて，エンジンの健全性確認やトータルインパルス等のデータ収集を目的に燃焼試験を行った．その結果を表 2 及び図 1 に示す．トータルインパルス（推力の時間積分）は 50 kNs を達成した<sup>[8]</sup>．しかし表 2 に示すように最後まで正常燃焼する場合とエンジンが破裂する場合がみられた．7 月 13 日の燃焼試験では燃

\*准教授 機械工学科

Associate Professor, Dept. of Mechanical Engineering

\*\*講師 防衛大学校

Lecturer, National Defense Academy

\*\*\*助教 機械工学科

Assistant Professor, Dept. of Mechanical Engineering

\*\*\*\*客員研究員 工学研究所

Visiting Researcher, Research Institute for Engineering

表 1 推力の比較

モーターサイズ	最大 推力 $F_{\max10}$ [kN]	トータル インパルス [kNs]	比推力 (実測値) [s]	燃焼時間 [s]	ポート 表面積 $A_p$ [m <sup>2</sup> ]
2018エンジン	1.8	23.7	153	28	0.245
2019エンジン	3.4	50.9	182	43	0.625

表 2 燃焼試験結果

日付	グレイン 燃焼量 [kg]	最大推力 $F_{\max10}$ [kN]	トータル インパルス [kNs]	比推力 [s]	燃焼 時間 [s]	備考
7/13	5.02	2.7	49.6	161	36	不具合1:燃焼中に ノズルの破片が飛散
7/15 1回目	4.88	2.9	52.0	171	39	正常燃焼
7/15 2回目	0.49	-	-	-	-	不具合2:インジェクター部から破裂 グレインとハウジング が飛散・山に刺さる
8/19	5.02	3.4	50.9	182	43	正常燃焼
8/31	0.14	-	-	-	-	不具合3:タンクとインジェクターを つなぐ配管から破裂。 グレインとハウジングが飛散・山に刺さ る
9/21 1回目	5.04	2.9	51.4	197	37	正常燃焼
9/21 2回目	4.86	3.3	40.1	146	31	不具合4:燃焼十数秒後にノズルが飛散。
11/2	0.32	-	-	-	-	不具合5:エンジンが点火直後に破裂。
12/14	3.16	2.7	34.9	119	18	不具合6:約18秒間燃焼した後、 ノズルがハウジングごと飛散。 山に刺さる。

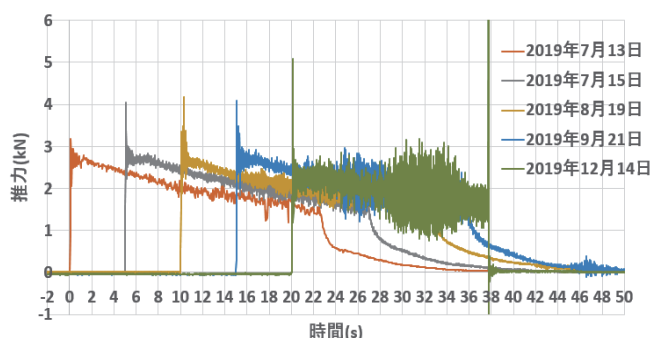


図 1 燃焼試験における推力の時間変化

焼中にノズルが半分に割れてしまった。原因は、ノズルハウジングの穴加工の際にノズルも削ってしまい、端部に割れやひびが生じたことによる応力集中であると推測された。

7月15日の2回目の燃焼試験ではエンジンが破裂した。原因としてはステム（酸化剤供給配管）先端にグラインダの削り跡が残る、さらにヤスリ掛けに目の粗いものを用いたために、Oリングとの隙間から酸化剤である亜酸化窒素が漏れ、点火と同時に自己発熱分解反応を起こしたためと考えられた。そこで、ステム製作時にOリングとはめ合わせる際に傷や溝が付かないようにステム先端を仕上げることにした。

8月31日の燃焼試験ではエンジンと酸化剤タンクをつなぐ配管が破裂した。そこで、インジェクターに接続するねじを確認したところ、潤滑剤 PN55 とみられる液体が付着していた。さらに配管を切断したところ、インジェクターの近傍では焦げた形跡が見つかったが、タンクと逃がし弁をつなぐ配管には焦げた形跡が見当たらな

かった。このことから、破裂はインジェクターの近傍で起こり、ねじ締結部に塗布した PN55 の成分が触媒となり、亜酸化窒素の自己発熱分解反応が起こったことが原因であると考えられた。今後は潤滑剤 PN55 を使わずに配管締結をすることとした。

9月21日の2回目の燃焼試験では点火から十数秒後にノズルが飛散した。これはノズルのR部の応力集中が原因であると考えられた。SOLIDWORKS や Marc による応力解析からノズルのR部周辺に最も応力がかかっていることが分かった。このことからノズルのR部を廃止することとした（図2）。

改良したノズルを用い燃焼試験を行った。しかし、他の部位で亜酸化窒素の自己発熱分解反応と思われる事象による破裂が相次ぎ、打ち上げには至らなかった。11月2日の燃焼試験では点火直後にエンジンが破裂した。これはステムとはめあうOリングに塗布したグリスを触媒とした亜酸化窒素の自己発熱分解反応が原因であると考えられ、このことからエンジン内部のOリングにもグリスの塗布を廃止することとした。反応の原因となったと思われるOリングを図3に示す。

12月14日の燃焼試験では点火後18秒にてノズルが飛散した。原因としては、試験後のエンジン分解時にグレインのインジェクター側に穴が開いていたことから判断すると、その穴から未燃の亜酸化窒素を含む燃焼ガスが漏出して自己発熱分解反応を起こした可能性がある。さらにインジェクターが大きいことから火炎の熱放射を受けてインジェクター内部のOリングが熱せられたため、Oリングが触媒となり、亜酸化窒素の自己発熱分解反応によって破裂が起きた可能性も考えられる。以上のことからグレインとインジェクターとのはめあいの改良を実施した。加えて、インジェクターの改良が必要となるとともに、公知の文献などを調べても情報の少ない亜酸化窒素の自己発熱分解反応に対する基礎的な研究も必要となる。

エンジンの性能を評価する上で燃焼効率は重要なパラメータと

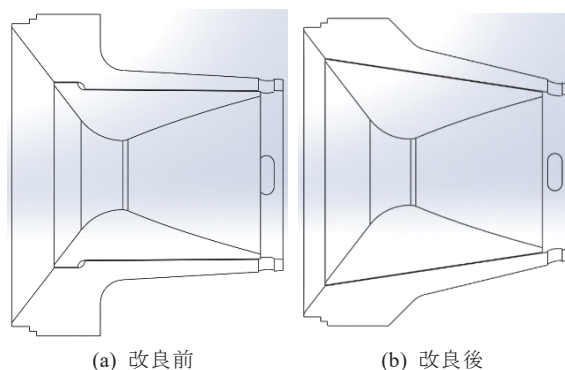


図 2 ノズルの改良

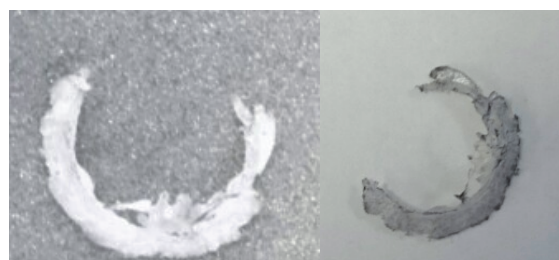


図 3 11/2 実施の燃焼試験（エンジン破裂）後に回収したOリング

なるが、ロケットエンジンにおいては特性排気速度と呼ばれる指標を基に効率を評価することが一般的に行われている。開発したエンジンの試験においてはこれまで述べてきたように種々のトラブルに見舞われたが、その影響が比較的小さいと思われる試験の結果に対して補正を行うことによって、特性排気速度効率の算出を行った。その結果を図4に示す。いずれも8割弱とまだ改善の余地が見られる値となっているが、今後の高効率化に向けて参考となる大型エンジンのデータを取得することができた。

以上のように本研究期間中では燃焼試験にてエンジン破裂が度重なり、打ち上げ試験を実施する事はできなかった。その一方で、トータルインパルスは50.9 kNs以上となり、目標の50 kNsを達成することができた。ただし、特性排気速度効率についてはまだ改善の余地が見られるものとなった。エンジンの設計・制作に関しては、グレインを内側と外側に分割することにより、作業時間削減を実現した。また、エンジン製作にあたり潤滑剤の塗布を行わないことによりエンジン破裂を防げる可能性を見出した。

### 3. レベルセット法を用いた50 kNs級エンジン燃焼試験結果の解析

ハイブリッドロケットエンジンの評価指標の一つとして燃料後退速度が挙げられる。これは燃料ガスの発生速度に直結するパラメータであり、発生推力へと影響を与える。燃焼の観点でみると、酸化剤と燃料の混合割合であるO/Fは燃焼状態に大きな影響を与えるパラメータであり、燃焼効率にも影響する。このO/Fを決めるにあっても燃料後退速度についての理解は鍵となる。また、燃料後退速度は固体燃料グレインの設計においても必要不可欠な情報となる。これらを踏まえて2018年度では、星形フラクタル旋回形状ポートを有する固体燃料グレインへの適用を見据えて、三次元のレベルセット法を用いた平均燃料後退速度の評価手法を開発した<sup>[9,10]</sup>。レベルセット法とは界面の時間変化を捉えるための数値解析手法の一種であり、符号付距離関数として定義されるレベルセット関数についての移流方程式を解く手法である<sup>[11]</sup>。固体燃料グレインの表面を固気界面として取り扱い、固体燃料の気化に伴って表面が後退していく挙動をレベルセット法により数値解析することで、固体燃料の消費質量と固体燃料表面の後退距離に関するデータベースを作成する。ハイブリッドロケットエンジンの燃焼試験結果とそのデータベースを照らし合わせることで固体燃料表面が後退した平均の距離を推測し、ひいては平均の燃料後退速度を求めることができる。以上が2018年度に開発した手法の概略である。しかしながら数値解析の観

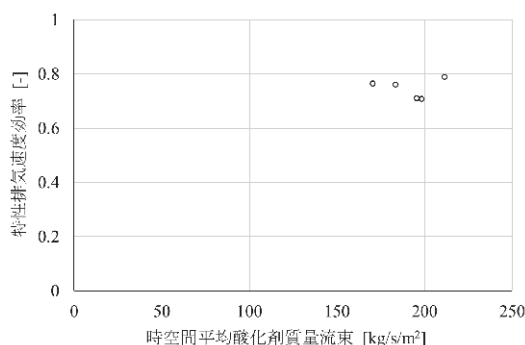


図4 2019年度開発エンジンの特性排気速度効率

点から改善しなければならない課題を残している状況であった。レベルセット法においては数値的な問題から、レベルセット関数が満たすべき距離関数としての特性を徐々に喪失していくという課題が知られている。その対策としてレベルセット関数の再初期化という方法を探るのが一般的であるが、2018年度に開発した解析ツールには未実装であった。そこで2019年度には、2018年度に開発した解析ツールに Sussman らの再初期化アルゴリズム<sup>[12]</sup>を実装し、解析ツールの改良を行った。これにより、より高い信頼性をもってハイブリッドロケットエンジンの燃焼試験結果から平均燃料後退速度を得ることが可能となった。

2章にて既に述べたが、2019年度ではトータルインパルス50 kNs級のハイブリッドロケットエンジンの開発を行った<sup>[8]</sup>。このエンジンの地上燃焼試験の結果に対して、上記のレベルセット法による評価手法を適用することで、2019年度に開発したエンジンにおける平均燃料後退速度を算出した。エンジンの開発にあたっては亜酸化窒素の自己分解反応などに起因するトラブルが多発したが、その影響が比較的小さいと思われる試験の結果を選び、可能な範囲で補正を行うことで燃焼試験結果を後退速度の評価に用いた。ここで得られた後退速度を図5に示す。補正された試験結果を用いたことから図5の取り扱いには注意を要するものの、今後の大型エンジンの開発にあたって参考となる重要なデータを得ることができた。

### 4. 34 L 酸化剤タンクの開発<sup>[13]</sup>

概念設計の結果、トータルインパルス50 kNsのエンジンを実現するためには、酸化剤充填量は26 kg必要となった。この酸化剤タンク（以下2019タンクと呼ぶ）は、2018年度開発の酸化剤タンク（以下2018タンクと呼ぶ）を基に、胴部の長さを約2倍の1940 mmへ延長することで内容積を34 Lへと拡大した。タンク外径及び蓋のねじ部構造は2018タンクと同一とした。機体のタンク位置及び外観を図6及び図7に示す。

開発した酸化剤タンクに対して耐圧試験を実施したところ、初めて圧力を負荷したタンクS/N2の蓋下部が5.3 MPaで抜けてしまった（図8）。調査の結果、5.3 MPaでの胴部と蓋部のねじ同士の摩擦

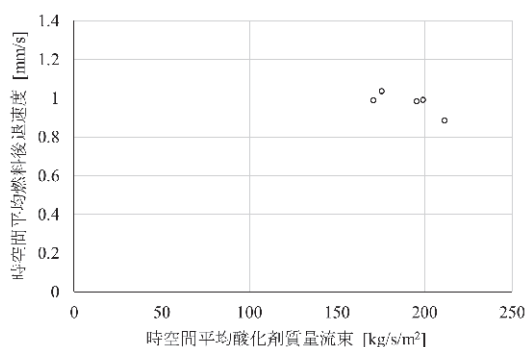


図5 2019年度開発エンジンの平均燃料後退速度



図6 機体におけるタンク位置





図7 タンクの全体図（上：2018 タンク，下：2019 タンク）

係数が 0.016 となった場合には蓋が抜け、さらに摩擦係数が 0 の時に MS (Margin of Safety)  $< 0$  となることが分かった。結論として内圧を負荷させていくうちに胴部が広がり、ねじのかみ合い量が減少したことが原因と考えられる。この対策として、タンク胴部と蓋部のねじの長さを 2 倍にした。これは過去の試験からめねじの強度はめあい長さに比例するという知見があった<sup>[14]</sup>ためである。このねじ部の長さを 2 倍としたタンクを S/N 3 及び S/N 4 として作製した。図 9 に改修前後の蓋の CAD 画像を示す。

タンク胴部には補強を目的に CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic) を巻いている。タンク S/N3 及び 4 に CFRP (HyEJ12M65PD, 繊維方向弾性率 380 GPa, 板厚 0.096 mm) を積層構成[-55/0/55]<sub>s</sub>で 6 層巻き付けた。しかし、CFRP が 130 °C での加熱成型時に大きく収縮し、高温下から常温下へ取り出した際に起こる膨張の影響でひび割れが生じた。この事象を受けて、熱応力を下げるために、繊維弾性率が低く、板厚が厚い CFRP (TR380G250, 繊維方向弾性率 109 GPa, 板厚 0.24 mm, 以下 TR と呼ぶ) を積層構成[-55/55]<sub>s</sub>で 2 層巻き付けた。TR への変更及びねじ部の延長によって CFRP のひび割れや蓋が抜けるという問題は解決し、さらに耐圧試験にも成功したため、燃焼試験で問題なく使用できると判断し、タンク S/N3 及び 4 を用い

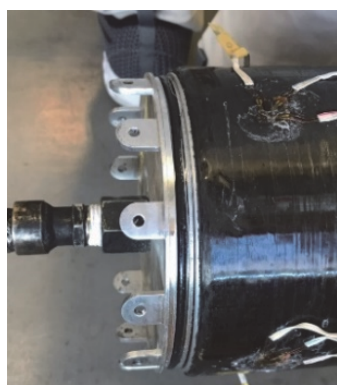


図8 蓋下部が抜けた様子

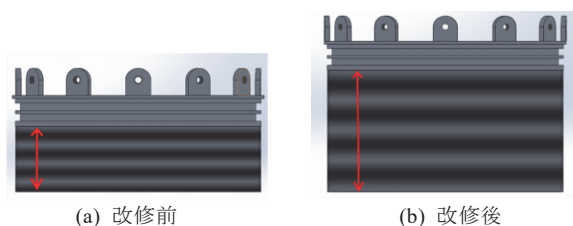


図9 酸化剤タンクの蓋の改修

た燃焼試験を実施した。しかし、8月18日の燃焼試験にて亜酸化窒素の充填不具合が発生した。これは、充填前からタンク温度が約 36 °C と高く、充填開始直後にタンク圧力がすぐに上昇して供給側圧力との逆転が起きたためであった（図 10）。その対策として、翌 19 日にはタンクへ保冷剤を貼り付けて、タンク温度約 20 °C を目標に冷却を行い、結果として正常に充填を行うことが出来た。

2019 年 8 月 31 日の燃焼試験では、8 月 19 日と同様にタンクへ保冷剤を貼り付けて冷却を行いながら実施した。結果として充填不具合は起きず、正常に点火まで行えたため、この対策は有効であると考えられる。しかし、この方法では打ち上げ試験において保冷剤を貼り付けたまま打ち上げることになるため、夏季の打ち上げを避けるか、夏季に打ち上げ試験を行う場合には別のタンク冷却方法を考えなければならない。

酸化剤タンクの長さを延長することで容量 34 L への大型化を達成し、軽量化性能指数 (= 圧力 × 容積 / タンク重量) は 2018 タンクと比較して 1.7 倍増となった。開発過程において、タンク蓋の抜けや CFRP の割れ等の事象が発生したが、それぞれ改善を施したタンク S/N3 及び 4 は耐圧試験にて健全性が確認でき、燃焼試験においてもリーク等の異常なく充填できることを確認した。また、燃焼試験においてもタンクとしては正常に使用できることを確認できた。以上から打ち上げ試験にこれらのタンクを用いても問題なく充填ができ、打ち上げを行うことが出来るものであると考える。

## 5. 結言

到達高度 15 km を目標にさらなる推力増強を見据え、酸化剤タンクを含めたエンジンシステム全体を精査し、エンジン及び酸化剤タンクの大型化・軽量化を行った。さらにレベルセット法による燃料後退速度の評価ツールの改良に取り組んだ。

酸化剤タンクの開発には成功し、エンジン燃焼試験において妥当性の評価も完了できたが、エンジンは相次ぐ破裂により打ち上げには至らず、さらなる原因究明と改善が必要となった。しかしこれら一連の試験中で得られた知見により、今後さらなる大型化につなげてゆけるものと信ずる。

## 参考文献

- [1] E. Buchan, et al., SpaceWorks Enterprises, Inc., 2014.
- [2] 船見祐揮, 内島圭祐, 本目将大, 高野敦, 星形フラクタル形状

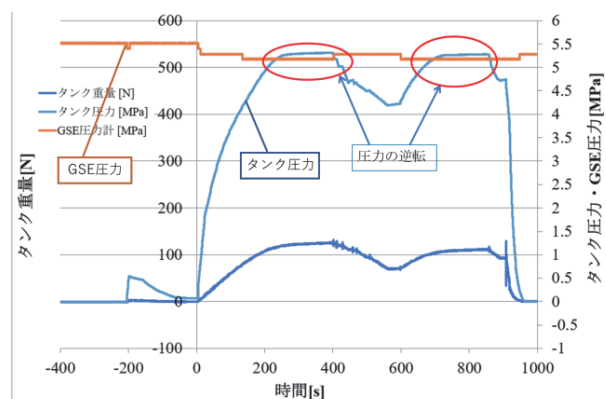


図10 8/18 実施の燃焼試験でのタンク圧力及び供給側圧力



- グレインを用いたハイブリッドロケットの燃料後退速度特性，第 62 回宇宙科学技術連合講演会，1N03（久留米，2018）。
- [3] 鎮目夢玄，高野敦，船見祐揮，諸星宏樹，田原鴻一，寺田俊樹，3D プリントによる星型フラクタル旋回形状グレイン搭載ハイブリッドロケットエンジンの開発，平成 29 年度宇宙輸送シンポジウム，STCP-2017-012（相模原，2018）。
- [4] 田原鴻一，諸星宏樹，鎮目夢玄，寺田俊樹，高野敦，船見祐揮，低損耗・低コストノズルの開発，平成 29 年度宇宙輸送シンポジウム，STCP-2017-014（相模原，2018）。
- [5] 館山哲也，船見祐揮，高野敦，到達高度 100km を目指すハイブリッドロケットにおける構造設計を考慮した最適酸化剤，第 1 回ハイブリッドロケットシンポジウム，HR-2018-003（相模原，2018）。
- [6] 諸星宏樹，鎮目夢玄，田原鴻一，館山哲也，高野敦，星形フラクタル形状グレインを用いた推力 1.8kN 級ハイブリッドロケットエンジンの開発と打ち上げ実証，平成 29 年度宇宙輸送シンポジウム，STCP-2017-005（相模原，2018）。
- [7] 高野敦，船見祐揮，西野沙也佳，星型フラクタル旋回形状グレイン搭載ハイブリッドロケット概念設計及び打上試験結果，UNISEC Space Takumi Journal, 9, 1-16 (2020)。
- [8] 五十嵐裕貴，船見祐揮，喜多村竜太，高野敦，トータルインパルス 50kNs 級ハイブリッドロケットエンジンの開発，令和元年度宇宙輸送シンポジウム，STCP-2019-041（相模原，2020）。
- [9] 船見祐揮，高野敦，星形フラクタル旋回形状ハイブリッドロケット燃料グレインの平均後退速度，第 2 回ハイブリッドロケットシンポジウム，HR-2019-001（相模原，2019）。
- [10] 高野敦，船見祐揮，軽量・高性能ハイブリッドロケットエンジンの研究・開発（2018），神奈川大学工学研究，3, 81-84 (2020)。
- [11] S. Osher and R. Fedkiw, Level Set Methods and Dynamic Implicit Surfaces, Applied Mathematical Sciences 153, Springer (2003)。
- [12] M. Sussman, A. S. Almgren, J. B. Bell, P. Colella, L. H. Howell and M. L. Welcome, An Adaptive Level Set Approach for Incompressible Two-Phase Flows, J. Comput. Phys., 148, 81-124 (1999)。
- [13] 三徳春季，西條紀之，齊藤慶紀，船見祐揮，喜多村竜太，高野敦，ハイブリッドロケット用酸化剤タンクの開発，令和元年度宇宙輸送シンポジウム，STCP-2019-038（相模原，2020）。
- [14] 高野敦，長井隆博，日高暢大，低強度めねじ/高強度ボルト締結体の強度と軸力低下，第 57 回構造強度に関する講演会，3B08（岡山，2015）。

DNA のレーザー分子線堆積に基づくニューパラダイム：

新奇ハイブリッド薄膜材料の創製

松木 伸行<sup>\*1</sup>, 有賀 克彦<sup>2</sup>, 小野 晶<sup>3</sup>, 亀山 敦<sup>4</sup>, 佐藤知正<sup>5</sup>, 山口 栄雄<sup>6</sup>, 横澤 勉<sup>3</sup>

A New Paradigm Based on Laser Molecular Beam Deposition of DNA:  
Creation of Novel Hybrid Thin Film Materials

Nobuyuki MATSUKI<sup>\*1</sup>, Katsuhiko ARIGA<sup>2</sup>, Akira ONO<sup>3</sup>, Atsushi KAMEYAMA<sup>4</sup>,  
Tomomasa SATO<sup>5</sup>, Shigeo YAMAGUCHI<sup>6</sup> and Tsutomu YOKOZAWA<sup>3</sup>

1. 緒言

現在、創薬や医療技術の進展は著しく、それらを支援するための生体分子材料による様々な機能素子の開発も進められている。表 1 に、そのような機能素子と想定される応用例を示す。

表 1 生体分子材料による種々の想定されるデバイス例[1]

機能別分類		デバイス例
センサ	分子認識センサ	有害物質検知器、ウイルス・細菌検知器、人探知器、嗅覚・味覚センサ、血糖・乳酸・疾病マーカー測定器、DNA シーケンサー
	物理センサ	視覚・聴覚・触覚センサ、温度・発汗センサ
リアクタ	物質生産	ペプチド合成（酵素生産含む）、核酸合成（食品添加物含む）、水浄化膜、VOC 処理用生物膜、メタン変換気相リアクタ
	エネルギー生産	酵素発電機、微生物発電機、生物電気器官発電機
アクチュエータ	ウェットロボティクス	人工臓器（ハイブリッド型）、心筋細胞ポンプ、昆虫・動物細胞ロボット、ハイブリッド昆虫・魚
	分子ロボティクス	アメーバ型・スライム型分子ロボット、分子機械
プロセッサ	バイオコンピュータ	DNA コンピュータ、粘菌コンピュータ
その他	バイオチップ	DNA チップ、ペプチドチップ、細胞チップ、臓器チップ
	機能性材料	DNA ストレージ、DNA オリガミ（2D・3D ナノ構造体）

上記のデバイスを具現化する際、電気信号処理回路と組み合わせることが想定されるため、従来のデバイスと親和性の高い形態として構成されていることが望ましい。生体分子材料による分子認識や分子反応の機能を用いて、それを電気信号に変換するデバイスを作製する場合、その基本構造としては図 1 に示すように、反応部（Reaction part）・伝達部（Transduction part）、基板部（Substrate part）から成る基本構造が想定される。

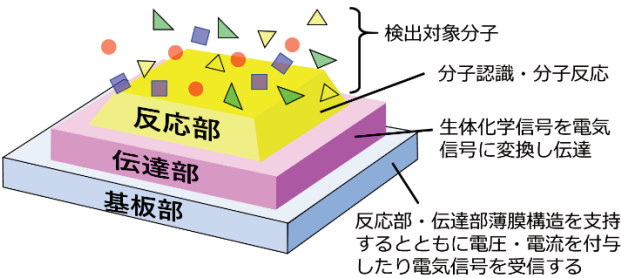


図 1 生体分子材料に基いたデバイスの基本構造例

表 1 のデバイス例一覧を見ると、DNA（Deoxyribonucleic acid, デオキシリボ核酸）に関わる材料やデバイスが広範な分野の応用例に含まれており、これらが今後の新型機能素子材料として注目されていることがわかる。DNA は 2'-デオキシリボース（五炭糖）、リン酸、およびプリン塩基であるアデニン(A)とグアニン(G)、そしてピリミジン塩基であるシトシン(C)とチミン(T)から構成され、生物の遺伝情報機能を担う高分子生体物質の一つである。2'-デオキシリボースの 5'位部分にリン酸がエステル結合し、1'位部分に A, G, C, T のうちいずれかの塩基が結合した基本構成単位が「デオキシリボヌクレオチド」であり、この基本構成単位がさらにリン酸基部分を介して連続結合し 1 本の螺旋状分子鎖となったものが DNA 構造の方半分である 1 本鎖 DNA に相当する。A と T は 2 つの水素結合、C と G は 3 つの水素結合でそれぞれ対結合する「相補的塩基対」の性質を有している。1 本鎖 DNA と A, G, C, T を含むヌクレオチド（デオキシアデノシン-リン酸：dAMP、デオキシグアノシン-リン酸：dGMP、デオキシシチジン-リン酸：dCMP、チミジン-リン酸：dTMP）とポリメラーゼ酵素が一定条件の下で同時に存在するとポリメラーゼ酵素の働きによってそれぞれの相補塩基

<sup>\*1</sup> 准教授 電気電子情報工学科  
Associate Professor, Dept. of Electrical, Electronics and Information Engineering

<sup>2</sup> 教授 東京大学大学院新領域創成科学研究科／  
グループリーダー 国立研究開発法人 物質・材料研究機構  
国際ナノアーキテクトゥクス研究拠点超分子グループ  
Professor, Dept. of Adv. Materials Science, The Univ. of Tokyo;  
Group Leader, Nano-Materials Field, Supermolecules Group, International Center for Materials Nanoarchitectonics, National Institute for Materials Science

<sup>3</sup> 教授 物質生命化学科  
Professor, Dept. of Material and Life Chemistry

<sup>4</sup> 教授 化学教室  
Professor, Dept. of Chemistry

<sup>5</sup> 助手 電気電子情報工学科  
Research Assistant, Dept. of Electrical, Electronics and Information Engineering

<sup>6</sup> 教授 電気電子情報工学科  
Professor, Dept. of Electrical, Electronics and Information Engineering

が次々に対結合し、最終的に DNA は 2 本鎖の二重螺旋構造として構築される。この二重螺旋構造を比喩的に表せば、長い梯子（はしご）の上下両端を掴んでねじったような構造であり、足を掛ける「踏棧（とうざん）」の部分がヌクレオチド同士の水素結合部分、支柱部分がリン酸結合にそれぞれ相当する。

分子生物学および遺伝子工学の進展に伴って DNA を任意の構造に切断・結合・複製できる技術が開発されると、DNA の構造や機能が着目され、電子デバイスを構成する「機能性材料」として利用できないだろうかという考えが提唱されるようになった[2, 3]。DNA により発現させる主な機能として以下のようなものが期待されている。

- |                    |                  |
|--------------------|------------------|
| 1. 電気伝導性とその変化[4-6] | 5. 分子触媒[12]      |
| 2. ナノ構造[7]         | 6. ナノデバイス[13]    |
| 3. 演算[8]           | 7. ナノマシン[14, 15] |
| 4. 分子認識[9-11]      | 8. DNA 認証 [16]   |

これらの機能を有するデバイスを作製するためには、DNA を分子層レベルで平坦に再現性良く制御堆積する技術が求められる。従来、基板上に DNA を製膜する方法としては DNA 溶液をスピコート法やインクジェット法によって塗布した後、乾燥固化させる手法が一般的であったが、この方法では均一な膜厚や表面平坦性を得ることが困難であった。そこで本研究では、高融点無機材料や低分子材料の薄膜化に威力を発揮してきた物理蒸着法であるレーザー分子線堆積法（Laser Molecular Beam Deposition: LMBD）[17]に着目した。超高真空中において、材料分子の分解エネルギーよりも低いエネルギー領域の赤外レーザーを有機原料へ局所的・短時間照射することによって材料分子の変性を抑制しつつ基板上へ分子層レベルで膜厚を制御しながら堆積することが可能である[18, 19]。しかしながら、DNA に対するレーザーを用いた堆積手法の実施例が極めて限られており[20, 21]、筆者の調べた範囲では実験条件や製膜された DNA 固体薄膜の物性に関する報告が殆どなされていない。

本研究は、LMBD によって、DNA がベースとなった新奇な機能性固体薄膜の創製を目指し、DNA 薄膜の作製プロセス条件を探索すること、および作製された DNA 薄膜の諸物性について知見を得ることを目的として開始した。

## 2. 実験方法

図 2, 3 に本研究で用いた LMBD 装置の構造模式図および外観写真をそれぞれ示す。ターボ分子ポンプ排気によって基本真空度を  $4 \times 10^{-5}$  Pa に維持可能なチャンパー内部には、上部に基板を取り付けたホルダーを固定する箇所があり、下部には 4 種類のターゲット材料を自転・公転できるターゲットカールセルが設置されている（本実験では 1 種類のターゲットのみ使用）。チャンパー側面に 45°の角度で取り付けられた合成石英ガラス窓を通じて、半導体発振赤外レーザー（波長：808 nm）をターゲット上にレンズで集光しターゲット材料を昇華・蒸散させる。製膜速度はチャンパー内に取り付けられた水晶振動子膜厚モニターにより 0.1 Å/s の精度で計測可能となっている。基板直下にはステッピングモーター駆動の可

動マスクが設置してあり、基板上への分子線照射を遮蔽するシャッターの役割を担うとともに、製膜中にこの可動マスクを一定速度で動かすことによって、図 4 に示すように基板上へ膜厚が直線的に傾斜した製膜を行うことが可能である（マスクを特定箇所で停止させることにより階段状の膜厚変化を有する試料作製も可能）。本実験では以下の条件によって試料を作製した。

[基板] Si(100) n-type 42 mm×19 mm×0.5 mm をアセトン、エタノール、超純水により洗浄後エアブローにて乾燥させた後に基板ホルダーへ取付けてロードロック室を介し製膜チャンパー内に導入（自然酸化膜除去なし）。

[基板温度] 室温（23 °C）

[ターゲット材料] サケ精子由来乾燥 DNA 粉末 (MP Bio Japan)

[レーザー] 半導体連続発振赤外レーザー（波長：808 nm, Directphotonics, DIRECTBOND 800）、出力 1.8~2.5 W

[製膜速度] 平均製膜速度 0.48 Å/s

[製膜プロセス] 製膜前に可動マスクを基板端までフルオープンし、製膜速度を調整した後に 77 μm/s の速度で可動マスクを閉じる（基板を覆う）方向へ動かし膜厚傾斜堆積を行った。

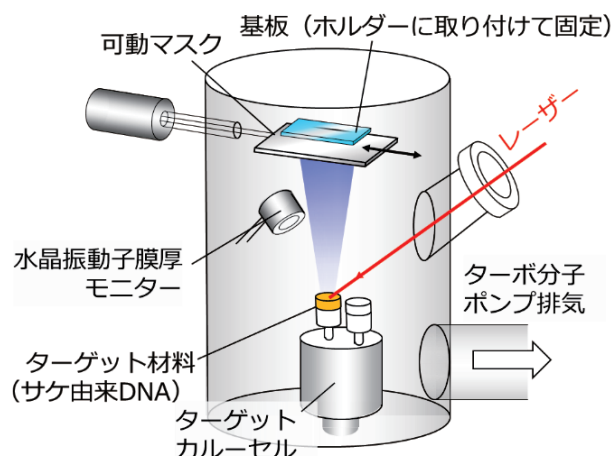


図 2 LMBD 装置の構造模式図

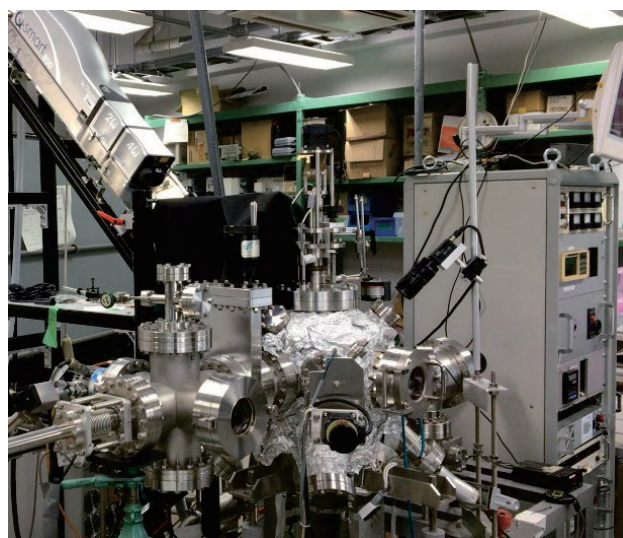


図 3 LMBD 装置の外観写真

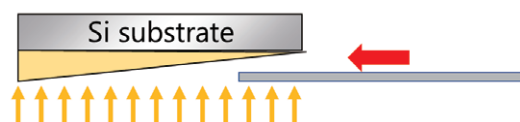


図4 製膜中の可動マスク等速駆動による膜厚傾斜製膜の模式図

また、比較のためにキャスト法によっても製膜を行った。図5に示すように、超純水中にサケ精子由来乾燥 DNA 粉末を溶解させて作製した溶液を上述と同様の Si(100)基板上へ滴下した後、シリカゲルで満たした密閉容器中に基板を常温で96時間保持して乾燥させた。

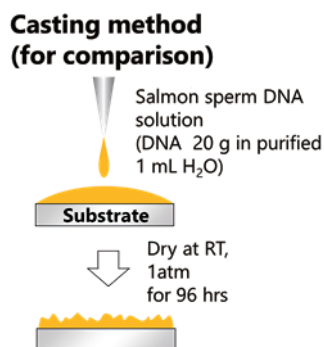


図5 キャスト法による製膜プロセス

製膜後は以下に示すそれぞれの方法で堆積薄膜の物性評価を行った。

[表面形状] 走査型白色干渉計

[表面粗さ] 原子間力顕微鏡 (AFM)

[膜厚] 触針式段差計

[結合構造] フーリエ変換赤外分光光度計 (FT-IR)

[DNA 分子鎖長評価] アガロースゲル電気泳動法

- (1) 基板上薄膜を TE buffer 溶液 (10 mmol/L Tris-HCl (pH 8.0), 1 mmol/L EDTA\* (pH 8.0)) によって溶解し分析に用いた。
  - (2) 電気泳動用アガロースゲル (1.4%) : アガロース 0.7 g を 500 mL TAE 溶液 (40 mmol/L Tris-acetate, 1 mmol/L EDTA\*) に溶解して作製した。
  - (3) 電気泳動用バッファー溶液: 上記 TAE 溶液
  - (4) DNA サイズマーカー: Gene Ladder 100 (Nippon Gene) 5  $\mu$ l
  - (5) 電気泳動条件: 100 V, 30 min
  - (6) 染色蛍光試薬: SYBR Safe DNA Gel Stain
- ※EDTA: ethylenediaminetetraacetic acid

### 3. 実験結果および考察

以下においては、LMBD およびキャスト法により作製された資料をそれぞれ LMBD 薄膜、キャスト薄膜と呼称する。

図6に触針段差計により計測した LMBD 薄膜の膜厚分布を示す。試料の全体に渡って、ほぼ直線的な膜厚傾斜となっており、水晶振動子膜厚モニターと可動マスクによって高い膜厚制御性で製膜可能であることがわかる。この高い膜厚制御性は DNA 薄膜をデバイス化する際に必要不可欠な要素である。

図7は、走査型白色干渉計により計測した LMBD 薄膜とキャスト薄膜の断面形状プロファイルを示している。100 nm オーダーの凹凸があるのに対し、LMBD 薄膜ではほぼ測定ノイズ範囲内程度の凹凸となっており、非常に平坦な表面が得られていることを表している。

MBD 薄膜について、定量的に表面の RMS (最小二乗) ラフネスを評価するとともに、膜厚に依存した RMS ラフネスの変化を調べるため、図8のように膜厚と RMS ラフネスとの関係をプロットし

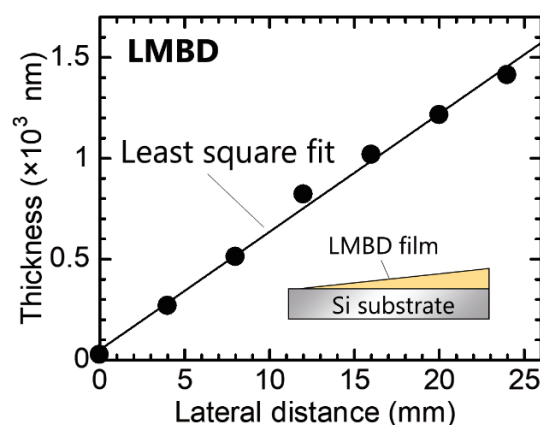


図6 触針段差計による膜厚分布測定結果。

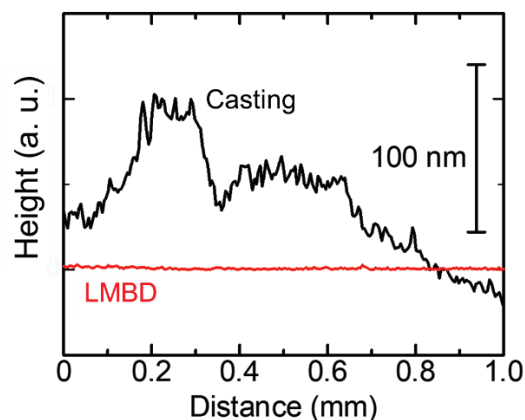


図7 走査型白色干渉計により計測した断面形状プロファイル。

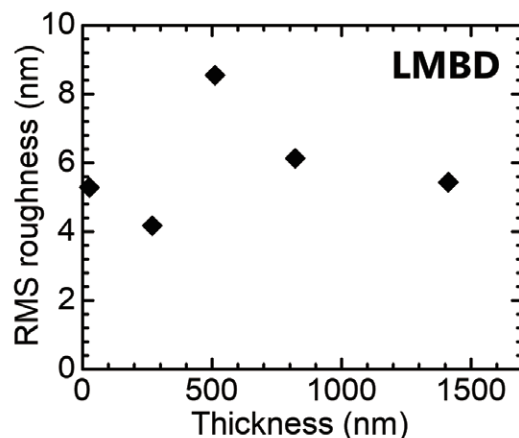


図8 AFM により計測した LMBD 薄膜の RMS ラフネス。



た．同プロットからわかるように，膜厚の増大に伴う RMS ラフネスの明確な増大傾向はなく，4~9 nm の範囲に収まっている．このように nm レベルの平坦性が得られていることから，別の機能性薄膜を上部に積層し急峻な界面を得ることも可能であると考えられる．

以上の結果から，LMBD 薄膜は膜厚制御や表面平坦性に優れるという結果が得られた．これに加えて，形成された薄膜が DNA の分子構造を維持しているかどうかという点が DNA の機能を活用させるために最も重要な事項である．図 9 に，LMBD 薄膜とキャスト薄膜の FT-IR 吸収スペクトルを示す．LMBD 薄膜のスペクトルは，膜厚の小さい部分から大きい部分にかけて 7 領域を測定した結果を重ねて示してあり，膜厚の増加に応じてスペクトルの概形が相似を保ちながら吸収が増加している．特徴的な吸収ピークについて番号を付記し，対応する結合構造[22]を表 2 にまとめた．

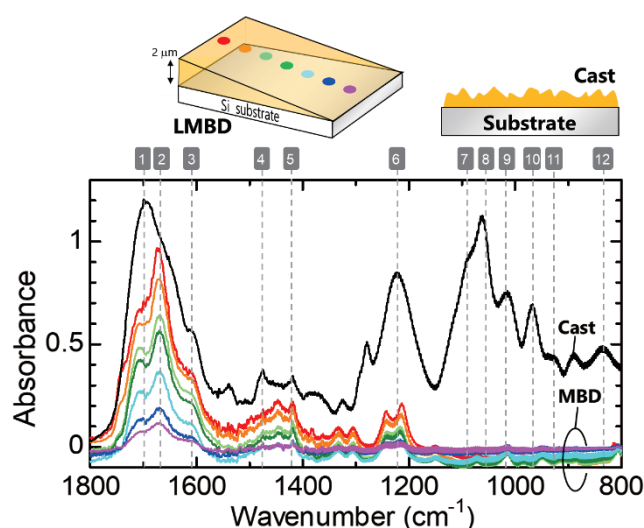


図 9 MBD 薄膜およびキャスト薄膜の FT-IR 吸収スペクトル．

表 2 赤外吸収ピーク位置と結合構造との対応[22]．

ピーク No.	ピーク位置 (cm <sup>-1</sup> )	結合構造 (および振動モード)
1	1700	Guanine (C=O stretching)
2	1653	Thymine (C=O stretching)
3	1603	Adenine (C=N stretching)
4	1488	Cytosine (in-plane vibration)
5	1420	Cytosine and Guanine
6	1221	Phosphate antisymmetric stretching
7	1083	Phosphate symmetric stretching
8	1050	C-O deoxyribose stretching
9	1014	P-O or C-O stretching
10	963	C-C and C-O of deoxyribose skeletal motion
11	938	Adenine-Thymine base pairs
12	835	Deoxyribose phosphate

図 9 から，キャスト薄膜の吸収スペクトルにおいて現れていた No.6~12 のピークが LMBD 薄膜の吸収スペクトルにおいて著しく減少していることがわかる．結合構造との対応から推察されるこ

とは，リン酸結合が切断されている，すなわち DNA を梯子構造に例えた場合の支柱部分が断片化しているということである．No. 1~5 のピークについては LMBD 薄膜とキャスト薄膜で概形の相似がほぼ保持されていることから，A, G, C, T 塩基構造は維持されていると思われる．DNA 構造におけるリン酸結合が断片化していると推察されたことから，どの程度の塩基対数 (Base pair) まで断片化しているかを確認するため行ったアガロースゲル電気泳動実験の蛍光画像を図 10 に示す．

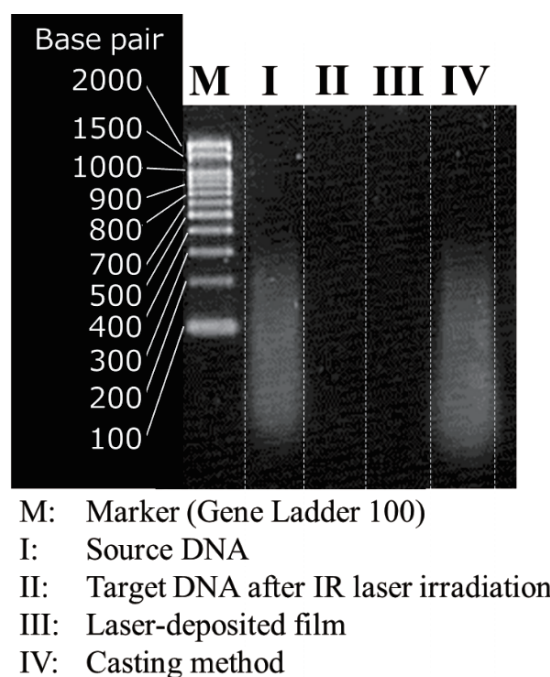


図 10 アガロース電気泳動後の蛍光画像．

図 10 のレーン I にはサケ精子由来 DNA によるスミアな蛍光バンドが現れており，700 塩基対以下の種々の長さの DNA 鎖が原料に含まれていることがわかる．レーン IV はキャスト法による試料の結果であり，原料とほぼ同様のレーン範囲にスミアな蛍光バンドが出現している．これは原料水溶液を乾燥させたキャスト試料に対して想定された結果である．レーン II は，IR レーザーを照射した後のターゲットから採取した DNA 粉による結果であり，レーン III は LMBD 薄膜の結果である．これらのいずれのレーンにも蛍光バンドは現れていないことから，ターゲットとして IR 照射を受けた DNA 原料，およびそこから蒸散して基板上に堆積された薄膜では，DNA は 100 塩基対よりもはるかに小さな塩基対まで断片化したか，あるいは水素結合も乖離して色素がインターカレーションを起こさないような構造にまで分解したことが考えられる．

以上の結果から，LMBD を用いた DNA 薄膜堆積実験において，ナノメートルレベルで平坦な表面の固体薄膜が形成されるもののリン酸結合構造は維持されず，A, G, C, T 塩基構造は残存することがわかった．この原因は，IR レーザーによるターゲット加熱が変性を生じさせていることに帰せられる可能性が高い．A, G, C, T 塩基構造のみを利用した機能性薄膜を形成する目的であれば本実験条件も活用可能であるが，原料 DNA の塩基対鎖を保持した DNA による固体薄膜形成を目指す上では不適である．そのため，新たな

アプローチの導入を進めることが必要である。

#### 4. 新たなアプローチの検討

LMBD によって原料 DNA の塩基対鎖を保持した DNA 固体薄膜を形成するために、IR レーザーによる熱的な昇華ではなく、原料 DNA に与えるダメージがより少ない新たなアプローチを検討している。その有力な候補として挙げられるのが、Matrix-assisted pulsed laser evaporation (MAPLE)法である[20]。堆積物質よりもレーザー光吸収係数が高く、より蒸散しやすい材料を Matrix (母材) として堆積物質とともに混合シターゲットを作製する。このターゲットに真空中でレーザーを照射すると、まず Matrix にレーザーのエネルギーが吸収されて爆発的蒸発を生じ、堆積物質はその爆発的蒸発に押し出されるようにして基板方向に射出する。このプロセスにより、堆積物質はレーザーエネルギーによる分解を免れて基板上に堆積される。

最近、筆者らはこの Matrix 法を用いた LMBD による DNA 製膜実験を開始した。堆積膜の FT-IR スペクトルにおいて図 9 中の No. 6~12 に相当する吸収ピークが明瞭に現れる有望な結果が得られ始めており、目下のところ堆積条件の最適化と結果の解析を行いながら研究を進めている。

#### 5. 結言

本研究では、DNA を機能材料とした新奇なデバイスの開発を目指し、LMBD を用いて DNA 固体薄膜を創製する研究を行った。サケ精子由来 DNA を原料として、赤外レーザーを用いた LMBD によりナノメートルレベルで平坦な表面を有する固体薄膜が得られた。しかしながら、FT-IR スペクトルの分析から原料 DNA の構造が維持されていないことが推察された。現在、新たなアプローチとして MAPLE 法の適用を進めており、有望な初期的結果が得られ始めている。今後は、堆積条件の最適化と詳細な評価を行いつつ LMBD による DNA 固体薄膜の製膜プロセス確立に向けて研究を進展させる。

#### 6. 謝辞

本研究は工学研究所共同研究 A の助成により実施された。電気泳動実験でご協力とご指導をいただいた生物教室 朝倉史明教授に心より感謝申し上げる。DNA の精製方法についてご指導下さった公益財団法人 国際科学振興財団 シーラカンス研究所 飯岡恵里香氏に深く感謝の意を表する。本研究について貴重なご助言を下された岡田典弘 北里大学特任教授/東京工業大学名誉教授、鯉沼秀臣 東京工業大学名誉教授に心より御礼申し上げます。

#### 参考文献

- [1] (国) 新エネルギー・産業技術総合開発機構技術戦略研究センター (TSC) 編, 生物機能を利用したデバイス分野の技術戦略策定に向けて, TSC Foresight, Vol. 23 (2017).
- [2] R. Hoffmann, DNA as clay, *Am. Sci.* **82**, 308–311 (1994).
- [3] N. C. Seeman, DNA in a material world, *Nature* **421**, 427–431 (2003).
- [4] S. Kelley and J. Barton, Electron transfer between bases in double helical DNA, *Science* **283**, 375–381 (2021).
- [5] 田畑 仁, 谷口 正輝, 田中 裕行, 大塚 洋一, 田中 慎一, 川

- 合 知二, DNA エレクトロニクス, 表面科学 **24**, 677–683 (2003).
- [6] R. Yamada, I. Nomura, Y. Yamaguchi, Y. Matsuda, Y. Hattori, H. Tada, A. Ono, Y. Tanaka, Electrical conductance measurement of HgII-mediated DNA duplex in buffered aqueous solution, *Nucleosides, Nucleotides, & Nucleic Acids*, **39**, 1083–1087 (2020).
- [7] A. Chandrasekaran, Nuclease resistance of DNA nanostructures, *Nature Reviews Chemistry*, published online in 10 Feb. 2021, (2021).
- [8] F. Wang, H. Lv, H. Lv, Q. Li, J. Li, X. Zhang, J. Shi, L. Wang, C. Fan, Implementing digital computing with DNA-based switching circuits, *Nat. Commun.* **11**, 121 (2020).
- [9] S. Woo. and P. Rothmund, Programmable molecular recognition based on the geometry of DNA nanostructures. *Nat. Chem* **3**, 620–627 (2011).
- [10] T. Dairaku, K. Furuita, H. Sato, J. Šebera, D. Yamanaka, H. Otaki, S. Kikkawa, Y. Kondo, R. Katahira, F. M. Bickelhaupt, C. F. Guerra, A. Ono, V. Sychrovský, C. Kojima and Y. Tanaka, Direct detection of the mercury–nitrogen bond in the thymine–Hg<sup>II</sup>–thymine base-pair with <sup>199</sup>Hg NMR spectroscopy, *Chem. Comm.* **51**, 8488–8491 (2015).
- [11] Torigoe, H., Ono, A. & Kozasa, T. Detection of single nucleotide polymorphisms by the specific interaction between transition metal ions and mismatched base pairs in duplex DNA, *Transition Met. Chem.* **36**, 131–144 (2011).
- [12] N. Duchemin, I. Heath-Apostolopoulos, M. Smietana and S. Arseniyadis, A decade of DNA-hybrid catalysis: from innovation to comprehension, *Org. Biomol. Chem.* **15**, 7072–7087 (2017).
- [13] T. Liedl, T. Sobey, F. Simmel, DNA-based nanodevices, *Nano Today* **2**, 36–41 (2007).
- [14] J. Bath, A. Turberfield, DNA nanomachines, *Nat. Nanotech* **2**, 275–284 (2007)
- [15] P. Ma, C-P Liang, H.-H. Zhang, Bin-Cheng Yin, Bang-Ce Ye, A highly integrated DNA nanomachine operating in living cells powered by an endogenous stimulus, *Chem. Sci.* **9**, 3299–3304 (2018).
- [16] M. Hashiyada, DNA Biometrics, Sec. 7 in “Biometrics”, InTech, J. Yang (Ed.), ISBN: 978-953-307-618-8 (2011), available from: <http://www.intechopen.com/books/biometrics/dna-biometrics>.
- [17] 松木伸行, 大久保勇男, レーザ堆積法 (レーザーアブレーション法), 2020 年版 薄膜作製応用ハンドブック, 第 2 編 2 章 5 節 pp. 372–380, 株式会社エヌ・ティイー・エス, (2020).
- [18] M. Haemori, J. Yamaguchi, S. Yaginuma, K. Itaka and H. Koinuma, Fabrication of highly oriented rubrene thin films by the use of atomically finished substrate and pentacene buffer layer, *Jpn. J. Appl. Phys.* **44**, 3740–3742 (2005).
- [19] K. Kawashima, Y. Okamoto, O. Annayev, N. Toyokura, R. Takahashi, M. Lippmaa, K. Itaka, Y. Suzuki, N. Matsuki and H. Koinuma, Combinatorial screening of halide perovskite thin films and solar cells by mask-defined IR laser molecular beam epitaxy, *Sci. Tech. Adv. Mater.* **18**, 307–315 (2017).
- [20] D. B. Chrisey, A. Piqué, R. McGill, J. Horwitz, B. Ringeisen, D. M. Bubbb and P. K. Wu, Laser Deposition of Polymer and Biomaterial Films, *Chem. Rev.* **103**, 553–576 (2003).
- [21] S. Ito, S. Yaginuma, K. Itaka, K. Kawashima and H. Koinuma, Infrared laser MBE growth of bio-material films inclusive of DNA, 第 59 回高分子学会年次大会, 発表 No. 2L23, 予稿集 p. 683 (2010).
- [22] B. Gnapareddy, S. Dugasani, T. Ha, B. Paulson, T. Hwang, T. Kim J. H. Kim, K. Oh and S. H. Park, Chemical and Physical Characteristics of Doxorubicin Hydrochloride Drug-Doped Salmon DNA Thin Films, *Sci. Rep.* **5**, 12722 (2015).

# 新バリア材料を有するジョセフソン接合の作製と 二次元磁界変調特性の測定による接合の評価

渡邊 騎通\* 穴田 哲夫\*\* 中山 明芳\*\*\*

## Fabrication of Josephson junctions with new barrier materials and evaluation of junctions by two-dimensional scan of external magnetic field

Norimichi WATANABE\* Tetsuo ANADA\*\* Akiyoshi NAKAYAMA\*\*\*

### 1. 緒言

二つの超伝導体で薄い絶縁層を挟んだ構造をしているものをジョセフソン接合というが、我々は、トンネル接合型のジョセフソン接合の磁界特性を研究してきた[1-3]。トンネル接合型のジョセフソン接合では、超伝導電極にNb、トンネルバリア層の材料に酸化アルミニウムを用いたものが試料作製の歩留まりもよく、超伝導特性の再現性も高いことから、Nb/Al-AlO<sub>x</sub>/Nb 構造のジョセフソン接合が最も多く作製されており、超伝導デジタル回路などのエレクトロニクスの分野に多く利用されている[4-7]。ジョセフソン接合の応用としては、生体磁気などの微弱な磁場の検出が可能な高感度の磁気センサである SQUID (超伝導量子干渉素子) や、低消費電力、超高速動作を同時に実現できる SFQ (単一磁束量子) 回路と呼ばれている超伝導デジタル回路、X 線や放射線を検出できる超伝導検出器などがある[8-10]。

近年、ジョセフソン接合のトンネルバリア層である酸化アルミニウムを磁性材料に置き換えた超伝導体/磁性体/超伝導体構造の磁性ジョセフソン接合の研究が精力的に行われている[11-16]。従来の超伝導体/絶縁体/超伝導体構造のジョセフソン接合では、接合部にバイアス電流や外部磁界を印加して接合を流れる超伝導電流を制御することにより超伝導回路などのエレクトロニクスに応用されるが、磁性ジョセフソン接合では、バリア層の磁性材料によって接合を流れる超伝導電流が抑制されるため、接合部にバイアス電流や外部磁界を印加する仕組みを減少させることができ、システムの消費電力を削減できることから磁性ジョセフソン接合をエレクトロニクスに応用する研究が行われている。

我々は、Nb/Al-AlO<sub>x</sub>/Nb ジョセフソン接合を作製し、ジョセフソン接合を流れる超伝導電流の磁界特性について研究してきた。ジョセフソン接合を流れる超伝導電流は外部磁界によって変調されるが、ジョセフソン電流の磁界変調特性は、通常、接合面に平行に外部磁

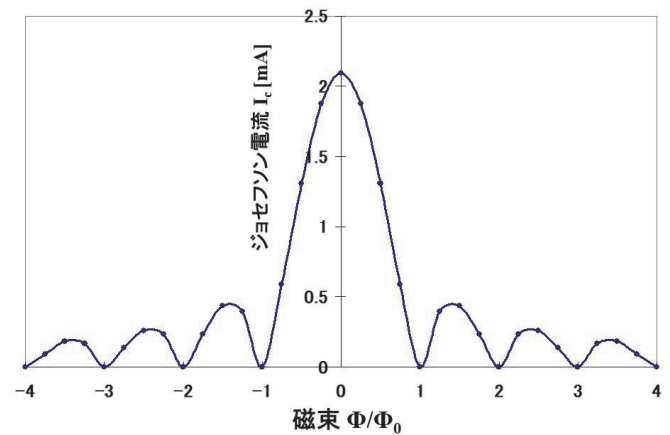


図1 ジョセフソン電流の外部磁界変調特性  
(フラウンホーファーパターン)

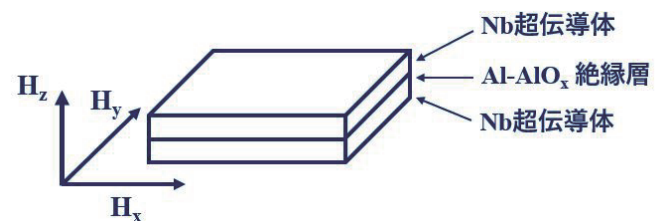


図2 ジョセフソン接合の接合面に平行に二方向から外部磁界  $H_x, H_y$  を印加してジョセフソン電流の変調を行う

界を一方から印加することによりジョセフソン電流の変調を行い、図1のようなフラウンホーファーパターンと呼ばれる磁界変調特性を観測することにより接合の一様性が議論される[17]。それに対して我々は、図2に示すように接合面に平行に二方向から外部磁界を印加することによりジョセフソン電流の変調を行い、ジョセフソン電流の二次元磁界変調特性を測定してきた。外部磁界を二次元走査することにより、ジョセフソン電流の磁界特性においてより多くの情報を得ることができる。例えば、接合形状の異なるジョセフソン接合の磁界変調特性を測定した場合、外部磁界を二次元走査した方

\*特別助教 電気電子情報工学科

Assistant Professor, Dept. of Electrical, Electronics, and Information Engineering

\*\*名誉教授 電気電子情報工学科

Professor Emeritus, Dept. of Electrical, Electronics, and Information Engineering

\*\*\*教授 電気電子情報工学科

Professor, Dept. of Electrical, Electronics, and Information Engineering



が、一次元で走査した場合よりも、明瞭にジョセフソン電流の磁界変調特性の接合形状依存性を観測することができる[18, 19]。また、ジョセフソン接合の接合面に垂直に外部磁界を印加してジョセフソン電流の磁界特性を調べたジョセフソン電流の垂直磁界依存性についての研究の報告例は少ないが[20]、ジョセフソン接合に垂直磁界に加えて、同時に接合面に平行な外部磁界も二方向から印加してジョセフソン電流を変調することにより、ジョセフソン電流の垂直磁界依存性についても、より多くの情報を得ることが可能になる[21-24]。そこで、本研究では、この外部磁界を接合面に平行に二方向から印加してジョセフソン電流を変調するという接合の評価手法を、超伝導体/磁性体/超伝導体構造の磁性ジョセフソン接合の評価に適用し、磁性ジョセフソン接合を流れる超伝導電流の二次元磁界変調特性を測定することを目的に研究を行っている。

## 2. 試料作製

最初に、図3に示したような磁性ジョセフソン接合を作製するためのdcスパッタリング装置の立ち上げを行った。Nb、Al、Niが成膜できるスパッタリング室を有しており、各スパッタリング室の間は磁気移動棒を用いて試料を移動することができる構造になっているので、高真空を破らずに積層膜を作製することが可能である。試料交換室を含めて3台のターボ分子ポンプで真空引きを行っており、到達真空度は $2.0 \times 10^{-5}$  Pa程度である。Nbのスパッタリングレートは、Arガス圧 1.0 Pa、陰極電圧-320 V、陰極電流 0.5 Aのときに1.24 nm/s、Alのスパッタリングレートは、Arガス圧 4.0 Pa、陰極電圧-350 V、陰極電流 0.2 Aのときに0.5 nm/s、Niのスパッタリングレートは、Arガス圧 5.0 Pa、陰極電圧-260 V、陰極電流 0.2 Aのとき0.05 nm/sであった。次に、新たに立ち上げたスパッタリング装置で、Nb/Al-AIO<sub>x</sub>/Nb ジョセフソン接合を作製し、新スパッタリング装置で、従来のジョセフソン接合が正常に作製できるのか確認を行った。Nb/Al-AIO<sub>x</sub>/Nb と配線用の Wiring Nb 層の各層の膜厚は、それぞれ300 nm、5 nm、50 nm、100 nmである。フォトリソグラフィにより積層膜のパターニングを行い、陽極酸化法により接合領域を作製した[25]。素子の大きさは、75  $\mu$ m $\times$ 75  $\mu$ mである。

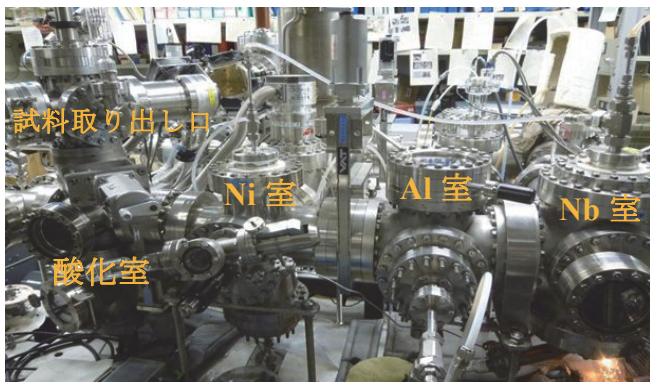


図3 磁性ジョセフソン接合を作製するために、新たに立ち上げたスパッタリング装置

## 3. 実験

図4に、4.2Kで測定したジョセフソン接合の電流-電圧特性を示す。V=0で、1.1 mAの超伝導電流が観測されており、2.7mVのギャッ

プ電圧が観測されている。このように、新たに立ち上げたスパッタリング装置を用いても、超伝導トンネル接合特有の大きなヒステリシスを持つ電流-電圧特性を示すジョセフソン接合を作製できることが確認できた。さらに、ジョセフソン接合の接合面に平行に二方向から外部磁界  $H_x$ ,  $H_y$  を印加して、ジョセフソン電流の変調を行った。測定結果を図5に示す。 $H_x$ 方向と  $H_y$ 方向の二方向にフラウンホーファーパターンのメインピークとサブピークが観測されていることから、均一なトンネルバリア層が作製できていると推測される。

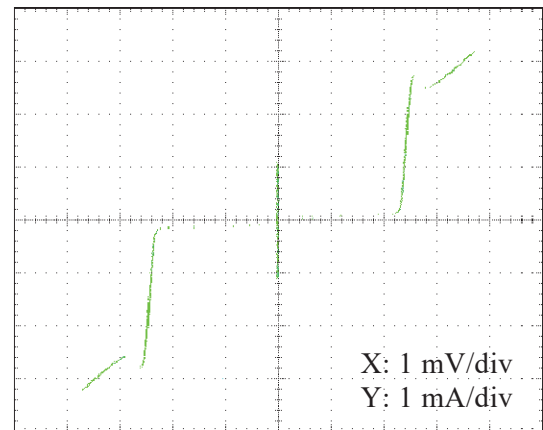


図4 新たに立ち上げたスパッタリング装置を用いて作製した Nb/Al-AIO<sub>x</sub>/Nb ジョセフソン接合の電流-電圧特性

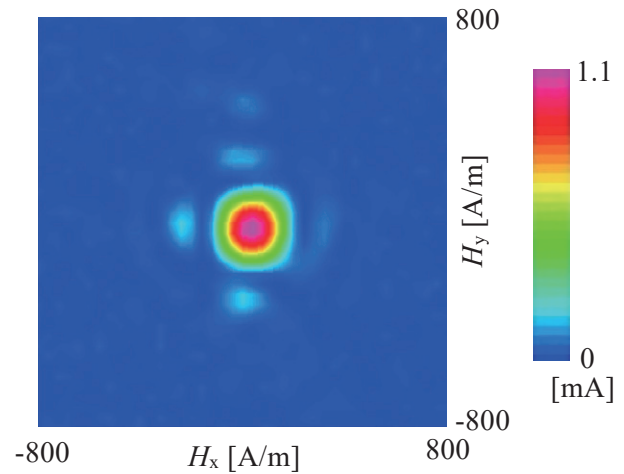


図5 新たに立ち上げたスパッタリング装置を用いて作製した Nb/Al-AIO<sub>x</sub>/Nb ジョセフソン接合を流れるジョセフソン電流の二次元磁界変調特性

新たに立ち上げたスパッタリング装置で、Nb/Al-AIO<sub>x</sub>/Nb ジョセフソン接合が作製できることを確認できたので、次に、Nb/Ni/Nb 磁性ジョセフソン接合の作製を行った。作製した素子の断面構造を図6に示す。同一基板上に、複数の磁性ジョセフソン接合が作製されており、Nb/Ni/Nbの各層の膜厚は、それぞれ300 nm、3 nm、50 nmである。素子間の絶縁は、Nb/Al-AIO<sub>x</sub>/Nb 作製プロセスのときと同じように、陽極酸化法によって試みた。図7(a)は、Nb/Al-AIO<sub>x</sub>/Nb ジョセフソン接合の陽極酸化後の素子表面の光学顕微鏡写真であり、図7(b)は、Nb/Ni/Nb ジョセフソン接合の陽極酸化後の素子表面の光学顕微鏡写真である。図7(a)において、正方形の形状のものがジョ



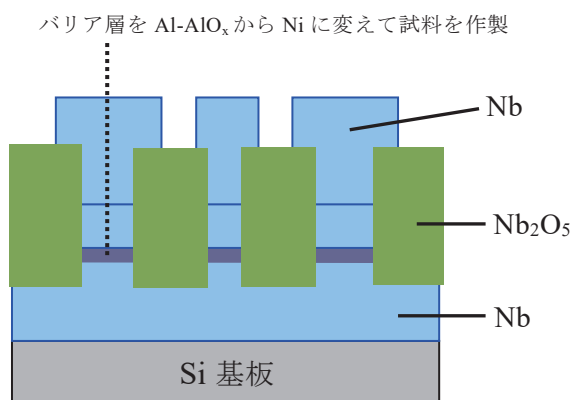


図6 陽極酸化プロセスで作製した試料の断面構造

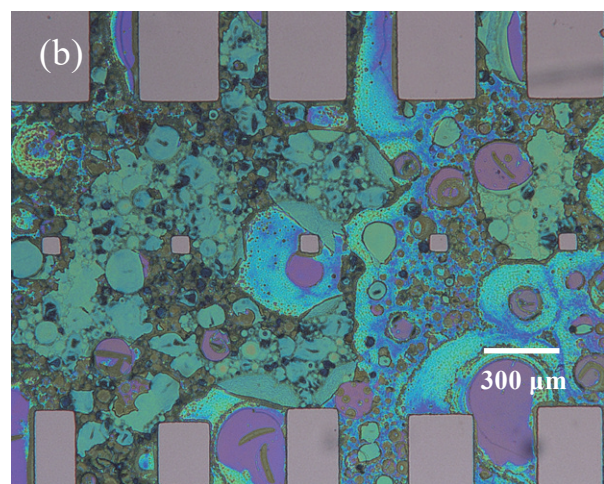
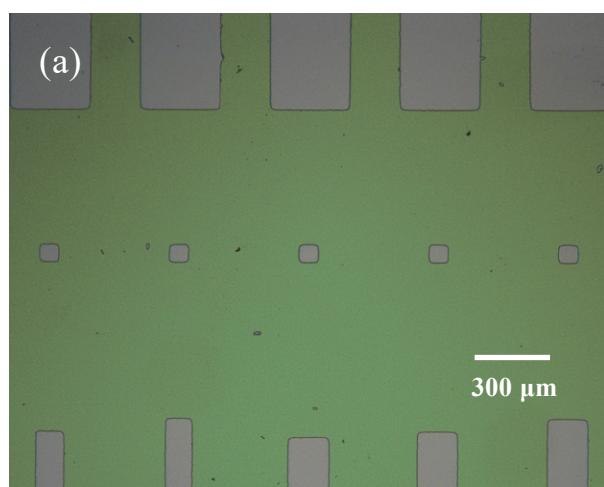


図7 陽極酸化プロセスで作製したジョセフソン接合の試料表面の光学顕微鏡写真 (a) Nb/Al-AlO<sub>x</sub>/Nb ジョセフソン接合の試料表面 (b) Nb/Ni/Nb 磁性ジョセフソン接合の試料表面

セフソン接合であり、その周辺は陽極酸化法により絶縁された領域 (Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) である。図 7(b)においては、ジョセフソン接合周辺の陽極酸化された領域の表面形態が、図 7(a)と比較して大きく変化していることがわかる。これは、Niの陽極酸化に原因があると考え、ガラ

ス基板上に Ni 薄膜のみを成膜して陽極酸化を行い確認した結果、Ni 薄膜を陽極酸化すると、Ni 薄膜が基板から剥がれてしまうことがわかった。そこで、Niの陽極酸化の影響を減らす素子作製プロセスで磁性ジョセフソン接合の作製を行った。新たに作製した Nb/Ni/Nb 磁性ジョセフソン接合の構造を図 8 に示す。下部電極の Nb を幅 300 μm のライン状にパターニングし、そのライン状の Nb 層の上に Nb/Ni/Nb の積層膜を成膜した。ライン状の Nb 層の膜厚は 300 nm、その上に作製した Nb/Ni/Nb 層の各膜厚は、50 nm、3 nm、50 nm である。接合領域は陽極酸化法ではなくケミカルエッチングにより接合領域以外の部分を取り除いて作製した。陽極酸化は下部電極の Nb と Wiring 層となる Nb 層が短絡しないように絶縁するためだけにを行った。下部電極 Nb 層をパターニングして作製した磁性ジョセフソン接合の試料表面の光学顕微鏡写真を図 9 に示す。ライン状の Nb 層の表面は、陽極酸化後も表面形態に大きな変化は見られず、Ni 層の陽極酸化の影響を取り除いて素子を作製することができた。さらに、4 端子法により、作製した磁性ジョセフソン接合の室温における抵抗を測定したところ、同一基板上に作製した 17 個すべての磁性ジョセフソン接合において、1 Ω 程度の常温抵抗が得られた。各素子において均一な常温抵抗が測定できていることから、均一なパリア層が作製できていると考えられる。

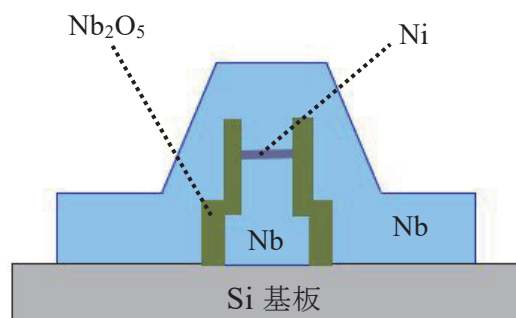


図8 下部電極のNb層をライン状にパターニングして作製した Nb/Ni/Nb 磁性ジョセフソン接合の試料断面図

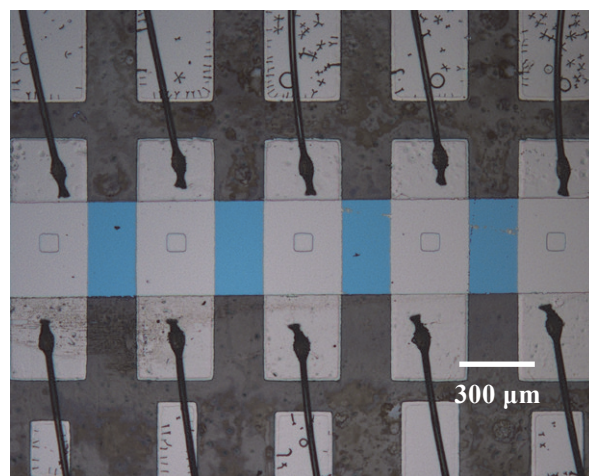


図9 下部電極のNb層をライン状にパターニングして作製した Nb/Ni/Nb 磁性ジョセフソン接合の試料表面の光学顕微鏡写真

#### 4. 結言

Ni 成膜室を有するロードロック方式のスパッタリング装置を新たに立ち上げ、Nb/Ni/Nb 磁性ジョセフソン接合の作製を行った。下部電極となる Nb 層をライン状にパターンニングして、その上に磁性ジョセフソン接合を作製することにより、Ni の陽極酸化の影響を少なくした作製プロセスで、磁性ジョセフソン接合を作製した。同一基板上に作製した磁性ジョセフソン接合の常温抵抗は、すべて  $1\ \Omega$  程度になり、均一な Ni のバリア層を有するジョセフソン接合を作製することができた。今後は、作製した磁性ジョセフソン接合の超伝導状態における電流-電圧特性を測定し、さらに、接合面に平行に二方向から外部磁界を印加してジョセフソン電流の二次元磁界変調特性を測定し、接合の評価を行っていく予定である。

#### 参考文献

- [1] A. Nakayama, S. Abe, T. Morita, M. Iwata, Y. Yamamoto, Modulation of Josephson current of Nb junctions by two-dimensional scan of external magnetic field, IEEE Trans. Magn., 36, 3511-3513 (2000).
- [2] A. Nakayama, S. Abe, N. Watanabe, Two-dimensional magnetic field dependence of Josephson current and resonant current steps at finite voltage of square shape superconducting tunnel junctions, J. Appl. Phys., 111, 113907 (2012).
- [3] A. Nakayama, S. Abe, N. Watanabe, Y. Okabe, Two-dimensional magnetic field dependence of zero and finite voltage steps in current-voltage characteristics of rectangular shape niobium tunnel junctions, Microelectron. Eng., 108, 163-168 (2013).
- [4] Y. Tarutani, M. Hirano, U. Kawabe, Niobium-Based Integrated Circuit Technologies, Proc. IEEE, 77, 1164-1176 (1989).
- [5] T. Imamura, T. Shiota, S. Hasuo, Fabrication of high quality Nb/ $\text{AlO}_x$ -Al/Nb Josephson junctions. I. Sputtered Nb films for junction electrodes, IEEE Trans. Appl. Supercond., 2, 1-14 (1992).
- [6] T. Imamura, S. Hasuo, Fabrication of high quality Nb/ $\text{AlO}_x$ -Al/Nb Josephson junctions. II. Deposition of thin Al layers on Nb films, IEEE Trans. Appl. Supercond., 2, 84-94 (1992).
- [7] T. Shiota, T. Imamura, S. Hasuo, Fabrication of high quality Nb/ $\text{AlO}_x$ -Al/Nb Josephson junctions. III. Annealing stability of  $\text{AlO}_x$  tunneling barriers, IEEE Trans. Appl. Supercond., 2, 222-227 (1992).
- [8] 小山大介, 生体磁気計測分野で活躍する超伝導磁気センサ, 電子情報通信学会誌, 99, 193-198 (2016).
- [9] 日高睦夫, 永沢秀一, 低温超伝導デバイス作製プロセスと今後の展望, 低温工学, 52, 315-322 (2017).
- [10] 大久保雅隆, 超伝導エレクトロニクスにより拓く先端分析技術, 低温工学, 46, 47-52 (2011).
- [11] J. W. A. Robinson, Z. H. Barber, M. G. Blamire, Strong ferromagnetic Josephson devices with optimized magnetism, Appl. Phys. Lett., 95, 192509 (2009).
- [12] S. Scharinger, C. Gurlich, R. G. Mints, M. Weides, H. Kohlstedt, E. Goldobin, D. Koelle, R. Kleiner, Interference patterns of multifacet  $20\times(0-\pi)$  Josephson junctions with ferromagnetic barrier, Phys. Rev. B, vol. 81, 174535 (2010).
- [13] T. I. Larkin, V. V. Bol'ginov, V. S. Stolyarov, V. V. Ryazanov, Igor V. Vernik, S. K. Tolpygo, O. A. Mukhanov, Ferromagnetic Josephson switching device with high characteristic voltage, Appl. Phys. Lett. 100, 222601 (2012).
- [14] J. A. Glick, R. Loloee, W. P. Pratt, Jr., N. O. Birge, Critical Current Oscillations of Josephson Junctions Containing PdFe Nanomagnets, IEEE Trans. Appl. Supercond., 27, 1800205 (2017).
- [15] T. Yamashita, A. Kawakami, H. Terai, NbN-Based Ferromagnetic 0 and  $\pi$  Josephson Junctions, Phys. Rev. Appl., 8, 054028 (2017).
- [16] S. K. Tolpygo, V. Bolkhovsky, R. Rastogi, S. Zarr, A. L. Day, E. Golden, T. J. Weir, A. Wynn, L. M. Johnson, Planarized Fabrication Process With Two Layers of SIS Josephson Junctions and Integration of SIS and SFS  $\pi$ -Junctions, IEEE Trans. Appl. Supercond., 29, 1101208 (2019).
- [17] Barone and G. Paterno, Physics and Applications of the Josephson Effect, Wiley-Interscience, New York (1982).
- [18] N. Watanabe, A. Nakayama, S. Abe, S. Kawai, Y. Nishi, and K. Masuda, The shape dependency of two-dimensional magnetic field dependence of a Josephson junction, J. Appl. Phys., 103, 07C707 (2008).
- [19] A. Nakayama, S. Abe, N. Watanabe, Y. Nishi, Y. Okabe, Two-dimensional Magnetic Field Dependence of Current-Voltage Characteristics of Rectangular, Hexagonal and Triangle Shape Superconducting Junctions and DC-SQUIDS, J. Phys. Conf. Ser., 97, 012247 (2008).
- [20] S. L. Miller, Kevin R. Biagi, John R. Clem, and D. K. Finnemore, Critical currents of cross-type superconducting-normal-superconducting junctions in perpendicular magnetic fields, Phys. Rev. B, vol. 31, 2684-2693 (1985).
- [21] N. Watanabe, A. Nakayama, S. Abe, K. Masuda, Measurement of perpendicular magnetic field dependence of the Josephson current by a three-dimensional scan of the external magnetic field, J. Phys. Conf. Ser., 234, 042038 (2010).
- [22] A. Nakayama, S. Abe, N. Watanabe and Y. Okabe, Anomalous modulation characteristics of DC Josephson current through niobium tunnel junction by applying external magnetic field 4000 A/m in perpendicular direction, Microelectron. Eng, 108, 93-98 (2013).
- [23] N. Watanabe, S. Abe, and A. Nakayama, Modulation of a Josephson current though an Nb/Al- $\text{AlO}_x$ /Nb Josephson junction by a parallel magnetic field and perpendicular magnetic field, J. Appl. Phys., 116, 033920 (2014).
- [24] A. Nakayama, S. Abe, N. Watanabe, Deviation From Fraunhofer-Type Modulation of Josephson Current Through Niobium Tunnel Junctions by Applying Vertical Magnetic Field, IEEE Trans. Appl. Supercond., 26, 1100606 (2016).
- [25] H. Kroger, L. N. Smith, and D. W. Jillie, Selective niobium anodization process for fabricating Josephson tunnel junctions, Appl. Phys. Lett., 39, 280 (1981).

# 曲げ履歴を受けた鋼材の機械的性質に関する研究

藤田正則\*, 中村 慎\*\*

## Mechanical properties of structural steels subjected bending history

Masanori FUJITA\*, Makoto NAKAMURA\*\*

### 1. 序論

鋼構造の部材リユースは、図1に示すように既存建物より柱・大梁・小梁などを丁寧な解体工法により採取して新規の建物に再度使用することである[1-5]。リユース部材は、既存建物から採取された部材、または、既存建物から採取予定の部材であり、接合部・架構を含む。鋼構造の部材リユースにあたっては、丁寧な解体により損傷の少ない部材を採取することが重要である[6]。部材の損傷には、曲がり、ねじれ、反りなどの生じた部材曲や腐食(部分腐食・全面腐食)または減肉などがあるが、軽微な損傷を受けた部材の場合、修復できれば、その適用範囲を広げることできる。例えば、解体時の敷地条件や部材ディテールなどにより図2に示すような変形やねじれなどである。ここでは、曲がりの生じた変形を曲げ加工により新材と同等の形状に修復することを想定する。曲がりの修復には、新材の場合において加熱矯正や冷間曲げが実施されており、加熱温度や範囲、あるいは冷間曲げ時のスプリングバックの影響を少なくする工夫がなされている[7,8]。その際、曲げ半径、曲げ回数、歪速度などが鋼材の機械的性質に及ぼす影響などは、割れが発生しないように経験的に行われていることが多い。

本論は、損傷を有するリユース部材に着目し、曲げ履歴を受けた鋼材の機械的性質に関する基礎的な研究である。まず、鋼材の JIS 試験片を用いて冷間プレス加工による曲げ・曲げ戻しの成形を行い、曲げ半径の異なる鋼材の硬度と歪の関係を把握する。次に、曲げ・曲げ戻しを繰り返し施した鋼材の引張試験を行い、曲げ履歴を受けた鋼材の機械的性質について明らかにする。

### 2. リユース部材と損傷

#### 2.1 リユース部材の対象

リユース部材には、リユース部材の対象は、日本工業規格材(以降、JIS 規格材という)、大臣認定品および F 値(建築基準法施行令で定められた基準強度)が設定された鋼材である[8]。ただし、ボルト、

溶接材料などの接合材料は除いている。これらは、主に鉄鋼メーカーがプレハブ化した低層建物の鉄骨造、すなわち、工場・作業場、倉庫、事務所などの主要構造部材のうちその大部分を占める JIS 規格材の一般構造用圧延鋼材や溶接構造用圧延鋼材などである。リユース部材の性能評価にあたっては、解体材より試験片を採取できれば破壊試験により性能評価が可能であるが、解体前の試験片の採取は容易ではない。非破壊検査により硬度より、引張強さを推定する方法が提案されている[9-15]。

#### 2.2 鋼材の曲げ加工と曲げ半径

鋼材の冷間曲げ加工には、規格材として冷間ロール成形角形鋼管(BCR)、プレス成形角形鋼管(BCP)などがある。この場合、角部外側の曲率半径の標準値は板厚  $t$  に対して、ロール成形において  $2.5t$  ( $6\text{mm} \leq t \leq 22\text{mm}$ )、プレス成形において  $3.5t$  ( $6\text{mm} \leq t \leq 40\text{mm}$ ) とされている。これらは、冷間曲げを受けて角部だけではなく、平坦部においても降伏点が上昇し、ばらつきが大きくなることを考慮して、降伏点のレンジや降伏比が定められている[9]。また、冷間曲げ加工の場合、柱、ブレースなど塑性変形能力が要求される部位における内側曲げ半径は、応力方向が面に沿った方向において  $8t$  以上、応力方向が面と直角方向において  $4t$  以上、塑性変形能力が要求される部位の内側曲げ半径は、応力方向が面に沿った方向において  $8t$  以上、応力方向が面と直角方向において  $4t$  以上、塑性変形能力が要求されない部位においては、 $2t$  以上とさ

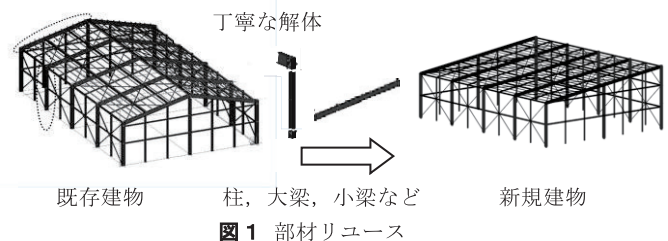


図1 部材リユース



(a) ウェブ (b) フランジ

図2 解体時のH形鋼の残留変形

\*教授 建築学科

Professor, Dept. of Architecture and Building Engineering

\*\*特別助手 建築学科

Research Associate, Dept. of Architecture and Building Engineering



れている[16]。これらは、曲げ加工時の板厚の外表面に生じる割れによって曲げの加工限度により最小曲げ半径が規定されている。上記を踏まえて、ここでは、L字やV字曲げなどのベンダー曲げを想定した冷間曲げ加工による部材の修復を取り上げる。

3. 実験概要

3.1 試験体形状

試験体のパラメータは、リユースを想定した曲げ履歴を受けた鋼材とし、表1に示すような鋼材の曲げ半径、曲げ回数、板厚とする。試験体の内側曲げ半径は、 $R=1t, 2t, 8t$ とし、試験体の形状は図3に示すようなJIS引張試験片1A号とする。試験体数は板厚12mm、22mmごとに各8体の計16体とし、使用鋼材は各板厚ごとに同一ロットから採取した一般構造用圧延鋼材(SS400)とする。曲げ加工の回数は、部材の損傷の程度によっても異なるが、正曲げ・曲げ戻しを1サイクルとして曲げ加工として3回まで行う。

3.2 試験体の製作・計測

曲げ加工は、通常曲げ加工に使用しているプレス機(500t)を用いて、鋼材を各曲げ半径  $R=1t, 2t, 8t$  になるよう曲げ加工を施す。その際、曲げ加工時の鋼材の引張側の歪(中央部)を計測する。曲げ加工を施した後、鋼材を裏返し、再び载荷して元の形状に曲げ戻す。曲げ加工・曲げ戻し加工の1サイクルを模式図を図4に示す。その際、図5に示すような曲げ半径を有する曲げ加工用治具を载荷側と支点側に製作する。なお、曲げ半径  $R=1t, 2t, 8t$  に鋼材を曲げ加工した範囲を図3に示している。超音波硬度計を用いて、曲げ加工・

曲げ戻し後の表面のビッカース硬さ(以降、硬度という)を計測する。計測箇所はグラインダーで研磨した状態で、3点の平均値とする。試験体の曲げ加工状況、曲げ戻し加工の状況を図5に各々示す。鋼材の正曲げにおいて、試験体の引張側と接触する治具に溝をつけて、曲げ加工時に接触しないように歪ゲージを添付する。試験体の曲げ加工況を図5(a)(b)、曲げ戻し加工を図5(c)(d)に各々示す。鋼材の正曲げにあたっては、曲率半径に対してスプリングバックを考慮して曲げ加工を行う。また、曲げ戻し加工の際、架台にステンレスプレートを設置して摩擦を少なくしている。

4. 実験結果

各試験体の曲げ加工の前後の硬度および引張試験の実験結果一覧表を表2に示す。

4.1 曲げ加工と硬さ

1回目の曲げ加工後の各試験体の状況を図6に示す。曲げ半径  $R$  が  $1t$  の2回目の曲げにおいて、試験体に割れが発生し、 $R=2t$  およ

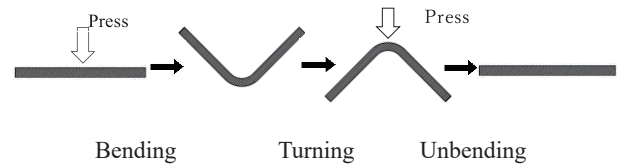


図4 曲げ加工のプロセス

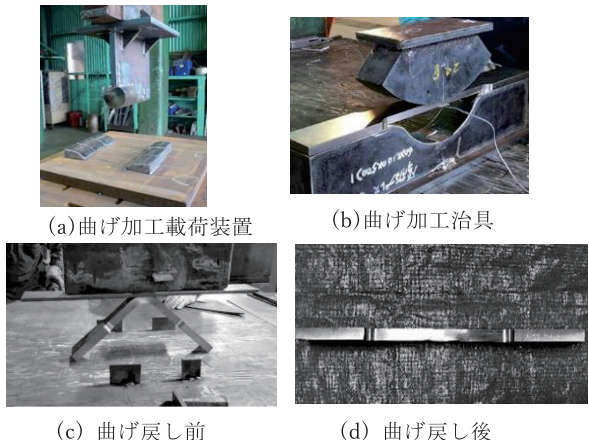


図5 曲げ加工

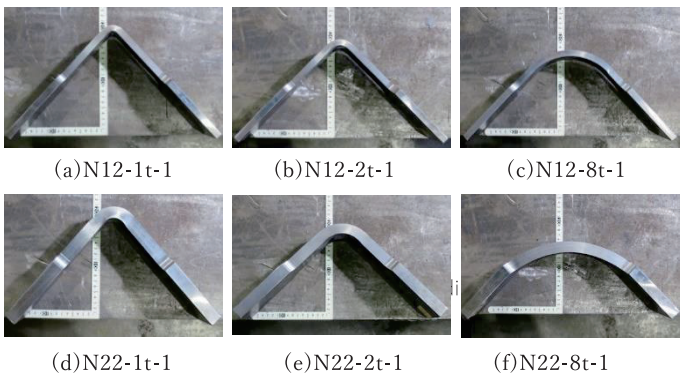


図6 曲げ加工後の試験体

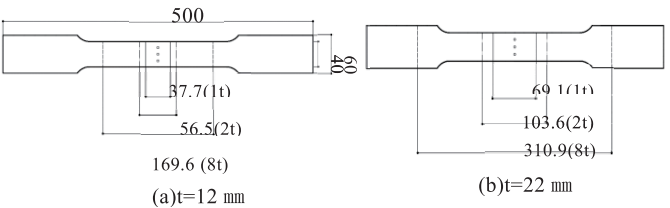
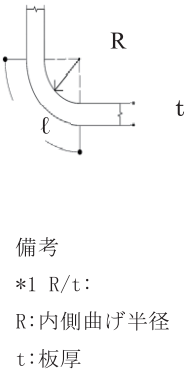


図3 試験体形状

表1 試験体リスト

Specimen	Thickness mm	R/t	R mm	Bending count
N12-R0t	12	-	-	0
N12-R1t-1		1	12	1
N12-R2t-1		2	24	1
N12-R2t-2		2	24	2
N12-R2t-3		2	24	3
N12-R8t-1		8	96	1
N12-R8t-2		8	96	2
N12-R8t-3		8	96	3
N22-R0t	22	-	-	0
N22-R1t-1		1	22	1
N22-R2t-1		2	44	1
N22-R2t-2		2	44	2
N22-R2t-3		2	44	3
N22-R8t-1		8	176	1
N22-R8t-2		8	176	2
N22-R8t-3		8	176	3



備考  
\*1 R/t:  
R:内側曲げ半径  
t:板厚



び 8t において曲げ加工による各試験体の割れは全て発生しなかった。

試験体の曲げ加工前後の表面のビッカース硬さの分布を図 7 に示す。各試験体ビッカース硬さは共に中央部で最大となっており、端部になるに連れて小さくなる傾向にある。試験体中央より左右対称となっていることから、曲げ加工は概ね均等になっていると考えられる。

## 4.2 引張試験

曲げ加工した試験体のうち、板厚 22 mm の R=8t の試験体の破断位置は曲げ半径範囲 ℓ 内であるが、その他の全て試験体は半径範囲 ℓ の外側に位置している。これは、t=22 以外の試験体の破断は曲げ関係の外側に位置することから、曲げ半径による曲げ加工を施した際、曲げ範囲内において歪硬化の影響を受けて強度が大きくなったものと考えられる。同様に、同じ曲げ半径においても板厚 22 mm は歪硬化の影響が板厚 22 mm より小さいものと考えられる。板厚に対する曲げ半径が小さい場合、塑性変形量が大きくなったものと考えられる。試験体の曲げ加工前後の表面のビッカース硬さと曲げ回数との関係を図 8 に示す。ビッカース硬さは曲げ回数が増えるに連れて大きくなる傾向にある。各板厚ともに曲げ回数が増えるに伴い、表面硬度は徐々に大きくなり、3 回目の曲げ加工の板厚 t=12, 22mm の硬さ

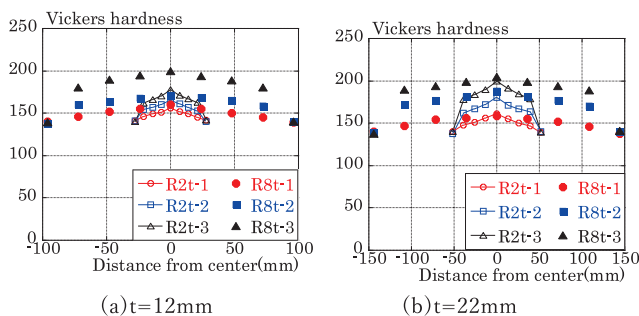


図 7 ビッカース硬さの分布

(中央部) は 1 回目の各々 1.23, 1.28 倍であり、歪硬化の影響を受けていることがわかる。

試験体の曲げ加工前後の表面のビッカース 1 回目の曲げ加工した試験体の荷重歪曲線を図 9 に示す。ただし、試験体中央部の引張側の歪であり、曲げ加工無しの試験体と合わせて示しており、図 9 (c)(d) は、R=8t の試験体の部位の歪を抽出したものである。各試験体共に 1 回目の曲げ加工において、板厚が 12mm と 22mm の場合においても降伏棚が消失したランドハウス型の荷重歪曲線になっている。2 回目以降の曲げ回数においても同様である。R=8t の場合、降伏棚は 1 回目において消失するものの、歪硬化の影響が観察される。t=12mm の場合、試験体中央部が局所的に歪硬化の影響が見られるのに対して、t=22mm の場合には、曲げ半径全体に渡って歪硬化の影響を受けている。

## 5. 考察

### 5.1 曲げ半径と最大歪の関係

鋼板が冷間均等曲げを受ける場合、最外縁の歪  $\varepsilon$  は下式で表すことができる。

$$\varepsilon = \frac{1}{1+2\left(\frac{R}{t}\right)} \quad (1)$$

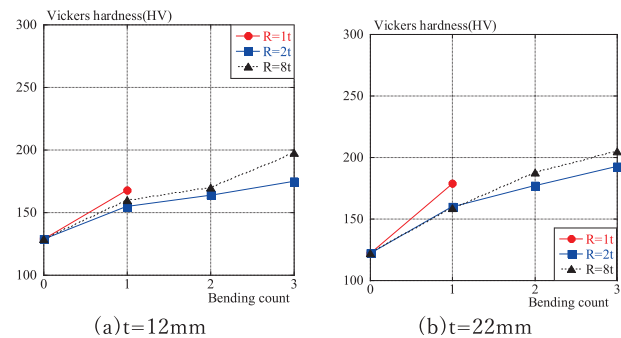


図 8 ビッカース硬さと曲げ回数

表 2 実験結果一覧表

No.	Specimen <sup>*1</sup>	Thickness t (mm)	Vickers hardness HV ①	After bending			②/①	Tensile test							
				Maximum strain(%)				Vickers Hardness s ② HV	Tensile strength N/mm2	Fracture location (mm)	*3	Elongation (%)	Yield strength (N/mm)	Yield ratio (%)	
				1st bending	2rd bending	3rd bending									
1	N12-R0	12	129	-	-	-	1.00	433	55	-	31	298	69	Remark  *1 N13(thickness)  -R1t(Bending radius)  -1(Bending count)  *2 Not measured  *3 Failure location I: inside bending radius, O:Outside bending radius	
2	N12-R1-1		129	16.0	-	-	1.68	1.30	452	-112	O	12	279		62
3	N12-R2-1		124	19.0	-	-	1.55	1.25	452	113	O	11	292		65
4	N12-R2-2		131	18.9	*2	-	1.64	1.25	458	110	O	13	283		62
5	N12-R2-3		129	22.5	*2		1.75	1.36	463	-118	O	12	288		62
6	N12-R8-1		129	6.7	-	-	1.60	1.24	452	123	O	7	308		68
7	N12-R8-2		135	6.8	8.6	-	1.70	1.26	460	108	O	8	294		64
8	N12-R8-3		127	7.0	8.7	9.6	1.98	1.56	467	-117	O	9	306		66
1	N22-R0	22	122	-	-	-	1.00	427	8	-	38	290	68		
2	N22-R1-1		134	24.2	-	-	1.79	1.34	480	-129	O	7	325	68	
3	N22-R2-1		139	14.0	-	-	1.60	1.15	475	-110	O	15	310	65	
4	N22-R2-2		136	17.6	*2	-	1.77	1.30	479	117	O	9	332	69	
5	N22-R2-3		137	22.0	*2		1.93	1.41	476	-120	O	9	311	65	
6	N22-R8-1		129	7.3	-	-	1.59	1.24	476	38	I	25	361	76	
7	N22-R8-2		131	7.1	8.6	-	1.88	1.44	488	80	I	21	384	79	
8	N22-R8-3		131	6.7	7.9	7.4	2.05	1.57	493	79	I	18	386	78	

Remark  
<sup>\*1</sup> N13(thickness)  
 -R1t(Bending radius)  
 -1(Bending count)  
<sup>\*2</sup> Not measured  
<sup>\*3</sup> Failure location  
 I: inside bending radius,  
 O: Outside bending radius

t: 鋼板の板厚, R: 鋼板の内側曲げ半径

(1)式は、板厚が大きく、曲げ半径が小さいほど曲げひずみが大きくなり、最大歪が大きくなることを示している。曲げ加工に伴う歪速度、バウシinger効果、残留歪の影響は考慮されていないものの、 $R=1t, 2t, 8t$  の均等曲げを受けると、(1)式による最大歪は各々33%, 20%, 6%程度となる。

各試験体の1回目の曲げ加工時の  $R/t$  と最大曲げ歪の関係を図10に示す。ここで、曲げ加工時の試験体中央部の引張側における最外縁の最大歪である。1回目の曲げ加工時の最大曲げ歪は、(1)式の近傍に概ね分布していることがわかる。各試験体の曲げ回数と最大曲げ歪の関係を図11に示す。曲げ半径  $R=8t$  の試験体の最大曲げ歪は板厚  $t=12\text{mm}$  および  $22\text{mm}$  共に1回目の曲げ加工で大きくなるものの、2回目以降概ね一定になる。曲げ半径  $R=2t$  の最大曲げ歪は、1回目の曲げ加工で大きくなった後、2回目以降やや増大する傾向となる。これは、 $R=2t$  の試験体は  $R=8t$  よりも歪硬化の影響を受けているものと考えられる。

曲げ半径  $R=8t$  の試験体の残留ひずみは、曲げ回数に関係なく概ね同じである。ただし、残留ひずみは各曲げ回数時の最大ひずみと曲げ戻し後の最大ひずみの差分である。

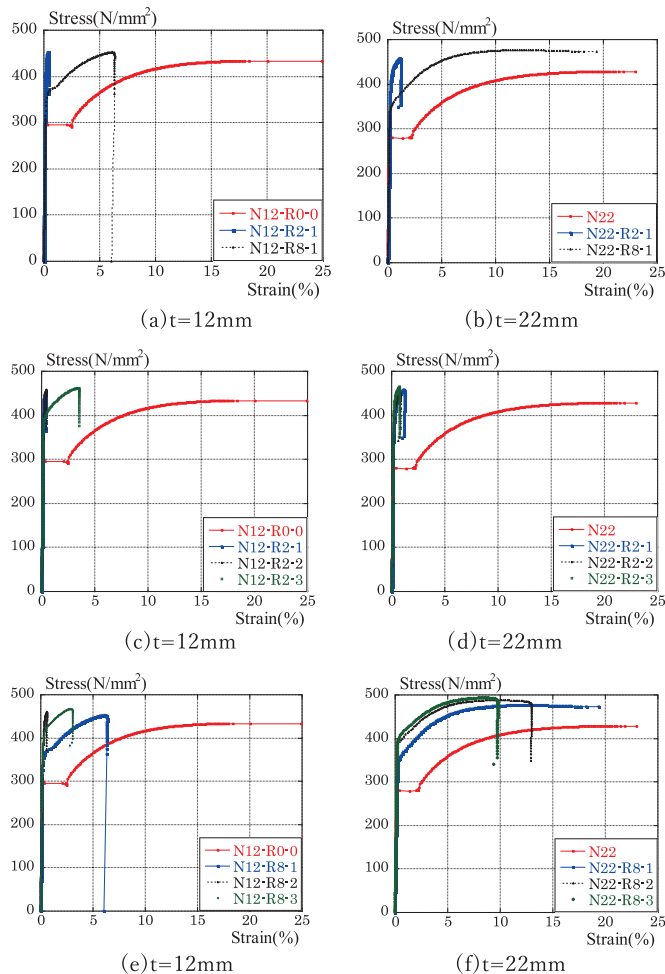


図9 荷重ひずみ曲線

## 5.2 機械的性質と曲げ回数の関係

各試験体の板厚ごとの引張強さと曲げ回数の関係を図12(a)(b)に示す。各試験体の引張強さは曲げ加工を受けると大きくなるが、板厚と曲げ半径によってその傾向はやや異なる。 $t=12\text{mm}$  の場合、引張強さは、曲げ回数が増えるに連れて緩やかに増大し一定になる。これは、全ての試験体において破断位置が曲げ半径の外側であり、歪硬化の影響を受けていない箇所に該当するためである。 $t=22\text{mm}$  の場合、引張強さは曲げ回数が増えるに連れて1回目でやや増大するものの、2回目以降概ね一定になる。

各試験体の板厚ごとの降伏耐力と曲げ回数の関係を図13(a)(b)に示す。板厚  $12\text{mm}$  の試験体の降伏耐力は、曲げ回数に関わらず概ね一定の値となる。これに対して、 $N22-8t$  の降伏耐力は曲げ回数が増えるに連れてやや増大する。破断位置が曲げ半径の内側であり、歪硬化の影響をやや受けているためである。

各試験体の板厚ごとの伸びと曲げ回数の関係を図14(a)(b)に示す。各試験体の伸びは1回目の曲げ加工を受けると大きく減少するが、2回目以降、板厚によりその変動は異なる。板厚  $12\text{mm}$  の試験体の伸びは、2回目以降、概ね一定になっている。 $N22-2t$  および  $N22-8t$  の試験体は曲げ回数が増えるに減少するが、その減少の割合は、 $N22-2t$  が大きい。

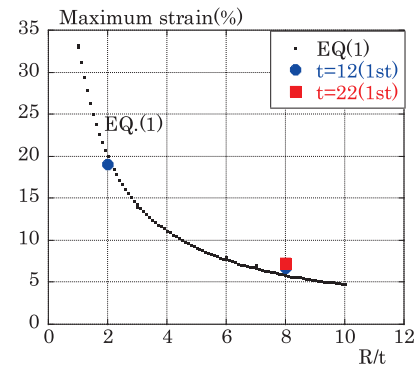


図10 最大曲げひずみと  $R/t$

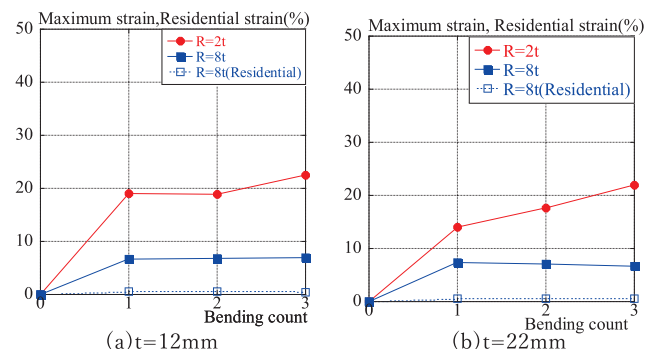


図11 最大曲げひずみと曲げ回数

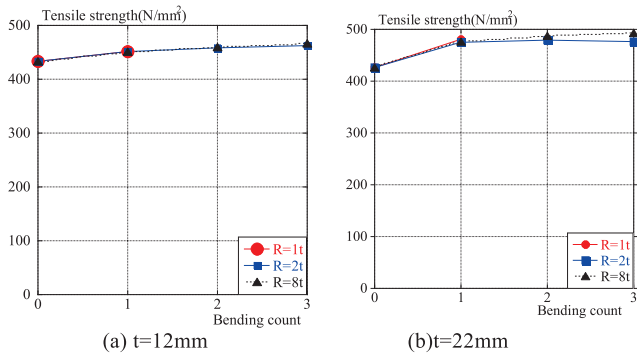


図 12 引張強さと曲げ回数

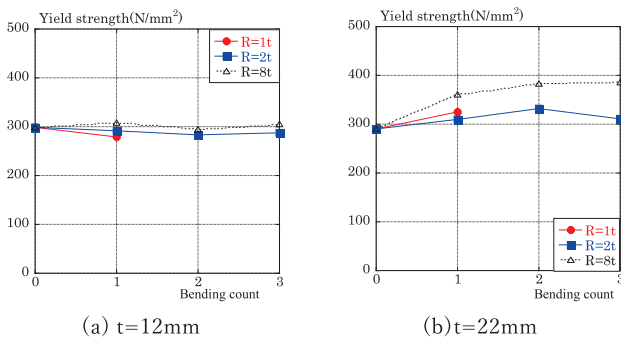


図 13 降伏耐力と曲げ回数

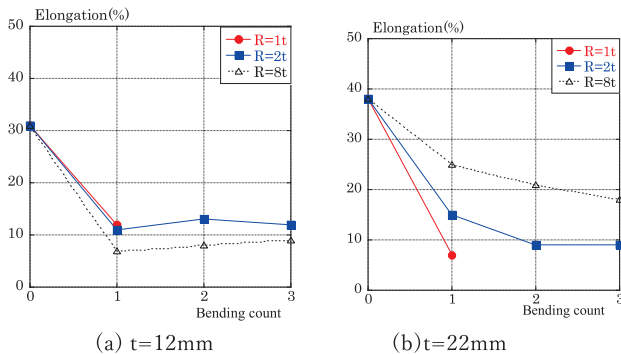


図 14 伸びと曲げ回数

## 6. 結論

本論では、リユースを想定して曲げ履歴を受けた鋼材の機械的性質について検討した結果、下記のことが明らかになった。

- 1) 曲げ加工時の引張側における最外縁の最大歪は、(1)式の近傍に概ね分布している。
- 2) 鋼材のビッカース硬さは、曲げ回数が増えると徐々に大きくなり、3回曲げ時に最大で曲げ加工前の1.6倍程度になる。
- 3) 鋼材の引張強さは、1回目の曲げ加工においてやや大きくなるものの、2回目以降、概ね同じになる。
- 4) 鋼材の降伏耐力は、板厚 12mm において曲げ加工の回数にかかわらず概ね同じであるが、板厚 22mm において曲げ半径の影響を受け、変動する。
- 5) 鋼材の伸びは、1回目の曲げ加工において大きく減少し、その変動は2回目以降、板厚の影響を受ける。

## 謝辞

本研究は、神奈川大学工学研究所との共同研究により実施されたものです。各関係者に謝意を表します。

## 参考文献

- [1] 日本建築学会：鋼構造環境配慮設計指針（案）-部材リユース-，2015.12
- [2] 日本建築学会構造委員会 鋼構造運営委員会：建築鋼構造における環境性とは何か，日本建築学会大会 構造部門パネルディスカッション，2002.8
- [3] 日本建築学会：建築部材のリユースマニュアル・同解説，2009.10
- [4] 日本建築学会 構造委員会 鋼構造運営委員会：鋼構造のリユースの現状と今後のあり方，日本建築学会大会（東海）構造部門パネルディスカッション，2012.9
- [5] 日本建築学会，構造委員会鋼構造運営委員会：東京五輪を契機に鋼構造環境配慮設計をどのように次世代に引き継ぐか，日本建築学会大会（東北）構造部門パネルディスカッション，2018.9
- [6] FUJITA, M., IWATA, M.: Reuse System of Building Steel Structures, STRUCTURE & INFRASTRUCTURE ENGINEERING, Vol. 4, No. 3, Taylor & Francis, pp. 207-220, 2008.6
- [7] 日本塑性加工学会：塑性加工入門，コロナ社，2007.8
- [8] 岡松眞之，橋本潔，望月晴雄，窪田蔵：建築構造用鋼材の知識，鋼構造出版，1993.5
- [9] 遮断法人鋼材倶楽部：新しい建築構造用鋼材，鋼構造出版，1998.1
- [10] 藤田正則，前田親範，岩田 衛：建築鋼構造のリユースシステムに関する研究 -リユース材の構造性能-，日本建築学会環境系論文集，第 600 号，pp. 83-89，2006.2
- [11] 藤田正則，文蔵亮介，岩田 衛：建築鋼構造のリユースシステムに関する研究-リユース材の加工とその性能評価-，日本建築学会環境系論文集，第 620 号，pp. 97-102，2007.10
- [12] 藤田正則，村井正敏，前田親範，岩田 衛：建築鋼構造のリユースシステムに関する研究 -サステナブルビル構造の試施工によるリユースの検証-，日本建築学会環境系論文集，第 75 巻 第 656 号，pp. 923-928，2010.10
- [13] 藤田正則，田知也，山本正幸，岩田 衛：リユースを想定した鋼構造部材の性能評価 -材質の推定例-，日本建築学会技術報告集，第 20 巻，第 44 号，pp. 45-48，2014.2
- [14] 藤田正則，岡崎駿介：桁面ブレースを有する鋼構造建物の部材リユース -設計理フローの検証-，日本建築学会技術報告集，第 24 巻，第 58 号，pp. 1047-1051，2018.10
- [15] 藤田正則，吉岡 励，中澤祥二，加藤史郎：リユース部材を用いた鋼構造建物の設計法に関する研究 -桁方向ブレース構造の耐震性能評価-，日本建築学会構造系論文集，第 83 巻，第 748 号，pp. 903-911，2018.6
- [16] 日本建築学会，建築工事標準仕様書 JASS6 鉄骨工事，2018.1

# 遺伝子組換えを利用したシーベリー雌雄識別 DNA マーカーの開発

朝倉 史明\* 中川 理絵\*\* 河合 義隆\*\*\* 森 直樹\*\*\*\*

## Development of DNA markers to identify sexuality of *Hippophae rhamnoides* L. using recombinant DNA technology

Nobuaki ASAKURA\* Ric NAKAGAWA\*\* Yoshitaka KAWAI\*\*\* Naoki MORI\*\*\*\*

### 1. 緒言

グミ科植物の一種であるシーベリー *Hippophae rhamnoides* L. (図 1) はユーラシア大陸に分布する落葉低木果樹である。*Hippophae* 属植物は 6 種に分類されており、*H. rhamnoides* はさらに 8 亜種に分類されている<sup>[1][2]</sup>。Lian (2003) はさらに新亜種を報告していることから、現在では *H. rhamnoides* には 9 亜種が知られている<sup>[3]</sup>。シーベリーは防風や土壌保全の目的で利用される一方、果実にはビタミン、ミネラル、不飽和脂肪酸などの豊富な栄養素を含んでおり、健康食品としても利用されている<sup>[4][5][6][7][8]</sup>。シーベリーは二倍体 ( $2n=24$ ) の雌雄異株植物(雌花のみをつける個体と雄花のみをつける個体がそれぞれ独立に存在する植物)であり、風媒により種子を着ける<sup>[1][9]</sup>。X/Y 性染色体が関与する機構によって性別が決定すると考えられているが、性分化機構の詳細は不明である<sup>[10][11]</sup>。播種から開花までの 3 から 4 年間は雌雄の識別ができない。育種および果実生産の効率化のために幼苗時での雌雄識別法が求められている。



図 1. 北海道で栽培されているシーベリー

*H. rhamnoides* の雌雄識別に寄与する DNA マーカーの最初の報告は、Persson and Nybom (1998) によるオスに特異的な RAPD (Random Amplified Polymorphic DNA) マーカーの OPD<sub>15-600</sub> である<sup>[12]</sup>。その後、Sharma et al. (2010) はオスに特異的な一つの RAPD マーカーを報告し<sup>[13]</sup>、Korekar et al. (2012) は二つのメスに特異的な RAPD マーカーを報告し<sup>[14]</sup>、Das et al. (2017) は一つのメスに特異的な ISSR (Inter Simple Sequence Repeat) マーカーを報告している<sup>[15]</sup>。最も近年では Zhou et al. (2018) によって一つのメスに特異的な RAPD マーカーが報告されている<sup>[16]</sup>。さらに *H. rhamnoides* の近縁種 *H. salicifolia* においては、Rana et al. (2009) によって一つのメスに特異的な RAPD マーカーが報告されている<sup>[17]</sup>。これらの DNA マーカーのなかには SCAR (Sequence Characterized Amplified Region) マーカー化されているものもある。

既報の DNA マーカーは各々が使用している材料においては雌雄識別に有効な DNA マーカーであるが、他の系統や品種では機能しないことが多く、私たちが使用している品種(表 1)について完全に雌雄識別に利用可能な DNA マーカーは存在しなかった(未発表)。そこで本研究では、私たちが見いだした一つの RAPD マーカーである OPAH03-500<sup>[18]</sup>と現在までに SCAR マーカー化されていない OPD15-600<sup>[12]</sup>の SCAR マーカー化を行い、適応範囲の広い、シーベリーの雌雄識別マーカーの開発を試みた。その結果、OPD15-600 由来の SCAR マーカーは私たちが使用している品種(表 1)において完全に雌雄識別可能なものであった。今回の結果は多くのシーベリーの簡便な雌雄識別を可能にする可能性を示唆しており、今後のシーベリーの育種や果実生産への利用が期待できる。

### 2. 材料と方法

#### (1) 植物材料

四カ国で育成された合計 16 のシーベリーの品種を材料として実験を行った(表 1)。シーベリーの栽培は東京農業大学の厚木キャンパスにおいて行われた。OPAH03-500 のクローニングには Pollmix、Botanitseskaja、Prevoskhodnaya、Leikora を、OPD15-600 のクローニ

\*\*教授 工学部 神奈川大学

Professor, Fac. of Engineering, Kanagawa University

\*\*准教授 工学部 神奈川大学

Associate Professor, Fac. of Engineering, Kanagawa University

\*\*\*教授 農学部 東京農業大学

Professor, Fac. of Agriculture, Tokyo Agricultural University

\*\*\*教授 大学院農学研究科 神戸大学

Professor, Grad. Sch. of Agriculture, Kobe University



ングには Pollmix と Tolme を用いた。

表1. 今回の研究に用いたシーベリーの品種

No.	性別	品種	育成国
1	オス	Tolme	ロシア
2		Tarmo	フィンランド
3		Rudolf	フィンランド
4		Pollmix	ドイツ
5	メス	Sunny berry	ロシア
6		Botanitseskaja	ロシア
7		Otradonaja	ロシア
8		Morimorinaya	ロシア
9		Chuskaya	ロシア
10		Prevoskhodnaya	ロシア
11		Tytti	フィンランド
12		Terhi	フィンランド
13		Hergo	ドイツ
14		Leikora	ドイツ
15		Frugana	ドイツ
16		Shiyou	中国

## (2) DNA 抽出、RAPD-PCR と DNA クローニング

5 月に採取した若い葉から DNeasy Plant Maxi Kit (Qiagen) を用いて各品種の DNA を抽出した。10 ヌクレオチドからなる二つのランダムプライマー OPD15 (5'-CATCCGTGCT-3') と OPAH03 (5'-GGTTACTGCC-3') を用いて RAPD-PCR を行った。反応液組成と反応温度については Persson and Nybom (1998) [12] に準じた。増幅 DNA 断片は 1.4% アガロースゲルを用いた電気泳動に供試した。DNA の検出にはエチジウムブロマイド溶液 (0.5 µg/ml) もしくは SYBR Safe DNA Gel Stain (ThermoFisher Scientific) を用いた。目的とした DNA 断片はゲルカッターにより切り出し、QIAEXII Gel Extraction Kit (Qiagen) を用いてマニュアルに従って抽出を行った。抽出した DNA 断片は電気泳動により DNA 断片長と濃度の確認を行った後、TOPO TA Cloning Kit for Sequencing (ThermoFisher Scientific) を用いてマニュアルに従ってクローニングを行った。この際の無菌操作と大腸菌の培養に、2019 年度工学研究所共同研究の助成を受けて購入したクリーンベンチと小型恒温振とう培養器を使用した (図 2)。

## (3) コロニー PCR、プラスミド抽出と塩基配列の決定

プラスミドベクターに組込まれた DNA 断片の長さをコロニー PCR によって確認した。コロニー PCR には EmeraldAmp PCR Master Mix (Takara) を用いた。サーマルサイクラーの設定は、94°C・5 分間熱解離した後、98°C・10 秒間、55°C・30 秒間、72°C・45 秒間を 30 サイクル行った後に、72°C・5 分間伸長反応とした。目的の DNA 断片が導入されていると考えられたコロニーから QIAprep Spin Miniprep Kit (Qiagen) を用いてマニュアルに従ってプラスミドを抽出し、電気泳動による確認と濃度測定を行った。プラスミドに挿入された DNA 断片の塩基配列は、各品種 8 クローンずつジデオキシ法 [16] により両鎖とも決定された。

## (4) プライマーの設計、PCR と増幅 DNA 断片の電気泳動

決定された各クローンの両鎖の塩基配列は GeneStudio Pro を用いてアセンブルを行った。品種ごとに ClustalW [19] を用いて比較し、塩基配列の確認を行った。得られた塩基配列をもとに、Primer3 [20] [21] を用いて、フォワードプライマー 5 種類とリバースプライマー 5 種類を設計した。サーマルサイクラーは様々な温度設定で PCR を実施した。PCR には二種類の DNA ポリメラーゼ、Taq DNA Polymerase with Standard Taq Buffer (New England BioLabs) と Tks Gfl DNA polymerase (Takara) を用いた。増幅 DNA 断片は 2% アガロースゲルを用いて行い、SYBR Safe DNA Gel Stain によって染色し、観察を行った。

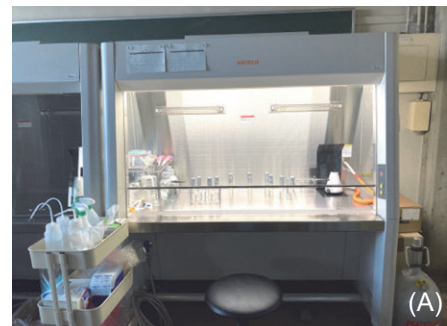


図 2. 2019 年度工学研究所共同研究の助成を受けて購入した機器 (A)クリーンベンチ (B)小型恒温振とう培養器

## 3. 結果と考察

### (1) OPAH03-500

OPAH03-500 はフィンランドで育成された品種を除くメスに特異的な RAPD マーカーとして見いだされた (図 3)。

Botanitseskaja、Prevoskhodnaya、Leikora の三つのメス品種について OPAH03-500 をクローニングした。エチジウムブロマイド溶液よりも検出感度の高い DNA 染色試薬である SYBR Safe DNA Gel Stain を用いたところ、OPAH03-500 はわずかにオス品種でも検出できるようになった。さらにオス品種 Pollmix においても OPAH03-500 をクローニングした。塩基配列を決定した。正確な DNA 断片長は 492 bp であった。メス品種とオス品種間で塩基配列の比較を行ったところ違いが存在しなかった。このことから、OPAH03 がアニーリングする部位に特異的な雌雄間の塩基配列の差異が存在するものと考えられた。そこで、OPAH03 の SCAR マーカー化は不可能と考えられたので、これ以降の実験は行わなかった。

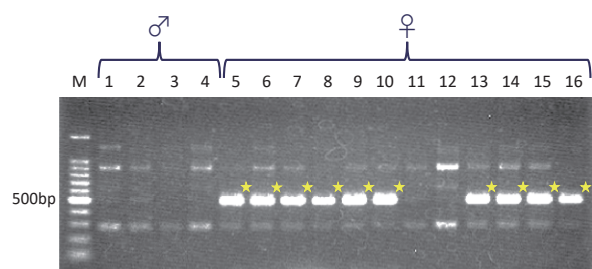


図 3. プライマー OPAH03 を用いた RAPD-PCR 産物の電気泳動パターン M: 100 bp Ladder, 1-16 は表 1 の表記の品種 ★は OPAH03-50 を示す。DNA の検出にはエチジウムブロマ이드を使用した。

## (2) OPD15-600

オス品種の Pollmix において見いだされたオス特異的 RAPD マーカーの OPD15-600 であるが<sup>[12]</sup>、今回用いた品種においては、Pollmix 以外に Tolme においても検出された。そこで、この二つの品種で検出される OPD15-600 の塩基配列を決定した。両者の塩基配列は全く同じで、正確な DNA 断片長は 603 bp であった。決定した塩基配列をもとに、フォワードプライマー 5 種類とリバースプライマー 5 種類を設計した。これらを用いた PCR を行ったところ、用いた全品種において DNA の増幅が認められる場合や、オス品種に明瞭な DNA の増幅が認められるものの、一部のメス品種にもわずかに DNA の増幅が検出される場合などがあった (図 4)。

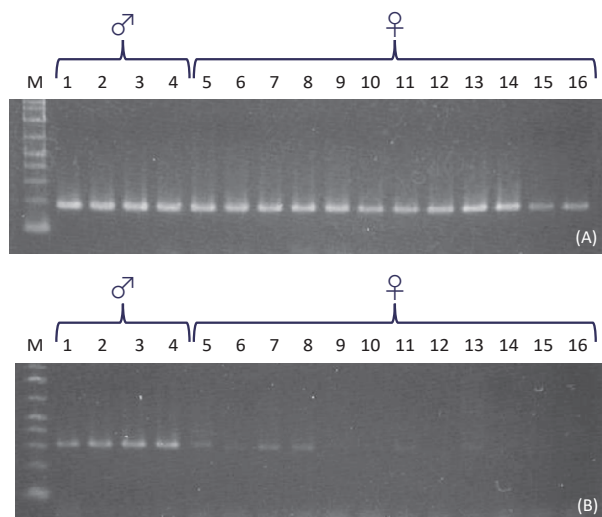


図 4. OPD15-600 の塩基配列に基づき設計したプライマーを用いて行った PCR の例 (A) 全品種で DNA の増幅が見られる例 (B) 用いたオスの全品種とメスの一部の品種で DNA の増幅が見られる例

一方、用いたオスの全品種で DNA の増幅が認められるが、用いたメス品種の全品種において DNA の増幅が検出されなかったプライマー組み合わせも複数存在した。OPD15-600 は Pollmix と Tolme にのみ検出される RAPD マーカーであったが、新しい SCAR-マーカーは Tarmo と Rudolf においても検出可能となった。今回のこれら

のプライマー組み合わせによる PCR によって、OPD15-600 の SCAR マーカー化は成功に至ったこととなる。今回開発された SCAR マーカーはシーベリーの品種改良や栽培へ貢献できる可能性がある。今後、さらに多くの品種群や交配後代の雌雄が分離している集団を用いて、今回開発された SCAR マーカーの有効性を詳細に検証していく必要がある。

Mangla et al. (2019) は西ヒマラヤに分布する *H. rhamnoides* ssp. *turkestanica* において、花の器官の観察から雌雄分化が完全ではないとの観察と雌雄識別 DNA マーカー周辺のゲノム構造が雌雄間で大きく異なるわけではないことから、シーベリーの性分化は最近起こったものと考えられることを報告している<sup>[22]</sup>。OPAH03-500 と OPD15-600 の塩基配列を決定した今回の結果はこの報告を指示するものであり、雌雄識別 DNA マーカーの開発が困難なことを意味している。シーベリーの性分化が最近起こり、今も分化が進行中であると考えられることは、同時にシーベリーが性分化機構のモデルとなる可能性が考えられ、大変興味深い研究対象であることを意味している<sup>[22]</sup>。次世代シーケンサーを用いたゲノム解読から得られたコンティグのスクリーニングに本研究で開発された SCAR マーカーを用いるなど、今回の研究結果はシーベリーの品種改良や栽培の助けとなるだけでなく、シーベリーの性分化機構の解明においても一助となる可能性がある。

## 4. 謝辞

2019 年度工学研究所共同研究の助成を賜り、工学研究所関係者各位に心より御礼申し上げます。何よりもお気持ちに深く感謝申し上げます。そして、クリーンベンチと小型恒温振とう培養器はこれからも大切に活用し、研究を発展させて参ります。

研究室でシーベリーの研究に携わり、ともに汗を流した学生、横田勇人さん (総合工学プログラム一期生)、長谷川聖さん (総合工学プログラム二期生)、上野伸治さん (総合工学プログラム三期生)、櫻井快樹さん (総合工学プログラム三期生)、藤田凌雅さん (総合工学プログラム四期生)、中村恭平さん (総合工学プログラム五期生) に心から感謝申し上げます。

## 5. 引用文献

- [1] A. Rousi, The genus *Hippophae* L. A taxonomic study, Ann. Bot. Fenn., 8, 177-227 (1971)
- [2] U. Swenson, and I.V. Bartish, Taxonomic synopsis of *Hippophae* (Elaeagnaceae), Nordic J. Bot., 22, 369-374 (2002)
- [3] Y. Lian, X. Chen, K. Sun and R. Ma. A new subspecies of *Hippophae* (Elaeagnaceae) from China, Novon, 13, 200-202 (2003)
- [4] W.R. Schroeder, Shelterbelt planting in the Canadian prairies, p. 35-43, (1990) In: Protective plantation technology. Publishing House of Northeast Forestry Univ., Harbin, China.
- [5] T.S.C. Li and W.R. Schroeder, Sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.): a multipurpose plant, HortTechnology, 6, 370-380 (1996)

- [6] R. Chengjiang and L. Daiqiong, Function and Benefit of *Hippophae rhamnoides* L. improving eco-environment of Loess Plateau of China. 12<sup>th</sup> Institute of Soil and Water Conservation Conference, Shannxi, China, (2002)
- [7] C.J. Ruan, K. Rumpunen and H. Nybom, Advances in improvement of quality and resistance in a multipurpose crop: sea buckthorn, Crit. Rev. Biotechnol., 33, 126–144 (2013)
- [8] P.C. Sharma and M. Kalkal Nutraceutical and medicinal importance of sea buckthorn (*Hippophae* sp.). In: Therapeutic, probiotic, and unconventional foods. Academic, London, 227–253, (2018)
- [9] T.S.C. Li, Sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.): production and utilisation. National Research Council of Canada, Ottawa, (2003)
- [10] N.S. Shchapov, On the karyology of *Hippophae rhamnoides* L., Citologija i Genetika 13, 45–47, (1979) (in Russian, with English abstract)
- [11] E. Truta, G. Capraru, S. Surdu, M.M. Zamfirache, Z. Olteanu, C.M. Rosu. and L. Oprica, Karyotypic studies in ecotypes of *Hippophae rhamnoides* L. from Romania, Silvae Genet., 59, 175-182, (2010)
- [12] H.A. Persson and H. Nybom, Genetic sex determination and RAPD marker segregation in the dioecious species sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.), Hereditas, 129, 45–51, (1998)
- [13] A. Sharma, G. Zinta, S. Rana and P. Shirko, Molecular identification of sex in *Hippophae rhamnoides* L. using isozyme and RAPD markers, For. Stud. China, 12, 62–66, (2010)
- [14] G. Korekar, R.K. Sharma, R. Kumar, Meenu, N.C. Bisht, R.B. Srivastava, P.S. Ahuja and T. Stobdan, Identification and validation of sex-linked SCAR markers in dioecious *Hippophae rhamnoides* L. (Elaeagnaceae), Biotechnol. Lett., 34, 973–978, (2012)
- [15] K. Das, S.H. Ganie, Y. Mangla, T.U. Dar, M. Chaudhary, R.K. Thakur, R. Tandon, S.N. Raina, S. Goel, ISSR markers for gender identification and genetic diagnosis of *Hippophae rhamnoides* ssp. *turkestanica* growing at high altitudes in Ladakh region (Jammu and Kashmir), Protoplasma, 254, 1063-1077, (2017)
- [16] W. Zhou, Y. Wang, G. Zhang, G. Luan, S. Chen, J. Meng, H. Wang, N. Hu and Y. Suo, Molecular sex identification in dioecious *Hippophae rhamnoides* L. via RAPD and SCAR markers, Molecules, 23, 1048-1056, (2018)
- [17] S. Rana, P. Shirkot and M.C. Yadav, A female sex associated randomly amplified polymorphic DNA marker in dioecious *Hippophae salicifolia*, Genes, Genomes and Genomics, 3, 96-101, (2009)
- [18] 櫻井快樹 シーベリーの雌雄判別マーカーの探索ならびに遺伝的多様性の解析 平成 29 年度神奈川大学工学部卒業論文 (2017)
- [19] M.A. Larkin, G. Blackshields, N.P. Brown, R. Chenna, P.A. McGettigan, H. McWilliam, F. Valentin, I.M. Wallace, A. Wilm, R. Lopez, J.D. Thompson, T.J. Gibson and D.G. Higgins, Clustal W and Clustal X version 2.0., Bioinformatics, 23, 2947-2948, (2007)
- [20] T. Koressaar and M. Remm, Enhancements and modifications of primer design program Primer3, Bioinformatics, 23, 1289-1291, (2007)
- [21] A. Untergasser, I. Cutcutache, T. Koressaar, J. Ye, B.C. Faircloth, M. Remm and S.G. Rozen, Primer3 - new capabilities and interfaces, Nucleic Acids Res., 40, e115, (2012)
- [22] Y. Mangla, K. Das, S. Bali, A. Heena, S.N. Raina, R. Tandon and S. Goel Occurrence of subdioecy and scarcity of genderspecific markers reveal an ongoing transition to dioecy in Himalayan seabuckthorn (*Hippophae rhamnoides* ssp. *turkestanica*), Hereditas, 122, 120–132, (2019)





## 6. 工学研究所プロジェクト研究

- 6-1 まちづくり研究所 2019 年度までの活動より 山家 京子、上野 正也、中井 邦夫、石田 敏明、内田 青蔵、  
曾我部 昌史、須崎 文代、吉岡 寛之、田野 耕平、重村 力、丸山 美紀、長谷川 明、鈴木 成也
- 6-2 高周波回路の解析・設計理論の整備と対応ソフト開発 ―短絡境界平行平板平面回路のインピーダンス型等価回路導出と妥当性―  
平岡 隆晴、許 瑞邦
- 6-3 Investigation of Relationship Between the Response and Fourier Spectral Ratios Based on Statistical  
Analyses of Strong Motion Records Haizhong ZHANG、Yan-Gang ZHAO
- 6-4 “新たな低炭素エネルギー社会に対応した新型電池の開発 (5)” 松本 太、池原 飛之、郡司 貴雄、  
大坂 武男、入井 友海太、安東 信雄
- 6-5 振動エネルギー伝達特性に基づく低周波振動の低減 山崎 徹、片岡 大雄
- 6-6 振動を用いた DNA 増幅法 山口 栄雄、米田 征司、鈴木 温
- 6-7 パルスレーザー光を利用した反応開発および機構解析 岩倉 いずみ、岡本 専太郎、織作 恵子、赤井 昭二、  
岡田 繁、小林 孝嘉、岡村 幸太郎、橋本 征奈、簗下 篤史
- 6-8 企業ロボット研究へのモデリング & シミュレーションの活用 石井 信明、松井 正之
- 6-9 ポリペプチドのフォールディングと集積化により形成される高次構造と機能 亀山 敦、森井 尚之、岩岡 道夫、高橋 明
- 6-10 戸建住宅における全館空調の一次エネルギー消費量に関する研究 (3) 岩本 静男、傳法谷 郁乃、児保 茂樹
- 6-11 不確定状況下でのプロジェクトマネジメントの定量的評価の概念 石井 信明、横山 真一郎、劉 功義
- 6-12 機械学習を用いた倒産予知モデルの研究 片桐 英樹、平井 裕久、松丸 正延
- 6-13 次世代無線通信を支えるマイクロ波・ミリ波・テラヘルツ・光パッシブデバイスの理論設計と応用 (第 1 報)  
陳 春平、武田 重喜、穴田 哲夫
- 6-14 医療従事者用感染対策防護服に関する研究 (1) 傳法谷 郁乃、内田 幸子、岩本 静男
- 6-15 超小型ロケット向け低コスト複合構造の開発 正井 卓馬、高野 敦、喜多村 竜太



## まちづくり研究所 2019 年度までの活動より

山家京子\* 上野正也\*\* 中井邦夫\* 石田敏明\* 内田青蔵\* 曾我部昌史\*

須崎文代\*\* 吉岡寛之\*\* 田野耕平\*\* 重村力\*\*\* 丸山美紀\*\*\*\* 長谷川 明\*\*\*\* 鈴木 成也\*\*\*\*

### Reports from the Activities of Town Planning Institute until 2019

Kyoko YAMAGA\* Masaya Ueno\*\* Kunio NAKAI\* Toshiaki ISHIDA\* Seizo UCHIDA\* Masashi SOGABE\*

Fumiyo SUZAKI\*\* Hiroyuki YOSHIOKA\*\* Kouhei TANO\*\* Tsutomu SHIGEMURA\*\*\* Miki Maruyama\*\*\*\* Akira Hasegawa\*\*\*\* Naruya SUZUKI\*\*\*\*

#### 1. 弘明寺商店街の遊休不動産活用／山家京子・上野正也

横浜市南区弘明寺商店街は、横浜最古の寺院「弘明寺」の門前に位置する商店街である。中央に大岡川が貫流し、桜の名所としても有名である。当該地域においてオンデザイン(設計事務所)、泰有社(不動産会社)と協働し、遊休不動産の活用に向けた実験的取り組みを行った。



図1 弘明寺商店街の位置と周辺の町割り

##### 1-1. まちびらきイベント「One Day Open!!」

当該地域における基礎調査を実施した後、商店街組織との意見交換を経て、2017年10月7日に1日限定のイベントを実施した。当該イベントは遊休不動産の活用可能性を探ることを目的としている。その構成として、まず、元商業ビルの2,3階(以下、A施設)をアートや模型作り等のワークショップを行うスペースとして開いた。また、別の不動産1階(以下、B施設1F)は、弘明寺に対する思いを来街者へのインタビューにより集めた「私が思う弘明寺」の制作・展示を行った。そして、これら2つの会場をつなぐように、地域商店の魅力を発信するボードを制作し配置した。

これらを通じて、A施設は、アート制作やものづくりなどによる活用の有効性を確認した。また、B施設1Fは、商店街中央部の路面

という特性から、活動に対する注目度や視認性の高さが確認できた。さらには、当該地域に住まう方々は、単なる消費の場としての商店街利用に留まらず、多様な関わり合いを有しながら生活している実態を把握することができた。



図2(左) アートWS 図3(中)「私が思う弘明寺」例  
図4(右) 地域商店の特徴を記したインフォメーションボード

#### 1-2. 国際交流ワークショップを通じた建築操作・空間介入

次に、2018年5月23日から31日にかけてタイ・モンクット王工科大学トンプリー校(本学卒業の西堀隆氏が講師を務める)との国際交流ワークショップを実施した。前回のイベントを踏まえ、A施設はものづくりスペースとして活用し、B施設1Fは建築操作の対象、2Fはタイ学生の滞在場所として活用した。

学生は、タイ・日本混合で複数のチームに分かれ、フィールドワークを実施し、各国学生が持つ視点の違いなどを発見しながら協働体制を構築し制作を行った。

最終的に次の4つの作品が完成した。1)街の風景を切り取る望遠鏡「まちの断片集積所」、2)商店街における生活の痕跡を集めた「個の生活の痕跡」、3)建物と建物のすき間に空を反射させた「ボーッとすき間」、4)建物のファサードに凹凸ミラーを付け、反射によって新しい風景を作り出す「でこ、ぼこ、パキッ」(B施設1F)。なお、上記1)~3)は最終日のみの展示であったが、4)に関してはその後5ヶ月間にわたって展示を継続した。

これらを通じて、学生同士の交流はもとより、制作過程において地域住民等とのコミュニケーションが生まれ、活動が許容・認知されるなど、当該地域の寛容性を認識することができた。また、商店街という実空間において新しい建築表現を試みることができた。

##### 1-3. 以後の展開

以上の活動を経て、B施設2Fはシェアハウス(水谷基地)として

\* 教授 建築学科  
Professor, Dept. of Architecture  
\*\* 特別助教 建築学科  
Assistant Professor, Dept. of Architecture  
\*\*\* 客員教授 工学研究所  
Guest Professor, Research Institute for Engineering  
\*\*\*\* 特別研究員 工学研究所  
Research Fellow, Research Institute for Engineering

稼働しており、また、その1Fは小商いをを行うスペースとなるなど、不動産活用が進んでいる。今後は、これら活用に合わせて大学との連携が模索されている。



図5 制作風景(A施設)



図6 でこ、ぽこ、パキッ(B施設1F)

## 2. 防火建築帯を活かした魚津中央通り名店街活性化プロジェクト／中井邦夫

建築学科中井研究室では、戦後復興期に全国の都市に建設された防火建築帯についての調査研究ならびに、それらの建物を活かした町づくりの提案を推進している。そのなかで、2014年から富山県魚津市に残る中央通り名店街の防火建築帯(図7)に関する調査研究<sup>1)</sup>を始め、現在、同防火建築帯の一面を実際に改修する計画を、地域の関係者ならびに魚津市地域おこし協力隊と共同で進めている。



図7 魚津中央通り名店街の防火建築帯 外観(部分)

富山県東部新川地方の主要都市である魚津市は、14世紀前半頃には魚津城が築かれ、北国街道の宿場町としても栄え、現在人口4万人あまりの小都市である。中央通り名店街は、旧市街地である魚津城跡地周辺地区と、1960年代以降開発された魚津駅周辺地区をつなぐ通りに位置し、かつては市内の中心的繁華街を形成していた。同名店街の防火建築帯は、1956(昭和31)年9月10日に起きた魚津大火からの復興事業の一環として建設され、1959(昭和34)年4月20日に完成した。

そもそも「防火建築帯」とは、この魚津大火に先立つ1952年に、日本の都市不燃化を目指して制定された耐火建築促進法に基づく沿道型の耐火建築群を指し、全国80都市以上に建設された。これらのなかでも魚津中央通り名店街の防火建築帯は、1)約750mの道の両側計1.5kmにおよぶ長大な規模、2)全国各地の防火建築帯設計に携わった建築家、今泉善一による完成度の高いデザイン、3)建築当時の姿がよく残されている歴史的建築物としての価値、などの特

徴を有し、築後60年以上を経て全国の防火建築帯の多くが取り壊されていくなかで、建築史的、都市開発史的な重要性のみならず、戦後日本の地方都市の復興と発展のプロセスを後世に伝える意味でも貴重な建物である。

しかし他の地方都市同様、魚津市でも旧中心市街地の衰退が進み、中央通り名店街も閉まった店舗や空室が目立つ状況となっている。2016年に魚津市の助成を受けて本学大学院生らが立案した名店街全体の活性化計画(図8)<sup>2)</sup>制作時における所有者の方々へのヒアリングからは、空室を活用の方法がわからない、あるいは資金がない、または活用自体にあまり関心がないなどといった理由で活用が進んでいないことがわかった。



図8(左) 大学院生らによる活性化計画の地域住民への発表会(2016.9)

図9(右) フローティングフレームスタジオ(丹羽貴行修士論文、2020.2)

そこで本研究室では、こうした地域の雰囲気自体を変えるために、長屋式建物の空き区画のひとつ(RC造3階建て、延床面積約130㎡)を確保し、1)改修計画の立案、2)セルフ・デザインビルドでの改修、3)運営プログラムの立案を通して、商店街の活性化に寄与するプロジェクトを推進している。具体的には、2019年夏に当該区画を確保し、当時大学院生だった丹羽貴行君のプロジェクトとして、同区画の再生計画の立案と1階部分のセルフビルドでの改修を実施し、彼の修士論文(図9)<sup>3)</sup>としてまとめた。これに引き続き、2020年春以降、区画全体の改修計画を、魚津市地域おこし協力隊員として市職員となった丹羽君との共同にて立案し、秋から施工を実施している。1階は地域に開かれた多目的スペース、2、3階は住居として、当面は同隊員が2階に住みながら改修を進めつつ、同商店街の関係者の方々ならびに当研究室と共同しつつ1階スペースの運営と商店街の活性化計画推進を行う予定である。将来的には2、3階をゲストハウスとして運営することも想定している。

以上のような具体的な実践を通して、貴重な歴史的、空間的資産である防火建築帯を活かした同名店街の活性化によるまちづくりを目指している。

注)

- 1)原誠、中井邦夫、岡田啓佑「魚津市中央通りの防火帯建築を含む街区の構成(1)、(2)」、2015年日本建築学会大会(関東)学術講演梗概集(建築歴史・意匠)、pp.447-450、2015.9
- 2)中井研究室、「BA/横浜防火帯建築研究 No.10+11、魚津特別号、魚津中央通り名店街防火建築帯」、2017.8
- 3)丹羽貴行「フローティングフレームスタジオー自主設計施工による既存の躯体や部材をいかした多目的スペースの提案」、2019年度神奈川大学大学院工学研究科建築学専攻修士論文、優秀賞、2020.2



# 高周波回路の解析・設計理論の整備と対応ソフト開発 —短絡境界平行平板平面回路のインピーダンス型等価回路導出と妥当性—

平岡 隆晴\* 許 瑞邦\*\*

## Derivation of Impedance-type Equivalent Network and its Validity for Boundary Short Circuited Parallel Plate Planar Circuit

Takaharu HIRAOKA\* Jui-Pang HSU\*\*

### 1. 研究の目的

短絡境界平面回路とは電磁波を平行平板導体で上下に閉じ込め、回路側面を短絡とした任意形状の平面回路である。入出力線路から  $TE_{10}$  波で励振すると、この種の回路は基本モードで動作する導波管回路の一般化と考えられる。ここでは任意形状回路の適用例として図1の方形平面回路について、電圧分布を2次元スカラ固有関数で展開して回路の開口モードインピーダンスを導出する。さらに入出力特性及び動作時の電圧分布が同時に計算できるフォスタ型等価回路に基づく結果と伝送線路理論を比較して、その妥当性を検討する。

### 2. 平面回路方程式

平面回路の電磁界は高さ方向に一樣な  $TM_0$  動作であり、平面回路内の電界は面に垂直( $E_z$ )、磁界は平面と平行になっている( $H_t$ )。平面回路内の電圧(スカラ)、電流密度(ベクトル)を式(1)で定義する。

$$\begin{cases} V(x, y) = -E_z(x, y)d \quad [\text{V}] \\ \mathbf{J}(x, y) = \mathbf{H}_t(x, y) \times \mathbf{k} \quad [\text{A/m}] \end{cases} \quad (1)$$

平面回路の電圧  $V(x, y)$  と電流密度  $\mathbf{J}(x, y)$  は Maxwell の電磁界方程式より、式(2)の平面回路方程式で与えられる。

$$\begin{cases} \text{grad} V(x, y) = -j\omega\mu_0 d \mathbf{J}(x, y) & (2a) \\ \text{div} \mathbf{J}(x, y) = -\frac{j\omega\epsilon_0}{d} V(x, y) & (2b) \end{cases} \quad (2)$$

さらに式(2)の電流密度を消去すると、電圧分布に関する式を得る。

### 3. 方形平面回路の2次元スカラ固有関数展開

図1の方形平面回路の境界条件は、金属である導波管壁( $C_S$ )は短絡、入出力導波管が接続されている接続部( $C_W$ )は開放境界である。その境界条件を満たす2次元スカラ関数  $\varphi_p(x, y)$  は式(3)で定義する。

$$\begin{aligned} \nabla_t^2 \varphi_p(x, y) + k_p^2 \varphi_p(x, y) &= 0 & (3) \\ \text{境界条件} \begin{cases} \text{導波管壁: } \varphi_p(x, y) = 0 & (\text{短絡 on } C_S) \\ \text{導波路接続部: } \text{grad} \varphi_p(x, y) \cdot \mathbf{n} = 0 & (\text{開放 on } C_W) \end{cases} \\ \text{正規直交系: } \frac{1}{S} \iint_S \varphi_p(x, y) \cdot \varphi_q(x, y) dS &= \delta_{pq} & (4) \end{aligned}$$

平面回路周囲より電流励振されたとき、平面回路内の電圧分布は式(3)のスカラ固有関数で展開して式(5)で与えられる。

$$V(x, y) = \sum_p v_p \cdot \varphi_p(x, y) \quad (5)$$

この場合、電圧展開係数  $v_p$  は式(4)で示すスカラ固有関数の正規直交性より式(6)で与えられる。

$$v_p = \frac{1}{S} \iint_S V(x, y) \cdot \varphi_p(x, y) dS \quad (6)$$

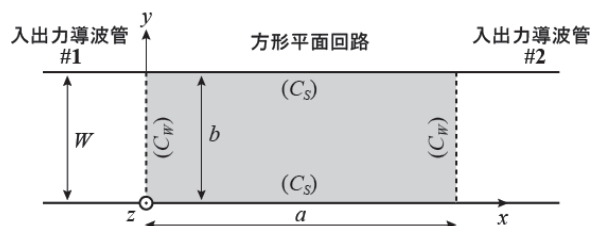


図1 任意形状平面回路の適用例：二辺短絡方形平面回路

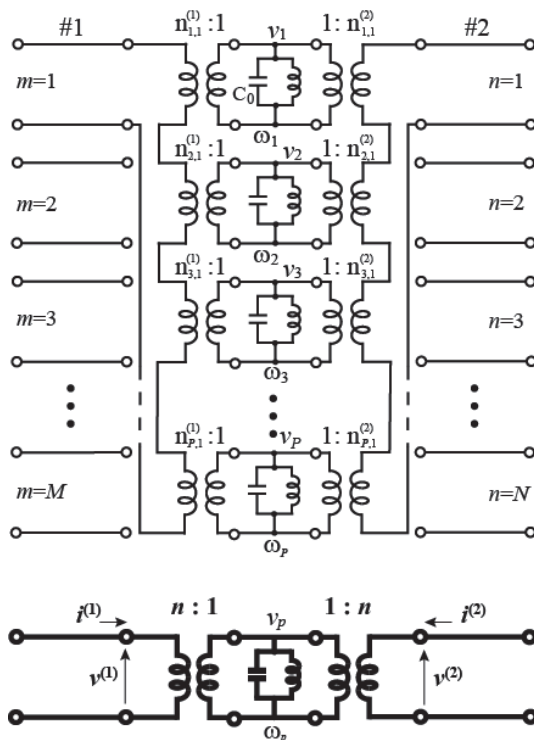


図2 方形平面回路に対するフォスタ型等価回路・ベクトル表示

\*准教授 電気電子情報工学科 Associate Professor,  
Dept. of Electrical, Electronics and Information Engineering  
\*\*客員研究員 工学研究所  
Invited Researcher, Research Institute for Engineering

さらに電圧展開係数を計算すると次式で与えられる。

$$v_p = -\frac{j\omega\mu_0 d}{(k^2 - k_p^2)} \frac{1}{S} \int_{C_w} \varphi_p(x, y) J_m ds = -\frac{j\omega}{\omega^2 - \omega_p^2} \frac{1}{C_0} \int_{C_w} J_m \varphi_p(x, y) ds \quad (7)$$

$$\text{但し } C_0 = \varepsilon S/d \text{ [F]} \quad \omega_p^2 = k_p^2 / \varepsilon \mu_0 \quad (8)$$

入出力導波路から電流励振したときの平面回路内の電圧分布は、式(7)を式(5)に代入して次式となる。

$$V(x, y) = \sum_p -\frac{j\omega}{\omega^2 - \omega_p^2} \frac{1}{C_0} \left[ \int_{C_w} J_m(s) \varphi_p(x, y) ds \right] \varphi_p(x, y) \quad (9)$$

#### 4. 開口モードインピーダンスおよび等価回路の導出

平面回路での電圧分布は式(9)に基づいて式(10)と計算できる。式(11)は、平面回路の  $p$  次の固有モードと  $i$  番目の方形導波管で  $m$  番目のモードとの結合を示す理想変圧器の変圧比を示す。

$$V(x, y) = \sum_p -\frac{j\omega}{\omega^2 - \omega_p^2} \frac{1}{C_0} n_{pm}^i \varphi_p(x, y) I_m^i \quad (10)$$

$$\text{但し } n_{pm}^i = \frac{1}{W^i} \int \sqrt{2} \sin \frac{m\pi}{W^i} s_i \cdot \varphi_p(x, y) ds \quad (11)$$

ところで、 $j$  番目の方形導波管での  $n$  番目のモード電圧は式(10)の結果を用いて式(12)と計算される。

$$V_n^j = \frac{1}{W_j} \int V(x, y) \sqrt{2} \sin \frac{n\pi}{W_j} s_j ds_j = \sum_p -\frac{j\omega}{\omega^2 - \omega_p^2} \frac{1}{C_0} n_{pm}^i n_{pn}^j I_m^i \quad (12)$$

従って、平面回路でのモード開口インピーダンスは式(12)より次式で与えられる。

$$Z_{nm}^j \equiv \left( \frac{V_n^j}{I_m^i} \right)_{I_m^i \text{以外零}} = \sum_p -\frac{j\omega}{\omega^2 - \omega_p^2} \frac{1}{C_0} n_{pm}^i n_{pn}^j \quad (13)$$

多開口多モード電流励振の場合、平面回路内の電圧分布は式(14)と導出される。従って、 $j$  番目の方形導波管における  $n$  番目のモード電圧は式(15)で求まる。

$$V(x, y) = \sum_{i,m} \sum_p -\frac{j\omega}{\omega^2 - \omega_p^2} \frac{1}{C_0} n_{pm}^i I_m^i \varphi_p(x, y) \quad (14)$$

$$\begin{aligned} V_n^j &= \frac{1}{W_j} \int_0^{W_j} V(x, y) \sqrt{2} \sin \frac{n\pi}{W_j} s_j ds_j \\ &= \sum_{i,m} \sum_p -\frac{j\omega}{\omega^2 - \omega_p^2} \frac{1}{C_0} n_{pm}^i I_m^i \frac{1}{W_j} \int_0^{W_j} \varphi_p(x, y) \sqrt{2} \sin \frac{n\pi}{W_j} s_j ds_j \\ &= \sum_{i,m} \left[ \sum_p -\frac{j\omega}{\omega^2 - \omega_p^2} \frac{1}{C_0} n_{pm}^i n_{pn}^j \right] I_m^i \quad (15) \end{aligned}$$

#### 5. 周波数特性の考慮モード数に対する収束性

図1に示す両側短絡平面回路の正規化開口モードインピーダンスから、透過電力係数/反射電力係数及び位相遅れ特性をフォスタ型等価回路で考慮モード次数  $P$  (1次より50次まで)をパラメータとして計算した。電力透過係数、電力反射係数の周波数特性の計算結果を図3, 4に示す。確かに考慮モード数を上げると電力透過係数は1に、電力反射係数は0に近づくことがわかる。さらに透過波の位相遅れについてフォスタ型等価回路に基づく計算値を図5に示す。考慮モード次数を上げると真値に近づくことより、50次まで考慮すればかなり真値にかなり近づくこともわかる。

本来、この回路の電力反射係数の値は無反射により零になるので、非零の電力射係数の値は考慮モード数に基づく打ち切り誤差

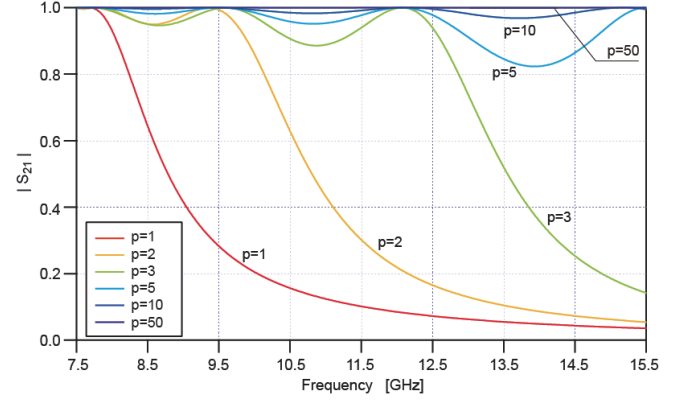


図3 電力透過係数の収束性 ( $|S_{21}|=1.0$  に収束→すべて透過)

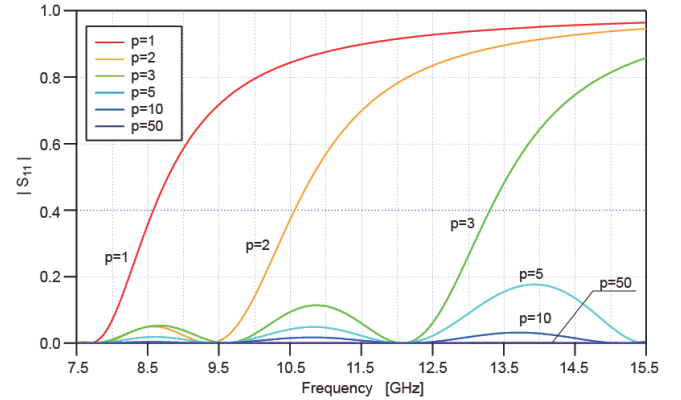


図4 電力反射係数の収束性 ( $|S_{11}|=0.0$  に収束→反射なし)

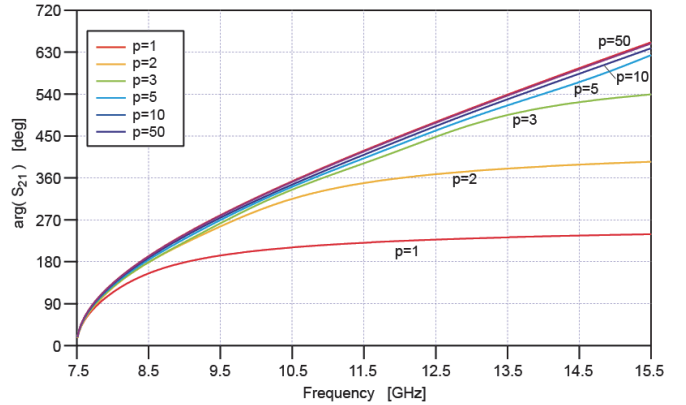


図5 透過波の位相遅れ (位相特性)

と考えられる。このように考えると考慮モード数に基づく打ち切り誤差は、考慮モード次数が上がる小さくなることがわかる。

#### 6. むすび

短絡境界平行平板平面回路のインピーダンス表現フォスタ型等価回路を2次元スカラ固有関数・固有値を用いて導出した。二辺短絡方形平面回路のフォスタ型等価回路を具体的に導出し、多数の平面回路のモード数を考慮すると伝送線路理論の結果に一致することから本理論の妥当性を検証できた。

(参考文献)

許瑞邦, 平岡隆晴, 短絡境界平行平板平面回路のインピーダンス型等価回路導出と妥当性 — 2次元スカラ固有関数を用いて —, 信学技報, Vol. 119, No. 242, MW2019-78, pp.71-76, (2019.10)

# Investigation of Relationship Between the Response and Fourier Spectral Ratios Based on Statistical Analyses of Strong Motion Records

Haizhong ZHANG \*      Yan-Gang ZHAO\*\*

## 1. Introduction

In both seismic design and probabilistic seismic-hazard analysis, the response spectral ordinate at a particular level of damping is always used to measure the ground-motion intensity [1]. In the construction of ground-surface response spectral ordinates, site effects are typically characterized as the ratio of the response spectral ordinate on the ground surface to bedrock based on the scaling law borrowed from the Fourier spectral ordinate [2]. This means that the response spectral ratio (RSR) is assumed to purely represent the effect of site conditions and be independent the earthquake scenario for linear analysis. This assumption is widely adopted in ground motion prediction models as well as seismic codes [3-6]. In the Japanese seismic code [7], the RSR model is constructed even by considering the RSR to be identical to the Fourier spectral ratio (FSR) [8-12]. However, Zhao et al. [13, 14] found that in contrast to the FSR, RSR is dependent on the earthquake scenario even for linear analysis based on site-response analysis of several single layer elastic soil sites that were subjected to a suite of seismic motions at rock sites. Bora et al. [15] have further pointed out that the RSR may significantly differ from FSR particularly at short periods based on random vibration theory. Subsequently, Stafford et al. [16] presented a theoretical explanation for why the two spectral ratios are different and why the RSR depends on the magnitude and distance of the earthquake scenario for linear analysis based on random vibration theory. Nearly all the aforementioned researches are based on theoretical analysis using random vibration theory or one-dimensional wave propagation theory.

This study aims to statistically compare RSR and FSR using the actual ground motions recorded at natural nearby soil and rock sites. The rest of the paper is organized as follows. First, the nearby soil and rock sites as well as ground-motion records utilized in this study are detailed in Sections 2 and 3, respectively. Then, by analyzing seismic motions recorded on nearby soil and rock sites in Japan, the relationship between the two spectral ratios and the dependence of the RSR – FSR relationship on earthquake scenario and oscillator damping are investigated, in Section 4. Finally, the conclusions are presented in Section 5.

## 2. Nearby Soil and Rock Sites

To systematically compare RSR and FSR, as many nearby soil and rock sites as possible are selected from the K-NET, KIK-net of Japan [17]. The

soil and rock sites are selected that have surface-layer shear wave velocities below and greater than 400 m/s, respectively, to meet the definition in the Japanese Seismic Code [7]. In addition, to reduce the path effect on the spectral ratios, the soil sites are selected to be as close as possible to the rock site. Moreover, nearby soil and rock sites are selected that have sufficient strong-motion records for statistical analysis. A total of 10 pairs of nearby soil and rock sites satisfy the above conditions. Among the selected 10 pairs of soil and rock sites, the farthest distance from the rock to soil sites is 4.16 km, and the shortest distance is 0.01 km. The surface-layer shear wave velocities of the selected soil and rock sites vary from 70 to 260 m/s and from 440 to 1800 m/s, respectively. The selected 10 pairs of nearby soil and rock sites are numbered from 1 to 10; information for each pair of soil and rock sites, including the station code; coordinates; distance from the rock to soil sites; surface-layer shear wave velocity,  $S$ ; and average shear wave velocity in the upper 30 m,  $V_{S30}$ , are listed in Table 1. For each pair of soil and rock sites, the upper line represents a rock site, and the lower line represents a soil site.

## 3. Ground-Motion Database

To systematically compare RSR and FSR, it is also necessary to select a large number of strong motions recorded on the 10 pairs of nearby soil and rock sites. To reduce the source effects on the spectral ratios, the ground motions from the same earthquakes that are simultaneously recorded at both the rock and nearby soil sites are selected. In addition, to control the signal-to-noise ratio and reduce the effect of noise, ground motions are selected that have peak accelerations above 5 gal. Moreover, to reduce the path effect on the spectral ratios, ground motions are selected that have epicentral distances that are more than 10 times the distance between the rock and nearby soil sites and less than 300 km. Finally, 510 ground-motion records from 232 earthquakes are selected from the K-NET, KIK-net [17]. Each ground-motion record has two components: NS and EW. Thus, there are a total of 1,020 earthquake time histories used in this study. Figure 1 shows the distributions of magnitudes,  $M_j$ , and epicentral distances of the used earthquakes. Here the magnitude,  $M_j$ , represents the Japan Meteorological Agency magnitude. The earthquakes have a wide range of magnitudes and epicentral distances. Because ground motions with a small magnitude can barely be recorded at a large epicentral distance, few such records are obtained. Generally, the selected ground-motion records are with reasonably balanced distribution with respect to magnitude and epicentral distance.

\* Assistant Professor, Dept. of Architecture

\*\* Professor, Dept. of Architecture

**Table 1 Information for the selected 10 pairs of nearby soil and rock sites.**

Station ID		Coordinates		--	Site Conditions	
Name	Code	Long.	Lat.	Distance (km)	$S$ (m/s)	$V_{S30}$ (m/s)
1	AOMH03	140.9896	41.234	4.10	530	653.7
	AOM006	140.9972	41.1976		100	264.8
2	CHBH20	140.0997	35.0882	3.04	1800	1909.1
	CHB020	140.1022	35.1155		150	134.4
3	ISKH04	136.7176	37.1902	4.16	440	443.5
	ISK006	136.6897	37.1602		260	344.0
4	YMGH01	131.5618	34.0494	3.22	1000	1387.7
	YMG013	131.5348	34.031		70	185.4
5	NGSH06	129.8625	32.6999	4.15	900	1421.1
	NGS010	129.8763	32.7353		150	371.6
6	GIFH20	137.2531	35.7991	0.84	460	809.9
	GIF010	137.245	35.8029		150	440.9
7	GIFH14	137.5174	36.2493	0.01	440	627.4
	GIF004	137.5174	36.2492		230	452.7
8	ISKH07	136.6357	36.515	3.07	440	440.0
	ISK010	136.6431	36.5419		110	388.2
9	SRCH10	142.0085	42.993	0.03	480	1026.8
	HKD123	142.0085	42.9933		110	627.1
10	MIE014	136.1687	34.0638	0.02	880	1009.4
	MIEH05	136.1689	34.0637		170	590.1

In addition, all the selected ground-motion records are consistently processed. A baseline adjustment is applied to all records to remove long-period noise, and a low-pass filter with a corner frequency equaling 10 Hz is used to eliminate low-period noise. Because the corner frequency is 10 Hz for all the records, spectral ratios at periods larger than 0.1 s should not be severely affected by the low-pass filter.

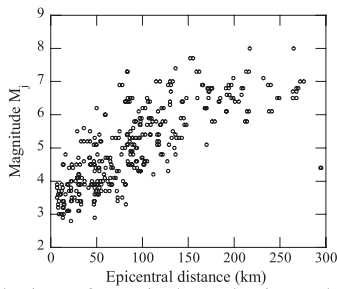


Fig. 1. Distributions of magnitudes and epicentral distances of the selected earthquakes.

#### 4. Results of the Statistical Study

##### 4.1. Comparison between the average RSR and FSR

To compare the RSR and FSR, the response spectra and Fourier spectra of all selected ground-motion records are computed. For the response spectra calculation, a 5% oscillator damping ratio is adopted. The Fourier amplitudes are smoothed using the Parzen window function with a bandwidth of 0.3. Then, the geometric means of the two components in EW and NS directions for each seismic record are calculated. Finally, the RSR and FSR are obtained as the quotient of the spectra for the soil sites

compared with those for the rock sites. The representative comparison of the average RSR and FSR for the 10 pairs of nearby soil and rock sites is shown in Fig. 2. Because the corner frequency of the low-pass filter is set to 10 Hz, and the upper bound period considered in seismic engineering is generally not above 10 s; this study focuses on the period band from 0.1 to 10 s.

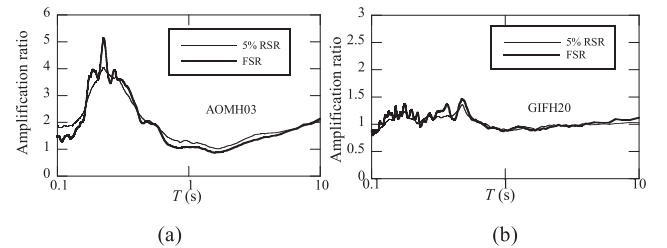


Fig. 2. Comparisons of the average RSR and FSR for the 10 pairs of soil and rock sites.

It is observed that the average RSR and FSR have similar overall shapes, and the maximum values of the two spectral ratios occur at approximately the same period, when the spectral ratios have obvious peaks. The spectral ratios for 5 pairs of sites represented by the left column of Fig. 2 have obvious peaks, whereas those for the right column show no obvious peaks. For the cases with no obvious peaks, the two spectral ratios have nearly the same values; however, for those with obvious peaks, the two spectral ratios can be obviously different.

To explore the reason why no obvious peaks are observed, shear wave velocity profiles of the 5 pairs of soil and rock sites are analyzed. As



presented in Fig. 2, although the surface-layer shear wave velocities of the 5 soil sites are below 400 m/s, the soft layers are very thin. The thicknesses of the soft layers that have a shear wave velocity below 400 m/s are only 4 m for GIF010, 12 m for GIF004, 3 m for ISK010, 2 m for HKD123, and 4 m for HIEH05. This leads that the site's fundamental period may be smaller than 0.1 s and could not be observed in the period 0.1–10 s.

#### 4.2. Effect of input rock motion

To investigate the dependence of the RSR – FSR relationship on the earthquake scenario, the selected ground motions in the previous section are classified into three groups according to magnitude and epicentral distance. Figure 3 shows the number of earthquake records in each group. Groups 1, 2, and 3 represent seismic motions with a small magnitude and short distance, seismic motions with a large magnitude and short distance, and seismic motions with a large magnitude and long distance, respectively. Therefore, by comparing the results from groups 1, 2, and 3, the effect of magnitude and epicentral distance can be investigated.

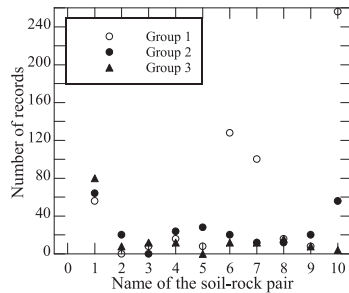


Fig. 3. Number of records in each group

The RSRs and FSRs belonging to the same group for each pair of soil and rock sites are averaged, respectively. Then, the average values of 5% damped RSR and FSR for each group are compared. Figure 4 shows the representative comparisons for the 5 pairs of soil and rock sites, in which the RSRs and FSRs have obvious peaks. The results of some groups for some sites are lacking. This is because among the selected seismic motion data described in the previous section, there are no data belonging to these groups for these sites, although seismic records are selected as much as possible. By comparing the results of groups 1, 2, and 3 in Fig. 4, it is found that at periods longer than the site's fundamental period  $T_f$ , the difference between the RSR and FSR decreases as the magnitude and epicentral distance increase. A representative ratio of RSR to FSR at 2 s is used to quantify the agreement between the RSR and FSR at periods longer than the site's fundamental period  $T_f$ . It is observed that all the 2-s ratios approach unity with increasing group number.

In addition, the comparison of each group in Fig. 4 shows that the overall shapes of RSR and FSR are very similar, and their maximum peaks occur at approximately the same period with FSR consistently exceeding RSR. The ratio of the maximum peak values and ratio of the periods between RSR to FSR for each group are calculated. The period ratios for each group are near unity, and the maximum peak value ratios for each group are smaller than unity.

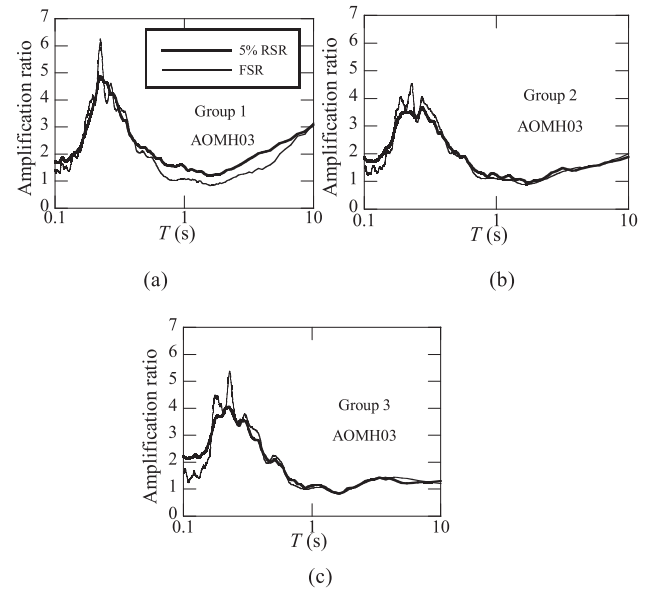


Fig. 4. Comparisons of RSR and FSR for each group of the 5 pairs of soil and rock sites for which the spectral ratios show obvious peaks.

Moreover, the results of the 5 pairs of soil and rock sites, in which the spectral ratios have no obvious peaks are analyzed. For these sites, the RSRs are nearly identical the FSRs and approximately equal to unity for each group. The dependence of the RSR – FSR relationship on the magnitude and epicentral distance is not that obvious as for the results in Fig. 4. Nevertheless, for long periods, the difference between RSR and FSR tends to decrease as the magnitude and epicentral distance increase. Although, for sites MIE014 and ISKH07, the shapes of RSR and FSR for group 3 are more jagged, and the difference between RSR and FSR in group 3 is larger compared with those for groups 1 and 2. This is perhaps because that there is only one earthquake for group 3 for the two sites, and the spectral ratios of the single earthquake cannot be smoothed by the average as for other groups that have many earthquakes.

It is known that FSR purely reflects site effects and is independent of the earthquake scenario for linear analysis. However, Fig. 4 shows that not only the RSR but also the FSR varies with the magnitude and epicentral distance. This occurs because the soil behaves nonlinearly when subjected to strong earthquake motions, or when the incident angles of seismic waves are different. As the analysis is based on real seismic motions recorded on natural sites, these effects can hardly be removed.

#### 4.3. Effect of the Oscillator Damping Ratio

As the RSR is dependent on the oscillator damping ratio, the RSR-FSR relationship should also be dependent on the oscillator damping ratio. To investigate the effect of the oscillator damping ratio, three values of the oscillator damping ratio, 1%, 5% and 10%, are considered in the calculation of RSR. The averaged RSRs with different damping ratios are compared with FSRs for each pair of soil and rock sites.

The RSR is dependent on the oscillator damping ratio. The RSR values approach those of FSR upon decreasing oscillator damping, and this trend is most prominent near the maximum peak. Three representative values of the RSR-FSR ratio at 0.1 s, the maximum peak, and 2 s are selected to

further investigate the dependence of the RSR – FSR relationship on the oscillator damping ratio. The RSRs and FSRs at 0.1 s and 2 s as well as the calculated ratios of RSR and FSR for these periods are provided in Table 1. Most of these ratios approach unity with decreasing oscillator damping ratio, which supports that the idea the RSR values approach those of FSR with decreasing oscillator damping ratio.

In addition, for all oscillator damping ratios, the two spectral ratios have very similar overall shapes, and the shape of the RSR is relatively flatter. The maximum peaks for RSR and FSR occur at approximately the same period with the FSR peak consistently exceeding the RSR peak. To further investigate the relationship between the maximum peaks of RSR and FSR, their maximum peak values and corresponding periods are obtained. Then, the ratio of the maximum peak values and the ratio of the periods between the two spectral ratios are computed. All the period ratios are very near unity, and all the maximum peak ratios are smaller than unity. This indicates that the maximum peak values for the two spectral ratios occur at nearly the same period with that for FSR consistently exceeding that for RSR for any damping condition.

## 5. Conclusions

This study statistically investigates the relationship between the RSR and FSR by analyzing a lot of seismic ground motions recorded on 10 pairs of nearby soil and rock sites in Japan. The following systemic relationships between the two spectral ratios are found.

- (1) The shape of RSR is very similar to that of FSR. When the two spectral ratios have obvious peaks, the maximum peak values of RSR and FSR occur at approximately the same period with that of FSR consistently exceeding that of RSR.
- (2) The relationship between RSR and FSR is dependent on the earthquake scenario and ultimately the magnitude and epicentral distance. For long periods, the difference between RSR and FSR decreases with increasing magnitude and epicentral distance. This trend is particularly prominent for spectral ratios that have obvious peaks.
- (3) The relationship between RSR and FSR is dependent on the oscillator damping ratio, and RSRs generally approach the FSRs with decreasing oscillator damping ratio. This trend is particularly prominent for spectral ratios that have obvious peaks.

## References

- [1] Li X.J., Liu L., Wang Y.S., Yu T, Analysis of horizontal strong-motion attenuation in the great 2008 Wenchuan earthquake, *Bulletin of the Seismological Society of America* 100 (5B), 2440–2449 (2010).
- [2] Ibrahim R., Si H., Koketsu K., Miyake H, Empirical spectral acceleration amplification in the Iwate–Miyagi and Niigata regions, Japan, inferred by a spectral ratio method using ground-motion prediction equations, *Bulletin of the Seismological Society of America* 104 (3), 1410–1429 (2014).
- [3] Borchardt, R.D, Estimates of site-dependent response spectra for design (Methodology and Justification), *Earthquake Spectra* 10, 617–653 (1994).
- [4] Dobry R., Borchardt R.D., Crouse C.B., Idriss I.M., Joyner W.B., Martin G.R., Power M.S., Rinne E.E., Seed R.B, New site coefficients and site classification system used in recent building seismic code provisions, *Earthquake Spectra* 16, 41–67 (2000).
- [5] Uniform Building Code (UCB), Whittier (CA): International Conference of Building Officials (1997).
- [6] Ministry International Building Code (IBC), Country Club Hill, Illinois, USA: International Code Council (2012).
- [7] Japanese Seismic Design Code, Technical standard for structural calculation of response and limit strength of buildings, 2000. Notification no.1457-2000, Ministry of Land, Infrastructure and Transport. (2000).
- [8] Miura K., Koyamada K., Iiba M, Response spectrum method for evaluating nonlinear amplification of surface strata, *Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)* 539, 57–62. (2001)
- [9] Midorikawa M., Okawa I., Iiba M., Teshigawara M, Performance-based seismic design code for buildings in Japan, *Earthquake Engineering and Engineering Seismology* 4, 15–25 (2003).
- [10] Zhang H.Z., Saito T., Zhao Y.G, Simple calculation method of seismic motion amplification ratio corresponding to fundamental period, *Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)* 82 (734), 597–604 (2017)
- [11] Zhang H.Z., Zhao Y.G, A simple approach for estimating the first resonance peak of layered Soil profiles, *Journal of Earthquake and Tsunami* 12 (3), 1850005 (2018).
- [12] Zhang H.Z., Zhao Y.G, A simple approach for estimating the fundamental mode shape of layered soil profiles, *Journal of Earthquake and Tsunami* 13 (1), 1950003 (2019).
- [13] Zhao J.X., Zhang J., Kojiro I, Side effect of using response spectral amplification ratios for soil sites-variability and earthquake-magnitude and source-distance dependent amplification ratios for soil sites, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 29, 1262–1273 (2009).
- [14] Zhao J.X., Zhang J, Side-effect of using response spectral amplification ratios for soft soil sites—Earthquake source-type dependent amplification ratios, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 30, 258–269 (2010).
- [15] Bora S.S., Scherbaum F., Kuehn N., Stafford P.J, On the relationship between Fourier and response spectra: Implications for the adjustment of empirical ground-motion prediction equations (GMPEs), *Bulletin of the Seismological Society of America* 106 (3), 1235–1253 (2016).
- [16] Stafford P.J., Rodriguez-Marek A., Edwards B., Kruiver P., Bommer J.J, Scenario dependence of linear site effect factors for short-period response spectral ordinates, *Bulletin of the Seismological Society of America* 107 (6), 2859–2872 (2017).
- [17] Strong-motion Seismograph Networks (K-NET, KIK-net), <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>; [accessed 19.08.08].

## “新たな低炭素エネルギー社会に対応した新型電池の開発 (5)”

松本 太<sup>1</sup>・池原 飛之<sup>2</sup>・郡司貴雄<sup>3</sup>・大坂武男<sup>4</sup>  
・入井友海太<sup>5</sup>・安東信雄<sup>6</sup>

## “Development of Novel Battery towards New Low Carbon Energy Society (5)”

Futoshi MATSUMOTO<sup>1</sup>・Takayuki IKAHARA<sup>2</sup>・Takao GUNJI<sup>3</sup>  
・Takeo OHSAKA<sup>4</sup>・Yuuta IRII<sup>5</sup>・Nobuo ANDO<sup>6</sup>

### 1. 緒言

本プロジェクトは、次世代の新型電池の開発に焦点を当て、産学連携のもとに行われているプロジェクトである。今年度は、産学連携研究で得られたリチウムイオン電池(LIB)に関する二つの研究成果を報告する。

### 2. 研究結果紹介

#### 2. 1. XPS を用いた充電およびブレドープ過程で生成するグラファイト負極上の SEI 被膜の組成分析

LIB の負極材料である Graphite などは初回充電時、負極表面に Solid Electrolyte Interphase (SEI)被膜が生成する。SEI は電解液の還元を抑制するなどの働きがあるが、充放電を繰り返すことで、SEI の腐食や Li 析出などで抵抗層になり電池が劣化する原因にもなる。そのため、電池の劣化因子を理解するために、SEI の成分や組成を分析することは非常に重要である。しかし、SEI は大気中では酸化してしまい、測定が非常に困難であるため、SEI の詳しい成分組成はほとんど明らかになっていない。本研究では充電または Li イオンブレドープ(LPD)<sup>1)</sup>によって形成した SEI 被膜の成分や組成を大気非暴露で測定可能な XPS を用い定量的に把握することを目的とした。

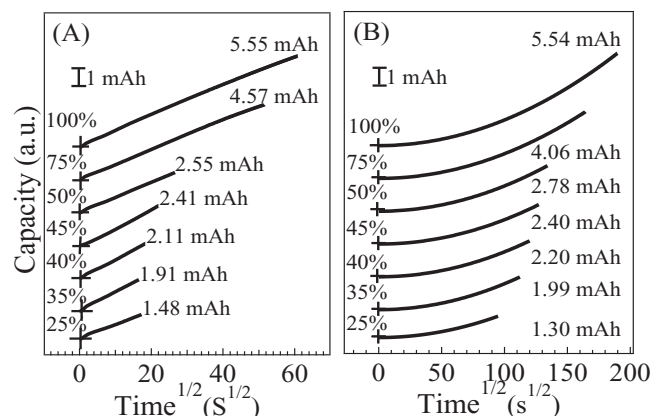


Fig. 1 (A)LPD および(B)充電によって Li 挿入された電池の容量測定結果

活物質に Graphite を用いて作製したスラリーを塗工し真空乾燥させ電極を作製した。電極の密度が  $1.5 \text{ g cm}^{-3}$  になるようにプレスしたものを電極とし、Ar 雰囲気下で電池を作製した。LPD と充放電装置による充電の 2 通りの条件で行った(以下、充電および LPD)。その後、トランスファーベッセルを用いて大気非暴露鏡下で XPS により SEI の分析を行った。LPD 量と充電量は 100, 75, 50, 45, 40, 35, 25% の割合で

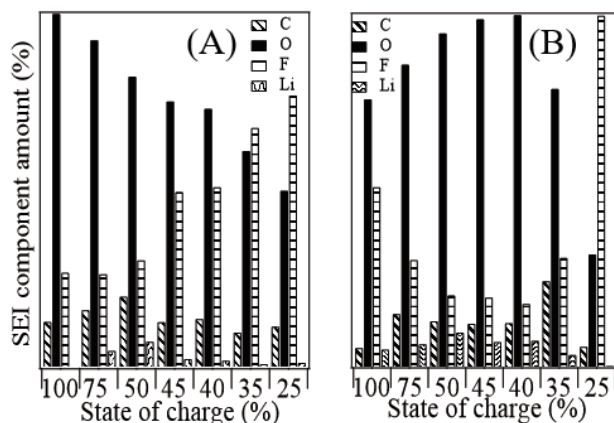


Fig. 2 (A)LPD および(B)充電によって形成した SEI の各 Li 挿入量における XPS による組成分析結果

\*1: 教授 神奈川大学工学部物質生命化学科  
Professor, Dept. of Material and Life Chemistry, Kanagawa University  
2: 教授 神奈川大学工学部物質生命化学科  
Professor, Dept. of Material and Life Chemistry, Kanagawa University  
3: 特別助教 神奈川大学工学部物質生命化学科  
Assistant Professor, Dept. of Material and Life Chemistry, Kanagawa University  
4: 客員教授 神奈川大学工学研究所  
Visiting Professor Research Institute for Engineering, Kanagawa University  
5: 客員研究員 神奈川大学工学研究所  
Researcher Research Institute for Engineering, Kanagawa University.  
6: 客員研究員 神奈川大学工学研究所  
Researcher Research Institute for Engineering, Kanagawa University.

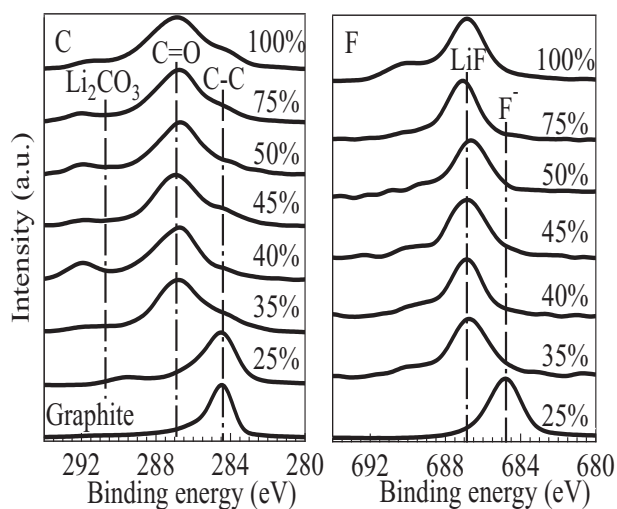


Fig. 3 充電によって形成した SEI の各 Li 挿入量における XPS 測定結果

行った。

Fig. 1 に充電および LPD によって  $\text{Li}^+$  を挿入した各電池における時間ごとの容量変化を示す。活物質質量から計算される理論容量から目的通りの容量であることが確認できた。Fig. 2 に XPS によって求めた SEI 被膜の元素割合を示す。充電と LPD では O と F での増減傾向が異なっており、充電の場合、40% まで O の割合が増加しているが 40% 以降は割合が減少している。逆に F は 40% まで減少し、以降は増加している。LPD では O は増加し、F は減少していた。このことから SEI 成長過程では LPD と充電で異なることが確認できた。Fig. 3 に充電の場合の C 1s と F 1s 軌道の XPS を示す。25% では Graphite 由来のピークが観測され、35% 以上では、C と F のメインピークは C=O と LiF になった。これは電解液の還元により炭酸塩が生成したことに起因する。また  $\text{LiPF}_6$  が炭酸塩と反応することで LiF が生成したと考えた。この結果から先に還元反応により炭酸塩が生成され被膜となった後に LiF が生成するため O と F の割合が反比例したと考えられる。

## 2. 2. 次世代 LIB のための Li 含有金属酸化物/活性炭を用いたハイブリッド正極の性能特性の検討

高エネルギー密度を有する Li イオン二次電池 (LIB) と出力特性で有利な電気二重層キャパシタとのハイブリッド化は新規蓄電デバイスの構築という観点から極めて重要な取り組みである。本研究室では片面に  $\text{LiFePO}_4$  (LFP)、もう一方の面に活性炭 (AC) を塗工し、穴開け加工を施すことにより効率的に LFP から AC へのエネルギー移動が起こることに起因する高レートでの放電特性と高容量の保持を確認している<sup>2)</sup>。本研究ではさ

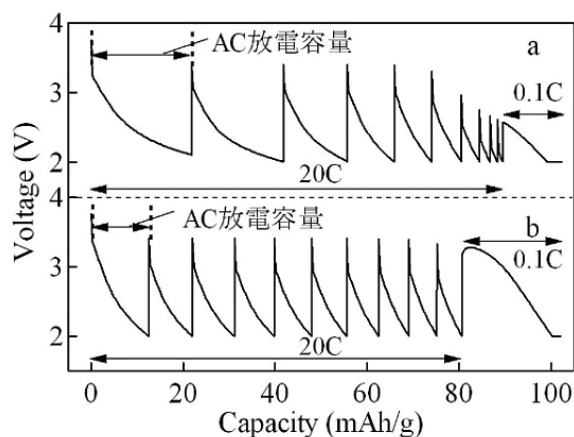


Fig. 4 (a)穴あけ及び (b)穴なし電極電池のレート試験結果 (AC wt. % :36.1%)

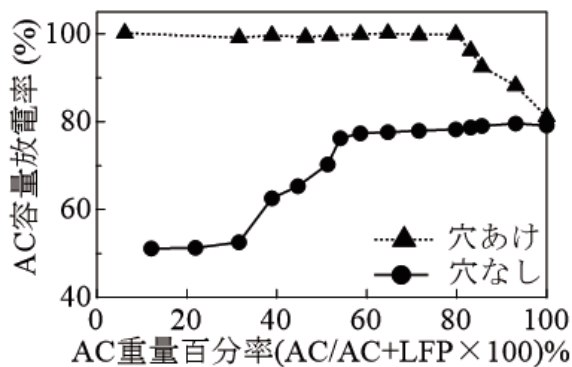


Fig. 5 穴あけ及び穴なし電極における AC の wt.% に対する AC 容量放電率

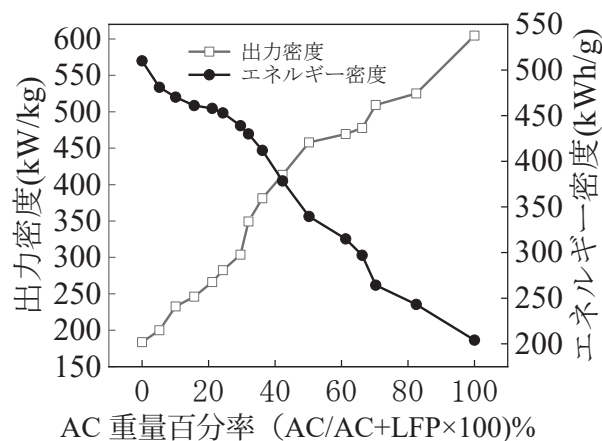


Fig. 6 AC の wt. % におけるエネルギー密度と出力性能の関係

らなる高速放電特性や高容量化を目指し、AC の目付割合を検討することによって、LFP/AC 比が電池性能にどのような影響を与えるか調べた。



正極活物質として片面に LFP 層、もう一方の片面に AC 層を形成した。これら材料を用いてスラリーを調製した後、塗工・乾燥させた。ピコ秒パルスレーザーで開口率 0.5 %、開口径 20  $\mu\text{m}$  となるように穴あけを行った。Li 金属を負極として電池を作製した。0.1 C で 3 サイクル充放電試験により容量測定を行い、その後、高電流でのレート試験を行った。レート試験は 0.1C で充電を行ったあと

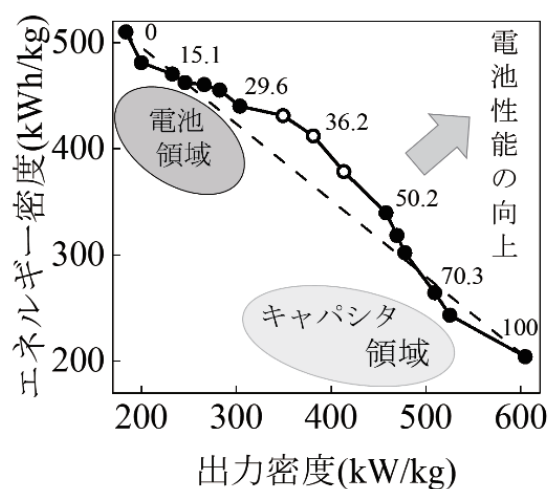


Fig. 7 エネルギー密度と出力密度の関係。図中の数字は AC の wt. %

AC 容量分を 20 C にて急速放電を行い 5 分休止し、再び 20 C にて急速放電を行うことを 10 回繰り返した。

Fig. 4 に穴あけ、穴なし電極で作製した電池のレート試験結果を示す。10 回の 20C 放電によって得られる放電容量に違いが見られる。この図から 1 回目放電した容量を AC 放電容量とし、AC の理論容量に対する AC の実際の放電容量の割合を AC 容量放電率とした。Fig. 5 に電極における AC の質量割合と AC 容量放電率の関係を示す。AC 割合が低い場合、穴なし電極では約 50% の放電率しか得られなかったのに対し、穴あけ電極の場合、AC 割合に関係なくほぼ 100% の放電率を示したことから穴あけ電極で作製した電池の方が優れた特性を有していることが分かった。Fig. 6 に穴あき電極で作製した電池の 20 C 放電によるエネルギー密度を求め、各電池のレート試験の結果から求めた出力密度をしめす。Fig. 7 に出力密度を横軸エネルギー密度を縦軸に示す。Fig. 6、Fig. 7 より AC wt. % が 35~50% の本電池は出力性能とエネルギー密度が両立できることが見られ、本ハイブリッド電池で従来の蓄電デバイスでは得られない領域の性能を示すデバイスの構築に成功した。

### 3. 終わりに

本研究で行った LIB の不可逆容量の除去のための LPD とハイブリッド正極の実現により、次世代の LIB の性能の向上に大きく貢献することが考えられる。

最近、自動車が電動化され、さらに、自動車自体も移動

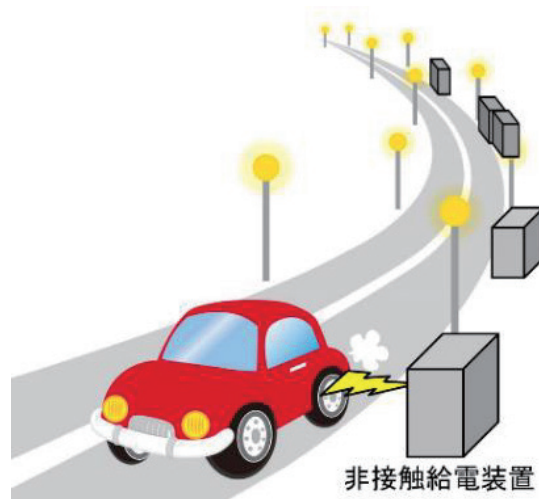


Fig. 8 車の走行中での非接触給電システムの概念図例

する電子機器化し始めている。このような高度な電子化社会において次に起こる変化は、これら移動機器への電力供給システムの発達である。電力を供給するために、ある場所に行く、待つといった動作はなくなる方向に技術は発展していくであろう。この方向へ変化は始まっており、携帯電話を非接触で充電するシステムが既に市販されて、私たちの生活に浸透し始めている。今後の社会では、インフラの中にある限りは様々な場所での機器充電が求められる。その中で、機器内にはある程度の電力を貯める電池が必要であるが、大きな電力を貯めるための電池は必要でなくなる。例えば、電気自動車は様々な場所で少しずつ充電しながら走り続ける (Fig. 8)。しかし、電池が充電されるためには、電池は瞬時に大電力を受け止めなければならない。しかし、現行の LIB は、 $\text{Li}^+$  が正極と負極の間を行き来することで充電と放電が行われているので、 $\text{Li}^+$  の移動の速度に制限されて、急に大電力を充電することはできない。本研究において開発したハイブリッド電極はこのような要望に合う電極であり、今後、大きな注目を浴びることが期待できる。

### 4. 発表論文

(1) Tatsuya Watanabe, Takashi Tsuda, Nobuo Ando, Susumu Nakamura, Narumi Hayashi, Naohiko Soma, Takao Gunji, Takeo Ohsaka, Futoshi Matsumoto, An Improved Pre-Lithiation of Graphite Anodes Using Through-Holed Cathode and Anode Electrodes in a Laminated Lithium Ion Battery, *Electrochimica Acta*, 134848 (2019).

(2) Takashi Tsuda, Nobuo Ando, Tomohiro Utaka, Kenji Kojima, Susumu Nakamura, Narumi Hayashi, Naohiko Soma, Takao Gunji, Toyokazu Tanabe, Takeo Ohsaka, Futoshi Matsumoto, Improvement of High-Rate Performance of  $\text{LiFePO}_4$  Cathode with Through-Holed  $\text{LiFePO}_4$ /Activated Carbon Hybrid Electrode Structure Fabricated with a Pico-second Pulsed Laser, *Electrochimica Acta*, **298**, 827-834 (2019).

# 振動エネルギー伝達特性に基づく低周波振動の低減

山崎 徹\* 片岡 大雄\*\*

## Vibration reduction in low frequency range by controlling vibration energy transmissibility

Toru YAMAZAKI\* Daiyu KATAOKA\*\*

### 1. 緒言

設計開発期間の短縮のため、設計初期で振動騒音を考慮できる手法が求められている。振動騒音の対策は、主として振動の原因となる振動モードを抑制することで行われてきた。モードに基づく対策は詳細設計後となり、エンドローディングとなる。そこで本プロジェクト研究の一つとして、高モード密度領域の振動音響解析に有効な解析手法である統計的エネルギー解析法 (Statistical Energy Analysis, 以下 SEA) を用いて低振動設計の研究を行っており<sup>(1)(2)</sup>、特に結合損失率 (Coupling Loss Factor, 以下 CLF) を解析式により算出する解析 SEA により、設計のフロントローディングに取り組んでいる<sup>(3)</sup>。これまでの解析 SEA の利用では、はり要素もしくは板要素としてモデル化を行っている。しかし、実機には厚肉構造も多く使用され、特に厚肉構造において問題となる低モード密度領域の振動も SEA によりエネルギー伝搬モデルとして把握することが期待されている。

そこで本研究では、2 自由度系間の CLF (エネルギー伝達特性) を活用し、連続体の低モード密度領域の振動に伝達特性による設計が可能であることを示し、自動車エンジンでの振動低減の事例を紹介する。

### 2. 低モード密度領域のエネルギー伝達特性による振動解析

はり構造物を例に 2 自由度系のエネルギー伝達モデルにより、連続体の低モード密度領域の振動においてもエネルギー伝搬の観点での設計が可能であることを示す。

#### 2.1 2 自由度振動系のエネルギー伝達特性モデル

連結ばね  $K$  で接続された 2 つの 1 自由度系 (質量・バネ・ダンパ系) において、質点 1 から 2 へのエネルギー伝達特性 (CLF)  $\beta_{12}$  は

$$\beta_{12} = \frac{K^2(\Delta_1 + \Delta_2)}{m_1 m_2 [(\Omega_1^2 - \Omega_2^2)^2 + (\Delta_1 + \Delta_2)(\Delta_1 \Omega_2^2 + \Delta_2 \Omega_1^2)]} \quad (1)$$

で表せる。ここで、 $\Omega_i$  はブロッキング周波数 (各質点を固定した時の固有角周波数) で、 $\Delta_i$  は減衰特性で、それぞれ以下で表される。

$$\Omega_i = \sqrt{(k_i + K) / m_i} \quad (2)$$

$$\Delta_i = c_i / m_i \quad (3)$$

#### 2.2 対象構造物

図 1 に示すような、結合ばね  $K$  により 2 本のはりが接続された構造物を考える。アルミ製で各はりの全長は 1m、正方断面、両端は自由とする。断面寸法が異なる Type1 (はり 1: 10mm 角, はり 2: 20mm 角) と Type2 (はり 1: 15mm 角, はり 2: 20mm 角) の構造を考える。

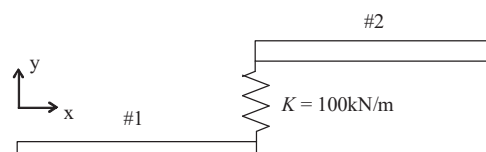


図 1 結合ばねで二本のはりを接続した構造物

#### 2.3 伝達特性モデルによる検討

各はりのブロッキング周波数  $\Omega_i$  は、各はりと結合ばねでその端部を固定した状態の FEM モデルより算出し、式(1)よりエネルギー伝達特性を算出した。その結果、Type2 の伝達特性は、Type1 より 1.05 倍大きく、振動の伝達が大きいものとなっていると予測される。

これを検証するために、図 1 の全系での FEM モデルを作成し、それぞれのはりに振動入力を与え、そのときの各はりの応答を算出し、エネルギー伝達特性を同定した。図 2 に同定された伝達特性の比較を示す。凡例 Type1 と 2 の結果から周波数全域において、また凡例 (Freq-ave) の結果からも、Type2 の方が大きな値となっていることが確認できる。これは式(1)による予測と一致しており、式(1)によるエネルギー伝達特性の評価の有効性が確認でき、これを用いた低振動設計が可能と言える。

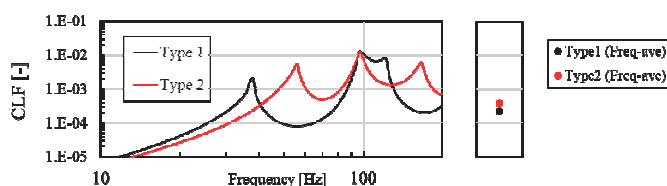


図 2 FEM で算出した伝達特性の比較

\*教授 機械工学科

Professor, Dept. of Mechanical Engineering

\*\*大学院生 機械工学専攻

Graduate (M.C.), Dept. of Mechanical Engineering

### 3. 自動車エンジンの低振動化

ここでは、SEA を用いて自動車エンジンの高モード密度領域<sup>(5)</sup>と前章の低モード密度領域それぞれを狙った低振動化を行う。

#### 3.1 対象エンジンと要素分割

図3に対象としたエンジンの全系のモデル図を示す。本対象を29の要素とし、要素4はヘッド部側面部、要素24はチェーンケースであり、図中にそれぞれを示した。そこで、チェーンケースの振動の低減を目標とする。

#### 3.2 高モード密度領域の振動低減

ここでは、振動低減要素の振動を他の要素に伝える（橋渡し）ことによる振動低減を行うために、どの要素に橋渡しすべきか、文献(5)の方法により適正化した。その結果、要素4のヘッド部側面に結合すればよい結果を得た。これによる低振動化を確認するため、図3のFEMモデルで確認を行った。変更前後のチェーンケースの振動の比較結果を図4に示す。700Hz付近を除き、振動の低減が確認できる。

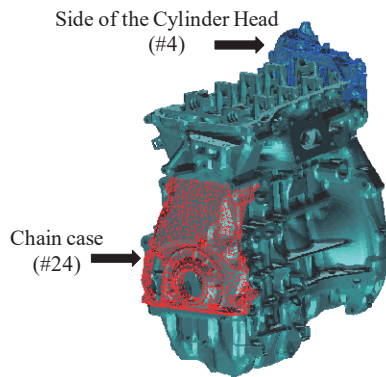


図3 対象エンジン

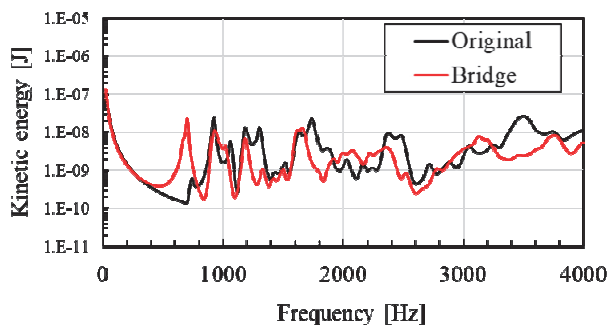


図4 高モード密度領域の設計法適用による振動低減の確認

#### 3.3 低モード密度領域の振動低減

前節で、橋渡しにより700Hz付近に生じたピーク応答の低減について、前章のエネルギー伝達特性を用いて検討する。ここでは、チェーンケースに新たに構造物を付加し、そのブロッキング振動数に着目し、付加構造物を設計する。

チェーンケースから平板へのパワーフロー $P_{24,p}$ は

$$P_{24,p} = \omega \eta_{24,p} E_{24} - \omega \eta_{p,24} E_p \quad (4)$$

である。ここで、 $\omega$  は角周波数、 $\eta_{ij}$  は伝達特性 (CLF)、 $E_i$  は要素エ

ネルギーである。付加する構造物はチェーンケースと比べエネルギー伝搬の下流に位置し $P_{24,p} > 0$ となる。よって、 $\eta_{24,p}$ と $\eta_{p,24}$ を大きく、すなわち式(1)より、チェーンケースと付加物のブロッキング振動数間隔を小さくすればよい。

そこで、付加物として縦150mm、横50mmのアルミ平板を考えた。ブロッキング振動数は板厚で調整し、1mmと1.1mmとし、チェーンケースとは平板の四隅をばね（ばね定数50kN/m）で接続した。その結果、ブロッキング振動数は、1mm厚で712Hz、1.1mm厚で746Hzであり、1mm厚の方がチェーンケースとのブロッキング振動数間隔が小さくなり、平板への振動伝達を促進でき、結果としてチェーンケースの振動低減が図れると予測される。

FEMによる平板付加前後のチェーンケースの振動の変化を図5に示す。ブロッキング振動数を近づけた1mm厚の平板の方が、700Hz付近での振動低減が大きくなっていることが分かり、式(1)による伝達特性による設計の有効性が確認できる。

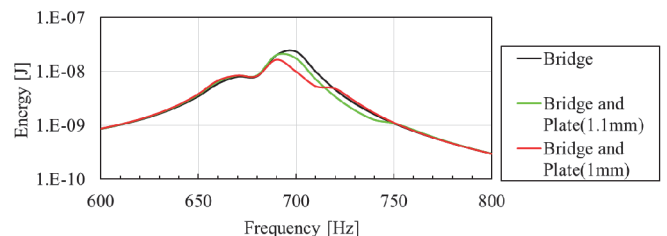


図5 低モード密度領域の設計法適用による振動低減の確認

### 4. おわりに

本研究では、エネルギー伝達特性の基づき、低周波数域の振動問題への取り組みを行い、エンジンの低振動化に適用した事例を紹介した。本研究で得られた知見は、以下の通り。

- (1) 2自由度系のエネルギー伝達モデルを基に、ブロッキング振動数を操作することなどにより、連続体であるはりの低モード密度領域における伝達特性を制御できることを示した。
- (2) 自動車エンジンのFEMモデルに平板を付加し、その平板への振動伝達を促進するために、ブロッキング振動数を基に設計し、振動低減効果を得た。

### 参考文献

- (1) Lyon, R. H. and DeJong, R. G., Theory and Application of Statistical Energy Analysis, 2nd ed., RH Lyon Corp. (1998)
- (2) 山崎ほか, SEAによる機械製品の固体音低減プロセス, 日本機械学会論文集C編, 73巻726号, pp.84-90(2007)
- (3) 山崎ほか, モードと波動の両視点による機械構造物の振動低減設計, 自動車技術会論文集, Vol.47, No.6, pp.1373-1379(2016)
- (4) 山崎ほか, 部分構造を対象としたFEMによるSEAパラメータの評価—FEM-SEAの提案—, 日本機械学会論文集C編, Vol.74, No. 747, pp. 2655-2661(2008)
- (5) 山崎ほか, ロードノイズを対象とした自動車車体の概念設計モデルの構築, 神奈川大学工学研究, No.3, pp.109-110(2020)

## 振動を用いたDNA増幅法

山口 栄雄\* 米田 征司\*\* 鈴木 温\*\*\*

### Vibration-driven DNA amplification

Shigeo Yamaguchi\*, Seiji Yoneda\*\*, and Tadzunu Suzuki\*\*\*,

#### 1. 研究の概要

従来, DNA の増幅技術であるポリメラーゼ連鎖反応 (PCR) 法では, 94 °Cの高温によって, DNA を二本鎖から一本鎖に解離 (変性) させる行程が含まれるが, この熱変性には DNA の損傷や酵素の失活などの問題がある. そこで我々は, 高温状態を用いずに可聴周波数帯での振動を用いたDNAの変性及び増幅技術を提案及び開発を行ってきた.

#### 2. 実験結果

実験方法は, DNA と酵素などが混合された水溶液をマイクロチューブに入れ, チューブ全体を可聴周波数で振動させることでDNAの変性・増幅を行った. 振幅, 周波数及び振動時間を変えることにより変性・増幅条件を調べた.

特に, 振動変性時においての, 外部からチューブ内のDNAに加えらるエネルギーを計算し, その振動エネルギーとDNAの変性と増幅との関係性を調べた.

この技術では, 正確な増幅, 時間の大幅な短縮, 高い効率化が期待できる. 振動を用いたPCR法 (以下, 振動PCR法) では, 使用する酵素の活性化温度である 37 °Cに設定した恒温槽の中に振動子を設置し行った.

振動PCR法は2段階の工程 (変性→アニーリング・伸長) に分かれており, はじめに, 振動により変性を行う. その後, 無振動状態にてアニーリング及び伸長を行う. この2段階を1サイクルとする.

振動1周期当たりDNAに加えらる振動エネルギーをグラフにまとめた (図1). 計算に用いた式は, 振動1周期当たりDNAに加えらる振動エネルギーとして, 次式から求められる.

$$\varepsilon_v = \varepsilon_{v,1cycle} f \Delta t = 8\pi^2 m f^3 A^2 \Delta t$$

ここで,  $m$ : チューブ内のDNA全質量,  $A$ : チューブの振動振幅,  $f$ : チューブの振動数である.

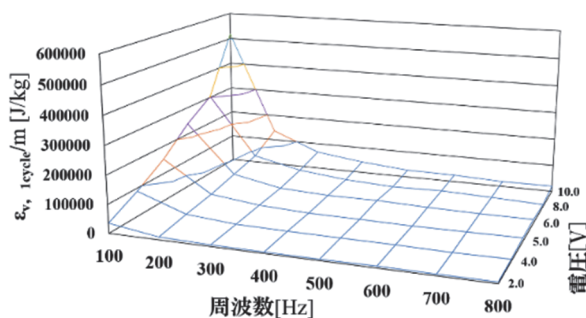


図1 振動エネルギー

また, 本実験では, マイクロチップ型電気泳動装置を用いて, 振動PCR後のDNAの確認を行った. この装置は, 石英基板 (マイクロチップ) 内に形成された分離流路内でキャピラリー電気泳動を行う装置であり, 毛細管現象を利用した電気泳動法である. また, マイクロチップの分離流路内で, DNAが分離バッファ中の色素と結合しながら分離される. その後, LED光照射によって発生する蛍光信号を検出しその強度を解析する.

\*教授 電気電子情報工学科  
Professor, Dept. of Electrical and Electronic Information Engineering  
\*\*准教授 電気電子情報工学科  
Associate Professor, Dept. of Electrical and Electronic Information Engineering

\*\*\*客員研究員 工学研究所  
Guest Researcher, Research Institute for Engineering



# パルスレーザー光を利用した反応開発および機構解析

岩倉 いずみ\* 岡本 専太郎\*\* 織作 恵子\*\*\* 赤井 昭二\*\*\*\* 岡田 繁\*\*\*\*

小林 孝嘉\*\*\*\* 岡村 幸太郎\*\*\*\*\* 橋本 征奈\*\*\*\*\* 簗下 篤史\*\*\*\*\*

## Development and Analysis of Chemical Reaction Triggered by Ultrashort Laser Pulse

Izumi IWAKURA\* Sentaro OKAMOTO\*\* Keiko ORISAKU\*\*\* Shoji AKAI\*\*\*\* Shigeru OKADA\*\*\*\*\*

Takayoshi KOBAYASHI\*\*\*\* Kotarou OKAMURA\*\*\*\*\* Sena HASHIMOTO\*\*\*\*\* Atsushi YABUSHITA\*\*\*\*\*

### 1. 緒言

有機化合物の分子振動周期よりも閃光時間が短い 10-fs パルスレーザー光を用いると、振動位相を揃えて分子振動を励起できる。このコヒーレント分子振動を化学反応に利用すれば、熱反応とも、光反応とも異なる第3の反応を誘起できると考察した。

### 2. 可視 10-fs パルス光の発生<sup>(1)</sup>

可視 10-fs パルス光は非共直線光パラメトリック増幅(NOPA)により発生させた。具体的には光源(SpectraPhysics, Spitfire Pro)から発振される 800-nm パルス光(パルス持続時間 100 fs, 繰り返し率 1 kHz)を部分反射鏡で2分し、一方のパルス光はBBO結晶に集光し、400-nm パルス光に波長変換した(NOPA増幅光)。他方のパルス光はサファイア板に集光し、スペクトル帯域幅を可視域(525~725 nm)に広げた(NOPA種光)。発生させたNOPA増幅光とNOPA種光とをなす角6.5°でBBO結晶に入射し、NOPA種光を全波長域にわたって二段階増幅した。増幅した可視白色パルス光のパルス幅は、回折格子と可変形鏡を使用して圧縮した。

石英セルに封入された溶液試料に集光した時点でパルス幅が10 fsとなるように、セル前壁と同じ1 mmの厚さの石英板を光路内に挿入し、群速度分散を補償した。第二高調波発生-周波数分解光ゲート法を使用してパルス幅を測定したところ、9.5 fsと推定された。この様に発生させたパルス光を可視 10-fs パルス光とする。パルス幅測定後に挿入した石英ガラス板を取り外し、結晶化実験、および、ポンプ・プローブ実験に使用した。

### 3. 可視 10-fs パルス光の照射による昇華結晶化<sup>(2)</sup>

糖1飽和メタノール溶液を調整したところ、1.7 mM (1.1 g L<sup>-1</sup>)であった。そこで、1.5 mMの糖1メタノール溶液を調整し、10 mm x 10 mm x 40 mmの蓋付き石英セルに0.5 ml封入し、28 mJ cm<sup>-2</sup>の可視 10-fs パルス光を集光した(光照射時間:48時間)。光照射開始10分後には、液面から約3.5 cm上空のセル上部に結晶が析出し始めた。析出した針状結晶は<sup>1</sup>H-NMRスペクトルとX線結晶構造解析の結果から、溶質(糖1)の結晶であることが示された(図1)。

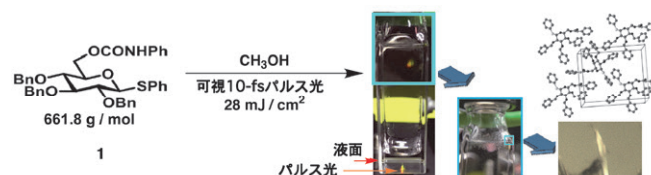


図1. 可視 10-fs パルス光の照射による糖1の昇華結晶化

### 4. 結晶化機構

レーザー光を用いて物理的な刺激を与え、強制的に結晶核の形成を誘起する“レーザー誘起結晶化”では、溶液中、もしくは、気-液、液-液、固-液界面に結晶が析出する。ところが、本手法では液面から約3.5 cm上空のセル壁面に結晶が析出した。そのため、一般的なレーザー誘起結晶化とは異なる機構で結晶が析出していると考えられる。

まず、レーザーアブレーションの影響を検討した。光強度を0.5, 5, 12, 13, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 24, 25, 26, 28, 29 mJ cm<sup>-2</sup>に設定し、同様の実験を行なった。その結果、光強度に依らずセル上部に結晶が析出した。次に、光の集光点を液面から0.5, 2.0, 3.5 mm下に設定し、同様の実験を行なった。その結果、集光点に依らずセル上部に結晶が析出した。これまでに報告されているアブレーション閾値(8 mJ cm<sup>-2</sup>)<sup>(3)</sup>の10分の1の強度のレーザー光を用いても結晶が析出すること、および、集光点の深さに依存しないことから、アブレーションによる飛散は否定できると考察した。

\*教授 化学教室

Professor, Dept. of Chemistry

\*\*教授 物質生命化学科

Professor, Dept. of Material and Life Chemistry

\*\*\*准教授 物質生命化学科

Associate Professor, Dept. of Material and Life Chemistry

\*\*\*\*客員教授 工学研究所

Guest Professor, Research Institute for Engineering

\*\*\*\*\*客員研究員 工学研究所

Guest Researcher, Research Institute for Engineering

次に濃度依存性を検討した。糖1メタノール溶液の濃度を、0.2, 0.4, 0.8, 1.1, 1.5 mM に調整し、同様の実験を行った。その結果、0.4 ~ 1.5 mM いずれの溶液を用いてもセル上部に結晶が析出した。しかし、0.2 mM の溶液からは結晶は析出しなかった。

さらに偏光依存性、セルの形状依存性、溶媒依存性を検討した。その結果、縦偏光・横偏光に依らず、セル上部に結晶が析出した。また、石英 NMR チューブ・10 mm x 10 mm x 100 mm の蓋付石英セル・太鼓型石英セルいずれを用いても、セル上部に結晶が析出した。一方、溶媒に関しては依存性が現れた。メタノール、エタノール、2-プロパノール、アセトニトリルを溶媒として用いた場合は、セル上部に結晶が析出した。他方、アセトン、1,4 ジオキサン、シクロオクタノール、ベンゼン、トルエン、クロロホルムを溶媒として用いた場合には結晶は析出しなかった。これらの結果から、分極した化学結合がラマン活性な分子振動を有する場合にのみ、結晶が析出したと考察できる。

より詳細な機構解析を目的に、ポンプ・プローブ測定を試みた。糖1メタノール溶液 (1.5 mM) を調整し、光路長 1 mm の蓋付き石英セルに 0.4 ml 封入し、測定試料に用いた。測定結果を図2に示す。実時間差吸光度変化(図2a)に現れる細かい振動は、ノイズではなく、可視 10-fs パルス光照射によりコヒーレントに励起された分子振動を反映している。そこで、ブラックマン窓関数を用いてフーリエ変換し、コヒーレント励起された分子振動を解析した(図2b)。その結果、糖1とメタノールのラマン活性な分子振動(図2c,d)が、複数、同時にコヒーレント励起されていることが示された。

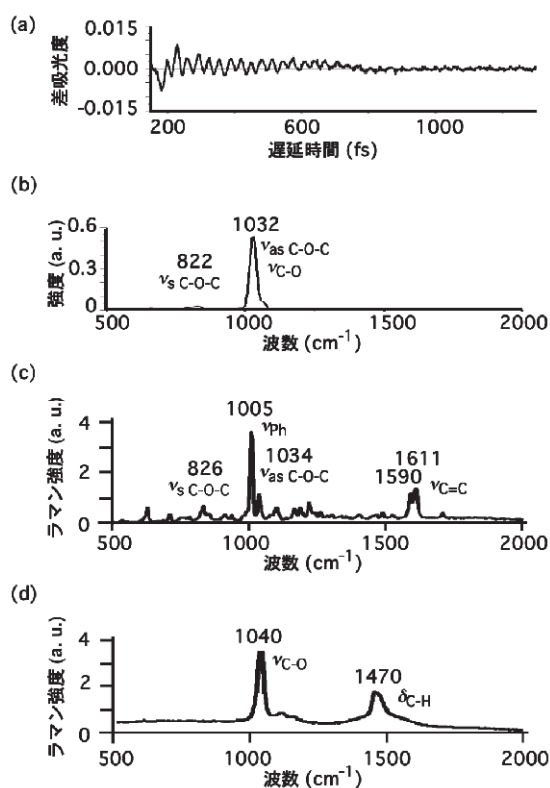


図2. ポンプ・プローブ実験結果  
(a) 実時間差吸光度変化 (b) フーリエ変換スペクトル  
ラマンスペクトル (c) 糖1 (d) メタノール

これらの結果から、以下の仮説を考察している。可視 10-fs パルス光の光電場との相互作用により、例えば糖1の C-O-C 結合やメタノールの C-O 結合がひきのばされる等の効果により種々のラマン活性な分子振動がコヒーレント励起され、気化に必要なエネルギーが低下し、常圧・常圧化において糖1、および、溶媒の気化が誘起された。さらに気化した糖1、および、溶媒はセル壁面で冷やされ、昇華結晶、もしくは、液滴として現れた。

## 5. 結論

糖1は分子量が661.8もあり、常圧、もしくは、減圧下で加熱すると、気化することなく炭化してしまう。また、この糖1に紫外光を照射すると、糖1の分解反応が進行する。本研究では、可視 10-fs パルス光を照射すると、糖1が気化し、昇華結晶として析出することを見いだした。この昇華結晶化手法には、不飽和溶液を用いても結晶化の誘起が可能であるという利点があり、微量のサンプル溶液からでも構造解析に適した純粋な結晶を形成できるという特徴がある。

以上、可視 10-fs パルス光を用いると、熱反応(加熱による炭化反応)とも、光反応(紫外光照射による分解反応)とも異なる第3の反応として、気化を誘起できることを見出した。現在は、新たに光機能的な材料の発光機構解析を行っている。

- (1) S. Hashimoto, A. Yabushita and I. Iwakura, Transient process spectroscopy for the direct observation of inter-molecular photo-dissociation. *Structural Dynamics*, 4, 054901 (2017).
- (2) I. Iwakura, K. K.-Orisaku, S. Hashimoto, S. Akai, K. Kimura and A. Yabushita, Formation of thioglucoside single crystals by coherent molecular vibrational excitation using a 10-fs laser pulse. *Communications Chemistry*, 3, 35 (2020).
- (3) H. Masuhara, Time-resolved spectroscopic and imaging studies on laser ablation of molecular systems: from mechanistic study to bio/nano applications. *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, 86, 755–783 (2013).

# 企業ロボット研究へのモデリング&シミュレーションの活用

石井 信明\* 松井 正之\*\*

## Using Modeling and Simulation for the Research of Enterprise Robot

Nobuaki ISHII \* Masayuki MATSUI \*\*

### 1. はじめに

神奈川大学工学研究所に設置された「企業ロボット開発研究所」(以下、本研究)では、これまで人間が作り上げてきた生産企業体、公共事業体などのさまざまな人工体の調査・研究を行っている。現代社会は、IoT(モノのインターネット)、人工知能(AI)、ビッグデータなど、個別に発展してきた情報通信技術(ICT)がおよぼす相乗的効果による未知なる世界の入り口にいる。おそらくこの先には、ICTでヒト・モノ・カネ・知の膨大な社会・経営の情報が結ばれ、これらを利用したロボットやAIなどが、経済、経営、福祉、教育や家事・育児など社会のさまざまな場面で重要な意思決定にかかわるICT管理化社会が到来する。しかし、その社会が我々にどのような影響を及ぼすかは、想像の域を出ない。我々が気づかない間に企業ロボットが社会に浸透し、人間はそれに疑問すら持たない可能性もある。

このような状況下にあつて、本研究では、ICT管理化社会を人間社会となじみのある、人間中心のICT共生社会にすることを目標に、そのための自然の理知を反映した科学あるいは仕組みを明らかにすることに挑戦している。

一昨年度の「工学研究 (Vol. 2)」<sup>[1]</sup>では、企業ロボットの概念として三相型の人工体を提示した。また昨年度の「工学研究 (Vol. 3)」<sup>[2]</sup>では、企業ロボット研究の必要性、および、本研究で提案している三相型人工体の中央相に当たる「分析・管理系」について考察を行った。本稿では、人間中心のICT共生社会の観点から、企業ロボット研究へのモデリング&シミュレーション(以下、M&S)の活用の可能性について考察を行う。

### 2. 企業ロボットにおける科学技術とアートの融合の必要性

これまで、ヒト型ロボットやAI応用をはじめとしたさまざまな技術が人工体に利用されている。しかしこれらは、科学技術分野を中心とした動作系-知能系の二相からなる人工体の発展が中心といえる。さらに、動作系と知能系それぞれが先鋭化した研究として展開しており、両者の協調・調和、さらには人間とのかかわりを中心

とした研究は少ない。

たとえば、サイバーフィジカルシステム(CPS: Cyber Physical System)、IoT(Internet of Things)、Digital Twin、Industry 4.0など、仮想空間と物理空間をつなげた次世代技術の研究・開発が進み、社会、産業に大きなインパクトを与えている。しかしこれらは、統計、アルゴリズム、ロジック、プログラムなど、科学技術を中心とした動作系-知能系の二相からなる人工体を前提としている。そこには人間の要求を分析し、その達成を導く仕組みとの関係が明示的には示されていない。言い換えると、抽象化、創造、協働、コミュニケーションなど、人間の思考を反映するアートの側面が不足している。

科学技術がICT共生社会の実現に必要であることは間違いない。しかしハード思考アプローチである科学技術のみでは、人間になじみのあるICT共生社会の実現は不可能であろう。一方で、アートはソフト思考アプローチであり、優れたマネジメントには欠かせない。しかし、膨大な情報が利用できる現在、人間中心のより良い社会を築くためには、アートだけでは不十分である。

これらのことから本研究では、図1に示すように、これまで動作系-知能系の二相としてきた人工体の間に、人間の思考を反映するアートの側面を考慮できる相として中央相を加えた三相型の人工体<sup>[2]</sup>を考案した。すなわち、それぞれ人工知能、制御理論を中心として発展している知能系とセンサー等を含めた動作系に対し、それらに挟まる形の中央相として人間の思考を反映したアートの側面を取り入れることが出来る「分析・管理系」を加える構造である。この人工体スキームにより、ICT管理化社会において、より人間・社会となじみのある人工体の発展が目指せると考えている<sup>[1], [2]</sup>。

中央相に必要な人間の思考を反映する仕組みには様々な方法が考えられるが、以下では、M&Sの利用について考察を行う。

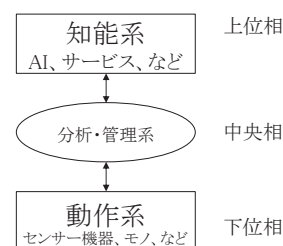


図1 人工体理論のスキーム

\*教授 経営工学科

Professor, Dept. of Industrial Engineering and Management

\*\*客員教授 工学研究所

Visiting Professor, Research Institute for Engineering

### 3. M&S による人間の思考の反映

M&S におけるモデリングには、抽象化、単純化、創造、ステークホルダとの協働、コミュニケーションのプロセスがあり、多くのステークホルダを巻き込みながらモデルが作られていく。作られたモデルを用いたシミュレーションでは、システムの動的かつ複雑な挙動に関する情報を収集する。その結果を統計手法、AI など、様々な数理技術を用いて分析し、管理に利用する。より良い成果を上げるためには優れたモデルの作成とシミュレーションシナリオの準備が必要であるが、そこにはアートの領域がある。すなわち M&S は、図 2 に示すように、科学技術のハード思考とアートのソフト思考の両面を併せ持っており<sup>[1]</sup>、人間の意思を反映する中央相の仕組みとして重要な役割が期待できる。

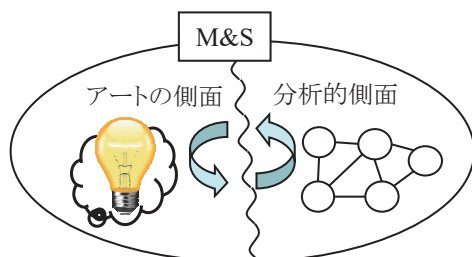


図2 モデリング&シミュレーションの構造

図3は、人工体の三相型構造に M&S の当てはめを試みたものである。この例では、動作系からの IoT データなどと知能系あるいは人間が指示するシミュレーションシナリオによりモデルを用いてシミュレーションを行い、その結果の分析に基づいて管理ための意思決定を行うことを示している。

すなわち分析・管理系では、人間の思考を反映したモデルを用いて複雑系システムの挙動データをシミュレーションにより収集し、その分析を知能系による AI、統計などの数理技術を利用しながら行う。知能系は、シミュレーション結果の分析と意思決定について、人間の判断を支援することになる。そして分析データに基づき、AI、あるいは人間が管理のための意思決定を行う。意思決定は指示として動作系伝えられ、その結果が分析・管理系に伝えられる。

このように、M&Sを三相型人工体中央相の分析・管理系に用いることで、モデリングを通じて人工体に人間の意思を取り入れた、人間社会となじみのある ICT 共生社会の実現に近づくことができる。

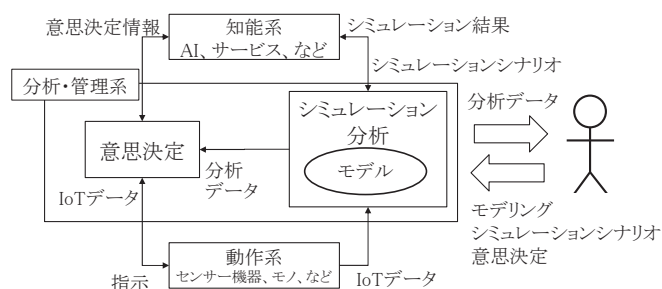


図3 三相型構造と M&S の役割の例

### 4. これまでの研究成果

本研究は、2016 年 10 月より工学研究所内に設置された「企業ロボット開発研究所」を中心に進めている。現在は研究の途上であるが、外部資金の調達への挑戦、成果の発表を継続している。2019 年以降の主な研究成果は、次の様に公表している。

Ishii, N. and Ohba, M., A method of supply chain evaluation based on the structure of an information network, *Procedia Manufacturing*, 39, 1501-1509 (2019).

Shiokawa, H. and Ishii, N., A Method of Collaborative Inspection Planning by Integrating a Production Planning System, *Procedia Manufacturing*, 39, 727-736 (2019).

Matsui M. and Ishii N., A Demand-to-Supply Enterprise robot and its ODICS II type for convenience store application, *Procedia Manufacturing*, 39, 381-388 (2019).

M. Matsui, Theory, Formulation and Realization of Artifacts Science: 3M&I-Body System, Springer (2019).

松井正之, 石井信明, 大戸-藤田理恵, 企業ロボットの開発 (3) : ヒューマナイズド H=W 系ロボットによる企業体の新・方法&時間研究法例, 日本設備管理学会 2020 春季研究発表会, B-1.4, (電気通信大学) (2020).

松井正之, 知識社会における情報不等式問題 II 一知識系ペアマップ創出, カメレオン多様性と人工体マネジメント考一, 第 11 回横幹連合コンファレンス, B-3-1 (2020).

松井正之, 自然対人工体のあるべき姿, 中央 2 重性とカメレオン基準, 第 11 回横幹連合コンファレンス, B-3-2 (2020).

大場允晶, 石井信明, 災害時の対応サプライチェーン情報ネットワーク価値評価, 第 11 回横幹連合コンファレンス, B-3-5 (2020).

### 5. まとめ

本研究では、従来の人工体が動作系と知能系の二相構造ととらえられ、それぞれが個別に先鋭化している状況に着目している。そして両者を結びつける中央相として人間がかかわる分析・管理系を加えた三相構造を提案し、人工体の中央相に着目した研究を進めている。

本報では、その一端として、M&S の活用について考察を行った。本研究では、人間社会となじみのある、人間中心の ICT 共生社会の実現を目指し、科学技術とアートが融合する仕組みを明らかにすることに挑戦をしていく。

### 参考文献

- [1] 松井正之, 石井信明, 山田哲男, 企業ロボットの概念, 工学研究, 2 (12), 158-159 (2019).
- [2] 石井信明, 松井正之, 企業ロボットと分析・管理系, 神奈川大学工学研究, 3, pp.127-128 (2020).
- [3] Greenwood, A. G., A specification for effective simulation project management, *Proceedings of the 2020 Winter Simulation Conference*, 2482-2492 (2020).



# ポリペプチドのフォールディングと集積化により形成される高次構造と機能

亀山 敦\* 森井 尚之\*\*\* 岩岡 道夫\*\*\* 高橋 明\*\*

## Higher Order Structures and Function Formed by Polypeptide Folding and Integration

Atsushi KAMEYAMA\* Hisayuki MORII\*\*\* Michio IWAOKA\*\*\* Akira TAKAHASHI\*\*

### 1. 緒言

本プロジェクト研究は、タンパク質が線維状に集積した構造体であるアミロイド線維に着目し、その特異な高次構造、ペプチド鎖の集積・形成過程の解明、およびそれら構造的な特徴に基づくことで発現する分子機能の開拓を目的とする。アミロイド線維は一般に、数残基程度から 200 残基以上まで幅広いペプチド・タンパク質が多点での水素結合により形成する平行/逆平行  $\beta$  シート構造がさらに集積した、極めて強固な集積構造をもつ (Fig. 1)。これが一旦脳内で生成すると分解が極めて困難であり、アルツハイマー型認知症など多くの病気の原因になることが知られている。これまで、アミロイド線維の分子構造および発症機構の解明が進められているが、適用できる解析手法が限定的であることから詳細な解析は難しく、現在も研究議論が継続している。

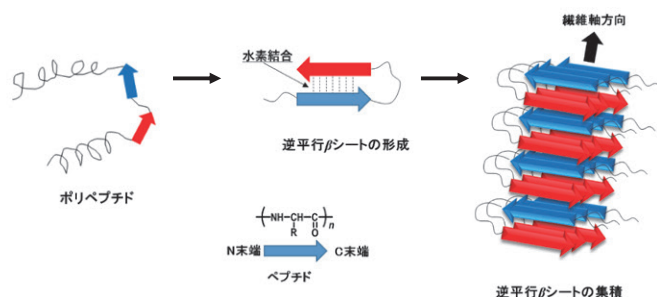


Fig. 1. Hierarchical structural formation of amyloid fibril.

一方で、アミロイド線維の強固な集積構造はシルクやクモの糸の優れた物性の起源になっており、これを再現した生体模倣材料の研究が報告されている<sup>1,2)</sup>。このような背景から、本研究ではシルクフィブロインの部分配列を模したセリン含有 6 アミノ酸残基ペプチド類を合成し、その集積構造の形成について検討を行っている。今年度は 6 アミノ酸残基ペプチドのアミノ酸配列の違いと集積構造との相関や、構造中のセリンの重要性について検討した。

\*教授 化学教室

Professor, Dept. of Chemistry

\*\*助教 化学教室

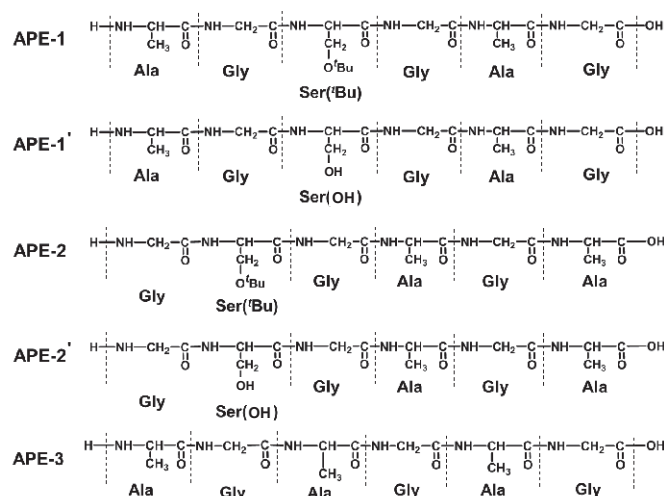
Assistant Professor, Dept. of Chemistry

\*\*\*客員教授 工学研究所

Guest Professor, Research Institute of Engineering

### 2. 6 アミノ酸残基ペプチド類の合成

シルクフィブロインには、アラニン(Ala)–グリシン(Gly)–セリン(Ser)–グリシン(Gly)–アラニン(Ala)–グリシン(Gly) の繰り返し配列が多く見られる。そのため、本研究ではこの配列ないしそれに準じた配列を持つ 4 種類のセリン含有 6 アミノ酸残基ペプチド類、および対照サンプルとしてセリンを持たないペプチドの合成を行った (Scheme 1)。FT-IR, <sup>1</sup>H-NMR, および ESI-TOF MS スペクトル測定により、目的の 6 アミノ酸残基ペプチド類が合成されたことを確認した。



Scheme 1. Structures of the serine-containing peptides.

### 3. ペプチド類の集積構造評価

まず、FT-IR 測定による集積構造評価を行った。既報より、逆平行  $\beta$  シート構造の中で水素結合によって分子同士が連なっているとき 1630  $\text{cm}^{-1}$  と 1700  $\text{cm}^{-1}$  付近に逆平行  $\beta$  シート構造に由来するピークが見られることが報告されている<sup>3)</sup>。また、1650  $\text{cm}^{-1}$  にはペプチド鎖がアモルファス凝集した際の C=O 由来のピークが現れる。APE-1 の FT-IR では、1630  $\text{cm}^{-1}$  と 1700  $\text{cm}^{-1}$  付近にピークが明確に見られ、逆平行  $\beta$  シート構造を形成していることが示唆された。一方、APE-2 ではこれらのピークは小さくなり、さらに 1650  $\text{cm}^{-1}$  付近のピーク強度比が高かった (Fig. 2)。このことから、APE-1 の方がより規則的な集積構造が形成されていることが示唆された。

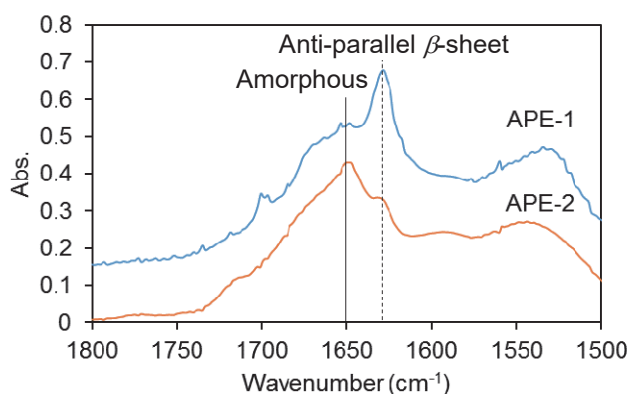


Fig. 2. FT-IR spectra of APE-1 and APE-2.

次に、広角 X 線散乱 (WAXS) 測定によるペプチド類の集積構造評価を行ったところ、いずれのペプチドにおいても約 4.2~4.6 Å の面間隔  $d$  に相当するピークが見られた (Fig. 3)。これは逆平行  $\beta$  シート構造の基本単位である 2 つのペプチド鎖間の一般的な距離に相当し (Fig. 4)、全てのサンプルにおいて逆平行  $\beta$  シート構造が形成されていることが示唆された。一方、ピークの鋭さやアモルファスピークが占める割合が大きく異なることも読み取れた。そこで、各 WAXD スペクトルに対してカーブフィッティングを行うことで集積構造に由来するピークを分離し (Fig. 3)、下記 Scherrer の式を用いて集積構造のサイズを見積もった。

$$D_{hkl} = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta}$$

ここで、 $D_{hkl}$  は集積構造のサイズ (Å)、 $\beta$  はピークの半値幅 (rad)、 $\theta$  は Bragg 角 (rad)、 $\lambda$  は X 線の波長 (1.54 Å)、および  $K$  は定数 (ここでは 0.94) である。その結果を Table 1 にまとめた。Ser 側鎖の OH が *t*-ブチル基 ('Bu) で保護された APE-1 の  $D_{hkl}$  は 116 Å、APE-1' の  $D_{hkl}$  は 28.6 Å であり、APE-1' の方が集積しやすく、より大きな集積体が形成されることが分かった。このことから、APE-1 では Ser 側鎖の 'Bu の疎水相互作用により  $\beta$  シート間のスタッキングを誘起していることが示唆された。また、APE-1 は APE-2 と比べ、逆平行  $\beta$  シート構造由来のピーク面積が大きく、したがって集積構造のサイズは APE-1 の方が大きいことが示唆された。これは、6 アミノ酸残基の配列が逆平行に並んだ逆平行  $\beta$  シート構造の中で、Ser 側鎖

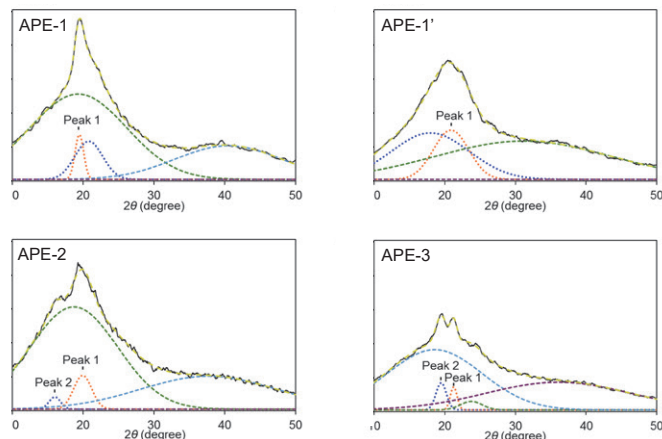
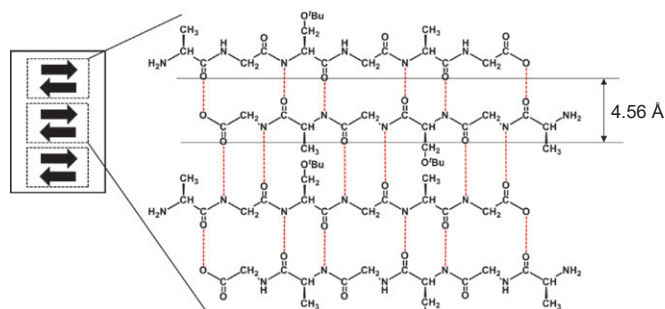


Fig. 3. WAXS profiles of the obtained peptides.

Table 1. Curve-fitted WAXD profiles

Peptide	Peak No.	$d$ (Å)	Peak area ratio (%)	$D_{hkl}$ (Å) <sup>a)</sup>
APE-1	1	4.56	3.2	116
APE-1'	1	4.25	15.7	28.6
APE-2	1	4.45	4.7	52.4
	2	5.54	1.1	85.6
APE-3	1	4.18	1.7	149
	2	4.55	3.0	95.9

a) Calculated from Scherrer's equation.

Fig. 4. Speculated anti-parallel  $\beta$ -sheet structure of APE-1.

の疎水性 'Bu 基が APE-2 に比べて互いに近傍に位置するので、1 枚の逆平行  $\beta$  シート構造が層状に集積しやすかったことが考えられる。また、APE-1 は APE-3 と比べても全体の構造中の集積構造の割合が大きく、6 アミノ酸残基ペプチドの構成成分として、側鎖 'Bu 基を有するセリン (Ser ('Bu)) を 1 つ含有することで集積特性が向上することが示唆された。

以上、本研究ではシルクフィブロインの優れた物性発現に重要な役割を果たしているペプチド部分をモデル化した、部分配列の異なるセリン含有 6 アミノ酸残基ペプチド類の合成を行い、その分子構造・分子配列と集積特性の相関について検討し、Ser 側鎖の疎水性保護基がペプチドの集積化を促進することを明らかにした。

## 6. 参考文献

- (1) O. Rathore and D. Y. Sogah, Nanostructure Formation through  $\beta$ -Sheet Self-Assembly in Silk-Based Materials, *Macromolecules*, 34, 1477-1486 (2001).
- (2) T. B. Yu, J. Z. Bai and Z. Guan, Cycloaddition-Promoted Self-Assembly of a Polymer into Well-Defined  $\beta$  Sheets and Hierarchical Nanofibrils, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 48, 1097-1101 (2009).
- (3) H. Morii, M. Nara, S. Konakahara, T. Tsuji and T. Shimizu, Infrared Studies on Amyloid Structure of Insulin, *Peptide Science* 2014, 307-308 (2015).

# 戸建住宅における全館空調の一次エネルギー消費量に関する研究 (3)

岩本 静男\* 傳法谷 郁乃\*\* 児保 茂樹\*\*\*

## Primary Energy Consumption of Central Air-conditioning in a Detached House

Shizuo IWAMOTO\* Ayano DEMPOYA\*\* Shigeki KOYASU\*\*\*

### 1. 本研究の背景

日本の住宅においては、北海道などの厳寒地域を除いて、部分暖冷房・間欠暖冷房となっている。在室する室・空間のみを暖冷房し、廊下・階段・洗面所・脱衣室・浴室・トイレ等の付室では考慮しないことが多い。また不在の空間では通常暖冷房を入れない。このため、入浴など居室から付室に移動する際に居住者周囲の環境が急変し、血圧や心拍等の急上昇を伴って脳疾患や心臓疾患の危険性が増大するおそれがある<sup>(1)</sup>。特に高齢者が居住する場合には注意が必要となる。

この対策として、常時全館を換気・暖冷房を行う全館空調方式が有効である。外気を取り入れた空調空気を用いるため換気基準は十分満たされており、室内の温熱環境はもとより、優れた空気環境となることも期待できる。空調方式にもよるが付室においても居室とおおよそ同等の気温・湿度となり、温熱環境上のいわばバリアフリーとなる。

### 2. 本研究の目的と方法

温熱・空気環境上は大変望ましい全館空調ではあるが、消費エネルギーが増大する傾向にある。空調対象空間は大きくなり、連続運転であることから運転時間も大きくなる。室内の設定室温を同等として空調機器が同一ならば消費エネルギーは必ず増大する。住宅に対する日本の省エネルギー基準では、全館空調時の消費一次エネルギー量は、一般の部分・間欠空調時のおよそ2倍とされている。

全館空調では室別に風量を制御することで省エネルギー化を図ることができる。平成28年度の省エネルギー基準の改正によりこのVAVによる省エネルギー効果のある程度は評価させるようになったが、十分妥当とはいえない。そこで、本研究プロジェクトでは、商用ソフトのTRNSYSとTRNFLOWによる計算モデルを活用して、学術的に妥当な方法で、空調方式別に、年間の一次消費エネルギーと室内温熱環境を、評価することを目的とする。本稿は本プロジェクトの研究成果を報告するものである。

\*教授 建築学科

Professor, Dept. of Architecture

\*\*t助教 建築学科

Assistant Professor, Dept. of Architecture

\*\*\*特別研究員 工学研究所

Researcher, Research Institute for Engineering

### 3. 研究成果

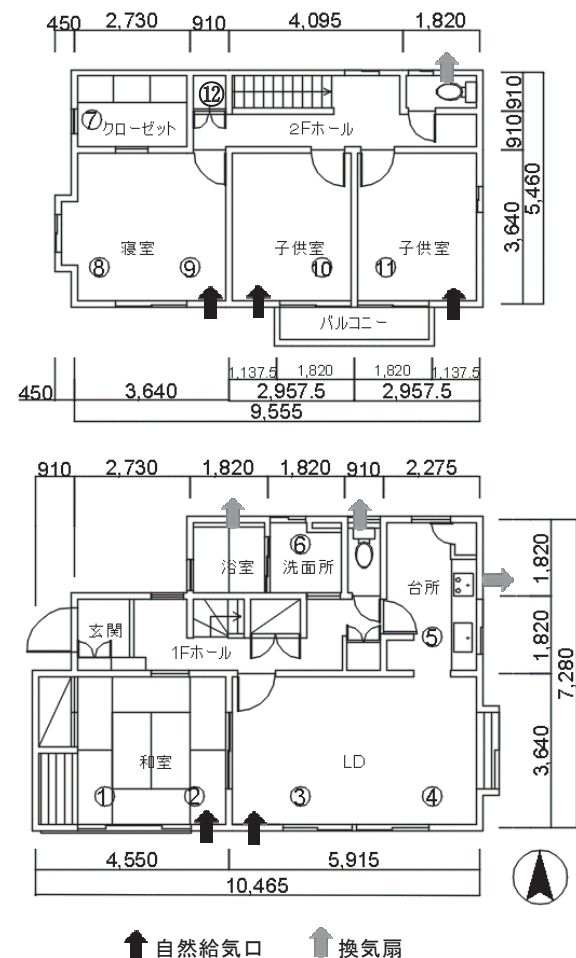


図1 IBEC標準住宅<sup>(2)</sup>

#### 3.1 計算対象と計算条件

計算対象住戸は、図1に示すIBECの標準住宅<sup>(2)</sup>とし、所在地は東京として標準気象データを用いる。常時換気量は160 m<sup>3</sup>/hと設定し、表1に示す標準住宅の在室者スケジュールを採用する。同様に照明、機器発熱のスケジュールも標準住宅のものに従った。ここでは、就寝時には暖冷房を行わない、図1の和室は未使用で在室者なし、と設定されている。

エアコン冷暖房と全館空調を想定して空調負荷の比較を行う。エアコン冷暖房では、図1に示す窓付近に設置した自然給気口、扉下

のアンダーカット、換気扇(40m<sup>3</sup>/h・個)による常時換気を TRNFLOW により計算し、LD、台所、寝室と2個室(以下、居室)の冷暖房・除湿負荷を求める。

全館空調では図1にある①～⑪の吹出口を想定し、⑫の吸込口から空調機へ戻す。冷暖房なしのときには最小風量 160 m<sup>3</sup>/h を各室床面積で按分して供給する。吹出気温を暖冷房時 40℃・15℃とし、⑫の吸込口気温との気温差と風量を用いて暖冷房・除湿負荷を求める。

窓建具によるすきまを評価するために、窓サッシのすきま特性値を調整し、JIS A 2201:2017 に基づいてすきま風量を TRNFLOW で求めて相当すきま面積 C 値が 2.1、4.2 cm<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> となるよう設定した。

表1 在室者スケジュール

居室名		在室者人数[人数]															
		AM 12-13	0-1 13-14	1-2 14-15	2-3 15-16	3-4 16-17	4-5 17-18	5-6 18-19	6-7 19-20	7-8 20-21	8-9 21-22	9-10 22-23	10-11 23-24	11-12			
LDK	平日	AM															
		PM															
	休日	AM															
		PM															
子ども室1	平日	AM															
		PM															
	休日	AM															
		PM															
子ども室2	平日	AM															
		PM															
	休日	AM															
		PM															
寝室	平日	AM															
		PM															
	休日	AM															
		PM															

3.2 計算ケースの設定

計算条件を表2に示す。全館空調では冷暖房のないときは季節別に想定した吹出気温を用いて負荷計算を行った。

表2 計算ケース

		Case1	Case2	Case3	Case4
相当すきま面積		2.1	4.2	2.1	4.2
空調方式		個別空調		全館空調	
設定気温	暖房	22℃			
	冷房	26℃			
吹出気温	暖房	－		40℃	
	冷房	－		15℃	
空調対象室		居室（LD、台所、寝室、子供室2つ）			
空調時間		間欠運転		常時	

VAV の計算では、風量制御を追跡して空調機を含めたシステム全体のシミュレーションを行うべきであるが、計算負担が大きくなる。本プロジェクトでは吹出風量は理想的に決定されると想定して、Case1 の負荷と吹出気温から逆算して決定した。室負荷の発生しないところでは最小風量とする。例えば和室・浴室では常に最小風量である。非空調時は吹出気温は還気と外気の風量比混合とした。

3.3 計算結果

各ケースの冷暖房・除湿負荷の集計結果を図2に示す。加湿負荷は考慮していない。Case1 と Case2 では大きな差は見られず、児保ら<sup>(3)</sup>と同等といえる。自然給気口とすきまによる風量を比較すると児保ら<sup>(3)</sup>では 160 m<sup>3</sup>/h のほとんどが自然給気口から供給されるが、この結果ではすきまと自然給気口とでおよそ半々となっている。外気が導入される風量に違いはないので差が現れなかったと思われる。全館空調では Case3 より Case4 で冷暖房・潜熱負荷が児保ら<sup>(3)</sup>より大きい。二つの違いは相当すきま面積だけであり、他は全く同じ条

件である。全館空調では全熱交換器を用いているが、すきまが大きいと空調機へ戻る風量が少なくなる、還気空気の気温が変化する、などの影響と思われる。暖房負荷が大きい、換気時に季節別の吹出気温を設定したことが原因と思われる。全負荷は Case1 に比較して Case3 が 1.04 倍、Case2 に比較して Case4 は 1.17 倍となっており、全館空調システムを用いる際、建物の気密性によって負荷が変わる場合があることが示された。

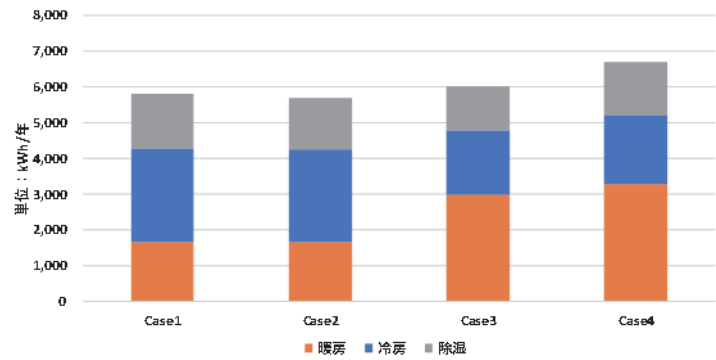


図2 計算結果

4. まとめ

本プロジェクトでは、商用ソフトの TRNSYS と TRNFLOW による計算モデルを構築し、エアコン等による部分間欠空調とダクト式セントラル空調機システムによる全館空調との冷暖房・除湿負荷を比較した。

今後の課題として、①居室や付室の温熱環境、②カーテン等の日射遮へいの導入、③VAV による風量制御の計算モデル化、④消費電力による検討、が挙げられる。より現実的なシミュレーションのために今後も検討を続けたい。さらに、より省エネルギーとなる運転条件の再現方法、HEMS や AI を用いた詳細制御、などの検討を計画している。

(参考文献) (1) 羽山広文・他、人口動態統計を用いた疾病発生に関する研究その3 脳血管疾患と心疾患について、空気調和・衛生工学会大会講演論文集、G-21、2010年9月。

(2) 建築環境・省エネルギー機構：住宅事業主の判断の基準ガイドブック。

(3) 児保茂樹・岩本静男・傳法谷郁乃、住宅における全館空調システムに関する研究、第1報 概要と空調負荷の検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、2019.9。

(4) 児保茂樹・岩本静男・傳法谷郁乃、住宅における全館空調による空調負荷と室内温熱環境、人間-生活環境系シンポジウム、2019.11。

(5) 梶谷達希・岩本静男・傳法谷郁乃・児保茂樹、住宅における全館空調システムに関する研究、第2報 隙間を考慮した空負荷の検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、2020.9。

(6) 梶谷達希・岩本静男・傳法谷郁乃・児保茂樹、住宅における全館空調による空調負荷と室内温熱環境 その2 CAV システムのシミュレーション、人間-生活環境系シンポジウム、2020.12。



# 不確定状況下でのプロジェクトマネジメントの定量的評価の概念

石井 信明\* 横山 真一郎\*\* 劉 功義\*\*\*

## Concept of Quantitative Evaluation of Project Management under Uncertainty

Nobuaki ISHII \* Shin-ichiro Yokoama \*\* Gongyi Liu \*\*\*

### 1. はじめに

神奈川大学工学研究所に設置されたプロジェクト研究 C「不確定状況下におけるプロジェクトマネジメントの定量的管理方法」(以下、本研究)では、社会の損失を招く失敗プロジェクト事例が後を絶たないことを背景に、失敗しないプロジェクトを目指したマネジメント研究を進めている。

現代企業では、プロジェクトの形で多くの問題に取り組んでいる。しかし多数のプロジェクトで、依然として多くの手戻りと無駄が発生しているのが現状である。そのためプロジェクトを成功に導く活動を支援する新たなマネジメント手法の確立が望まれている。これまでに実務家そして研究者から、このテーマに関係して多くの研究成果が発表されている。しかし、これまでのところ経験則に基づく研究、あるいは事例紹介が多く、定量的で科学的なマネジメント手法の構築までには至っていない。プロジェクトの大規模化と複雑化が進む中、プロジェクト推進に必要な経験豊富な技術者・プロジェクトマネジャーも減少傾向にある。このことは、今後の社会の発展への懸念事項と言える。

プロジェクトが失敗する原因の多くは、情報の不確実性にあると言われる。ICT (Information and Communication Technology)の進歩とDX (デジタルトランスフォーメーション)の推進により、より多くのプロジェクトデータと情報が得られるようになっていく。しかし得られるデータと情報には、不必要な、あるいは曖昧な内容が多く含まれている。一方、単に事実としてのデータである出来高を管理しているだけでは事後処理になってしまい、思うようにマネジメントを行うことは出来ない。すなわちプロジェクトの成功には、必要かつ正しいデータと情報を収集・蓄積・抽出する技術の確立と、それらを定量的に分析しマネジメントに活用する手法の開発が必要と言える。

本稿ではこれまでの研究成果として、プロジェクトマネジメントにおける定量的管理の概念の紹介と、定量的管理の例として現在研究を進めているプロトタイプシステムについて述べる。

\*教授 経営工学科

Professor, Dept. of Industrial Engineering and Management

\*\*客員教授 工学研究所

Visiting Professor, Research Institute for Engineering

\*\*客員研究員 工学研究所

Visiting Researcher, Research Institute for Engineering

### 2. 定量的管理の概念

プロジェクト遂行の責任者であるプロジェクトマネジャーは、プロジェクトの進捗状況を把握しながら、プロジェクトを正常な状態に保つための意思決定を常に行っている。そのための支援ツールとして、古くから EVM (出来高管理), PERT をはじめとしたプロジェクトマネジメント技術<sup>[1]</sup>が開発されている。また近年では、プロジェクトデータの蓄積とデータに基づく管理を行うためのプロジェクトマネジメントシステム (PMS) の利用が進んでいる。たとえば、ERP との連携もとれる EcoSys EPC (<https://spltechnologies.net/ecosys-epc/>), ARES PRISM (<https://www.tc-systems.co.jp/epm/products/prism/>), などである。そのほか、プロジェクトチーム内のコミュニケーション用ツールとして、Trello (<https://trello.com/ja>), jira software (<https://www.atlassian.com/ja/software/jira>)などの利用も進んでいる。さらに、TeamPort (<https://www.teamport.com/>)のようなプロジェクトデザイン用のツールも開発されている。これら PMS は、プロジェクトの膨大な時系列データを収集し、プロジェクトマネジャーをはじめとしたステークホルダーに様々な角度から情報を提供することができる。

経験豊富なプロジェクトマネジャーは、これら PMS を活用することで、プロジェクトを適切にマネジメントできる可能性が広がる。しかし、複雑・大規模なプロジェクトでは常に動的な変化が生じるため、正確な状況把握のみでは対応できないことが多い。経験に基づいたプロジェクトマネジャーの判断が必要となる。そこには、プロジェクトマネジャーの感性あるいは個性が反映する。

しかしその「感性あるいは個性」を常に良い方向に引き出すには、幸運に任せるのではなく、データに裏付けされた正しい状況把握が可能となる仕組みと、冷静な立ち位置からプロジェクトマネジャーの高度な意思決定を支援する仕組みが必要となる。

本稿で示す定量的管理の概念は、図1に示すように、プロジェクトマネジャーに対してプロジェクトの状況を正確に知らせる PMS と、プロジェクトマネジャーの意思決定を支援する AI (Artificial Intelligence)手法を用いた仕組みからなる。「感性あるいは個性」を持ったプロジェクトマネジャーに、AI がデータに基づく冷静な状況分析結果を示し、意思決定を支援する仕組みである。

たとえば、経験豊富なプロジェクトマネジャーは、ステークホルダーとのコミュニケーション・データをマネジメントに活用するといわれる。しかし、コミュニケーション・データを大量に収集して

も、経験不足のプロジェクトマネジャーが、それを的確に活用できるとは限らない。このような背景から、コミュニケーションに関する豊富なデータに対して AI 手法を活用することが考えられる。その際、AI が出した結果を人間が判断する、AI と人間の協働作業が必要である。AI を構成する諸技術と協働することで、人間の判断や経験値を補うことが可能となる。たとえば草野有希ら<sup>[2]</sup>は、EVM で得られた情報を基に、早い段階でプロジェクトの成否を予測する方法を提案している。

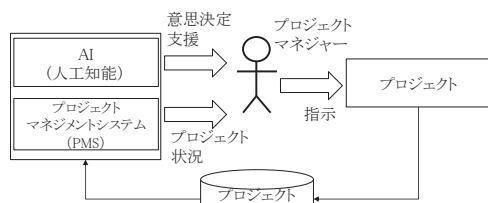


図1 プロジェクトマネジメントにおける定量的管理の概念

### 3. 定量的管理のプロトタイプシステム

定量的管理の概念に基づき、計画段階における定量的なリスク評価を行うプロジェクトマネジメントシステムとして、現在研究中のプロトタイプシステムを紹介する。本システムでは、ステークホルダーのコミュニケーションに焦点を当てることで、プロジェクトの進捗データに潜むプロジェクトの危険性を判断する。このシステムによりプロジェクトマネジャーは、ステークホルダー間のコミュニケーション状況に関する危険性についてシステムから適時提言を受け、影響回避のための対応を判断することが可能となる。

検討中のプロトタイプシステムは、図2に示すように6つのモジュールからなる。すなわち、収集したプロジェクトデータからプロジェクトの状況を評価し、類似プロジェクトとの比較から危険因子の判定を行う。その際、単に判定を示すだけでなく、そのように判定した理由を過去のプロジェクト事例から類推して説明する。

近年、高度なリモートワークやバーチャルチーム化の進展、職場環境のIT化に伴い、企業においてはコミュニケーションに関係する多くのデータが取得可能となっている。本システムでは、それらのデータをプロジェクトの危険性因子を判別するために活用することを検討している。ただし多くのデータは直接的にプロジェクトの結果に影響するとは限らない。そのため進行しているプロジェクトの状況にあわせて変数を選択し、危険性因子を判別するためのモデルを作成する必要がある。本研究では、そのためのプロセスと必要となるプロジェクトデータの構造を明らかにする。

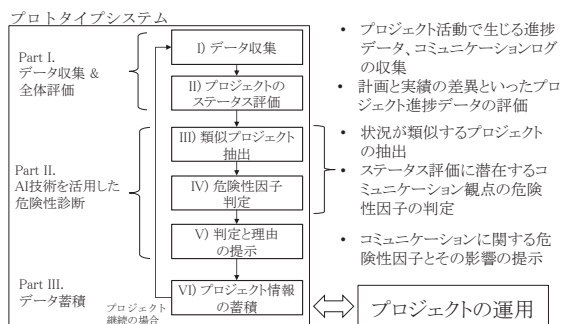


図2 プロトタイプシステムの例

### 4. これまでの研究成果

本研究は、2018年10月より工学研究所内に設置されたプロジェクト研究C、「不確定状況下におけるプロジェクトマネジメントの定量的管理方法」の活動として進めている。現在は研究の途上であるが、以下に2018年以降の主な研究成果を示す。

Ishii, N., Ohba, M., Design and Evaluation of Project Organization based on Communication Links, Proceedings of the 20th Asia Pacific Industrial Engineering and Management Systems Conference 2019, ID85, 1-6, Kanazawa (2019).

Liu, G., Ishii, N., Ohno, K., Yokoyama, S., Project Management Support Using the Log Data of Inter-organizational Communication, Proceedings of the 20th Asia Pacific Industrial Engineering and Management Systems Conference 2019, ID249, 1-6, Kanazawa (2019).

大野晃太郎, 劉 功義, 石井信明\*, 横山真一郎, プロジェクトにおける潜在的危険性診断のためのAI的アプローチ, プロジェクトマネジメント学会 2019年度秋季研究発表大会 (北海道立道民活動センター, 札幌) (2019).

石井信明, 大場允晶, 情報価値に基づくプロジェクト組織の評価と設計 — コミュニケーション計画の視点から —, プロジェクトマネジメント学会 2018年度秋季研究発表大会 (同志社大学 今出川キャンパス) (2018).

石井信明, 管理技術を学ぶ, 第41期 国際ロジスティクス学会 日本支部2月度フォーラム (2019). (招待講演)

### 5. まとめ

現代企業では、プロジェクトマネジメントの高度化が進む一方で、対応可能な人材が減少している。そのため組織で蓄積したデータの活用により経験不足を補うことが期待され、AIの活用も検討されている。本報では、そのための定量的管理の概念と、研究中のプロトタイプシステムを紹介した。プロジェクトの複雑化、大規模化が進む現在、スケジュールとコスト情報のみに頼るプロジェクトマネジメント手法には限界がある。これまでは、経験豊富なプロジェクトマネジャーが不足する部分を補ってきたが、プロジェクトマネジャーの育成には多くの資源の投入が必要であり、限界がある。

本研究を推進することで、プロジェクトの進捗状況を客観的に分析しプロジェクトマネジャーに適時的確な提言を行う仕組みの導入に結び付く可能性があると考えている。そのために、プロジェクトデータの収集と蓄積、各種AI手法を用いた支援システムの確立に向けた研究を推進していく。

### 参考文献

- [1] Project Management Institute, A Guide to the Project Management Body of Knowledge Six Edition, Project Management Institute (2017).
- [2] 草野有希, 横山真弘, 劉 功義, 田村智幸, 石井信明, 岡田公治, 横山真一郎, 経験データを活用したプロジェクト成否逐次予測法の提案, プロジェクトマネジメント学会誌, 19 (3), 29-34 (2017).

# 機械学習を用いた倒産予測モデルの研究

片桐 英樹\* 平井 裕久\* 松丸 正延\*\*

## Bankruptcy prediction model using machine learning

Hideki KATAGIRI\* Hirohisa HIRAI\* Masanobu MATSUMRU\*\*

### 1. 緒言

不確実性が増大する現代において、企業倒産予測に対するニーズと重要性は益々高まっている。倒産予測に関しては Altman[1]の Multiple Discriminant Analysis (MDA) 研究に代表されるように、これまで統計的手法が数多く用いられてきた。一方で、近年の人工知能 (AI) の発展に伴い、機械学習に注目が集まっている。

本研究では、機械学習アルゴリズムの一つで、多くの実問題に対する有用性が示されている勾配ブースティング[2]を用いた倒産予測モデルに焦点を当てる。具体的には、決定木を用いた勾配ブースティングの一種である eXtreme Gradient Boosting (XGBoost) [3]を用いたモデル構築を行う。日経 NEEDS-Financial QUEST2.0 から収集した財務データを用いた数値実験を行い、他の機械学習モデルの性能と比較することにより、提案モデルの有用性について検証する。

### 2. 先行研究

従来からよく知られる機械学習アルゴリズムの一つとして、Support Vector Machine(SVM) [4]がある。SVM は多くの判別問題に対して良い精度を示すことが知られており、倒産・非倒産の判別でも MDA と比べて良い性能をもつ[5]。

Wan and Ni [6]は特徴量選択に対してベジアンハイパーパラメータ最適化を用いた XGBoost を提案し、米国企業の倒産判別モデルを題材した数多くの数値実験を行い、提案モデルの有用性を検証している。

### 3. 本研究の倒産予測モデルとその特徴

本研究では、日本企業の財務データを用いた XGBoost による倒産予測モデルを開発する。倒産予測において MDA よりも良いと報告されている SVM との比較を行い、XGBoost の優位性を確認する。

モデル開発の際には、変数選択を実施して、特徴集合において予測に寄与する部分集合のみを選択する。また交差検証を行い、訓練データと評価用の検証データを分割して性能を計測することで、特定のデータに拠らない汎化能力の高いモデルを得る方法を用いる。

財務指標の選択については、偏りのない多くの財務指標として 115 財務指標を用いる。期間については 1991 年から 2015 年までの 25 年間のデータを使用した。25 年間という長期間の財務指標データを用いることで、倒産企業のサンプル数が多くなり学習データとして十分な量を確保できる。一方で、経済環境が異なる期間を一緒にしてモデルを構築すると予測率が低くなる可能性がある。そこで、本研究では期間の異なる 5 種類のデータセットを作成して対応する。

一般に、倒産予測研究で扱うデータは、非倒産企業数に比べて倒産企業数が極端に少ないという不均衡データセット (Imbalanced Data Sets) と呼ばれる特徴をもつ。本研究ではこの不均衡データセットに対する解決策の一つとして提案されている SMOTO (Synthetic Minority Over-sampling Technic) 手法を用いている。

XGBoost はパフォーマンスの良い手法であるが、複数のパラメータ調整によるチューニングが必要であり、これがモデル性能に影響することも多い。ただし、本研究では最初の試みとして代表的なパラメータをデフォルト値で設定した。なお、本研究で用いるハイパーパラメータは、学習率、最大葉、最大深度などがある。

### 4 実証分析

#### 4.1 データセットの説明

日経 NEEDS-Financial QUEST2.0 から財務データを収集した。データセットは倒産が起きた 1 年前のみの財務指標データセット p1, 2 年前の年度のみの財務指標データセット p2, 3 年前の年度のみの財務指標データセット p3, 2 年前のみの財務データセット p2 を追加した財務指標データセット pp1 と、pp1 に更に 3 年前のみの財務指標データセット p3 を追加した財務指標データセット pp2 の 5 種類を作成した。

倒産予測で考慮する財務指標 (モデルに対する入力データ) の種類は 115 とした。表 1、表 2 に各業種とデータセットの企業 (非倒産企業と倒産企業) の数を示す。

表 1 各業種の企業数

単位:社

	不動産業	建設業	卸売業	サービス業
非倒産企業	135	170	335	449
倒産企業	30	22	12	16

\*教授 経営工学科

Professor, Dept. of Industrial Engineering and Management

\*\*客員教授 工学研究所

Visiting Professor, Research Institute for Engineering

表 2 各業種のデータセットと企業数 単位:社

業種	企業	p	p1	p2	pp1	pp2
不動産業	非倒産企業	512	512	512	512	512
	倒産企業	30	30	30	60	90
建設業	非倒産企業	667	667	667	667	667
	倒産企業	22	22	22	44	66
卸売業	非倒産企業	1316	1316	1316	1316	1316
	倒産企業	12	12	12	24	36
サービス業	非倒産企業	1691	1691	1691	1691	1691
	倒産企業	16	16	16	32	48

4.2 実証分析結果と検討・考察

4.2.1 手法の違いによる実証分析結果と検討・考察

XGBoost と SVM の手法の違いによる結果から、XGBoost の偽陽性率(False Positive Rate)は SVM のそれよりも低い数値を示した。実際には倒産企業を非倒産と判別した企業数の割合が偽陽性率であり、倒産判別においては非常に重要な性能評価基準の一つである。この偽陽性率に関して、XGBoos は SVM よりも低い値を示しており、XGBoos が優れていることが示された。

4.2.2 多期間のデータセットを用いた実証分析結果と検討・考察

XGboost を用いた場合、不動産業、建設業、卸売業およびサービス業の全てにおいて、倒産の 1 年前のみのデータセット p1 を用いた場合の予知精度が p2 と p3 を用いた場合よりも低い値を示した。1 年前のみのデータセット p1 を用いた場合が良い予知精度を示し、先行研究と同じ結果となった。すなわち、倒産年度に近いデータセットを用いたほうが、倒産年度から離れたデータセットを用いるよりも、倒産予知精度が高いことを意味している。

一方、単年度データセットを用いた場合と多期間の複数の年度にわたるデータセットを用いた場合を比較すると、多期間の複数年度にわたるデータセットを用いた場合のほうが高い倒産予知率を示した。

4.2.3 変数選択による予知精度の検討・考察

XGBoost の特徴の一つとして、回帰や判別の結果に大きく寄与する変数を特定できる機能がある。本研究において、倒産予知に寄与する変数を業種ごとにまとめた結果を表 3 に示す。

表 3 倒産予知に重要な財務指標の結果

業種	1位	2位	3位
不動産業	売上高営業外費用比率	純資産増加率	総資本内部留保利益率
建設業	総資本内部留保利益率	有利子負債平均金利 インスタントカバレッジ	自己資本比率
卸売業	金利	有利子負債平均金利	総資本内部留保利益率
サービス業	有利子負債	総資産運転資本比率	総資本営業外収益

重要な財務指標の結果を見ると、業種の特徴が表れている。総資本内部留保率は不動産業で第 3 位、建設業で第 1 位、卸売業で第 3 位と 3 業種で重要な財務指標となっている。総資本内部留保率は、留保利益を総資本で割った値である。したがって留保利益が総資本に対して小さくなると倒産しやすくなる。換言すれば倒産を避けるには、留保利益の減少には注意をする必要があり、留保利益を厚くしておくことが安全性につながるという結果が導き出されてい

る。

また、有利子負債平均金利については、建設業と卸売業の第 2 位に位置する重要変数となっている。有利子負債平均金利は小さいほうが良く、有利子負債金利の増大には気をつける必要がある。

さらに、売上高営業外費用比率が不動産業では第一にランクされている。売上高営業外費用比率は支払利息を売上高で割った値であるので、売上高の減少と支払利息の増大に注意を支払わなければならない。

以上より貸借対照表では内部留保額の減少、有利子負債額の増大、損益計算書では、売上高の減少、支払利息の増大に気を付ける必要性が示唆される。

また サービス業では第 2 位に総資産運転資本比率がランクされた。この比率は運転資本を総資産で割った値である。運転資本の構成要素のうち影響の大きいのは棚卸資産であり、棚卸資産が増大すると経営が悪化する。サービス業の特徴が表れており、妥当な結果が得られたと考える。

5. 結言

本研究では、機械学習を用いた日本企業の倒産予知モデルを提案し、企業の財務データを用いた数値実験により提案モデルの有用性を検証した。勾配ブースティング木の一種である XGBoost は偽陽性率において低い数値を示し、SVM よりも優れた結果となった。予知に用いるデータセットについては、単年度よりも多期間、古いデータよりも新しいデータを用いたほうが倒産予知の精度が高まることも示された。また、業種ごとで倒産予知に重要な財務指標についても明らかにした。

今後の研究として、企業間の関係など財務データ以外のデータを用いた倒産予知モデルを検討している。

参考文献

[1] E. I. Altman, Financial ratios, discriminant analysis and the prediction of corporate bankruptcy, The Journal of Finance, 23(4), 589-609(1968)

[2] J.H. Friedman, Greedy function approximation: A gradient boosting machine, The Annals of Statistics, 29(5), 1189-1232(2001)

[3] T. Chen and C. Guestrin, XGBoost : A Scalable Tree boosting System, KDD '16: Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining August(2016), 785–794, <https://doi.org/10.1145/2939672.2939785>Cornel University, (2016)

[4] C. Cortes and V. Vapnik, Support-vector networks, Machine Learning, 20(3), 273–297(1995)

[5] M. Matsumaru, T. Kawanaka, H. Katagiri and S. Kaneko, Bankruptcy prediction for Japanese corporations using support vector machine, artificial neural network, and multivariate discriminant analysis, International Journal of Industrial Engineering and Operations Management (IJIEOM), 1(1), (2019).

[6] Y. Wang and X.S. Ni, A XGBoost risk model via feature selection Bayesian hyper-parameter optimization, International Journal of Database Management Systems (IJDMS) ,11(1), 1-17(2019)



# 次世代無線通信を支えるマイクロ波・ミリ波・テラヘルツ・

## 光パッシブデバイスの理論設計と応用（第1報）

陳 春平\* 武田 重喜\*\* 穴田哲夫\*\*\*

### Theoretical Design and Its Application in Microwave, Millimeter-wave, Terahertz-wave, and Light-wave Passive Devices for Next-generation Wireless Communications

Chun-Ping CHEN\* Shigeki TAKEDA\*\* Tetsuo ANADA\*\*\*

#### 1. 緒言

近年、次世代無線通信（5G & beyond 5G）、超高速無線 LAN、車載レーダなどのミリ波電磁波機器の研究開発が加速している。5G 無線通信では 24.25~31.0 GHz, 31.8~33.4 GHz, 37.0~43.5 GHz, 45.3~50.2 GHz, 50.4~52.6 GHz, 64.0~76.0 GHz, 81.0~86.0 GHz の帯域の使用が検討されている。新たなワイヤレス無線通信システムの本格的な普及・発展に向けて、重要な高周波フィルタに対して超小型・低損失および高性能化の電氣的仕様を満たす集積化技術の開発が求められている。今後、さらにミリ波からテラヘルツ波帯において利用可能な実装技術の中で、金属/高抵抗シリコンによるフォトリソニック結晶 (MPHC/DPhC) は電磁波回路に重要な役割を果たすことが期待されている。この MPHC 構造の基本的バンドギャップ特性は、2018 年度工学研究所プロジェクト研究報告にて明らかにした[1]。また MPHC 共振器/導波路は、低損失 PCB 基板上に、SIW (Substrate Integrated Waveguide, 別名 Post-Wall-Waveguide) および柔軟なマイクロストリップ線路 (MSL) と共存可能である。本報告では、MSL 励振による正方格子 MPHC インライン形帯域通過フィルタを Step Tune Method と呼ばれるコンピュータ支援の物理構造の最適化を行う[2]。これは従来のように構造全体を一度に最適化（調整）する代わりに、限られた数の物理的寸法のみを最適化（調整）することにより、高速最適化が可能、且つ最終結果の信頼性が高まることを意味する。なお、設計の詳述は紙幅の制限上割愛する。ここでは設計の流れと結果のみを記述する（詳細は文献[2]を参照）。

#### 2. MPHC 誘導性金属ポスト BPF の設計

MPHC 回路は高 Q 特性を有し、高周波帯において、MSL 共振器形

フィルタより、挿入損失とスカート特性の劣化が少なく、理想特性に近い周波数特性を実現することが可能である。今回、筆者等の提案方法では、理想特性を与える全体の結合行列から、考慮する各共振器ごとの小結合行列を算出し、各共振器の実現すべき理想の伝送特性 (S-パラメータ) と順次共振器を追加して電磁界シミュレーション結果を比較して検証する。一方、最近の市販シミュレータには最適化 tool (古典的手法〜最新的手法、さらに先進的トポロジー最適化手法) が組み込まれているか、あるいは自作や他のベンダーのソフトウェアをリンクし、マイクロ波フィルタ等の最適化を提案した論文も幾つか報告されている。しかし、変数の多い複雑なモデルでは所望の解を得るにはかなりの計算時間と計算機リソースを消費し、すべての構造パラメータを同時に最適化する手法は必ずしも効率的とは言えない。また収束解が得られない事もある。特に、MPHC モデルの場合、64bit-PC(メモリ 192GB) で計算しても数日かかり、しかも等リップルのチェビシェフ特性が得られるとは限らない。例えば、MPHC 構造のように微細なメッシュ (分割数) を必要とするモデル ( $N_x \times N_y \times N_z = 1053 \times 444 \times 32$ ) では、短時間で簡単に計算できる回路シミュレータは存在しないので、電磁界シミュレータによる繰り返し計算回数の低減と設計時間の短縮が望まれる (メッシュ数を各方向 2 倍にすると計算時間は約 16 倍になり、またメモリは約 8 倍になる)。筆者等が展開する設計手法は直感的に分かりやすく、あらかじめ外部  $Q_e$  および共振器間の結合度  $m_{ij}$  の設計チャートを準備することで、構造定数を短時間、且つ正確に決定されるという特長を持っている。本報告では、設計例として、25GHz 帯における MPHC 構造の N=3 段対称デュアル金属ポスト結合窓の帯域通過フィルタを結合行列に基づいて設計する。

#### 3. 提案する設計の考え方

本論文で提案した N 段直接結合共振器形帯域通過フィルタの設計法は、以下の 4 点に要約される。

- (1) 外部  $Q_e$ , 結合係数  $m_{ij}$  などの物理構造と回路パラメータの対応関係が直感的にわかりやすい設計パラメータを用いる。
- (2) MPHC-BPF の設計において、すべて電磁界シミュレータと最適化ツールに任せるのではなく、外部  $Q_e$  値と共振器間の結合係数  $m_{ij}$

\*准教授 電気電子情報工学科

Associate Professor, Dept. of Electrical and Electronic Information Engineering

\*\*客員研究員 (名誉教授) 神奈川大学工学研究所  
Guest Researcher, Research Institute for Engineering

\*\*\*客員研究員 神奈川大学工学研究所  
Guest Researcher, Research Institute for Engineering

の設計チャートをあらかじめ用意することにより、構造パラメータの最終設計値に近い初期値を短時間で決定する。その結果、構造パラメータの調整回数を削減し、計算機負荷の軽減を図ることが可能。

(3) MPhC-BPF の段数や帯域幅の変化に対しても、外部  $Q_e$ 、結合係数  $m_{ij}$  の設計チャート[3]に基づいて、共振器のピアホールによる結合窓の構造パラメータを容易に決定される。さらに、MPhC 構造による点欠陥共振器の基本共振モード（直六面体共振器の  $TM_{110}$  のモード）を用いたインライン形狭帯域 BPF を、Cameron 等による一般化結合行列に基づいて、電磁界シミュレータを援用し、MPhC 構造狭帯域 BPF の合成を行う[4]。なお、結合行列に基づく合成法は従来の古典的導波管フィルタの設計理論を包括し、逆行列演算 (Inversion)、相似変換 (Similarity transformation) および共振器ごとに分割 (Partitioning) された伝送特性を自在に取り扱うことができる。また、この結合行列の各要素は各共振器の共振周波数と他の共振器との結合を意味し、各共振器を順次追加するごとに各共振器に対応した結合行列から実現すべき伝送特性が得られる。

(4) 中心周波数近傍において、電磁界シミュレーションの伝送特性を結合行列の伝送特性に一致するように構造パラメータを微調整する。このとき、各段階での微調整はごく少数の構造パラメータなので、計算時間と計算機リソースの節約になる。

4. 設計例

3.で述べた設計手順に沿って BPF の構造パラメータを求め、電磁界シミュレータを用いて局所的最適化することにより、誘導性金属ポスト共振器による 3 段狭帯域 BPF を中心周波数  $f_0 = 24.5\text{GHz}$  で設計した。3 段 BPF の側面図と上面図を図 1(a)(b)、フィルタの周波数特性を図 1(c)に与える。フィルタの構造パラメータを表 1 に纏めている。設計したフィルタは帯域内において、3 つの伝送極を持ち、チェビシェフ型フィルタの理論特性と一致している。また、フィルタを誘電体基板に設計したため、実際の BPF は標準的な PCB プロセスによって作製できることを付記する。

5. むすび

低損失 PCB 基板上に MPhC 線欠陥導波路内に誘導性金属ポスト構造共振器を直列に配置し、急峻なスカート特性を持つ 3 段狭帯域帯域通過フィルタを設計した。また、結合行列に基づく伝送特性、電磁界シミュレーションによる伝送特性より、本設計法の有効性を確認した。本報告では紙幅の制限上、概要のみを述べたが、詳細な理論展開は最終プロジェクト報告に記す予定である。

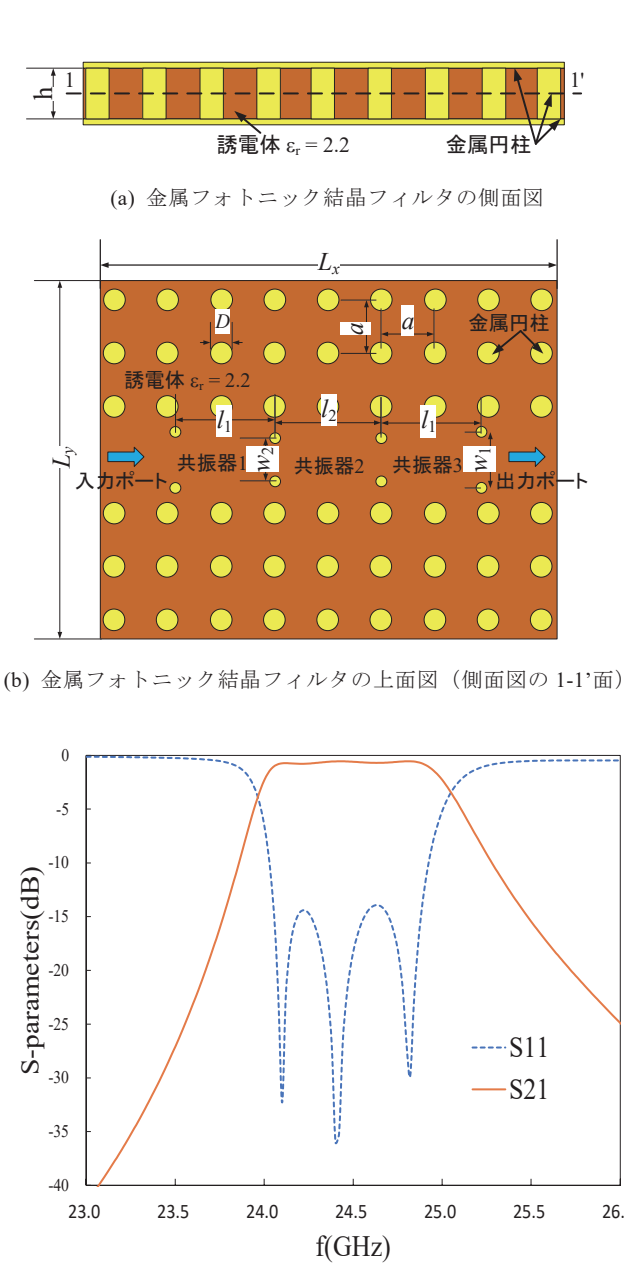
参考文献

[1] 穴田哲夫, 陳春平, 中山明芳, ミリ波・テラヘルツ波帯における金属フォトニック結晶構造デバイスの解析と応用に関する研究, 神奈川大学工学研究所所報, No.39, pp.130-131, 2020.

[2] 陳春平, et. al., 結合行列に基づく金属フォトニック結晶構造による準ミリ波帯域通過フィルタの合理的設計, 電子情報通信学会論文誌 C, Vol.J103-C, No.8, pp.356-365, Aug. 2020.

[3] J. S. Hong, M.J. Lancaster, Microstrip Filters for RF/Microwave Applications, John Wiley & Sons Inc, pp.104-116, 2001.

[4] R. J. Cameron, R. R. Mansour, C. M. Kudsia, Theory and Design of



(c) 金属フォトニック結晶フィルタの周波数特性

図 1 設計した 3 段直結型金属フォトニック結晶フィルタの構造図

表 1 設計した金属フォトニック結晶フィルタの構造パラメータ (単位:mm)

$a$	$D$	$d$	$l_1$	$w_1$	$l_2$	$w_2$
3	1.2	0.6	5.624	3.15	5.92	2.43
$L_x$	$L_y$	基板パラメータ RT/duroid5880				
25.5	19.5	$\epsilon_r = 2.2 \pm 0.02, h = 0.508\text{mm}$				

Modern Microwave Filters and Systems Applications, John Wiley & Sons Inc. Hoboken, New Jersey, pp.544-552, 2007.

# 医療従事者用感染対策防護服に関する研究（1）

傳法谷 郁乃\* 内田幸子\*\* 岩本静男\*\*\*

## Study on Protective Clothing to Prevent Infection for Healthcare Workers (1)

Ayano DEMPOYA\* Yukiko UCHIDA\*\* Shizuo IWAMOTO\*\*\*

### 1. 本研究の背景

近年、エボラ出血熱や重症急性呼吸器症候群（SARS）、新型コロナウイルス感染症（COVID-19）など、局地的あるいは人物の移動による輸入・新興感染症が人々を脅かし、問題となっている。わが国においても COVID-19 の流行当初、感染症に罹患した患者に対応するため、多くの医療従事者が個人防護具（PPE）を着用し、防護服やマスク不足に陥り、全国的な問題となった。新興感染症の特性が不明な初期段階において、罹患した患者に最初に対応する医療従事者は、二次感染を防ぐために PPE を着用し、患者の移乗など活動量の多い作業とともに、精密な作業を行わなければならない。

医療従事者へのインタビュー調査では、防護服の着用により、「暑い」「汗のため防護服の中は湿りが高く気持ち悪い、不快感」などの熱ストレスに対する声や、「動きにくい」、「着脱が困難」など動作性についての問題<sup>1)</sup>のほか、音の聴取が困難であることが問題点の一つとして挙げられた<sup>2)</sup>。防護服着用時の熱ストレスに関する先行研究はいくつかみられ、防護服の密閉性・防護性が高いことにより通気性や透湿性が低い素材が用いられていることが要因であると考えられている<sup>3)</sup>。医療従事者の二次感染を防ぐためには、身体を安全に防護し、快適かつ円滑に活動をすることができる、適切な個人防護服を着用することが求められる。

### 2. 本研究の目的と方法

本研究では、輸入・新興感染症等に対する防護服に着目し、医療従事者や救急などの一次対応者が防護服を選択・使用する際に生じる問題点について検討し、医療従事者の作業に支障のない防護服の改善策を提案することを目的とする。そのため、医療従事者から問題点として意見が挙げられた以下の2点について検討する。

#### 2.1 防護服の動作性評価

防護服着用時の動きにくさを改善するため、着用動作中に身体へかかる圧力を測定する。また、三次元動作解析により、着脱時の動作効率を評価する方法を検討し、評価を試みる。

#### 2.2 防護服着用時の聞き取りにくさの評価

防護服着用時の聞き取りにくさを改善するため、防護服着用時のうるささ及び外部からの音の聞こえにくさについて検討する。

### 3. 2020 年度の成果と今後の課題

2020 年度の成果としては、各評価のための実験方法や実験条件、プロトコル等の構築が主な成果である。

動作性評価については、三次元動作解析を用いた予備実験により、実験プロトコルを作成した。まだ十分に動作効率を評価する解析方法を見出すまでには至っておらず、来年度継続して検討を進める予定である。聞き取りにくさの評価については、まず防護服着用動作時に発生する音の収録と、その音のうるささ評価を試み、繊維製品消費科学会 2020 年次時大会で報告した<sup>4)</sup>。現在、さらに詳細な解析を進めている。

今後は新型コロナウイルス感染症の流行が落ち着き次第、2020 年度の成果をもとに、それぞれの本実験を行い、得られた結果から防護服の改善策を検討したい。

謝辞

実験のご協力並びにご助言いただきました茨城大学准教授 辻村壮平先生、神奈川大学教授 安田洋介先生、技術職員の関根秀久様、同大学大学院千田真人様に深くお礼申し上げます。

本研究の一部は、一般社団法人日本繊維製品消費科学会創立 60 周年記念事業若手研究者を育成するための研究委託助成によって行われたものです。記して深謝いたします。

（参考文献）

[1] 森本美智子, 内田幸子, 田辺文憲, 荒川創一, 医療従事者における感染制御,特に感染防護服の現状における問題点からの研究成果をふまえた提言: 将来への感染防護服の改良に向けて, 日本防菌防黴学会誌, 48 (9), 493-499 (2020).

[2] 内田幸子, 他 7 名, 感染対策用防護服に対する医療従事者へのインタビューをもとにした着用実験評価, 日本防菌防黴学会第 43 回年次大会, 26Pp-D17 (2016.9)

[3] 内田幸子, 傳法谷郁乃, 他 4 名, 感染防護服着用時の生理・心理反応に関する研究繊維製品消費科学会誌, 62 (1), 44-53 (2021)

[4] 傳法谷郁乃, 辻村壮平, 内田幸子, 小柴朋子, 感染防護服着用時の看護動作において発生する騒音のうるささ評価, 日本繊維製品消費科学会 2020 年次大会発表要旨, 46 (2020.6)

\*特別助教 建築学科

Assistant Professor, Dept. of Architecture

\*\*客員教授 工学研究所

Professor, Research Institute for Engineering

\*\*\*教授 建築学科

Professor, Dept. of Architecture

## 超小型ロケット向け低コスト複合構造の開発

正井 卓馬\* 高野 敦\*\* 喜多村 竜太\*\*\*

### Development of Low Cost CFRP Structures for Micro Rocket

Takuma MASAI\* Atsushi TAKANO\*\* Ryuta KITAMURA\*\*\*

#### 1. 緒言

近年、ベンチャー企業や研究機関によって数kgから数十kg程度の超小型衛星の開発・打ち上げが活発になっている。しかしこれらの衛星は大型ロケットによる大型衛星の打ち上げに相乗として打ち上げられることが主流であるため、打ち上げ時期や軌道は大型衛星により決定されてしまい、超小型衛星側としてはこれらの選択の自由度がほとんどない。更なる開発機会の確保のためには、超小型衛星打ち上げ専用で、かつ低コストな超小型ロケットの開発が望まれている。低コスト化のためには、火薬など爆発物を用いないため、運用管理コストを含めたトータルコストが安価となるハイブリッドロケットが着目されている。一方で多様な衛星の軌道投入を実現化するためには軌道投入質量の増大が必要であり、エンジン推力の増大とともに、ロケット全体の軽量化も重要となる。しかし、従来からロケットの軽量化のための研究は多く行われているが、低コスト化を意識した研究・開発は充分に行われて来たとはいえない。このため、更なる軽量化を志向し、ロケット構造体の Carbon Fiber Reinforced Plastics (以下 CFRP) 化への研究開発成果について示す。本資では、特に酸化剤タンク等の結合部に用いられる CFRP ねじの開発についてその開発概略を示す。

#### 2. CFRP 製ねじの開発意義

ロケット構造体の CFRP 化に関しては、当研究グループにおいては先行事例[1], [2]に代表されるように単体の構造物の CFRP 化に関しては、一様の用途を得ている。一方、これらを構造体として組立て、ロケット構造体として成立させるためには、これらの構造体を結合するための機能部品が必要となる。一般的な金属タンクでは、多くの部品を一体成型で製作し、この結合部にはねじが用いられるのが一般的である。これは各結合部は一回のみの結合ではなく、製造・試験において、調整のために何度となく結合・分離・再結合が必要となる場合もある。そのため、分離・再結合を簡単に実現することが可能となるねじ構造が結合部に用いられることになる。ねじ

部は複雑な形状を有しているため、一般的には、金属材料にて製造されることになる。CFRP 製タンクと金属製ねじ部品では、線膨張係数（以下 CTE）が大きく異なり（例えば CFRP の CTE $\approx$ 0PPM, AL の CTE $\approx$ 23PPM）、製造時や試験時の温度変化により、結合部間に隙間を生じる、もしくは、高い熱応力が発生し、破損を誘発する可能性を有することになる。これらの課題を解決するためには、ねじ部を CFRP にて製作することが一つの解決策となる。

#### 3. CFRP 製ねじ試作試験

ねじは、その機能から特殊形状をしており、この特殊形状をそのまま CFRP にて製造した場合（切削加工等の例）図 1 に示すように、外形を樹脂にて成形することになるため、ねじ部に作用するせん断荷重を樹脂にて耐荷することになるため、強度的に不利になる。

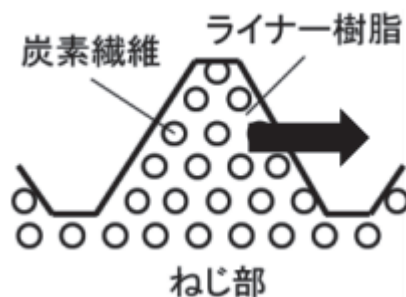


図 1 切削加工による CFRP ねじ

当研究グループにて適用検討している CFRP ねじはタンク等圧力容器に使用するものであるため、必然的に耐荷重が高いものである必要がある。従って、図 1 のような樹脂の強度に依存するねじ部では適用が難しく、図 2 に示す丸ねじで以降は検討を行うこととする。

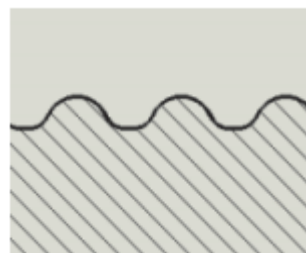


図 2 丸ねじ

\*客員研究員 工学研究所

Research Institute for Engineerin

\*\*准教授 機械工学科

Associate Professor, Dept. of Mechanical Engineering

\*\*助教 機械工学科

Assistant Professor, Dept. of Mechanical Engineering



丸ねじの場合、丸ねじの形状の型にプリプレグを積層することで、切削加工を行わずにねじ形状の成形が可能となった。

積層構成は $[0/h/90/h/0/h(1/2)]_s$ とし、図3に示すプリプレグ積層のための型は3Dプリンタで成形を行い、図4に示す試験コンフィギュレーションにて引っ張り試験を行い強度データの取得を行った。

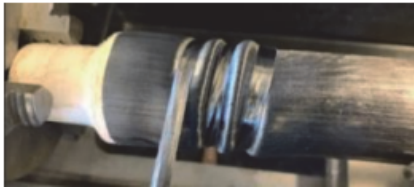


図3 帯(h)の巻き付け



図4 試験セットアップ

引っ張り試験の結果を図5に示す。この試験結果からCFRP製モーターケースを図6のように設計した。

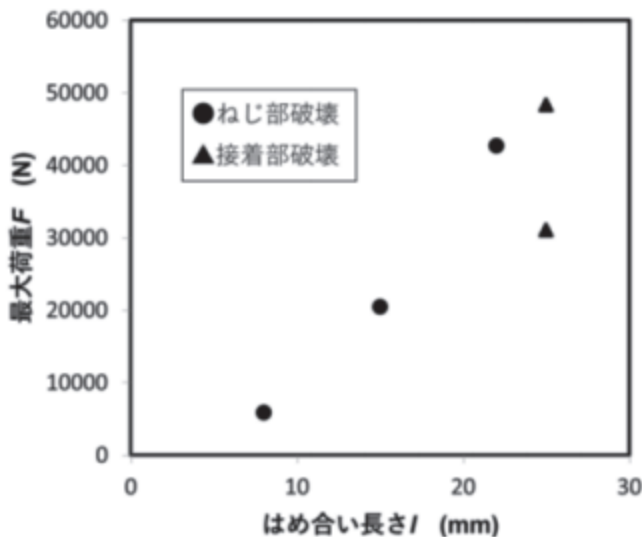


図5 引張試験結果

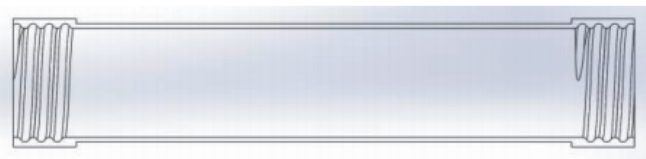


図6 CFRP製モーターケース断面図

#### 4. 燃焼試験

図6に示すCFRPモーターケースを用いて、2019年7月14日に神奈川大学湘南ひらつかキャンパス内にて燃焼試験を行った。燃焼試験の様子を図7に、燃焼試験中の燃焼室内圧力の時刻歴データを図8に示す。燃焼試験は問題なく正常に終了した。燃焼試験時にCFRPモーターケースには、外観からは特に異常を確認することはできなかった。また、燃焼試験後のCFRP製モーターケースを確認したところ、ねじ部・胴体共損傷はなかった。



図7 燃焼試験の様子

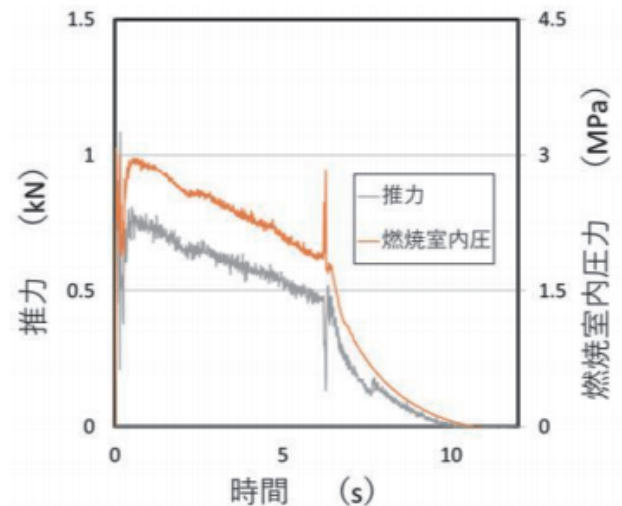


図8 燃焼試験時の推力及び燃焼室内圧の時間履歴

図8より、推力、燃焼室内圧の時刻歴データには、燃焼中に特に異常を示すデータ挙動をみることはなく、燃焼試験中に破損による圧力低下等の異常はデータからは確認できない。よって、今回開発したCFRPねじ部を擁するCFRP製モーターケースは所定の性能を発揮できたと判断している。

#### 5. 結言及び今後の課題

今回設計したCFRP製ねじは今回の燃焼試験に耐荷することができたが、試験データの蓄積も少なく、製品のバラつきを考慮した場合、今後も同様に要求性能を満足するかはまだ未知数である。今後想定されるハイブリッドロケットの大型化に関しても対応できるように設計の高度化が必要になる。これらの高度化及び製品のバラつきを考慮しても要求性能を満足するように開発を行うとともに、他部品も並行して開発することが必要となる。これらを考慮して、今後開発計画を策定していく予定である。

#### 参考文献

- [1] 西野沙也佳, 高野敦, ハイブリッドロケットにおけるFRP製軽量酸化剤タンクの開発, 日本航空宇宙学会第50期年会講演会講演集, 2019
- [2] 伊藤直由, 高山泰成, 鈴木直人, CFRP円筒の強度試験とハイブリッドロケット強度設計, 神奈川大学卒業論文, 2016



## 7. 工学研究所テクノサークル

- |     |                                 |                   |
|-----|---------------------------------|-------------------|
| 7-1 | テクノサークル 「けんちくをつくる会」 2019 年度活動報告 | 吉岡 寛之、林 淳平        |
| 7-2 | テクノサークル KURAFT 2019-20 シーズン報告   | 山崎 徹、山口 光弘        |
| 7-3 | 「神奈川大学宇宙ロケット部」 活動報告 (2019)      | 高野 敦              |
| 7-4 | 神奈川大学ロボットプロジェクト活動報告             | 江上 正、谷村 草太、野中 祐太郎 |
| 7-5 | 2020 年度ものづくり・電子工作テクノサークル活動報告    | 土屋 健伸             |





# テクノサークル「けんちくをつくる会」2019 年度活動報告

吉岡 寛之\* 林 淳平\*\*

## Reports of Annual works of the Techno Circle “Tuku-Ken”

Hiroyuki YOSHIOKA\* Junpei HAYASHI\*\*

### 1. 活動の背景と目的

一般的に建築デザイン教育は、講堂内の座学による設計演習で行われている。そこでは、社会的背景、敷地条件、様々な人の活動などをイメージしながら建築のデザインを考える。そのため、実際の空間体験に関係した、利用者の活動に触れる機会は少ない。建築サークル「けんちくをつくる会」（通称つくけん）では、座学で得られない建築体験を重視した活動に取り組み、今期で9期目を迎えた。今年度は3年生、1年生が中心となり活動を継続してきた。一つの建築をつくるプロセスから、共同で建築をつくる経験から、参加学生の企画力、行動力、調整力を向上することを目的としてきた。

### 2. これまでのつくけんの活動

学生が主体となり、毎年春に活動の目的や内容を話し合い、1年間の取り組みについて検討する。どのような建築空間をどのような場所で、どのようにするか、必要な予算手配や敷地交渉など、建築をつくる全てのプロセスを学生自身が行うことがルールとなっている。授業の設計課題とは異なり、予算や敷地など条件を整理し、自らが決めたテーマにそって建築空間をデザインして、材料の特徴を理解して、加工や組み立てを考え、実際に立ち現れる「建築」をつくる。設計演習課題では得られない、建築に対する興味や好奇心が生まれ、より建築デザインを身近な存在として実感することを大切にしている。実際に建築を使う利用者に対する細やかな配慮もイメージできる思考の向上へとつながる。今期も六角橋商店街の商店会の方々と連携し、商店街イベントに合わせて休憩所やステージのデザインを行った。これまで、竹・布・段ボール・紙管・角材・プラスチック段ボールといった材料を対象に、その特性を活かした空間デザインの検討を進めてきた。（表1、写真1）

表1 各年度の建築物の敷地、用途、材料

年度	敷地	用途	材料
1期 2011	旧3号館前 公開空地	神大フェスタ 休憩所	竹
2期 2012	東屋前空地	神大フェスタ 休憩所	布
3期 2013	六角橋商店街	どっきり闇市 ライブ会場	ダンボール
4期 2014	六角橋商店街	どっきり闇市 ライブ会場	紙管+ 3Dプリンター
5期 2015	六角橋商店街	どっきり闇市 ライブ会場	角材
6期 2016	六角橋商店街	食べくら横丁 ライブ会場	プラスチックダ ンボール
7期 2017	海、山、原っぱ 住宅街、公園	休憩所（フォリー）	単管パイプ+ 布
8期 2018	六角橋商店街	食べくらナイト 休憩所	角材+合板
9期 2019	六角橋商店街 公園	食べくらナイト 休憩所（フォリー）	竹+麻



写真1 2018 年度活動「400mm キューブの組合せ」

### 3. 2019 年度の活動「竹と麻布による空間の仕切り」

9 年目となる 2019 年度は、これまで以上に利用者の活動に注目することを目的とした。竹と麻布を用いて一時的な居場所の空間(フォーリー)を作成し、配置や視線の通り方、空間としての閉じ方を変化させることで、それぞれの組み方や周辺状況により、変化する人の活動を観察することが活動の目的とした。製作する居場所の空間は、簡易に解体し組み立てることができるように、ビスなどは使用せず、麻紐を用いた竹垣に使用される角縛りの方法で接合し組立を行った。

竹で三角柱の骨組みを組み立て、ねじれ防止に回転方向が対になるよう、斜めに二本の竹材を接合した骨組みを基準とした。麻布を面材として一面閉じる場合、一部分だけ開ける場合など、原寸でつくりながら様々な検討を行い、それをもとに、竹を用いた照明、竹と麻紐を用いた椅子をデザインし製作した。照明や椅子は、人が滞在するためのきっかけとなり、人の活動と空間の関係を生み出す重要な役割を担うことがうかがえた。

昨年から引き続き、岸根公園と、六角橋商店会の方々のご協力のもとで「食べくらナイト」で、実際にデザインして製作した椅子やフォーリーを設置した。「食べくらナイト」では家族連れなど複数人による参加者が多く、フォーリー内部で過ごす方が多く見受けられた。内部を感じる空間になると、空間内に人の意識による重心が生まれ、自然に視線や体が向き合うようになっていた。内部に椅子や照明を設置することで、より、その傾向は強くなり、外部に設置した場合より効果が見受けられた。

今年度はフォーリーを作成し、利用者の行動を観察する中で、いくつかの発見があった。そのなかでも、小さな空間において、家具の配置や空間を設えることで、人の意識による重心をつくりだすことができた。意識の重心をつくることで、利用者はその空間をより活用した空間体験ができていた。このことは今年度の活動だけではなく、様々な空間の設計において展開できる成果である。空間利用者の行動を観察することを活動目的として、このような成果が得られたことは参加学生の熱心な取り組みによるものである。(写真 2.3)



写真 2 「食べくらナイト」でのフォーリーの設置



写真 3 岸根公園での椅子の設置

### 4. 活動の展望

大学から出て、社会の関わりの中で、授業だけでは味わえない建築の魅力や楽しさを実感してもらうことが、このサークルの設立目的となっている。昨年から継続している 3 年生のメンバーと新入生による共同作業で活動に取り組み、例年と異なった利用者の行動に焦点をあてて進めてきた。今回の活動から、自分たちの無意識な行動に、これまで以上に意識的に気づくきっかけにもなったように思われる。自分たちで考え、複数人で試行錯誤を繰り返しながら、一緒に建築空間を作り上げ、訪れた多くの人に利用してもらうという経験はとても貴重なものとなり、さらに建築への興味がふくらみ、関心が深まったと思われる。参加学生の卒業後の進路は様々であるが、つくけんの活動がこれから社会で建築に携わっていくときの助けとなり、参加したメンバーの活躍につながれば幸いである。

\*特別助教 建築学科

Assistant Professor, Dept. of Architecture

\*\*学部生 4 年生

Graduate, Dept. of Architecture

# テクノサークル KURAFT 2019-20 シーズン報告

山崎 徹\* 山口 光弘\*\*

## Activity Report on the Techno-circle “KURAFT”

Toru YAMAZAKI\*

Mitsuhiro YAMAGUCHI\*\*

### 1. はじめに

近年の工学系大学では、実習や設計・製図などのカリキュラムが減少している。そういった状況を鑑みて、学生フォーミュラ大会は、学生自らがチームを組み1年間で1人乗り小型レーシングカーを開発・製作することによって、学生がものづくりの本質やそのプロセスを学び、ものづくりの厳しさ・おもしろさ・喜びを実感することを目的に掲げている。2003年から米国「Formula SAE®」のルールに準拠し、全日本学生フォーミュラ大会が開催されており<sup>(1)</sup>、走行性能だけでなく、車両のマーケティング、企画・設計・製作、コスト等のものづくりにおける総合力を競う。また、2013年からEV（電気自動車）クラスが設立され、駆動ユニット以外はほぼ内燃機関エンジン車両と同じルールでEV車両の性能を競っている。

本学テクノサークル KURAFT は2013年10月に設立され、毎年9月に開催される全日本学生フォーミュラ大会への出場を主な目標として活動している。また、地域貢献活動の一環として神奈川県下の中小企業と連携して展示会にて車両展示を行っている。これは神奈川大学 KURAFT の広報活動であるとともに、支援企業の技術に社会に広めることを目的としている。

### 2. KURAFT 2019-20 シーズン

#### 2. 1 車両設計・製作

2020年大会向けの車両外観を図1、主要車両諸元を表1に示す。トラクティブシステム（モータ/インバータ/バッテリー式のシステム）を一新し、加速力の高い車両を設計した。そのほかの主要構造は前年度車両を踏襲して信頼性のある構造を採用した。パワーウェイトは8.6 kg/kW から 7.23 kg/kW へ向上し、2000ccのスポーツカーと同程度の数値となっている。

電気設計ではこれまでの改善点をまとめ、シンプルで堅牢な回路設計を行った。また、マイコンを用いた CAN 通信や各基板のプリント基板化といった取組みに学生自ら挑戦している。

機械設計ではドライバーの姿勢をモックアップで乗車姿勢を確認しながら主要部品（ドライバ、バッテリーコンテナ、モータ）の位置

を決定した。トラクティブシステムの容積は増加したが、ドライバの下にバッテリーコンテナ（図2）、背後にモータを搭載することで車両サイズを維持している。

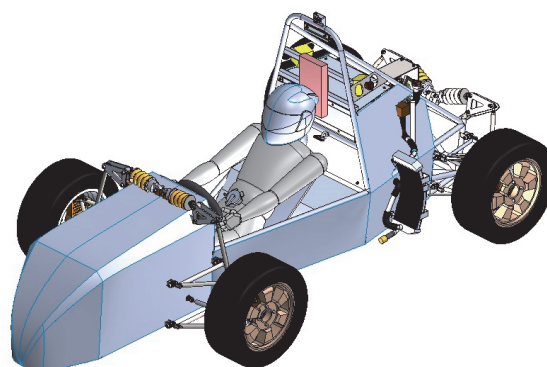


図1 KF-06EV 外観

表1 KF-06EV 主要諸元表

全長×全幅×全高	2730mm×1440mm×1220mm
ホイールベース	1650mm
トレッド	1250mm
車両重量	340kg
フレーム構造	鋼管スペースフレーム
モータ出力	47kW
バッテリーシステム	リチウムイオン電池 350V/7.2kWh
ステアリング	ラックアンドピニオン
サスペンション	ダブルウィッシュボーン
ブレーキ	4輪油圧ディスク式

さらに、今までは構想段階から車両重量を検討しても、実際のラップタイムを想定することが困難であった。そのため闇雲な軽量化や安易な部品追加を行ってしまい、結果として重い車両ができあがることが多かった。これを解決するために、ラップタイムシミュレータソフト（OptimusG）の学生フォーミュラ向けのデータ作成を行った。これにより最適な減速比や車両質量のラップタイムへの影響が検討できるようになった。

\*教授 機械工学科

Professor, Dept. of Mechanical Engineering

\*\*教務技術職員 機械工作センター

Technical Assistant, Mechanical Engineering Factory



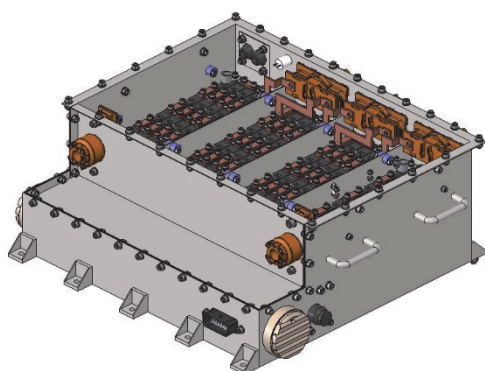


図2 KF-06EV 用バッテリーコンテナ

## 2. 2 コロナウイルスの影響

コロナウイルス感染拡大の影響で 2020 年大会は中止が発表され、本活動もオンラインでの活動を強いられた。車両製作は溶接機/フライス盤/旋盤などの大学設備が必要でありオンラインでの活動は非常に困難であるが、オンラインでのセミナー参加、新入生勧誘、月間報告会の実施、OB/OG 講演などを行い 2021 年大会への参加の準備を行っている。

一般的に言われている通りオンラインセミナー、講演、報告会は物理的距離や時間的制約が緩和されるので例年より充実した内容となった。新入生の参加希望者は例年より多く、現在 5 名の学部 1 年生が参加し、KURAFT は総勢 10 名で活動をしている。

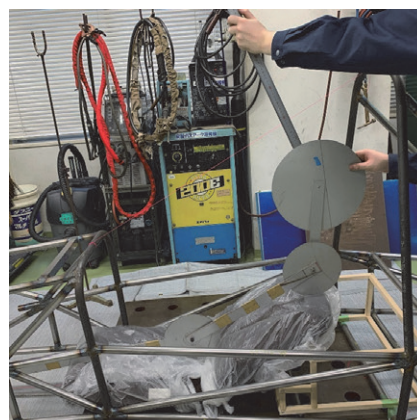


図3 ドライビングポジション確認の様子

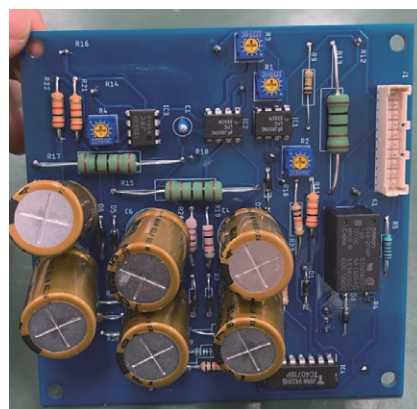


図4 オリジナルのプリント基板

## 3. 今後の展望と業界の流れ

### 3. 1 今後の展望

トラクションコントロールシステム(以下 TCS)、運転支援システムを順次導入していく予定である。

TCS は一般的なスポーツカーには採用されているが、学生フォーミュラ車両においては採用例が少ない。これはまだ ICV(ガソリン車)の参加台数が多くクラッチミートによってドライバがホイールスピンを制御しているからである。ICV に比べて EV はモータの応答性が高いのでクラッチレスの EV はドライバによるホイールスピンの制御が難しい。そのため、車速センサと加速度センサを併用した TCS の導入を計画している。これにより未熟なドライバでも効率の良い加速を行えるようになる。本運転支援システムは、タイヤのグリップ限界を視覚化しドライバの技量に依存せずに走行を支援するシステムである。具体的には加速度センサで計測した加速度を摩擦上に表示させドライバがグリップの限界を把握できるようにする。これにより初心者でも車両の限界付近の性能を発揮しやすくなる効果が期待できる。いずれの機能も学生フォーミュラ車両においては採用例が少ないが高出力の EV 車両で好成績を収めるには必要な機能である。

また、KURAFT は現在 172 位の学生フォーミュラ世界ランキングを 3 大会以内で 100 位以内を目指している。これはチーム目標の”日本大会で総合上位 1/3 に入る”を安定して達成すれば実現可能な順位である。

### 3. 2 EV への転換化の流れ

自動車業界や大会全体としてガソリン車から EV への転換が模索されており、EV の製作経験が業界から求められる時代になってきた。今後も本活動を通して”実践的なものづくりの場の提供”と”優秀な人材の輩出”をしていきたいと考えている。

## 4. 謝辞

KURAFT は神奈川大学工学部特別予算と以下の企業の支援を受けて活動を行っている。関係各位へ感謝の意を表する。

川崎市産業振興財団、日本モレックス、日立金属、三菱自動車工業、西川精機製作所、アナログデバイセズ、堤工業、オートモーティブエナジーサプライ、SEVCON JAPAN、オズコーポレーション、D-jac、NTN、ヒラミヤ、サイマコーポレーション、ソリッドワークス・ジャパン、ミスミ、日信工業、トーテックアメニティ、サトーパーツ、オサダ、矢崎総業、富士電機、HPI、重松製作所、SHIFT UP、キタコ、TGM、FCC、他 30 社(順不同)

## 参考文献

- (1) 全日本学生フォーミュラ大会ホームページ,  
<http://www.jsae.or.jp/formula/jp>
- (2) Formula Student Electric - World Ranking List,  
<https://fs-world.org/E/>



# 「神奈川大学宇宙ロケット部」活動報告（2019）

高野 敦\*

## Annual Report of “Kanagawa University Space Rocket Club” in 2019

Atsushi TAKANO \*

### 1. 緒言

「神奈川大学宇宙ロケット部」は、座学で得た工学を、ハイブリッドロケットの設計・開発、打ち上げを通じさらに深く実践的に学ぶための場として 2014 年 9 月に設立された。その活動は工学部機械工学科航空宇宙構造研究室（以下、「研究室」と呼ぶ）と一体で行いつつも、その年々の学生の特性に合わせながら、卒業研究としては取り組みづらい製品開発などでは研究室の活動とすみ分け、機体の製作や試験設備の構築、試験の実施など研究室の活動と重なる部分では 1 年次から経験を積んだロケット部学生が逆に 4 年次から研究室に配属された学生を指導するなどして、相互に補完しあいながら活動が続けてきた。その結果、2018 年には研究室学生が主導して設計したロケットを研究室とロケット部で 1 機ずつ製作し、実際の打ち上げにおいては研究室機体の直前で不具合によりロケット部機体を打ち上げ、高度 6204m と国内のハイブリッドロケット団体としては 2 位となる記録を樹立した<sup>[1]</sup>。2019 年は研究室主導で進められたエンジンの開発にトラブルが続き、打ち上げには至らなかったが、ロケット部は搭載電子機器であるテレメトリおよびデータロガーの高信頼性化などに取り組んで大きな成果を上げた<sup>[2]</sup>。

2019 年後半から 2020 年にかけては、コロナ禍により大学内での活動に制約が生じたが、外部の企業との連携を進め、テレメトリおよびデータロガーの製品化の達成やハイブリッドロケット開発でキーとなる酸化剤タンクの開発に着手したので報告する。

### 2. テレメトリ・データロガーの製品化<sup>[2]</sup>

テレメトリはロケット飛行中の気圧、温度、加速度、GPS 座標などのデータを無線を介して地上に送信する装置である。これにより地上でロケットの位置や到達高度を確認することができる。データロガーとはそれらのデータをより高速に機体に記録するための装置である。これらの装置は、2017 年度にロケット部によって開発され（図 1）、2018 年度には気圧センサを高性能化し強制分離、電圧モニタの制作に着手したものを今年度はさらなる高信頼性化と小型軽量化を目標に、(株)フルハートジャパンと共同で製品化した（図 2）。製品化のために機能の集約、基板の小型軽量化（プリント基板化）

や省電力化を実施した。その結果 2020 年 9 月 17 日にプレスリリースおよびロケット部学生による講演会発表<sup>[2]</sup>により発表されたとおり、製品として販売を開始し、すでに数台が他の団体によって購入された。このテレメトリ装置の製品化によって、従来は学生が手作りで半田付けなどにより制作していたためその出来栄や信頼性が学生の技量に大きく左右される状況だったものが大きく改善された。また開発要素が少なくなった装置を製品化することにより、学生のリソースをほかの開発要素の大きい機器に振り向けることが可能となった。

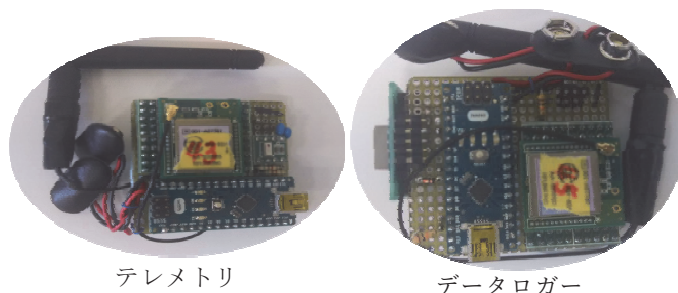


図 1 2017 年度開発品

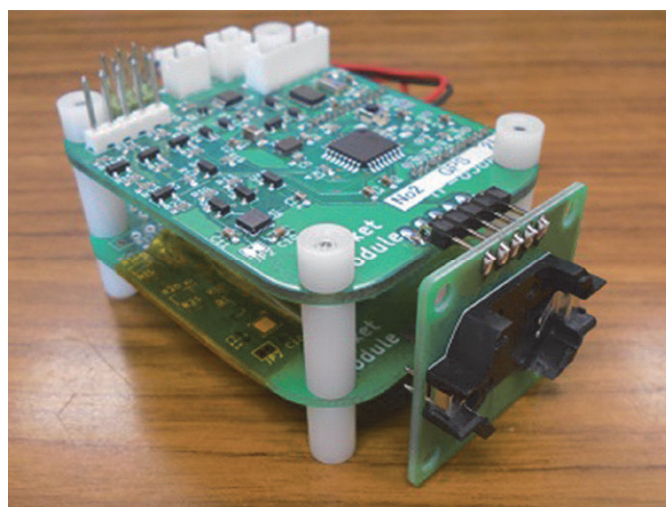


図 2 2019 年度開発品（製品化）

\*准教授 機械工学科

Associate Professor, Dept. of Mechanical Engineering

### 3. 燃焼試験設備の強靱化

2019 年度は研究室によりエンジンの大型化に関する開発が行われたが、相次ぐエンジン破裂に見舞われ、打ち上げには至らなかった。エンジンが破裂すると、そのエンジンを支える架台や配管類も同時になぎ倒され、それらの復旧に多大な労力と時間を要することが開発の加速の妨げとなっていた。そこで宇宙ロケット部により、燃焼試験設備の強靱化が行われた。従来の架台は図 3 に示すようにアルミフレームに取り付けた板バネでエンジンを支える形式であったが、エンジンが破裂すると板バネ及びアルミフレームも変形破断する欠点があった。

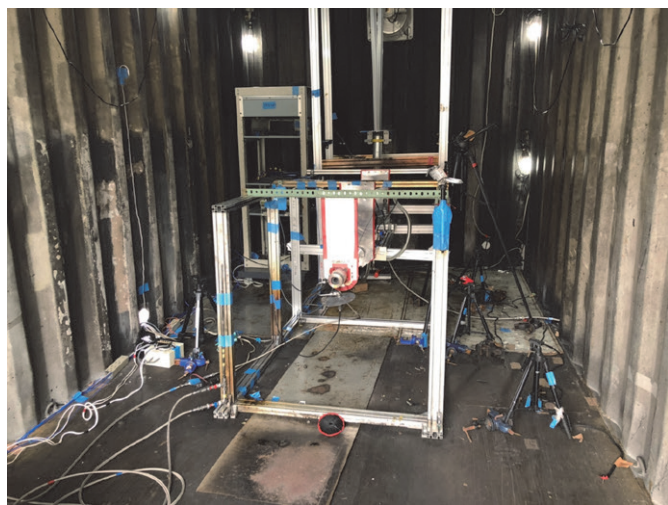


図 3 改修前の架台

そこで図 4 に示すように架台に H 型鋼を採用することにより、燃焼試験失敗後に架台が破損することを抑え復旧作業の低減を図った。この設計に基づき、入構禁止となる前に架台の改修を実施した。改修後の架台の外観を図 5 に示す。この強靱化により、2020 年 11 月及び 12 月にも研究室が実施した燃焼試験でエンジンの破裂が生じたが、燃焼試験設備はほぼ無傷で従来必要であった改修のための特別な作業が不要となる快挙を達成した。

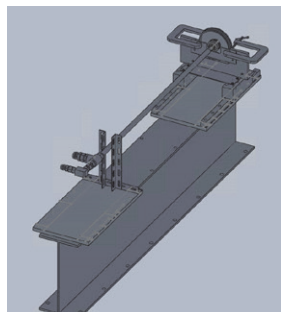


図 4 架台設計結果

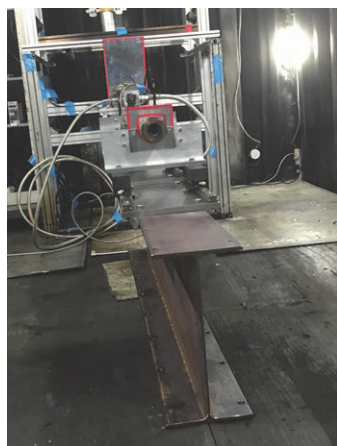


図 5 改修後の架台

### 4. チタンタンク開発

ハイブリッドロケット開発でキーとなるチタンタンクの開発にも取り組んだ。この開発はツツミ産業(株)と共同にて開発している。チタン合金を採用することにより高い強度と軽量化を両立できるため、軽量化に対して大きな効果がある。ロケット部は 2020 年 3 月後半からは在宅での活動を強いられたが、タンク材料である Ti-6Al-4V 溶接部の疲労試験を実施するための治具設計(図 6)とコントローラーのプログラムは部員の自宅で行った。加えてタンク全体の 3 次元 CAD モデルを作成し、圧力負荷時の応力解析も在宅で行った(図 7)。

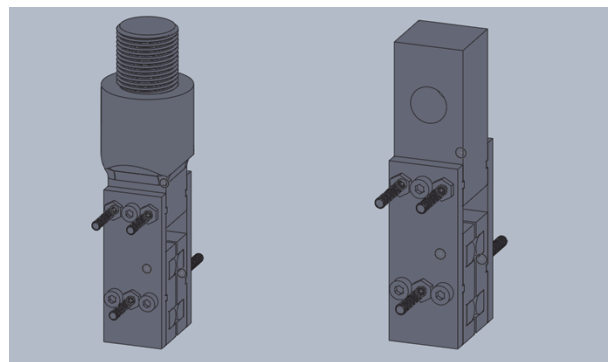


図 6 疲労試験治具

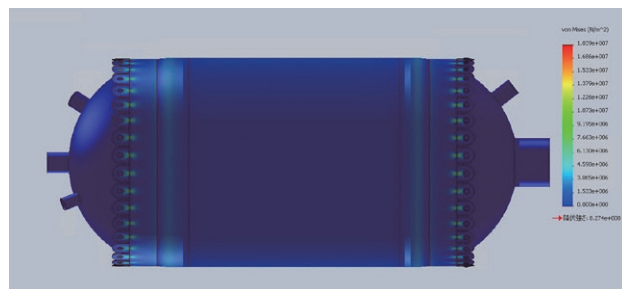


図 7 タンクの応力解析

### 5. 結言

宇宙ロケット部は 2020 年 9 月で設立後 6 年を迎えた。国内には学生を中心としたハイブリッドロケット打ち上げを行う団体が多くあるが、それらの中でも高い評価を得ている。今年度後半はコロナにより在宅での活動を強いられたが、本稿では触れられなかったが各種展示会や講演会、交流会の参加などのアウトリーチ活動にも力を入れた。またオンラインによる新入生の不安にこたえるようなサポート活動も行った。今年度内には高度日本記録更新は達成できなかったが、これらの成果をもとに来年度こそ高度日本記録更新を達成してくれるものと信ずる。

### 参考文献

- [1] 高野敦,「神奈川大学宇宙ロケット部」活動報告(2018), 工学研究, 神奈川大学工学研究所(2019).
- [2] 星拓磨, 高野敦, 三宅真, 国廣愛彦, 超小型ロケット用独立搭載型テレメトリ装置の開発, 10th UNISEC Space Takumi Conference, (2020).

# 神奈川大学ロボットプロジェクト活動報告

江上 正\* 谷村 草太\*\* 野中 祐太郎\*\*\*

## Activity Reports of Kanagawa University Robot Project

Tadashi EGAMI\* Souta TANIMURA\*\* Yutaro NONAKA\*\*\*

### 1. 緒言

神奈川大学ロボットプロジェクトは、2008 年度から活動しており、2019 年度で創立 12 周年となる。部員は機械工学科や電気電子情報工学科、総合工学プログラムから 10 名が所属している。部員はロボット剣道、二足歩行ロボット、室内飛行ロボットの 3 部門のうちのどれかに所属し、それぞれの分野の大会への出場を主な目標として、機体の製作やプログラム作成などに取り組んでいる。今年度、二足歩行ロボット部門は ROBO-ONE Light, ロボット剣道部門は ROBO-剣(アーム部門)、室内飛行ロボット部門は全日本学生室内飛行ロボットコンテストのマルチコプター部門に出場した。

大会出場以外にも、神大フェスタとオープンキャンパスで製作物の実演展示を行い、注目を集めた。

本報告では 2019 年度の活動を報告する。

### 2. 二足歩行ロボット部門活動報告

今年度は一般社団法人二足歩行ロボット協会主催の第 20 回 ROBO-ONE Light 大会へ参加した。ROBO-ONE とは二足歩行ロボットを対象とした大会であり、Light 大会は大会公認の既製品ロボットと 1kg 以下の自作ロボットが参加対象となっている。この大会ではロボットは無線により参加者の手で操縦する。本大会は予選と決勝トーナメントからなっており、予選ではロボットによる 4.5m 走を行う。予選の走行コース中には高さ 1cm の段差があり、これを超えて移動できることが求められる。予選での上位機は決勝トーナメントへと進み、参加ロボット同士による格闘を行う。相手ロボットをパンチなどで転倒させ、時間内に立ち上がれなかった場合 1 回のダウンとカウントされる。これを繰り返し、相手ロボットを先に 3 回ダウンさせた方が勝ちとなる。

今回、本サークルは大会公認の市販品ロボットの KHR-3HV を用いて参加した。大会に参加する準備としては主にロボットのモーション作成に取り組んだ。モーション作成には専用ソフトの Heart

To Heart 4 を使用した。このソフトにはプログラミングを必要としない簡易的なモーション作成機能があり、今回はそれを用いた。予選の 4.5m 走を想定した歩行や方向転換などの移動用モーションに主に注力し、他にはパンチなど決勝トーナメント用のものも作成した。前述の通り予選では 1cm の段差があるため、足を上げられる歩行モーションの作成に取り組んだが、作成したモーションは動きが遅い上に安定しなかった。これは大会当日までに改善がすることが出来ず、大会では予選 45 位で敗退という結果になった。

現在は 3D プリンターを用いて新しい機体を製作しており、次回 ROBO-ONE Light 大会への出場を目標としている。現時点ではセンサ類を用いていないが、新機体が完成し次第それらの搭載にも取り組み、前述の歩行モーションの改善などに取り組む考えである。



図 1 ROBO-ONE 大会の様子

### 3. ロボット剣道部門活動報告

ロボット剣道部門は、二足歩行ロボット協会主催「ROBO-剣(アーム部門)」に出場することを目的として活動している。この大会は、人間が操縦するロボットの大会ではなく自律動作を行うアーム型ロボットによる剣道大会である。ロボット先端に取り付けられた竹刀で相手の面、胴、小手を打突することで 1 本となるルールであり、3

\*教授 機械工学科 ロボットプロジェクト顧問  
Professor, Dept. of Mechanical Engineering

\*\*ロボットプロジェクト部長  
President, Robot Project

\*\*\*ロボットプロジェクト副部長  
Vice President, Robot Project



分間で2本先取したロボットの勝利となる。打突が有効かどうかは剣道有段者である審判が判断する。また、ロボット制御の精度を評価する大会でもあるため、同じ攻撃を繰り返すには3秒以上待たなければならない、連続攻撃も3回までといったルールがある。面、胴、小手はそれぞれ赤、青、黄に色分けすることが定められており、画像処理を用いて目標の座標を認識することが求められる。今年度は5月に第9回、8月に第10回大会が行われ、本部門から出場したロボットは第9回大会では第3位、第10回大会では準優勝という結果であった。

本部門で製作を行っているロボットは、デブスカメラとよばれる奥行を認識することもできるカメラを用いて画像処理を行っている。画像から赤、青、黄の画素を抽出してその重心を求めることで面、胴、小手の3次元座標を得る。そしてその座標に竹刀の先端が到達するような各関節の角度を計算することによって、攻撃を繰り返すことができる。しかし、この方法での動作を行うと、攻撃動作中は自分の面や小手もカメラに映りこんでしまうため、攻撃中は目標となる座標を更新することができないという問題があった。そこで第10回大会では、赤や黄成分を抽出した画像の奥行情報にも注目し、自分と相手の輪郭よりも奥側を相手とすることによって、攻撃中も目標を更新することができるようになった。これにより、攻撃中に相手が動いてしまっても対応することができた。また、攻撃を行わない時は相手の竹刀にこちらの竹刀を向け続けることによって、相手の攻撃を防ぐことができるようにした。第10回大会では、この取り組みが評価され制御技術賞を頂いたが、決勝中にフレームのABS部に破損があり、1本も取られなかったにもかかわらず準優勝という結果となった。次年度ではフレームをアルミで製作し強度を高める予定である。また、使用しているプログラム言語はPythonであり、この言語はライブラリが充実していることなどから比較的簡単な言語であると考えられているが、高速な処理には向かないといった特徴がある。このため、次年度ではC++言語を用いてプログラムを作成しようと考えている。

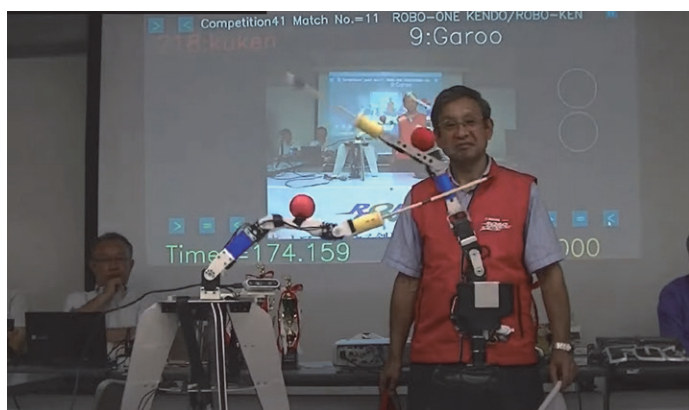


図2 ROBO-剣(アーム部門) 大会の様子

#### 4. 室内飛行ロボット部門

室内飛行ロボット部門は、一般社団法人日本航空宇宙学会が主催する全日本学生室内飛行ロボットコンテスト、マルチコプター部

門に出場することを目的として活動している。このマルチコプター部門は複数のプロペラの回転数を制御することによって飛行するマルチコプターを用いて物資運搬やS字飛行を行い、その運搬量や時間を点数化して順位をつける大会である。2019年度には第15回大会が開催され、本部門もこの大会に参加したが予選敗退であった。

本部門で製作しているマルチコプターは、市販されている姿勢制御基板であるフライトコントローラを用いずに、ラズベリーパイというシングルボードコンピュータを用いた自作を行っている。フレームについては板状のものを交差させることで、軽量かつ強度を高めた。しかし、ラズベリーパイではマイコンに比べてモータやセンサとの信号の通信速度に問題があり、十分に制御周期を短くすることができなかったため、市販されているようなマルチコプターほどは安定させることができなかった。この問題が大会で予選敗退という結果となった大きな要因であると考えている。今後の発展を考えて、画像処理へ対応するためにラズベリーパイを搭載していたが、今後製作するマルチコプターの姿勢制御部分はマイコンを用いて製作しようと考えている。



図3 製作した室内飛行ロボット

#### 5. 結言

二足歩行ロボット部門はROBO-ONE Light 予選敗退、室内飛行ロボット部門も全日本学生室内飛行ロボットコンテスト予選敗退といった結果であったが、ロボット剣道部門については2018年度に引き続き準優勝できたため成果を残すことができた。今年度は、すべての部門が1つのロボットを製作し、大会に出場できたことに大きな意味があると感じている。

来年度の目標として、二足歩行ロボット部門については、市販のキットを使用している段階であるのでフレームの自作、もしくは二足歩行を行うための制御を行うプログラムの作成を行うことで、本団体ならではの特徴的なロボットを製作して行きたい。室内飛行ロボット部門についても、まずは市販のマルチコプター以上に安定して飛行させるとともに、画像処理を組み合わせることで、位置制御にも挑戦することを目標とする。ロボット剣道部門についてはフレームの強化、画像処理の高速化に取り組み、今度こそ大会での優勝を目指したいと考えている。



## 2020 年度ものづくり・電子工作テクノサークル活動報告

土屋 健伸\*

### 2020 Report of the Science Technocircle “Manufacturing and Electronic Work”

Takenobu TSUCHIAYA\*

#### 1. サークルの歩みと今後

本テクノサークル「ものづくり・電子工作テクノサークル」は、2017年に発足し、今年で4年目となる。本テクノサークルのポリシーは、「電子機器工作を通じてものづくり体験を楽しく学ぶ」である。そのため、いろいろな種類の電子機器の製作やテストを実施することを主眼として活動を行っている。コンペティションや大会などへの出場を目的とせず、主に“遊びながら楽しんで学ぶ”がモットーとして、学生の積極的な意思で好きなものを楽しんで実施することを目指している。初年度のメンバーは、申請者である著者と電気電子情報工学科の土屋健伸研究室所属の4年生4名のみであったが、2018年度になってから、1年生5名、3年生2名、4年生1名、大学院生3名、2019年度は2年生2名、4年生1名、大学院生1名と若干減少したが、毎週活発な活動をおこなった。しかし、2020年度は新型コロナ禍による急激なオンライン授業移行のために新入生の勧誘ができなかった。既属の学生も本学構内に入構が許可されなかったためにサークル活動自体の実施が困難で、また、教員と所属学生共にオンライン授業への対応に忙しくサークル活動を楽しむ余裕がなかったため、本年2020年度はほぼ活動らしい活動ができなかったことが悔やまれる。ここでは2020年度の反省も含めて2021年度に新型コロナ対策を考慮したサークル活動について検討した。

#### 2. 活動内容検討

本サークルのポリシーは、「電子機器工作を通じてものづくり体験を楽しく学ぶ」である。従来幾つかの教材テーマや電子キットを数種類購入し、各自が希望するテーマについてばらばらに実施していた。これは、学生個々の興味をひきだすための施策であり、対面での実施では特に問題なく実施されてきた。一方、全員が実施するテーマ、例えばプログラミングによる機械制御の中核となるラズベリーパイは、皆で揃ってセットアップ等を実施した。学生には初めての体験で、かつ手作業も多いことから教員側で講義をしながら教科書的な本を配布して組み立ておよび設定を行っていた。その点を踏まえて、2021年度は、基本遠隔での活動とし、もし可能となれば構内での対面活動に移行する手立てを考えて計画を立案する。

\*教授 電気電子情報工学科

Professor, Dept. of Electrical, Electronics, and Information Engineering

#### 2. 1 遠隔におけるラズベリーパイ等のセットアップ作業

ものづくりとして超小型 PC ラズベリーパイ[1]のセットアップを実施しするにあたっては適切な教科書の本が必要である。教員側で講義をしながら説明する必要もある。一方、インターネットには、複数の参照となるページもある。そこで、遠隔におけるラズベリーパイ等のセットアップ作業では、Zoom を利用した講義的説明会とインターネットを活用した資料配布とページ紹介を実施する。そうすることで、遠隔にてラズベリーパイ等のセットアップが可能になると考える。一方、テクノサークル費用で購入した物品を学生各自の住居に送るには費用が発生するので、対面授業の合間に手渡しを実施する予定である。もちろん大学の資産でもあるので、実施後は返却を依頼する。また、安全に配慮してはんだ付けを必要とするキットは使用しない。これらの施策はオンラインを前提とするが、可能となれば構内での対面活動に移行する。

#### 2. 2 各自が希望するテーマの実施について

ラズベリーパイのセットアップが完了した後、従来はラズベリーパイを使ったロボット制御として戦車キット[2]などを購入してラジコン戦車を組み立てた。組み立てた装置はオープンキャンパスにて「ものづくり実験工作室」を公開し、セットアップ後のラズベリーパイと一緒に展示も行った。そのため、各自が希望するテーマについては、従来通り希望内容を徴集して、個々のテーマに関わるキットを利用する予定である。

#### 2. 3 サポート体制

活動に関わるサポート体制は、先に述べた Zoom を利用した講義的説明会と同時に LINE や Slack などの SNS ツールを用いた実施を予定している。昨今の大学生はこういった SNS ツールへの慣れがあるため利用しやすい点と学年間での交流の促進が期待される。

#### 3. おわりに

新型コロナによって、サークル活動がほぼ活動停止となったが、2021年度は新たな施策で活動を再開したいと思う。

#### 参考文献

[1] ラズベリーパイ 公式 HP <https://www.raspberrypi.org/> (閲覧日 2019/08/31)

[2] 山際伸一, 親子で電子工作入門ラズパイとスマホでラジコン戦車を作ろう!, (秀和システム, 東京, 2017), p.90.



## 8. 随想

8-1 神奈川県大学における 25 年の奮闘

新中 新二

8-2 「建築デザイン研究室 8-68A」

石田 敏明





# 神奈川大学における 25 年の奮闘

新中 新二\*

## Twenty Five Years of Strenuous Efforts at Kanagawa University

Shinji SHINNAKA\*

### 1. 赴任直後

#### 1.1 赴任

1996 年 4 月、白楽駅に降り立ち、本学に向かった。商店街の坂を下り、六角橋の交差点を抜け、地図を頼りに坂を上ると、刑務所を思わせる高い壁に出会った。壁に沿ってさらに進むと大学正門に出た。正門の内は、桜花爛漫であった。新中新二、45 歳。第 4 の人生のスタートである。

#### 1.2 宛がわれた部屋

宛がわれた教員室は、4 号館(旧館)の 3 階にあった。部屋に入って驚いた。埃の薄っすら積もった部屋には、古式の木製机が、シミと埃で黄土色に染まったカーテン越しの光に照らされていた。ビジネスマンから転じた私には、「新任者には、綺麗に清掃された机、新品文房具と名刺が用意されている」と言うのが、常識であった。世間の常識が全く通用しない異次元の世界に入ったことを、この時、瞬時に悟った。幸い電話は通じていた。「ネット回線」は期待する方が間違っていることは、直ぐに理解した。

宛がわれた研究室は、通常研究室スペースの半分であった。こちらは、倉庫として長年利用されていたらしく、山のようなガラクタが分厚い埃に埋まっていた。

着任後の最初の仕事は、教員室を使用可能なレベルに回復し、倉庫化した研究室のガラクタの山を廃棄し、教育スペースを確保することであった。短期間では一人の手に負えそうにないと悟り、女房と掃除道具一式を携え出直すことにした。

#### 1.3 学生

赴任初年度に預かった卒研生は、6、7 名であったかと思う。結果的には、彼らと研究室を作ることになった。個性的でユニークな学生が多かった。学生とともに自分達で、他学科から「タコ足」要領でネット回線を引き回した。卒研生の中には、情報技術に天賦の才をもつ者がいて、短期間に研究室のネット機能を構築できた。彼は、その後、サイバー防衛関係の企業へ就職した。

今日では信じがたいかもしれないが、学生とは一緒によく飲んだ。

飲み代節約のため、近隣で酒とつまみを用意し、研究室で飲むことが多かった。カラオケのお供もした。どうしても、教授とドラえもんをカラオケしたいと言っていた学生は、卒業後おもちゃ会社に就職した。こちらも天賦の才を発揮し大活躍と推測している。

### 2. 前半期

#### 2.1 天の計らい

私は、原理原則に則って行動する。場当たりの行動はまずしない。行動原理は、「質実剛健」と「積極進取」である。振り返れば、50 年の労働人生は、この体现そのものであった。

赴任後の最初の驚きは、「質実剛健」と「積極進取」を建学の精神とする大学に、自分が勤務していることであった。動地の驚きとともに、天の計らいを感じずにはいられなかった。

縁有って研究室にきた学生には、建学の精神の何たるかを、実践を通し教育した。時に、「人生において、何れの選択を取るべきか迷ったときには、何れが質実剛健、積極進取に適っているか考えよ。そして、適っている方を選択せよ。十に七つ、八つは、正しい選択を取ることができる。」と教えた。また、時に、「人生には、百に一つ、二つは脱兎のごとく逃げなければならないこともある。これもまた、質実剛健であり、積極進取である。」と教えた。さらには、「原理原則に則って行動せよ。応用に際し、知略を尽くせ。」と教えた。

#### 2.2 月火水木金

赴任 2 年目の 1997 年から、学部に加え、大学院の教育を担当することになった。院生教育には、大学院に相応しい最新の専門知識と実効的な研究手法とを教授しなければならない。この源泉は、大学院担当教員自身による研究活動にある。院生教育のために、研究活動を展開した。当時は、2 部(夜間部)の学部生教育も担当しており、月曜日から金曜日は、学部教育に忙殺されていた。研究特に実験を伴う研究には、ある程度のまとまった時間が必要である。細切れ時間の寄せ集めでは、実験はできない。

まとまった時間が確保できる休日が、研究遂行の重要な時間となった。月に 1 日を除き、日曜日、祭日、連休、お盆、正月の関係なく、大学へ通った。大雨の日も、大風の日も、雪の日も、大学へ通った。家庭を顧みず、家族を顧みず、通い働き続けた。月に 1 日のみ、1 ヶ月間溜まった自宅の仕事を処理するために、在宅した時に娘に言われた「パパ!、今日はお仕事さぼってるの?」と。

\*元教授 電気電子情報工学科  
Former Professor, Dept. of Electrical Engineering

世間が駆伝でワイワイやっている正月2日には、当然のこととして、暖房のない冷え切った研究室で、コートを羽織り、震えながら働いていた。ある冬の朝、余りの寒さに、ハードディスクが正常起動せずパソコンがガリガリと唸り壊れた。生身の人間が耐えているのに、機械が壊れるのが、情けなかった。怒りで、壊れたパソコンを床に叩きつけた。そして、男泣きした。

昭和の帝国海軍は、土日のない艦隊勤務を「月月火水木金金」と呼んでいたそうである。平成の神大教員は、帝国海軍に引けをとることはなかった。

### 2.3 最初の成果

2年目に、最初の研究成果がでた。このときの様子を、電気学会論文誌D、1999年12号(Vol. 119, No. 12, p. 1567)、研究グループ紹介欄に「神奈川大学 工学部電気工学科 新中研究室」と題した記事の中で、以下のように紹介している。

「生涯一研究者を信条とする著者は、目下『AC サーボモータ駆動制御法の体系化』なる10年テーマを自らに課している。誘導モータに関しては、適応とセンサレスの2ベクトル制御法が完成の域に到達している。到達性能は世界トップクラスとの自負を擁している。同期モータに関しては、センサレス駆動制御法の完成を急いでいる。理論構築を完了し、速度1/150定格での力行・回生100%定格トルク発生に成功と言ったところが、現状である。添付の写真(図1参照)は、誘導モータ、同期モータの周波数ハイブリッドベクトル制御法の最初の成功データを与えてくれた愛機である。初成功の夜、何度も何度も万歳を呟いた。涙が止まらなかった。挑戦開始以来、艱難辛苦の7年が既に過ぎ去っていた。(注:前ベンチャー企業で5年間苦闘するも成功に至らず、バブル崩壊の中資金尽き、廃業)」

ある日、ベンチャー企業を起こした社長が来室した。その際に、上記の初成功の実験データを見せた。彼はこれを持ち帰り、あるショーに展示した。それを見た日刊工業新聞の記者が、研究室を訪ねてきた。数日後、初の研究成果は、全国紙・日刊工業新聞のトップページを飾った。1998年8月14日のことである(図2参照)。

### 2.4 ST-EV 新I号の開発

初期の研究では、供試機として軸出力300[W]の小型モータを駆動した。順次軸出力の大きい供試機を対象とし、最後は新幹線等に利用されている軸出力60[kW]の供試機を駆動した(図3参照)。多種多様な供試機を相手に、独自技術の完成度を高めた。

独自技術の完成を受け、予てより構想を温めていたセンサレス・トランスミッションレス電気自動車(ST-EV)の開発を、1999年の春、着手した。当時、この種のEV開発の機運は、重電メーカ、大学を含む電気自動車(EV)業界で高まっており、互いにかつ密かに研究開発に着手していた。問題は誰が最初に成功を名乗るかにあった。競い合うからには勝たねばならないと考えつつも、他大学は眼中になかった。自分のライバルは大企業と認識していた。独自技術を頼りに、開発を急いだ。

当初、著者、竹内教務技術職員、そして卒研究生2名の総員4名でST-EVを開発する計画を立てた。そうした中、某企業から、共同開発の提案が来た。直ちに断った。しばし後、また来た。また断った。性懲りもなく、三度目が来た。三度目の要請は、「男が三度頭を下げ



図1 小型テストベンチ上の供試機(右端)



図2 1998.8.14付の全国紙日刊工業新聞第1面記事

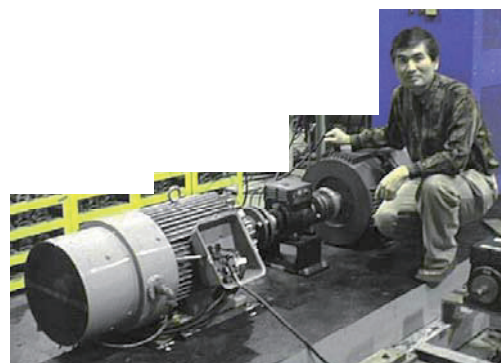


図3 大型試験装置と著者

た時には、断ってはならぬ」と言う価値観に従い、受けた。

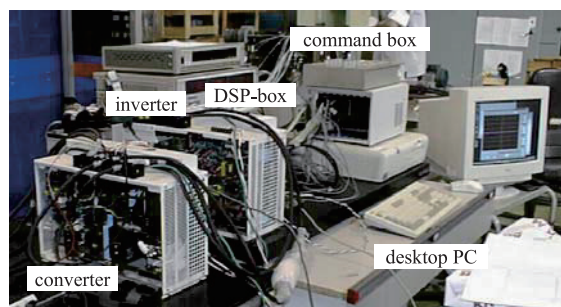
メカ系は共同開発企業が担当し、モータ、モータ駆動装置、電気系を我々が担当することを取り決め、開発をキックオフした。

図4は、モータ駆動装置の中で特に独自技術を埋め込む頭脳部分の開発の様子(我々担当)である。同図(a)は、性能・機能を確認するために展開した開発の様子で、デスクトップPCとDSP(数理演算装置)ボックスが見える。同図(b)は、PCは野外ダウンロード用のノートになり、DSPはワンボード化されている。図5は、テストベンチ上のEV搭載用モータ(手前)である。本モータは、某重電メーカに、一般産業モータを改造する形で、特注製作してもらった。

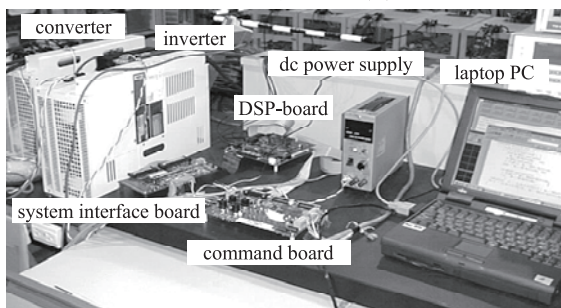
EVの車体は、一般ガソリン車を流用することにした。卒研究生がターゲット車両の探索に当たった。結果的には、ダイハツの中古ミゼットを選定し購入した(後掲の図7参照)。この機械的改造は、共同開発企業が当たった。

企業側担当の機械的改造は遅れに遅れた。担当課長が我々との共





(a) 性能・機能試験用装置



(b) 車載用に縮小化された装置

図4 頭脳に相当する中核部の開発

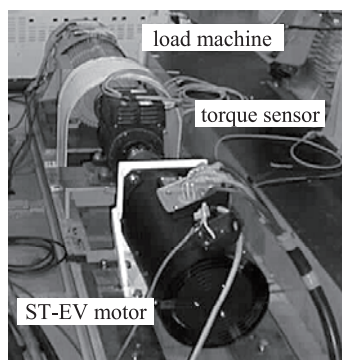
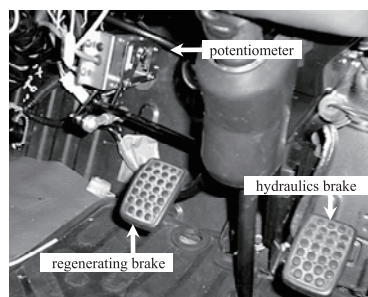
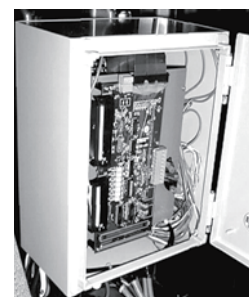


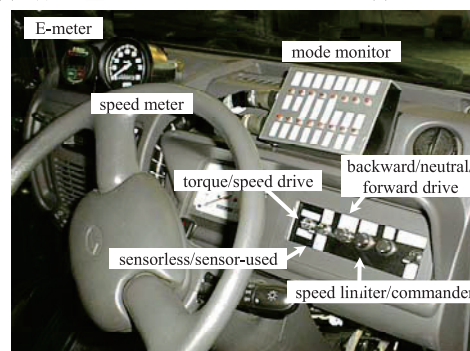
図5 テストベンチ上のEV駆動用モータ(手前)



(a) 独立二重ブレーキシステム



(b) システム頭脳部



(c) 運転席前面

図6 電気系の機装



図7 横浜キャンパスグラウンドでの試験走行

同開発の約束を破り、1999年の暮れに早期退職制度を利用して退職した。これを引き継いだ係長は、共同開発の約束履行よりも、年末年始の己の休暇を優先するという始末であった。土日祭日もなく昼夜兼行で開発に当たった我々の怒りは、心頭に達した。本学赴任前のビジネスマン時代を通じ、サラリーマン根性の何たるかは熟知していた。故に、企業からの共同開発提案を断ってきた。甘かった。サラリーマン根性に地団駄を踏んだ。2名の卒研生は、結果的には、試作EVに搭乗させることなく、卒業させざるをえなかった。

明けて2000年の春、十数名の新卒研生の中から、免許証取得済を条件に、2名の卒研生を選出し、彼らの卒研テーマをEV開発とした。

2000年の初夏、機械的改造を終えたEVが戻ってきた。直ちに電気系の機装を開始した。車検合格を念頭に、インバータ、バッテリー、諸々の電装品を機装した。ブレーキに関しては、油圧ブレーキと回生ブレーキの特性を把握すべく、これらが完全独立に作動できる独立二重ブレーキシステムを構築した。最後に、EVの頭脳部を頑丈な鉄シャーシの中に取り付け、EVの全機能をこれで制御できるようにした。図6は、この様子である。なお、同図(c)は、ドライバー席から見たフロントの様子である。種々のモード(トルク/速度モード、センサ利用/センサレスモードなど)で走行できるようにした。速度

モードの取り付けは、将来の自動運転を考慮したものである。

同年8月、建築中23号館裏のグラウンドで試験走行を開始した。学生部管轄のグラウンドは、部活中心で運用されており、卒研の学生教育といえども、平日日中は利用することができなかった。夜討ち朝駆けの要領でグラウンドを使用した。

試験走行の主役は、2名の卒研生(椿君と内藤君)である。「さー、走ってくれ」と言うと、椿君は「走れない」と答える。「約束が違うではないか」と言うと、「先生は運転免許をもっているかと聞いたが、運転できるかとは聞かなかった」と答える。「ツバキィー」と一喝した。また、学生に騙された。

試験走行を通じ、グラウンドで幾度となくドライブアルゴリズムの改修とEVへのダウンロードを繰り返した。同時に、多くの基本データを取得した。データ取得の主役は椿君であり、テストドライバーは内藤君であった。なお、坂道発進性能の改善とデータ取得は、生協から体育館へ通じる神大最傾斜の坂で行った。図7は、砂塵を巻き上げ疾走するEVの様子である。

20世紀最終年の最終月、2000年12月18日に、車検前ナンバー取得前であったが、一応の完成の域に達したST-EVの公開披露を行った。激しい開発競争を展開している業界の中であって、一番乗り

を挙げる戦略的意義を考えての決断であった。20 世紀の暮れも押し迫った中、神奈川テレビ、日刊工業新聞、日経産業新聞、読売新聞、朝日新聞等が取材に駆けつけてくれた。神奈川テレビはその日の 7 時ニュースとして、新聞社は翌日以降の記事として、ST-EV の国内初開発を紹介してくれた。

第 1 次公開披露後、直ちに車検・ナンバー取得の準備に入った。ガソリン車からの EV 化へ向けて改造した箇所がすべて車検対象となった。車検の詳細情報収集は、卒研生が担当した。21 世紀の初正月、第 1 回車検に挑戦した。機械的改造部分は詳細な設計図面によりパス。モータ軸出力問題はメーカーの定格表によりパスと順調に進んで行ったが、軽トラとしての積載空間が問題となり、あえなくアウト。積載空間確保等の改良を実施後、2001 年 2 月 16 日に第 2 回車検に挑戦し、待望の車検合格を取得した。取得ナンバーは、「納得いく EV」を意味する「7919」となった。公式認可を機会に、試作 EV を「ST-EV 新(シン) I 号」と命名した。

公道走行正式認可後の公開披露は、日取りは卒業式 3 月 25 日午前 10 時、場所は「みなとみらい」と決めていた。事前に周到な準備をし、同日 2 時間前には、現地準備を完了した。しかし、大降りの天を、晴れぬ顔で仰ぐことになった。公開走行実施可否かの決断を考えざるを得ない状況の中、時間のみが過ぎ去っていった。10 時直前、奇跡が起きた。天が突然晴れた。そして、NHK テレビに加え、多くの新聞社が取材に来てくれていた。「行けー!!」と号令をかけた。一斉に決めた内藤君が電磁音を鳴らしながら「ST-EV 新 I 号」を駆動した(図 8(a) 参照)。

パシフィコ横浜国立大ホールで午後の卒業式の準備をしていた本学関係者は、同日正午、NHK 全国ニュース放映の「ST-EV 新 I 号」の快走をニュースとして見ることになった。同日、19 時のニュースでも「ST-EV 新 I 号」の快走が全国放映された。翌日には、「ST-EV 新 I 号」の快走が、多くの全国紙の紙面を賑わせた(図 9 参照)。それから約 1 年間、多数の雑誌(図 10 参照)、イベントで紹介・招待されることになった。図 8(b)は、環境省の招聘を受け東京代々木公園で開催されたエコカーワールド 2001(2001. 6. 2~3)に、図 8(c)は、主催者の招聘を受け東京ビッグサイトで開催された INTERMAC 2001(2001. 11. 7~9)に、図 8(d)は、主催者の招聘を受け幕張メッセで開催された Techno-Frontier 2002(2002. 4. 17~19)に、各々参加した様子である。「ST-EV 新 I 号」の開発成功は、少なくとも国内初の快挙であった。米国テスラ社の同様コンセプトカー・ロードスターに約 7 年先行していた。

## 2.5 ST-EV 新 II 号の開発

EV の駆動用主機としては、誘導モータと永久磁石同期モータが多用されている。「新 I 号」は、駆動用主機として誘導モータを利用していた。この時期発売されたハイブリッド車(HV)プリウスには、永久磁石同期モータが採用され、国内車メーカーは、「右へならえ」とばかり、永久磁石同期モータへ傾いて行った。これを受け、2002 年、永久磁石同期モータを利用した「ST-EV 新 II 号」の開発に着手した。

「新 II 号」には、当時最高性能を誇った独自技術「D 因子最小次元磁束オブザーバ」、「鏡相形電流相関磁束推定法」を利用した。

2004 年には、「ST-EV 新 II 号」は車検を受けナンバーを取得した。



(a) 公開走行



(b) エコカーワールド 2001



(c) INTERMAC 2001



(d) Techno-Frontier 2002

図 8 新 I 号の公開の様子



図 9 新 I 号紹介の新聞記事例



図 10 新 I 号紹介の雑誌記事例



(a) 公開走行



(b) EVS22

図 11 新 II 号の公開の様子



「ST-EV 新 I 号」にならい、卒業式の 2004 年 3 月 25 日に、「みなとみらい」を快走した(図 11(a)参照)。

2006 年、10 年振りに EVS(電気自動車のモータショー)が日本に帰ってきた(2006. 10. 23~28)。開催場所は、横浜パシフィコである。この好機を逃すわけにはいかなかった。関係者を説得し、企業に負けない大型ブースを展開参加した。図 11(b)はこの様子である。右端に「新 I 号」、左端に「新 II 号」が見える。教育的観点から、研究室学生に、授業の合間を縫うようにして、会場スタッフを務めさせた。スタッフ用の赤いコスチュームは、学生がデザインした。

### 3. 後半期

#### 3.1 技術体系化と専門教科書の出版

ST-EV 新 I 号、II 号の開発を終えると、院生に対し、最新のモータドライブ技術と最新の研究手法を教育すべく、同技術の基礎研究に復帰した。本学赴任後 10 年の 2006 年、同僚の顔を伺いながら、サバティカルを申請した。その結果、サバティカル中も院生教育を継続することを条件に、翌 2007 年の取得が認められた。

2007 年春から、予てより計画していた技術体系化と教育用教科書を目的に、推定約 1000 頁の専門書「永久磁石同期モータのベクトル制御技術、上下巻」の執筆を開始した。図面を含め月に 100 頁を書き上げれば、10 月後には 1000 頁の原稿を用意できると見込んだ。残り 2 月、不測事態に備えるための予備とした。

通常の手順に従うならば、先ず執筆構想を出版社へ提示し、出版企画会議での承認を得、しかる後に執筆を開始する。しかし、私は、この手順を踏まず、遮二無二、約 1000 頁の専門書を書き始めた。

当時の様子を同書の「まえがき」に次のように記している。「著者は、神仏に導かれるように、あるいは鬼神に突き動かされるように、『永久磁石同期モータの駆動制御技術の体系化』に十数年間にわたり孤軍奮闘してきた。本書出版は長期構想の最終段階に当たる・・・」。

技術開発自体同様に、執筆活動も神仏に導かれるように、鬼神に突き動かされるように始まり、月月火水木金金が展開された。そして、1 年後には、500 枚超の挿絵用図面を含む約 1000 頁の原稿が、手元にあった。

原稿の完成を受けて、都内の出版社に打診を開始した。A 社に断られ、B 社に断られ、C 社に断られと「ノー」の連続が、打診の数だけ続いた。何社回ったであろうか。出版社の出版会議にかけて戴ければ、上出来である。多くの場合、その前段階の一瞥で断られた。

200 頁程度の学部教科書であれば、出版を希望する出版社は、執筆を断るのに苦労するほど引手あまたである。しかし、400 頁を超えるような専門書となると、状況は一変し、これに応える出版社は激減する。近年の大学教科書は、学生、教員、出版社が相協力して、「安く安く」、「薄く薄く」、「易しく易しく」を循環的に高めてきた。その結果、お日様にかざせば透けるような、「わかる・・・」、「やさしい・・・」、「ポイントを・・・」、「超入門・・・」と題した教科書が氾濫し、学生の学修レベルもこれに呼応して低下していった。これは、日本特有の近視眼的異常現象で、欧米先進国では笑止の的である。

私は、当初より、世界をリードする専門書の上梓を狙っていた。出版に関する何の約束もなく、勝手に 1000 頁の原稿を用意したのは、世間の風潮に叛旗を掲げ、軽薄化に抗するためであった。出版を引き受けてくれる出版社を見出す苦労は、当初より想定していた。同



図 12 単著上梓の専門書・教科書

時に、妄想といえる根拠なき確信もあった。それは、「私を突き動かした神仏や鬼神が、出版社を用意しているはずだ。必ず出版社は現れる。」というものであった。そして、その日が来た。

東京ビックサイトでのあるショーに技術情報収集を目的に参加した時のことである。技術書を並べている電波新聞社ブースにふと立ち寄った。スタッフに声をかけた。あいにく管理職は居なかった。しかし、翌日連絡が来た。さらに翌日、来学を受けた。先方から「うちで出版させて欲しい」と言ってきた。嬉し泣きした。

2008 年に上梓した上下巻を図 12(a), (b)に示した。同書は、出版当初から「バイブル」との評価がつき、今日これが定着している。本書は、モータドライブ工学を教育する大学、利用する企業で、例外なく利用されている。

爾後、大学院教育、学部教育で私自身が責任担当となった全科目の教科書を単著執筆し、上梓した。重複のない延べ総頁数は約 2700 頁に及んだ。図 12 にこれらを示した。専門書の威力は凄まじかった。院生が猛烈な勢いで学力・研究力を身に着けた。専門書出版後に研究室に入った卒研 2 名が立て続けに博士になった。

#### 3.2 シフトダウン

還暦を過ぎた頃から、体力の低下を認識するようになった。月月火水木金金では、定年まで持ち堪えられないと判断し、ギアを一段シフトダウンし、これを巡航速度とした。こうして、25 年間に育てあげた学部生は約 300 名、院生・研究生は約 80 名を数えた。学生教育のために展開した研究活動を通じて書き上げた論文は、学会論文誌掲載論文 115 報、査読付き国際会議論文 40 報となった。年平均 5 報の論文を 25 年間書き続けてきた計算になる。最後の論文は、2020 年 12 号論文誌に掲載された。この間、IEEE 論文誌論文賞、計測自動制御学会技術賞、電気学会業績賞などの高位の学術賞にも輝いた。

### 4. おわりに

不肖新中新二は、25 年にわたり、本学学生に対し、多くの体系化先進知識とともに、積極進取、質実剛健の何たるかを、身を挺し家族を顧みず、教育してきた。そして、燃え尽きた。

最後の力を絞り、エールを贈りたい。「神奈川大学に栄光あれ」。

## 「建築デザイン研究室 8-68A」

石田敏明\*

### Architectural Design Laboratory 8-68A

Toshiaki ISHIDA\*

#### 1. 前橋から横浜へ

神奈川大学工学部建築学科へ赴任したのは、2016年4月。群馬県にある公立大学前橋工科大学に19年間勤務した後、継続的に赴任したため、それまで蓄積した研究資料をほぼそのまま神奈川大学の横浜キャンパスに移動したような格好になった。与えられた「8-68A 建築デザイン研究室」は筆者が尊敬する白濱謙一先生、高橋志保彦先生、室伏次郎先生、重村力先生など歴代の研究室を継承する形となり、とても身に余る光栄であり、身の縮まる思いであった。

#### 2. 横浜キャンパスと建築

横浜キャンパスは近代建築運動のリーダーの一人、モダニズムデザインの名手である建築家 山口文象率いる RIA 建築総合研究所が1954年にキャンパス整備計画を行なっている。(図1)



図1 神奈川大学総合計画図 1954 2011 年度 RAKU Vol.8 より転載

キャンパス内には RIA が設計した建築群もあり、そのほとんどは解体されたが 5 号館(図2)は端正なプロポーションが魅力的で銀杏並木があるプロムナードとともに当時のモダニズム建築の雰囲気を残しつつ今に伝えている。また、近年では現代建築の巨匠の一人であり、横浜新市庁舎の設計者でもある横文彦氏デザインの 16 号館

セレストホール(図3)や本学卒業生で設計者の一人でもあり、かつ本学建築学科卒業生である萬玉直子さんの新国際学生寮や卒業生設計の 30 号館(宮陵会館)(図4)がある。一連の建築を眺めてみると横浜キャンパスには建築を創造する脈々とした精神が地下水脈のように流れていることが読み取れる。それは神奈川大学建築学科の特徴の教育目標の一つである「人を育てる」が寄与しているように思われる。一部のキャンパス施設の設計者を卒業生が参加できるコンペ形式を採っていることによるのではないだろうか。こうした卒業生を支援し、かつ卒業後も人材を育成する制度は今まで他では聞いたことがないし、他大学に誇れる神奈川大学独自の素晴らしい制度だと思う。今後もこうした制度は神奈川大学の良き伝統として引き継いでもらいたいと願うばかりである。



図2 5号館



図3 16号館(セレストホール)



図4 30号館(宮陵会館)

\*教授 建築学科  
Professor, Dept. of Architecture



### 3. 横浜建築とみなとみらいキャンパス

港町横浜には山手の洋館建築やレンガ造、組積造など多くの近代建築がある。建築学科では毎年、新入生に FOC の際、「横浜近代建築 関内・関外の歴史的建造物」という横浜の歴史的建造物を紹介する冊子を配布している。建築はその土地の風土や文化を読み取って、その場所に相応しい固有のデザインが求められる。神奈川大学が横浜発祥という経緯もあり、横浜の文化に触れ土地への愛着を育て、建築デザインのあるべき姿を知って欲しいと願うためである。2020 年、待望の「みなとみらいキャンパス」(図 5)が竣工した。2018 年から筆者も含めて建築学科のデザインコースの教員と筆者の前任教授である重村先生を加えて教育現場に携わる者として、また建築の専門的立場から新校舎設計の設計アドバイザーとして参加した。新キャンパスは従来の平面的拡がりのあるキャンパスとは異なり超高層の施設である。街なかにある時代を反映した大学キャンパスのデザインとは何か、オフィスビルとは一線を画する学舎としてのキャンパスらしさとは何かなど自由かつ活発な意見交換があり工事途中の現場にもメンバーで足を運んだ。楽しく、また得難い貴重な経験であった。



図 5 神奈川大学みなとみらいキャンパス 神奈川大学 HP より

### 4. 教育・研究活動について

筆者の研究領域は建築意匠と設計である。中でもまちづくりや住居系建築が専門であるが、着任してから研究対象を横浜に因んだ内容にしたいと思っていた。横浜には建築デザイン教育に携わっている知人も多い。ある集まりで横浜に縁のある建築家の話題になり、緒形昭義という建築家と作品を初めて知った。興味が湧き、その後研究室の学生とともに代表作である緑区にある「竹山団地センターゾーン」(図 6 1972 年竣工)と「寿町総合労働福祉会館」(1974 年竣工、2016 年解体)(図 7-1, 2)を訪れた。後者は解体中の現場であったが、建築と広場の関係が設計者のデザイン思想を確認できた。現在、「建築家 緒形昭義-人と作品」として研究室の大学院生と共同で研究報告書としてまとめつつある。また、研究室として地方の過疎化と空き家問題、廃校舎などの公共施設の利活用について行政や地元住民へのヒヤリング調査、実地調査を通して交流を行ってきた。(図 8-10,15)

2018 年度から 2020 年度は研究テーマとして、「瀬戸内海地方の広島県東部地域の再生・活性化に関する調査と提案-其の 1・2・3」を、2019 年度は「新潟市街地における空き家の再生・活用に関する研究と提案」(図 9)を行った。



図 6 竹山団地センターゾーン 1972 竣工 \*2016 年撮影



図 7-1 寿町総合福祉会館 1974 年竣工(解体前) \*撮影:井上岳



図 7-2 寿町総合福祉会館 1974 年竣工 \*解体現場 2016 年撮影

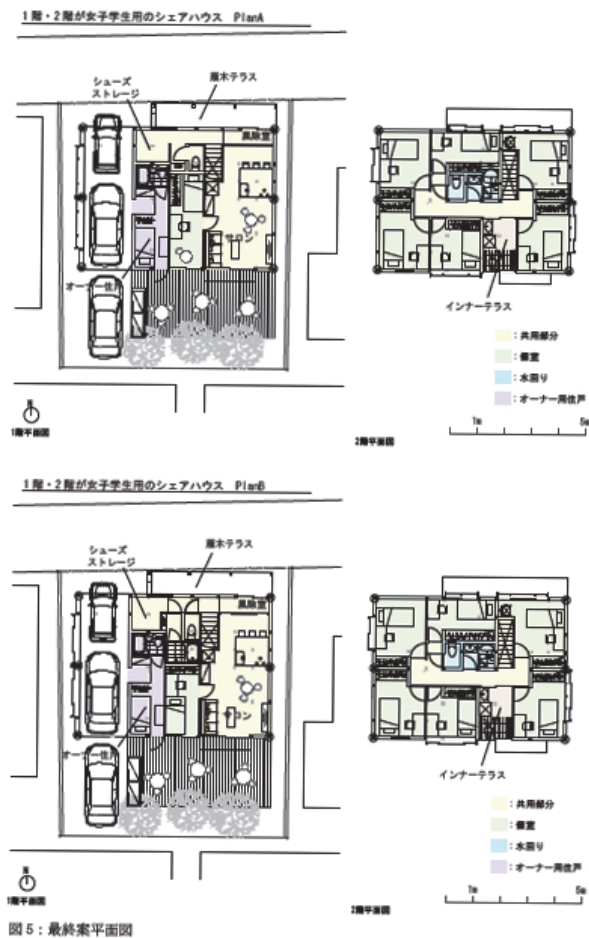


図8 新潟 関屋松波町N改修プロジェクト平面図

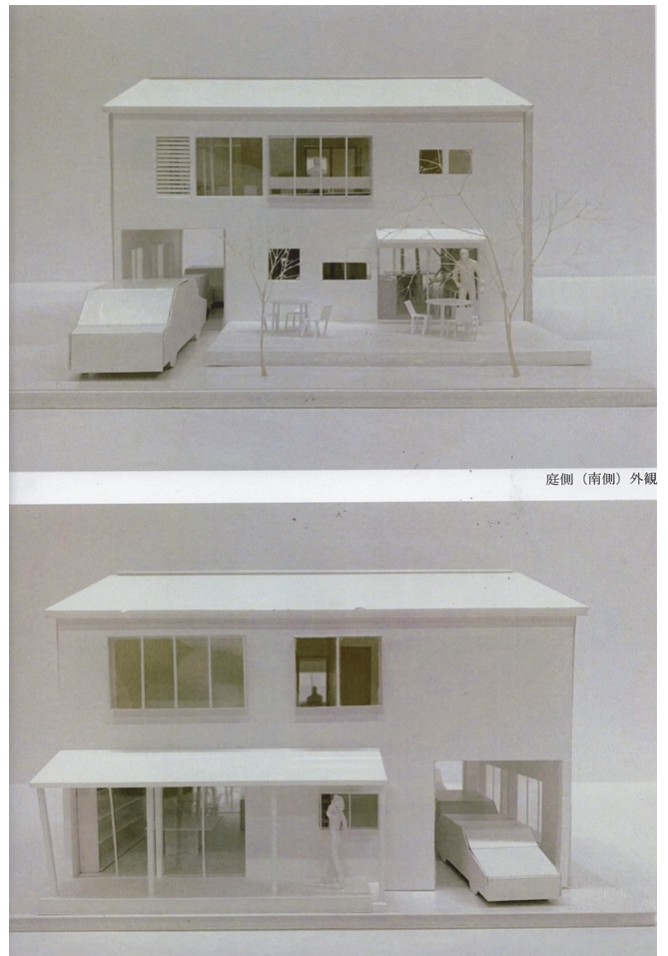


図10 新潟 関屋松波町N改修プロジェクト模型写真

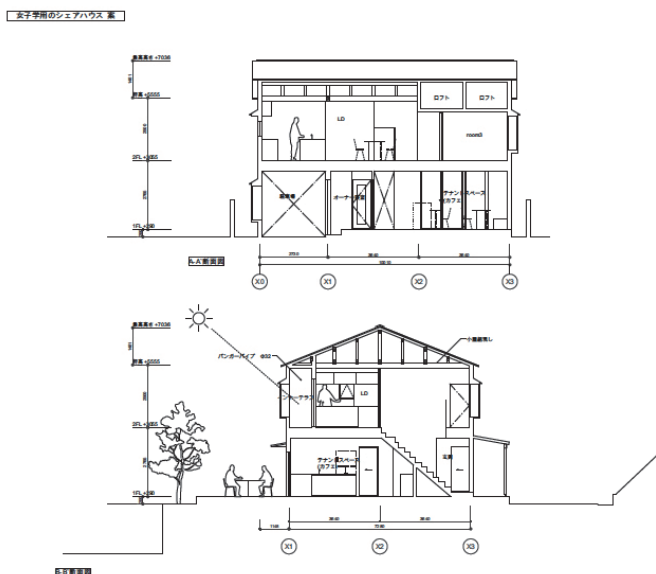


図9 新潟 関屋松波町N改修プロジェクト断面図

最終年度の今年度は旧小学校の校地全体と廃校舎の利活用・運営に関する具体的な提案を自治体や地元の人々に中間発表の予定であったが、新型コロナ禍のためワークショップも含めて中止せざるを得なかったのは、とても残念であったが年度末にはリモートによるプレゼンテーションを考えている。また、教育の一環としてゼミ生との国内外のゼミ旅行(図14)や神奈川大学アジア研究センター共同研究「東アジア4国際都市の脆弱地区の調査、ならびに環境社会再生への方法の探究」で参加した海外の大学や教員との国際交流(図11-12)は風土や文化、社会問題を相互理解する上で大変、役に立った楽しい思い出である。嬉しいことに『アジアのまち再生 社会遺産を力に』(図13)として書籍化された。

神奈川大学での5年間は教える立場でありながら、多くの得難い経験や知見も多々あった。この場を借りて感謝申し上げるとともに神奈川大学の益々の発展を願っている。





図 11 2019 年度脆弱地区調査 タイ



図 12 2019 年度脆弱地区調査 Community Organizations Development Institute(CODI)にて タイ



図 13 「アジアのまち再生 社会遺産を力に」(共著 2017 年発行 鹿島出版会)



図 14 2018 年度ゼミ旅行 台湾

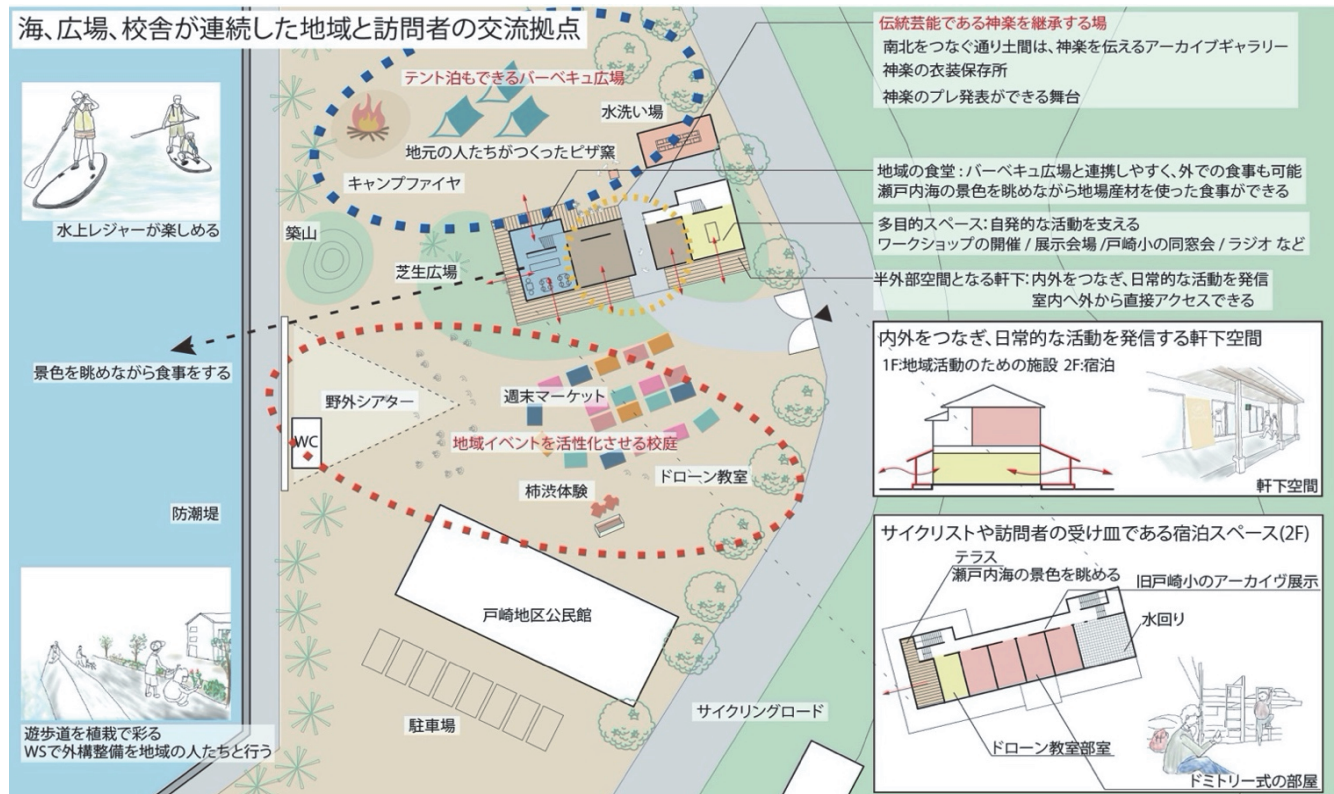


図 15 旧尾道市立戸崎小学校 全体計画図 2020



## 9. 工学部通信

1. 研究活動(2019年10月～2020年9月)
2. 講演会開催記録(2019年10月～2020年9月)
3. 研究分野紹介および2019年度博士論文・修士論文・卒業研究テーマ一覧

1. The List of Research Activities(2019,Oct.～2020,Sep.)
2. Public Lectures(2019,Oct.～2020,Sep.)
3. The List of Laboratory Activities and Student Papers(Academic Year 2019)





# 【 1 】 研 究 活 動

(2019 年 10 月 1 日より 2020 年 9 月 30 日までの期間に公表したものについて記す)

## 凡例

### 研究活動成果報告の分類

- ・ 研究論文Ⅰ：査読のある学会誌に掲載された研究論文
- ・ 研究論文Ⅱ：査読のある会議の会議録に掲載された研究論文
- ・ 建築作品：建築学科
- ・ 口頭発表：会議の会議録に掲載された研究論文
- ・ 学術誌：専門学術誌に掲載された論文等
- ・ 著書
- ・ 調査報告書：学会等の委員会や公的機関が公表した調査報告書、科研費の最終報告書
- ・ 講演・展示会：学会等の招待講演や基調講演、展示を含む
- ・ 助成金：科研費等
- ・ 受託研究
- ・ 特許(取得)
- ・ 特許(公開)
- ・ 海外出張：学会、国際会議の論文委員会、座長、調査等による出張
- ・ 褒賞
- ・ 学位：学位授与
- ・ その他

## 機械工学科

### 研究論文Ⅰ（レフェリー付き論文）

1. B. Zhang, M. Kaneko and H. Lim, Robust 2D Mapping Integrating with 3D information for the Autonomous Mobile Robot under Dynamic Environment, Electronics, 8(12), 1503 (2019).
2. K.Umemoto, T.Endo, F.Matsuno and T.Egami, Stability analysis of a control system with nonlinear input uncertainty based on disturbance observer, International Journal of Robust and Nonlinear Control, 30(11), 4433-4448 (2020.4).
3. D. Fedorynenko, R. Kirigaya, Y. Nakao, Dynamic characteristics of spindle with water-lubricated hydrostatic bearings for ultra-precision machine tools, Precision Engineering, 63 (2020), pp. 187-196.
4. T. Yano, and K. Nishino, Numerical study on the effects of convective and radiative heat transfer on thermocapillary convection in a high-Prandtl-number liquid bridge in weightlessness, Advances in Space Research, 66 (8), 2047-2061 (2020).
5. 中村弘毅, 山崎徹, 笠原和則, 長沼寛樹, 松下修己, 縦振動連成を加味した翼軸ねじり振動計算の高精度化, 日本機械学会論文集, No.19-00500, 85 巻, 879 号, 2019-11
6. Takeshi SUEKI, Toshiki KITAGAWA, Toru YAMAZAKI, Scale-model tests of railway rolling noise, JSME Mechanical Engineering Journal, Vol.6, No.6, Paper No.19-00073, 2019-12
7. 池田和正, 山崎徹, 低モード密度領域における実験 SEA の拡張適用, 日本機械学会論文集, No.19-00185, 85 巻, 878 号, 2019-10J. E. Lee, M. L. Fusco and A. J. Hessel, Structure of the Ebola virus glycoprotein bound to an antibody from a human survivor, Nature, 454 (7201), 177-182 (2008).
8. 伊東弘行, 徳長稜, 野上駿平, 三浦正義, 高密度バイオマ

スブリケット有炎燃焼挙動に及ぼすバイオマス原材料の影響, 日本機械学会論文集, 85 (879), 1-11 (2019).

9. 三浦正義, 荒井治紀, 小椋隆晶, 伊東弘行, 自励振動ヒートパイプにおいて往復振動する液柱が形成する液膜に関する研究 (加振機構を用いた液膜厚さの測定), 日本機械学会論文集, 85 (879), 1-13 (2019).
10. 永田雄基, 菅原慧, 江上正, 最近点探索と進行方向の目標点設定を用いた経路制御手法のボール&プレート装置への適用, 日本機械学会論文, 86(882), 1-16 (2020.1).
11. 館山哲也, 高野敦, ハイブリッドロケットにおける低コスト・軽量化酸化剤タンクの開発, 航空宇宙技術 (オンライン論文集), 19, 19-26 (2020).
12. 高野敦, 喜多村竜太, 正井卓馬, 内圧を受ける一般異方性円筒殻の閉じた解と最適化, 航空宇宙技術 (オンライン論文集), 19, 81-89 (2020).
13. 船見祐揮, 高野敦, 星形フラクタル形状グレインを用いたハイブリッドロケットにおける平均後退速度の評価, 航空宇宙技術 (オンライン論文集), 19, 91-100 (2020).
14. 高野敦, 船見祐揮, 西野沙也佳, 星形フラクタル旋回形状グレイン搭載ハイブリッドロケット概念設計及び打上試験結果, UNISEC Space Takumi Journal, 9, 1-16 (2020).
15. 楠山純平, 小松奏絵, 橋本匠海, 棚田耀介, 中尾陽一, ビルトインモータスピンドルの最適冷却条件に関する研究, 第1報ビルトインモータスピンドルの温度変化シミュレーション, 砥粒加工学会, 64, 5 (2020), pp. 254-259.
16. 小高勢也, 川瀬美真, 楠山純平, 中尾陽一, 工作機械用温度制御システムの開発と制御性能の基礎的評価, 砥粒加工学会, 64, 4 (2020), pp. 208-213.
17. 福井拓也, 由井明紀, 北嶋孝之, 研削盤砥石カバリの衝突安全性に関する研究—カバー材の引張試験に基づく安全性予測, 砥粒加工学会誌, 64(3), 146-151 (2020).

### 研究論文Ⅱ（レフェリー付き Proceedings）

1. H. Ito, Y. Nishimaki, M. Miura, Influence of Temperature, Flow Rate and Oxygen Concentration of Oxidizer on the Flaming Combustion Behavior of Single Columned Biomass Briquette, Extended Abstracts of the Second Pacific Rim Thermal Engineering Conference (PRTEC2019), PRTEC-24091 (Hawaii, 2019. 12).
2. M. Miura, H. Arai, T. Ogura, H. Ito, Thickness of a Liquid Film Formed during Oscillation of a Liquid Column in a Pulsating Heat Pipe (Measurement Using a Forced Oscillation System), Extended Abstracts of the Second Pacific Rim Thermal Engineering Conference (PRTEC2019), PRTEC-24021 (Hawaii, 2019. 12).
3. H. Mineshita, T. Otani, M. Sakaguchi, Y. Kawakami, H. Lim and A. Takanishi, "Jumping Motion Generation for Humanoid Robot Using Arm Swing Effectively and Changing in Foot Contact Status," Proceedings of the 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 3823-3828, (Las Vegas, 2020.10).
4. H. Mineshita, T. Otani, K. Hashimoto, M. Sakaguchi, Y. Kawakami, H. Lim and A. Takanishi, "Development of a trapezoidal leaf spring for a small and light variable joint stiffness mechanism," Proceedings of the 23rd CISM IFToMM Symposium on Robot Design, Dynamics and Control, pp. 355-363, (Hokkaido, 2020.9).
5. H. Mizukami, T. Otani, J. Shimizu, K. Hashimoto, M. Sakaguchi, Y. Kawakami, H. Lim and A. Takanishi, "Investigation of Parallel Connection Circuit by Hydraulic Direct-Drive System for Biped Humanoid Robot Focusing on Human Running Motion," Proceedings of the 23rd CISM IFToMM Symposium on Robot Design, Dynamics and Control, pp. 34-42, (Hokkaido, 2020.9).
6. B. Zhang, K. Shimazu and H. Lim, Motion Control of the Autonomous Mobile Robot Considering Personal Spaces of Pedestrians, 2020 SICE International Symposium on Control Systems (ISCS), 7-11, (Tokushima, 2020.3).
7. B. Zhang, M. Kaneko and H. Lim, Development of An Autonomous Guide Robot Based on Active Interactions with Users, 2020 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), 601-604, (Hawaii, 2020.1).
8. B. Zhang, H. Xia and H. Lim, Development of an AI based Teaching Assisting System, 2019 International Conference on Artificial Intelligence, Information Processing and Cloud Computing, 1-5, (Sanya, 2019.12).
9. B. Zhang, M. Abdulaziz, K. Mikoshi and H. Lim, Development of an In-Pipe Mobile Robot for Inspecting Clefts of Pipes, 2019 IEEE International Conference on Cybernetics and Intelligent Systems (CIS) and IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics (RAM), 204-208, (Bangkok, 2019.11).
10. J. Moh, T. Kijima, B. Zhang and H. Lim, Gesture Recognition and Effective Interaction Based Dining Table Cleaning Robot, 2019 7th International Conference on Robot Intelligence Technology and Applications, 72-77, (Daejeon, 2019.11).
11. H. Mineshita, T. Otani, K. Hashimoto, M. Sakaguchi, Y. Kawakami, H. Lim and A. Takanishi, "Robotic Ankle Mechanism Capable of Kicking While Jumping and Running and Adaptable to Change in Running Speed," Proceedings of the IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, pp. 505-510, (Toronto 2019. 10).
12. J. Kusuyama, B. Kawase, Y. Nakao, M. Kanazawa and K. Ishikawa, Proposing a New Evaluation Method in Si Wafer Rotary Grinding, Proceedings of the JSME 2020 Conference on Leading Edge Manufacturing/Materials and Processing, LEMP2020, (2020).
13. S. Kodaka, B. Kawase, J. Kusuyama, Y. Nakao, Development of Temperature Control System for Machine Tools, 34th The American Society for Precision Engineering Annual Meeting (2019) .
14. S. Wakiya, S. Yamazaki, J. Kusuyama, D. Fedorynenko, Y. Nakao, Fundamental Analysis on Thermal Characteristics of High-Speed Aerostatic Spindle, 34th The American Society for Precision Engineering Annual Meeting (2019) .
15. 藤本滋, 小島翔, 一木正聡; La 添加積層型 PZT 素子を電源とした自律型加速度モニタリングシステムの実証実験, 日本機械学会, Dynamics and Design Conference 2020, Web 講演論文集(20-01), (Web 開催, 2020.9)
16. 藤本滋, 高田毅士, 成宮祥介, 蔵増真志, 伊神和忠, 樋口智一, 飯島唯司, 美原義徳; 原子力発電所の地震安全原則から具体化される耐震設計法の枠組み, 日本地震工学会, 第15回日本地震工学シンポジウム, USB 講演論文集 2019, (仙台, 2019.12)
17. 小島翔, 藤本滋, 一木正聡; La 添加積層 PZT 素子を用いた振動発電による無線加速度センサの駆動特性評価, 第36回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, Web 講演論文集 2019, (浜松, 2019.10) .
18. Toru Yamazaki, Keita Suwabe, Kousuke Nakanishi, Hirotaka Shiozaki, and Junichi Yanase, Conceptual Design Model of Road Noise on Automotive Bodies in White Based on Energy Propagation, Proceedings of The 18th Asian Pacific Vibration Conference (APVC 2019), Paper No. 185, 2019-11
19. Kai Kurihara, Takahiro Kondou, Hiroki Mori, Kenichiro Matsuzaki, and Nobuyuki Sowa, Robust Vibration Control of an Overhead Crane by Elimination of the Natural Frequency Component, Proceedings of The 18th Asian Pacific Vibration Conference (APVC 2019), Paper No. 53, 2019-11
20. C.Nakamae, A.Yui, et al., Effective Grinding of CMSX4 under Constant Removal Rate, The 22nd International Symposium on Advances in Abrasive Technology, 7-8 (2019.12).
21. A. Yui, S. Narasimalu, A. Fitrianingrum and S.Enomoto, Submerged power generation using mono-crystalline silicon solar panel- possibility of electric power generation under seawater, euspen's 20th International Conference & Exhibition, Geneva, CH, pp.77-78, June 2020
22. Takuya Fukui, Akinori Yui, Tatsuki Ikari and Takayuki Kitajima, Effect of grinding wheel safety guard thickness in the collision of a conical projectile, euspen's 20th International Conference & Exhibition, Geneva, CH, pp.639-540, June 2020

## 口頭発表

1. 三浦正義, 荒井治紀, 趙懿斌, 伊東弘行, 自励振動ヒートパイプの往復振動流において液柱が形成する液膜の厚さ (加振機構を用いた測定), 日本機械学会熱工学コンファレンス 2019 講演論文集, F121, (名古屋, 2019. 10)
2. 三浦正義, 趙懿斌, 伊東弘行, 自励振動ヒートパイプにおいて液柱往復振動に伴い生じる液膜の厚さ, E211, (金沢, 2020. 6)
3. 渡部竜也, 峯下弘毅, 大谷拓也, 川上泰雄, 林憲玉, 高西淳夫, “人間の特徵に着目した投球ヒューマノイドロボットの開発 (第 1 報: 弾性力と慣性力を利用した投球が可能な投球腕部機構の開発),” 第 38 回日本ロボット学会学術講演

- 会予稿集, 2H3-04, (online, 2020.10).
4. 磯部拳志, 張斌, 林憲玉, 筋音信号を用いた肘一自由度パワーアシストシステムの開発, ROBOMECH2020, 2P2-D17, (online, 2020.5).
  5. 陳展, 藤川純哉, 張斌, 林憲玉, パンダ型感情表現ロボットの開発 - ファジィに基づく感情認識手法の提案 -, ROBOMECH2020, 1P2-E06, (online, 2020.5).
  6. 夏海彬, 張斌, 林憲玉, 教育現場で複数 Kinect を用いたユーザ行動追跡, ROBOMECH2020, 2A2-F04, (online, 2020.5).
  7. 張斌, 仙石龍司, 林憲玉, 空間を理解したロボットの自律移動制御, 電子情報通信学会総合大会, D-8-1, (online, 2020.3).
  8. 張斌, 夏海彬, 林憲玉, 教育支援システムのための RGB-D センサを用いた受講者行動追跡, 情報処理学会全国大会, 5C-04, (online, 2020.3).
  9. 高橋亮, 江上正, スパイラル推進機構を用いた宇宙エレベーター実験機の開発, 第 62 回自動制御連合講演会, 111-02 (札幌, 2019.11).
  10. 谷田貝凌太, 江上正, 直動側面開閉機構を用いたアイリスロボットハンドの提案, 第 62 回自動制御連合講演会, 1G3-05 (札幌, 2019.11).
  11. 永瀬喬介, 江上正, リアクションホイールを用いた宇宙エレベータークライマーの姿勢制御, 第 20 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 1D2-04 (高松, 2019.12).
  12. 原戸柊, 渡部颯太, 鹿島僚太, 江上正, ドローンに搭載するアイリス機構ロボットハンドの開発, 第 20 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2E5-14 (高松, 2019.12).
  13. 後藤敬雄, 高橋亮, 江上正, インフラ検査用昇降機の開発, 第 52 回計測自動制御学会北海道支部学術講演会, A01 (札幌, 2020.3).
  14. 小林慎也, 谷田貝凌太, 江上正, アイリスロボットハンドの解析と制御, 第 52 回計測自動制御学会北海道支部学術講演会, A02 (札幌, 2020.3).
  15. 瀬野尾幸希, 横川公平, 江上正, 片流れ抑制可能な倒立振り子型電動車いすの開発, 第 52 回計測自動制御学会北海道支部学術講演会, A03 (札幌, 2020.3).
  16. 横川公平, 江上正, 車いすの段差乗り越え補助機構の開発, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2020, 1P2-F10(オンライン, 2020.5).
  17. 鹿島僚太, 渡部颯太, 原戸柊, 江上正, アイリス機構ロボットハンドを搭載したドローンの提案, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2020, 2A2-B14(オンライン, 2020.5).
  18. 渡部颯太, 江上正, アイリス機構を用いた円錐型ロボットハンドの提案, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2020, 2A2-I11(オンライン, 2020.5).
  19. 谷田貝凌太, 渡部颯太, 原戸柊, 江上正, アイリス機構を用いた多指ハンドの提案, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2020, 2A2-I13(オンライン, 2020.5).
  20. 高橋亮, 後藤敬雄, 江上正, インフラ検査用 H 型クローラクライマーの開発, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2020, 2P2-A03(オンライン, 2020.5).
  21. 中村俊貴, 江上正, 送電塔を昇降する検査用ロボットの開発, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2020, 2P2-A17(オンライン, 2020.5).
  22. 船見祐揮, 高野敦, 星形フラクタル旋回形状グレインを用いたハイブリッドロケットの地上燃焼試験, 第 63 回宇宙科学技術連合講演会講演論文集, 2E07 (JSASS-2019-4316) (徳島, 2019.11).
  23. 西野沙也佳, 高野 敦, 喜多村竜太, ハイブリッドロケットエンジン及び酸化剤タンク軽量化のための CFRP ねじの開発, 第 63 回宇宙科学技術連合講演論文集, 2E05, (徳島, 2019.11).
  24. 長田海斗, 高野敦, 喜多村竜太, めねじの引張試験および強度解析, 第 35 回宇宙構造・材料シンポジウム講演論文集, A01, (相模原, 2019.12).
  25. 李超, 高野敦, 喜多村竜太, 接着強度に対するピール止め部材の剛性の影響, 第 35 回宇宙構造・材料シンポジウム講演論文集, A02, (相模原, 2019.12).
  26. 水上諒, 高野敦, 喜多村竜太, 航空機軽量化のための直交異方性角パイプの座屈解析, 第 35 回宇宙構造・材料シンポジウム講演論文集, A03, (相模原, 2019.12).
  27. 包景軒, 高野敦, 喜多村竜太, CFRP 薄肉円筒に対する圧縮座屈実験, 第 35 回宇宙構造・材料シンポジウム講演論文集, A04, (相模原, 2019.12).
  28. 萩原圭, 武川和洋, 高野敦, 喜多村竜太, ハニカムサンドイッチフィン及び CFRP 製フィンスターの開発, 第 35 回宇宙構造・材料シンポジウム講演論文集, A05, (相模原, 2019.12).
  29. 西野沙也佳, 喜多村竜太, 高野敦, CFRP 製めねじを用いたハイブリッドロケット構造物の開発, 第 35 回宇宙構造・材料シンポジウム講演論文集, A06, (相模原, 2019.12).
  30. 岩崎愛樹, 石村康生, 中村和行, 久原隆博, 齋藤宏文, 喜多村竜太, 高野敦, ハニカムサンドイッチ構造を有する衛星搭載アンテナの熱変形に関する検討, 第 35 回宇宙構造・材料シンポジウム講演論文集, A05, (相模原, 2019.12).
  31. 三徳春季, 西條紀之, 齋藤慶紀, 船見祐揮, 喜多村竜太, 高野敦, ハイブリッドロケット用酸化剤タンクの開発, 令和元年度宇宙輸送シンポジウム講演論文集, STCP-2019-038 (相模原, 2020.1).
  32. 五十嵐裕貴, 船見祐揮, 喜多村竜太, 高野敦, トータルインパルス 50kNs 級ハイブリッドロケットエンジンの開発, 令和元年度宇宙輸送シンポジウム講演論文集, STCP-2019-041 (相模原, 2020.1).
  33. 綿貫照久, 田邊力也, 西野沙也佳, 高野敦, 喜多村竜太, 細貝淳一, セパレーションナットを用いたハイブリッド用分離機構の開発, 2019 年度宇宙輸送シンポジウム講演論文集, STCP-2019-042, (相模原, 2020.1).
  34. 星拓磨, 高野敦, 三宅真, 国廣愛彦, 超小型ロケット用独立搭載型テレメトリ装置の開発, 10th UNISEC Space Takumi Conference for Practical Study of Problem Finding and Solving in Space Systems 講演論文集, UNISEC 2020-003, (オンライン, 2020.7).
  35. 五十嵐裕貴, 高野敦, 喜多村竜太, 船見祐揮, 亜酸化窒素によるハイブリッドロケットエンジンの破裂事例と対策, 10th UNISEC Space Takumi Conference for Practical Study of Problem Finding and Solving in Space Systems 講演論文集, UNISEC 2020-004 (オンライン, 2020.7).
  36. 李超, 高野敦, 喜多村竜太, ピール止めの剛性に基づく強度解析, 第 62 回構造強度に関する講演会講演論文集, 2B08, (オンライン, 2020.8).
  37. 包景軒, 高野敦, 喜多村竜太, CFRP 薄肉円筒の軸方向の形状不整に対する圧縮座屈実験, 第 62 回構造強度に関する講演会講演論文集, 2B14, (オンライン, 2020.8).
  38. 長坂司, 竹村兼一, 松本紘宜, 加藤木秀章, 加熱処理を利用したジュート繊維の機械的特性, 日本材料学会第 11 回自動車用途コンポジットシンポジウム講演論文集, 103-104 (京都, 2019.11).
  39. T. Nagasaka, K. Matsumoto, K. Takemura and H. Katogi,



- Mechanical properties of Jute Fiber by heat treatment, Mini Symposium on Green Composites (for ICGC-11), 56 (Changwon, Korea, 2019.11).
40. H. Katogi, A. Takata, K. Takemura, H. Tunekawa and K. Matsumoto, Tensile Property Evaluation by Variation in Cross-Sectional Area and Water Vapour Permeability of Cotton Fiber, 8th International Conference on Mechanical of Biomaterials and Tissues, P1.31 (Hawaii, USA, 2019.12).
  41. 松本紘宜, 長坂司, 竹村兼一, 木粉及びセルロース添加ポリプロピレンの高温下における引張特性, 第23回先端複合材料研究センターコロキウム, AC23-8 (京都, 2020.1).
  42. 加藤木秀章, 恒川弥子, 竹村兼一, 松本紘宜, 長坂司, 加熱処理による麻繊維の分解挙動, 2020年繊維学会年次大会, 3D02 (2020.6).
  43. 寺島岳史, Au基金属ガラスの開発, 日本機械学会講演論文集 (関東支部総会講演会), 17A11 (千葉, 2020.3).
  44. 寺島岳史, Au基金属ガラスの開発と過冷却液体の粘性流動性, 日本機械学会講演論文集 (年次大会), J03137 (名古屋 (オンライン開催), 2020.9).
  45. 金邊穂純, 生島竣平, 楠山純平, 中尾陽一, 工作機械の統合的温度予測モデルの基礎的研究 (第1報: 熱伝達係数の測定と基礎モデルへの適用), 日本機械学会2020年度年次大会 (2020).
  46. 川瀬美真, 楠山純平, 中尾陽一, 六角柱モデルによる砥石の作用砥粒数および平均砥粒間隔に関する基礎的研究, 2020年度砥粒加工学会学術講演会 (2020), pp.117-118.
  47. 脇谷趣聞, 山崎颯生, 楠山純平, D. Fedorynenko, 中尾陽一, スピンドルの回転数増加に伴う冷却効果の検討, 2020年度砥粒加工学会学術講演会 (2020), pp.61-62.
  48. 田村健昇, 山口大貴, 楠山純平, 中尾陽一, 熱的安定性に優れた高速水静圧スピンドルの基本設計, 2020年度砥粒加工学会学術講演会 (2020), pp.37-38.
  49. 川瀬美真, 田中道之助, 楠山純平, 中尾陽一, 平均切れ刃間隔のモデル化とEPMAによる画像解析, 2020年度精密工学会春季大会 (2020), pp.470-471.
  50. 福井大樹, 篠塚祐希, 楠山純平, 中尾陽一, 空気圧サーボ弁による空気静圧スラスト軸受のフィードバック変位制御系の性能評価 (第一報, 外部一定負荷に対する補償性能), 日本機械学会北陸信越支部第57期総会・講演会 (2020).
  51. 田村健昇, 山口大貴, 金邊穂純, 楠山純平, 中尾陽一, 超高速水静圧スピンドルの基本設計, 日本機械学会北陸信越支部第57期総会・講演会 (2020).
  52. 山口大貴, 田村健昇, 楠山純平, 中尾陽一, 熱的安定性を考慮した超高速水静圧スピンドルの基本設計, 日本機械学会関東学生支部第59回学生員卒業研究発表講演会 (2020).
  53. 田中道之助, 川瀬美真, 楠山純平, 中尾陽一, 半導体材料の高効率高精度ロータリ研削, 砥粒加工学会ATF2020卒業研究発表会 (2020).
  54. 生島竣平, 小高勢也, 楠山純平, 中尾陽一, 工作機械の熱的特性の解明を目的とする熱伝達率と放射係数の測定実験, 砥粒加工学会ATF2020卒業研究発表会 (2020).
  55. 篠塚祐希, 福井大樹, 楠山純平, 中尾陽一, 空気静圧軸受の変位制御系における負荷変動に対する制御特性, 砥粒加工学会ATF2020卒業研究発表会 (2020).
  56. 小高勢也, 川瀬美真, 楠山純平, 中尾陽一, 冷却水温制御による工作機械用スピンドルの温度制御の試み, 日本機械学会第13回生産加工・工作機械部門講演会 (2019).
  57. 矢野大志, 西野耕一, 軌道上の液柱マランゴニ対流実験で得られた成果と今後の課題, 日本マイクログラビティ応用学会第31回学術講演会講演論文集, 25C07 (仙台, 2019.10).
  58. 有信潤哉, 矢野大志, 西野耕一, 微小重力条件下の液柱マランゴニ対流に対する周囲気体流動とふく射伝熱の影響, 日本マイクログラビティ応用学会第31回学術講演会講演論文集, 25C06 (仙台, 2019.10).
  59. 中西裕二, 船見祐揮, スタビライザによる相反転プロペラの姿勢制御に関する基礎的研究, 令和2年度佐賀大学海洋エネルギー研究センター共同利用・共同研究成果発表会講演論文集, 9-10. (佐賀, 2020-9).
  60. 原村嘉彦, 圧縮比・熱源温度比・作動ガス比熱比によるエントロピー生成の特性, 第22回スターリングサイクルシンポジウム, 44-49. (東京, 2019.11).
  61. 梶川裕登, 原村嘉彦, 定常遷移沸騰の熱伝達, 第57回日本伝熱シンポジウム, G-114 (金沢, 2020.5, 論文公開のみ).
  62. 諸隈崇幸, 加藤彰悟, 気泡合体過程における気泡間液膜厚さに及ぼすバルク液温度の影響に関する研究, 第57回日本伝熱シンポジウム, G-121 (金沢, 2020.5, 論文公開のみ).
  63. 小島翔, 藤本滋, 一木正聡; La添加積層型PZT素子を電源とした自律型状態監視システムの実証実験, 日本機械学会・関東支部, 第26期総会講演会, Web講演論文集(200-1), 2020-1, p1-p6. (東京, 2020.1).
  64. 浅田展立, 若森正悟, 山崎徹, 実験SEAによる回転鉄輪への入力同定の検討, 機械学会Dynamics and Design Conference 2020講演論文集, 333, 2020-9.
  65. 青木大祐, 若森正悟, 栗原海, 山崎徹, 定速回転時と加速回転時の車輪の振動放射音推定手法に関する基礎検討, 日本機械学会Dynamics and Design Conference 2020講演論文集, 334, 2020-9.
  66. 黄聖凱, 菊地通, 山崎徹, 非平面構造物の振動インテンシティ計測法の検討, 日本機械学会Dynamics and Design Conference 2020講演論文集, 324, 2020-9279.
  67. 巖鵬程, 山崎徹, 解析SEAによるマフラーの消音構造の適正化, 自動車技術会2020春季大会学術講演会講演予稿集, 20205160, 2020-5.
  68. 磯野オクト, 山崎徹, 中村弘毅, 澤田雅人, 櫻井一弥, 松村雄一, バイクフレーム構造の解析SEAモデリング, 自動車技術会2020年春季大会学術講演会予稿集, 20205158, 2020-5.
  69. 若森正悟, 澤田克人, 北原篤, 山崎徹, 実験SEAによるタイヤ単体の振動放射音推定法, 自動車技術会2020年春季大会学術講演会講演予稿集, 文献番号20205155, 2020-5.
  70. 磯野オクト, 山崎徹, 中村弘毅, 澤田雅人, 櫻井一弥, 松村雄一, バイクフレームの解析SEAモデリング, 日本騒音制御工学会研究発表会講演論文集, 2-2-07, pp.235-238, 2019-11.
  71. 村上和希, 中村弘毅, 山崎徹, 加茂利明, 実験SEAを用いた微小振動用制振器の効果の評価, 日本騒音制御工学会研究発表会講演論文集, 2-2-06, pp.119-120, 2019-11.
  72. 巖鵬程, 山崎徹, 自動車排気管の音響エネルギー伝搬特性に基づく初期設計, 日本騒音制御工学会研究発表会講演論文集, 1-2-17, pp.119-122, 2019-11.
  73. 中村弘毅, 加茂利明, 早川昇邦, 飯倉雅彦, 山崎徹, 車体振動に対して最適な抵抗力を持つダンパーの選定手法の確立 (第一報) - 伝達関数合成法による実車の振動低減効果予測 -, 自動車技術会2019年秋季大会学術講演会講演予稿集, 20196284, 2019-10.
  74. 若森正悟, 澤田克人, 中村弘毅, 北原篤, 山崎徹, 路面からスムースタイヤへの入力パワーの実験SEAによる評価, 自動車技術会2019年秋季大会学術講演会講演予稿集, 20196160, 2019-10.
  75. 池田和正, 武田章善, 山崎徹, 部品間エネルギー伝達に着



目した低騒音構造の初期設計,自動車技術会 2019 年秋季大会学術講演会講演予稿集, 20196159, 2019-10

76. 山崎徹, 中西康介, 諏訪部溪太, 塩崎弘隆, 柳瀬純一, ホワイトボディの振動エネルギー伝搬モデルによる概念設計, 自動車技術会 2019 年秋季大会学術講演会講演予稿集, 20196158, 2019-10
77. 由井明紀, 単結晶 Si ソーラパネルによる水中発電 (海面下における発電の可能性検証), 日本機械学会第 13 回生産加工・工作機械部門講演会, 19(307), 熊本大学 (2019.10)
78. 福井拓也, 北嶋孝之, 由井明紀, 研削盤砥石カバーの衝突安全性に関する研究(Solid to SPH による砥石破壊解析手法の検討), 日本機械学会第 13 回生産加工・工作機械部門講演会, 19(307), 熊本大学 (2019.10)
79. 福井拓哉, 由井明紀, 山田浩之, 猪狩龍樹, 北嶋孝之, 工作機械安全カバーの衝突安全性に関する研究ーポリカーボネート製目視窓の防護性能ー, 2020 年度砥粒加工学会学術講演会講演論文集 A25.

## 学術誌

1. 江上正, 中村嘉孝, 野中祐太郎, 神奈川大学ロボットプロジェクト活動報告, 神奈川大学工学研究, 3,144-145(2020).
2. 松本紘宜, 炭素繊維強化複合材料に関する研究動向 -マルチマテリアル化のための成形・接合技術-, 成形加工, 32 (8), 278-282 (2020).
3. 原村嘉彦, 神奈川大学における工学ゼネラリスト教育プログラム, 工学教育, 48(4), 92-96 (2020).
4. 山崎徹, 振動エネルギーの伝達特性に着目した音振動を伝えない筐体・システム設計手法, 自動車技術, Journal of Society of Automotive Engineers of Japan, Vol.74, No.7, pp.43-49, 2020.7
5. 山崎徹, 総論: 振動エネルギーの伝搬に着目した騒音解析・騒音制御, 騒音制御, 第 44 巻, 第 3 号, pp.117-121, 2020.6
6. 由井明紀, 監事が砥粒加工学会に求めること・期待すること, 砥粒加工学会誌, 64(1), 23(2020.1).
7. 由井明紀, サファイアウエハの振動援用インフィード研削, 超音波テクノ, 31(6), 11-18(2019.12)

## 著書

1. 江上正 (分担執筆), 宇宙ビジネス参入の留意点と求められる新技術, 新材料, (第 9 章第 3 節宇宙エレベータの開発と制御を執筆), 437-450, 技術情報協会 (2020.4).
2. 江上正, 土谷武士, 現代制御工学ー基礎から応用へ (改訂新版), 産業図書 (2020.9).

## 調査報告書

1. 山崎徹他, 令和元年度環境省委託業務「自動車単体騒音の低減方策 (今後の車外騒音規制) のあり方に関する調査業務」報告書, 公益社団法人自動車技術会共同研究センター将来の車外騒音検討委員会 (2020.3)
2. 山崎徹他, 令和元年度環境省委託業務「二輪車に装着する交換用マフラーの走行騒音消音性能調査業務」報告書, みずほ情報総研株式会社 (2020.3)

## 講演・展示会

1. 高野敦, 「ハイブリッドロケット開発・打ち上げ」～失敗許容設計及びマネジメント～, 日本プロジェクトマネジメン

ト協会例会講演会 (オンライン, 2020. 6).

2. 松本紘宜, 伸長流動を用いたナノコンポジットの混練技術, プラスチック成形加工学会 2019 年度第 1 回押出成形専門委員会 (東京, 2019.10).
3. 松本紘宜, マルチマテリアル化のための成形技術を中心とした炭素繊維強化複合材料に関する研究動向, 高分子学会関東支部 高分子のためのキャラクタリゼーションセミナー (東京, 2019.12).
4. 松本紘宜, CFRTP による軽量構造体の成形技術と異種材接合技術, プラスチック成形加工学会 2020 年度第 1 回押出成形専門委員会 (オンライン, 2020.9).
5. 山崎徹 基調講演「Co-Co 設計のすすめ」, ISID Teams セミナー「形で考えない設計」研究会の勧め, 株式会社 ISID エンジニアリング (オンライン, 2020.7)
6. 山崎徹, IDCAE スクール: 第 1 回&第 2 回合同「講義 2 : 音振動設計と IDCAE」, 日本機械学会設計工学・システム部門講習会 (オンライン, 2020.7)
7. 山崎徹, 基調講演「形で考えない NVH モデル研究会 (形で考えない設計) の試み」, System Simulation Symposium, ニュートンワークス株式会社 (東京, 2020.7)
8. 山崎徹, 形で考えない NVH モデル研究会, ISID X Innovation フォーラム 2020 TEAMS オンラインセミナー, 株式会社 ISID エンジニアリング (オンライン, 2020.2)
9. 由井明紀, ダイヤモンドの光学的魅力, 中部大学生産技術開発センター講演会 (web, 2020. 7).

## 助成金

1. 伊東弘行 (代表), 新規バイオマス含有金属除去手法の開発および適用条件に関する研究, 令和 2 年度科学研究費補助金 (継続), 基盤研究 (C), 課題番号 19K12406.
2. 三浦正義 (代表), 広い温度範囲で安定的に動作する自励振動ヒートパイプの開発, 公益財団法人 荏原昌山記念文化財団, 2020 (令和 2) 年度研究助成.
3. 江上正 (代表), ロープテザーに対する宇宙エレベータークライマーの姿勢制御 (継続), 令和 2 年度科学研究費補助金, 基盤研究 (C), 課題番号 18K04031.
4. 高野敦 (代表), 船見祐揮 (協力), 喜多村竜太 (分担), ハイブリッドロケットエンジンの軽量化, 大推力化および高燃焼効率化, 2019 年度工学研究所共同研究 A, 神奈川大学工学研究所.
5. 高野敦 (代表), 船見祐揮 (協力), 喜多村竜太 (分担), 高燃焼効率の複合材料製超小型ハイブリッドロケットの研究および開発, 平成 31 年度研究助成, 公益財団法人高橋産業経済研究財団.
6. 高野敦 (代表), 船見祐揮 (協力), 喜多村竜太 (分担), 正井卓馬 (分担), ハイブリッドロケットエンジンの軽量化, 大推力化および高燃焼効率化, 2020 年度工学研究所共同研究 A, 神奈川大学工学研究所.
7. 高野敦 (代表), 船見祐揮 (協力), 喜多村竜太 (分担), 正井卓馬 (分担), 高燃焼効率の複合材料製超小型ハイブリッドロケットの研究および開発, 令和 2 年度研究助成, 公益財団法人高橋産業経済研究財団.
8. 松本紘宜 (代表), ナノ繊維の高度利用を目的としたマルチスケール複合材料の新規創製プロセスに関する研究, 2020 年度神奈川大学工学研究所共同研究 A, 神奈川大学工学研究所.
9. 中尾陽一 (代表), 温度・変位制御機能と高い熱的安定性を有する超高速高剛性水静圧スピンドルの開発, 科学研究費補助金, 基盤研究 (C), 課題番号 17K06093.

10. 中尾陽一（代表），工作機械における各種熱移動と熱的相互干渉を考慮した統合的温度予測モデルの基礎研究，工作機械技術振興財団平成 30 年度第 40 次試験研究助成 A.
11. 楠山純平（代表），同芯異径回転軸周りの圧力差を利用した新しい切くず収集機構の開発，工作機械技術振興財団 2019 年度第 41 次試験研究助成 A.
12. 中西裕二，係留されたスタビライザ付き相反発電ユニットの姿勢制御に関する基礎的研究，令和 2 年度共同利用研究，佐賀大学海洋エネルギー研究センター.
13. 諸隈崇幸(代表)，高熱流束除熱達成に向けた気泡合体が沸騰伝熱に及ぼす影響，科学研究費補助金，若手研究，課題番号 19K14904.
14. 諸隈崇幸(分担)，狭隘制限空間内沸騰における限界熱流束向上方法の提案，科学研究費補助金，基盤研究（C），課題番号 17K06209.
15. 藤本滋（代表），高出力積層圧電素子の振動発電を電源とする設備状態監視手法に関する研究，令和 1 年度科学研究費助成事業，基盤研究（C），課題番号 18K04030.
16. 山崎徹（代表），振動エネルギー流れに基づく低振動設計，公益財団法人トランスコスモス財団 2019 年度調査研究助成
17. 山崎徹（代表），全周波数対応振動エネルギー伝搬解析法の開発，公益財団法人トランスコスモス財団 2020 年度調査研究助成
18. 由井明紀（プロジェクトリーダー），高発電効率と汚れ防止機能を有する海中設置型高機能ソーラパネルの研究開発，令和 2 年度中小企業経営支等対策費補助金（戦略的基盤技術高度化支援事業）.
19. 由井明紀（研究代表者），ダイヤモンド工具によるバインダレス超硬合金のレーザ援用微細切削加工，公益財団法人高橋産業経済研究財団
20. 由井明紀（研究代表者），硬脆材料のダイヤモンド工具によるレーザ援用微細切削加工，2020 年度工学研究所共同研究 A.

## 受託研究

1. 江上正，架空送電工事用ロボットの開発，日本電設工業株式会社.
2. 竹村兼一，松本紘宜，CNF 複合材モデルの作成と特性評価，トクラス株式会社
3. 竹村兼一，松本紘宜，CNF 添加 FRP 素材の疲労強度評価，トクラス株式会社
4. 竹村兼一，松本紘宜，研究奨学寄附金，旭化成株式会社
5. 中尾陽一，楠山純平，脆性材料向け低振動かつ高精度回転研磨装置の開発，不二越機械工業株式会社
6. 原村嘉彦，廃棄物乾燥システムの排ガス及びドレン水の熱回収に関する理論計算の構築，受託研究，エイ・エス・デイ株式会社.
7. 原村嘉彦，サブクール沸騰についての学術指導，受託研究，日野自動車株式会社.
8. 山崎徹，研究奨学寄附金，三菱自動車工業
9. 山崎徹，研究奨学寄附金，株式会社ブリダストン
10. 山崎徹，研究奨学寄附金，一般社団法人音振基盤技術研究会
11. 山崎徹，共同研究，株式会社デンソー
12. 山崎徹，共同研究，信越ポリマー株式会社
13. 山崎徹，共同研究，日本発条株式会社
14. 山崎徹，共同研究，ヤマハ発動機株式会社
15. 山崎徹，指導，株式会社 小松製作所

16. 山崎徹，共同研究，みずほ情報総研株式会社
17. 山崎徹，共同研究，トヨタ自動車株式会社
18. 由井明紀，プラスト技術を応用したダイヤモンド砥石のドレッシング，株式会社 MOLDINO.

## 海外出張

1. 山崎徹，The 18th Asia-Pacific Vibration Conference (APVC 2019), Sydney, Australia, (2019.11)
2. 由井明紀，海中ソーラ発電に関する実証実験，南洋理工大学（シンガポール）及びパタム国際大学（インドネシア），(2020.2.15- 3.3).
3. 由井明紀，The 22nd International Symposium on Advances in Abrasive Technology (ISAA2019), Shenzhen, China (2019.12.6-9).

## その他

1. 竹村兼一，松本紘宜，同志社大学 先端複合材料研究センター 嘱託研究員
2. 山崎徹，認定：JSAE フェローエンジニア，自動車技術会（2019.11）
3. 由井明紀 ISO/TC39/SC10/WG2 委員（研削盤の安全性）
4. 由井明紀（JIS 原案作成委員長），ダイヤモンド/CBN 工具-安全性要求事項，JIS B 4142
5. 由井明紀（JIS 原案作成委員長），芯なし研削盤の精度試験 JIS B 6220

## 電気電子情報工学科

### 研究論文I（レフェリー付き論文）

1. C. Bao, X. Wang, Z. Ma, C.-P. Chen and G. Lu, An Optimization Algorithm in Ultrawideband Bandpass Wilkinson Power Divider for Controllable Equal-Ripple Level, IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 30(9), 861-864 (2020).
2. B. Wu, Z. Sun, X. Wang, Z. Ma and C.-P. Chen, A Reconfigurable Wilkinson Power Divider with Flexible Tuning Range Configuration, IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 67(7), 1219-1223 (2020).
3. T. Xie, X. Wang, Z. Ma, C.-P. Chen and G. Lu, A Novel Analysis Approach for Dual-Frequency Parallel Transmission-Line Transformer with Complex Terminal Loads, IEEE Access, 8, 57472-57482 (2020).
4. T. Kagawa, F. Ono, L. Shan, R. Miura, K. Nakadai, K. Hoshiba, M. Kumon, H. G. Okuno, S. Kato and F. Kojima, Multi-hop wireless command and telemetry communication system for remote operation of robots with extending operation area beyond line-of-sight using 920 MHz/169 MHz, Advanced Robotics, 34 (11), 756-766 (2020).
5. Kazuki Kobayashi, Akiyoshi Nakayama, Susumu Abe, Norimichi Watanabe, Influence of the Al thickness of Nb/Al-AlOx/Nb Josephson junction on the magnetic field dependence of the Josephson current, Physica C: Superconductivity and its applications, 579, 1353754 (2020).
6. J. Li and L. Li, Study on Optimization of Coal Logistics Network Based on Hybrid Genetic Algorithm, International Journal of Innovative Computing, Information and Control, 15 (6), 2321-2339 (2019).

7. J. Li and L. Li, A Hybrid Genetic Algorithm Based on Information Entropy and Game Theory, IEEE Access, 8, 36602-36611 (2020).
8. 新中新二, 同期モータ・インダクタンスの一般化磁束推定法を利用した実時間同定, 電気学会論文誌D, Vol.139, No.12, pp. 973-986 (2019. 12).
9. 新中新二, dq 軸間磁束干渉をもつ同期リラクタンスモータの電流制御・効率駆動・突極位相推定, 電気学会論文誌D, Vol.140, No.3, pp. 202-210 (2020. 3).
10. 中村直人, 新中新二, 誘導電動機のための回転子抵抗変動にロバストな簡易すべり周波数形ベクトル制御法, 電気学会論文誌D, Vol.140, No.3, pp. 211-219 (2020. 3).
11. 新中新二, 空間依存インダクタンスを有する同期リラクタンスモータの動的数学モデルとベクトルシミュレータ, 電気学会論文誌D, Vol.140, No.4, pp. 327-339 (2020. 4).
12. 新中新二, 同期リラクタンスモータのトルクセンサレス・リブル低減トルク制御, 電気学会論文誌D, Vol.140, No.7, pp. 550-561 (2020. 7).
13. 陳春平, et. al., 結合行列に基づく金属フォトニック結晶構造による準ミリ波帯域通過フィルタの合理的設計, 電子情報通信学会論文誌 C, Vol.J103-C, No.8, pp.356-365 (2020. 8).
9. [Invited] C.-P. Chen, Tetsuo Anada, Zejun Zhang, Design of Metallic PhC Band-Pass Filter in Quasi-Millimeter-Wave Band, 2019 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2019), pp. 1-3, (Xi'an, China, 2019. 10).
10. M. Wakabayashi, K. Washizaka, K. Hoshiba, K. Nakada, H. G. Okuno and M. Kumon, Design and Implementation of Real-Time Visualization of Sound Source Positions by Drone Audition, Proc. 2020 IEEE/SICE International Symposium on System Integrations (SII), 814-819 (Honolulu, 2020. 1).
11. T. Hakamata, K. Hoshiba, T. Tsuchiya and N. Endoh, Forming and controlling audible spot including wide frequency band with two parametric speakers, Proc. The 40th Symposium on Ultrasonic Electronics (USE), 3P2-4 (Tokyo, 2019. 11).
12. S. Uemae, H. Yamashita, T. Sato, S. Matsumoto, K. Hoshiba, T. Tsuchiya and N. Endoh, Reduction of false detection of multiple reflections caused by attached seashells in ultrasonic non-contact thickness gauging, Proc. The 40th Symposium on Ultrasonic Electronics (USE), 3P2-7 (Tokyo, 2019. 11).
13. J. Li and L. Li, An Improvement Proposal of Genetic Algorithms Based on Information Entropy and Game Theory, IEEE Xplore Proc. of 2019 Sixth International Conference on Social Networks Analysis, Management and Security, 36-43 (Granada, 2019. 10).
14. N. Matsuki, T. Matsui, K. Michishio, B. O'Rourke, N. Oshima and A. Uedono, A Novel Optical Characterization of a-Si:H/c-Si Interface Microstructures Based on Data of Positron Annihilation Spectroscopy, ECS Transaction, 92 (9), 21-24 (Atlanta, 2019.10).
15. N. Matsuki, Y. Iida, Y. Abe, T. Shimada, T. Sato, Inter-Layer Solid-Phase Reaction in Halide Perovskite Fabricated via Alternate Laser Deposition, IEEE Xplore Proceedings, the 21th Active-Matrix Flatpanel Displays and Devices, 11-12 (Online, 2020. 9).

## 研究論文II (レフェリー付き Proceedings)

1. Zhaoxiong Meng, Tetsuya Morizumi, Sumiko Miyata, Hirotsugu Kinoshita, An Improved Design Scheme for Perceptual Hashing based on CNN for Digital Watermarking, 2020 IEEE 44th Annual Computers, Software, and Applications Conference (COMPSAC), pp.1789-1894, 13-17, DOI: 10.1109/COMPSAC 48688.2020.00048. (2020. 7).
2. E. Iwata, T. Shima, LNA noise cancellation method considering two different signal path frequency responses, AVIC2019 (Taiwan, 2019.10).
3. E. Katsuno, C.-P. Chen, T. Anada and X. Wang, Cavity and Filter Based On Air-Gap Inserted Planar MPhC Structure, 2020 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT2020), (Shanghai, China, Virtual Conference, 2020. 9).
4. Z. Zhang, Y. Tsuji, M. Eguchi, and C.-P. Chen, Study on Silicon-based Polarization Rotator Using Asymmetric Slot Waveguides, Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2019), (Xiamen, China, 2019. 12).
5. H. Sun, C.-P. Chen, Z. Zhang, T. Anada, Theoretical Design of RF Filtering Switch Using Short-circuited Stubs and Coupled-lines, Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2019), (Xiamen, China, 2019. 12).
6. E. Katsno, C.-P. Chen, T. Anada, Z. Zhang, Metallic Photonic Crystal Structure with Air-Gap and Its Applications in Resonator and Filter Design, 2019 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC2020), pp. 950-952, (Singapore, 2019. 11)).
7. X. Wang, Z. Ma, M. Ohira and C. Chen, Multi-isolation Resistors in Coupled Line Section for Wilkinson Power Divider and Its Optimization, 2019 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), pp. 306-308, (Singapore, 2019. 11).
8. B. Zhang, B. Wu, Q. Wang, X. Wang, Z. Ma and C.-P. Chen, Design of a Dual-Band Power Divider using Single Ring Structure, 2019 Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference (CSQRWC), pp. 1-3, (Taiyuan, China, 2019. 7).

## 口頭発表

1. MENG Zhaoxiong, MORIZUMI Tetsuya, MIYATA Sumiko, KINOSHITA Hirotsugu, A Scheme of Digital Copyright Management System Based on Blockchain and Digital Watermarking : Research on Improvement Method of Perceptual Hashing based on Machine Learning, 信学技報 119, no. 329, pp.21-27. (2019.12).
2. 紅林宏祐, 森住哲也, 木下宏揚, 2つの確率モデルの組み合わせによるMulti-Label Learningの解釈について ~ ラベルを教師データとみなし、評価テキストを解釈するアプローチ ~, 信学技報 vol. 119, no. 329, SITE2019-81, pp. 7-12 (2019.12).
3. 森住哲也, 論理空間の存在者及び確率測度空間の中の存在者として存在する事 : 身体性の必要条件としての言語ゲーム上の分有ロゴス, 信学技報, vol. 119, no. 329, SITE2019-86, pp. 41-46 (2019.12).
4. 澤田芳矢, 新中新二, DIW-PMSM の非電圧制限下における最大力率電流指令法, 令和2年電気学会全国大会講演論文集, 4, pp.255-256 (2020. 3).
5. 新中新二, 空間依存の回転子磁束強度・固定子インダクタンスを有する永久磁石同期モータの動的数学モデルとベクトルシミュレータ, 令和2年電気学会全国大会講演論文集, 5, pp.150-151 (2020. 3).
6. 村上穰視, 細岡竜, 新中新二, センサレス永久磁石同期モータのための同相低減高周波磁束相関を用いた離散時間搬



- 送高周波電圧印加法, 令和 2 年電気学会全国大会講演論文集, 5, pp.166-167 (2020.3).
7. 内田悠介, 新中新二, 中村直人, 空間依存回転子磁束強度・固定子インダクタンスを有する永久磁石同期モータのトルクリプル抑制法, 電気学会研究会資料, モータドライブ・回転機・リニアドライブ合同研究会, MD-20-142, RM-20-135, LD-20-085 (2020.9).
  8. 孫航, 陳春平, 勝野絵梨香, 穴田哲夫, 武田重喜, 有極型広帯域バンドパスフィルタの理論設計, 2020 年電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, エレクトロニクス, C-15-6, pp.118 (オンライン, 2020.9)
  9. 孫航, 陳春平, 張沢君, 穴田哲夫, 先端短絡スタブと平行結合線路を組み合わせた広帯域 BPF の設計理論に関する一検討, 信学技報, vol. 120, no. 54, MW2020-12, pp. 5-10 (オンライン, 2020.6).
  10. 勝野絵梨香, 陳春平, 穴田哲夫, 土屋健伸, 渡邊騎通, 5G 準ミリ波帯における非対称金属ポスト窓を用いた金属フォトニック結晶帯域通過フィルタの設計手法, 信学技報, vol. 119, no. 459, MW2019-149, pp. 53-58 (2020.3).
  11. 勝野絵梨香, 陳春平, et al, 非対称誘導性金属円柱共振器型準ミリ波帯 MPHC 狭帯域帯域通過フィルタの設計法, 信学技報, vol. 119, no. 243, EST2019-71, pp. 151-156 (2019.10).
  12. 上前舜, 虻川和紀, 佐藤智夫, 松本さゆり, 干場功太郎, 土屋健伸, 遠藤信行, 空間周波数フィルタを用いた非接触式超音波板厚測定手法の実測データによる評価, 電子情報通信学会 超音波研究会, 5-9 (オンライン, 2020.8).
  13. 山下洋佳, 袴田拓実, 佐藤智夫, 松本さゆり, 干場功太郎, 土屋健伸, 遠藤信行, M 系列変調信号を用いた周波数解析に基づく非接触式超音波板厚測定の高精度化, 電子情報通信学会総合大会, 42 (オンライン, 2020.3).
  14. 袴田拓実, 干場功太郎, 土屋健伸, 遠藤信行, 二つのパラメトリックスピーカを用いたオーディオスポット形成における頭部による影響, 電子情報通信学会 超音波研究会, 95-98 (Kyoto, 2020.1).
  15. 上前舜, 山下洋佳, 虻川和紀, 佐藤智夫, 松本さゆり, 干場功太郎, 土屋健伸, 遠藤信行, 貝が付着した港湾構造物の板厚測定における B-スキャン画像による多重反射波の検出, 電子情報通信学会 超音波研究会, (Kyoto, 2020.1).
  16. 袴田拓実, 干場功太郎, 土屋健伸, 遠藤信行, パラメトリックスピーカを用いたオーディオスポット形成における広帯域信号の安定化の検討, 第 55 回人工知能学会 AI チャレンジ研究会, 48-53 (Yokohama, 2019.11).
  17. T. Hakamata, K. Hoshiba, T. Tsuchiya and N. Endoh, Study of Stabilization of Audible Spot including Multiple Frequencies with Two Parametric Speakers, 14th TOIN International Symposium on Biomedical Engineering (BME), 150-151 (Yokohama, 2019.11).
  18. 許瑞邦, 平岡隆晴, 短絡境界平行平板平面回路のインピーダンス型等価回路導出と妥当性 ー2 次元スカラ固有関数を用いてー, 信学技報, Vol. 119, No. 242, MW2019-78, pp.71-76 (仙台, 2019.10).
  19. 平岡隆晴, 豊嶋久道, 許瑞邦, 方形導波管 H 面直角曲がりのインピーダンス型等価回路に基づく解析, 信学技報, Vol. 119, No. 242, MW2019-79, pp.77-82 (仙台, 2019.10).
  20. 許瑞邦, 平岡隆晴, 短絡平行平板平面回路のアドミタンス型等価回路導出と妥当性 ー2 次元ベクトル固有関数を用いてー, 信学技報, Vol. 119, No. 459, MW2019-150, pp.59-64 (2020.03).
  21. 許瑞邦, 平岡隆晴, 短絡平行平板平面回路のアドミタンス対応フォスタ型等価回路導出と適用結果, 信学技報, Vol. 119, No. 459, MW2019-151, pp.65-70 (2020.03).
  22. 平岡隆晴, 豊嶋久道, 許瑞邦, 方形導波管 H 面直角曲がりのアドミタンス型等価回路に基づく解析, 信学技報, Vol. 119, No. 459, MW2019-152, pp.71-76 (2020.03).
  23. 小松隆, 西沢豪, 中村聡, 三次元 MS2T-DFT を用いた CFA 動画像データの雑音除去, FIT2020 第 19 回情報科学技術フォーラム, I-041 (2020.9).
  24. 加藤匠, 能登正人, 人狼知能における古い師推定を行う人狼の提案, 情報処理学会第 82 回全国大会, 2P-03 (オンライン, 2020.3).
  25. 難波脩人, 辻順平, 能登正人, 農作物の長期的な自動栽培実現に向けたニューラルネットワークによる Q 学習手法の提案, 情報処理学会第 82 回全国大会, 4U-04 (オンライン, 2020.3).
  26. [Invited] N. Matsuki, T. Matsui, K. Michishio, B. O'Rourke, N. Oshima and A. Uedono, A Novel Optical Characterization of a-Si:H/c-Si Interface Microstructures Based on Data of Positron Annihilation Spectroscopy, 236th ECS Meeting: Photovoltaics for the 21st Century 15: New Materials and Processes, I02-1783 (Atlanta, 2019.10).
  27. 飯田裕貴, 嶋田貴大, 阿部優汰, 佐藤知正, 松木伸行, レーザ交互積層ハライドペロブスカイトにおける層間固相反応, 第 81 回応用物理学会秋季学術講演会, 11p-Z11-11 (オンライン, 2020.9).
  28. N. Matsuki, Y. Iida, Y. Abe, T. Shimada, T. Sato, Inter-Layer Solid-Phase Reaction in Halide Perovskite Fabricated via Alternate Laser Deposition, The 21th Active-Matrix Flatpanel Displays and Devices (Online, 2020.9).
  29. R. Kobayashi, S. Yoneda and S. Yamaguchi, Precise control of DNA denaturation and amplification by vibration, the 8th International Conference of ASPEN (ASPEN2019), P06 (Matsue, 2019.11).
  30. 名倉雅人, 米田征司, 山口栄雄, 振動子駆動による振動 PCR 法, 生体医工学シンポジウム 2020, 2A-22 (オンライン, 2020.9).

## 学術誌

1. 土屋健伸, 2019 年第 2 回談話会要旨, 海洋音響学会, 46 (4), 188-193 (2019).
2. 土屋健伸, 海と産業革新コンベンション (うみこん 2019) 参加報告, 海洋音響学会, 46 (4), 196-201 (2019)
3. 土屋健伸, 図書紹介, 海洋音響学会, 47 (2), 84-87 (2020).
4. 土屋健伸, パラメトリックスピーカの放射音場特性, 騒音制御, 44 (2), 71-74 (2020).

## 著書

1. 豊嶋久道, メタレーダー4&5 共通ライブラリによる EA 開発入門, T&Y 総合研究所 (2019).
2. 松木伸行, 大久保勇男, レーザ堆積法 (レーザアブレーション法), 2020 版薄膜作製応用ハンドブック 第 2 編 2 章 5 節, p372~380, (株)エヌ・ティー・エス (2020).

## 調査報告書

1. 松木伸行, 擬定常状態光伝導度測定システム, 平成 28 年度工学部特別予算重要機器整備費関連研究報告, 神奈川大学工学研究, 2, 91-92, (2019).
2. 松木伸行, 山口栄雄, 本橋輝樹, 米田征司, 佐藤知正, 無



機触媒／半導体ハイブリッド型水素・酸素生成太陽光熱電池の創製, 神奈川大学 工学研究, 2, 101-104, (2019).

## 講演・展示会

1. 陳・張研究室, Microwave Workshops & Exhibition 2019 (MWE2019) 出展 (横浜パシフィコ, 2019.11).
2. 土屋健伸, 海洋内伝搬シミュレーションの現状 ―浅海域を中心に―, 海洋音響学会海中騒音の評価手法研究部会講演会 (2019.10).
3. 渡邊騎通, 阿部晋, 中山明芳, Nb/Al-AIOx/Nb ジョセフソン接合を流れるジョセフソン電流の垂直磁界依存性, 2019 年日本表面真空学会学術講演会 (つくば, 2019. 10).
4. N. Watanabe, S. Abe, A. Nakayama, Measurement of Two-Dimensional Magnetic Field Dependence of Josephson Current through Nb/Al-AIOx/Nb Josephson Junction, 13th Superconducting SFQ VLSI Workshop (横浜, 2020. 1).
5. 松木伸行, エネルギーをみんなにクリーンに, 鎌倉ユネスコ協会 SDGs みらい塾第 2 期 (2019. 11).
6. 松木伸行, ペロブスカイト／シリコンタンデム太陽電池の作製, 日本表面真空学会 2020 年 1 月研究例会 (東京, 2020. 1).
7. 松木伸行, ハライドペロブスカイト薄膜のコンビナトリアルレーザー分子線堆積プロセス開発, 固体レーザーの高速探索と機能開発に向けたインフォマティクス研究会 (東京, 2020. 3).
8. N. Matsuki, Recent trend in the development of Halide Perovskite/Silicon Heterojunction Solar Cells: towards over 30%, The 25th Anniversary of Permanent Neutrality of Turkmenistan - Resolute step in strengthening International Cooperation - (Online, 2020. 4).

## 助成金

1. 陳春平, 穴田哲夫, 5G 無線通信を支えるマルチバンドとミリ波デバイスの理論設計による迅速開発, 平成 30 年度年度科学研究費助成金・基盤研究(C), 課題番号 16K06320.
2. 奨学寄附金, 株式会社トーイツ(2019).
3. 松木伸行 (代表), 超高真空製膜装置用脱着式ポータブル走査型電気化学セル顕微鏡の開発, (地独) 神奈川県立産業技術総合研究所 産学公連携事業化促進研究 (平成 30 年度～令和 2 年度).
4. 松木伸行 (代表), DNA のレーザー分子線堆積に基づくニューパラダイム: 新規ハイブリッド薄膜材料の創製, 神奈川大学工学研究所共同研究 (A).

## 受託研究

1. 松木伸行, 再生可能エネルギー分野への静電塗布工法応用開発, ナガセテクノエンジニアリング株式会社.

## 海外出張

1. 干場功太郎, 2020 IEEE/SICE International Symposium on System Integrations (SII), Honolulu, USA (2020. 1).
2. 干場功太郎, The 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Macao, China (2019. 11).
3. 松木伸行, 236th The Electrochemical Society Meeting, Atlanta, USA (2019. 10).

## 褒賞

1. 新中新二, 電気学会業績賞, モータドライブ工学の進歩・発展および普及への貢献」(2020. 6).
2. T. Hakamata, 14th TOIN International Symposium on Biomedical Engineering (BME), Award of Excellence, Prize of Gold (2019. 11).
3. 加藤匠, 能登正人, 人狼知能における古い師推定を行う人狼の提案, 学生奨励賞, 情報処理学会第 82 回全国大会 (2020. 3).
4. 難波脩人, 辻順平, 能登正人, 農作物の長期的な自動栽培実現に向けたニューラルネットワークによる Q 学習手法の提案, 学生奨励賞, 情報処理学会第 82 回全国大会 (2020. 3).

## 学位

1. 中村直人, 周波数形オブザーバを用いた誘導電動機のベクトル制御法に関する研究, 博士 (工学), 神奈川大学 (2020. 3).
2. 李嘉誠, The Study on Multi-target Transportation Problem Based on Improved Genetic Algorithm, 博士 (工学), 法政大学 (2020. 3).

# 物質生命化学科

## 研究論文I (レフェリー付き論文)

1. Y. Oda, M. Inutsuka, R. Awane, M. Totani, N. L. Yamada, M. Haraguchi, M. Ozawa, H. Matsuno and K. Tanaka, A Dynamic Interface Based on Segregation of an Amphiphilic Hyperbranched Polymer Containing Fluoroalkyl and Oligo(ethylene oxide) Moieties, Macromolecules, 53 (7), 2380-2387 (2020).
2. J. Hirayama, I. Orlowski, S. Iqbal, M. Douthwaite, S. Ishikawa, P. Miedzak, J. Bartley, J. Edwards, Q. He, R. Jenkins, T. Murayama, C. Reece, W. Ueda, D. Willock, G. Hutchings, The Effects of Dopants on the Cu-ZrO<sub>2</sub> Catalysed Hydrogenation of Levulinic Acid, J. Phys. Chem. C, 123, 7879-7888 (2019).
3. Z. Zhang, M. Sadakane, M. Hara, Y. Li, W. Ueda, Intramolecular Electron Transfer and Oxygen Transfer of Phosphomolybdate Molecular Wires, Inorg. Chem. 58 (18) 12272-12279(2019).
4. M. Sadakane, K. Kodato, N. Yasuda, S. Ishikawa, W. Ueda, Thermal Behavior, Crystal Structure, and Solid-State Transformation of Orthorhombic Mo-V Oxide under Nitrogen Flow or in Air, ACS Omega, 4, 13165-13171 (2019).
5. S. Ishikawa, T. Murayama, B. Katryniok, F. Dumeignil, M. Araque, S. Heyte, S. Paul, Y. Yamada, M. Iwazaki, N. Noda, W. Ueda, Influence of the Structure of Trigonal Mo-V-M3rd Oxides (M3rd; -, Fe, Cu, W) on Catalytic Performances in Selective Oxidations of Ethane, Acrolein, and Allyl Alcohol, Appl. Catal., General A, 584, 117151 (2019).
6. T. Murayama, S. Ishikawa, N. Hiyoshi, Y. Goto, Z. Zhang, T. Toyao, K. Shimizu, S. Lee, W. Ueda, High Dimensionally Structured W-V Oxides as Highly Effective Catalysts for Selective Oxidation of Toluene, Catal. Today, in press (2019).
7. Y. Kon, T. Nakashima, T. Fujitani, T. Murayama, W. Ueda, Dehydrative Allylation of Amine with Allyl Alcohol by Titanium Oxide Supported Molybdenum Oxide Catalyst, Synlett,

- 30, 287-292 (2019).
8. S. Ishikawa, M. Shinoda, Y. Motoki, S. Tsurumi, M. Kimura, N. Hiyoshi, A. Yoshida, W. Ueda, Synthesis of Fluoride-Containing High Dimensionally Structured Nb Oxide and Its Catalytic Performance for Acid Reactions, *Inorg. Chem.*, 59, 9086-9094 (2020).
9. K. Shimoda, S. Ishikawa, M. Tashiro, M. Kumaki, N. Hiyoshi, W. Ueda, Synthesis of High Dimensionally Structured Mo-Fe Mixed Metal Oxide and Its Catalytic Activity for Selective Oxidation of Methanol, *Inorg. Chem.*, 59, 5252-5255 (2020).
10. Z. Zhang, H. Tatenno, M. Hara, W. Ueda, Tin Oxide-Coated Transition Metal Oxide Molecular Wires for Biomass Conversion, *New J. Chem.*, 44, 5147-5151 (2020).
11. Z. Zhang, H. Wang, H. Yoshikawa, D. Matsumura, S. Hatao, S. Ishikawa, W. Ueda, Zeolitic Vanadomolybdates as High-Performance Cathode-Active Materials for Sodium-Ion Batteries, *ACS Appl. Mater. Interfaces.*, 12, 6056-6063 (2020).
12. T. Matsumoto, M. Saito, S. Ishikawa, K. Fujii, M. Yashima, W. Ueda, High Catalytic Activity of Crystalline Lithium Calcium Silicate for Oxidative Coupling of Methane Originated from Crystallographic Joint Effects of Multiple Cations, *T. Motohashi, ChemCatChem*, 212, 1968-1972 (2020).
13. S. Inukai, S. Ishikawa, T. Tanabe, Y. Jing, T. Toyao, K. Shimizu, W. Ueda, Thermally Induced Transformation of Sb-Containing Trigonal  $\text{Mo}_3\text{VO}_x$  to Orthorhombic  $\text{Mo}_3\text{VO}_x$  and Its Effect on the Catalytic Ammoxidation of Propane, *Chem. Mater.*, 32, 1506-1516 (2020).
14. S. Ishikawa, N. Noda, M. Wada, S. Tsurumi, W. Ueda, Selective Oxidation of Methacrolein over Crystalline  $\text{Mo}_3\text{VO}_x$  Catalysts and Comparison of Their Catalytic Properties with Heteropoly Acid Catalysts, *ACS. Catal.*, 10, 10535-10545 (2020).
15. K. Hirooka, S. Shioda, and M. Okada. Identification of critical residues for the catalytic activity of ComQ, a *Bacillus* prenylation enzyme for quorum sensing, by using a simple bioassay system. *Biosci. Biotechnol. Biochem.*, 2020, 84(2), 347-357.
16. K. Ibe, T. Yamada, and S. Okamoto, Synthesis and Vitamin D Receptor Affinity of 16-Oxa Vitamin D<sub>3</sub> Analogues, *Organic & Biomolecular Chemistry*, 17, 10188-10200 (2019).
17. R. Yamada, I. Nomura, Y. Yamaguchi, Y. Matsuda, Y. Hattori, H. Tada, A. Ono, and Y. Tanaka, Electrical conductance measurement of  $\text{Hg}^{\text{II}}$ -mediated DNA duplex in buffered aqueous solution, *Nucleosides, Nucleotides, & Nucleic Acids*, 39 (8), 1083-1087 (2020).
18. H. Saneyoshi, K. Nakamura, K. Terasawa, and A. Ono, Development of Bioreduction Labile Protecting Groups for the 2'-Hydroxyl Group of RNA, *Organic Letters*, 22, 15, 6006-6009 (2020).
19. H. Saneyoshi, Y. Yamamoto, T. Ohta, S. Akai, and A. Ono, Thiol-responsive pro-fluorophore labeling: Synthesis of a pro-fluorescent labeled oligonucleotide for monitoring cellular uptake, *Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters*, 30, 127222 (2020).
20. T. Funai, M. Aotani, R. Kiri, J. Nakamura, Y. Miyazaki, O. Nakagawa, S. Wada, H. Torigoe, A. Ono, and H. Urata, Silver(I) ion-mediated cytosine-containing base pairs: Metal ion specificity for duplex stabilization and susceptibility toward DNA polymerases, *ChemBioChem*, 21 (4), 517-522 (2020).
21. T. Hashimoto, M. Kumai, M. Maeda, K. Miyoshi, Y. Tsuchido, S. Fujiwara, and T. Hayashita, Structural Effect of Fluorophore on Phenylboronic Acid Fluorophore/Cyclodextrin Complex for Selective Glucose Recognition, *Front. Chem. Sci. Eng.*, 14, 53-60 (2020).
22. K. Sugita, Y. Tsuchido, C. Kasahara, M. A. Casulli, S. Fujiwara, T. Hashimoto, and T. Hayashita, Selective Sugar Recognition by Anthracene-Type Boronic Acid Fluorophore/Cyclodextrin Supramolecular Complex under Physiological pH Condition, *Front. Chem.*, 7, 806 (2019).
23. Huanjun Kong, Xueping Sun, Liu Yang, Xinling Liu, Haifeng Yang and Ren-Hua Jin, "Polydopamine/silver substrates stemmed from chiral silica for SERS differentiation of amino acids enantiomers", *ACS App. Mater. & Inter.*, 12, 29868-29875 (2020).
24. Xueping Sun, Huanjun Kong, Qinghai Zhou, Seiji Tsunega, Xinling liu, Hai-Feng Yang, and Ren-Hua Jin, "Chiral plasmonic nanoparticles assisted Raman enantioselective recognition", *Anal. Chem.* 92, 8015-8020 (2020).
25. Wen-Li Wang and Ren-Hua Jin, "A unique polymersome covered by loop-cluster polyamine corona", *RSC Adv.*, 10, 13260-13266 (2020).
26. Seiji Tsunega, Ren-Hua Jin, Takuya Nakashima, Tsuyoshi Kawai, "Transfer of chiral information from silica host to achiral luminescent guests: A simple approach to accessing circularly polarized luminescent systems", *ChemPlusChem*, 85, 619-626 (2020) (selected as VIP, cover page).
27. I. Terao, S. Horii, J. Nakazawa, M. Okamura and S. Hikichi, Efficient alkane hydroxylation catalysis of nickel(II) complexes with oxazoline donor containing tripodal tetradentate ligands, *Dalton Trans.*, 49 (18), 6108 - 6118 (2020).
28. Takashi Tsuda, Yuta Ishihara, Tatsuya Watanabe, Nobuo Ando, Takao Gunji, Naohiko Soma, Susumu Nakamura, Narumi Hayashi, Takeo Ohsaka, Futoshi Matsumoto, An Improved High-rate Discharging Performance of "Unbalanced"  $\text{LiFePO}_4$  Cathodes with Different  $\text{LiFePO}_4$  Loadings by a Grid-patterned Micrometer Size-holed Electrode Structuring, *Electrochemistry*, 87 (6), 370-378 (2019).
29. Takao Gunji, Hiroya Ochiai, Yu Isawa, Yubin Liu, Fumihiro Nomura, Masahiro Miyauchi, Futoshi Matsumoto, Electrocatalytic Conversion of Carbon Dioxide to Formic Acid over Nanosized  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  Intermetallic Compounds with a  $\text{SnO}_2$  Shell Layer, *Catalysis Science & Technology*, 9, 6577-6584 (2019).
30. Xiaolin Sun, Quanhai Niu, Depeng Song, Shimei Sun, Minmin Li, Takeo Ohsaka, Futoshi Matsumoto, Jianfei Wu, Constructing an interface compatible Li anode in organic electrolyte for solid-state lithium batteries, *Journal of Energy Storage*, 27, 101142 (2020).
31. Tatsuya Watanabe, Kouji Hirai, Fuma Ando, Shoudai Kurosumi, Shinsaku Ugawa, Hojin Lee, Yuta Irii, Fumihiko Maki, Takao Gunji, Jianfei Wu, Takeo Ohsaka, Futoshi Matsumoto, Surface Double Coating of  $\text{LiNi}_a\text{Co}_b\text{Al}_{1-a-b}\text{O}_2$  ( $a > 0.85$ ) Cathode with  $\text{TiO}_x$  and  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  to Apply a Water-Based Hybrid Polymer Binder to Li-Ion Batteries' Preparation, *RSC Advances*, 10, 13642-13654 (2020).
32. Takushi Shimane, Tsukasa Watanabe, Nohara Yokota, Futoshi Matsumoto, Manabu Tanaka, Hiroyoshi Kawakami, Secondary battery Performance of Solid Polymer Electrolyte membranes Based on Lithium Ion Conductive Polyimide Nanofibers, *J. Photopolym. Sci. Technol.*, 33(3), 321-325 (2020).
33. T. Gunji, H. Ochiai, T. Ohira, Y. Liu, Y. Nakajima, F. Matsumoto,

Preparation of Various Pd-based Alloys for Electrocatalytic CO<sub>2</sub> Reduction Reaction - Selectivity Depending on Secondary Elements -, Chem. Mater., 32, 16, 6855-6863 (2020).

34. Miwa Saito, Kenji Arai, Nami Uekusa, Nozomi Tominaga, Teruki Motohashi, Thermogravimetric and desorbed-gas analyses of perovskite-type Ba(Zn<sub>x</sub>Nb<sub>1-x</sub>)O<sub>3</sub>(OH)<sub>2</sub>, Journal of the Ceramic Society of Japan 127, 777-784 (2019).
35. Tomohiro Matsumoto, Miwa Saito, Satoshi Ishikawa, Kotaro Fujii, Masatomo Yashima, Wataru Ueda, Teruki Motohashi, High Catalytic Activity of Crystalline Lithium Calcium Silicate for Oxidative Coupling of Methane Originated from Crystallographic Joint Effects of Multiple Cations, ChemCatChem, 12, 1968-1972 (2020).
36. Yuki Kinoshita, Yuto Shimoyama, Yoichi Masui, Yoshiteru Kawahara, Kenji Arai, Teruki Motohashi, Yasuto Noda, and Sayaka Uchida, Amorphous High-Surface-Area Aluminum Hydroxide-Bicarbonates for Highly Efficient Methyl Orange Removal from Water, Langmuir 36, 6277-6285 (2020).
37. Tingru Chen, Yusuke Asakura, Takuya Hasegawa, Teruki Motohashi, and Shu Yin, A simple and novel effective strategy using mechanical treatment to improve the oxygen uptake/release rate of YBaCo<sub>4</sub>O<sub>7+δ</sub> for thermochemical cycles, Journal of Materials Science & Technology 68 8-15 (2020).
38. Satoshi Ogawa, Yasuyo Ogino, Masao Yonemura, Toshiharu Fukunaga, Hisao Kiuchi, Kei Nakayama, Ryo Ishikawa, Yuichi Ikuhara, Yoshihiro Doi, Kenta Suzuki, Miwa Saito, Teruki Motohashi, Synthesis of Novel Melilite-Type Iron/Cobalt Oxides and Their Oxygen Evolution Reaction Electrocatalytic Activity, Chemistry of Materials 32, 6847-6854 (2020).
39. Y. Tokita, K. Sugawara, R. Awayama, Y. Ohta and T. Yokozawa, Synthesis of Molecular-Weight-Controlled Polyfluorene with Boronate at One End, J. Polym. Sci., Part A: Polym. Chem., 57 (24), 2498-2504 (2019).
40. K. Urushibara, T. Yamada, A. Yokoyama, H. Mori, H. Masu, I. Azumaya, H. Kagechika, T. Yokozawa and A. Tanatani, Development of Helical Aromatic Amide Foldamers with a Diphenylacetylene Backbone, J. Org. Chem., 85 (4), 2019-2039 (2020).
41. H. Sugita, Y. Ohta and T. Yokozawa, Synthesis of cyclic aromatic polymer containing thiophene or pyridine by means of unstoichiometric Suzuki-Miyaura cyclic polycondensation: Effect of the position of bromine of heteroarylenes on cyclic polycondensation, J. Polym. Sci., 58 (9), 1236-1240 (2020).
42. 實吉尚郎、小野晶、プロオリゴ型核酸医薬を志向した保護基の開発研究、有機合成化学協会誌、78 (9), 886-893 (2020). <https://doi.org/10.5059/yukigoseikyokaishi.78.886>
43. 安藤 風馬、田邊 豊和、郡司 貴雄、松本 太、PtX 金属間化合物ナノ粒子における X 元素の脱離度合いと酸素還元電極触媒活性との関係、燃料電池(The Journal of Fuel Cell Technology), 19 (4), 91-99 (2020)
44. 郡司貴雄、宇井彪流、渡邊達也、安藤風馬、松本 太、AlCl<sub>3</sub>/LiAlH<sub>4</sub>/エーテル系溶媒からのアルミニウムの無電解めっき(1) ～めっき条件の最適化～、表面技術協会誌、71(8), 521-529 (2020)
45. 水品愛都、林 遙介、横井健人、河合陽賢、郡司貴雄、松本太、無電解めっき法を用いた Fe 基板への Sn 高含有(> 30 at.%) Ni-Sn 薄膜の作製 (1) ～Ni-Sn 薄膜のめっき浴組成の最適化の試み～、表面技術協会誌、71(9), 577-585 (2020).

## 研究論文II (レフェリー付き Proceedings)

1. 岡田正弘、翻訳後修飾によるトリプトファン残基のイソプレニル化、神奈川大学工学研究, 2019, 2, 18-20.
2. Touya Kujime, Fuma Ando, Takao Gunji, Futoshi Matsumoto, Review of the Electrochemical Deposition of an Aluminum Layer from Aprotic Solvents - Old and New Solvents, Additives, and New Technologies -, Current Topics in Electrochemistry, 21, 1-20 (2019).
3. Tastsuya Watanabe, Takao Gunji, Nobuo Ando, Futoshi Matsumoto, Technical Review of the Perpendicular Pre-doping Method of Li<sup>+</sup> Ions into Anodes in Lithium Ion Capacitors and Batteries, Current Topics in Electrochemistry, 21, 63-77 (2019).
4. T. Watanabe, T. Gunji, T. Tsuda, F. Ando, N. Ando, S. nakamura, N. hayashi, N. Soma, F. Matsumoto, Application of a Holed Cathode and Anode Prepared with a Picosecond Pulsed Laser to Lithium Ion Battery (2) ~ Analysis of the Structure of Holed Cathode Layers ~, ECS Transactions, Electrochemical Society, Inc., 97, 101-109 (2020).
5. T. Watanabe, T. Gunji, K. Suzuki, N. Ando, S. Nakamura, N. Hayashi, N. Soma, F. Matsumoto, Application of a Holed Cathode and Anode Prepared with a Picosecond Pulsed Laser for Lithium Ion Batteries (1) ~ Performance of Holed Cathodes with Solid-State Electrolytes ~, ECS Transactions, Electrochemical Society, Inc., 97, 859-868 (2020).
6. Mitsuru Yamada, Tatsuya Watanabe, Takao Gunji, Jianfei Wu, Futoshi Matsumoto, Review of the design of current collectors for improving the battery performance in lithium-ion and post-lithium-ion batteries, Electrochem, MDPI, 2, 124-159 (2020).

## 口頭発表

1. 佐藤大輝、片岡利介、犬束学、池原飛之、高分子薄膜の球晶成長におけるレジーム転移温度の分子量・膜厚依存性、第 69 回高分子学会年次大会, 1Pc019 (福岡, 2020. 5).
2. 犬束学、佐藤大輝、山田悟史、池原飛之、水界面におけるポリ(ε-カプロラクトン)の構造と物性、第 69 回高分子学会年次大会, 1Pd036 (福岡, 2020. 5).
3. 青木和沙、石川理史、上田渉、酸化-還元周期処理した結晶性 Mo<sub>29</sub>V<sub>11</sub>O<sub>112</sub> 複合酸化物触媒のエタン酸化活性、第 49 回石油・石油化学討論会、(山形, 2019. 10).
4. 仁藤廣一、石川理史、上田渉、ε-Keggin 構造をユニットとするマイクロ細孔性複合酸化物触媒による乳酸エチルの気相酸化、第 49 回石油・石油化学討論会、(山形, 2019. 10).
5. 今喜裕、石川理史、中島拓哉、鶴見翔太、永島裕樹、藤谷忠博、上田渉、MoO<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> 触媒を用いた高効率アリル化反応における担体の効果、第 49 回石油・石油化学討論会、(山形, 2019. 10).
6. 神山曜帆、Z. Zhenxing、石川理史、猪股雄介、村山徹、上田渉、W<sub>4</sub>V<sub>3</sub>O<sub>19</sub> 複合酸化物のイオン交換によるマイクロ細孔性質制御およびその NH<sub>3</sub>-SCR 触媒活性、第 49 回石油・石油化学討論会、(山形, 2019. 10).
7. S. Ishikawa, Y. Yamada, N. Noda, W. Ueda, Selective oxidation of acrolein over crystalline Mo-V-W-O catalyst, 第 49 回石油・石油化学討論会、(山形, 2019. 10).
8. 石川理史、上田渉、結晶性 Mo<sub>3</sub>VO<sub>x</sub> への骨格金属置換および異金属導入に立脚した選択酸化活性制御、日本結晶学会令和元年度年会、(石川, 2019. 11).
9. M. Tao, S. Ishikawa, W. Ueda, Synthesis of zeolitic Mo-doped



- vanadotungstate materials with tailorable oxidability and acidity, 第 126 回触媒討論会 (オンライン, 2020. 9)
10. 小杉雄大, 石川理史, 上田渉, Pharmacosiderite 型  $\text{Mo}_4\text{P}_3\text{O}_{16}$  の合成とマイクロ孔吸着能, 第 126 回触媒討論会 (オンライン, 2020. 9)
  11. 川村美紗希, 石川理史, 定金正洋, 上田渉, Keggin 型ヘテロポリ酸を構造ユニットとした結晶性 W-V 複合酸化物結晶の合成とその解析, 第 126 回触媒討論会 (オンライン, 2020. 9)
  12. 石川理史, 幸谷真芸, 池田拓史, 上田渉, ピリジンと Keggin 型ポリ酸で構成される結晶性  $(\text{Py})_x\text{PMo}_{12}\text{O}_y$  触媒の物質解析とメタクロレイン選択酸化反応, 第 126 回触媒討論会 (オンライン, 2020. 9)
  13. 下田光祐, 宮沢真維, 石川理史, 上田渉,  $\{\text{Mo}_6\text{O}_{21}\}_6\cdot 5$  員環ユニットを基盤とした Mo および W 酸化物の合成と酸化触媒機能, 第 126 回触媒討論会 (オンライン, 2020. 9)
  14. 野田渚紗, 石川理史, 上田渉, メタクロレイン酸化とアクロレイン酸化における結晶性  $\text{Mo}_3\text{VO}_x$  複合酸化物の触媒活性差に関する考察, 第 126 回触媒討論会 (オンライン, 2020. 9)
  15. 仁藤廣一, 石川理史, 上田渉,  $\varepsilon$ -Keggin 型 ポリ酸を構造ユニットとしたマイクロ細孔性  $\text{Co}_3\text{Mo}_{12}\text{O}_{40}$  複合酸化物におけるイオン交換能と乳酸エチルの気相酸化, 第 126 回触媒討論会 (オンライン, 2020. 9)
  16. 石川理史, 上田渉, Oxidation catalysis over crystalline  $\text{Mo}_3\text{VO}_x$  catalysts, 錯体化学会第 70 回討論会 (オンライン, 2020. 9)
  17. 岡田正弘. 納豆のネバネバを誘導するペプチドの発見. 神大テクノフェスタ 2020『健康長寿にむけたテクノロジー』, (神奈川大学, 神奈川, 2020. 11. 13)
  18. 澄本慎平, 小林正幸, 佐藤理史, 四宮誠一, 岩崎有紘, 須田彰一郎, 照屋俊明, 犬塚俊康, 大野修, 岡田正弘, 末永聖武. ネクロシス様の細胞死を誘導する minnamide A の絶対立体配置の決定と生物活性. 第 62 回天然有機化合物討論会, P3-12 (名古屋(オンライン), 2020. 9. 24)
  19. 吉村果歩, 石川まるみ, 北川史也, 入山瑠理, 韋思思, 高橋巧真, 澄本慎平, 岡田正弘. 枯草菌由来トリプトファンレニル化酵素の基質特異性に関する研究. 日本化学会第 100 春季年会, 1H6-39 (東京理科大学, 千葉, 2020. 3. 22)
  20. K. Sakai, T. Yamada, S. Okamoto, Ester aminolysis catalyzed by 2-pyridone derivatives, 3PC-008, 3PC-001, (千葉, 2020.3) .
  21. K. Ibe, M. Ogami, T. Yamada, S. Okamoto, Synthesis and Vitamin D Receptor Affinity of 16-oxa Vitamin D3 Derivatives.-2, 3PC-002, 3PC-001, (千葉, 2020.3) .
  22. M. Ogami, S. Okamoto, T. Yamada, K. Ibe, Synthesis and Vitamin D Receptor Affinity of 16-oxa Vitamin D3 Derivatives.-1, 3PC-001, (千葉, 2020.3) .
  23. Y. Okabe, T. Yamada, S. Okamoto, Nickel catalyzed cycloaddition polymerization of 1,6-diynes, 3PA-012, 3PC-001, 2020 年 3 月 (千葉, 2020.3) .
  24. Y. Kimura, N. Kikuta, Y. Yasuda, T. Uchida, T. Yamada, S. Okamoto, Development of dual-mode coupling polymerization by a low-valent titanium reagent  $\text{Ti}(\text{O}-i\text{-Pr})_4/\text{Me}_3\text{SiCl}/\text{Mg}$ , 1PB-141, 3PC-001, 2020 年 3 月 (千葉, 2020.3) .
  25. 木村祐也, 菊田奈菜, 安田葉助, 山田健, 岡本専太郎, 低原子価チタン反応剤による dual-mode カップリング重合法の開発, 第 9 回 CSJ 化学フェスタ, P8-076, (東京, 2019.10).
  26. 山本春佳, 小沢早紀, 中川理絵, 山田健, 岡本専太郎, 嶋田幸久, IBA の生合成阻害剤の探索, 第 9 回 CSJ 化学フェスタ, P5-070, (東京, 2019.10).高橋脩, 廣瀬友靖, 君嶋葵, 岩月正人, 穂苅玲, 石山亜紀, 山田健, 菅原章公, 大村智, 砂塚敏明, 抗マラリア活性を有する(+)-Diatretol の不斉全合成, 第 116 回有機合成シンポジウム 2019 年【秋】, O-37, (東京, 2019.10).
  27. 川井 李佳, 大樂 武範, 小野 哲也, 吉田 健太郎, 近藤 次郎, 小野 晶, 田中 好幸, 柏木 良友, DMSO 中におけるシチジン/ $\text{Ag}^+$  (2:1)錯体の還元電位, 日本薬学会第 140 年会, 京都国際会議場, 2020 年 3 月 25 日~28 日 (ポスター: 28P-am227S)
  28. 小野 晶, 三上 智紀, 鈴木 海斗, 堀川 匡嗣, 寺澤 一馬, 太田 貴之, 中村 康大, 實吉 尚郎, 細胞内で除去される保護基を結合したプロドラッグ型核酸医薬の合成手法の開発研究, 日本薬学会第 140 年会, 京都国際会議場, 2020 年 3 月 25 日~28 日 (口頭発表 26L-pm12)
  29. 荒川章 裕, 木田隼英, 安達咲希, 小野 晶, 浦田秀仁, 平林 佳, 鳥越秀峰, 2 本鎖 DNA の融解温度の上昇が金属イオンとミスマッチ塩基 対の特異的結合を必ずしも示すわけではない, 日本化学会第 100 春季年会, 東京理科大学・野田キャンパス, 2020 年 3 月 22 日~25 日 (口頭 3E6-01)
  30. 中山澄玲, 安達咲希, 小野 晶, 平林 佳, 鳥越 秀峰, 分子夾雑環境における金属イオンとミスマッチ塩基対の特異的結合, 日本化学会第 100 春季年会, 東京理科大学・野田キャンパス, 2020 年 3 月 22 日~25 日 (口頭 3E6-02)
  31. A. Ono, T. Atsugi, H. Ito, M. Goto, H. Saneyoshi, J. Kondo, Novel Structures of modified oligonucleotides and oligonucleotide-metal complexes, 第 46 回国際核酸化学シンポジウム, 小金井市 (宮地楽器ホール), 2019 年 10 月 29 日~31 日(ポスター: 122-123)
  32. M. Inoshita, R. Ikeda, A. Ono, Synthesis and higher structure formation of modified oligonucleotides, 第 46 回国際核酸化学シンポジウム, 小金井市 (宮地楽器ホール), 2019 年 10 月 29 日~31 日(ポスター:132-133)
  33. H. Fujita, N. Fushimi, A. Ono, Preparations of modified oligonucleotides with mirror image helical structures, 第 46 回国際核酸化学シンポジウム, 小金井市 (宮地楽器ホール), 2019 年 10 月 29 日~31 日(ポスター: 134-135)
  34. T. Mikami, T. Ota, A. Ono, Development of thiol sensitive protecting groups for amino functions in nucleotides, 第 46 回国際核酸化学シンポジウム, 小金井市 (宮地楽器ホール), 2019 年 10 月 29 日~31 日(ポスター: 144-145)
  35. K. Terasawa, A. Ono, H. Saneyoshi, Development of a reduction cleavable linker for solid-phase synthesis, 第 46 回国際核酸化学シンポジウム, 小金井市 (宮地楽器ホール), 2019 年 10 月 29 日~31 日(ポスター: 154-155)
  36. T. Atsugi, A. Ono, Preparation of metal-DNA wires containing metallo-base pairs, 第 46 回国際核酸化学シンポジウム, 小金井市 (宮地楽器ホール), 2019 年 10 月 29 日~31 日(ポスター: 158-159)
  37. K. Hirabayashi, S. Adachi, A. Yaguchi, A. Ono, J. Kondo, H. Torigoe, X-ray Crystallographic Structure for the Specific Binding between Metal Ion and Chemically Modified Mismatched Base Pairs, 第 46 回国際核酸化学シンポジウム, 小金井市 (宮地楽器ホール), 2019 年 10 月 29 日~31 日(ポスター: 212-213)
  38. F. Arakawa, H. Kida, S. Adachi, A. Ono, H. Urata, K. Hirabayashi, H. Torigoe, Increase of Melting Temperature does not Usually Indicate Specific Binding between Metal Ion and Mismatched Base Pair, 第 46 回国際核酸化学シンポジウム, 小金井市 (宮地楽器ホール), 2019 年 10 月 29 日~31 日(ポスター: 214-215)



39. S. Seki, D. Momiyama, K. Fujita, A. Ono, Preparations of oligonucleotide-metal nanocluster complexes, 第46回国際核酸化学シンポジウム、小金井市(宮地楽器ホール)、2019年10月29日～31日(ポスター:256-257)
40. K. Sibayama, D. Momiyama, K. Fujita, A. Ono, Preparations of DNA duplexes containing metallo-base pairs. 第46回国際核酸化学シンポジウム、小金井市(宮地楽器ホール)、2019年10月29日～31日(ポスター: 258-259)
41. K. Suzuki, K. Horikawa, K.a Terasawa, A. Ono, Development of reduction sensitive protection groups for nucleotides, 第46回国際核酸化学シンポジウム、小金井市(宮地楽器ホール)、2019年10月29日～31日(ポスター: 260-261)
42. T. Ohta, Z. Shu, H. Abe, A. Ono, H. Saneyoshi, Synthesis of cell-permeable and GSH-activatable oligonucleotides, 第46回国際核酸化学シンポジウム、小金井市(宮地楽器ホール)、2019年10月29日～31日(ポスター: 304-305)
43. S. Adachi, K. Hirabayashi, A. Ono, J. Kondo, H. Torigoe, Thermodynamic Properties of the Specific Binding between Metal Ion and Mismatched Base Pairs Involving 5-Fluorouracil, 第46回国際核酸化学シンポジウム、小金井市(宮地楽器ホール)、2019年10月29日～31日(ポスター: 336-337)
44. S. Nakayama, S. Adachi, A. Ono, K. Hirabayashi, H. Torigoe, Specific Binding between Metal Ion and Mismatched Base Pair under Molecular Crowding Condition, 第46回国際核酸化学シンポジウム、小金井市(宮地楽器ホール)、2019年10月29日～31日(ポスター: 338-339)
45. 王 文立・金 仁華, “ルーブクラスターポリアミンで被覆された特異ベシクルによる中空シリカボールの合成”, 第23回ケイ素化学協会シンポジウム, (宮崎、フェニックス・シーガイア・リゾート) 2019年11月1～2日
46. 恒賀 聖司・金 仁華, “キラルシリカ反応場を用いたキラル材料の創出”, 第23回ケイ素化学協会シンポジウム, (宮崎、フェニックス・シーガイア・リゾート) 2019年11月1～2日
47. 太田 恵唯・恒賀 聖司・貝掛 勝也・金 仁華, “シリカ系キラル無機材料構築におけるテンプレートのエナンチオマーエクセスの効果”, 第23回ケイ素化学協会シンポジウム, (宮崎、フェニックス・シーガイア・リゾート) 2019年11月1～2日
48. 松尾 和樹・貝掛 勝也・金 仁華, “ナノ構造化パラジウム触媒充填の流動式連続リアクターにおけるC-Cカップリング反応”, 日本化学会第100春季年会, (千葉県、東京理科大学・野田キャンパス) 2020年3月22日～25日
49. 西山 美里・貝掛 勝也・金 仁華, “マイクロ PEI 粒子をテンプレートとした酸化チタン/Ag の合成及び光触媒機能”, 日本化学会第100春季年会, (千葉県、東京理科大学・野田キャンパス) 2020年3月22日～25日
50. Haruka Takebuchi, Ren-Hua Jin, “Synthesis and properties of thermo-responsive tooth-brush like copolymer consisted of PNIPAM and chiral-oxazoline side-chain”, 日本化学会第100春季年会, (千葉県、東京理科大学・野田キャンパス) 2020年3月22日～25日
51. Ryo Itoga, Wang Wen-li, Ren-Hua Jin, “Synthesis and properties of optically active cyclic polyoxazoline via two-end functionalization”, 日本化学会第100春季年会, (千葉県、東京理科大学・野田キャンパス) 2020年3月22日～25日
52. 重光 大晃・王 文立・金 仁華, “熱応答性を持たせた長鎖アルキル基含有ポリ(アルキルオキサゾリン)の機能と相分離”, 日本化学会第100春季年会, (千葉県、東京理科大学・野田キャンパス) 2020年3月22日～25日
53. 福本 紫織・太田 恵唯・恒賀 聖司・貝掛 勝也・金 仁華, “キラルテンプレートの砕きによるキラルシリカナノ粒子の合成”, 日本化学会第100春季年会, (千葉県、東京理科大学・野田キャンパス) 2020年3月22日～25日
54. 向山 晴樹・恒賀 聖司・貝掛 勝也・金 仁華, “リンゴ酸を不斉源とするキラルシリカの合成”, 日本化学会第100春季年会, (千葉県、東京理科大学・野田キャンパス) 2020年3月22日～25日
55. 貝掛 勝也・酒井 優斗・金 仁華, “界面活性剤型テオフィリンパラジウム触媒を埋め込んだカップリング反応リアクターの開発”, 第69回高分子討論会, (岩手大学・上田キャンパス・オンライン開催) 2020年9月16日～18日
56. 竹淵 はるか・金 仁華, “熱応答性コイル構造とキラルポリオキサゾリン櫛構造を有するくしーコイル型ブロックポリマーの合成と物性評価”, 第69回高分子討論会, (岩手大学・上田キャンパス・オンライン開催) 2020年9月16日～18日
57. 王 文立・金 仁華, “クシ型ブロックポリマーからなるルーブクラスターポリアミンで被覆した特殊ベシクル”, 第69回高分子討論会, (岩手大学・上田キャンパス・オンライン開催) 2020年9月16日～18日
58. 重光 大晃・王 文立・金 仁華, “熱応答性親水性ブロックと長鎖アルキル基含有疎水性ポリ(アルキルオキサゾリン)クシ構造からなる歯ブラシポリマー及び自己組織化”, 第69回高分子討論会, (岩手大学・上田キャンパス・オンライン開催) 2020年9月16日～18日
59. 糸賀 稜・王 文立・金 仁華, “キラルポリオキサゾリンの両末端設計による環状の光学活性ポリマー/Pd 錯体の作製”, 第69回高分子討論会, (岩手大学・上田キャンパス・オンライン開催) 2020年9月16日～18日
60. 茂木 駿弥・恒賀 聖司・金 仁華, “ポリエチレンイミンとアキラル/キラル酸からなる錯体にテンプレートされるシリカ構造体”, 第69回高分子討論会, (岩手大学・上田キャンパス・オンライン開催) 2020年9月16日～18日
61. 西浦利紀, 高島朝子, 奥津真理子, 佐藤由奈, 中澤順, 岡村将也, 引地史郎, トリス(NHC)カルベンボレート配位子を有するコバルトおよび鉄錯体の反応性, 第52回酸化反応討論会, 10-02 (奈良, 2019. 11).
62. Y. Sato, M. Okamura and S. Hikichi, Synthesis and catalytic activity of iron complexes bearing a tris(carbene)borate ligand, 日本化学会 第100春季年会, IPA-043 (千葉, 2020. 3).
63. 佐藤由奈, 岡村将也, 引地史郎, トリス(N-ヘテロサイクリックカルベン)ボレート配位子を有する鉄錯体の合成と反応性, 錯体化学会第70回討論会, 3PC-08 (オンライン, 2020.9)
64. Futoshi Matsumoto, Takao Gunji, Takeo Ohsaka, Application of through-holed anodes and cathodes to lithium ion battery, Electrochem-2019 conference, 2019.9.30-10.2, Istanbul, Turkey.
65. Tatsuya Watanabe, Futoshi Matsumoto, Takao Gunji, Takeo Ohsaka, An Improved Pre-Lithiation of Graphite Anodes Using Through-Holed Cathode and Anode Electrodes in a Laminated Lithium Ion Battery, Electrochem-2019 conference, 2019.9.30-10.2, Istanbul, Turkey.
66. Takao Gunji, Hiroya Ochiai, Yu Isawa, Futoshi Mstsumoto, Conversion of Carbon Dioxide to Formic Acid over Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> with a SnO<sub>2</sub> Shell Layer, Electrochem-2019 conference, 2019.9.30-10.2, Istanbul, Turkey.
67. H. Ochiai, T. Gunji, F. Matsumoto, Selective Conversion to Formic Acid from CO<sub>2</sub> By Electrochemical Reduction over Cuxsny Intermetallic Compounds, 236th ECS meeting,

- 2019.10.13-17, Atlanta, GA, USA.
68. T. Watanabe, T. Tsuda, T. Gunji, N. Ando, S. Nakamura, N. Hayashi, N. Soma, T. Ohsaka, and F. Matsumoto, Directly Removing of Irreversible Capacity in Lithium Ion Battery By Pre-Lithiation Using through-Holed Cathode and Anode Electrodes in a Laminated Cell, 236th ECS meeting, 2019.10.13-17, Atlanta, GA, USA.
  69. 松本 太, 穴あき電極を用いたリチウムイオン電池の高機能化, KISTEC Innovation Hub 2019 in Ebina, 2019.11.1, 神奈川県立産業技術総合研究所 海老名本部.
  70. 津田喬史, 郡司貴雄, 松本 太, ピコ秒レーザーを用いて作製された穴あき  $\text{LiFePO}_4$ /活性炭電極の出力特性及び充放電メカニズムの検討, KISTEC Innovation Hub 2019 in Ebina, 2019.11.1, 神奈川県立産業技術総合研究所 海老名本部.
  71. 安藤風馬, 大坂武男, 松本 太, 担持体および第二元素を用いた Pt 系金属間化合物ナノ粒子の Pt *d*-バンドセンターのチューニングによる ORR 活性の向上に関する検討, KISTEC Innovation Hub 2019 in Ebina, 2019.11.1, 神奈川県立産業技術総合研究所 海老名本部.
  72. 小山 昇, 山口 秀一郎, 古館 林, 大澤 康彦, 望月 康正, 大坂 武男, 松本 太, 高速パルス測定 of 正規化データを用いる電池状態の機械学習の評価法 — 汎用電池特性の使用容量減少度合いの評価およびリユース指標の提案、第 60 回電池討論会、2019.11.13-15, 国立京都国際会館.
  73. 山口 秀一郎, 小山 昇, 古館 林, 大澤 康彦, 望月 康正, 大坂 武男, 松本 太, 高速パルスおよび交流インピーダンス測定を用いる電池状態評価法の開発 — 解析用等価回路の選択、2019.11.13-15, 国立京都国際会館.
  74. 渡邊 達也, 津田 喬史, 安東 信雄, 中村 奨, 板垣 薫, 杣 直彦, 林 成実, 郡司 貴雄, 大坂 武男, 松本 太, 積層型穴あきグラファイト電極を用いたリチウムイオン電池における不可逆容量のキャンセルによる電池容量の向上、2019.11.13-15, 国立京都国際会館.
  75. 横井健人, 河合陽賢, 松本 太, 無電解 Sn-Ni 合金めっきにおける処理条件の最適化と特性評価、第 21 回関西表面技術フォーラム、2019.11.21-22, 甲南大学 ポートアイランドキャンパス.
  76. 安藤風馬, 郡司貴雄, 大坂武男, 松本 太, 担持体および第二元素を用いた Pt 系金属間化合物ナノ粒子の Pt *d*-バンドセンターのチューニングによる ORR 活性の向上に関する検討, 第 12 回 新電極触媒シンポジウム, 2019. 11.1-2, 静岡県三島市 東レ総合研修センター.
  77. 宇井彪流, 郡司貴雄, 大坂武男, 松本 太,  $\text{AlCl}_3/\text{LiAlH}_4$ /ジブチルエーテル溶液からのアルミニウムの無電解めっき, 表面技術協会第 141 回講演大会, 2020.3.3, 首都大学東京南大沢キャンパス.
  78. 田中詩乃, 亀谷 聡, 加藤友人, 渡邊秀人, 郡司貴雄, 大坂武男, 松本 太, 銅配線上への無電解 Pd/Au めっきにおける銅ボイドを抑制するための Pd 触媒付与溶液組成の最適化, 表面技術協会第 141 回講演大会, 2020.3.3, 首都大学東京南大沢キャンパス.
  79. 梅橋佑実, 郡司貴雄, 大坂武男, 松本 太, 林 遥介, 横井健人, 河合陽賢, 自己触媒型無電解 Ni-Sn めっき被膜の作製と耐薬品性の検討 (2), 表面技術協会第 141 回講演大会, 2020.3.3, 首都大学東京南大沢キャンパス.
  80. 並木明日香, 松本 太, 郡司貴雄, 新規金属酸化物コア Pt シェルにおける酸素還元反応活性の向上についての検討, 表面技術協会第 141 回講演大会, 2020.3.3, 首都大学東京南大沢キャンパス.
  81. 大平貴裕, 郡司貴雄, 松本 太,  $\text{CO}_2$  電解還元のための Pd 系合金触媒の合成と添加元素種と反応の選択性の検討, 表面技術協会第 141 回講演大会, 2020.3.3, 首都大学東京南大沢キャンパス.
  82. 安藤 風馬, 郡司 貴雄, 大坂 武男, 松本 太, ORR 活性の向上のための金属酸化物担持体と Pt ナノ粒子の電子的な相互作用による Pt *d*-バンドセンターのコントロール, 電気化学会第 87 回大会, 2020.3.17-19, 名古屋工業大学.
  83. 落合 弘也, 郡司 貴雄, 松本 太,  $\text{CO}_2$  還元反応における助触媒担持  $\text{TiO}_2$  の反応生成物選択性, 電気化学会第 87 回大会, 2020.3.17-19, 名古屋工業大学.
  84. 郡司 貴雄, 落合 弘也, 大平 貴裕, 松本 太, 電気化学的  $\text{CO}_2$  還元反応のための Pd 系合金触媒の合成と添加元素種と反応の選択性の検討, 電気化学会第 87 回大会, 2020.3.17-19, 名古屋工業大学.
  85. 渡邊 達也, 津田 喬史, 安藤 風馬, 郡司 貴雄, 安東 信雄, 中村 奨, 板垣 薫, 杣 直彦, 林 成実, 大坂 武男, 松本 太, ピコ秒パルスレーザーを用いた三次元構造を有する穴あき電極の作製及びリチウムイオン二次電池への適用, 電気化学会第 87 回大会, 2020.3.17-19, 名古屋工業大学.
  86. 渡邊 達也, 津田 喬史, 安藤 風馬, 郡司 貴雄, 安東 信雄, 中村 奨, 板垣 薫, 杣 直彦, 林 成実, 大坂 武男, 松本 太, レーザー加工穴あき電極によるリチウムイオン電池の性能の向上, 第 38 回電気化学会関東支部夏の学校(Web セミナー) 2020. 9.17.
  87. 落合 弘也, 郡司 貴雄, Pd 系合金電極触媒の合成と  $\text{CO}_2$  還元反応における選択性第 38 回電気化学会関東支部夏の学校(Web セミナー) 2020. 9.17.
  88. Kenji Arai, Kyohei Suganami, Miwa Saito, Miki Inada, Katsuro Hayashi, and Teruki Motohashi, Synthesis of oxy-hydroxides  $\text{Ba}(\text{Zn}_x\text{Nb}_{1-x})\text{O}_{3-\delta}\text{y}(\text{OH})_{2y}$  by water-vapor annealing, PACRIM13, 28-P-S19-09 (Okinawa Convention Center, Japan, 2019/10/28)
  89. Yoshiteru Kawahara, Miwa Saito, Teruki Motohashi, Thermal behaviors and chemical composition of  $\text{La}_{0.5}\text{Sr}_{2.5}\text{FeCoO}_{7-\delta-z}(\text{OH})_{2z}\cdot w\text{H}_2\text{O}$  studied by simultaneous thermogravimetry and desorbed-gas analysis, PACRIM13, 28-P-S19-10 (Okinawa Convention Center, Japan, 2019/10/28)
  90. Tomohiro Iseki, Sayaka Tamura, Miwa Saito, Teruki Motohashi, Oxygen storage characteristics of  $\text{Ca}_2\text{AlMnO}_{5+\delta}$  Synthesized under controlled oxygen pressures, PACRIM13, 29-P-S06-18 (Okinawa Convention Center, Japan, 2019/10/29)
  91. Kosaku Ohishi, Sayaka Tamura, Miwa Saito, Teruki Motohashi, Oxygen Intake/Release capability of Melilite-type  $\text{Ba}_2\text{MnGe}_2\text{O}_{7+\delta}$ , PACRIM13, 29-P-S06-19 (Okinawa Convention Center, Japan, 2019/10/29)
  92. 田村紗也佳, 井関知宏, 大石耕作, 齋藤美和, 本橋輝樹, マンガン系酸素貯蔵材料の開発と製造技術への応用, 第 9 回日本セラミックス協会関東支部若手研究発表交流会, (8), 2019 年 11 月 30 日, 東海大学 (東京都, 高輪)
  93. 新井健司, 菅波享平, 齋藤美和, 稲田幹, 林克郎, 本橋輝樹, 高濃度水蒸気アニールによる酸化物  $\text{Ba}(\text{Zn}, \text{Nb})\text{O}_3(\text{OH})_2$  の合成, 第 9 回日本セラミックス協会関東支部若手研究発表交流会, (9), 2019 年 11 月 30 日, 東海大学 (東京都, 高輪)
  94. 石橋莉史, 大石耕作, 京谷英紀, 小川哲志, 齋藤美和, 本橋輝樹, Ni, Cu を含むメリライト型金属酸化物の合成とキャタリゼーション, 第 14 回セラミックフェスタ in 神奈川, P01, 2019 年 12 月 14 日, 湘南工科大学 (神奈川県, 厚木)
  95. 平岡智輝, 新井健司, 齋藤美和, 本橋輝樹, 気相水酸化物化反応によるコバルト酸水酸化物の合成, 第 14 回セラミック

- フェスタ in 神奈川, P10, 2019 年 12 月 14 日, 湘南工科大学 (神奈川県, 厚木)
96. 渡邊悠, 松本知大, 齋藤美和, 本橋輝樹, Li-Ca-Si 系酸化物におけるメタン酸化カップリング反応触媒活性評価, 第 14 回セラミックフェスタ in 神奈川, P16, 2019 年 12 月 14 日, 湘南工科大学 (神奈川県, 厚木)
  97. 星野智也, 齋藤美和, 本橋輝樹, メタン-メタノール直接変換反応のための複合銅酸化物触媒の探索, 第 14 回セラミックフェスタ in 神奈川, P23, 2019 年 12 月 14 日, 湘南工科大学 (神奈川県, 厚木)
  98. 田村紗也佳, 井関知宏, 齋藤美和, 本橋輝樹, ブラウンミラーライト型  $\text{Ca}_2\text{AlMnO}_{5+\delta}$  の酸素吸収放出特性に対する合成時酸素圧の影響, 第 58 回セラミックス基礎化学討論会, 1G15, 2020 年 1 月 9 日, ウィンクあいち (愛知県, 名古屋)
  99. 千葉裕介, 小泉大輔, 齋藤美和, 萩原健司, 高津浩, 陰山洋, 本橋輝樹, 電気化学的手法を用いたチタン酸化物・酸フッ化物単結晶の育成, 第 58 回セラミックス基礎化学討論会, 2A02, 2020 年 1 月 10 日, ウィンクあいち (愛知県, 名古屋)
  100. 井関知宏, 田村紗也佳, 齋藤美和, 本橋輝樹,  $\text{Ca}_2\text{AlMnO}_{5+\delta}$  における Sr 置換による酸素吸収放出特性への影響, 日本セラミックス協会 2020 年年会, 2Q06, 2020 年 3 月 19 日, 明治大学 (東京都, 神田)
  101. 下村 貴 優, 田村紗也佳, 齋藤美和, 本橋輝樹,  $\text{CaBaFe}_{4-x}\text{MxO}_{7+\delta}$  ( $M = \text{Co}, \text{Mn}$ ) の合成と酸素吸収放出特性, 日本セラミックス協会 2020 年年会, 2Q07, 2020 年 3 月 19 日, 明治大学 (東京都, 神田)
  102. 菅波享平, 新井健司, 齋藤美和, 本橋輝樹, プロトン伝導体  $\text{Ba}(\text{Zn}_x\text{Nb}_{1-x})\text{O}_{3-\delta}(\text{OH})_y$  における拡散反射赤外分光分析, 日本セラミックス協会 2020 年年会, 3J09, 2020 年 3 月 20 日, 明治大学 (東京都, 神田)
  103. 星野智也, 齋藤美和, 本橋輝樹, メタン-メタノール直接変換反応における複合銅酸化物の触媒活性要因の検討, 日本セラミックス協会 2020 年年会, 3Q20, 2020 年 3 月 20 日, 明治大学 (東京都, 神田)
  104. 松本知大, 齋藤美和, 石川理史, 上田 渉, 本橋輝樹, カチオンの結晶学的複合効果に基づくメタン酸化カップリング反応における  $\text{Li}_2\text{CaSiO}_4$  の高触媒活性, 日本セラミックス協会 2020 年年会, 3Q22, 2020 年 3 月 20 日, 明治大学 (東京都, 神田)
  105. 新井健司, 菅波享平, 齋藤美和, 稲田幹, 林克郎, 本橋輝樹, プロトン伝導性酸水酸化物  $\text{Ba}(\text{Zn}_x\text{Nb}_{1-x})\text{O}_{3-\delta-y}$  の合成と赤外吸収分光分析, 日本セラミックス協会 第 33 回秋季シンポジウム, 1G21, 2020 年 9 月 2 日, オンライン
  106. 井関知宏, 田村紗也佳, 齋藤美和, 田邊豊和, 本橋輝樹, 欠陥構造形成によるブラウンミラーライト型  $\text{Ca}_2\text{AlMnO}_{5+\delta}$  の酸素吸収放出特性制御, 日本セラミックス協会 第 33 回秋季シンポジウム, 2G02, 2020 年 9 月 3 日, オンライン
  107. 下村 貴 優, 田村紗也佳, 齋藤美和, 本橋輝樹,  $\text{CaBaFe}_4\text{O}_{7+\delta}$  および Co, Mn 置換体の合成と酸素吸収放出特性, 日本セラミックス協会 第 33 回秋季シンポジウム, 2G06, 2020 年 9 月 1 日, オンライン
  108. クリコウィッツアリシア, シフィエルチェックコンラッド, ダブロフスキーボグダン, 高崎明人, 本橋輝樹, 六方晶マンガン酸塩の酸素超化学量論と酸素製造・貯蔵への応用, 日本セラミックス協会第 33 回秋季シンポジウム, 2G07, 2020 年 9 月 1 日, オンライン [招待講演]
  109. 松本知大, 齋藤美和, 石川理史, 上田 渉, 本橋輝樹, 結晶性 Li-Ca-Si 酸化物におけるメタン酸化カップリング反応の活性要因, 第 126 回触媒討論会, 1I12, 2020 年 9 月 16 日, オンライン
  110. 大貫英恵, 田村紗也佳, 齋藤美和, 本橋輝樹,  $\text{YBaCo}_4\text{O}_{7+\delta}$  と  $\text{Ca}_2\text{AlMnO}_{5+\delta}$  の酸素吸収放出特性に対する二酸化炭素の影響の比較, 第 33 回日本セラミックス協会関東支部研究発表会, 1B02, 2020 年 9 月 17 日, オンライン
  111. 山田崇樹, 大石耕作, 田村紗也佳, 齋藤美和, 本橋輝樹,  $\text{YBa}_2\text{FeO}_{5+\delta}$  の酸素吸収放出特性, 第 33 回日本セラミックス協会関東支部研究発表会, 1B03, 2020 年 9 月 17 日, オンライン
  112. 大川優介, 渡邊純生, 太田佳宏, 横澤勉, 制御されたポリフルオレン-ポリオキサゾリンブロック共重合体の効率的な合成法の開発, 第 69 回高分子学会年次大会, 3Pc007 (認定発表, 2020.5).
  113. 渡邊純生, 太田佳宏, 横澤勉, 多環芳香環炭化水素を末端に持つポリフルオレン-ポリエチレンイミン ブロック共重合体を含むシリカ微粒子の合成と光学特性, 第 69 回高分子学会年次大会, 3Pc009 (認定発表, 2020.5).
  114. 島田涼太, 太田佳宏, 横澤勉, 湾曲した p-フェニレン三量体とナフタレンジイミドを含む環状物の合成とその光学特性, 第 69 回高分子学会年次大会, 3Pd008 (認定発表, 2020.5).
  115. 小林紗奈, 杉田一, 太田佳宏, 横澤勉, ベンゾトリアゾールをジプロモモノマーに用いた  $\text{A}_2 + \text{B}_2$  非等モル下重縮合によるドナー・アクセプター交互共重合体の合成, 第 69 回高分子学会年次大会, 2Pa013 (認定発表, 2020.5).
  116. 谷内田里菜, 原田菜摘, 太田佳宏, 横澤勉, ケイ素で連結した二芳香環ジプロモアリレーン上の Pd 触媒の分子内移動と非等モル下重縮合への応用, 第 69 回高分子学会年次大会, 2Pb020 (認定発表, 2020.5).
  117. 小林浩熙, 太田佳宏, 横澤勉, 連鎖縮合重合と鈴木・宮浦カップリング反応による生長末端を官能基化した制御されたハイパーブランチポリアミドの合成, 第 69 回高分子学会年次大会, 1Pd014 (認定発表, 2020.5).
  118. 佐藤充記, 太田佳宏, 横澤勉, 開環メタセシス重合によるハイパーブランチポリアミドを含むブラシブロック共重合体の合成, 第 69 回高分子学会年次大会, 1Pc013 (認定発表, 2020.5).
  119. 加藤顕禎, 鈴木智也, 太田佳宏, 横澤勉, 非等モル下重縮合による末端官能基化における可逆反応の重要性, 第 69 回高分子学会年次大会, 3C09 (認定発表, 2020.5).
  120. 加藤顕禎, 鈴木智也, 太田佳宏, 横澤勉, 可逆的な非等モル下重縮合によるテレケリックポリエステルの合成, 第 69 回高分子討論会, 1D10 (オンライン, 2020.9).
  121. 小林紗奈, 杉田一, 太田佳宏, 横澤勉, ベンゾトリアゾールをジプロモモノマーに用いた  $\text{A}_2 + \text{B}_2$  非等モル下重縮合によるドナー・アクセプター交互共重合体の合成とその光学特性, 第 69 回高分子討論会, PA0408 (オンライン, 2020.9).
  122. 島田涼太, 太田佳宏, 横澤勉, 鈴木・宮浦重縮合による湾曲した p-フェニレン三量体とナフタレンジイミドを含む環状物の合成とその光学特性, 第 69 回高分子討論会, PA6a06 (オンライン, 2020.9).

## 学術誌

1. 上田 渉, 天然炭素資源を活用する革新的触媒, えねるみくす, 99 (2), 129-134 (2020)
2. 石川理史, 上田 渉, 固体複合酸化物触媒の酸化触媒機能～結晶性  $\text{Mo}_3\text{VO}_x$  複合酸化物触媒を例に～, 触媒, 62 (2), 74-80 (2020).
3. 石川理史, 結晶性酸化物触媒による選択酸化反応, 触媒, 62 (3), 198 (2020).
4. M. Okada and S. Sumimoto. Bacillus Quorum Sensing



Pheromones: ComX and Phr. Quorum Sensing: Microbial Rules of Life, Ed. S. S. Dhiman, in ACS Symposium Series vol. 1374, Chap. 11, 201–217.

5. 澄本慎平. フッ化スルフル基を用いた硫黄(VI)フッ化物交換反応(SuFEx)とアジド化反応. 有機合成化学協会誌, 2020, 78(10), 979–980.
6. 引地史郎, 酵素反応機構の解明や酸化触媒への応用を指向した遷移金属-活性酸素錯体の分子設計, 触媒, 62 (2), 119 – 125 (2020).
7. 津田喬史, 郡司貴雄, 渡邊達也, 中村 奨, 安東信雄, 柚直彦, 大坂武男, 松本 太, 「神奈川大学新型電池オープンラボにおける電池開発」～レーザー加工でリチウムイオン二次電池の高エネルギー密度化に成功, ～, 工業材料, 2019 年 12 号(Vol. 67, No.12), 66-70.
8. 渡邊達也, 郡司貴雄, 黒角翔大, 鶴川晋作, イ ホジン, 大坂武男, 松本 太, 「神奈川大学新型電池オープンラボにおける電池開発(2)」～リチウムイオン二次電池用正極の作製における水系バインダーの適用～, 工業材料, 2020 年 1 月号(Vol. 68, No.1), 82-87.
9. 野村文洋, 郡司貴雄, 入井友海太, 大坂武男, 松本 太, 「神奈川大学新型電池オープンラボにおける電池開発(3)」～現行正極の2倍の容量を有するLi過剰系固溶体正極材料の開発～, 工業材料, 2020 年 2 月号(Vol. 68, No.2), 90-95.
10. 安藤風馬, 郡司貴雄, 竹田剛士, 大坂武男, 松本 太, 「神奈川大学新型電池オープンラボにおける電池開発(4)」～次世代燃料電池用電極触媒としての白金系ナノ粒子/金属酸化物/カップスタックカーボンナノチューブの開発～, 工業材料, 2020 年 3 月号(Vol. 68, No.3), 82-87.
11. 入井友海太, 榎 文彦, 郡司貴雄, 松本 太, 「神奈川大学新型電池オープンラボにおける電池開発(5)～PVdF バインダーをゲル化させない LIB 用 NCA 正極材の開発～, 工業材料, 2020 年 4 月号(Vol. 68, No.4), 84-87.
12. 野村文洋, 235th ECS meeting 参加報告, 第 48 回若手研究者の国際交流支援報告, Electrochemistry, 87 (Winter), 359 (2019).
13. 渡邊達也, 236th ECS meeting 参加報告, 第 49 回若手研究者の国際交流支援報告, 電気化学, 88 (2), 186 (2020).
14. 小浦節子, 松本 太, 関東支部～伝統の継承と未来への試み～ 支部・委員会・研究技術懇談会日より, 電気化学, 88(3), 278 (2020).
15. T. Motohashi, Y. Kawahara, K. Arai, K. Suzuki and M. Saito, “TG-GC” as thermogravimetric and quantitative reacted-gas analyses, Rigaku Journal 36, 2 (2020).
16. 本橋輝樹, 河原由輝, 新井健司, 鈴木健太, 齋藤美和, “TG-GC” による熱重量・反応ガス定量分析, リガクジャーナル 51, 2 (2020).
17. 松本知大, 本橋輝樹, 元素の複合効果を駆使した金属酸化物触媒のメタン酸化カップリング反応活性, ペトロテック 43 (8), 530-534 (2020).
18. 横澤勉, 変わってきた縮合重合の常識, 69 (7), 346-347, 高分子(2020).

## 著書

1. 池原飛之, 基礎高分子科学第2版, 高分子学会編, 6.8.2 結晶性高分子を含む混合系, 東京化学同人 (2020).
2. 野村文洋, 郡司貴雄, 松本太, リチウム過剰系固溶体正極材料  $x\text{Li}_2\text{MnO}_3\text{-}y\text{LiNi}_{1/2}\text{Mn}_{1/2}\text{O}_2\text{-(1-x-y)LiNi}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$  の合成における焼成温度と電池性能の関係, 「全固体電池の界面抵抗低減と作製プロセス」, 技術情報協会編 205 - 213

(2019).

3. 郡司貴雄, 松本太, リチウム過剰系固溶体層状酸化物正極材料  $x\text{Li}_2\text{MnO}_3\text{-}y\text{LiNi}_{1/2}\text{Mn}_{1/2}\text{O}_2\text{-(1-x-y)LiNi}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$  の合成条件および電池作製法と電池性能の関係, マテリアルステージ, 9, 7-15 (2020).
4. 松本 太, 次世代高機能材料の動向(7), Yano E plus ((株) 矢野経済研究所), No.150, 2020 年 9 月号, 9-14 (2020).
5. 本橋輝樹, 熱量測定・熱分析ハンドブック 第3版, 5.2.17. 熱重量・反応ガス定量分析法の開発と機能性無機材料への応用—TG-GC—, 丸善株式会社, (2020).
6. 横澤勉, 基礎高分子科学 第2版, 高分子学会編, 3.1 高分子合成の基本様式, 3.2 高分子合成反応の基礎 (その1): 逐次重合, 3.4 重合反応の制御 3.4.3 連鎖縮合重合, 3.5.1 連鎖制御, 東京化学同人 (2020).

## 調査報告書

1. 岡田正弘. ゲノムシャッフルによる非天然物の創製. 公益財団法人内藤記念科学振興財団助成金による研究報告書.
2. 岡本専太郎, 低原子価チタンの発生法を基盤とする精密合成手法の開発, 科学研究費助成事業研究成果報告書, 基盤研究 (C), 課題番号 17K05869 (2019).
3. 山田健, 光学活性 2-ピリドン共役酸・塩基触媒に用いた新規カスケード反応の開発と応用, 科学研究費助成事業研究成果報告書, 基盤研究 (C), 課題番号 17K08219. (2019).
4. 横澤勉, 「2つの異種カップリング反応を用いる両末端官能基化された $\pi$ 共役系高分子の選択的合成」, 令和元年度科学研究費助成事業 (学術研究助成基金助成金) 実績報告書, 基盤研究(B) (一般) (2020 年 3 月).
5. 太田佳宏, 「ハイパーブリッジブロック共重合体による新規フォトリソグラフィ結晶の開発」, 平成 30 年-令和元年度科学研究費助成事業 (学術研究助成基金助成金) 研究成果報告書, 若手研究 (2020 年 6 月).

## 講演・展示会

1. 上田渉, Catalyst innovation for methane chemistry and technology development, The Korean Institute of Chemical Engineers Fall Symposium 2019 (韓国, 2019.10).
2. 上田渉, New Pore-Structured Complex Transition Metal Oxides as Solid-State Catalysts, Department of Chemistry, Academia Sinica (台湾, 2019.11).
3. 上田渉, All-Inorganic Porous Crystalline Complex Transition Metal Oxides as Solid-State Catalysts, Shanghai Technical University (中国, 2019.11).
4. 引地史郎, 錯体化学を基盤とする均一系・不均一系酸化触媒の開発, 触媒学会高難度選択酸化研究会シンポジウム (東京, 2020. 1)
5. 引地史郎, 人工酵素を目指した有機-無機ハイブリッド構造体の開発, ハイブリッドマテリアルの新展開を目指した異分野融合シンポジウム(ERATO 山元アトムハイブリッドプロジェクト) (東京, 2020. 2)
6. 松本 太, リチウム過剰系正極への水系バインダーの適用と長寿命化, 水系電極の開発・特性評価とリチウムイオン電池での適用, 技術情報協会セミナー (東京都, 五反田), 2019.11.18.
7. 松本 太, Application of through-holed anodes and cathodes prepared with pico-second pulsed laser to lithium ion battery, 第一回 日中新エネルギー自動車動力電池技術フォーラム (東京, JST サイエンスプラザ), 2019. 12 6.



8. 松本 太, ピコ秒パルスレーザーを用いて作製した穴あき電極による高速充放電、リチウムイオンプレドープの実現による次世代二次電池の創成, 神奈川大学新型電池オープンラボ第 27 回講演会(山形大学、神奈川大学包括的連携協定事業)(神奈川大学), 2019.12.19.
9. 松本 太, 電気化学反応・電極反応のメカニズムと電気化学測定法および電極/溶液界面の解析, サイエンス&テクノロジーセミナー(東京、芝公園) 2020.2.25-26.
10. 郡司 貴雄、Photocatalytic Decomposition of Organic Compounds and CO<sub>2</sub> Reduction Reaction over Ordered Intermetallic Compounds. 26th Topical Meeting of ISE
11. 松本 太, 【Live 配信セミナー】電気化学測定の基礎と解析データの解釈のポイント, 技術情報協会セミナー (東京都、五反田), 2020.7.9.
12. 郡司貴雄, 燃料電池用電極触媒のためのコア・シェル金属間化合物の創生, 第 147 回燃料電池研究会セミナー(東京、神保町) 2020. 6.19.
13. 郡司貴雄, 電極触媒材料のキャラクタリゼーションと最近の研究について, 第 38 回電気化学会関東支部夏の学校(Web セミナー) 2020. 9.17.
14. 本橋輝樹, 結晶構造化学に基づく無機材料の創製: 環境・エネルギー応用への将来展望, 神大テクノフェスタ 2019 「くらしと環境の未来ーエネルギーの地産地消に向けてー」, 2019 年 11 月 8 日, 神奈川大学横浜キャンパス.
15. T. Yokozawa, Catalyst Transfer on Various Functional Groups, Malaysia Polymer International Conference (MPIC 2019), (Kualalumpur, 2019.10).
16. N. Harada, T. Kamigawara, H. Sugita, Y. Ohta and T. Yokozawa, Intramolecular Catalyst Transfer on Functional Groups, International Conference "Chemistry of Organoelement Compounds and Polymers 2019", (Moscow, 2019.11).
17. T. Yokozawa, N. Harada, T. Kamigawara, H. Sugita and Y. Ohta, Intramolecular Catalyst Transfer on a Variety of Functional Groups between Benzene Rings, The 16th Pacific Polymer Conference (PPC16), (Singapore, 2019.12).
8. 岡本専太郎 (分担), 生合成阻害剤および作動薬を用いるインドール酪酸 (IBA) 周辺科学の新機軸の導入, 神奈川大学共同研究奨励助成金.
9. 岡本専太郎 (代表), 研究奨学寄付金, 日産化学株式会社.
10. 山田健 (代表), 光学活性 2-ピリドン共役酸・塩基触媒に用いた新規カスケード反応の開発と応用, 令和元年度科学研究費補助金, 基盤研究 (C), 課題番号 17K08219.
11. 山田健 (代表), 1,3-ジアリールプロパン構造を有する有機触媒の開発と縮環型インドールの不斉合成, 令和 2 年度科学研究費補助金, 基盤研究 (C), 課題番号 20K05502.
12. 山田健 (分担), 生合成阻害剤および作動薬を用いるインドール酪酸 (IBA) 周辺科学の新機軸の導入, 神奈川大学共同研究奨励助成金.
13. 小野晶 (代表), DNA 二重鎖中で無限に金属イオンが連続する超分子錯体: 精密合成・結晶構造・物性、令和 2 年度科学研究費補助金、基盤研究 (B)、課題番号 17H03033
14. 小野晶 (代表), 核酸構造上に構築された螺旋状金属イオン集積体のヘリシティ制御と単分子物性、令和 2 年度科学研究費補助金、新学術領域研究、課題番号 19H04598
15. 金仁華 (企画班分担), 「配位アシンメトリー」 (新学術領域 2016~2020) JSPS 科研費 JP16H06515.
16. 金仁華 (研究代表)「エナンチオ選択性手法によるキラルシリカの合成及びキラル無機機能材料の開発」(基盤研究 B 2019~2021) 19H02767\_2019.
17. 貝掛勝也 (代表), パラジウム錯形成に駆動される自己組織化パラジウムナノ構造固体触媒の開発, 令和 1 年度科学研究補助金, 基盤研究 (C), 課題番号 19K05571.
18. 引地史郎 (分担), 後周期遷移金属オキシラジカル錯体によるメタンの酸化反応, 戦略的創造研究推進事業 (CREST), JPMJCR16P1.
19. 松本 太, 2019-2020 山東省主要研究開発計画 新エネルギー電気自動車カーソリッドバッテリー開発と応用.
20. 松本 太, 令和元年度 次世代イノベーション創出プロジェクト 2020 (東京都中小企業振興公社), 2020-2023 (再委託).
21. 渡邊達也(松本研究室), 2019 年度後期(第 49 回)「若手研究者の国際交流支援」2019 年海外渡航助成.
22. 松本 太, 2019-2020 年度日本板硝子材料工学助成会研究助成.
23. 松本 太, 2019 年度御器谷科学技術財団研究助成.
24. 安藤風馬(松本研究室), 日本学術振興会令和 1 年度特別研究員 DC1.
25. 津田喬史(松本研究室), 日本学術振興会令和 1 年度特別研究員 DC2.
26. 松本 太, 2019-2021 科研費基盤 (C)「Pt 系金属間化合物触媒 d-バンドセンターチューニングによる ORR 活性の向上.
27. 松本 太, 軽金属奨学会 教育研究資金・研究補助金 (2020).
28. 落合弘也(松本研究室), 加藤科学振興会令和 2 年度研究奨励金.
29. 郡司貴雄, 2020 年度科学研究費助成事業 若手研究 「光触媒/助触媒界面が誘発する二酸化炭素還元反応の高選択・高活性化」
30. 渡邊達也(松本研究室), 2020 年度公益財団法人村田学術振興財団海外渡航助成.
31. 松本 太, 公益財団法人フジクラ財団、2020 年度研究助成.
32. 郡司貴雄, 公益財団法人 泉科学技術振興財団, 2020 年度研究助成.
33. 郡司貴雄, 岩谷直治記念財団 2020 年度研究助成.
34. 本橋輝樹 (代表), 気相水酸化物化反応による新規酸水酸化

## 助成金

1. 池原飛之 (代表), 大東学 (分担), 固体基板に結晶性高分子をグラフトした単分子層でのラメラ晶と分子鎖の挙動, 科学研究費助成事業 (学術研究助成基金助成金), 基盤研究 (C), 課題番号 19K03775.
2. 上田渉 (代表), 全無機細孔構造結晶の金属酸化物合成展開による新触媒機能創出, 科学研究費助成事業 (化学研究費補助金), 基盤研究 (A), 課題番号 19H00843.
3. 石川理史 (代表), Mo を基盤とした結晶性複合酸化物の結晶構造と触媒活性の関係の解明, 科学研究費助成事業 (学術研究助成基金助成金), 若手研究, 課題番号 18K14058
4. 岡田正弘. 令和 1 年度 (平成 31 年) ~ 令和 4 年度 (終了予定), 基盤研究(B), 代表, 翻訳後修飾を受けた新規ペプチドフェロモンの探索, 課題番号 19H02842.
5. 岡田正弘. 平成 30 年 4 月 ~ 令和 2 年 3 月 (終了予定), 2018 年度 内藤記念科学奨励金 (研究助成), 代表, ゲノムシャッフルによる非天然物の創製.
6. 岡本専太郎 (代表), 低原子価チタンの発生活法を基盤とする精密合成手法の開発, 令和元年度科学研究費補助金, 基盤研究 (C), 課題番号 17K05869.
7. 岡本専太郎 (分担), トマトの花成におけるオーキシンの役割と花成調節技術への応用, 令和元年度科学研究費補助金, 基盤研究 (C), 課題番号 18K05630.

物の合成と機能性の創出, 令和元年度科学研究費補助金, 新学術領域研究(研究領域提案型), 課題番号 19H04707.

35. 本橋輝樹 (代表), 配位不飽和構造をもつ金属酸化物の合成とレドックス機能性の開拓, 令和2年度科学研究費補助金, 基盤研究 (B), 課題番号 20H02827.
36. 横澤勉 (代表), 2つの異種カップリング反応を用いる両末端官能基化された $\pi$ 共役系高分子の選択的合成, 令和2年度科学研究費補助金, 基盤研究 (B), 課題番号 18H02023.
37. 横澤勉 (分担), 「縮合系高分子を用いる接着剤の耐熱化・高強度化」, 令和2年度科学技術振興機構, 受託研究, 未来社会創造事業 大規模プロジェクト型「Society5.0の実現をもたらす革新的接着技術の開発」(研究代表者:九州大学・田中敬二教授) 2018年11月～2022年3月

## 受託研究

1. 上田渉, アルカンからアルケンを製造する触媒並びにプロピレン、イソブチレン及びメタクロレインを部分酸化するための触媒に関する研究, 日本化薬株式会社
2. 上田渉, 炭化水素に活性を持つ新規化合物の研究, 旭化成株式会社
3. 上田渉, 軽炭化水素の含酸素化, 旭化成株式会社
4. 上田渉, 触媒を利用した有機化合物の活性化方法, 昭和電工株式会社
5. 上田渉, 多孔性ポリオキシメタレートに関する研究, 東ソー株式会社
6. 上田渉, 複合酸化物を基盤とする C4 気相酸化触媒に関する研究, 三菱ケミカル株式会社
7. 上田渉, Trigonal and orthorhombic molybdenum and vanadium containing mixed metal oxides comprising at least one additional element for ethane oxidative dehydrogenation, Honewell Internatuional Inc.
8. 上田渉, 研究奨学寄附金 株式会社ブリヂストン
9. 上田渉, 研究奨学寄附金 株式会社日本触媒
10. 上田渉, 研究奨学寄附金 株式会社ダイセル
11. 岡本専太郎, 有機エレクトロニクス用塗布型正孔輸送材料の開発, 日立化成株式会社.
12. 松本 太, エイ・エス・ディ株式会社, “リチウムイオン電池の作製に関する研究”.
13. 松本 太, 株式会社アシザワファインテック, “リチウムイオン電池作製用スラリーの調製に関する研究”
14. 松本 太, 株式会社小島化学薬品, “貴金属無電解めっきに関する研究”.
15. 松本 太, サン工業株式会社, “無電解めっきに関する研究”.
16. 松本 太, JSR 株式会社, “バインダーに関する研究”.
17. 松本 太, 日本化学産業株式会社, “正極材料に関する研究”.
18. 横澤勉, 研究奨学寄附金, 日産化学工業.
19. 横澤勉, 研究奨学寄附金, ブリヂストン.
20. 横澤勉, 研究奨学寄附金, 日本化学工業.

## 特許(取得)

1. POSITIVE ELECTRODE ACTIVE MATERIAL CONTAINING SOLID SOLUTION ACTIVE MATERIAL, POSITIVE ELECTRODE CONTAINING THE POSITIVE ELECTRODE ACTIVE MATERIAL, AND NON-AQUEOUS ELECTROLYTE, S Yamamoto, A Ito, G Kobayashi, F Matsumoto, US Patent App. 16/583,625.

## 特許(公開)

1. 本橋輝樹, 齋藤美和ら, 触媒及び金属空気電池, 特開 2019-209288.
2. 松本知大, 本橋輝樹, 齋藤美和, 触媒及び炭化水素の製造方法, 特開 2020-028821.
3. 新井健司, 本橋輝樹, 齋藤美和, 酸水酸化物及びその製造方法、プロトン伝導体、並びに触媒担体, 特開 2020-070203.
4. 横澤勉, 鎖状ポリマーの製造方法及び鎖状ポリマー, 特開 2016-74818.
5. 横澤勉, 江原和也, (学校法人 神奈川大学, 日産化学工業株式会社), 芳香族環状化合物及びその製造方法, 19292JP1.
6. 横澤勉, ポリエステル共重合体の製造方法、表面改質方法、および接合体, 特願 2019-162637.

## 海外出張

1. 上田渉, 台湾中央研究院, 台湾 (2019.11)
2. 上田渉, 上海科学技術大学 および 寧波大学, 中国 (2019.11).
3. Futoshi Matsumoto, Takao Gunji, Takeo Ohsaka, Application of through-holed anodes and cathodes to lithium ion battery, Electrochem-2019 conference, 2019.9.30-10.2, Istanbul, Turkey.
4. Takao Gunji, Hiroya Ochiai, Yu Isawa, Futoshi Mstsumoto, Conversion of Carbon Dioxide to Formic Acid over Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> with a SnO<sub>2</sub> Shell Layer, Electrochem-2019 conference, 2019.9.30-10.2, Istanbul, Turkey.
5. Futoshi Matsumoto, 研究滞在, Qingdao Institute of Bioenergy and Bioprocess Technology, Chinese Academy of Science, 2020.1.6-10.
6. 横澤勉, The 16th Pacific Polymer Conference (PPC16), Singapore (2019.12).
7. 横澤勉, International Conference "Chemistry of Organoelement Compounds and Polymers 2019", Moscow, Russia (2019.11).
8. 横澤勉, Malaysia Polymer International Conference (MPIC 2019), Kuala Lumpur, Malaysia (2019.10).

## 褒賞

1. 藤原章司, 高度な分子認識能を有するシクロデキストリン化学センサーの開発, 令和2年度シクロデキストリン学会奨励賞, シクロデキストリン学会 (2020.9).
2. 安藤風馬(松本研究室), 第12回新電極触媒セミナー, ポスター賞(2019).
3. 松本 太, 中国山東省科学技術庁優秀協力賞(2019).
4. 津田喬史(松本研究室), 神奈川県産業技術総合研究所 Innivation Hub 2019 in Ebina ポスター賞.
5. 安藤風馬(松本研究室)、電気化学会第87回大会、優秀学生講演賞 (2020年3月) .
6. 落合弘也,(松本研究室) 電気化学会関東支部第38回夏の学校ポスター賞(2020).

## 学位

1. 伊部公太, ビタミンD誘導体の設計・合成と活性評価, 博士(工学), 神奈川大学 (2020.9).
2. 津田 喬史, ピコ秒パルスレーザを用いて作製した穴あき電極による高速充放電、リチウムイオンブレドープの実現による次世代二次電池の創成, 博士(工学), 神奈川大学.

3. 杉田一, Pd 触媒を用いた鈴木-宮浦カップリングによる非等モル下環化重合, 博士 (工学), 神奈川大学 (2020.3).

## 情報システム創成学科

### 研究論文I (レフェリー付き論文)

1. 市川 淳, 光國 和宏, 堀 紫, 池野 湧太, アレクサンドル ブロン, 河本 徹和, 西崎 友規子, 岡 夏樹, 性格に着目した子どもと対話型スピーカーのインタラクションに関する検討, 日本感性工学会論文誌, 19 (2), 173-179 (2020)
2. 市川 淳, 藤井 慶輔, 協調に関する議論に向けたアプローチの提案—集団運動からみる他者の行動予測と適応—, 認知科学, 27 (3), 377-385 (2020)
3. T. Kajiwar, S. Koyama, N. Konno and K. Saito, Periodicity for the 3-state quantum walk on cycles, Quantum Information and Computation, 19(13&14), 1081-1088 (2019).
4. S. Shindoh, Some properties of SINR regions for standard interference mappings, SICE J. Control, Measurement and System Integration, 13 (3), 50-56 (2020).
5. T. Sugimoto, The Kepler Triangle and Its Kin, Forma, 35 (1), 1-2 (2020).
6. T. Sugimoto, On Togai Ito's Codex of Maps and a Manuscript Originally Prepared by the Tokugawa-Shogunate Expeditors to the Bonin Islands, Forma, 35 (1), 3-8 (2020).
7. K. Miyakoshi, S. Ito, H. Oya, Y. Hoshi and S. Nagai, Synthesis of Formation Control Systems for Multi-Agent Systems under Control Gain Perturbations, Advances in Technology Innovation, 5 (2), 112-125 (2020)
8. Y. Izunaga, T. Matsui, and Y. Yamamoto, "A doubly nonnegative relaxation for modularity density maximization," Discrete Applied Mathematics, 275, 69-78 (2020).
9. 池田 大地, 森田 光, Git とブロックチェーンを用いる文書管理方法の考察に基づく提案, 情報ネットワーク・ローレビュー, 18, 62-75, (2019).

### 研究論文II (レフェリー付き Proceedings)

1. K. Mihara, T. Matsuda, Y. Majima, S. Masuda, M. Akiyoshi, K. Adachi, and N. Taira, Analysis of Gaze Trajectory and Skin Extension Pressure Data in Blood Collection Technology, 13th International Conference on Health Informatics, 687-692 (2020.2)
2. N. Taira, Y. Majima, S. Masuda, T. Kawano, M. Akiyoshi, K. Adachi, K. Mihara, and R. Namba, Differences in Brain Activity of Skilled and Novice Nurses during Blood Collection, 13th International Conference on Health Informatics, 699-74 (2020.2).
3. K. Mitsukuni, J. Ichikawa, Y. Hori, Y. Ikeno, L. Alexandre, T. Kawamoto, N. Oka, and Y. Nishizaki, Analysis of the influence of mothers' traits and behaviors on children's conversational play with an utterance-output device, 7th International Conference on Human-Agent Interaction, 271-273 (2019.10)
4. S. Shindoh, Some properties of eigenvalues for standard interference mappings, Proc. Nonlinear Analysis and Convex Analysis, 293-301 (2019).
5. S. Nagai, H. Oya, T. Matsuki and Y. Hoshi, Decentralized Variable Gain Robust Controllers Based on Piecewise Lyapunov Functions for a Class of Uncertain Large-Scale Interconnected

Systems, Proc. of The 13th IFAC Workshop on Adaptive and Learning Control Systems (ALCOS2019), 140-145 (2019)

6. K. Nishizawa, S. Katsumata and Y. Komorida, Stone Dualities from Opfibrations, Proc. 18th International Conference, Relational and Algebraic Methods in Computer Science 2020, Lecture Notes in Computer Science 12062, pp.221-236, Springer, (Proceedings open 2020. 4).
7. K. Nishizawa, K. Yasuda and H. Furusawa, Preorders, Partial Semigroups, and Quantales, Proc. 18th International Conference, Relational and Algebraic Methods in Computer Science 2020, Lecture Notes in Computer Science 12062, pp.237-252, Springer, (Proceedings open 2020. 4).
8. A. Fujioka, K. Takashima, and K. Yoneyama, One-round authenticated group key exchange from isogenies, The 13th International Conference on Provable and Practical Security (ProvSec 2019), 330-338 (Cairns, 2019. 10).
9. Minoru Yoshida and Sergio Albeverio ; A formulation of quasi-regular non-local Dirichlet forms on  $F^{\infty}$  spaces with application to a stochastic quantization of  $\Phi^4_3$  field, RIMS Kokyū-roku, 2116, pp. 85-94, Kyoto Univ. (2019)

### 口頭発表

1. 仲川紗彩香, 秋吉政徳, GAN を用いた画像データへの意外性組み込み方式の検討, 電気学会情報システム研究会, IS19-60, 1-3 (2019.11)
2. 星野恵以子, 秋吉政徳, 特許調査における検索式自動生成による検索の実験, 電気学会情報システム研究会, IS19-67, 37-40 (2019.11)
3. 上原優平, 秋吉政徳, 介護事例の自動分類実験, 令和 2 年電気学会全国大会講演論文集, S10-3 (2020.3)
4. 藤井直之, 秋吉政徳, 事故多発交差点における形状・構造特徴分析方式, 電気学会研究会資料, IS20-007, 37-40 (2020.3)
5. 上原優平, 秋吉政徳, 代表事例抽出を伴った介護事例の自動分類方式, 電気学会研究会資料, IS20-012, 59-62 (2020.3)
6. 石田龍星, 秋吉政徳, 市川淳, トピックモデルを用いた避難における集団行動特性の分析, 人工知能学会全国大会論文集, 4G3GS703 (2020.6)
7. 信末竜空, 秋吉政徳, 市川淳, OpenPose とオートエンコーダを用いたダンス動画のジャンル判別方式, 人工知能学会全国大会論文集, 4I3GS204 (2020.6)
8. 喜古泰一, 鍾津儀, 市川淳, 秋吉政徳, 仮想エージェントとの身体的同期運動が印象評価に与える影響の検討, 人工知能学会全国大会論文集, 4Rin104 (2020.6)
9. 市川淳, 鍾津儀, 秋吉政徳, 仮想エージェントとの同期運動が印象評価に与える影響, HAI シンポジウム 2020 プロシーディングス, P-32 (2020.3)
10. 大澤正彦, 奥岡耕平, 坂本孝丈, 市川淳, 今井倫太, 認知的インタラクションフレームワークに基づいた他者モデルの提案, HAI シンポジウム 2020 プロシーディングス, P-40 (2020.3)
11. 市川淳, 藤井慶輔, 協調に関する発展的な議論に向けた検討—なぞり課題を用いた集団運動からみる他者の行動予測と適応—, 第 34 回人工知能学会全国大会論文集, 3Rin4-93 (2020.6)
12. 市川淳, 藤井慶輔, なぞり課題を用いた運動協調における役割の検討, 日本認知科学会第 37 回大会発表論文集, 33-40 (2020.9)
13. 光國和宏, 市川淳, 西崎友規子, 堀紫, 対話型スピーカーを



介した模倣が操作者の印象評価に及ぼす影響, 日本認知科学会第 37 回大会発表論文集, 542-544 (2020.9)

14. S. Qian, J. He, T. Imai and T. Matsumoto, Outage Analysis for Information Correlation Assisted Cooperative Communications in Mobile Networks, 信学技報, 119(448), RCS2019-378, 297-301, (2020.3).
15. 鶴見理沙, 今井崇雅, 傾き角変動のある移動端末の受信特性の角度ダイバーシティ受信系構成依存性, 2020 年電子情報通信学会, 総合大会講演論文集, B-10-22(2020.3)
16. 平田康人、奥野祥二、内田智史、大規模システムに対応可能なビジュアル型言語の設計と開発、日本 e-Learning 学会第 22 回学術講演会 学生セッション (1) S1-002、2019 年 11 月 30 日、上智大学
17. 田尻紘生、奥野祥二、内田智史、ファイバ스코ープを用いた昆虫 3D 映像撮影システム、日本 e-Learning 学会 第 22 回学術講演会 学生セッション (1) S1-003、2019 年 11 月 30 日、上智大学
18. 張晋華、福田隼翼、奥野祥二、内田智史、RoBoHoN を用いた子供向け学習システムの提案、日本 e-Learning 学会第 22 回学術講演会 学生セッション (1) S1-004、2019 年 11 月 30 日、上智大学
19. 佐々木卓也、齋藤堯之、奥野祥二、内田智史、英会話時における心理的不安を除いた Pepper 英会話学習システムの開発、日本 e-Learning 学会 第 22 回学術講演会 学生セッション (1) S1-005、2019 年 11 月 30 日、上智大学
20. 黒須峻太、奥野祥二、内田智史、学習者の理解度によって難易度が変化する電子書籍執筆システムの研究、日本 e-Learning 学会 第 22 回学術講演会 学生セッション (2) S2-002、2019 年 11 月 30 日、上智大学
21. 中島大樹、奥野祥二、内田智史、VR を用いた応急手当学習システムの提案、日本 e-Learning 学会 第 22 回学術講演会 学生セッション (2) S2-003、2019 年 11 月 30 日、上智大学
22. 村上力哉、福田大貴、奥野祥二、内田智史、処理のイメージと作成過程の動画を用いた初学者向け Scratch 学習システムの提案、日本 e-Learning 学会 第 22 回学術講演会 学生セッション (2) S2-004、2019 年 11 月 30 日、上智大学
23. 進藤晋, 漸近写像の性質と SINR 領域の構造, 第 62 回自動制御連合講演会講演論文集, 2M1-06 (札幌, 2019. 11).
24. 杉本剛, ケプラーの三角形とその仲間, 形の科学シンポジウム講演予稿集, 2 (深谷, 2019. 11) .
25. 杉本剛, 幕命無人嶋探検隊 1675, かたちシュレー 2019in 名古屋大学, 19-20 (名古屋, 2019. 12) .
26. 杉本剛, 伊藤東涯の写本「無人嶋圖記」について, 日本科学史学会第 67 回年会研究発表講演要旨集, 33 (東京, 2020. 5) .
27. 工藤蓮, 伊豆永洋一, Signed modularity density 最大化問題に対する SDP 緩和, 京都大学数理解析研究所 共同研究 (グループ型) 数理最適化の理論・アルゴリズム・応用, (2020.8).
28. 伊豆永洋一, 不協和音のないパートへの割当: 最適な割当から安定な割当へ, 数理最適化: Optimization Night #2 (TensorFlow User Group 主催), (2020.1).
29. 安田康史, 西澤弘毅, 古澤仁, Preorders, partial semigroups, and quantales, 第 22 回プログラミングおよびプログラミング言語ワークショップ, ポスター発表, (オンライン, 2020. 3).
30. 安田康史, 西澤弘毅, 古澤仁, 前順序とべき集合クォンテールの間の関係性について, 日本ソフトウェア科学会第 37 回大会講演論文集, 75-L (オンライン, 2020. 9).
31. 木下魁, 永井彰, 富田潤一, 鈴木幸太郎, 藤岡淳, TLS1.3 への適用を考慮した ID ベース認証鍵交換方式, 2020 年暗号と情報セキュリティシンポジウム, 1B2-5 (高知, 2020. 1).
32. 岩井光輝, 川口武瑠, 佐々木太良, 藤岡淳, 鈴木幸太郎, 永井彰, 富田潤一, 非対称 Pairing 版 FSU における指数部検査の必要性, 2020 年暗号と情報セキュリティシンポジウム, 3B1-1 (高知, 2020. 1).
33. 林隼輔, 佐々木太良, 藤岡淳, ポチュバルの 3 値論理による Garbled Circuit のおける最小暗号文数, 2020 年暗号と情報セキュリティシンポジウム, 3C2-5 (高知, 2020. 1).
34. 割木寿将, 佐々木太良, 藤岡淳, 鈴木幸太郎, 富田潤一, IoT 機器向け ID ベース認証鍵交換と不正な PKG に対する安全性, 電子情報通信学会技術研究報告, 120(28), 55-61 (オンライン, 2020. 5).
35. 池田 大地, 森田 光, 改ざん困難なエビデンスを用いた文書管理方法, 情処学会コンピュータセキュリティシンポジウム 2019 論文集, 1C1-1, 106-110 (佐世保, 2019.10) .
36. 繁田 大輝, 森田 光, 深層学習で分類するステガノグラフィのロバスト性評価, 情処学会コンピュータセキュリティシンポジウム 2019 論文集, 1F1-4, 349-353 (佐世保, 2019.10) .
37. 増井 孝之, 森田 光, あみだくじの Garbled Circuit による構成, 情処学会コンピュータセキュリティシンポジウム 2019 論文集, 1F2-1, 354-358 (佐世保, 2019.10) .
38. 繁田 大輝, 森田 光, Perceptual hash を用いたステガノグラフィ構成法, 信学会 2020 年暗号と情報セキュリティシンポジウム, 1E1-1 (高知, 2020.1) .
39. 増井 孝之, 森田 光, ZDD の Garbled Circuit 法, 信学技報, 119(474), ISEC2019-110, 167-170 (Zoom, 2020.3) .
40. 香川智修, 吉野邦生; "The fractional Hilbert transform under the Bargmann transform", 調和解析セミナー, 東京都市大学, 2018/12/22
41. Minoru Yoshida; "non-local Dirichlet forms n infinite dimensional spaces", Random Transformations and Invariance in Stochastic Dynamics, University of Milan, (招待講演)2019/3/28
42. 香川智修 ; "Bargmann transform of convolution" 調和解析セミナー, 東京都市大学, 2019/7/13

## 学術誌

1. 市川淳, 身体運動からみる人間の“こころ”の情報処理, 神奈川大学工学研究, 3, 46-48 (2020).
2. 杉本剛, 地球と生命—知識基盤社会の中で, 神奈川大学評論, 95, 91-99 (2020).
3. S. Takahashi, Y. Izunaga, and N. Watanabe, "An experimental study of VCG mechanism for multi-unit auctions: Competing with machine bidders," RISS Discussion Paper Series, 88, (2020.7).

## 著書

1. 杉本剛, 無人嶋／小笠原島の自然史秘話三題, 私家版 (2020) .

## 講演・展示会

1. 秋吉政徳, 「機械学習技術による地平線の先に見える社会」, 中京大学第 30 回知的センシングセミナー (2019.11) .
2. 藤岡淳, 暗号技術とその安全性, 神大シルバー21 連続講演



会 (横浜, 2019. 11).

## 助成金

1. 市川淳(研究代表者), 「運動協調の達成過程における他者視点の理解の解明」, 科学研究費助成事業 研究活動スタート支援 (令和元年度～2 年度, 課題番号 19K24369).
2. 藤岡淳(代表), 耐量子暗号技術への移行に向けた暗号技術, 令和 2 年度科学研究費補助金, 基盤研究(C), 課題番号 20K11686.

## 受託研究

1. 秋吉政徳(研究代表者), 「特許調査業務における AI 応用検討」, 株式会社エムテック.

## 海外出張

1. 杉本剛, グリニッジ天文台(現・博物館)と国際交流促進および水星過日観察(2019. 11. 11), London, UK (2019. 11.8-13); 後者については 2020 年 12 月に学会発表予定.

## 褒賞

1. W. Lin, S. Qian (Corresponding author) and T. Matsumoto, Lossy-Forward Relaying for Lossy Communications: Rate-Distortion and Outage Probability Analyses, IEEE Transactions on Wireless Communications, 18(8), 3974-3986, 2019, 令和元年度丹羽保次郎記念論文賞, 東京電機大学 (2020.2).

## その他

1. 坂本孝丈, 大澤正彦, 市川淳, 日本認知科学会第 37 回大会 オーガナイズドセッション「認知的インタラクションフレームワークの構築」オーガナイズ, OS2 (2020.9).

# 経営工学科

## 研究論文I (レフェリー付き論文)

1. Q. Huang, J. Weng, S. Ohmori, K. Yoshimoto, A Routing Problem in Global Production Planning, Industrial Engineering & Management Systems, 19 (2), 335 - 346 (2020).
2. K. Sato and K. Nakashima, Optimal Pricing Problem for a Pay-per-use System Based on the Internet of Things with Intertemporal Demand, International Journal of Production Economics, 221, 107477 (2020).
3. R. Perera and K. Sato, The Impact of Savings Withdrawals on a Banker's Capital Holdings subject to Basel III Accord, Annals of Financial Economics Journal, 15 (2), 2050006 (2020).
4. K. Sato, Dynamic Pricing with Automated Purchase-reservation Algorithms, Journal of Revenue and Pricing Management, <https://doi.org/10.1057/s41272-020-00259-x> (2020).
5. R. Matsumoto, T. Yamada, M. Takanokura, Staff scheduling and work allocation considering physical workload in senior daytime care facilities, Journal of Japan Industrial Management Association, 71(2E), 99-110 (2020).
6. R. Matsumoto, T. Yamada, Y-H. Kuo, M. Takanokura,

Rehabilitation staff scheduling in senior daytime care facility with feeling of physical/mental workloads and movements, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 14 (5), JAMDSM0077 (2020).

7. M. Matsumoto, Analysis of Force Acting on Drawing Compasses Required for Drawing Circle, Journal of Japan Society for Design Engineering, 55 (5), 335-352 (2020).
8. 高野倉雅人, 八木昭紀, 荻谷光晴, 石黒圭広, デイサービス施設におけるコミュニケーションロボットを用いたトレーニングの印象評価, 日本福祉工学会誌, 21(2), 60-68 (2019).
9. 浅田孝幸, 大浦啓輔, 平井裕久, 堀井悟志, 日本企業のグローバル経営における予算管理の有効性—国内・海外子会社の管理の比較研究—, 日本原価計算研究学会 原価計算研究, 44 (1), 156-168 (2020).
10. 松本光広, 指一本で保持して押すことで円を描ける製図用コンパス, 産業応用工学会論文誌, 8 (2), 161-172 (2020).
11. 松本光広, 二次元レーザレンジスキャナおよび鏡を用いて物体の背後を走査する方法の設計, 設計工学, 55 (6), 389-404 (2020).
12. 松本光広, 背中中の触覚により皮膚表面の法線方向における背後の物体を感じ取るセンシングベスト, 産業応用工学会論文誌, 8 (1), 65-73 (2020).
13. 松本光広, 鏡面の平面における傾きおよび範囲の同時測定, 産業応用工学会論文誌, 8 (1), 17-27 (2020).
14. 松本光広, 二次元レーザレンジスキャナおよび鏡を用いて物体の全周およびスキャナ周囲の物体を同時に走査する走査装置, 設計工学, 55 (2), 129-144 (2020).
15. 松本光広, ヘッドライトを用いた耳鏡検査における耳鏡の集光性能評価および集光最適化設計, 照明学会誌, 104 (2), 61-68 (2020).

## 研究論文II (レフェリー付き Proceedings)

1. N. Ishii and M. Ohba, A method of supply chain evaluation based on the structure of an information network, Procedia Manufacturing, 39, 1501-1509 (2019).
2. H. Shiokawa and N. Ishii, A Method of collaborative inspection planning by integrating a production planning system, Procedia Manufacturing, 39, 727-736 (2019).
3. M. Matsui and N. Ishii, A Demand-to-Supply Enterprise robot and its ODICS II type for convenience store application, Procedia Manufacturing, 39, 381-388 (2019).
4. N. Ishii and M. Ohba, Design and evaluation of project organization based on communication links, Proceedings of the 20th Asia Pacific Industrial Engineering and Management Systems Conference 2019, ID 85, 1-6 (Kanazawa, 2019).
5. G. Liu, N. Ishii, K. Ohno, and S. Yokoyama, Project management support using the log data of inter-organizational communication, Proceedings of the 20th Asia Pacific Industrial Engineering and Management Systems Conference 2019, ID 249, 1-6 (Kanazawa, 2019).
6. Z. Cong, K. Sato and K. Nakashima, An Optimization Problem in a Closed-Loop Manufacturing System with Stochastic Variability, Procedia Manufacturing, 39, 1607-1615 (2019).
7. S. Ota and M. Kimura, Reliability modeling of coherent systems with dependent components due to common factors, Proc. the 24th IEEE Pacific Rim International Symposium on Dependable Computing, 2 pages (Kyoto, 2019. 12).
8. S. Ota and M. Kimura, Factor copula modeling of coherent systems with dependent components, Proc. the 9th Asia-Pacific

- International Symposium on Advanced Reliability and Maintenance Modeling, 5 pages (Online, 2020. 8).
9. K. Ota and H. Katagiri, A machine learning method for detecting line defects of glass substrates using time series non-contact line scan data, Proc. World Congress on Engineering and Computer Science 2019, 287-292 (San Francisco, 2019. 10).
  10. S. Kano, K. Ota and H. Katagiri, Demand forecasting of boxed lunch meals through a state-space model using time-series data, Proc. IAET 2nd International Conference on Innovative Research in Computer Applications, Information Technology, System Engineering & Applied Sciences, 16 (Amsterdam, 2020. 2).
  11. T. Tanizaki, Y. Masuda, and H. Katagiri, Application of scatter search with path relinking for scheduling problems with crane interference, Proc. International Symposium on Flexible Automation 2020, ISFA2020-9604, V001T06A001 (Virtual Conference, 2020. 7).
  12. M. Takanokura, T. Ohhira, Y. Kawahara, M. Ogiya, Interaction of a communication robot with elderly users during physical and cognitive training exercises at a daycare facility in Japan, Proc. 4th International Conference on Ambient Intelligence and Ergonomics in Asia (Aml&E 2019), 6p (Taoyuan, Taiwan, 2019.10)
  13. Y. Kusu, H. Hirai, Corporate Lifecycle Continuity and Executive Compensation in Japan , 10th EIASM Conference on Performance Measurement and Management Control (Nice, 2019. 10).
  14. M. Nakashima, Y. Hirose, H. Hirai, Is the Japanese MD&A Information is different from English information? : A Comparison between Fraud Firms and Non-Fraud Firms, The Asia-Pacific Management Accounting Association, 15th Annual Conference (APMAA 2019) (Doha, 2019. 11).
  7. 松井正之, 石井信明, 大戸・藤田理恵, 企業ロボットの開発 (3) : ヒューマナイズド H=W 系ロボットによる企業体の新・方法&時間研究法例, 日本設備管理学会 2020 春季研究発表会, B-1.4 (東京, 2020. 6).
  8. 木村光宏, 太田修平, 学校等での集団食中毒事例における原因給食提供日の推定, 電子情報通信学会技術研究報告 (信学技報) 信頼性, 7-12 (東京, 2019. 12).
  9. 太田修平, 信頼性解析におけるコンピュータを用いたモデリング・推定・シミュレーション, OR 学会「信頼性とその応用」研究部会第 4 回研究会, (神奈川, 2020. 1).
  10. 太田修平, 木村光宏, ファクターコンピュータを用いたシステムにおける従属故障のモデリングと信頼性評価の一考察, 電子情報通信学会技術研究報告 (信学技報) 信頼性, 7-12 (オンライン開催, 2020. 6).
  11. 太田修平, 木村光宏, 単調コンピュータの一般化と信頼性評価モデルへの応用, 統計関連学会連合大会報告集, 217 (オンライン開催, 2020. 8).
  12. S. Wu, J. Weng, S. J. Ryu, A Study on Coordinated Trading System for Product Sales of Consumer Electronics Manufacturers Proceedings of the 20th Asia Pacific Industrial Engineering and Management Systems Conference ID-11 (2019. 10)
  13. S. Wu, S. J. Ryu, J. Weng, Proposal of coordinated trading system for eliminating double marginalization, 2019 INFORMS Annual Meeting (2019. 10)
  14. C. Liu, J. Weng, Design Support System for Product Model Change, -A Case Study of Automotive Seat-, 2019 Asian Conference of Management Science & Applications, 9-13, (2019. 10)
  15. X. Fan, J. Weng, A study on order-receiving plan applying production seat system for sales staff in engineer-to-order manufactory, 2019 Asian Conference of Management Science & Applications, 94-99 (2019. 10)
  16. R. Yamada and J. Weng, Integrated Operation Planning for Multi-domestic Enterprises, 2019 Asian Conference of Management Science & Applications (2019. 10)
  17. X. Shao, J. Weng, Qian Huang, Shunichi Ohmori and Kazuho Yoshimoto, Supplier selection and order allocation under supply disruption risks, 2019 Asian Conference of Management Science & Applications (2019. 10)
  18. Y. Wu and J. Weng, A Study on Parts Preparation for Engineer-to-order Production, 2019 Asian Conference of Management Science & Applications (2019. 10)
  19. 劉楚恒, 赤坂信悟, 翁嘉華, 製品設計変更のための設計支援システムに関する研究, 日本経営工学春季大会, 日本経営工学会春季大会 Web 予稿集, 14-15 (2020. 5)
  20. 翁嘉華, 邵相和, 吳思迪, 中断リスクを考慮した部品調達計画に関する研究, 日本経営工学春季大会, 日本経営工学会春季大会 Web 予稿集, 18-19 (2020. 5)
  21. 片桐英樹, 佐藤圭介, 風見公子, 高橋淳, 北岡優里, 数理最適化に基づく現場の様々な制約を考慮した学校給食の献立作成, 第 15 回日本給食経営管理学会学術総会, 1P-21 (稲沢, 2019. 11).
  22. 狩野桜, 片桐英樹, 状態空間モデルによる仕出し弁当の需要予測, 第 63 回日本経営システム学会全国研究発表大会講演論文集, 138-139 (神戸, 2019. 11).
  23. 片桐英樹, 谷崎隆士, 宇野剛史, 搬送設備の干渉を考慮したジョブショップスケジューリング問題に対するヒューリスティクス解法, 第 63 回日本経営システム学会全国研究発表大会講演論文集, 198 -201 (神戸, 2019. 11).

## 口頭発表

1. 大場允晶, 石井信明, 中邨良樹, 林 千宏, Matrix Approach による Supply Chain の情報組織評価 一事例考察: 納期調整業務の Supply Chain Platformー, 第 10 回横幹連合コンファレンス, ID A-4 (長岡, 2019. 11).
2. H. Shiokawa, S. Ota, and N. Ishii, Collaborative inspection planning by integrating a production planning system under uncertainty, Proceedings of the 20th Asia Pacific Industrial Engineering and Management Systems Conference 2019, ID 129 (Kanazawa, 2019. 12).
3. M. H. Talukder, S. Ota, M. Takanokura, and N. Ishii, Crack detection on the wall of building by CNN using sub-datasets to increase accuracy, Proceedings of the 20th Asia Pacific Industrial Engineering and Management Systems Conference 2019, ID 43 (Kanazawa, 2019. 12).
4. 石井信明, 競争入札におけるコントラクター選択, 日本オペレーションズ・リサーチ学会 2020 春季研究発表会, ID 1-F-2 (奈良, 2020. 3).
5. M. H. Talukder, S. Ota, M. Takanokura, and N. Ishii, Crack detection of concrete Walls by CNN using sub-dataset, 日本オペレーションズ・リサーチ学会 2020 春季研究発表会, ID 1-D-5 (奈良, 2020.3).
6. M. H. Talukder, S. Ota, M. Takanokura, and N. Ishi, Crack detection in concrete structures under varied environmental conditions by CNN, 日本設備管理学会 2020 春季研究発表会, C-2.4 (東京, 2020. 6).

24. 太田和希, 狩野桜, 片桐英樹, 人気と外部環境を考慮した状態空間モデルによる仕出し弁当の需要予測, 日本経営工学会 2020 春季大会予稿集, 2-3 (秋田, 2020. 3).
25. 高橋淳, 片桐英樹, 組合せ最適化に基づいた現場の制約を考慮した学校給食の献立作成, 第 64 回日本経営システム学会全国研究発表大会講演論文集, 204-205 (習志野, 2020. 5).
26. 張安達, 平井裕久, 松丸正延, 片桐英樹, 機械学習を用いた企業格付けの研究, 第 64 回日本経営システム学会全国研究発表大会講演論文集, 202-203 (習志野, 2020. 5).
27. Y. Fang, K. Sato and K. Nakashima, A study on Internet of Things embedded Closed-Loop Supply Chain System, The 20th Asia Pacific Industrial Engineering and Management Systems (APIEMS 2019), (Kanazawa, 2019. 12).
28. 高野倉雅人, 江渡玲雄, 金杉優宏, 荻谷光晴, デイサービス施設における送迎業務を支援するアプリケーションの人間中心設計, 日本人間工学会第 61 回大会, 1A2-03 (尾道, 2020. 6).
29. Y. Yu, S. Taki, M. Takanokura, T. Yamada, M. Kawakami, An Analysis of Occupational Stressors for Healthcare Workers, 20th Asia Pacific Industrial Engineering and Management Systems Conference (APIEMS2019), USB Memory (金沢, 2019.12).
30. M. H. Talukder, S. Ota, M. Takanokura, N. Ishii, Crack Detection on the Wall of Building by CNN using Subdatasets to Increase Accuracy, 20th Asia Pacific Industrial Engineering and Management Systems Conference (APIEMS2019), USB Memory (金沢, 2019. 12).
31. 任東陽, 内田祥太, 堀内悠汰, 荻谷光晴, 高野倉雅人, 失語症者の社会生活を支援するアプリケーションの人間中心設計, 日本人間工学会関東支部第 49 回大会, 42-43 (千葉, 2019. 12).
32. 久宗周二, 小本和孝, 第一次産業における産業衛生一漁業, 第 93 回日本産業衛生学会関東地方会第 291 回例会 (旭川医科大学 (オンライン), 2020. 5)
33. 久宗周二, 小本和孝, 坂田 真一郎, 参加型改善による W I B 労働安全衛生マネジメントシステム導入の試み, 第 61 回日本人間工学会全国大会(岡山大学 (オンライン), 2020.6)
34. 張安達, 平井裕久, 松丸正延, 片桐英樹, 機械学習を用いた企業格付けの研究, 日本経営システム学会 第 64 回全国研究発表大会, (千葉, 2020. 5).
35. 白須彬, 平井裕久, 坂上学, 顧客関係性に基づく収益管理の事例研究, 日本管理会計学会 2020 年度年次全国大会, (愛知, 2020. 8).
36. J-L. Viviani, A. Komura, Customer Relationship Dynamics using Hidden Markov Model, 国際戦略経営研究学会第 12 回年次大会・研究発表大会, (埼玉, 2019. 10).
37. 小村亜唯子, 顧客ポートフォリオ分析における費用配賦と営業利益安定性 国際戦略経営研究学会第 12 回年次大会・研究発表大会, (埼玉, 2019. 10).
5. 高野倉雅人, 吳思迪, APIEMS2019 に参加して, 経営システム, 30 (1), 88-89 (2020).
6. 高野倉雅人, ハラルとハラール食品, およびその課題の解決に向けて, 神奈川大学アジア・レビュー, 7, 96-101 (2020).
7. 崎章浩, 平井裕久, 大槻晴海, 投資意思決定に関する実態調査, 産業経理協会 産業経理, 79 (3), 185-201 (2019).
8. 平井裕久, 椎葉淳, 併用方式におけるウェイトの推定と評価: T O B データによる検証, 神奈川大学経済学会 商経論叢 55 (3-4), 87-100 (2020).

## 著書

1. S. I. Ao, H. K. Kim, O. Castillo, A. H. S. Chan and H. Katagiri (eds.), IAENG Transactions on Engineering Sciences: Special Issue for the International Association of Engineers Conferences 2019, World Scientific Publishing (2020).

## 調査報告書

1. 佐藤公俊, 消費者の安心・安全の確保に向けた価格決定モデルに関する研究, 科学研究費助成事業研究成果報告書, 若手研究 (B), 課題番号 17K12985 (2020).

## 講演・展示会

1. 石井信明, SOLE 日本支部基本教材紹介 LSE ロジスティクス・システムズ・エンジニアリング, 第 42 期 国際ロジスティクス学会日本支部 8 月度フォーラム (東京 2020. 8).
2. 高野倉雅人, 人間中心設計とユーザーエクスペリエンスの視点からなる研究事例, ユニバーサルコミュニケーションデザイン協会第 4 回加齢配慮部会 (東京, 2019. 12).
3. 久宗周二, 船員向け自主改善活動, 国交省補助事業敦賀講習会 (函館, 2019. 11).
4. 久宗周二, 船員向け自主改善活動, 水産庁補助事業小松島講習会 (徳島, 2020. 1).
5. 久宗周二, 船員向け自主改善活動, 水産庁補助事業久慈講習会 (岩手, 2020. 2).
6. 松本光広, 手で押さえる力と同じ力で, 瞬時に容易に, 割れ物・壊れ物を固定する取り外す., 第 9 回おた研究・開発フェア (東京, 2019. 10).

## 助成金

1. 石井信明 (代表), プロジェクトの見積り戦略と遂行体制・契約方式の研究, 令和 2 年度科学研究費補助金, 基盤研究 (C), 課題番号 20K04991.
2. 石井信明, 需給システムの最適化, ユニバーサル製缶株式会社.
3. 太田修平 (代表), 従属故障を伴う大規模システムに対する信頼性設計手法の新展開, 令和元年度科学研究費助成事業, 研究活動スタート支援, 課題番号 19K04892.
4. 翁嘉華 (代表), 個別受注設計生産における「生産座席」を用いた新生産方式の開発, 科学研究費助成事業基盤研究(C), 課題番号 18K04620.
5. 翁嘉華 (分担), A I 技術をプラットフォームとする競争力ある次世代生産システムの設計・運用基盤の構築, NEDO 受託事業・次世代人工知能・ロボットの中核となるインテグレート技術開発.
6. 片桐英樹 (代表), ファジィ確率計画に基づく健康障害発生

## 学術誌

1. 石井信明, LSE の新たな体系化に向けて, 月刊ロジスティクス・ビジネス, 19 (11), 110-111 (2020. 1).
2. 石井信明, 松井正之, 企業ロボットと分析・管理系, 神奈川大学工学研究, 3, 127-128 (2020. 2).
3. 石井信明, ロジスティクス・システムズ・エンジニアリング LSE 標準テキストの作成に向けて, 月刊ロジスティクス・ビジネス, 20 (4), 84-86 (2020. 7).
4. 高野倉雅人, 歩行車やシルバーカーを用いた歩行の特性, バイオメカニズム学会誌, 44 (3), 152-157 (2020).



リスクを考慮した最適献立作成, 2019 年度科学研究費補助金, 基盤研究 (C), 研究課題番号 17K01276.

7. 藤江遼 (研究代表者), 2020 年度 統計数理研究所公募型共同利用 共同研究集会「社会物理学の新展開」, 課題番号 2020-ISMCRP-5008.
8. 佐藤公俊 (分担), 混雑と遅延に頑健な輸送・交通ネットワーク設計に関する研究, 平成 30 年度科学研究費補助金 (継続), 基盤研究(B), 課題番号 18H01662.
9. 佐藤公俊 (分担), エネルギー資源の輸入計画のための統合的リスク評価モデルの開発, 平成 29 年度科学研究費補助金 (継続), 基盤研究(B), 課題番号 17H02042.
10. 佐藤公俊 (代表), 価格決定アルゴリズムの公平性評価における数理的手法の理論と応用, 令和 2 年度科学研究費補助金 (新規), 基盤研究(C), 課題番号 20K04976.
11. 高野倉雅人 (代表), 荻谷光晴 (分担), 人間中心アプローチによるデータドリブンな介護サービス・マネジメントシステムの創成, 2020 年度科学研究費補助金, 基盤研究(C), 課題番号 19K04915.
12. 高野倉雅人 (分担), ワークライフバランス支援のための技術・技能・健康のコミュニケーションデザイン, 2019 年度科学研究費補助金, 基盤研究(C), 課題番号 19K04909.
13. 久宗周二 (分担), 農林水産業における災害の発生状況の特性に適合した労働災害防止対策の策定のための研究, 平成 30 年度 厚生労働科学研究費補助金 (労働安全衛生総合研究事業), 課題番号 30180701
14. 平井裕久 (代表), 類似企業比較法を用いた企業価値評価に関する実証研究, 平成 29 年度科学研究費補助金, 基盤研究 (C), 課題番号 17K04059.
15. 平井裕久 (分担), 会社分割におけるテキストマイニングを用いた企業の開示情報と企業価値の関連性, 全国銀行学術研究振興財団 平成 29 年度科学研究費補助金, 研究助成 (研究コード 1924).
16. 小村亜唯子 (代表), 企業と顧客との関係性管理による営業利益安定化メカニズム, 令和 2 年度科学研究費補助金, 若手研究, 課題番号 20K13652.
17. 松本光広 (代表), 二次元レーザレンジスキャナおよび鏡を用いて物体の背後を走査する方法の設計, 中部電気利用基礎研究振興財団令和 2 年度出版助成.

## 受託研究

1. 片桐英樹, フードロス対策での AI 活用についての検討, 山路フードシステム
2. 佐藤公俊, ダイナミックプライシングにおける効果測定及び需要推定精度の研究, ダイナミックプラス株式会社.
3. 久宗周二, 海上医学研究, 神戸マリナーズ厚生会.

## 特許(公開)

1. 松本光広, 把持装置, 特開 2020-069578.

## 海外出張

1. 翁嘉華, 2019 Asian Conference of Management Science & Applications, Yantai, China (2019. 10)
2. 片桐英樹, World Congress on Engineering and Computer Science 2019, San Francisco, USA (2019.10).
3. 片桐英樹, IAET 2nd International Conference on Innovative Research in Computer Applications, Information Technology, System Engineering & Applied Science, Amsterdam, Netherland

(2020. 2).

## 褒賞

1. 太田修平, 日本信頼性学会優秀賞, 日本信頼性学会 (2020. 6).
2. 太田修平, Best Paper Award of The 9th Asia-Pacific International Symposium on Advanced Reliability and Maintenance Modeling (APARM 2020), APARM 2020 (2020. 8).

## その他

1. 翁嘉華, 産業座談会, 若手研究者×若手物流業界現場管理者, 産学若手のコラボレーションで未来志向の“現場力”を向上 (経営工学会創立 70 周年記念企画), Material Flow, 61 (10), 50-53 (2020. 10)
2. 翁嘉華, 神奈川大学工学部経営工学科 生産流通マネジメント研究室の紹介, 経営システム, 30 (1), 48-52 (2020. 7)
3. 佐藤公俊, 伊藤晴祥, “JAROS2019 大会ルポ”, リアルオブションと戦略, 11(2), 52-54, (2020. 3).
4. 久宗 周二, 久宗 周二 教授 (工学部) と本学学生の計 13 人が群馬県みどり市大間々町で現地調査を行い, 交流人口を増やすため具体的な地域活性化策をコメントした様子が掲載された, 桐生タイムス (2019. 9.18)
5. 久宗 周二, 久宗 周二 教授 (工学部) が, 神戸マリナーズ厚生会とともに作成した『船員版マンガで読もう 疾病と対策』を題材に, 清水港湾合同庁舎で行われた国土交通省静岡運輸支局「安全衛生講習会」の講師を務めたことが紹介された, 日本海事新聞 (2019. 9.27)
6. 久宗 周二, 久宗 周二 教授 (工学部) が, 9 月 30 日に開催された国土交通省海事局「船員の健康確保に関する検討会」で座長を務めたことが紹介されました. 船員の働き方改革のお一環として具体的な議論をする場で, 来夏ごろの取りまとめに向け, 医療や通信の専門家も交えて検討を進めているものである, 日本海事新聞 (2019. 10.2)
7. 久宗 周二, 久宗 周二 教授 (工学部) の著書「元気な健康職場づくりヒント集」と, 編書『船員版 マンガで読もう 疾病と対策 仕事別なりやすい病気と改善策』が紹介された, 日刊水産経済新聞 (2019. 10.18)
8. 久宗 周二, 群馬県みどり市大間々町で定期開催されることになった, 生産者・製造者と消費者の交流を図るイベント「おおまま昼市」を紹介する記事において, 久宗 周二 教授 (工学部) のコメントが掲載された, 桐生タイムス (2019. 12.7)
9. 久宗 周二, 水産庁の「浜の活力再生広域プラン」を活用して安全操業に取り組む徳島県の 3 漁協を紹介する記事において, 久宗 周二教授 (工学部) のコメントが掲載された, 日刊水産経済新聞 (2020. 3.4)
10. 久宗 周二, 久宗周二 教授 (工学部) が, 神戸マリナーズ厚生会から委託研究を受けて作成した「船員のメンタルヘルスとハラスメント対策」が, 自主改善活動協会の HP で公開されていることが掲載された, 日刊水産経済新聞 (2020. 5.1)
11. 久宗 周二, 神戸マリナーズ厚生会の委託により, 久宗 周二 研究室 (工学部) の学生が「船員の疾病対策」についての動画を制作し, 動画投稿サイト (YouTube) で配信していることが掲載された, 日刊水産経済新聞 (2020. 5.1)
12. 久宗 周二, 工学部経営工学科社会行動科学研究室 (久宗教授) の学生有志が, テレビ会議システム「ZOOM」を使っ



て、群馬県みどり市の活性化や地域の課題解決に関する提案を地域グループや議員の方々に対し報告したことが掲載された、桐生タイムス (2020. 9.14)

13. 久宗 周二, 久宗 周二 教授 (工学部) が座長となっている国土交通省海事局「船員の健康確保に関する検討会」が船員の働き方改革等に向けた議論を取りまとめ、国会審議を経ての制度化に一步進んだことが紹介されました。また、令和元年9月より同検討会において、船員の健康確保の実現に向けた取組について議論を行ってきた国土交通省海事局は、令和2年10月19日同省HPにてその結果をとりまとめた「船員の健康確保に向けて」を報道資料として公開した、水産経済新聞 (2020. 9.17)
14. 松本光広, 修行ゼロで、全方向に気配を感じられる「超人化スーツ」、アスキー (2020. 6).

## 建築学科

### 研究論文I (レフェリー付き論文)

1. T. Ochiai, T. Inubushi, H. Ma, M. Navarro, and T. Enomoto, Structural Health Monitoring of a Vibration Controlled Structure, EURODYNE2020, 4887-4899, (2020)
2. T. Enomoto, T. Ochiai, and H. Ma, Structural Monitoring of CFT Building Using Earthquake Strong Motion Records, EURODYNE2020, 4935-4947, (2020)
3. —
4. 毎田 悠承, 坂田 弘安, 島崎 和司, 和泉 信之, 竹中 啓之, 渡辺 亨, 佐伯 英一郎, 洪田 敬, 突起付き鉄製プレート圧着接合法を用いたダンパー接合部設計法の提案とダンパーを組み込んだRCフレーム実験による検証ー突起付き鉄製プレート圧着接合を用いたコンクリート系構造物のダンパー適用に関する研究 その2ー, 日本建築学会構造系論文集, 85(770), 563-573, (2020)
5. 白井 佑樹, 島崎 和司, 静的・動的載荷実験による評価, 粘弾性ダンパーを付加したアンボンド圧着型PCフレームの水平載荷性能 その1, 日本建築学会技術報告集, 26(62), 136-140, (2020).
6. Y.G. Zhao, X.F. Yan and S.Q. Lin. Compressive strength of axially loaded circular hollow centrifugal concrete-filled steel tubular short columns, Engineering Structures, 201, 109828 (2019).
7. H.Z. Zhang and Y.G. Zhao. Investigation of Relationship Between the Response and Fourier Spectral Ratios Based on Statistical Analyses of Strong Motion Records, Journal of Earthquake and Tsunami, 2150008 (2020).
8. H.Z. Zhang and Y.G. Zhao. Damping modification factor based on random vibration theory using a source-based ground-motion model, Soil Dynamics and Earthquake Engineering 136,106225 (2020).
9. X.F. Yan, Y.G. Zhao. Compressive strength of axially loaded circular concrete-filled double-skin steel tubular short columns, Journal of Constructional Steel Research, 170, 106114 (2020).
10. S. Q. Lin, Y. G. Zhao and Z. H. Lu. Fiber beam element models for nonlinear analysis of concentrically loaded circular CFT columns considering the size effect, Engineering Structures, 210(1), 110400 (2020).
11. S. Q. Lin, Y. G. Zhao and Z. H. Lu. Modified confining stress path dependent analytical model for axially loaded circular normal, high and ultra-high strength concrete-filled steel tube

stub columns, Composite Structures, 242(15), 112192 (2020).

12. X. W. Ji, G. Q. Huang and Y. G. Zhao. Probabilistic flutter analysis of bridge considering aerodynamic and structural parameter uncertainties. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 201, 104168 (2020).
13. Q. Zhang, Y. G. Zhao, K. Kolozvari, and L. Xu. Simplified model for assessing progressive collapse resistance of reinforced concrete frames under an interior column loss. Engineering Structures, 215(15), 110688 (2020).
14. Z. H. Lu, Z. Zhao, X. Y. Zhang, C. Q. Li, X. W. Ji and Y. G. Zhao. Simulating stationary non-gaussian processes based on unified Hermite polynomial model. Journal of Engineering Mechanics, 146(7), 04020067 (2020).
15. M. J. Qin, Y. G. Zhao and Z. H. Lu. Reliability analysis of nuclear power plants under random earthquake based on extreme value theory. Journal of Beijing University of Technology, 46(8), 892-899 (2020).
16. Z.H. Lu, Z. Zhao, X.Y. Zhang, C.Q. Li, X.W. Ji and Y.G. Zhao. Simulating Stationary Non-Gaussian Processes Based on Unified Hermite Polynomial Model. Journal of Engineering Mechanics, 146(7), 04020067. (2020).
17. Y. G. Zhao, M. N. Tong and Z. H. Lu. Monotonic Expression of Polynomial Normal Transformation Based on the First Four L-Moments, Journal of Engineering Mechanics, 146(7), 06020003(2020).
18. Z. H. Lu, H. J. Wang, F. L. Qu, Y. G. Zhao, P. R. Li and W. G. Li. Novel empirical model for predicting residual flexural capacity of corroded steel reinforced concrete beam. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 14, 888-906 (2020).
19. C. H. Cai, Z. H. Lu and Y. G. Zhao. Moment method with Box-Cox transformation for structural reliability, Journal of Engineering Mechanics, 146(8), 04020086 (2020).
20. Z. H. Lu, Z. Zhao, X. Y. Zhang, C. Q. Li, X. W. Ji and Y. G. Zhao. Simulating stationary non-Gaussian processes based on unified Hermite polynomial model, Journal of Engineering Mechanics, 146(7), 04020067(2020).
21. Y. Yasuda, K. Saito and H. Sekine, Effects of the convergence tolerance of iterative methods used in the boundary element method on the calculation results of sound fields in rooms, Applied Acoustics, 157, 106997 (2020).

### 研究論文II (レフェリー付き Proceedings)

1. P. P. Li, Z. H. Lu and Y. G. Zhao. Structural reliability analysis without exclusion of the epistemic uncertainty in distribution parameters, International Symposium on reliability of multi-disciplinary engineering systems under uncertainty (ISMES2019) (Taipei, 2019. 12).
2. L. Ren and Y.G. Zhao, Reliability analysis of total construction duration based on cubic normal distribution, International Symposium on Reliability of Multi-disciplinary Engineering Systems under Uncertainty (ISMES2019) (Taipei, 2019. 12).
3. F. W. Ge and Y. G. Zhao. Seismic resilience assessment on steel braced-frame, International Symposium on Reliability of Multi-disciplinary Engineering Systems under Uncertainty (ISMES2019) (Taipei, 2019. 12).
4. X.Y. Zhang, Y.G. Zhao and Z.H. Lu. System reliability of CRTS II track slab considering both safety and serviceability. International Symposium on Reliability of Multi-disciplinary Engineering Systems under Uncertainty (ISMES2019) (Taipei,

2019. 12).

5. H.R. Jiang, X.Y. Zhang, Y.G. Zhao and Z.H. Lu. Reliability assessment of CRTS II track slab considering correlated random variables. International Symposium on Reliability of Multi-disciplinary Engineering Systems under Uncertainty (ISMES2019) (Taipei, 2019. 12).
6. B.Z. Jin, X.Y. Zhang, Y.G. Zhao and Z.H. Lu. Time-dependent reliability evaluation of CRTS II track slab based on conditional probability method. International Symposium on Reliability of Multi-disciplinary Engineering Systems under Uncertainty (ISMES2019) (Taipei, 2019. 12).
7. Masanori Fujita, Shunsuke Okazaki: Design and supervision flow of building steel structures for reuse, 12th Pacific Structural Steel Conference, 2019.11

## 建築作品

1. 石田敏明, corne (コルネ), GOOD DESIGN AWARD 2019, 592, 2020年3月30日, 公益財団法人日本デザイン振興会
2. 吉田明宏, 田野耕平, 木村留美, あぶりこつと保育園エミタス久本, KJ2019年12月号, 72-77, 新建築社 (2019. 11).
3. 曾我部昌史, 加茂紀和子, 竹内昌義, マニユエル・タルディッツ, ホテルアクア黒部 (富山県)
4. 曾我部昌史, 加茂紀和子, 竹内昌義, マニユエル・タルディッツ, 飯豊エコモデルハウス (山形県), 新建築ハウジング, p1-2, (2020.01.30)
5. 曾我部昌史, 加茂紀和子, 竹内昌義, マニユエル・タルディッツ, 奥会津水力館みお里 (福島県)
6. 曾我部昌史, 吉岡寛之, 丸山美紀, 長谷川明, ほか, 桜屋改修 (徳島県)
7. 曾我部昌史, 吉岡寛之, 丸山美紀, 長谷川明, ほか, 大三島みんなのワイナリー (愛媛県), 大三島みんなのワイナリーTIMES, (2019.11)

## 口頭発表

1. 齊藤健太, 掛川真乃子, 塚本裕士, 横山優莉菜, 石田敏明, 田野耕平, 瀬戸内海地方の尾道市浦崎町における廃校舎の活用による地域再生・活性化に関する研究と提案, 173, 日本建築学会 建築デザイン発表会
2. 児保茂樹, 岩本静男, 傳法谷郁乃, 住宅における全館空調による空調負荷と室内温熱環境, 第43回人間－生活環境系シンポジウム報告集(人間－生活環境系学会), (2019.12).
3. 武市拳斗, 岩本静男, 傳法谷郁乃, フリークーリングによる省エネルギー効果の検討, 日本建築学会学術講演梗概集(日本建築学会), (2020.9).
4. 梶谷達希, 岩本静男, 傳法谷郁乃, 児保茂樹, 住宅における全館空調システムに関する研究 第2報 隙間を考慮した空調負荷の検討, 日本建築学会学術講演梗概集(日本建築学会), (2020.9).
5. 藤本遼, 岩本静男, 傳法谷郁乃, 単位モデルによる大規模講義室の温熱環境評価 第1報 全体モデルとの比較および床吹出旋回流方式の検討, 日本建築学会学術講演梗概集(日本建築学会), (2020.9).
6. 岩本静男, 傳法谷郁乃, 坂上恭助, 水道水温の予測法に関する研究 第1報 省エネルギー基準の6地域について, 日本建築学会学術講演梗概集(日本建築学会), (2020.9).
7. 岩本静男, 稲田朝夫, 岡内繁和, 坂上恭助, 趙旺熙, 藤村和也, 光永威彦, 呉光正, 給湯設備設計用水道水温の予測

(第1報) 省エネルギー基準の全8地域に対する予測式, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集(空気調和・衛生工学会), (2020.9).

8. 笹森暁, 山田稜, 山崎慶太, 井野隼人, 染谷俊介, 栗原浩平, 濱田靖弘, 傳法谷郁乃, 小林宏一郎, ファン付き作業服が建設作業員の生理・心理反応に及ぼす影響に関する研究(第11報)人工気候室におけるファン付きズボンの有効性, 第43回人間－生活環境系シンポジウム報告集, 15-18 (釧路, 2019.12).
9. 山田稜, 笹森暁, 山崎慶太, 井野隼人, 染谷俊介, 栗原浩平, 濱田靖弘, 傳法谷郁乃, 小林宏一郎, ファン付き作業服が建設作業員の生理・心理反応に及ぼす影響に関する研究(第12報)建設現場におけるファン付き作業服およびズボンの有効性, 第43回人間－生活環境系シンポジウム報告集, 19-22 (釧路, 2019.12).
10. 傳法谷郁乃, 山崎慶太, 井野隼人, 染谷俊介, 栗原浩平, 濱田靖弘, 山田稜, 笹森暁, 小林宏一郎, ファン付き作業服が建設作業員の生理・心理反応に及ぼす影響に関する研究(第13報)夏季の建設作業現場における着用実態調査, 第43回人間－生活環境系シンポジウム報告集, 23-24 (釧路, 2019.12).
11. 山崎慶太, 井野隼人, 染谷俊介, 藤崎幸市郎, 高橋泰斗, 栗原浩平, 傳法谷郁乃, 山田稜, 笹森暁, 濱田靖弘, 小林宏一郎, ファン付き作業服が建設作業員の生理・心理反応に及ぼす影響に関する研究(第14報)水分損失や深部体温に及ぼす影響, 第43回人間－生活環境系シンポジウム報告集, 25-28 (釧路, 2019.12).
12. 藤崎幸市郎, 山崎慶太, 井野隼人, 染谷俊介, 栗原浩平, 濱田靖弘, 山田稜, 笹森暁, 傳法谷郁乃, 小林宏一郎, ファン付き作業服が建設作業員の生理・心理反応に及ぼす影響に関する研究(第15報)顔表面温度による評価, 第43回人間－生活環境系シンポジウム報告集, 29-32 (釧路, 2019.12).
13. 傳法谷郁乃, 辻村壮平, 内田幸子, 小柴朋子, 感染防護服着用時の看護動作において発生する騒音のうるささ評価, 日本繊維製品消費科学会 2020年学術大会・研究発表要旨, 46 (2020.6).
14. 高橋泰斗, 染谷俊介, 山崎慶太, 栗原浩平, 傳法谷郁乃, 濱田靖弘, 小林宏一郎, 作業所における熱中症対策の研究－強制飲水の効果測定－, 日本建築学会学術講演梗概集(日本建築学会), (2020.9).
15. 山崎慶太, 栗原浩平, 傳法谷郁乃, 濱田靖弘, 小林宏一郎, 染谷俊介, 高橋泰斗, ファン付き作業服を用いた暑熱ストレス低減化に関する研究(第12報)深部体温による熱中症モニタリングに関する検討, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集(空気調和・衛生工学会), (2020.9).
16. 竹本真, 内田青蔵, ナチス・ドイツ政権下(1933-1945)の小規模住宅地開発に関する一考察－ラマーズドルフ・ジードルンク(1934)の外観的特徴に着目して－, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), 387-388(千葉, 2020.9)
17. 野々村明佳里, 内田青蔵, 同潤会の勤め人向け分譲住宅事業の広報活動について－赤羽第二期・荻窪分譲住宅で開催された住宅展覧会を中心に－, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), 173-174(千葉, 2020.9)
18. 田中和幸, 渡邊裕子, 須崎文代, 内田青蔵, 脇岡明美, ブラジル連邦共和国レジストロ市における戦前に竣工した日本人の移住住宅 その6 天谷リコン邸の構造形式から見る日系移住住宅の変遷, 185-186(千葉, 2020.9)
19. 須崎文代, 『婦人衛生会雑誌』(明治21年～大正15年刊行)にみる明治・大正期の住居衛生論の主題と傾向について

- て、日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), 163-164(千葉, 2020.9)
20. T. Ochiai, T. Enomoto, and T. Inubushi, Structural Monitoring of Passive Control of Vibration Structure, ISRMES (International Symposium on Reliability of Multi-disciplinary Engineering Systems under Uncertainty), MA1-1, (2019)
  21. 落合努, 荏本孝久, 2019 年 6 月山形県沖の地震の被災地域における地盤振動特性の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), 107-108 (2020)
  22. 荏本孝久, 落合努, 栗山利男, 応答スペクトルによる表層地盤のハザード評価法に関する基礎的研究 -その 2. 規則的な多層地盤および不規則な実地盤モデルによる検討-, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), 109-110 (2020)
  23. 栗山利男, 落合努, 荏本孝久, 強震観測記録を用いた CFT 建物の構造モニタリング -固有周期の経年変化-, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), 1037-1038 (2020)
  24. 落合努, 荏本孝久, マルチハザード評価のための基礎的研究 -その 2 横浜市の町丁目を対象としたクラスター分析-, 地域安全学会梗概集 No.46, 19-22 (2020)
  25. 落合努, 荏本孝久, 先名重樹, 微動観測による房総半島低地部の地盤ハザード評価, 地域安全学会梗概集 No.47 (2020)
  26. 落合努, 荏本孝久, 木村克己, 帷子川下流部低地周辺を対象とした地盤構造の詳細分析と三次元グリッドモデル作成, 第 55 回地盤工学研究発表会, 23-6-1-02 (2020)
  27. 落合努, 荏本孝久, 安重晃, 佐藤孝治, 平井史生, 令和元年台風 15 号の被害と台風シミュレーションによる分析 -千葉県銕南町と横浜市金沢区を中心として-, 令和 2 年度土木学会全国大会第 75 回学術講演会, CS16-01 (2020)
  28. 吉浦温雅, 奥山博康, 固形アルコール燃焼による炭酸ガス発生を利用した換気量と有効混合容積の簡易測定法, 日本建築学会学術講演梗概集, 1353-1354 (オンライン, 2020. 9).
  29. 井出大輝, 奥山博康, 吉浦温雅, 移動一括最小二乗法による多数室換気量の時間変化測定法の計算機実験, 日本建築学会学術講演梗概集, 1355-1356 (オンライン, 2020. 9).
  30. 中谷剛, 奥山博康, 吉浦温雅, 柏原誠一, 大石匡, 多数室換気測定システムの最適トレーサガス供給法の実験, 日本建築学会学術講演梗概集, 1357-1358 (オンライン, 2020. 9).
  31. 奥山博康, 並流と向流の熱交換器の相当熱交換一般化コンダクタンスによる熱回路網モデル その 1 解析解からの一般化コンダクタンスの演繹, 日本建築学会学術講演梗概集, 1843-1844 (オンライン, 2020. 9).
  32. 藤崎詩織, 奥山博康, 吉浦温雅, 並流と向流の熱交換器の相当熱交換一般化コンダクタンスによる熱回路網モデル その 2 カタログ性能を利用した検証, 日本建築学会学術講演梗概集, 1845-1846 (オンライン, 2020. 9).
  33. 吉浦温雅, 奥山博康, 中谷剛, 多数室換気測定法と簡易換気測定法の実験的な研究, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 101-104 (オンライン, 2020. 9).
  34. 奥山博康, 藤崎詩織, 吉浦温雅, 並流と向流の熱交換器の相当熱交換一般化コンダクタンスによる熱回路網モデル, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 17-20 (オンライン, 2020. 9).
  35. 島崎 和司、白井 佑樹：逆対称曲げを受ける平行配筋されたアンボント PCaPS 梁のせん断耐力の評価、日本建築学会大会学術講演梗概集 (千葉), 23360, (2020)
  36. 竹内 陸人、島崎 和司、白井 佑樹：アンボンド PC 圧着梁の曲げ耐力後の変形性能に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集 (千葉), 23356, (2020)
  37. 佐藤宏貴、小野真鈴、渡辺 亨、白井佑樹、田口朝康、島崎和司、宇田川亮：RC 非構造壁に取付けるせん断パネル型ダンパーとその接合法 その 1 せん断パネルのせん断載荷実験、日本建築学会大会学術講演梗概集 (千葉), 22168, (2020)
  38. 小野真鈴、白井佑樹、渡辺 亨、田口朝康、佐藤宏貴、島崎和司、宇田川亮：RC 非構造壁に取付けるせん断パネル型ダンパーとその接合法 その 2 剛性の算定とボルト軸力の検討、日本建築学会大会学術講演梗概集 (千葉), 22169, (2020)
  39. 石川準、坂上教夫、中澤元宏、島崎和司、白井佑樹、佐藤宏貴：ボイドスラブ長期載荷実験、日本建築学会大会学術講演梗概集 (千葉), 22163, (2020)
  40. 白井佑樹、中村一男、松浦恒久、佐藤宏貴、牧田敏郎、島崎和司、國分直輝：無垢板を用いた耐力壁のせん断性能 その 5 耐力壁の追加実験とその 3,4 の訂正、日本建築学会大会学術講演梗概集 (千葉), 22111, (2020)
  41. 吉岡寛之 他 (報告), タイ バンコク周辺地域の脆弱街区再生事例に関する調査報告, 神奈川大学 (神奈川, 2019.12)
  42. 張 海仲, 趙 衍剛, ランダム振動理論による応答スペクトル減衰低減係数の評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), 構造 II, 191-192(関東, 2020. 09).
  43. F.W. Ge and Y.G. Zhao. Influence of the brace arrangement on seismic resilience Part 1 Analytical models and investigation results, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), 構造 I, 9-10(関東, 2020. 09).
  44. Y.G. Zhao and F.W. Ge. Influence of the brace arrangement on seismic resilience Part 2 Analytical models and investigation results, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), 構造 I, 11-12 (関東, 2020. 09).
  45. P.P. Li and Y.G. Zhao. Determination of load and resistance factors using the three-parameter lognormal distribution, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), 構造 I, 1-2 (関東, 2020. 09).
  46. X. Yan and Y.G. Zhao. A practical formula for predicting compressive strength of axially loaded circular CFST short columns, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), 構造III, 1211-1212 (関東, 2020. 09).
  47. 鈴木成也、中井邦夫、部位を構成する要素からみる 20 世紀以降の椅子デザイン、日本建築学会大会 (関東) 学術講演梗概集 建築歴史・意匠、547-548 (2020. 9)
  48. 渡辺悠介、中井邦夫、鈴木成也、土地形状と道路との関係からみた熱海市における防火帯建築の構成、日本建築学会大会 (関東) 学術講演梗概集 建築歴史・意匠、587-588 (2020. 9)
  49. 池原なつ子、中井邦夫、鈴木成也、要素の共存と連担から読み取る道空間の構成 沖縄県那覇市栄町市場を事例として、日本建築学会大会 (関東) 学術講演梗概集 建築歴史・意匠、589-590 (2020. 9)
  50. 簾内俊希、中井邦夫、鈴木成也、道との関係からみる水辺の桜並木の空間構成、日本建築学会大会 (関東) 学術講演梗概集 建築歴史・意匠、611-612 (2020. 9)
  51. 藤田正則：建築鋼構造の長寿命化に関する研究 一屋根用取付金物用ボルトの耐久性一、神奈川大学工学研究 No.3, 3-8, 2020.2
  52. 藤田正則, 中村 慎, 瀧澤裕貴, 岩田衛：芯材に LY 材を用いた座屈拘束ブレースの疲労実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), 1027-1028, 2020.9
  53. 中村 慎, 藤田正則, 岩田衛：小開口を有する方立壁の水平載荷実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), 651-652, 2020.9



54. 瀧澤裕貴, 中村 慎, 谷ヶ崎庄二, 田中康一, 藤田正則, 緑川光正: 座屈拘束ブレースの拘束材の局部破壊実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), 1029-1030, 2020.9
55. 杉村 剛, 中村 慎, 湊田安浩, 榎本浩之, 藤田正則: 綴り材の接合ピッチの異なる LVL 柱の曲げ実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), 63-64, 2020.9
56. 飯原 護, 中村 慎, 藤田正則: 曲げ履歴を受けた鋼材の機械的性質に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), 663-664, 2020.9
57. 星和磨, 中村智幸, 村石喜一, 安田洋介, 建築音響に関わる JIS/ISO など各規格の概観, 日本建築学会環境工学委員会音環境運営委員会 第 79 回音シンポジウム「音環境に関する法規制・規格・基準の最新動向について」資料, AIJ1911-00500, pp. 31-46 (2019. 11).
58. 千田真人, 関根秀久, 安田洋介, 岩根康之, 小林真人, 振動ふるい機から発生する超低周波音に関する波動数値解析—防音ハウス開口からの放射音の対策—, 日本音響学会建築音響研究会資料, AA2019-59 (横浜, 2019. 12).
59. 千田真人, 関根秀久, 安田洋介, 川澄卓也, 岩根康之, 小林真人, 振動ふるい機の防音ハウス開口から放射される超低周波音に関する波動数値解析—振動ふるい機の振動条件や位置による検討—, 日本音響学会講演論文集 (春季), 603-606 (2020. 3).
60. 井上尚久, 榎本貴之, 安田洋介, 佐久間哲哉, 高速多重極境界要素法と有限要素法の結合解法による音場解析—その 1 音響-音響連成スキームの構築, 日本音響学会講演論文集 (春季), 663-664 (2020. 3).
61. 榎本貴之, 井上尚久, 佐久間哲哉, 安田洋介, 高速多重極境界要素法と有限要素法の結合解法による音場解析—その 2 計算精度・効率の検証, 日本音響学会講演論文集 (春季), 665-666 (2020. 3).
62. 榎本貴之, 井上尚久, 安田洋介, 佐久間哲哉, FMBEM に基づく入射指向性解析に関する基礎的検討, 日本音響学会講演論文集 (秋季), 473-474 (2020. 9).
63. 遠藤啓吾, 山家京子, 上野正也, ドイツ・デュースブルク市におけるウォーターフロント再生事業に関する調査研究 RheinPark, Ort と Innenhafen を対象として, 日本建築学会学術講演会梗概集, 379-380, (2020)
64. 佐藤季也, 鈴木杏奈, 永盛栞, 山家京子, 上野正也, 横浜市・郊外住宅地における地域資源の抽出及び発信の取組—その 4. 愛着と思い出のある場所 (若葉台), 日本建築学会学術講演会梗概集, 489-490, (2020).
65. 三浦悠介, 山家京子, 上野正也, いえがまちを彩り、まちがいえを彩る 郊外住宅地におけるウチで完結しない暮らしと住空間の提案, 日本建築学会デザイン発表会, 264-265, (2020).
66. 鈴木杏奈, 山家京子, 上野正也, みちくさあそび 密集市街地における住宅外部空間の提案, 日本建築学会デザイン発表会, 372-373, (2020).
67. 上野正也, 鈴木伸治, 地区再生まちづくりにおけるアーティスト・イン・レジデンスに関する考察—横浜市中区黄金町地区を対象として—, 日本文化政策学会第 13 回研究大会予稿集, 12-15, (埼玉, 2019. 12).

## 学術誌

1. 内田青蔵, 青島の建築視察報告, 神奈川大学非文字資料研究センター『非文字資料研究センター News Letter』, 43, 24-29 (2020.3).
2. 内田青蔵編集, 日韓建築シンポジウムの報告—専門家が語

る韓国と日本の近代建築史研究の魅力・研究の回顧と展望—, アジア研究センター年報 2019-2020—神奈川大学アジア・レビュー, 7, 33-61 (2020.3).

3. 内田青蔵, わが国の戦後の住まい・生活の変遷—1960 年代の住まいと生活の様相—, 日本工業出版株式会社『住まいとでんき』, 32 (10), 1-5 (2020.9).
4. 内田青蔵, 建築施工単価, 14-15(2020 年冬号).
5. 須崎文代, 住まいの水まわりの空間の変革: 明治・大正期における上下水の衛生工事に着目して (特集 台所と土木), 土木技術, 74(12), 7-13, 2019.12
6. 落合努, 「自助」の進展・継続と防災ビジネス, 地域安全学会ニューズレターNo.111, 10-14 (2020)
7. 丸田誠, 島崎和司, 日本建築学会「プレストレストコンクリート造建築物の保有水平耐力計算指針 (案)・同解説」の概要, コンクリート工学 58(4), 265-272, 公益社団法人日本コンクリート工学会, (2020).
8. 石田敏明, 曾我部昌史, アルミの家からみんなの家へ—プリミティブ・ハットの変容にあらわれる都市生活像の系譜, 建築ジャーナル, 2020.02, 34-39 (2020).
9. 中井邦夫, 「代田の町家—あらためて、たしからしさの世界をすてろ」, 建築ジャーナル, 企業組建建築ジャーナル, 36-41 頁, (2020.3)
10. S. Sakamoto (Chairman of the Research Committee on Road Traffic Noise, Acoustical Society of Japan. Secretaries: Y. Yasuda, et al.), Road traffic noise prediction model "ASJ RTN-Model 2018": Report of the Research Committee on Road Traffic Noise, Acoustical Science and Technology, 41 (3), 529-589 (2020).
11. 山家京子, 生活が刻み込まれたまちなみの再生, 住まいとでんき, 第 32 巻, 第 7 号, pp.1-5, 日本工業出版 (2020).

## 著書

1. 石田敏明 (共著), 「建築家 浦辺鎮太郎の仕事」: 大佛次郎記念館 /P192/学芸出版/発行 2019 年 10 月 20 日
2. 石田敏明, 曾我部昌史, 「戦後住宅クロニクル—アルミの家からみんなの家へ—プリミティブ・ハットの変容にあらわれる都市生活像の系譜」, 34-39, 建築ジャーナル, 2020 年 2 月号, 企業組建建築ジャーナル
3. 石田敏明, JIA MAGAZINE367, JIA 全国学生卒業設計コンクール 2019 審査講評, 2019 年 10 月, 23, 公益社団法人日本建築家協会
4. 石田敏明 (共著)「第 7 回木質建築空間デザインコンテスト」審査委員 審査日 2020.0623 講評 日経アーキテクチュア No.1176 20209-24 P16-P19
5. 内田青蔵 (分担執筆), 学問への誘い—大学で何を学ぶか— (2020 年版), 52-56, 神奈川大学広報委員会 (2020.1).
6. 内田青蔵, 編集委員 (編集代表平井聖), 日本の建築文化事典, 丸善出版 (2020.1).
7. 内田青蔵 (分担執筆), 旧家再生研究所編, 「再生」が拓く新しい物語—温故知新のリフォーム六, 69-78, 建築資料研究社 (2020.3).
8. 内田青蔵, 大里浩秋, 孫安石編著, 東アジアにおける租界研究—その成立と展開, 神奈川大学非文字資料研究叢書 3, 209-259, 東方書店 (2020.3)
9. 内田青蔵 (分担執筆), 土浦邸フレンズ事務局, 土浦邸フレンズの活動記録 2013-2020, 96-111, 土浦邸フレンズ事務局 (2020.4).
10. 内田青蔵 (分担執筆), 住総研清水組『住宅建築図集』現存住宅調査委員会, 住まいの生命力—清水組住宅の 100 年,



- 18-23, 84-99, 162-163, 168-173, 176-181, 194-198, 206-209, 柏書房 (2020.5).
11. 内田青蔵, 須崎文代 他, 奇跡の住宅—旧渡辺甚吉邸と室内装飾, 55-58, LIXIL 出版 (2020.6).
  12. 内田青蔵 (分担執筆), 丸の内建築図集 1890-1973, 54-55, 新建築社(2020.9.29).
  13. 島崎和司(編), プレストレストコンクリート造建築物の保有水平耐力計算指針(案)・同解説(共著), 日本建築学会, (2020)
  14. 曾我部昌史 (分担執筆), 都市デザインの横浜と浦辺の関わり, 建築家 浦辺鎮太郎の仕事: 倉敷から世界へ, 154-155, 学芸出版社 (2019).
  15. 曾我部昌史, 加茂紀和子, 竹内昌義, マニユエル・タルディッツ(分担執筆), みかんぐみ, 日本建築家&インテリアデザイナーガイド 20\_20, 68-72, 絵想空間設計有限公司社 (2019)
  16. 吉岡寛之 (分担執筆), 神奈川近代文学館・霧笛橋, 建築家 浦辺鎮太郎の仕事: 倉敷から世界へ, 204-206, 学芸出版社 (2019).
  17. 藤岡泰寛、菅孝能、桂有生、中井邦夫、黒田和司、松井陽子、林一則、笠井三義 (担当頁順)『横浜防火帯建築を読み解く 現代に語りかける未完の都市建築』、花伝社、第 3 章 横浜防火帯建築の空間を読む、99-147 頁 (総頁数 280) (2020. 3)
  18. 編著: 松隈洋、笠原一人、西村清是 / 著: 大原謙一郎、藤森照信、松葉一清、重村力、中井邦夫、ほか (全 29 名) / 監修: 浦辺鎮太郎建築展実行委員会、『建築家 浦辺鎮太郎の仕事: 倉敷から世界へ、工芸からまちづくりへ』、学芸出版社、36:横浜開港資料館 (1981 年) 解説、column 36:浦辺鎮太郎の建築類型学 (総頁数 320) (2019.10)
  19. 山家京子 (分担執筆), NEO Book5 消えゆく境界、つながりのデザイン, 新世代ワークプレイスセンター (2020).

## 調査報告書

1. 「瀬戸内海地方の広島県東部地域(尾道市及び福山市の沿岸地域—尾道市浦崎町)の再生・活用及び運用に関する研究と提案」-その 2, 齊藤健太, 掛川真乃子, 塚本裕士, 横山優莉菜, 鳥達木、石田敏明、田野耕平
2. 岩本静男, 傳法谷郁乃, 建物内給水温度の推定法, 科学研究費助成事業研究成果報告書, 基盤研究 (C), 課題番号 17K06682 (2019).
3. 神奈川大学百年史編纂委員会(日野品也, 小林孝吉, 吉井蒼生夫, 出雲雅志, 内田青蔵他), 神奈川大学学 90 年のあゆみ, 8-55 (2019.10).
4. 内田青蔵, 日本における韓国近代建築史研究の動向について, 日韓シンポジウム 専門家が語る韓国と日本の近代建築史研究の魅力—研究の回顧と展望—, 神奈川大学アジア研究センター, 9-15 (2019.11.16)
5. 内田青蔵, 山家京子, 村井まや子, 出雲雅志, 須崎文代, 杉山真魚, 田所辰之助, ケルムスコット・プレストとウィリアム・モリスのデザイン思想, 神奈川大学共同研究報告書, 2020.3.
6. 清水組『住宅建築図集』現存住宅調査研究委員会 (波多野純、内田青蔵他), 清水組『住宅建築図集』現存住宅調査研究報告書, 2020.8.
7. 中井邦夫、大森美穂、飯田康二朗、鈴木成也、BA／横浜防火帯建築研究 No.19、不老町 2 丁目第一共同ビル、BA 編集部 (神奈川大学中井研究室内)、(2020.7)
8. 中井邦夫、菊井悠央、稲岡寛之、鈴木成也、BA／横浜防火

帯建築研究 No.18、福富町市街地住宅、BA 編集部 (神奈川大学中井研究室内)、(2020.5)

9. 中井邦夫、岡本晴美、鈴木成也、BA／横浜防火帯建築研究 No.17、金港他共同ビル、BA 編集部 (神奈川大学中井研究室内)、(2020.3)
10. 高速道路総合技術研究所, 日本音響学会 (道路交通騒音調査研究委員会執筆, 幹事: 安田洋介他), 令和元年度 道路交通騒音の予測精度向上に関する研究報告書 (2020).
11. 山家京子, 上野正也, 「八丁畷コンセプトブック」神奈川大学, 京浜急行電鉄及び川崎市による産学官連携協定に基づく活動報告書, 京浜急行電鉄株式会社, (2019.10).
12. 山家京子, 上野正也, 「十日市場駅勢圏域におけるまちづくりの推進に掛かる協定」に基づく活動報告書(霧ヶ丘編), 横浜市建築局住宅再生課, (2019.11).

## 講演・展示会

1. 「建築家 浦辺鎮太郎の仕事—倉敷から世界へ、工芸からまちづくりへ」展, 展示模型製作協力, 早川史洋, 門田大希, 岡本晴美, 水上翔太, 濱松謙太, 小田凌大朗、石田敏明, 田野耕平, 2019 年 10 月 26 日～12 月 22 日 倉敷アイビースクエア
2. 内田青蔵, 日本の近代住宅・鈴木成文邸, 練馬区千早地区文化創造講座, (東京, 2019.10.8).
3. 内田青蔵, 日本の近代住宅・前田侯爵邸, 練馬区千早地区文化創造講座, (東京, 2019.10.11).
4. 内田青蔵, 近代の史料と歴史, 神奈川大学公開講座, (横浜, 2019.11.8).
5. 内田青蔵, 日本における韓国近代建築史研究の動向について, 日韓シンポジウム 専門家が語る韓国と日本の近代建築史研究の魅力—研究の回顧と展望—, 神奈川大学アジアセンター (横浜, 2019.11. 16).
6. 内田青蔵, 東京の洋館拝見, 東京都公文書館・公益財団法人特別協議会主催 (東京, 2019.11.22).
7. 内田青蔵, 近代日本住宅史 1, 三鷹市教育委員会 (東京, 2019.11.24).
8. 内田青蔵, 近代日本住宅史 2, 三鷹市教育委員会 (東京, 2019.12.1).
9. 内田青蔵, 近代の日本住宅, 日本女子大学(東京, 2019.12.3).
10. 内田青蔵, 近代住宅の保存・活用の最新動向, シンポジウム熊本地震による被災文化財の保存・活用の現在, 熊本大学五校記念館主催 (熊本, 2020.2.22).
11. 旧渡辺甚吉邸サポーターズ (内田青蔵, 須崎文代 他), 奇跡の住宅—旧渡辺甚吉邸と室内装飾, LIXIL ギャラリー (Covid19 によりオンライン開催, 2020.06-2020.08)
12. 荏本孝久, 招待講演, 「Development of Risk Evaluation of Ground Shaking Characteristics for Seismic Vulnerability Assessment in Japan」, Development of Risk Evaluation of Ground Shaking Characteristics for Seismic Vulnerability Assessment in Japan, International Workshop on Urban Disaster Prevention, Guangzhou University, (2019)
13. 奥山博康, 吉浦温雅, 建築の伝熱・換気性能の予測計算法と現場測定法, 神大テクノフェスタ 2019 (横浜, 2019.11)
14. 吉浦温雅, 多数室建物の熱換気性能現場測定法の動作確認実験, 2019 年度第二回伝熱小委員会・合同 WG (東京, 2019. 11).
15. 奥山博康, 並流と向流の熱交換器の相当熱交換一般化コンダクタンスによる熱回路網モデル, 2020 年度第一回伝熱小委員会・合同 WG (東京, 2020. 6).
16. 曾我部昌史, Design Strategies in the population decreasing period University of South Florida (Tampa USA, 2019. 10).

17. 曾我部昌史, 人口減少期的設計戦略, 北京交通大学(北京 中国, 2019.11)
18. 曾我部昌史, 人口減少期の暮らしをめぐる創造性, 川崎総合科学高等学校 (川崎, 2019.11)
19. 曾我部昌史ほか(シンポジウム), 住宅課題のこれまでとこれからー建築教育における住宅課題の可能性を考えるー, 竹中工務店東京本店Aホール (東京, 2019.11)
20. 曾我部昌史, ヨコハマ・シチュアショニスム横浜にある作品群から見る浦辺鎮太郎の建築的方法, 倉敷公民館 (倉敷, 2019.12)
21. 曾我部昌史, 建築の未来と万博, グランフロント大阪うめきた SHIP ホール (大阪, 2020.7)
22. 曾我部昌史, 吉岡寛之, 丸山美紀, 長谷川明, ほか, 展示「未来の自分の仕事を考えて建築模型にしよう!」, 地域と暮らしの情報 ARU DE NAIDE (徳島, 2019.10)
23. 曾我部昌史, 吉岡寛之, 丸山美紀, 長谷川明, 西蔵祥大ほか, 展示「ウミガメマスク」, 地域と暮らしの情報 ARU DE NAIDE (徳島, 2020.7)
24. 中井邦夫,「これからの都市建築デザイナー横浜防火帯建築に学ぶー」, DAN 総合設計プレゼンテーション 2019 (BUKATSUDO、横浜、2019.11)
25. 星和磨, 中村智幸, 村石喜一, 安田洋介, 建築音響に関わる JIS/ISO など各規格の概観, 日本建築学会環境工学委員会音環境運営委員会 第79回音シンポジウム「音環境に関する法規制・規格・基準の最新動向について」(東京, 2019.11).
26. 山家京子, 働く場のデザイン, NEO Final SymposiumーNEOの試みと予測できない未来ー, (東京, 2020.1).

## 助成金

1. 岩本静男, 傳法谷郁乃, 建物内給水温度の推定法, 文科省科学研究費助成金, 基盤研究(C), 課題番号 17K06682.
2. 岩本静男, 傳法谷郁乃, 多様化する給湯用熱源の一次エネルギー消費量算定, 文科省科学研究費助成金, 基盤研究(C), 課題番号 20K04817.
3. 傳法谷郁乃(分担), 熱中症対策としてのファン付き衣服の有効性に関する研究, 科学研究費補助金, 基盤研究(C), 課題番号 19K04744.
4. 傳法谷郁乃(代表), 熱中症予防のための快適な着物構成・着装方法の新提案, 科学研究費補助金, 若手研究, 課題番号 19K14037.
5. 傳法谷郁乃(分担), 衣服内換気的最適化に基づく快適被服デザイン, 科学研究費補助金, 基盤研究(C), 課題番号 20K02364.
6. 内田青蔵(代表), 須崎文代, 安野彰, 同潤会における木造分譲住宅事業に関する基礎的研究ー遺構調査を中心としてー, 科学研究費補助金 基盤研究(C), 課題番号 19K04827, 2019.4.1-2022.3.31.
7. 須崎文代(代表), 大江スミのイギリス留学による明治期の住居衛生論の導入と国内での展開に関する研究, 科学研究費補助金 若手研究(B), 課題番号 16K18222, (2016.4.1-2020.3.31).
8. 内田青蔵, 須崎文代, 中谷礼仁, 三浦清史, 中下桂, 旧渡辺甚吉邸の建築的特徴に関する歴史的調査と評価, 財団法人 VS Port「旧渡辺甚吉邸に代表される歴史的建造物の保存、再生活用、展示運用に関わる研究」, (2020.2.1-2021.3.31).
9. 落合努(代表), 単点常時微動観測を用いた新たな簡易地盤ハザード評価手法の研究, 神奈川大学宮陵会, 2019(令和元)年度教育研究奨励助成金

10. 落合努(代表), 常時微動とボーリングデータを組合せた高精度な三次元グリッドモデル作成手法の構築, 令和2年度科学研究費補助金, 基盤研究(C), 課題番号 20K04689.
11. 白井佑樹(代表), 体育館を対象とした継続使用性の判断方法に関する検討-振動特性とコンクリート基礎の損傷の関係-, 令和2年度神奈川大学工学研究所共同研究
12. 白井佑樹(代表), アンボンドPC構造梁端の継続使用可能な制振要素接合方法の確立, 科学研究費補助金, 若手研究, 課題番号 20K14876
13. 曾我部昌史, (分担, 代表=中井邦夫), 戦後の防火建築帯に学ぶ都市建築類型学の構築と新しい都市建築モデルの探求, 令和2年度科学研究費補助金, 基盤研究(C)
14. 曾我部昌史, 吉岡寛之, 丸山美紀, 長谷川明, 改修前後の変化からみる古民家活用による新たな地域再生手法に関する研究-徳島県美波町薬王寺門前町のまちづくりを事例として-, 前田記念工学振興財団研究助成, 2020.6-2021.3
15. 中井邦夫(代表者), 内田青蔵(以下、分担), 曾我部昌史, 石黒由紀, 藤岡泰寛,「戦後の防火建築帯に学ぶ都市建築類型学の構築と新しい都市建築モデルの探求」, 科学研究費補助金(基盤研究C)、日本学術振興財団、(2020.04~2023.03)
16. 藤田正則(研究代表者), 浸水被害に対応した建築物の設計法に関する基礎研究, 令和2~4年度科学研究費助成事業(学術研究助成基金), 挑戦的研究(萌芽), 課題番号 20K21039
17. 山家京子(代表), 他, アジアの社会遺産と地域再生手法, 神奈川大学アジア研究所共同研究(2018-2020)
18. 趙衍剛(代表), 山家京子(分担), 他, アジア地域の災害軽減化と防災・減災ネットワーク構築に関する研究, 神奈川大学アジア研究所共同研究(2019-2021)
19. 内田青蔵(代表), 山家京子(分担), 他, ケルムスコット・プレスとウィリアム・モリスのデザイン思想, 神奈川大学共同研究奨励助成(2017-2019)

## 受託研究

1. 岩本静男, 傳法谷郁乃, 全館空調システムの省エネルギー性能評価, 受託研究, アズビル(株).
2. 岩本静男, 様々な給湯熱源システムの一次エネルギー消費量の計算ツールの検討, (一社)日本サステナブル建築協会.
3. 傳法谷郁乃, 研究奨学寄付金, 竹中工務店.
4. 荏本孝久, 研究奨学寄付金, 株式会社ニュージェック
5. 荏本孝久, 研究奨学寄付金, 株式会社環境防災技術研究所
6. 奥山博康, 吉浦温雅, 藤崎詩織, 関西の三住宅の温熱環境と多数室換気の現場測定, (株)創建, 受託金 150 万円(測定期間 2020.9.9~2020.9.17)
7. 島崎和司, 白井佑樹, 杭頭接合部の圧縮試験, 株式会社安藤・間
8. 島崎和司, 白井佑樹, 木造耐力壁パネルに関する架構性能実験(共同研究), 株式会社安藤・間
9. 島崎和司, 白井佑樹, 耐震・制振機能を有するRC造2次壁の研究(共同研究), 岡部株式会社
10. 島崎和司, 白井佑樹, 合成スラブ用デッキプレートの蟻溝形状の検討(共同研究), JFE 建材株式会社
11. 曾我部昌史, 吉岡寛之, 丸山美紀, 長谷川明「2020年度 門前町持続のためのまちづくり」, 徳島県美波町, 2020.6-2021.3
12. 曾我部昌史, 吉岡寛之, 丸山美紀, 長谷川明「令和2年度 谷屋の活用に向けた設計等官学連携事業」, 徳島県美波町, 2020.6-2021.3
13. 藤田正則, 3R配慮建築物のリユース検討, 大林組(株),

2018.4-2020.3

14. 藤田正則, 木構造の接合方法の検討, 共同研究, 大林組(株), 2020.4-2021.3
15. 安田洋介, 木造建築物の遮音性能向上に関する検討, 飛鳥建設.
16. 山家京子, 上野正也, 神奈川大学, 京浜急行電鉄及び川崎市の京急本線及び京急大師線沿線におけるまちづくり推進に関する調査研究, 京浜急行電鉄株式会社, 川崎市
17. 山家京子, 上野正也, 十日市場駅勢圏におけるまちづくりの推進に関する調査研究, 横浜市

## 海外出張

1. 曾我部昌史、中井邦夫、内田青蔵, 南フロリダ大学, USA (2019.10.13-20).
2. 内田青蔵, 曾我部昌史, 須崎文代, 北京交通大学, 中国 (2019.11.17-20).
3. 落合努, 台湾・台北「ISRMES2019へ参加、口頭発表」, 12月8日~12月11日
4. 荏本孝久, 中国・広州「都市防災に関する国際ワークショップ」, 11月1日~11月4日
5. 荏本孝久, インドネシア・バンダアチェ「アジア研究センター共同研究」
6. 曾我部昌史, 講演および建築まちなみ調査, Tampa ほか, USA (2019.10).
7. 曾我部昌史, 講演および建築まちなみ調査, 北京, 中国 (2019.11)
8. 曾我部昌史, 吉岡寛之, イスラエルの都市脆弱地区における調査研究, テルアビブほか, イスラエル (2020.1)

## 褒賞

1. 石田敏明, グッドデザイン賞 2019, come, 2019年10月31日, 公益財団法人 日本デザイン振興会
2. 吉田明宏、田野耕平、木村留美、あぷりこっと保育園エミタス久本, 2020年キッズデザイン賞, 特定非営利活動法人キッズデザイン協議会 (2020.8).
3. 傳法谷郁乃, ファン付き作業服が建設作業員の生理・心理反応に及ぼす影響に関する研究 (第13報) 夏季の建設作業現場における着用実態調査, 第43回人間-生活環境系学会大会発表賞, 人間-生活環境系学会 (2019.12).
4. 曾我部昌史, 加茂紀和子, 竹内昌義, マニユエル・タルデイツ, moto8, 2020年第13回市川市景観賞, 市川市 (2020.1).
5. 曾我部昌史, 加茂紀和子, 竹内昌義, マニユエル・タルデイツ, moto8, 2020年第26回千葉県建築文化賞入賞 (一般部門), 千葉県 (2020.3)

## その他

1. 石田敏明, 「JIA 学生卒業設計コンクール 2020」審査委員長, 公益社団法人 日本建築家協会
2. 石田敏明, 「第7回木質建築空間デザインコンテスト」審査委員
3. 石田敏明, 「作品選集委員会 選考委員, 一般社団法人 日本建築学会
4. 石田敏明, 平塚市開発審査会 審査委員, 平塚市
5. 傳法谷郁乃 (取材協力), 『現場の最強! 熱中症対策「ファン付き作業服」』田中英登監修, 株式会社エクスナレッジ (2020.7).

6. 内田青蔵, 書評—“歴史”を“文化”として再現する都市づくり, 週刊読書人 (2020.7.3).
7. 内田青蔵, 書評—都市型住宅の新たな構築の時代へ, 週刊読書人 (2020.1.3).
8. 内田青蔵, 住まいの建築史, 週刊新潮, 109-150 (2019.10.3-2020.7.30).
9. 内田青蔵, 応接室—社会や近隣との交流のため, 読売新聞 (2019.7.19.夕刊)
10. 内田青蔵, 百年名家—明治学院, BS 朝日 (2020.3.8).
11. 内田青蔵, 百年名家—榎尾俊雄発明記念館, BS 朝日 (2020.5.3).
12. 内田青蔵, 百年名家—哲学堂公園, BS 朝日 (2020.5.17).
13. 内田青蔵, 百年名家—軽井沢・レーモンドの建築, (2020.6.17).
14. 内田青蔵, 百年名家—旧山口萬吉邸, (2020.8.30).
15. 内田青蔵, 百年名家—旧西村伊作邸, (2020.8.30).
16. 須崎文代, 共同キッチンの先駆者たち, LIXIL「パブリックフロントランナーズ」, (2020.1.30).
17. 須崎文代, 住むための衛生の軌跡, 「これからの社会、これからの住まい」LIXIL マーケティング事業本部, (2020.6.30).
18. 須崎文代, ドメスティック・ディスタンス—人間のふるまい(Human Behavior)と衛生の尺度, 建築討論 046 号特集「距離のポリティクス——感染症と建築学の交点」, 日本建築学会 (建築作品小委員会), (2020.8.1).
19. 中井邦夫研究室、研究室紹介、「第17回 JIA 関東甲信越支部 大学院修士設計展」、総合資格、216-217 (2020.02)
20. 鉄構技術 Human, Vol.33, pp.9, 2020.7

## 数学教室

### 研究論文I (レフェリー付き論文)

1. P. Colli, M. H. Farshbaf-Shaker, K. Shirakawa, and N. Yamazaki, Optimal control for shape memory alloys of the one-dimensional Frémond model, Numerical Functional Analysis and Optimization, 41 (2020), 1421--1471.
2. K. Koshino, The space consisting of uniformly continuous functions on a metric measure space with the  $L_p$  norm, Topology and its Application, 282, 107303, 2020.
3. Y. Hitaya and Y. Yajima, Undecidability of the cardinality of  $C^*$ -embedded discrete subsets in products of natural numbers, Topology Proc. 56, 85-95 (2020).
4. Y. Hirata and N. Kemoto, A characterization of paracompactness of lexicographic products, Topology Proc. 56, 219-236 (2020).
5. Y. Hirata and Y. Yajima, A characterization of the countable paracompactness for products of ordinals, Topology Appl. 282, 107325, 10 pp (2020).
6. Y. Hirata and Y. Yajima,  $C^*$ -,  $C$ - and  $P$ -embedded subsets in products and the undecidability of a certain property on  $\aleph_1$ , Topology Appl. 283, 107350, 16 pp (2020).
7. T. Suzuki, Semilinear Schrödinger equations with a potential of some critical inverse-square type, J. Differ. Equ., 268 (12), 7629-7668 (2020).
8. R. Farwig, Y. Giga and P.-Y. Hsu, On the continuity of the solutions to the Navier-Stokes equations with initial data in critical Besov spaces, Annali di Matematica Pura ed Applicata, 198 (5), 1495-1511 (2019).
9. Y. Giga, Z. Gu and P.-Y. Hsu, Continuous alignment of vorticity direction prevents the blow-up of the Navier-Stokes flow under



the no-slip boundary condition, *Nonlinear Analysis*, 189, 111579 (2019).

## 口頭発表

1. 山崎教昭, 剣持信幸, 白川健, Control of parameter-dependent evolution equations governed by time-dependent subdifferentials, 日本数学会 2020 年度秋季総合分科会, 2020 年 9 月.
2. K. Koshino, Characterizing infinite-dimensional manifolds by general position properties, The 3rd Pan-Pacific International Conference on Topology and Applications, 48 (Chengdu, People's Republic of China, 2019, 11).
3. 越野克久, The space of uniformly continuous functions with the  $L_p$  norm, General Topology Symposium (大分, 2019, 12).
4. K. Koshino, Characterizing topological manifolds modeled on absorbing sets in Hilbert spaces by the discrete cells property, The Conference on Geometric Topology and Related Topics, 17 (Mazatlan, Mexico, 2019, 12).
5. 越野克久, The topological type of a function space on a metric measure space with the  $L_p$  norm, 日本数学会 2020 年度秋季総合分科会, トポロジー21 (オンライン, 2020, 9).
6. 嶺幸太郎, ペアノ連続体は連結である, 2019 年度ジェネラルトポロジーシンポジウム, 大分, 2019, 12.
7. 伊藤秀一, 可積分系の剛性とバーコフ標準形をめぐって, 第7回「ハミルトン系とその周辺」研究集会, 京都大学(2019. 12.19)
8. 鈴木敏行, Nonlinear Schrödinger equations with an inverse-square potential and a repulsive harmonic oscillator, 日本数学会 2020 年度年会, 日本大学, 2020.3.

## 学術誌

1. 平田康史, 矢島幸信, 順序数の積空間の閉長方形の  $C^*$ -embedding, 数理解析研究所講究録 2151 一般位相幾何学の発展と諸分野との連携, 40-46 (2020).
2. 伊藤秀一, 三体問題と摂動論, 数学セミナー 59 (1), 28-32 (2020).

## 著書

1. 嶺幸太郎, 数学の定義はどうやって覚えるの?, 数学セミナー2020 年 4 月号, 日本評論社, 15-19 (2020).

## 講演・展示会

1. P.-Y. Hsu, Continuous alignment of vorticity direction prevents the blow-up of the Navier-Stokes flow under the no-slip boundary condition, UTokyo-NTU Joint Symposium in Mathematics (Tokyo, 2019. 12).

## 助成金

1. 山崎教昭 (代表), 仮似変分発展方程式と特異最適制御問題の新展開と構造解析, 令和 2 年度科学研究費補助金, 基盤研究 (C), 課題番号 20K03665.
2. 平田康史 (代表), 単調正規空間の積における  $C^*$ -,  $C$ -,  $P$ -埋め込みの研究, 平成 31 年度科学研究費補助金, 基盤研究 (C), 課題番号 19K03606.
3. 伊藤秀一 (代表), 標準形理論による可積分系の剛性と大域

構造の解析, 令和 1 年度科学研究費補助金, 基盤研究 (C), 課題番号 16K05173

4. 伊藤秀一 (分担), 多様な数値モデルに対する力学系理論の新展開, 令和 1, 2 年度科学研究費補助金, 基盤研究 (B), 課題番号 17H02859
5. 許本源 (代表), 実解析と数値計算の手法による流体運動の振る舞いの解明及び数学理論の構築, 令和 1 年度科学研究費補助金, 研究活動スタート支援, 課題番号 19K23398.

## 物理学教室

### 研究論文I (レフェリー付き論文)

1. O. Adriani, E. Berti, L. Bonechi, M. Bongi, R. D'Alessandro, S. Detti, M. Haguenaue, Y. Itow, K. Kasahara, H. Menjo, Y. Muraki, K. Ohashi, P. Papini, S. Ricciarini, T. Sako, N. Sakurai, K. Sato, T. Tamura, A. Tiberio, S. Torii, A. Tricomi, W.C. Turner and M. Ueno, Measurement of energy flow, cross section and average inelasticity of forward neutrons produced in  $\sqrt{s} = 13$  TeV proton-proton collisions with the LHCf Arm2 detector, *Journal of High Energy Physics*, 07 (16), 1-20 (2020.7).
2. R.U. Abbasi, K. Hibino, D. Ikeda, F. Kakimoto, S. Udo, et al., "Search for point sources of ultra-high energy photons with the Telescope Array surface detector", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 492, 3, pp.3984-3993 (2020.02).
3. R.U. Abbasi, K. Hibino, D. Ikeda, F. Kakimoto, S. Udo, et al., "ПОИСК НЕЙТРИНО УЛЬТРАВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ ПО ДАННЫМ НАЗЕМНОЙ РЕШЕТКИ ЭКСПЕРИМЕНТА TELESCOPE ARRAY", *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, vol.158(8(2)), pp.282-294, (2020.08)
4. R.U. Abbasi, K. Hibino, D. Ikeda, F. Kakimoto, S. Udo, et al., "Search for a large-scale anisotropy on arrival directions of ultrahigh-energy cosmic rays observed with the Telescope Array Experiment", *The Astrophysical Journal Letters*, 898:L28, (2020.07)
5. R.U. Abbasi, K. Hibino, D. Ikeda, F. Kakimoto, S. Udo, et al., "Evidence for a Supergalactic Structure of Magnetic Deflection Multiplets of Ultra-High Energy Cosmic Rays", *The Astrophysical Journal*, 899:86, (2020.08)
6. R.U. Abbasi, K. Hibino, D. Ikeda, F. Kakimoto, S. Udo, et al., "Measurement of the proton-air cross section with Telescope Array's Black Rock Mesa and Long Ridge fluorescence detectors, and surface array in hybrid mode", *Physical Review*, D102, 062004, (2020.08)
7. M. Sasaki, An Efficient Monte Carlo Method to Make a Geometric Graph with a Fixed Connectivity, *Journal of the Physical Society of Japan* (80), 104006-1-11 (2020).
8. F. Rogers, S. Boggs, Y. Shimizu et al., Large-area Si(Li) detectors for X-ray spectrometry and particle tracking in the GAPS experiment, *Journal of Instrumentation*, 14, P10009 (2019).
9. M. Kozai, N. Madden, Y. Shimizu et al., Developing a mass-production model of large-area Si(Li) detectors with high operating temperatures, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 947, 162695, 1-10 (2019).
10. D. Hayashi, Y. Nakai, H. Kyakuno, Y. Miyata, K. Yanagi, Y. Maniwa, Temperature dependence of the Seebeck coefficient for mixed semiconducting and metallic single-wall carbon nanotube bundles, *Applied Physics Express*, 13 (1), 015001, (2019).



11. S. Takekawa, T. Oka, Y. Iwata, S. Tsujimoto and M. Nomura, The Fifth Candidate for an Intermediate-mass Black Hole in the Galactic Center, *The Astrophysical Journal*, 890, 167-172 (2020).
12. Y. Iwata, T. Oka, M. Tsuboi, M. Miyoshi and S. Takekawa, Time Variations in the Flux Density of Sgr A\* at 230 GHz Detected with ALMA, *The Astrophysical Journal Letters*, 892, 30-36 (2020)
13. F. Chibana, R. Kimura, M. Yamaguchi, D. Yamauchi and S. Yokoyama, Redshift space distortions in the presence of non-minimally coupled dark matter, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 10, 045 (2019).
14. R.U. Abbasi et al., Поиск нейтрино ультравысоких энергий по данным наземной решетки эксперимента Telescope Array, *ЖЭТФ*, 158, 282-294 (2020)
15. R. U. Abbasi, et al., Search for point sources of ultra-high-energy photons with the Telescope Array surface detector, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 492, 3984-3993 (2020)
16. R. U. Abbasi, et al., Search for Large-scale Anisotropy on Arrival Directions of Ultra-high-energy Cosmic Rays Observed with the Telescope Array Experiment, *The Astrophysical Journal Lett.* 898 L28 (5pp), (2020)
17. R. U. Abbasi et al., Measurement of the proton-air cross section with Telescope Array's Black Rock Mesa and Long Ridge fluorescence detectors, and surface array in hybrid mode, *Phys. Rev. D* 102, 062004 (13pp), (2020)
18. R.U. Abbasi et al., Search for Ultra-High-Energy Neutrinos with the Telescope Array Surface Detector, *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 131, 255-264 (2020)
19. R.U. Abbasi et al., Evidence for a Supergalactic Structure of Magnetic Deflection Multiplets of Ultra-high-energy Cosmic Rays, *The Astrophysical Journal*, 899:86 (13pp), (2020)
- 発表)
3. 鳥居祥二, 赤池陽水, 小林兼好, 浅岡陽一, 田村忠久, 森正樹, 浅野勝晃, 福家英之, 日比野欣也, 市村雅一, 笠原克昌, 片岡龍峰, 片寄祐作, 加藤千尋, 川久保雄太, 三宅晶子, MOTZ Holger, 宗像一起, 中平聡志, 奥野祥二, 小澤俊介, 坂本貴紀, 清水雄輝, 塩見晶司, 寺澤敏夫, 常定芳基, 山岡和貴, 柳田昭平, 吉田篤正, 吉田健二, 他 CALET チーム, CALET による 5 年間の軌道上観測の最新成果, 日本物理学会 2020 年秋季大会, 15aSN-1 (Zoom, 2020. 9).
4. 田村忠久, 鳥居祥二, 赤池陽水, 小林兼好, 浅岡陽一, 森正樹, 川久保雄太, MOTZ Holger, 他 CALET チーム, CALET による観測の進展状況と運用の概要報告, 日本物理学会 2020 年秋季大会, 15aSN-2 (Zoom, 2020. 9).
5. 毛受弘彰, 伊藤好孝, 大橋健, 佐藤健太, 松原豊, 村木綏, さこ隆志, 吉田健二, 笠原克昌, 鳥居祥二, 清水雄輝, 田村忠久, 櫻井信之, O. Adriani, E. Berti, L. Bonechi, M. Bongi, G. Catellini, R. D'Alessandro, M. Haguenaue, P. Papini, S. Ricciarini, A. Tiberio, A. Tricomi, W. C. Turner, LHCf 実験の次期測定計画とその準備状況, 日本物理学会 2020 年秋季大会, 14pSN-4 (Zoom, 2020. 9).
6. 木戸英治, 池田大輔, 有働慈治, 垣本史雄, 日比野欣也, 他, TA 実験 332:TAx4 実験全体報告 6, 日本物理学会第 75 回年次大会(2020 年) (名古屋大 3/16-19), 2020
7. 田上裕太, 有働慈治, 他, TA 実験 333 : TALE 実験全体報告 5, 日本物理学会第 75 回年次大会(2020 年) (名古屋大 3/16-19), 2020
8. 佐野賢吾, 池田大輔, 他, TA 実験 334 : UAV 搭載型光源による大気蛍光望遠鏡の視野方向解析, 日本物理学会第 75 回年次大会(2020 年) (名古屋大 3/16-19), 2020
9. 山崎勝也, 多米田裕一郎, 小越友理菜, 貝野裕紀, 富田孝幸, 山本真周, 岩倉広和, 中村雄也, 池田大輔, CRAFT 実験 8:完全自律自動観測システムを用いたステレオ観測の準備状況, 日本物理学会第 75 回年次大会(2020 年) (名古屋大 3/16-19), 2020
10. 日比野欣也, 有働慈治, 他, Tibet 空気シャワー観測装置による 100TeV 領域ガンマ線点源からのパルサー信号の探索 (2), 日本物理学会第 75 回年次大会(2020 年) (名古屋大 3/16-19), 2020
11. 川田和正, 日比野欣也, 他, 有働慈治, Tibet 空気シャワー観測装置による銀河面からの超高エネルギー拡散ガンマ線の探索, 日本物理学会第 75 回年次大会(2020 年) (名古屋大 3/16-19), 2020
12. 横江諄衛, 日比野欣也, 有働慈治, 他, ALPACA 実験 15 : ALPAQUITA 進捗状況 6, 日本物理学会第 75 回年次大会 (2020 年) (名古屋大 3/16-19), 2020
13. 加藤勢, 日比野欣也, 有働慈治, 他, ALPACA 実験 16 : ALPAQUITA 実験の性能評価シミュレーション 4, 日本物理学会第 75 回年次大会(2020 年) (名古屋大 3/16-19), 2020
14. 中田大樹, 大西宗博, 片寄祐作, 佐古崇志, 塩見昌司, 千石由佳子, 日比野欣也, 水チェレンコフ光検出器を用いた空気シャワー観測装置性能向上手法の研究 3, 日本物理学会第 75 回年次大会(2020 年) (名古屋大 3/16-19), 2020
15. 佐古崇志, 日比野欣也, 有働慈治, 他, チベット実験で観測された宇宙線異方性の太陽圏磁場による変調(1), 日本物理学会第 75 回年次大会(2020 年) (名古屋大 3/16-19), 2020
16. 鷹野和紀子, 日比野欣也, カメラ用イメージセンサーを使った超高エネルギー宇宙線の観測, 日本物理学会第 75 回年次大会(2020 年) (名古屋大 3/16-19), 2020
17. 木戸英治, 池田大輔, 有働慈治, 垣本史雄, 日比野欣也, 他, TA 実験 340 : TAx4 実験全体報告 7, 日本物理学会秋

## 研究論文II (レフェリー付き Proceedings)

1. T. Wada, H. Fuke, Y. Shimizu and T. Yoshida, Application of Machine Learning to the Particle Identification of GAPS, *Transactions of the Japan society for aeronautical and space sciences, space technology Japan* 18 (3), 44-50 (2020).
2. D. Ikeda, Y. Tameda, T. Tomida, K. Yamazaki, M. Yamamoto, H. Iwakura, Y. Nakamura and Y. Kaino, Current status and future prospects of the CRAFT project for the next generation UHECR observatory, *Journal of Physics: Conference Series*, 1468, 012079, (2020.03)

## 口頭発表

1. 鳥居祥二, 赤池陽水, 小林兼好, 浅岡陽一, 田村忠久, 森正樹, 浅野勝晃, 福家英之, 日比野欣也, 市村雅一, 笠原克昌, 片岡龍峰, 片寄祐作, 加藤千尋, 川久保雄太, 三宅晶子, MOTZ Holger, 宗像一起, 中平聡志, 奥野祥二, 小澤俊介, 坂本貴紀, 清水雄輝, 塩見晶司, 寺澤敏夫, 常定芳基, 山岡和貴, 柳田昭平, 吉田篤正, 吉田健二, 他 CALET チーム, CALET による 4.5 年間の軌道上観測の最新成果, 日本物理学会第 75 回年次大会, 名古屋大学東山キャンパス (Web 発表)
2. 浅岡陽一, 鳥居祥二, 田村忠久 A, 森正樹 B, 他 CALET チーム, CALET : 4 年半にわたる軌道上運用のまとめ, 日本物理学会第 75 回年次大会, 名古屋大学東山キャンパス (Web

- 季大会(2020 年) (オンライン開催 9/14-17), 2020
18. 佐藤光希, 有働慈治, 他, TA 実験 343 : TALE-SD によるエネルギー決定精度の評価, 日本物理学会秋季大会(2020 年) (オンライン開催 9/14-17), 2020
  19. 藤田慧太郎, 有働慈治, 池田大輔, 他, TA 実験 348 : TALE 実験大気蛍光望遠鏡を用いた単眼観測によるデータの解析, 日本物理学会秋季大会(2020 年)(オンライン開催 9/14-17), 2020
  20. 中澤新, 池田大輔, 他, TA 実験 350 : UAV 搭載型光源による大気蛍光望遠鏡の視野方向解析, 日本物理学会秋季大会(2020 年) (オンライン開催 9/14-17), 2020
  21. 窪田悠人, 富田孝幸, 中村雄也, 多米田裕一郎, 鍵谷鷹, 柴田規迪, 池田大輔, 山崎勝也, CRAFT 実験 9 : 空気シャワー再構成精度向上のための検出部の検討, 日本物理学会秋季大会(2020 年) (オンライン開催 9/14-17), 2020
  22. 池田大輔, 武多昭道, 山崎勝也, 小村健太郎, ボアホール内ミュオン検出器を用いた地下ミュオン観測 3, 日本物理学会秋季大会(2020 年) (オンライン開催 9/14-17), 2020
  23. 鷹野和紀子, 日比野欣也, CMOS カメライメージセンサーを使った超高エネルギー宇宙線空気シャワーコアの観測, 日本物理学会秋季大会(2020 年)(オンライン開催 9/14-17), 2020
  24. 倉茂大智, 日比野欣也, 有働慈治, 他, Tibet-III と MD を用いた knee 領域の陽子スペクトル測定法, 日本物理学会秋季大会(2020 年) (オンライン開催 9/14-17), 2020
  25. 横江誼衡, 日比野欣也, 有働慈治, 他, ALPACA 実験 17 : ALPAQUITA 進捗状況 7, 日本物理学会秋季大会(2020 年) (オンライン開催 9/14-17), 2020
  26. 加藤勢, 日比野欣也, 有働慈治, 他, ALPACA 実験 18 : ALPAQUITA 実験の性能評価シミュレーション 5, 日本物理学会秋季大会(2020 年) (オンライン開催 9/14-17), 2020
  27. 中田大樹, 塩見昌司, 日比野欣也, 片寄祐作, 大西宗博, 佐古崇志, 水チェレンコフ光検出器を用いた空気シャワー観測装置性能向上手法の研究 4, 日本物理学会秋季大会(2020 年) (オンライン開催 9/14-17), 2020
  28. 佐古崇志, 日比野欣也, 有働慈治, 他, チベット実験で観測された宇宙線異方性の太陽圏磁場による変調 (2), 日本物理学会秋季大会(2020 年) (オンライン開催 9/14-17), 2020
  29. 和田拓也, 小財正義, 清水雄輝, 中上裕輔, 福家英之, 吉田哲也, ニューラルネットワークを用いた GAPS 用粒子識別法の開発, 第 20 回宇宙科学シンポジウム (宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所, 2020. 1)
  30. 福家英之, 小財正義, 小川博之, 岡崎峻, 西城大, 徳永翔, 山谷昌大, 吉田哲也, 中上裕輔, 和田拓也, 吉田篤正, 清水雄輝, 山田昇, 小池貴久, 加藤千尋, 宗像一起, 永井大樹, 今西優香, 河内明子, 小林聖平, 本木誠人, 奈良祥太郎, 高橋俊, 竹村薫, 井上剛良, C.J. Hailey, K. Perez, L. Fabris, W. Craig, R. Ong, S. Boggs, P.v. Doetinchem, M. Boezio, 宇宙線反粒子探索 GAPS 実験計画の現状報告, 日本物理学会 2020 年秋季大会 (オンライン開催, 2020. 9)
  31. 小財正義, 徳永翔, 福家英之, T. Erjavec, C.J. Hailey, 加藤千尋, N. Madden, 宗像一起, K. Perez, F. Rogers, N. Saffold, 清水雄輝, M. Xiao, 宇宙線反粒子探索 GAPS 実験用リチウムドリフト型シリコン検出器の開発, 日本物理学会 2020 年秋季大会 (オンライン開催, 2020. 9)
  32. 中上裕輔, 和田拓也, 小財正義, 清水雄輝, 福家英之, 山谷昌大, 吉田篤正, 吉田哲也, GAPS における量み込みニューラルネットワークを用いた粒子識別法の開発, 日本物理学会 2020 年秋季大会 (オンライン開催, 2020. 9)
  33. 客野遥, 小倉宏斗, 松田和之, 真庭豊, 一次元リボン状氷のプロトン輸送, 日本物理学会第 75 回年次大会, 17pE25-2, (愛知, 2020.3).
  34. S. Takekawa, T. Oka, Y. Iwata, S. Tsujimoto and M. Nomura, Intermediate-mass black hole candidates in the Galactic center, Galactic Center Workshop 2019 —New Horizons in Galactic Center Astronomy and Beyond (Yokohama, 2019.10).
  35. S. Takekawa, High frequency studies of the Galactic center, East Asian ALMA Development Workshop 2019 (Tokyo, 2019.12).
  36. S. Takekawa, T. Oka, Y. Iwata, Y. Watanabe, R. Nakagawara, H. Yokozuka, A. Uruno, T. Hasegawa, K. Torii and M. Tsuboi, Report from Large program 2: Galactic center, ALMA/45m/ASTE Users Meeting 2019 (Tokyo, 2019.12).
  37. S. Takekawa, T. Oka, Y. Iwata, S. Tsujimoto and M. Nomura, ALMA views of high-velocity compact clouds in the Galactic center, East Asian ALMA Science Workshop 2019 (Taipei, 2020.2).
  38. 竹川俊也, 銀河系中心領域における中間質量ブラックホールの探査, ngVLA SWG5 オンライン会合 (オンライン開催, 2020.5)
  39. 竹川俊也, 辻元志保, 岡 朋治, 岩田悠平, 横塚弘樹, 渡邊裕人, 中川原峻介, 宇留野麻香, 西山苑実, 金子美由起, 長谷川哲夫, 坪井昌人, 野辺山 45m 鏡による銀河系中心分子層の全面イメージング観測, Nobeyama Science Workshop 2020 (オンライン開催, 2020.9).

## 著書

1. 田村忠久, 工学系の基礎力学 —公式の意味を知る—, 裳華房 (2019.10).
2. 日本 Square Kilometre Array コンソーシアム科学検討班(山内大介他), 日本版 Square Kilometre Array サイエンスブック 2020, (2020).

## 講演・展示会

1. 宇佐見義之, カンブリア紀の生物進化, 江戸川区子ども未来館講演会(東京,2020.8).
2. D. Yamauchi, Constraining primordial non-Gaussianity with future galaxy surveys, 招待講演, Theoretical aspects of non-Gaussianity from modern perspectives (京都, 2019. 11)
3. 山内大介, SKA cosmology, 招待講演, 第 8 回観測的宇宙論ワークショップ (宮城, 2019. 12)
4. 山内大介, 宇宙大規模構造を使った重力理論の検証, 招待講演, Testing Gravity THxOBS Japan キックオフミーティング (オンライン, 2020. 8)
5. 山内大介, 横山修一郎, 高橋智, Constraining scale-dependent primordial non-Gaussianity from galaxy power and bispectrum, 日本物理学 2020 年度会秋季大会 (オンライン, 2020. 9)
6. 竹川俊也, 銀河系中心と僕, 2020 年度第 50 回天文・天体物理若手夏の学校 (オンライン開催, 2020. 8).

## 助成金

1. 田村忠久 (分担), CALET 長期観測による銀河宇宙線の起源解明と暗黒物質探索, 令和二年度科学研究費補助金, 基盤研究 (S), 課題番号 19H05608.
2. 松田和之 (代表), 炭素ナノ空洞を利用した極性分子の配列・配向制御による極微小誘電体の作製と物性解明, 2020 年度科学研究費補助金, 基盤研究 (C), 課題番号 18K04894.
3. 松田和之 (分担), 隙間水が関与した摩擦現象と隙間水の流

体現象の研究, 2020 年度科学研究費補助金, 基盤研究 (C), 課題番号 19K05198.

- 清水雄輝 (代表), 南極周回気球実験による宇宙線反重粒子探索, 令和 2 年度科学研究費補助金, 基盤研究 (C), 課題番号 20K04002.
- 客野遥 (代表), 1 次元リボン状氷の構造と物性: 楕円筒形カーボンナノチューブを用いた研究, 令和 2 年度科学研究費補助金, 若手研究, 課題番号 18K13518.
- 有働慈治 (代表), TA 実験サイトにおける大気透明度測定法の研究・開発, 2020 年度 東京大学宇宙線研究所 共同利用研究
- 日比野欣也 (分担), アンデス高地の新しい宇宙線観測装置による PeV 粒子加速天体の探索, 令和元年度科学研究費補助金, 基盤研究 (A), 19H00678.
- 日比野欣也 (代表), 有働慈治 (分担), アンデス高原における雷雲からの高エネルギー放射線の研究, 2019 年度東京大学宇宙線研究所共同利用研究.
- 日比野欣也 (分担), 有働慈治 (分担), 乗鞍岳における雷雲に伴う二次宇宙線の研究, 2019 年度東京大学宇宙線研究所共同利用研究.
- 日比野欣也 (代表), 神奈川大学科研費申請奨励研究費.
- 山内大介 (代表), 宇宙ひもの精密測定による初期宇宙モデルの検証, 平成 29 年度科学研究費補助金, 若手研究 (B), 課題番号 17K14304.
- 山内大介 (分担), 超精密観測時代における次世代相対論的宇宙論の構築, 平成 31 年度科学研究費補助金, 基盤研究 (B), 課題番号 19K01891.
- 竹川俊也 (代表), 高速度分子雲に着目した銀河系中心領域に潜む中間質量ブラックホールの探査, 2020 年度科学研究費補助金, 若手研究, 課題番号 19K14768.
- 竹川俊也 (分担), サブミリ波観測に基づく銀河系内ミッシング・ブラックホールの探査, 2020 年度科学研究費補助金, 基盤研究 (A), 課題番号 20H00178.

## 受託研究

- 竹川俊也, 野辺山 45m 鏡による銀河系中心特異分子雲の理解, 国立天文台(大学支援経費).

## 海外出張

- 田村忠久, 研究打合せ CALET TIM, University of Florence INFN, ITALY (2020.2).

## その他

- 宇佐見義之, 特別展生物の進化と恐竜ワールド展示, 8/7-9/22, 山口県立山口博物館
- 宇佐見義之, 中生代白亜紀の展示 (常設, 及び 2019 年より youtube 展示), 北海道むかわ町博物館

# 化学教室

## 研究論文I (レフェリー付き論文)

- A. Tsuruoka, A. Takahashi, D. Aoki, and H. Otsuka, Fusion of different cross-linked polymers based on dynamic disulfide exchange, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 59, 4269–4273 (2020)
- H. Xu, N. Suzuki, A. Takahashi, T. Ohishi, R. Goseki, X.-M. Xie,

and H. Otsuka, Structural reorganization and crack-healing properties of hydrogels based on dynamic diselenide linkages, *Sci. Technol. Adv. Mater.*, 21, 450–460 (2020).

- A. Takahashi, S. Tsunoda, R. Yuzaki, and A. Kameyama, Thioacyl-transfer ring-expansion polymerization of thiiranes based on a cyclic dithiocarbamate initiator, *Macromolecules*, 53, 5227–5236 (2020).
- M. Aiba, A. Takahashi, H. Otsuka, et al. Use of bis(2,2,6,6-tetramethylpiperidin-1-yl)trisulfide as a dynamic covalent bond for thermally healable cross-linked polymer networks, *ACS Appl. Polym. Mater.*, 2, 4054–4061 (2020).
- I. Iwakura, K. K.-Orisaku, S. Hashimoto, S. Akai, K. Kimura and A. Yabushita, Formation of thioglucoside single crystals by coherent molecular vibrational excitation using a 10-fs laser pulse, *Communications Chemistry*, 3, 35 (2020).
- N. Nakashima, T. Yatsushashi, K. Sakota, I. Iwakura, S. Hashimoto, K. Yokoyama and S. Matsuda, An electron-capture efficiency in femtosecond filamentation, *Chemical Physics Letters*, 752, 137570 (2020).

## 口頭発表

- A. Takahashi, K. Kishimoto, H. Morii, A. Kameyama, Serine-containing oligopeptides of 6 amino-acid residues show self-assembly based on antiparallel  $\beta$ -sheet, The 56th Japanese peptide symposium, P-004 (Tokyo, 2019. 10).
- T. Sugiyama, T. Koito, M. Yamanobe, A. Takahashi, Y. Ishida, A. Kameyama, Core-shell micelle formation of amphiphilic block copolymer with poly(4-vinyl benzoic acid) core, OKINAWA COLLOIDS 2019, PT01-15 (Okinawa, 2019. 11).
- A. Takahashi, T. Hoshino, K. Tsuchiya A. Kameyama, Core-shell micelle with outer POSS shell based on POSS-containing random methacrylate copolymer, OKINAWA COLLOIDS 2019, PT01-16 (Okinawa, 2019. 11).
- 高橋 明, 王 文瑞, 亀山 敦, ホウ酸類を原料とした安定ポレートエステル類およびポリマー誘導体の開発, 第 69 回高分子学会年次大会, 3Pd104 (福岡, 2020. 5) .
- 織作恵子, 田中政孝, 岩倉いずみ, アルカリ土類金属アクア錯体を用いた 4,4'-bispyridylethene の触媒的固相光環化付加反応, 第 78 回有機合成化学協会関東支部シンポジウム, B02 (新潟, 2019. 11).
- 橋本征奈, 簗下篤史, 岡村幸太郎, 岩倉いずみ, 紫外 5-fs パルス光の安定化と振動実時間分光, 日本化学会第 100 春季年会, 2PC-044 (千葉, 2020. 3).
- 橋本征奈, 岡村幸太郎, 簗下篤史, 小林孝嘉, 岩倉いずみ, 広帯域光源の安定化と脱保護反応機構解析, 2020 年光化学討論会, 3P120 (オンライン, 2020. 9).

## 学術誌

- A. Takahashi, K. Kishimoto, H. Morii, A. Kameyama, Serine-containing oligopeptides of 6 amino-acid residues show self-assembly based on antiparallel  $\beta$ -sheet, *Peptide Science* 2019, 39–40.
- 高橋 明, キシリレン構造を有する芳香族ポリウレタンの光フリース転位と屈折率増加, ポリイミド・芳香族系高分子 最近の進歩 2020 年, 36–43 (2020).
- 岩倉いずみ, フェムト秒レーザーによる分子間反応の可視化に挑戦, *OPTRONICS*, 464, 98–102 (2020).



## 講演・展示会

1. 高橋 明, 芳香族ポリウレタン主鎖における光フリース転位と屈折率変化, 第 27 回日本ポリイミド・芳香族系高分子会議 (東京, 2019. 11).
2. 高橋 明, ヘテロ元素の個性に立脚した脂肪族分子の機能開拓, 関東高分子若手研究会サマーキャンプ 2020 (オンライン, 2020. 8).

## 助成金

1. 高橋 明 (代表), 活性な空軌道を持つカゴ型ボレートに基づく多様な結合の構築と高分子機能への展開, 平成 30 年度科学研究費補助金, 若手研究, 課題番号 19K15639.
2. 岩倉いづみ(代表), 超高速分光による分子間光反応過程の直接観測と機構解明, 東レ科学振興会 第 57 回東レ科学技術研究助成金.
3. 岩倉いづみ(代表), パルスレーザー分光による反応機構解析と合成反応への応用, 神奈川大学共同研究奨励助成金.
4. 岩倉いづみ(代表), 可視 5 フェムト秒パルス光を用いる“分子間熱反応遷移過程”の直接観測と機構解明, 平成 30 年度科学研究費補助金, 基盤研究 (B) .
5. 岩倉いづみ(代表), 5 フェムト秒パルスレーザー光による光圧昇華結晶化システム開発, 公益財団法人 JKA 機械振興補助事業 研究補助 複数年研究.
6. 橋本征奈(代表), 光反応遷移状態計測のコンピュータ制御システム開発, 公益財団法人 JKA 機械振興補助事業 研究補助 若手研究.
7. 橋本征奈(代表), ダブルピーク型 5-fs パルス光発生による分子振動位相を揃えた選択励起手法の開発, 平成 31 年度科学研究費補助金, 若手研究.
8. 岩倉いづみ(代表), 光反応とも熱反応とも異なるコヒーレント分子振動励起反応を利用する新反応開発, 平成 31 年度科学研究費補助金, 挑戦的研究 (萌芽) .

## 生物学教室

### 口頭発表

1. 近藤恵都, 丹羽凌介, 菊地理絵, 朝倉史明, 植物組織培養を題材として生命の不思議を体感する理科実験プログラムの開発, 日本生物教育学会 第 104 回全国大会, 研究発表要旨集, 48 (旭川, 2020. 1).
2. 小名大地, 西村亜美, 菊地理絵, 朝倉史明, 初めてでも環境 DNA を検出することはできるか, 日本生物教育学会 第 104 回全国大会, 研究発表要旨集, 57 (旭川, 2020. 1).

## 助成金

1. 中川理絵 (代表) トマトの花成におけるオーキシンの役割と花成調節技術への応用, 平成 30 年度科学研究費補助金, 基盤研究 (C)、課題番号 18K05630
2. 中川理絵 (代表) 2019 年度神奈川大学共同研究奨励助成金, 「生合成阻害剤および作動薬を用いるインドール酪酸 (IBA) 周辺科学の新機軸の導入」(2019～2021 年度)



# 【2】 講演会開催記録

(2019年10月1日より2020年9月30日までの講演会について記す)

## 学科・教室開催講演会

### 機械工学科

演題：宇宙産業の現状と宇宙のモノづくり

講師：山口 耕司（有限会社オービタルエンジニアリング 取締役社長）

日時：2019年11月27日（水） 17:10～18:50

場所：神奈川大学 横浜キャンパス 23号館 205室

講演要旨：以下の項目について紹介した。

- ・宇宙産業の状況について：産業界での宇宙産業の位置づけと、最近の宇宙ビジネスの紹介
- ・宇宙でのモノづくり：ほどよしプロジェクトでの超小型衛星開発における信頼性とモノづくりの考え方等について紹介
- ・IoTと宇宙：長距離低電力無線（LPWA）技術をつかったIoTの防災への利用と宇宙利用についての紹介
- ・先端技術開発の紹介：現在開発中の先端技術についての紹介

### 物質生命化学科

演題：Some Recent Developments in Metal Catalyzed Organic Reactions

講師：Kamal M. Dawood, Chemistry Department, Faculty of Science, Cairo University, Giza, Egypt

日時：2019年10月16日（水）16時30分から18時00分

場所：23号館 527号室

講演要旨：Modern synthetic chemistry is sustained by the use of transition-metal catalysts as powerful tools for carbon-carbon bond forming processes in academic and industrial research. Microwave irradiation, solid-phase assistance and water solvent are expected to offer “greener approaches” to organic synthesis. In this presentation, a remarkable catalytic activity of several oxime-based palladium(II)-complexes as pre-catalysts in the Suzuki, Heck and Sonogashira cross-coupling reactions of various activated and deactivated aryl and heteroaryl halides in water under thermal heating as well as microwave irradiation conditions will be introduced along with the optimization of the catalytic activity of these pre-catalysts which is highly important for mass production in industrial scales. In addition, a so-called ring-closing metathesis (RCM) of sulfonates having two terminal double bonds in the presence of Grubb’s II catalyst, which forms unsaturated six-, seven- and eight-membered unsaturated sultone rings, will be also demonstrated based on the assignment of some domino reactions of these sultones.

演題：先進機能材料の研究進展

講師：Wu Jianfei, Qingdao Institute of Bioenergy and Bioprocess Technology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, China

日時：2019年12月5日（木）16時30分から18時00分

場所：23号館 311号室

講演要旨：武教授は、近年、天然材料をリチウムイオン二次電池などへ適用する研究を精力的に行ってきた。本講演では、“先進機能材料の研究進展”と題して、近年の成果をトピックス的に紹介いただいた。また、中国・韓国での電池研究に関するものも紹介いただいた。

演題：多孔性イオン結晶の合成・構造と分子やイオンの吸着・輸送・変換機能

講師：内田 さやか（東京大学大学院 総合文化研究科 准教授）

日時：2019年10月4日（金） 17:10～18:10

場所：神奈川大学 横浜キャンパス 23号館 303室

講演要旨：一般にイオン結晶（例：NaCl）は対称性が高く密な構造をとるが、イオン結晶の構成ブロックとして、ポリオキソメタレート等のナノサイズの分子性イオンを用いると、官能基に応じて様々な結合を活用できることから、細孔構造が構築される。本講演では、分子性イオンと細孔構造の特徴を生かした、分子やイオンの吸着・輸送・変換機能について紹介いただいた。

### 建築学科

演題：創造と学びと空間

講師：小堀 哲夫（株式会社 小堀哲夫建築設計事務所）

日時：2019年10月7日（月） 17:10～18:50

場所：神奈川大学 横浜キャンパス 16号館（セレストホール）

講演要旨：講師の代表作である「ROKI グローバル・イノベーション・センター」、「梅光学院大学新校舎 The Learning Station CROSSLIGHT」などの紹介を通して、建築設計における着眼点、アイデアの構築、設計案の検討、表現方法などについて解説した。

演題：最新技術で挑む地震動特性と地盤の解明

講師：先名 重樹（国立研究開発法人 防災科学技術研究所）

日時：2019年11月11日（月） 17:10～18:50

場所：神奈川大学 横浜キャンパス 神奈川大学 16号館セレストホール

講演要旨：2014年から始まった国の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）において進められてきた「レジリエントな防災・減災機能の強化」の一環として実施された地震動特性と地盤の解明に関わる研究内容と成果について分かり易く解説した。

演題：建築物省エネルギー法とその周辺技術

講師：桑沢 保夫（国土技術政策総合研究所 住宅研究部）

場所：神奈川大学 横浜キャンパス 16号館（セレストホール）

日時：2019年12月2日（月） 17:10～18:50

講演要旨：我が国の建築分野における省エネルギーは重要な課題であり、建築物の省エネルギー法では適合義務が課せられている。その最前線で活躍する桑沢先生には、海外における住宅・

建築物の省エネルギー，日本における住宅・建築物の省エネルギーを概観いただき，住宅における省エネルギー技術について平易な言葉でご講演いただいた。



## 10. 工学研究所 2019 年度（令和元年度）年次報告

### 10.ANNUAL REPORTS OF RESEARCH INSTITUTE FOR ENGINEERING IN 2019

1. 人事
2. 予算
3. 共同研究 / プロジェクト研究
4. 講演会
5. 神大テクノフェスタ 2019 -くらしと環境の未来- 「エネルギーの地産地消」 に向けて
6. 大型装置使用実績

1. Personnel affairs
2. Budget
3. The List of Interdisciplinary Joint Researches and Project Researches
4. Public Lectures
5. Kanagawa University Techno Festa 2019 Future of Life and Environment-Promoting Local Production of Energy For Local Consumption-
6. Total Machine Time of each Large Research Facility

神奈川大学工学研究所

RESEARCH INSTITUTE FOR ENGINEERING, KANAGAWA UNIVERSITY





## 2019 年度（令和元年度）工学研究所年次報告

### 1. 人事

#### 1) 運営委員

所 長	今井 崇雅	情報システム創成学科	教 授
所報編集委員会	寺島 岳史	機械工学科	准教授
所報編集委員会	中山 明芳	電気電子情報工学科	教 授
幹 事	松本 太	物質生命化学科	教 授
講演会企画委員会	内田 智史	情報システム創成学科	准教授
講演会企画委員会	久宗 周二	経営工学科	教 授
自己点検委員会	中井 邦夫	建築学科	教 授
自己点検委員会	客野 遥	教室系（物理学教室）	准教授
研究支援委員会（所長指名）	亀山 敦	教室系（化学教室）	教 授
大型装置管理委員会（所長指名）	松本 太	物質生命化学科	教 授

#### 2) 研究所客員教授

石濱 正男 (2019.4～2020.3)	孫 世国 (2019.10～2020.9)	岩田 衛 (2019.4～2020.3)
長澤 浩 (2019.4～2020.3)	大坂 武男 (2019.4～2020.3)	簗下 篤史 (2019.10～2020.9)
小林 孝嘉 (2019.10～2020.9)	穴田 哲夫 (2019.4～2020.3)	重村 力 (2019.4～2020.3)
松井 正之 (2019.10～2020.9)	山田 哲男 (2019.10～2020.9)	岩岡 道夫 (2019.4～2020.3)
森井 尚之 (2019.4～2020.3)	高木 均 (2019.10～2020.9)	横山 真一郎 (2019.10～2020.9)
廖 紅建 (2019.10～2020.9)	小柴 朋子 (2019.10～2020.9)	内田 幸子 (2019.10～2020.9)
松丸 正延 (2019.4～2020.3)	王 小龍 (2019.4～2020.3)	岡田 繁 (2019.10～2020.9)
赤井 昭二 (2019.10～2020.9)	張 丹 (2019.10～2020.9)	川口 春馬 (2019.4～2019.9)
Sangkee Min (2019.4～2019.9)	井上 成美 (2019.4～2019.9)	大越 昌幸 (2019.4～2019.9)
野尻 秀智 (2019.4～2019.9)	金元 敏明 (2019.4～2019.9)	

#### 3) 研究所客員研究員

石川 博敏 (2019.4～2020.3)	久保 登 (2019.4～2020.3)	龍 重法 (2019.4～2020.3)
石倉 理有 (2019.4～2020.3)	堀野 定雄 (2019.4～2020.3)	徐 剛 (2019.10～2020.9)
蘆 朝輝 (2019.10～2020.9)	周 建東 (2019.10～2020.9)	山口 秀一郎 (2019.10～2020.9)
鈴木 温 (2019.4～2020.3)	大熊 武司 (2019.4～2020.3)	許 瑞邦 (2019.10～2020.9)
大熊 武司 (2019.4～2020.3)	許 瑞邦 (2019.10～2020.9)	岡村 幸太郎 (2019.10～2020.9)
織作 恵子 (2019.10～2020.9)	伊東 圭昌 (2019.4～2020.3)	田中 俊光 (2019.4～2020.3)
橋本 征奈 (2019.10～2020.9)	片岡 利介 (2019.4～2020.3)	加藤木 秀章 (2019.10～2020.9)
劉 功義 (2019.10～2020.9)	梁 炯丰 (2019.10～2020.9)	仲田 知弘 (2019.10～2020.9)
正井 卓馬 (2019.10～2020.9)	岩田 和朗 (2019.10～2020.9)	中村 弘毅 (2019.10～2020.9)
武田 重喜 (2019.10～2020.9)	植田 博臣 (2019.4～2019.9)	岩井 和史 (2019.4～2019.9)
中村 先男 (2019.4～2019.9)	友利 貴人 (2019.4～2019.9)	郡司 貴雄 (2019.4～2019.9)

#### 4) 研究所特別研究員

北島 創 (2019.4～2020.3)	入井 友海太 (2019.10～2020.9)	安東 信雄 (2019.10～2020.9)
丸山 美紀 (2019.4～2020.3)	長谷川 明 (2019.4～2020.3)	菊地 通 (2019.10～2020.9)
佐々木 敦朗 (2019.10～2020.9)	星野 健 (2019.4～2020.3)	渡邊 英昭 (2019.4～2020.3)
福井 隆史 (2019.4～2020.3)	児保 茂樹 (2019.4～2020.3)	鈴木 成也 (2019.4～2020.3)
河田 京子 (2019.4～2020.3)	童 明娜 (2019.10～2020.9)	渡邊 裕 (2019.4～2019.9)

#### 5) 研究所職員

教務技術職員 萩原 健司	教務技術職員 金子 信悟
--------------	--------------

## 2. 予算

2019 年度（令和元年度）の予算・決算額を表－1 に示す。

表－1

\*工学研究所共同研究内訳

業 務 項 目		予算額（千円）		決算額（千円）
経常予算	研究所運営費	2,204		1,929
	大型共同設備運用	5,800		5,873
	工学研究所共同研究*	13,000		12,797
特別予算	テクノフェスタ	1,900		1,490
	テクノサークル支援事業	2,000		940
	工学系紹介冊子作成 （日本語のみ）	700		637
合 計		25,604		23,666

共同研究代表者	予算額（千円）
高野 准教授	2,500
松木 准教授	3,000
渡邊 助 教	2,000
藤田 教 授	2,500
朝倉 教 授	3,000
計	13,000

## 3. 共同研究／プロジェクト研究

2019 年度（令和元年度）の工学研究所共同研究／プロジェクト研究を表－2 に示す。

表－2

## 共同研究

区分	研 究 課 題 名	研 究 代 表 者
A	ハイブリッドロケットエンジンの軽量化、大推力化および高燃焼効率化	高野 敦／機械工学
A	DNA のレーザー分子線堆積に基づくニューパラダイム：新規ハイブリッド薄膜材料の創製	松木 伸行／電気電子情報工学
B	新バリア材料を有するジョセフソン接合の作製と二次元磁界変調特性の測定による接合の評価	渡邊 騎通／電気電子情報工学
A	鋼構造の部材リユースを想定しての部材の性能評価に基づく低減率の検討	藤田 正則／建築学
A	遺伝子組換えを利用したシーペリー雌雄識別 DNA マーカーの開発	朝倉 史明／生物学

## プロジェクト研究

区分	研 究 課 題 名	研 究 代 表 者
C	地元住民と協力して実施する町づくり研究所の創設と運営	曾我部 昌史／建築学
A	高周波回路の解析・設計理論の整備と対応ソフト開発	平岡 隆晴／電気電子情報工学
C	高安心・超安全交通研究所	高野倉 雅人／経営工学
A	構造物の耐震安全性及び耐久性の評価方法に関する研究	趙 衍剛／建築学
A	新たな低炭素エネルギー社会に対応した新型電池の開発	松本 太／物質生命化学
A	三次元周波数分析を用いた振動モデル化技術の構築	山崎 徹／機械工学

A	高速高精度 DNA 増幅装置の開発	山口 栄雄／電気電子情報工学
A	車両等に装備するためのポリカーボネート窓の表面改質に関する研究	新中 新二／電気電子情報工学
A	超精密加工による高品位表面の創成に関する研究	中尾 陽一／機械工学
A	潮流発電ユニット開発の最先端技術：相反回転化	中西 裕二／機械工学
A	パルスレーザー光を利用した反応開発および機構解析	岩倉 いずみ／化学
A	新規物質の自己組織化を基盤とした界面制御	亀山 敦／化学
A	毒性金属イオン検出・除去システムの開発研究	小野 晶／物質生命化学
C	企業ロボット開発研究所	石井 信明／経営工学
A	ポリペプチドのフォールディングと集積化により形成される高次構造と機能	亀山 敦／化学
A	加熱器・冷却器を一方方向にバイパスするスターリングエンジンの開発	原村 嘉彦／機械工学
A	戸建住宅における全館空調の一次エネルギー消費量に関する研究	岩本 静男／建築学
C	不確定状況下におけるプロジェクトマネジメントの定量的管理方法	石井 信明／経営工学
A	革新的な電気自動車用グリーンコンポジットの創製とその機械的特性	竹村 兼一／機械工学
A	機械学習を用いた倒産予知モデルの構築	片桐 英樹／経営工学
A	次世代無線通信を支えるマイクロ波・ミリ波・テラヘルツ・光パッシブデバイスの理論設計と応用	陳 春平／電気電子情報工学
A	医療従事者用感染対策防護服に関する研究	傳法谷 郁乃／建築学
A	超小型ロケット向け低コスト複合構造の開発	高野 敦／機械工学



#### 4. 講演会

##### 「暮らしの中のサイエンス」連続講演会

テーマ：『ムスリム・ベジタリアンへの食事の提供について』

場 所：神奈川大学みなとみらいエクステンションセンター

オーガナイザー：久宗 周二（神奈川大学工学部教授）

開催日程：2019 年 11 月 29 日（金）13:00～17:00 全 1 回

##### ●講演 1 13:00～13:50

○食の多様化と消費者の安心への配慮について

講師：神奈川大学工学部経営工学科 准教授 高野倉 雅人

##### ●講演 2 14:00～14:50

○石巻市における産学異業種連携による商品開発の取り組み

講師：宮城女子学院大学現代ビジネス学部現代ビジネス学科 教授 石原 慎士

##### ●休憩・試食

※会場にお越しの方々へのムスリムフレンドリー食の提供

##### ●講演 3 15:10～16:00

○インバウンドと地域の活性化の試み

講師：神奈川大学工学部経営工学科 教授 久宗 周二

##### ●総合討論 16:00～17:00

#### 5. 神大テクノフェスタ2019 ―くらしと環境の未来― 「エネルギーの地産地消」に向けて

場 所：神奈川大学横浜キャンパス 2 号館地下演習場

開催日：2019 年 11 月 8 日（金）12:30～19:00

実施内容

##### 1) テーマ講演会 2 件

『かながわスマートエネルギー計画の推進について』

神奈川県 産業労働局 産業部 エネルギー課 主事 岩本 英憲氏、主事 重留 蓮希氏

『結晶構造化学に基づく無機材料の創製：環境・エネルギー応用への将来展望』

神奈川大学工学部 物質生命化学科 教授 本橋 輝樹

##### 2) 教員ショートプレゼンおよびオープンラボ 6 研究室

##### 3) 学生研究ポスター発表

特別セッション（エネルギー関連研究）24 件

一般セッション 24 件

テクノサークル 5 件 総計 53 件

##### 4) 実演展示 2 件（宇宙エレベーター、フォーミュラマシン）

##### 5) 神奈川大学の技術シーズの紹介 9 件

##### 6) 技術・情報交換会（於：19 号館 地下 1 階「LUX」 17:30～19:00）

## 6. 大型装置使用実績

2019 年度（令和元年度）の大型装置装置使用実績（当該年度に使用実績のない研究室等は除外）を表－3 に示す。

表一 3

(単位:時間)

組織・研究室名	TEM	SEM	粉末 X 線	薄膜 X 線	XPS	ICP	単結 X 線	ZYGO	XRF	
									WD-	ED-
機械工学科	0	55	46.5	0	0	0	0	139	33.5	0
伊東研究室									33.5	
竹村研究室		22								
寺島研究室		33	46.5							
中尾研究室								130		
由井研究室								9		
電気電子情報工学科	0	248	132.5	41	0	0	0	33	0	0
中山研究室		24.5		7.5						
松木研究室		205.5	130					33		
山口研究室		18	2.5	33.5						
物質生命化学科	88.5	559.5	1514	515.5	473	554	158	17	562.5	2
井川研究室		3.5	2.5			436			207.5	
池原研究室		7.5	46	76	2.5			13		
上田研究室		212.5			117					
岡本研究室					6.5		8	4		
金研究室	21	193.5	203	41	59.5					
小出研究室		17.5	14							
引地研究室	10		127			66	150			2
松本研究室	57.5	111	1103	398.5	250	52			355	
本橋研究室		4	18		37.5					
横澤研究室		10								
建築学科	0	131	0	0	0	0	0	0	0	0
藤田研究室		131								
化学教室	0	10	73.5	0	0	0	0	0	0	0
岩倉研究室		4.5	48							
亀山研究室		5.5	25.5							
三相乳化プロジェクト	81	33	0	0	0	0	0	0	0	0
合計時間	169.5	1037	2038	294.5	490	1030.1	291	165	537.5	47.5
機械工学科 (%)	0.0	5.3	2.6	0.0	0.0	0.0	0.0	73.5	5.6	0.0
電気電子情報工学科 (%)	0.0	23.9	7.5	7.4	0.0	0.0	0.0	17.5	0.0	0.0
物質生命化学科 (%)	52.2	54.0	85.7	92.6	100.0	100.0	100.0	9.0	94.4	100
建築学科 (%)	0.0	12.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
化学教室 (%)	0.0	1.0	4.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
三相乳化 (%)	47.8	3.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0



# 神奈川大学工学研究執筆規程

2019 年 6 月 24 日

## 1. 投稿資格

投稿筆頭者は原則として神奈川大学工学部所属教職員とする。ただし原稿を編集委員会が依頼する場合はこの限りではない。また連名者については制限しない。

## 2. 記事の種類, 刷り上り頁数

### 2-1. 巻頭言, 論説, 研究紹介

**巻頭言**：原則として 1 頁。

**論説**：学問・技術・工学研究所の事業・動向などに関する論説, 意見。原則として 4 頁程度。

**新任者の研究紹介**：前年度またはその年度に着任した工学部教員の専門分野や着任前の研究成果を簡潔に紹介した内容のもの。原則として 10 頁以内。

**受賞研究の紹介**：前年度に受賞対象となった研究概要の紹介。原則として 5 頁以内。

### 2-2. 論文, 研究報告

**総合論文**：著者の一連の研究をまとめたものであり、その分野における地位を明らかにした内容のもの。原則として 20 頁以内。和文の場合は〔欧文内容概要 (1 頁以内)〕, 欧文の場合は〔和文内容概要 (1 頁以内)〕をつけることができる。

**総説**：総合論文と略同一性格の記事であるが、解説的色彩の強いもの。原則として 8 頁以内。

**工学部特別予算重要機器整備費関連研究**：工学部特別予算により導入された研究設備などを用いて実施された研究で、導入年度から 2 年間で得られた成果を要約したもの。原則として 2~5 頁。

**私学助成関連研究**：国や自治体からの私学助成金により導入された研究設備などを用いて実施された研究で、導入年度から 2 年間で得られた成果を要約したもの。原則として 2~5 頁。

**工学研究所共同研究**：前年度の研究成果が報告される。原則として共同研究 A・B 共に 4~5 頁。

**工学研究所プロジェクト研究**：前年度の研究成果が報告される。原則として 2 頁以内。

**トピックス**：その時々の特ピックスについての展望あるいは解説。原則として 8 頁以内。

### 2-3. 特集

その号の特集として特別記事を設けることがある。

### 2-4. 活動報告, その他の記事

**工学研究所テクノサークル**：テクノサークルの紹介およびその現状が報告される。原則として 2 頁以内。

**随想**：研究・開発などの思い出, 意見, 感想, 経験談など。原則として 4 頁程度。

**国際交流研究**：学外（国内, 国外）における研究・講義・出張に関する経験談など。原則として 4 頁程度。

**工学部通信**：前年度 10 月からその年度の 9 月末までの工学部各学科の研究活動, 講演会記録, および前年度の博士論文, 修士論文, 卒業論文を体系的にまとめたもの。頁数は任意。

**工学研究所年次報告**：前年度の工学研究所活動状況をまとめたもの。頁数は任意。

## 3. 用語

用語は和文とする。ただし総合論文に限り欧文でもよい。また〔英文目次〕作成のため、原稿には〔英文題目〕のほか〔著者氏名〕および〔職名, 所属〕の英語名をつける。

## 4. 提出期日

その年度により定める。

## 5. 原稿の書き方

原稿の書き方は、この〔規程〕ならびに〔神奈川大学工学研究 執筆要領〕による。



## **6. 原稿の責任と権利**

掲載された論文など（以下記事という）の内容についての責任は著者が負うものとする。また、著者は記事が神奈川大学学術機関リポジトリにてインターネット公開されることに同意する。

神奈川大学工学研究掲載記事の著作権・編集出版権（複製権、公衆送信権）は〔神奈川大学 工学研究所〕に属する。

## **7. 採否**

原稿の採否および分類は〔神奈川大学工学研究 編集委員会〕において行う。

## **8. 原稿の提出先**

原稿の提出先は〔神奈川大学 工学研究所 事務室〕とする。そこで受領した日を原稿受付日とする。

## **9. その他**

（１）原稿の枚数が規定限度を超過する場合は委員会の承認を要するが、状況により超過分の実費と徴することがある。

（２）図が印刷に不適當な場合は、専門家に依頼して書直すことがある。この場合の経費は著者負担とする。

# 「神奈川大学工学研究」原稿執筆要領

工学 太郎\*      工学 花子\*\*

## Preparation of Manuscripts for “Technology Reports, Kanagawa University”

Taro KOUGAKU\*      Hanako KOUGAKU\*\*

### 1. 緒言

この「神奈川大学工学研究」執筆要領は、このファイル自体が工学研究原稿のテンプレートになっているので、著者が別にタイプしてある原稿をこの用紙内にペーストすれば、以下に記載する体裁の原稿が作成される。

テンプレートファイルは工学研究所事務局から著者宛にメールにより送付する。

原稿は、テンプレート（A4判）に従って執筆し、提出の際は原稿のデジタルデータ（ファイル）を工学研究所事務局に提出する。ファイルはMS Word（Windows または Mac）またはTeX（PDF提出）とする。原稿記載の順序は、標題、本文、文献、付録、である。

### 2. 本文及び原稿の体裁全般

A4判用紙を用い、本文レイアウト（1ページあたりの文字数）は、30字×50行×2段＝3000字とする。ただしタイトルのみは1段組である。

MS Wordの“ページの設定”の“文字数と行数”のタブ中の設定はフォントサイズ8、段数2で文字数30、行数50とし、“余白”のタブ中の設定は上29下22左13.7右13.7としてある。

和文文字はMS明朝、英文文字はTimes New Romanとする。ただし、記号などにSymbolを用いることが出来る。

本文、図、表及び式は原則として左右の段にまたがらないように書く。小数点は[.]を用い、カンマ[,]を用いない。句読点は[, ] [.]または、[, ] [.]で統一する。注釈の使用はなるべく避ける。

### 3. 見出し

諸記号の字体は次のとおりとする。

（種別）	（字体）	（例）
数学的演算記号	立体	$\sin, \sinh$
単位記号	立体	cm, kg, MΩ
ベクトル量	斜体	速度 $V$ , 力 $F$
量記号	斜体	周波数 $f$ , 長さ $l$
化学記号	立体	H <sub>2</sub> O, BaTiO <sub>2</sub>

\*教授 機械工学科  
Professor, Dept. of Mechanical Engineering  
\*\*助教 建築学科  
Assistant Professor, Dept. of Architecture

文字の大きさは表1に示すとおりとする。

### 4. 図、写真及び表の作成

図、写真及び表は全てカラー表示が可能であるが、製本印刷はモノクロで統一し、PDF版のみカラー掲載とする。このため、カラー表示を希望する場合は、モノクロ印刷時に識別できるように留意する。

図、写真及び表が単段（片側）に収まらない場合は2段（両側）にまたがって書くことができる。

図、写真及び表の横に空白ができて、その空白部には本文を記入しない。

図、写真、表と本文及び図表相互の間は1行余白をとる。

図、写真、表の見出しは本文と同一言語とする。図及び写真の見出しはその下に、表の見出しは上に書く。

図、表中の記号類は、小さすぎて判別不能にならないようにする。また、複雑な記号類は、大きめに描くようにする。

写真は本文に貼るだけでなく、写真のファイルを添付する。

### 5. 数式

数式エディタを用いて記載する。

式は単列に書くように整形する。

字体はTimes New Romanを使う。ただし、Symbolは使用できる。

数式は原則として文章の行の中に入れない。やむを得ず挿入する場合には、1行高さを守る。

#### 例1〔分数式の例〕

…これは  $(a+b)/(c+d)$  の形を取る。

#### 例2〔指数式の例〕

…電流は  $i = I \exp(-t/\tau)$  の形となる。

文中でなく、式を別行にする場合には、次のように書いても良い。

その結果、〔上例の式〕は次の形を取る。

#### 例1〔分数式の例〕

…その結果、これは次式の形を取る。

$$\frac{a+b}{c+d} \quad (1)$$

#### 例2〔指数式の例〕

…その結果、電流は次式の形となる。

$$i = I e^{-t/\tau} \quad (2)$$

6. 文献記載方法

文中の文献引用は、引用箇所に文献ナンバーを上付きカッコでつける。

参考文献 (References) はナンバーに ( ) や [ ] を付して本文末に列記する。

引用文献は原則として以下のように記載し、Vol., No., pp.等は省く (Vol. 30, No. 5, pp. 177-182 ではなく 30 (5), 177-182)。また、太字、斜体を用いない。

著者名は原則として全員記述し、あまりに多い場合は「他」や「et al.」と略してもよい。また、[, ] で列挙し、欧文著者の場合、最後のつなぎに「and」を加える。

例 1 論文の場合

(和文誌)

[1] 松原茂樹, 加藤芳秀, 江川誠二, 英文作成支援ツールとしての用例会検索システム ESCORT, 情報管理, 51 (4), 251-259 (2008).

(欧文誌)

[2] J. E. Lee, M. L. Fusco and A. J. Hessel, Structure of the Ebola virus glycoprotein bound to an antibody from a human survivor, Nature, 454 (7201), 177-182 (2008).

例 2 プロシーディング (Proceedings) の場合

[3] C. Büttner, S. Weinzierl, M. Yabushita and Y. Yasuda, Acoustical characteristics of preserved wooden style Kabuki theaters in Japan, Proc. Forum Acusticum 2014, R03D\_1 (Krakow, 2014. 9).

例 3 書籍・著書の場合

[4] 坂村健, グローバルスタンダードと国家戦略 (日本の<現代> 第 9 巻), NTT 出版 (2005).

[5] D. Frenkel and B. Smit, Understanding Molecular Simulation (2nd ed.), Academic Press (2002).

7. 原稿作成上のヒント

このテンプレートは Windows MS Word97-2003 文書で作成してある。著者が別に書いた原稿をコピーペーストすれば、自動的に割付が決定する。

Word からコピーペーストする際、書式情報無しのテキストのみをペーストするには、対象の文字または一文をコピーした後にメニューの“ホームタブ”から“形式を選択して貼り付け…”を選択し、“テキスト”を選ぶ。

第 1 ページ標題部分は 1 段組である。この部分では、項目ごとにコピーペーストが必要である。

本文は著者原稿から図、表、脚注を除いてコピーし、テンプレートにペーストする。その後で、図等のスペースを作ってテキストボックスを挿入し、その中に図などをペースト、あるいはファイルからの挿入をする、

第 1 ページの脚注 (著者所属など) には、直接入力しても、コピーした内容をペーストしても良い。

このテンプレートについて不明な点がある場合は、工学研究所事務局に問い合わせる。

8. 結言

校正は著者に依頼するので、校正刷りが到着後、速やかに校正を

済ませて、工学研究所事務局まで返送する。校正は内容が著者提出のハードコピーと一致することを確かめるものであって、軽微な修正点を除き、変更を加えることはできない。

著者の責任による修正が生じた場合には、その修正に必要な実費を徴収する。

表 1 文字及びサイズ

題目	MS 明朝	14 ポ
著者名	MS 明朝	10 ポ
欧文題目	Times New Roman	12 ポ
欧文著者名	Times New Roman	9 ポ
本文	MS 明朝	8 ポ
本文の各節・小項目	MS ゴシック	8 ポ
図・表の見出し	MS ゴシック	8 ポ
参考文献・脚注	MS 明朝 Times New Roman	8 ポ

付録				
〔参 考〕 神奈川大学工学研究の配布				
刷り上がった神奈川大学工学研究は以下の各者に 1 部宛贈呈する.				
(1) 本学理事および工学部所属教職員.				
(2) 理, 工学部を有する国内の大学またはそれに準ずる学校.				
(3) 官公庁の研究機関.				
(4) 主要の学協会.				
(5) 民間の主要研究機関.				
(6) その他, 編集委員会が認めたもの.				
〔資 料〕 英文用語一覧				
Technology Reports, Kanagawa University	神奈川大学工学研究	Industrial Engineering and Management	経営工学	
Faculty of Engineering	工学部	Architecture	建築学	
Research Institute for Engineering	工学研究所	Mathematics	数 学	
Department (Dept.) of	学 科	Physics	物理学	
Mechanical Engineering	機械工学	Chemistry	化 学	
Electrical and Electronic Information Engineering	電気電子情報工学	Biology	生物学	
Material and Life Chemistry	物質生命化学	Professor	教 授	
Information Systems Creation	情報システム創成学	Professor Emeritus	名誉教授	
		Associate Professor	准教授	
		Assistant Professor	助 教	
		Research Associate	助 手	
		Technical Assistant	技術員	
		Graduate (M.C.)	大学院 (博士前期課程)	
		Graduate (D.C.)	大学院 (博士後期課程)	
		Research Student	研究生	
		Dean	学部長	
		Chairman of Dept. of ...	学科主任	
		Abstract	概 要	
			注: 工学部, 准教授, 助手, 技術員, 研究生などについては種々の呼称があるが, 上記のように統一する.	



## 編集後記

神奈川大学工学研究第4号の刊行にあたり、ご多忙のなか原稿をご執筆下さいました先生方、編集に携わられた皆様方に心より御礼申し上げます。この「神奈川大学工学研究」が新たな研究の萌芽や応用研究の一助となり、工学部のさらなる発展に繋がることを願ってやみません。

(電気電子情報工学科 中山 明芳)

## 神奈川大学工学研究 第4号

### 神奈川大学工学研究 編集委員会

委員長	中山 明芳 (教授, 電気電子情報工学科)	／工学研究所所報編集委員会
委員	石井 信明 (教授, 経営工学科)	／工学研究所所報編集委員会
五十音順	伊東 弘行 (准教授, 機械工学科)	／工学部広報委員会
	内田 青蔵 (教授, 建築学科)	／工学部広報委員会

## TECHNOLOGY REPORTS, KANAGAWA UNIVERSITY (No. 4)

### Editorial Board

Chief Editor	Akiyoshi NAKAYAMA	(Prof., Dept. of Electrical, Electronics and Information Engineering)
Editors	Nobuaki ISHII	(Prof., Dept. of Industrial Engineering and Management)
	Hiroyuki ITO	(Associate Prof., Dept. of Mechanical Engineering)
	Seizo UCHIDA	(Prof., Dept. of Architecture)

---

### 神奈川大学工学研究 第4号

2021年3月26日 印刷

2021年3月31日 発行

編集兼発行者 神奈川大学工学研究所  
221-8686 横浜市神奈川区六角橋3丁目27番1号

印刷所 共立速記印刷株式会社

---

RESEARCH INSTITUTE FOR ENGINEERING, KANAGAWA UNIVERSITY

3-27-1, Rokkakubashi, Kanagawa-ku, Yokohama 221-8686, Japan



