

2025 年度  
京都産業大学 理学部  
研究成果報告書

## 理学部教員の研究成果報告書一覧

No.	学科	氏名	研究テーマ
1	数理科学科	伊藤 悠	非整数階微積分によるラフパス理論とその応用
2	数理科学科	牛瀧 文宏	(1) 位相幾何学(主にalgebraic topology) (2) 教師教育論(現職の小学校教員や中学高校の数学教員を対象にした研修のあり方) (3) 算数・数学教育(大学数学を活かした初等中等教育、小中一貫教育、高大接続など)
3	数理科学科	宇野 勝博	有限次元多元環の表現論、および、初等中等教育における数学の授業についての研究
4	数理科学科	緒方 勇太	変換理論、曲線や曲面の構成法の研究
5	数理科学科	勝股 審也	プログラム検証の数学的基礎
6	数理科学科	田中 立志	数論(多重ゼータ値, 多重L値)
7	数理科学科	中嶋 祐介	非可換クレパント特異点解消とその表現に関する研究
8	数理科学科	長瀬 睦裕	(1) 数学の探究活動に用いる優良な教材の研究 (2) 中等教育における数学の探究活動を指導できる教員の養成プログラムの開発
9	数理科学科	難波 隆弥	一般化二項定理から誘導される分数階二項分布とその性質
10	数理科学科	西 慧	反応拡散系における局在解の界面ダイナミクス
11	数理科学科	濱野 佐知子	開リーマン面のモジュライと接続を用いた多変数関数論の新展開
12	数理科学科	三好 博之	圏論(特に弱高次元圏と計算機科学への応用), 数理論理学(特にホモトピー型理論), 計算の哲学(哲学的, 数学的, 計算機科学的側面について)
13	数理科学科	柳下 浩紀	非線形現象の解析学、特に、動く空間パターンの数学解析
14	数理科学科	山田 修司	結目理論のDNA形状シミュレーションへの応用
15	数理科学科	渡辺 達也	変分的手法による楕円型偏微分方程式の解析 - 微分法の究極のかたち -
16	物理科学科	伊藤 豊	1) 遍歴電子磁性の未解明の謎の研究 - 磁気的量子臨界点近傍の物理 - 2) 卓上実験による量子類似物の探索 - 液面のパラメトリック共鳴 -
17	物理科学科	岩下 靖孝	異方的な粒子の振る舞い - 微粒子のデザインと平衡・非平衡挙動 -
18	物理科学科	内田 和之	ナノ・スケールからの物性理解と物質制御
19	物理科学科	大森 隆	エネルギー技術等による地球温暖化対策
20	物理科学科	齊藤 国靖	ジャミング系の固有振動と弾性定数の摂動論
21	物理科学科	下村 晋	構造物性物理学
22	物理科学科	鈴木 信三	炭素ナノ構造体の物理化学 - カーボンナノチューブの作製・分離精製と応用 -
23	物理科学科	瀬川 耕司	トポロジカル物質の実験研究
24	物理科学科	新山 雅之	素粒子・原子核物理と放射線検出器を用いたミュオグラフィの研究
25	物理科学科	山縣 淳子	ハドロン-原子核束縛状態から探るハドロン-原子核間相互作用の性質
26	物理科学科	山上 浩志	強相関 $f$ 電子系の相対論的バンド理論の構築と電子物性の理論的研究
27	宇宙物理・気象学科	安藤 紘基	電波掩蔽観測で調べる気温と硫酸蒸気混合比の長期変動について
28	宇宙物理・気象学科	小郷原 一智	火星中緯度でダストストームが発生しやすいのはどのような大気環境のときか?
29	宇宙物理・気象学科	河北 秀世	太陽系形成の起源と銀河系の物質化学進化
30	宇宙物理・気象学科	岸本 真	観測宇宙物理学, 特に高空間分解能観測, 巨大ブラックホール周縁の構造
31	宇宙物理・気象学科	佐川 英夫	惑星大気の観測的研究: 赤外線高分散分光観測によるタイタン大気の季節変動追跡
32	宇宙物理・気象学科	佐藤 浩介	精密X線分光観測で解き明かす宇宙の力学的/化学的進化
33	宇宙物理・気象学科	高木 征弘	惑星気象学, 特に金星の大気大循環について
34	宇宙物理・気象学科	高谷 康太郎	異常気象解明のための画期的な力学理論構築
35	宇宙物理・気象学科	西道 啓博	天文観測・物理学・計算統計学の融合による宇宙論: ダーク成分の解明に向けて
36	宇宙物理・気象学科	樋口 有理可	太陽系小天体から探る太陽系の起源と進化
37	宇宙物理・気象学科	米原 厚憲	重力レンズ現象の天文学的応用に関する研究 ~ 重力レンズ現象を用いて系外惑星から宇宙論に至る多様な問題に取り組む ~

# 研究成果報告書

数理科学科 伊藤 悠

## 1. 研究テーマ

非整数階微積分によるラフパス理論とその応用

## 2. 要旨

ラフパス解析の理論は確率解析の研究に有用であるが、従前から認識されている技術的な問題も多くある。そのような問題の解決方策は、T. Lyons (1998) による従来の方法とは異なる、新たな方法によるラフパス解析の基礎理論の展開であると報告者は考えている。本研究では、ラフパス解析の基礎理論をより簡明で適用範囲の広い形に整理することを目的とし、前述の新たな方法として、非整数階微積分の理論に基づいた方法に取り組んでいる。

## 3. 研究の背景

Terry Lyons が 1998 年発表の論文で創始したラフパス解析 (rough path analysis) の理論は、滑らかさの度合いの小さな関数に関する微積分学の理論であり、確率解析の研究に有用である。ラフパス解析の理論を確率解析の研究に用いると、確率積分や確率微分方程式のパスごとの取り扱い、確率微分方程式の解写像の連続性などといった、従来の確率解析では得ることの難しい情報を引き出すことが期待される。また、非整数ブラウン運動を含むガウス過程などのセミマルチンゲールの枠組みに入らない重要な確率過程で駆動される確率微分方程式の研究、2014 年にフィールズ賞を受賞した Martin Hairer の研究に代表されるような、Kardar-Parisi-Zhang 方程式や確率量子化に現れる特異な確率偏微分方程式の研究など、ラフパス解析の応用範囲は従来の確率解析で取り扱えなかったような対象にまで拡がり、更なる発展が期待される研究分野である。その一方で、ラフパス解析の理論を用いた確率解析の研究には技術的な制約条件が課されることも多く、詳細は省略するが、ラフパス解析の基礎理論の展開方法に起因する問題とも考えられる。そのような問題意識から本研究では、ラフパス解析の基礎理論をより簡明で適用範囲の広い形に整理することを目的とし、T. Lyons (1998) による従来の方法とは異なる、新たな方法によるラフパス解析の基礎理論の展開とその確率解析への応用に取り組んでいる。

## 4. 研究手法・成果

本研究では、非整数階微積分 (fractional calculus) の理論に基づいたラフパス解析の研究に取り組み、体系的な研究成果を得ている。3. 研究の背景で述べた、新たな方法によるラフパス解析の基礎理論の展開として、非整数階微積分による方法を考えて

いる。非整数階微積分に基づいたラフパス解析は、Yaozhong Hu と David Nualart の 2009 年発表の論文で導入され、特に、ラフ積分と呼ばれるラフパス解析における線積分に特色がある。通常のラフ積分の定義は、補正されたリーマン-スティルチェス和の極限として与えられ、区間の分割による離散近似の議論に基づいている。その一方、非整数階微積分に基づいたラフ積分の定義は、補正された非整数階微分作用素を用いてルベーク積分として明示的に与えられ、通常のラフ積分と比べて簡明な取り扱いを実現する。ラフ積分はラフパス解析の基礎理論の根幹となる部分であり、ラフ微分方程式と呼ばれるラフパス解析における微分方程式の定式化においても重要な役割を果たす。本研究では、Hu-Nualart (2009) や報告者のこれまでの研究を更に推し進め、非整数階微積分による方法を発展させることで、ラフパス解析の基礎理論のより簡明な取り扱いを実現し、確率解析の研究に有力な手法を提供することを目指して研究に取り組んでいる。

5. 主要な論文、著者等 (2021-2025 年) : 本人に 2 重下線、本学学生・大学院生には下線

- (1) Yu Ito, Integration with respect to Hölder rough paths of order greater than  $1/4$ : an approach via fractional calculus, *Collectanea Mathematica* 73 (2022), no. 1, 13-42.
- (2) Yu Ito, Toru Sera and Kouji Yano, Resolution of sigma-fields for multiparticle finite-state action evolutions with infinite past, *Journal of Theoretical Probability* 36 (2023), no. 3, 1368-1399.
- (3) Yu Ito, Backward representation of rough integral: an approach based on fractional calculus, *Kyushu Journal of Mathematics* 77 (2023), no. 2, 367-384.
- (4) Yu Ito, A proof of the additivity of rough integral, *Stochastics and Dynamics* 24 (2024), no. 1, Paper No. 2450006, 17 pp.

6. 主要な学会発表等 (2021-2025 年) : 本人に 2 重下線、本学学生・大学院生には下線

- (1) 伊藤悠, Backward representation of rough integral: an approach via fractional calculus, 岡山 確率解析ワークショップ 2022, Zoom, 2022 年 2 月.
- (2) 伊藤悠, Backward representation of rough integral: an approach via fractional calculus, 日本数学会 2022 年度年会, 埼玉大学, 2022 年 3 月.
- (3) Yu Ito, A fractional calculus approach to rough path integration, The 7th International Conference on Random Dynamical Systems, Institute of Mathematics, Vietnam Academy of Science and Technology, 2022 年 6 月.

7. その他特記事項 (2025 年度)

- (1) 科学研究費補助金(基盤研究(B))「繰り込みを伴う方程式と確率解析」研究分担者

# 研究成果報告書

数理科学科 牛瀧 文宏

## 1. 研究テーマ

- (1) 位相幾何学 (主に algebraic topology)
- (2) 教師教育論 (現職の小学校教員や中学校の数学教員を対象にした研修のあり方)
- (3) 算数・数学教育 (大学数学を活かした初等中等教育、小中一貫教育、高大接続など)

## 2. 要旨

(1) についての研究の中身は位相変換群論と有限位相空間論です。位相変換群論に関しては、主に Borsuk-Ulam の定理の変換群論的一般化と isovariant maps に関する研究を行なっています。Borsuk-Ulam の定理というのは、2 次巡回群が自由に作用する球面の間の変換写像が存在するとき、定義域の球面の次元は値域の球面の次元で上から評価されるという定理です。isovariant map は群が作用する 2 つの空間の間の変換写像であって、各点でアイソトピー部分群を保つものをいいます。これまで、ホモロジー球面の間の変換写像 map についての Borsuk-Ulam 型の結果や、その主張が成立するような群 (Borsuk-Ulam 群) の研究を行なってきました。有限位相空間論については、代数トポロジーの問題の初等的証明を与える手段としての有限位相空間の研究と Borsuk-Ulam 型の定理の構築 (群のコホモロジー理論の利用) がテーマです。

(2) については、現職の小学校教員 (算数科) や中学校の数学教員に対する研修方法の開発に関する実践的研究がメインテーマです。

(3) については小学校から大学までの一貫した算数・数学教育に関する実践的・実務的研究がメインです。特に小中一貫教育がメインテーマですが、最近は高大接続や教員養成などにも関心を寄せています。

## 3. 研究の背景

(1) について：

位相幾何学というと、不思議な図形がたくさん出てくる分野だという印象を持っている方もいるかもしれません。もちろん、その認識も間違いはないのですが、そればかりではありません。私が研究している位相幾何学は「存在や可能性を約束する言葉」または逆に「存在や可能性を否定する言葉」としての位相幾何学です。(1) での研究は主に Borsuk-Ulam の定理を扱っていますが、この定理の帰結として「地球上の対心点のペアで、必ず気温と気圧の両方が同じところがある」ということが証明されます。これは気象学の定理ではなく、地球の形、すなわち球面の数学的性質なのです。しかもそれは、球面が丸い形であるということとは無関係です。球面を連続的に変形させて得られる図形 (例えば、角をつけて立方体にするなど) についても同様に成立するのです。

このように、私が行なっている位相幾何学の研究は、このように色々な存在を証明することにあります。図形に関わる部分での存在や可能性、はたまたその逆の存在や可能性の否定に関しては、図形を曲げたり伸ばしたりしても変わらない位相的性質と言われるところと関係している部分が多く、それが位相幾何学の舞台なのです。

(2)について：

私は教員研修を教員支援の活動だと考えています。主に現職教員が行う授業への指導助言の実務を通して、そのあり方を研究しています。始めた当初は、小中高一貫した算数・数学の教育に関する教員の指導力向上を目指したものでした。すでに一貫教育も法制化されましたので、その視点は当然のものとして、普段の指導をどのようにするか、特に深い学びをどう構築するか、教育における不易流行（特に GIGA スクール構想といった DX との関連）を考慮して研修のあり方を考えているところです。実際に学校に出向き、教員や学校に寄り添うという立場での支援としての研修づくりを考えています。さらに、小学校教員養成課程を有する私立大学の多くが数学を入試に課していないことに関係すると思われる、算数教育における諸問題についても考察しています。

(3)について：

すでに一貫教育も法制化されましたし、小中一貫教育も小中連携教育も中教審によって定義づけられました。戦後に設定された 6・3・3 制は、子どもの発達の早期化などにより、実態に合わなくなりましたが、教科教育において、どのようにそれを見直すのかを考え始めたのが背景にあります。始めた当初は、小中の間の不理解を埋めるための実践研究や、前倒しを行わずに先に必要な学力をつけるための研究を行いました。最近では、例えば義務教育学校での「学習指導要領の準用」に伴うカリキュラム・マネジメントについても、教育現場と一緒に考えています。

#### 4. 研究手法・成果

(1)で述べた「Borsuk-Ulam の定理の変換群論的一般化と isovariant maps に関する研究」については、主に京都府立医科大学の長崎教授と共同研究を進めています。手法としては、同変コホモロジー、特に同変障害理論や有限群論の結果などを使いますが、有限群の表現論を用いることが多いです。成果として、Borsuk-Ulam 群の新しい判定条件を与えています。有限位相空間論については、古典的な McCord や Stong の結果をもとに、単体的複体との間に弱ホモトピー同値を作って、研究をしています。成果として、例えば、極小有限空間と言われるものに対して、コホモロジー理論を全く用いずに、Borsuk-Ulam の定理の初等的証明を与えています。

(2)に関しては、教員研修を数値的に測りデータを取ることがほぼ不可能なため、効果測定などの論文は非常に難しい分野になります。そのため、実際に教員研修や助言指導を行なった後で、教員から寄せられたアンケートをもとに教員の実態を読み取り、研修や講演を改善し、PDCA サイクルを何度か回し、その結果を書籍や教師用資料の形で出版するという形式をとります。教員の実態分析からの提案を論文としたこともありますが、書物などの形での出版も多くあります。書物で出版することで、より多くの教員や

管理職、指導主事の目に止まるという利点があります。

(3)に関しては、主にカリキュラム論が中心で、方法としては(2)と重複することが多いです。実際に様々な自治体から依頼を受けて、独自カリキュラムの研究に着手することがありますが、その際には、その自治体の様子を慎重に見極めながら行います。分担執筆ではありますが、中等教育での数学教育に関する書物を執筆しました。2023 年度からは日本評論社の雑誌「数学セミナー」にて連載を行い、大学で数学を学ぶことが初等中等教育を深めることいかに結びつくかという点について論考を重ねました。

5. 主要な論文、著者等 (2019-2024 年) : 本人に2重下線、本学学生・大学院生には下線

[1] 牛瀧文宏 : 「集合に位相を入れるってどういうことですか」 大学数学質問箱 集合・論理・位相篇 2025 日本評論社

[2] 牛瀧文宏 : 「文字と言語でひらく算数・数学」 Rimse 40 号 pp2-pp6, 2024 財団法人理数科学研究所

[3] 牛瀧文宏 : 「中高数学にひと味添える大学数学 連立一次方程式、二次方程式、零因子」 数学セミナー 2024 (5) pp78-pp83. 日本評論社

[4] 牛瀧文宏 : 「中高数学にひと味添える大学数学 方程式、述語、形式的操作」 数学セミナー 2024 (4) pp79-pp84. 日本評論社

[5] 牛瀧文宏 : 「中高数学にひと味添える大学数学 関数、文字式、数の代わり」 数学セミナー 2024 (3) pp72-pp77. 日本評論社

[6] 牛瀧文宏 : 「中高数学にひと味添える大学数学 関数の考え、面積、測度」 数学セミナー 2024 (2) pp62-pp67. 日本評論社

[7] 牛瀧文宏 : 「中高数学にひと味添える大学数学 比例、関数の考え、グラフ」 数学セミナー 2024 (1) pp54-pp59. 日本評論社

[8] 牛瀧文宏、三田紀房、コルク、モーニング編集部監修 : 「ドラゴン桜式 数学カドリル 数学 II,B,C」 講談社 2023

[9] 牛瀧文宏、三田紀房、コルク、モーニング編集部監修 : 「ドラゴン桜式 数学カドリル 数学 III」 講談社 2023

[10] 牛瀧文宏 : 「中高数学にひと味添える大学数学 数、数字、算数と数学」 数学セミナー 2023 (4) pp72-pp77. 日本評論社

[11] 牛瀧文宏 : 「中高数学にひと味添える大学数学 加法の意味、演算、代わりとなるもの」 数学セミナー 2023 (5) pp66-pp71. 日本評論社

[12] 牛瀧文宏 : 「中高数学にひと味添える大学数学 数の拡張、集合、写像、順序」 数学セミナー 2023 (6) pp72-pp77. 日本評論社

[13] 牛瀧文宏 : 「中高数学にひと味添える大学数学 小数、順序体、実数」 数学セミナー 2023 (7) pp66-pp71. 日本評論社

[14] 牛瀧文宏 : 「中高数学にひと味添える大学数学 道具、定義、「ストイケイア」」 数学セミナー 2023 (8) pp58-pp63. 日本評論社

- [15] 牛瀧文宏：「中高数学にひと味添える大学数学 図形、空間、多様体」 数学セミナー 2023 (9) pp64-pp69. 日本評論社
- [16] 牛瀧文宏：「中高数学にひと味添える大学数学 直線、平行、第 5 公準」 数学セミナー 2023 (10) pp72-pp77. 日本評論社
- [17] 牛瀧文宏：「中高数学にひと味添える大学数学 平行線、ピタゴラスの定理、接空間」 数学セミナー 2023 (11) pp70-pp75. 日本評論社
- [18] 牛瀧文宏：「中高数学にひと味添える大学数学 比例、「 $\dots$ 」、行列」 数学セミナー 2023 (12) pp64-pp69. 日本評論社
- [19] 二澤善紀編著：「中等数学科教育の理論と実践」第 2 章後半と第 4 章後半を担当 ミネルヴァ書房 2022
- [20] 牛瀧文宏、三田紀房、コルク、モーニング編集部監修：「ドラゴン桜式 数学カドリル 数学 I」講談社 2022
- [21] 牛瀧文宏：「教育との関わりを振り返る」 数学セミナー 2022 (5) pp18-pp23. 日本評論社
- [22] 牛瀧文宏：「なぜ位相を学ぶのか」 数学セミナー 2021 (4) pp18-pp23. 日本評論社
- [23] 牛瀧文宏：「算数の強化書 計算編」 メイツ出版 2021
- [24] 牛瀧文宏：「小学校・中学校・高等学校 算数からの学びのつながり」 啓林館 2021

6. 主要な学会発表等 (2019-2024 年) : 本人に 2 重下線、本学学生・大学院生には下線  
牛瀧文宏：「分数ができない大人」第 11 回東京財団政策研究所ウェビナー 2023 年 3 月  
牛瀧文宏：「Borsuk-Ulam properties between finite topological spaces」第 48 回変換群論シンポジウム 大阪大学 2022 年 11 月  
牛瀧文宏：「2020 年代の数学教育の方向性-高大接続を中心に-」 日本数学会教育委員会主催シンポジウム 2021 年 3 月

#### 7. その他特記事項 (2025 年度)

高等学校数学 I,II,III,A,B,C の検定教科書と中学校数学の検定教科書 (啓林館) の編集と執筆をさせて頂いております。

教育系 YouTube「篠原塾」に出演し、大学の数学や大学受験の数学について、発信をさせて頂いております。

# 研究成果報告書

数理科学科 宇野 勝博

## 1. 研究テーマ

有限次元多元環の表現論、および、初等中等教育における数学の授業についての研究

## 2. 要旨

有限次元多元環の表現論においては、主として有限群の群多元環の表現論でのいくつかの予想について研究している。特に、ブルーエ予想とその一般化およびデイド予想について研究を進めている。

数学教育については、種々の試験の関係を統計的に分析している

## 3. 研究の背景

上記予想は有限群の表現論の長い研究歴史の中で精密化されてきたものである。実際には、McKay、Alperin、Robinson、Knorr、Dade、Isaacs、Navarro、本報告書執筆者が改良を加えたもので、その最終形は関係する研究者の頭文字をとって「I am Drunk 予想」とも呼ばれている。しかし、個々の場合に予想の正しさを証明するのは通常難しい。

数学教育については、学力テストの国際比較などは行われてきたが、より基本的な能力である「読む力」のテストとの関係について研究を進めている。実際、「読む力」が不足していると、教科書、資料に書かれていることが理解できず、知識の定着以前の問題が顕在していると言える。

## 4. 研究手法・成果

有限群の群多元環についてもシロー部分群と呼ばれる部分群が含む元の数が少なくても元の群の構造が難しく、元の群の可能性の絞り込みが重要である。その方法を編み出すことが研究のポイントである。関連する予想について、関係する素数が3で、いわゆるシロー3-部分群の元の数が $3^4$ 個の非可換群の場合に、そのパターン部類はコンピュータによって完成しているが、論理的な証明がまだ全て完成されていない。今後はパターンごとの証明をさらに進めることになる。

数学教育については、学校現場で数々の試験が行われているが、その結果の関連性を分析し、どの試験が効果的かなどの考察が重要である。小中学校において、リーディング・スキルと学力テストの関係の統計的分析は完成した。この手法は大阪市教育委員会に引き継いでいて、今後は、さらに詳細な分析方法を模索し、大阪市教育委員会に提案できるよう研究を進める。

5. 主要な論文、著者等（2021-2025年）：本人に2重下線、本学学生・大学院生には下線

(1) 宇野勝博：ライブ感あふれる線形代数講義（裳華房）2024年2月

6. 主要な学会発表等（2021-2025年）：本人に2重下線、本学学生・大学院生には下線

(1) 宇野勝博、村上正行、安部有紀子、中美緒、杉山清寛：大阪大学における全学初年次教育「学問への扉」のオンライン化とその影響 2021年3月17日（水）「第27回大学教育研究フォーラム」3月17日～3月18日（京都大学、オンライン）

(2) 宇野勝博：「学問への扉」開設経緯 2023年3月14日（火）大阪大学 学問への扉 シンポジウム 大阪大学会館 アセンブリーホール

(3) 宇野勝博、村上正行、東尾晃世、柳本朋子：教科指導への活用を目指したリーディングスキルテストと学力調査の関係分析 2024年9月7日（土）ポスター(4)の4-L604-004、日本教育工学会2024年秋期全国大会、9月7日～8日、東北学院大学

7. その他特記事項（2025年度）

(1) 大学教育学会 奨励賞および会長特別賞審査委員

(2) 大阪公立大学 数学研究所 拠点運営委員および課題選考委員

(3) 現在、有限群の群多元環を含む有限次元多元環の表現論についての書籍を執筆中

(4) 公益財団法人 日本証券奨学財団 評議員

(5) 大阪教育大学附属高等学校天王寺校舎スーパーサイエンスハイスクール運営指導委員

# 研究成果報告書

数理科学科 緒方 勇太

## 1. 研究テーマ

変換理論、曲線や曲面の構成法の研究

## 2. 要旨

本研究では、曲線や曲面を構成する手法について研究を行った。特に、ここ継続して取り組んでいるテーマは Darboux 変換と呼ばれる曲線や曲面の変換理論であり、本年度もいくつか成果を得た。また、今年度は研究室の修士学生との共著論文が出版されたため、その結果についても報告する。

## 3. 研究の背景

本年度の研究成果の一つとして、曲面論および可積分系理論において有名な Darboux 変換に関する研究が挙げられる。古来より Darboux や Bianchi といった著名な数学者によって、既知の曲面から新しい曲面を生み出す構成法の研究が行われていた。近年では、彼らの研究成果が「可積分方程式の解の変換理論」と強く結びついていることが指摘され、「Darboux 変換」と呼ばれている。可積分系理論では、Darboux 変換はソリトン解を構成する有名な手法であるが、幾何学的には曲面を球叢（きゅうそう）によって変換する操作（球叢対応）である。本年度は、これらの古典理論と、近年導入された polarization と呼ばれる関数自由度を用いた「曲線の Darboux 変換」との関係について研究した。

一方、別の研究として、修士学生であった馬場 健太郎氏と「閉曲線の構成法」について研究を行った。先行研究における、ある種の平面閉曲線の構成法を拡張し、特異点付き平面閉曲線、球面閉曲線、特異点付き球面閉曲線、空間閉曲線、特異点付き空間閉曲線など、多様な閉曲線を構成できる手法を得た。

## 4. 研究手法・成果

古典的な Darboux 変換は、曲面に対し定式化されていたが、近年では「滑らかな曲面」、「滑らかな曲線」、「離散曲面」、「離散曲線」といった4つの意味で Darboux 変換を考えることができる。本年度は、滑らかな曲線の Darboux 変換と滑らかな曲面の Darboux 変換との関係に注目し、研究した。

曲線の Darboux 変換は、曲面の Darboux 変換と同様に球叢対応で曲線どうしが写り合うが、その変換には Polarization と呼ばれる実関数の自由度が新たに追加され、曲面の Darboux 変換に比べ、より自由な変形が可能となる。本研究では、曲線の Darboux 変換の

観点から研究を行い、新しい双等温曲面を構成した。離散版の理論との対比、Darboux 変換以外の変換理論の研究は次年度以降の課題とする。

5. 主要な論文、著者等 (2021-2025 年) :

- (1) K. Bamba and Y. Ogata, “Closed space curves with singularities, generated by periodic curvature and torsion”, J. Geom., 117 (2026), <https://doi.org/10.1007/s00022-025-00792-3>.
- (2) J. Cho, K. Leschke and Y. Ogata, “Discrete constant mean curvature cylinders and isothermic tori”, Discrete Comput. Geom., online first, (2024).
- (3) Y. Kabata, S. Matsutani, Y. Noda, J. Onoe and Y. Ogata, “A novel symmetry in nanocarbons: pre-constant discrete principal curvature structure”, Geom. Integrability & Quantization 27: pp. 25-44 (2024).
- (4) K. Daehwan and Y. Ogata, “Separable minimal surfaces and their limit behavior”, J. Korean Math. Soc. 61, no. 4, pp. 761-778, (2024).
- (5) Y. Kabata, S. Matsutani and Y. Ogata, “On discrete constant principal curvature surfaces”, Comput. Aided Geom. Design, vol. 111, Paper No. 102289, (2024).
- (6) J. Cho, K. Leschke and Y. Ogata, “Periodic discrete Darboux transforms”, Differential Geom. Appl. 91, Paper No. 102065 (2023).
- (7) J. Cho, K. Leschke and Y. Ogata, “Generalized Bianchi permutability for isothermic surfaces”, Anal. Global Anal. Geom., vol. 61, pp. 799-829 (2022).

6. 主要な学会発表等 (2021-2025 年) :

- (1) Y. Ogata, “Minkowski 空間内の周期的な平均曲率零曲面とその陰関数表示”, 特異点論と数理科学 への応用 (サンフレッシュ山口), 2025.06.04.
- (2) Y. Ogata, “曲線の Darboux 変換とそのモノドロミーについて”, 多様体上の微分方程式 (石川県文教会館), 2024.11.29.
- (3) Y. Ogata, “Periodic discrete Darboux transforms for curves”, Discrete Geometric Structures 2024 (TU Wien), 2024.09.05.

7. その他特記事項 (2025 年度) 特になし

# 研究成果報告書

数理科学科 勝股 審也

## 1. 研究テーマ

プログラム検証の数学的基礎

## 2. 要旨

プログラムおよびシステムの正しさを数学的に検証するには 1. プログラムおよびシステムの数学的なモデリングと 2. 検証のための論理的な枠組みの2つを構築することが重要です。これらの点に関して論理学・型理論・圏論を用いて研究を行っています。

## 3. 研究の背景

コンピュータは現在、身の回りの機器の制御から、商取引・交通・通信などの社会基盤の運営まで、様々な場面で用いられています。こうしたコンピュータを制御するプログラムは、正しく動作することが強く求められます。この要請に応えるため、数学を応用してプログラムの動作の正しさを保証する技法（形式手法）が発展してきました。私の現在の関心は、形式手法の数学的基盤とその応用にあります。特に、抽象代数学の一つである圏論を応用してこのテーマに取り組んできました。

## 4. 研究手法・成果

(1) プログラムの数学的なモデルを研究する分野はプログラミング言語の意味論と呼ばれます。この分野において、プログラミング言語やアルゴリズムに内在する様々な概念の本質を掘り上げて精錬することで、元概念を端的に説明し、しかも広範な応用をもつ新しいものへと発展させる研究を行ってきました。論文(6)では抽象解釈と呼ばれるプログラムの安全性解析の理論を圏論の立場で定式化し、圏論的意味論との対比を行いました。また論文(8)ではプログラム検証で用いられる最弱事前条件述語変換子(wppt)の圏論的な定式化と一般化を行い、様々な wppt がこれで理解できることを示しました。

2025年度は、産業技術総合研究所の Reynald Affeldt 氏と共同で、差分プライバシーのためのホア論理の形式化に関する研究を行いました。この形式化は、論文(5)で与えた理論的枠組を定理証明支援系 Rocq で実装することで行っています。この形式化の特徴は、ホア論理の部分と、その下にあるプログラミング言語の部分が圏論的に分離されている点です。現在は下に相当する部分、より具体的には、確率的プログラムの挙動を表現するのに用いられる Giry モナドに関して、周辺の理論を整備している段階です。

### (2) システム検証の型理論的アプローチ

プログラムが引き起こす様々な挙動の分析方法として代表的なものの一つがエフェクトシステムと呼ばれる型理論的なアプローチです。エフェクトシステムの数学的基盤としてこれまで次数付きモナドを研究してきました(論文(10)(17)(18))。次数付きモナドはプログラム検証への応用をますます広げており、従来のモナドを次数付きモナドで置き換えることで代数理論や余代数の理論に新たな発見や応用を探索する予定です。

2025年度は、Boston大学のMarco Gaboardi氏およびZachery Casey氏と共同で、再帰的プログラムに対する次数付き不動点演算子の研究を行いました。この研究の目的は、一般の(止まらないかもしれない)プログラムの副作用の挙動を型理論的に分析する新たな手法を開発することにあります。本研究では次数の構造としてKleene代数を用いており、これにより型チェックの計算可能性を確保し、広いクラスのプログラムの自動検証ができるようになることを目指しています。

#### (4) 動的システムの数学的モデル

オートマトンやマルコフ鎖に代表される状態遷移系は、動的システムをモデル化し、その安全性や活性を分析するのに広く用いられています。状態遷移系において重要な概念の一つに双模倣関係があります。これは、遷移系の二つの状態が外部から区別できないことを定式化したものであります。1990年代後半、様々な状態遷移系を圏論の余代数として統一的に扱う手法が導入され、これに呼応して双模倣関係はファイバー圏に沿った関手の持ち上げとよばれる圏論的構造に対応することが判明しました。私はこの文脈において、余稠密持ち上げと呼ばれる関手の持ち上げ法を導入し、これが様々な双模倣関係に対応することを示しました。加えて余稠密持ち上げが定める双模倣関係に対し、それを特徴づけるゲームを標準的に構成できることが分かりました(論文(9))。今後はこのゲームをプログラム間の双模倣性やループ不変量の構成に応用することを予定しています。

#### 5. 主要な論文、著者等 (2021-2025年): 本人に2重下線、本学学生・大学院生には下線

(1) David Sprunger, Shin-ya Katsumata: Differentiable causal computations via delayed trace (extended version). Math. Struct. Comput. Sci. 35 (2025)

(2) Mayuko Kori, Kazuki Watanabe, Jurriaan Rot, Shin-ya Katsumata: Composing Codensity Bisimulations. LICS 2024: 52:1-52:13

(3) Ichiro Hasuo, Yuichiro Oyabu, Clovis Eberhart, Kohei Suenaga, Kenta Cho, Shin-ya Katsumata: Control-data separation and logical condition propagation for efficient inference on probabilistic programs. J. Log. Algebraic Methods Program. 136: 100922 (2024)

(4) Mayuko Kori, Kazuki Watanabe, Jurriaan Rot, Shin-ya Katsumata: Composing Codensity Bisimulations. LICS 2024: 52:1-52:13

(5) Tetsuya Sato, Shin-ya Katsumata: Divergences on monads for relational program logics. Math. Struct. Comput. Sci. 33(4-5): 427-485 (2023)

- (6) Shin-ya Katsumata, Xavier Rival, Jérémy Dubut: A Categorical Framework for Program Semantics and Semantic Abstraction. MFPS 2023
- (7) Koki Nishizawa, Shin-ya Katsumata, Yuichi Komorida: Stone dualities from opfibrations. J. Log. Algebraic Methods Program. 127: 100773 (2022)
- (8) Alejandro Aguirre, Shin-ya Katsumata, Satoshi Kura: Weakest preconditions in fibrations. Math. Struct. Comput. Sci. 32(4): 472-510 (2022)
- (9) Yuichi Komorida, Shin-ya Katsumata, Nick Hu, Bartek Klin, Samuel Humeau, Clovis Eberhart, Ichiro Hasuo: Codensity Games for Bisimilarity. New Gener. Comput. 40(2): 403-465 (2022)
- (10) Shin-ya Katsumata, Dylan McDermott, Tarmo Uustalu, Nicolas Wu: Flexible presentations of graded monads. Proc. ACM Program. Lang. 6(ICFP): 902-930 (2022)
- (11) Ohad Kammar, Shin-ya Katsumata, Philip Saville: Fully abstract models for effectful  $\lambda$ -calculi via category-theoretic logical relations. Proc. ACM Program. Lang. 6(POPL): 1-28 (2022)
- (12) Mayuko Kori, Natsuki Urabe, Shin-ya Katsumata, Kohei Suenaga, Ichiro Hasuo: The Lattice-Theoretic Essence of Property Directed Reachability Analysis. CAV (1) 2022: 235-256
- (13) Shota Motoura, Shin-ya Katsumata: On Inverse Operators in Dynamic Epistemic Logic. LFCS 2022: 217-235
- (14) David Sprunger, Shin-ya Katsumata, Jérémy Dubut, Ichiro Hasuo: Fibrational bisimulations and quantitative reasoning: Extended version. J. Log. Comput. 31(6): 1526-1559 (2021)
- (15) Alejandro Aguirre, Gilles Barthe, Marco Gaboardi, Deepak Garg, Shin-ya Katsumata, Tetsuya Sato: Higher-order probabilistic adversarial computations: categorical semantics and program logics. Proc. ACM Program. Lang. 5(ICFP): 1-30 (2021)
- (16) Mayuko Kori, Ichiro Hasuo, Shin-ya Katsumata: Fibrational Initial Algebra-Final Coalgebra Coincidence over Initial Algebras: Turning Verification Witnesses Upside Down. CONCUR 2021: 21:1-21:22
- (17) Marco Gaboardi, Shin-ya Katsumata, Dominic Orchard, Tetsuya Sato: Graded Hoare Logic and its Categorical Semantics. ESOP 2021: 234-263
- (18) Yoji Fukihara, Shin-ya Katsumata: Generalized Bounded Linear Logic and its Categorical Semantics. FoSSaCS 2021: 226-246
- (19) Yuichi Komorida, Shin-ya Katsumata, Clemens Kupke, Jurriaan Rot, Ichiro Hasuo: Expressivity of Quantitative Modal Logics : Categorical Foundations via Codensity and Approximation. LICS 2021: 1-14
- (20) Tsutomu Kobayashi, Rick Salay, Ichiro Hasuo, Krzysztof Czarnecki, Fuyuki Ishikawa, Shin-ya Katsumata: Robustifying Controller Specifications of Cyber-Physical Systems Against Perceptual Uncertainty. NFM 2021: 198-213
- (21) Clovis Eberhart, Akihisa Yamada, Stefan Klikovits, Shin-ya Katsumata, Tsutomu Kobayashi,

Ichiro Hasuo, Fuyuki Ishikawa: Architecture-Guided Test Resource Allocation via Logic.  
TAP@STAF 2021: 22-38

6. 主要な学会発表等 (2021-2025 年): 本人に 2 重下線、本学学生・大学院生には下線

(1) (招待講演) Shin-ya Katsumata. A Double Category Theoretic Analysis of Graded Linear Exponential Comonads, Linearity & TLLA 2020, 2020-04-20

(2) (招待講演) Shin-ya Katsumata. Codensity Games for Bisimilarity, Midland Graduate School, 2020-11-17

(3) (招待講演) Shin-ya Katsumata. Divergences on Monads for Relational Program Logic, MFPS2021, 2021-04-19

(4) (招待講演) Shin-ya Katsumata. Differentiable Causal Computation via Delayed Trace, Workshop of Future Computing, 2022-10-23

(5) (招待講演) Shin-ya Katsumata. Codensity Liftings and their Applications. Shin-ya Katsumata. 17th International Workshop on Coalgebraic Methods in Computer Science (CMCS 2024).

(6) (招待講演) Shin-ya Katsumata. Codensity Liftings and their Applications, Chocora meeting, 2025/02/27

7. その他特記事項 (2025 年度)

下記の国際会議のプログラム委員

The 8th International Conference on Applied Category Theory (ACT 2025)

The Mathematical Foundations of Programming Semantics (MFPS 2025)

# 研究成果報告書

数理科学科 田中立志

## 1. 研究テーマ

数論 (多重ゼータ値, 多重 L 値)

## 2. 要旨

多重ゼータ値や多重 L 値の間に成り立つ具体的な関係式族について、主に代数的な視点から研究している。とりわけ、数理物理に起源を持つ、ある組合せ論的 Hopf 代数に範を取って構成した根付き木写像は、多重ゼータ値や多重 L 値の間の大きな関係式族を与えている。最近はもっぱらこの根付き木写像を追究している。

## 3. 研究の背景

数論は主に、初等整数論、代数的整数論、解析数論、超越数論、数論幾何などに分類される。多重ゼータ値 (multiple zeta values, MZV)

$$\zeta(k_1, \dots, k_n) = \sum_{m_1 > \dots > m_n > 0} \frac{1}{m_1^{k_1} \dots m_n^{k_n}}$$

は古くは L. Euler (1707--1783) も研究していた対象であるが、その後は散発的な研究にとどまっていた。時を経て、計算機が充実してきたころに、D. Zagier が多重ゼータ値の近似値の高速計算を行う画期的なプログラムを開発し、いわゆる次元予想を提唱した。それ以降、多重ゼータ値の研究は急速に進展し、今もなお次々と新しい公式や概念などが発見されている。(確か) Mathematics Subject Classification (MSC) 2010 ではじめて、数学の分野の分類の中に multizeta values のフレーズが登場した(番号: 11M32)。

多重 L 値は多重ゼータ値の類似物の一つで、定義級数の分数の分子に指標を乗せた級数として定義される。多重ゼータ値と言った場合には多重 L 値などのバリエーションも含めた総称として認識される場合もある。多重ゼータ値は解析数論との関わりが強く、代数的整数論や超越数論や数論幾何との関わりもある。組合せ論や数理物理との関わりも強い。

(狭義の) 多重ゼータ値は、多重 L 値、Hurwitz 型、q 類似版、p 進版、多重 Eisenstein 級数、(アデリックな) 有限版、対称化版やその完備化版、多項式補間、single-valued 版、arborified 版などなど、その形を変えた対象の開発がたくさんなされ、裾野がどんどん広がってきている。

#### 4. 研究手法・成果

私は主に古典的な多重ゼータ値および多重 L 値 (multiple L-values, MLV) について代数的な視点から研究している。とくに、Zagier の次元予想を与えるに足る具体的な関係式族を代数的に捉えることを主眼に置いている。数式処理ソフト Risa/asir や PARI/GP など援用する。

私のこれまでの研究成果の一部を以下に記す。

(1) 【一般導分関係式の証明】

Connes-Moscovici の Hopf 代数を参考に金子昌信 (九州大学) は MZV の導分関係式の一般化を予想した。私はこの予想を解決することに成功した。(J. Number Theory に掲載)

(2) 【巡回和公式の代数的別証明】

Hoffman-大野などにより初等解析的に示された MZV の巡回和公式を、MZV の川島関係式に純代数的に帰着することに成功した。(若林徳子 (大阪電気通信大学) との共同研究、J. Algebra に掲載)

(3) 【等号付き MZV の特殊値】

ある自己双対なインデックスに対する等号付き MZV の特殊値が  $\pi$  の 2 乗のべき乗の有理数倍になることを示した。(近藤宏樹 (下関市立大学)、斎藤新悟 (九州大学) との共同研究、J. Number Theory に掲載)

(4) 【双対公式と導分関係式について】

重さ、深さ、インデックスの最初の引き数をすべて固定した MZV の和に関する双対公式が導分関係式に帰着できることを示した。(川崎菜穂 (元ゼミ生、弘前大学) との共同研究、Ramanujan J. に掲載)

(5) 【根付き木写像の定義とその性質】

Connes-Kreimer の根付き木 Hopf 代数を参考に、2 変数非可換多項式環上の写像として「根付き木写像」(rooted tree maps、RTM と略す) なるものを定義し、それらが MZV の間の大きな関係式族を記述することを発見し証明した。(Commun. Number Theory and Physics に掲載) また、H. Bachmann (名古屋大学) との共同で、MZV の導分関係式はいわゆる ladder maps からくる関係式族と同値であることも示した。(Int. J. Number Theory に掲載) これらを MLV へと拡張した研究成果もいくつかある。(J. Num. Th. や Algebra & Number Theory に掲載)

(6) 【根付き木ポリログの定義とその性質】

根付き木写像とも密接に関わる、根付き木ポリログなるものを新たに定義し、その代数的・組み合わせ論的性質をいくつか調べた。(Bull. Sci. Math. に掲載)

[現在研究中のテーマについて]

2018 年ごろより根付き木写像の追究を行っている。たちまちの課題としては、(非)

自明な primitive な元の特定、MZV の双対公式の根付き木写像による具体表示、Connes-Kreimer の Hopf 代数の双対 Hopf 代数を用いた解釈、natural growth と一般導分作用素との関係解明、などが挙げられる。Grothendieck-Teichmüller Lie 代数、mould 解析、ARI/GARI 理論、Kontsevich グラフ、T. Willwacher の仕事、F. Brown の仕事などとの関連にも期待を寄せている。また、根付き木写像の operadic な拡張、Hochschild cohomology 的視点からの拡張、射影直線マイナス 3 点の数論的基本群への作用としての根付き木写像の意義、 $\mathbb{Q}$  の絶対ガロア群との関連、数理解析における Feynman 振幅との関連なども模索したい。

安田正大氏（北海道大学）から 2018 年秋ごろにいただいたご教示の中で導入された根付き木ポリログについて、（いろいろな事情からしばらく手を付けられずにいたが、それも少し落ち着き、）2024 年ごろから研究し始めた。母関数と超幾何、ベルヌーイ数、MZV の関係式導出など、研究の方向はさまざまありうる。今後しばらくは根付き木写像と並行してこちらの研究も進めたい。

5. 主要な論文, 著者等 (2021-2025 年) : 本人に 2 重下線、本学学生・大学院生には下線

- (1) H. Murahara, T. Tanaka, *Algebraic aspects of rooted tree maps*, Ramanujan J. 60 (2022), no.1, 123—139.
- (2) T. Tanaka, N. Wakabayashi, *Rooted tree maps for multiple L-values*, J. Num. Th. 240 (2022), 471—489.
- (3) S. Ito, N. Wakabayashi, T. Tanaka, *On interpolated multiple L-values*, Acta Arith. 208 (2023), no.2, 171--183.
- (4) H. Murahara, T. Tanaka, N. Wakabayashi, *Rooted tree maps for multiple L-values from a perspective of harmonic algebras*, Alg. and Num. Th. 18(11) (2024), 2003—2025.
- (5) K. Kobata, T. Tanaka, N. Wakabayashi, *Rooted tree polylogarithms*, Bull. Sci. Math. 199 (2025), Article 103568.
- (6) H. Murahara, T. Tanaka, N. Wakabayashi, `On a family of relations of rooted tree maps', preprint.
- (7) K. Kobata, T. Tanaka, N. Wakabayashi, `On Bernoulli numbers indexed by rooted trees', preprint.

6. 主要な学会発表等 (2021-2025 年) : 本人に 2 重下線、本学学生・大学院生には下線

- (1) T. Tanaka, On interpolated multiple L-values, RIMS 共同研究「解析的整数論とその周辺」, 京都大学数理解析研究所, 2022.10.11—14.
- (2) 田中立志, On Yasuda's observation of rooted tree maps, Workshop on algebraic

- issues concerning classical MZVs, 広島工業大学, 2023.8.29—30.
- (3) 松下天音, MZV の特殊値に関する Charlton の結果の紹介, Workshop on algebraic issues concerning classical MZVs, 広島工業大学, 2023.8.29—30.
  - (4) 田中立志, RTM related assignments, Mini-workshop on multiple zeta values and modular forms, 近畿大学広島キャンパス, 2024.8.22—23.
  - (5) 松下天音, 根付き木 Hopf 代数の原始的な元の計算方法, Mini-workshop on multiple zeta values and modular forms, 近畿大学広島キャンパス, 2024.8.22—23.
  - (6) 田中立志, 根付き木 Hopf 代数と根付き木写像, Mini-workshop on multiple zeta values and modular forms II, 近畿大学広島キャンパス, 2025.8.20—21.
  - (7) 田中立志, 多重ゼータ値の根付き木写像関係式について, 東京科学大学整数論研究集会 (田口雄一郎先生還暦集会), 東京科学大学大岡山キャンパス, 2025.11.22—23.

## 7. その他特記事項 (2025 年度)

- (1) 外部資金  
科研費 基盤研究(C) 23K03059 (代表, 2023—2026 年度) 「根付き木写像と多重ゼータ値・多重 L 値の研究」
- (2) RIMS 解析数論研究集会運営委員 (2019—)
- (3) 研究集会「Mini-workshop on multiple zeta values and modular forms II」(近畿大学広島キャンパス) 主催
- (4) ホームページ <http://www.cc.kyoto-su.ac.jp/~tatsushi>
- (5) researchmap [https://researchmap.jp/tatsushi\\_tanaka](https://researchmap.jp/tatsushi_tanaka)

# 研究成果報告書

数理科学科 中嶋 祐介

## 1. 研究テーマ

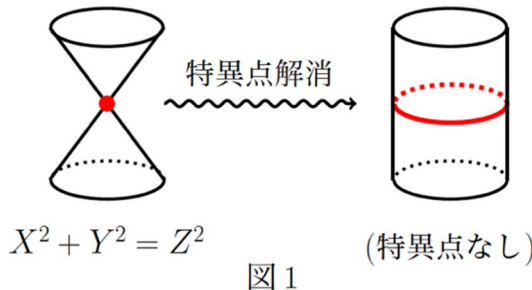
非可換クレパント特異点解消とその表現に関する研究

## 2. 要旨

「特異点」とは、尖ったり、自身と交差したりしている点である。調べたい図形が特異点を持つとき、その点において度々不都合なこと（微分不可能など）が起こり、図形の解析を困難にする。特異点は厄介な点ではあるが、その背後には豊かな構造が隠れており、特異点を考察することは、対象の図形を理解する上で不可欠である。本研究の目標は、「非可換クレパント特異点解消」と呼ばれる概念を通じて、特異点を理解することである。

## 3. 研究の背景

代数方程式（多項式=0 の形の方程式）の解集合を考えると図形（代数多様体と呼ばれる）が現れる。例えば、方程式  $X^2+Y^2-1=0$  の解集合を考えると、半径 1 の円が得られる。円は滑らかな図形であるが、考える代数方程式によっては、解集合として得られる図形の中に特異点が見ることがある。例えば、 $X^2+Y^2-Z^2=0$  という代数方程式を考えると、その解集合は図 1 の左図のようになる。特に赤色の点の特異点である。代数多様体の性質を解析するために、特異点を理解することは重要であるが、そのままの状態の特異点を調べることは難しい。特異点を調べる手法として、特異点を持つ代数多様体を、持たない代数多様体に変換する「特異点解消」という操作がある。特異点を持つ図形の代わりに、特異点解消をした図形を調べることにより、特異点の性質を説明することが可能となる。例えば、図 1 の右側は、 $X^2+Y^2-Z^2=0$  の解集合に現れる特異点を特異点解消したものである。



一方、近年「非可換特異点解消」という特異点解消の類似物が登場し、特異点の研究に新たな視点を与えている。非可換特異点解消における良いクラスである「非可換クレパント特異点解消 (NCCR = Non-Commutative Crepant Resolution)」は、とりわけ重要であり、「導来圏」と呼ばれる世界においては、通常の特異点解消と同等の情報を持っている。

このことから、NCCRに注目した特異点の研究が盛んになってきている。また、このNCCRを通じて、特異点論が他の数学の諸分野や数理物理との関わりを持つことも明らかになっている。NCCRに関しては「どんな特異点がNCCRを持つか」という基本的な問題がある。ここ20年程の研究で、多くの特異点に対してNCCRの存在が明らかになっているが、重要な特異点のクラスのひとつである「高次元のGorensteinトーリック特異点」については、部分的な結果はあるが、一般にはNCCRの存在が明らかになっていない。よって、このクラスに対するNCCRの存在を示すことは重要な問題である。

#### 4. 研究手法・成果

本研究では、「高次元の Gorenstein トーリック特異点に対して NCCR が存在するか」という問題を解決するため、トーリック多様体上の傾束という対象に着目した。傾束を用いた NCCR の構成は、NCCR が定義された当初から知られていたが、本研究ではこの手法を一般化することで、より多くのトーリック特異点に対して NCCR が構成できることを明らかにした（九州大学・埴原紀宏氏との共同研究）。例えば、「多項式環の Segre 積」や「因子類群が小さな日比環」に付随するトーリック特異点の NCCR は、先行研究において別の手法を用いて構成されていたが、本研究の手法でも構成可能であることを明らかにした。さらに、Geigle-Lenzing 射影直線の傾束からは、Du Val 特異点の NCCR が構成可能であるという既知の結果を拡張し、本研究の手法により toric compound Du Val 特異点の NCCR も構成可能であることを導き出した。傾束を用いた手法は、この他にも先行研究では扱えなかった多くのトーリック特異点に対して NCCR を構成することを可能にしており、さらなる拡張が期待される。

上記の NCCR の構成は、通常の意味での特異点解消の類似物を与えるだけでなく、環の表現論の観点からも重要である。NCCR を構成する過程で、「無限表現型代数」や「Calabi-Yau 代数」など、表現論において重要な対象が現れることが観察されており、これらの性質を用いて、表現論の視点から特異点の性質を捉えることが期待される。また、前述の Geigle-Lenzing 射影直線の傾束は、近年よく研究されており、特に傾束の「変異」は、団代数の理論と関連が深い。団代数は、様々な数学分野や数理物理と関係がある対象であるため、本研究で得られた成果と他分野との接点を見つけることにより、さらなる研究の進展が見込まれる。

#### 5. 主要な論文、著者等（2021-2025年）：本人に2重下線、本学学生・大学院生には下線

- (1) Y. Nakajima, Variations of GIT quotients and dimer combinatorics for toric compound Du Val singularities, arXiv:2309.16112
- (2) A. Higashitani and Y. Nakajima, “Combinatorial mutations of Newton-Okounkov polytopes arising from plabic graphs”, McKay Correspondence, Mutation and Related Topics, Advanced Studies in Pure Mathematics Vol. 88. (2023), pp. 227-278.

- (3) J. Jeffries, Y. Nakajima, I. Smirnov, K. Watanabe, and K. Yoshida, “Lower bounds on Hilbert–Kunz multiplicities and maximal F-signatures”, *Math. Proc. Cambridge Philos. Soc.*, 174 (2023), no. 2, 247–271.
- (4) Y. Nakajima, “On 2-representation infinite algebras arising from dimer models”, *Quarterly Journal Math.*, 73 (2022), no. 4, 1517–1553.
- (5) A. Higashitani and Y. Nakajima, “Deformations of Dimer Models”, *SIGMA* 18 (2022), 030, 53 pages.
- (6) A. Higashitani and Y. Nakajima, “Generalized F-signatures of Hibi rings”, *Illinois J. Math.* 65 (2021), no.1, 97–120.

6. 主要な学会発表等 (2021–2025 年) : 本人に 2 重下線、本学学生・大学院生には下線

- (1) Y. Nakajima, “On constructions of non-commutative crepant resolutions for some toric singularities”, 第2回環論表現論ワークショップ in 信州, 信州大学(2024/12/27).
- (2) Y. Nakajima, “New examples of toric NCCRs arising from conic modules”, 正標数の可換環論とその周辺2024 in 淡路島(2024/3/28).
- (3) Y. Nakajima, “Mutations and wall-crossings for dimer models associated to toric cDV singularities”, *Advances in Cluster Algebras 2024*, 名古屋大学 (2024/3/12).
- (4) Y. Nakajima, “Wall-and-chamber structures for algebras associated to toric cDV singularities”, 南大阪代数セミナー, 大阪公立大学i-Siteなんば (2024/1/11).
- (5) Y. Nakajima, “Projective crepant resolutions of toric cDV singularities and dimer combinatorics”, *McKay correspondence, Tilting theory and related topics*, Kavli IPMU (2023/12/22).
- (6) Y. Nakajima, “Dimer models in representation theory” (Gong show talk), *Silting in Representation Theory, Singularities, and Noncommutative Geometry*, Casa Matematica Oaxaca (2023/9/12).
- (7) Y. Nakajima, “Wall-and-chamber structures of stability parameters for some dimer quivers”, 第55回環論および表現論シンポジウム, 大阪公立大学 (2023/9/7).
- (8) Y. Nakajima, “On crepant resolutions of toric cDV singularities”, 東京可換環論セミナー(2023/4/20).
- (9) Y. Nakajima, “Dimer combinatorics for toric cDV singularities”, 特異点セミナー, 東京大学 (2023/3/14).
- (10) Y. Nakajima, “Dimer combinatorics for 3-dimensional toric hypersurfaces”, *IPMU 特異点セミナー*, 東京大学 Kavli IPMU (2022/10/28).

- (11) Y. Nakajima, “The Homological MMP for three dimensional toric hypersurfaces”, 可換環論の新しい融合セミナーII, 大阪市立大学 (2022/3/9).
- (12) Y. Nakajima, “Combinatorial mutations of polytopes arising from plabic graphs”, Infinite Analysis 21 Workshop Around Cluster Algebras (2021/9/28).
- (13) Y. Nakajima, “Combinatorial mutations and deformations of dimer models”, Online Algebraic Geometry Seminar, Nottingham University (2021/6/24).

## 7. その他特記事項 (2025 年度)

### (1) 外部資金

日本学術振興会基盤研究(C) 24K06698

「非可換代数を用いたトーリック特異点とその特異点解消の研究」

# 研究成果報告書

数理科学科 長瀬 睦裕

## 1. 研究テーマ

- (1) 数学の探究学習に用いる優良な教材の研究
- (2) 中等教育における数学の探究学習を指導できる教員の養成プログラムの開発

## 2. 要旨

- (1) 中学校の総合的な学習の時間や高等学校の総合的な探究の時間、さらに新しい教科である理数科において、生徒の探究学習として扱うことのできる数学の問題や、数学を活用して考察できる課題について研究を行っている。指導者から一方的に問題を与えるのではなく、中学生・高校生自身が問題を設定・作成し、主体的に探究学習に取り組むことができる教材の研究および開発を行う。
- (2) 上記の探究学習を指導できる教員に必要な能力を明らかにし、その能力を獲得することができる養成プログラムの開発を行う。

## 3. 研究の背景

高等学校における学習形態は、従来の講義型授業に加えて、探究型の学習の導入により大きく変化してきている。探究型学習における教員の役割は、個々の生徒にとって適切な探究課題を生徒とともに設定し、一定の成果が得られるよう教材化するとともに、学習の過程を見守りながら適切な支援によって探究活動を継続させることである。しかし、教育現場においては、数学に関する探究学習の実施率は依然として低い水準にとどまっている。そのため、教育効果が期待できる優良な教材の開発と、探究学習を指導できる教員の養成が急務となっている。

## 4. 研究手法・成果

- (1) 探究学習で扱う問題については、生徒自身が課題を設定することが重要である。本研究で開発している探究問題は、学習者が自ら問題を作成できるような「問題の素」となる教材であり、確定した問題を与えてその解決のみを活動とする従来型の学習とは異なる。また、本教材は新たな数学知識の習得を前提として事前学習を課すものではなく、学習者がその時点で有する数学的知識や技能を用いて直ちに探究活動を開始できることを目指している。そのため、教材には柔軟性を持たせ、学習者の興味・関心に基づく課題設定を可能にする構造を備えるよう設計している。開発した教材については、2026年度の出版を目指している。

(2) 教員養成については、教職課程に在籍する高等学校数学の教員免許取得希望者を対象に、授業課題として数学の探究活動の実践を行わせている。この実践を通して、探究学習の指導者として必要な能力の獲得過程と、その能力を育成するための効果的な養成プログラムとの関係进行分析している。特に、問題作成力と問題解決力の獲得に必要な学びの内容を明らかにすることを研究の中心課題としている。

この取り組みは今年度で6年目となる。これまでに蓄積してきたデータを分析した結果、探究活動の前後で「問題作成力」および「問題解決力」に対する自信が統計的に有意に向上することが確認された。また、自由記述の内容分析から、探究心、継続力、数学的思考力、情報収集力、分析力、プレゼンテーション力、コミュニケーション力といった複数の能力が向上したことが推測される。さらに、学生が作成した探究問題の変遷を分析した結果、多くの学生が探究課題を自立的に作成できるようになったことが確認された。

以上の結果から、数学教員養成において探究実習は、探究指導に必要な能力の形成に有効な方法であることが示唆された。本研究の成果は、本学の教職研究紀要にて公開する。

#### 5. 主要な論文、著者等 (2021-2025 年)

- (1) 長瀬睦裕、数学の探究活動を指導できる教員養成プログラムの実践報告と成果の検証 -問題作成から成果発表までの1年間の活動から-、京都産業大学教職研究紀要、Vol.21, pp.1-16, 2026.
- (2) 牛瀧文宏、長瀬睦裕、数学探究活動における高大連携と ICT 活用の有効性 -教員対象セミナーから見える生徒の指導への示唆-、京都産業大学教職研究紀要、Vol.21, pp.17-24, 2026.

#### 6. 主要な学会発表等 (2021-2025 年)

- (1) 長瀬睦裕、教職課程の学生による数学の探究学習の実践報告 -問題作成から成果発表までの1年間の活動から-、数学教育学会 2025年度春季年会

#### 7. その他特記事項 (2025 年度)

- (1) 京都府立朱雀高等学校 講演「数学探究のすすめ-新しい問題を作ろう-」のべ5回
- (2) 京都府立園部高等学校 講演 Area Study 講座 (課題探究型の講座)
- (3) 京都府立高等学校数学会 講演「数学探究をどう指導するか：生徒が問いを生み出す授業づくり」
- (4) 京都産業大学理学部数理科学科主催 高等学校数学科探究活動公開セミナー 趣旨説明
- (5) 高等学校数学 I、II、III、A、B、C の検定教科書 (啓林館) 編集協力

# 研究成果報告書

数理科学科 難波 隆弥

## 1. 研究テーマ

一般化二項定理から誘導される分数階二項分布とその性質

## 2. 要旨

一般化二項定理と言われる主張から自然に定義される離散型確率分布である分数階二項分布の確率論的性質について調べた。今年度も引き続き日野正訓氏(京都大学)との共同研究を行い、分数階二項分布に関して大偏差原理ならびに中偏差原理が成り立つことを証明した。また以前に証明した分数階二項分布の中心極限定理のさらなる精密化として、その収束誤差評価にあたる Berry-Esseen 型評価を示すことに成功した。

## 3. 研究の背景

一般化二項定理が自然に誘導する離散型確率測度である「分数階二項分布」を日野正訓氏(京都大学)との共同研究において導入し、昨年度までにモーメントの具体的表示や基本的な極限定理(大数の法則、Poisson の少数の法則、中心極限定理)等の確率論的性質を調べた。大数の法則の観点からは平均からどれくらいの速さで確率減衰が起こるかを述べる大偏差原理を調べることは基本的な問題意識であり、中心極限定理の観点からは標準正規分布への収束の誤差のスピード評価は応用上重要な問題である。今年度はこれらの問題についての解決を試みた。

## 4. 研究手法・成果

筆者が昨年度に実施した日野正訓氏(京都大学)との共同研究において、「分数階二項分布」に関する基本的な極限定理である大数の法則や中心極限定理を得ることができた。大数の法則を示したことにより、その平均から大きく離れた事象に関する確率減衰を記述する大偏差原理が次の自然な研究対象となる。実際、大偏差原理の一般論で有名な Gärtner-Ellis の定理を分数階二項分布の対数モーメント母関数に適用することにより、その Fenchel-Legendre 変換を速度関数とする大偏差原理が成り立つことを証明した。また、速度関数は古典的な二項分布の速度関数の定数倍で与えられることを示した。さらに、大数の法則と中心極限定理の間の任意の中間スケールにおける確率減衰を記述する中偏差原理が成り立つことを示すことに成功し、対応する速度関数の具体的表示を与えた。一方で、中心極限定理に続く問題として標準正規分布への収束の誤差のスピード評価を得ることを目指して研究を行った。一般に分数階二項分布は独立同分布な確率変数の和として表せることが期待できないため、その証明には既存のテクニックを安易に

適用することはできない。このような誤差評価を得るには対応する特性関数の誤差評価が得られれば十分であるので、原点近傍における特性関数の具体的表示を丁寧に用いることでその評価を達成した。これまでに示した一連の極限定理により、分数階二項分布に関する確率論的な基本性質は概ね得られたことになる。しかしながら、分数階二項分布の再生性に関する議論や、Poisson の少数の法則を通じて得られる Poisson 分布の分数階版にあたる離散確率分布の無限分解可能性等、確率論的には基本的でありながらもまだ明らかになっていない問題がある。次年度以降も引き続きそれらの解明にあたる。

#### 5. 主要な論文、著者等 (2021-2025 年) : 本人に 2 重下線

- (1) S. Ishiwata, H. Kawabi and R. Namba, Central limit theorems for non-symmetric random walks on nilpotent covering graphs: Part II, Potential Analysis **55** (2021), 127-166.
- (2) R. Namba, Laws of iterated logarithm on covering graphs with groups of polynomial volume growth, Forum Mathematicum **33** (2021), 129-145.
- (3) R. Namba, Edgeworth expansions for centered random walks on covering graphs of polynomial volume growth, Journal of Theoretical Probability **35** (2022), 1898-1938.
- (4) T. Kubo and R. Namba, Monotonic normalized heat diffusion for regular bipartite graphs with four eigenvalues, Graphs and Combinatorics **38** (22) (2022), 1-16.
- (5) J. Akahori, R. Namba, and S. Semba, Limit theorems for iterates of the Szász-Mirakyan operator in probabilistic view, Journal of Theoretical Probability **36** (2023), 1321-1338.
- (6) R. Namba, Rate of convergence in Trotter's approximation theorem and its applications, Tokyo Journal of Mathematics **46** (2023), 47-62.
- (7) T. Aoyama, R. Namba and K. Ota, Asymptotic behaviors of convolution powers of the Riemann zeta distribution, Lithuanian Mathematical Journal **63** (2023), 1-12.
- (8) J. Akahori, R. Namba, and A. Watanabe, The SIML method without microstructure noise, Japanese Journal of Statistics and Data Science **7** (2024), 677-700.
- (9) T. Aoyama and R. Namba, On some properties of a positive linear operator via the Moran model in population genetics, Mediterranean Journal of Mathematics **22**, 89 (2025).

#### 6. 主要な学会発表等 (2021-2025 年) : 本人に 2 重下線、本学学生・大学院生には下線

- (1) R. Namba, Long-time asymptotics of random walks on covering graphs of polynomial volume growth, 立命館幾何セミナー(オンライン), 立命館大学, 2021年4月.
- (2) R. Namba, Long time asymptotics of random walks on covering graphs with groups of polynomial volume growth, 東北幾何セミナー(オンライン), 東北大学, 2021年6月.
- (3) R. Namba, RWs on covering graphs with groups of polynomial volume growth via discrete geometric analysis, 第68回幾何学シンポジウム(オンライン), 北海道大学, 2021年9月.
- (4) R. Namba, Edgeworth expansions on covering graphs in a geometric view, 広島幾何学ワークショップ(オンライン), 広島大学, 2021年10月.
- (5) 難波 隆弥, Trotter の半群収束定理の精密化とその応用, 東京確率論セミナー, 東京大学, 2022年5月.
- (6) 難波 隆弥, 離散群上のランダムウォークの極限定理, 第6回幾何学的群論ワークショップ, 愛媛大学, 2022年10月.
- (7) 難波 隆弥, Some limit theorems for iterates of Bernstein-type operators, 関西確率論セミナー, 京都大学, 2023年6月.
- (8) 難波 隆弥, ベキ零被覆グラフ上のランダムウォークの極限定理, 2023年度日本数学会秋季総合分科会, 統計分科会特別講演, 東北大学, 2023年9月.
- (9) R. Namba, Iterates of Bernstein-type operators and some diffusions in population genetics, Stochastic Analysis (RIMS Research Project 2023: Stochastic Processes and Related Fields), 京都大学数理解析研究所, 2023年11月.
- (10) R. Namba, Iterates of Bernstein-type operators and some diffusions in population genetics, 阪大確率論セミナー, 大阪大学, 2023年11月.
- (11) R. Namba, Iterates of Bernstein-type operators and some diffusions in population genetics, 九州確率論セミナー, 九州大学, 2024年1月.
- (12) 難波 隆弥, 正值線形作用素の反復の極限定理の新展開, 大阪大学理学部数学科談話会, 2024年6月.
- (13) R. Namba, Diffusion processes in population genetics and iterates of some positive linear operator, 16<sup>th</sup> Mexico-Japan Probability Seminar, 2024年10月.
- (14) 難波 隆弥, Fractional binomial distributions induced by the generalized binomial theorem and their applications, 2024年度確率論シンポジウム, 2024年12月.
- (15) R. Namba, Fractional binomial distributions induced by the generalized

binomial

theorem and their applications, Third China-Japan-Korea Joint Probability Workshop, 2025年5月.

(16) 難波 隆弥, 多重ゼータ関数と高次元ランダムウォーク, 立命館量子ウォークセミナー, 2025年5月.

ナー, 2025年5月.

(17) 難波 隆弥, 分数階二項分布に関する極限定理, 確率解析とその周辺, 2025年11月.

(18) 難波 隆弥, 分数階二項分布に関する極限定理, 大分確率論セミナー, 2025年12月.

#### 7. その他特記事項 (2025年度)

(1) 科学研究費補助金(若手研究 23K12986)「ランダムウォークの極限定理の新展開」研究代表者

(2) 科学研究費補助金(基盤研究(C), 23K03155)「幾何解析の視点を融合した無限次元空間上の確率解析」研究分担者

# 研究成果報告書

数理科学科 西 慧

## 1. 研究テーマ

反応拡散系における局在解の界面ダイナミクス

## 2. 要旨

反応拡散方程式で見られる解のダイナミクスを数値計算や分岐解析により調べている。

## 3. 研究の背景

自然界で見られる様々なパターン形成を記述するモデル方程式として、反応拡散系とよばれる非線形偏微分方程式のクラスがある。

$$U_t = D\Delta U + F(U, k)$$

$N$ 成分系の場合、 $U = U(x, t)$  は  $U(x, t) = (u_1(x, t), \dots, u_N(x, t))$  で与えられ、

実際の現象では時刻  $t$ 、位置  $x \in R^n$  における化学物質の濃度や個体数密度な

どを表す。数値計算を行うと、成分の数  $N$  や反応項  $F$  の関数形、パラメータ

$D$ 、 $k$  の値などに応じて、縞模様や水玉模様、ラセン波や自己複製、時空カ

オスといった多様な時空間パターンが現れる。なかでも、定常解や進行波解、

周期解など十分時間が経過したときにみられる解については、存在や安定性、解の評価など解析的な枠組みが整備されてきているが、一方で、より複雑なパターンや遷移ダイナミクスについては十分に理解が進んでいない。本研究では主に反応拡散方程式でみられるダイナミクスについて、力学系理論の観点からパターンの時間変化を特徴付け、理解することを目標としている。本年度は以下のテーマについて研究を行なった:

- (1) 非一様媒質中でのパルス解の振る舞い
- (2) 局所外力による進行解の運動制御

いずれのテーマも、局在解（パルス解やスポット解のように空間的に局在化した解）とよばれるパターンに着目し、数値計算や縮約などの解析によりそのダイナミクスを調べている。

## 研究手法・成果

- (1) 非一様媒質中でのパルス解の振る舞い

局在解が現れる系として、FitzHugh-Nagumo 型の非線形項をもつ以下の 3

成分反応拡散方程式を考える (Purwins et al., 1997):

$$\begin{cases} \varepsilon u_t = \varepsilon^2 u_{xx} + u - u^3 - (\alpha v + \beta w + \gamma) \\ \tau v_t = D_v v_{xx} + u - v \\ \theta w_t = D_w w_{xx} + u - w \end{cases} \quad (1)$$

パラメータ  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  が適当な条件を満たすとき系(1)は双安定系となり、界面をもつパルス解やフロント解が現れる。ここでは定数項  $\gamma$  の値が  $\gamma(x) = \gamma_1(x < 0)$ ,  $\gamma_2(x \geq 0)$  のように空間変数  $x$  に応じて変化する状況を考える。このような空間非一様性をもつ系では、ジャンプ点  $x = 0$  の近くにフロントやパルスの界面がトラップされる現象 (pinning) が知られており、その存在や安定性が解析的に明らかになっている (v.Heijuster et al., 2011, 2018. 一方、界面が時間周期的に振動するパルス解 (振動パルス解) も様々な反応拡散系に現れるが、非一様性がそのような振動パルス解にどのような影響を与えるかは不明であった。実際に数値計算を行うと、定常パルス解の場合と同様にジャンプ点付近に振動パルス解がトラップされること、および、初期位置に応じて振動パルス解の移動方向が異なることが分かった。そのメカニズムを調べるため、3成分反応拡散方程式に対して複数の縮約を段階的に行うことで、振動パルス解の動きを定性的に再現する2変数の常微分方程式を導出した:

$$\begin{cases} \dot{p} = -\frac{1}{4Q} \frac{\Delta\gamma}{m_0} \left\{ h\left(p + \frac{h^*}{2}\right) - h\left(p - \frac{h^*}{2}\right) \right\}, \\ \dot{\phi} = \omega + \frac{\Delta\gamma}{4\omega_0 m_0} \left\{ h'\left(p + \frac{h^*}{2}\right) + h'\left(p - \frac{h^*}{2}\right) \right\}. \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 $p(t)$  と  $\phi(t)$  はそれぞれパルスの位置と振動の位相を表す変数である。式(2)の第1式はパルスの並進運動を記述するが、変数  $p$  で閉じており、第2式から位相  $\phi$  は  $p$  の値に応じて決まる。この  $p$  に関する1次元力学系を解析することで、振動パルス解がトラップされる場所や移動方向が固定点とその安定性により決まること、また固定点の個数もパラメータ  $\alpha, \beta$  の符号によって変わることがわかり、反応拡散方程式の数値計算で見られる振る舞いのメカニズムを力学系の観点から明らかにした。

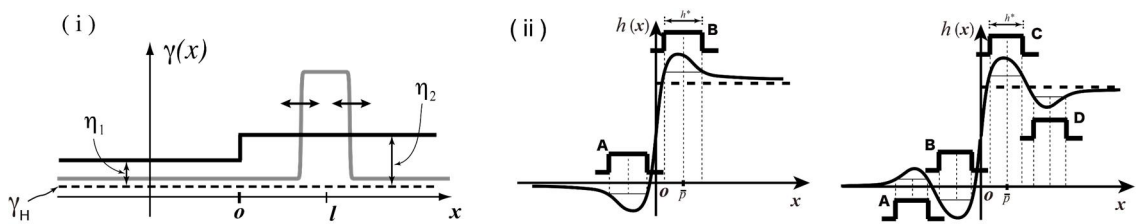


図1 (i) 振動パルス解とジャンプ型非一様性との相互作用, (ii) 関数  $h(x)$  の概形.

## (2) 局所外力による進行解の運動制御

反応拡散系では、一定の形状を保ったまま移動するパルス解やフロント解

(進行解) の存在が知られており、その存在や安定性についてこれまでに多

くの研究が行われているが、このような進行解の運動をどのように制御する

かという問題も応用上重要であり、さまざまな方法が考案されてきた。先行研究 (Löber et al., 2014, Marstens et al., 2021) ではこれらの解が平行移動の自由度 (並進対称性) を持つことを利用し、局所的な外力を加えることで進行解の軌道や速度を制御する方法を提案している。一方、このような解はパラメータの変化によりしばしば分岐を起こし、複数の解が共存することも多いが、そのような状況下での制御可能性については明らかになっていない。

本研究では空間 1 次元の反応拡散系

$$U_t = DU_{xx} + F(U, k) \quad (3)$$

(  $U(x, t) = (u_1(x, t), \dots, u_N(x, t))$ ,  $t > 0$ ,  $x \in R$  ) において、定常解から進行解への pitchfork 分岐点 (drift 分岐点)、および、そのような drift 分岐と saddle-node 分岐とが同時に起きる複合分岐点 (drift-saddle-node 分岐点) に着目し、進行解に一定強度の (弱い) 外力を局所的に加え続けることで、その振る舞いを制御する方法について考察した (図 2)。このような分岐点近傍での解の挙動は元の方程式系によらない普遍的な方程式 (標準形) で記述されることが知られており、本研究においても、進行解の動きを記述する縮約方程式 (2 変数, および 3 変数の常微分方程式系) を導出、解析することで局

所的な外力に対する進行解の応答を調べた。その結果、外力の大きさや持続時間に応じて進行方向の反転や進行パルス解の一時的な停止、進行パルス解の自己複製などの変化が起きることがわかり、そのメカニズムを分岐や安定(不安定)多様体の観点から明らかにした。また、反応拡散方程式に現れる進行解に対しても数値計算を行い、これらの結果が成り立つことを確認した。

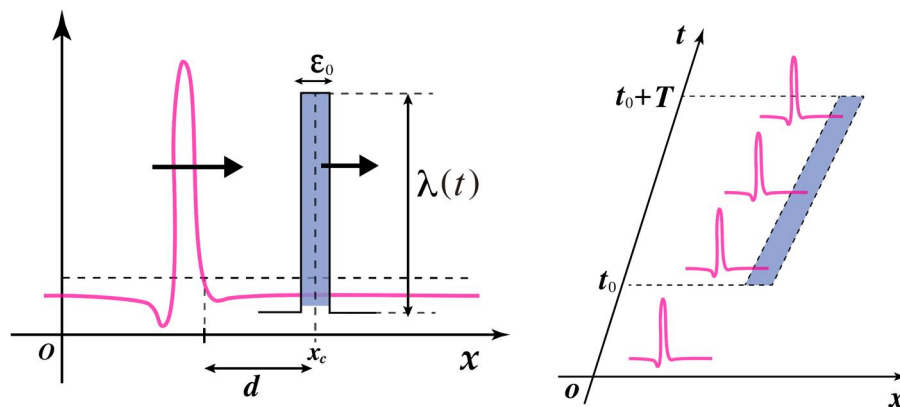


図2 式(3)に現れる進行解と一定の距離  $d$  を保ちながら、幅  $\varepsilon_0$  の局所的な外力を一定時間加える

#### 4. 主要な論文、著書等 (2021-2025 年): 本人に 2 重下線、本学学生・大学院生には下線

- (1) 西 慧: 反応拡散系に現れるパルス解の縮約を用いた分岐解析と集団ダイナミクスへの応用, 応用数理, 第 35 巻 (2025), 162—174.
- (2) M. Matsuo, K. Yasuda, K. Nishi, M. Kuze, H. Kitahata, Y. Nishiura, and S. Nakata: *Originating point of traveling waves on a spherical field dependent on*

*the nature of substrate surface*, J. Phys. Chem. C, **127** (2023), 1841--1847.

5. 主要な学会発表等 (2021-2025 年) : 発表者はすべて本人

(1) 余次元 2 の分岐点近傍における進行パルス解の局所外力によるダイナミクス制御について, 日本数学会 2026 年年会, 東京理科大学, 2026 年 3 月.

(2) 分岐構造にもとづいた局在解の運動制御について, 日本応用数理学会 2025 年度年会, 東京理科大学, 2025 年 9 月.

(3) Pulse bifurcations in a three-component FitzHugh-Nagumo system, ICIAM2023, 早稲田大学, 2023 年 8 月.

(4) 3 種反応拡散方程式のパルスダイナミクスについて, 日本数学会 2023 年年会, 中央大学, 2023 年 3 月.

(5) Pulse bifurcations in a three-component FitzHugh-Nagumo system, ReaDiNet2023, Paris-Saclay University, 2023 年 1 月.

6. その他特記事項 (2025 年度)

特になし

# 研究成果報告書

数理学科 瀨野 佐知子

## 1. 研究テーマ

開リーマン面のモジュライと接続を用いた多変数関数論の新展開

## 2. 要旨

複素 2 次元擬凸領域をそこで定義された正則関数の定数面/ファイバーの族として捉えたとき、ファイバー上に全空間の擬凸性を反映する良いモジュライを新たに構成することで、2 次元擬凸領域のモジュライ理論を展開することである。特に、領域の擬凸性の影響による剛性定理を定式化（全空間が直積領域と双正則同値であるための必要十分条件など）し、開リーマン面の擬凸変動に対する同時一意化定理の改良・拡張に挑む。

## 3. 研究の背景

多変数複素正則関数が定義される領域は複素  $n$  次元空間上で擬凸であることが知られている。1 変数複素関数では表出しない擬凸領域、そしてその一般化であるスタイン多様体の形状を多角的（複素解析的、微分幾何学的、代数幾何学的）な観点から理解することは、この 100 年に渡って多変数関数論の指導原理となり、現在も活発な研究が続けられている。

## 4. 研究手法・成果

コンパクト複素多様体の解析族に対する剛性は小平-Spencer 理論をふまえて Fischer-Grauert (1965) で示されているが、開リーマン面の変形族に関するものはまだ未解決である。1 変数関数論では閉リーマン面の位相的性質は種数で、解析的性質はそのモジュライで完全に決定される。一方で、無限型リーマン面の分類理論が示すように、開リーマン面のもつ複素解析的にもポテンシャル論的にも極めて豊富な多様性は、リーマン面の変形族や変形空間にも及ぶはずである。そのような開リーマン面の分類に対しても、擬凸領域の影響による剛性・一様性定理がどこまで成立するかという重要な問いがある。これまでの研究から単葉型の場合、および種数が 1 の場合は解決済みであり、現時点では有限種数正の開リーマン面に対する同時一意化問題に取り組んでいる。

本研究の遂行では、開リーマン面論と多変数複素関数論とのそれぞれの手法の融合を特徴的な方法としている。国内外においてベルグマン核の変動に

ついて詳しく考察され精密化が進んでいるが、本研究ではベルグマン核以外の等角不変量（調和スパン，Schiffer スパン，柴スパンなど）に対する新しい変分公式を確立し、全空間の擬凸性を反映する種々の等角不変量の変動の解析へと進化している点が独特である。領域変分理論は正則葉層理論の観点からも注目されており、関数論、幾何学、および凸解析の交差点であり、分野間の相互作用が期待できる。

#### 5. 主要な論文、著者等（2021-2025年）：本人に2重下線

- (1) Sachiko Hamano, Directional moduli and pseudoconvexity, Essays on Geometry (Ed. A. M. Uludaug, A. Zeytin), Springer Cham, 343p., 65-79 2025年1月28日 65-79 (ISBN: 978-3-031-76256-7).
- (2) Sachiko Hamano, Subharmonicity of a span associated with the moduli disk, Mathematisches Forschungsinstitut Oberwolfach Report 2023, 33 (Oberwolfach Workshop 2331-Teichmüller Theory: Classical, Higher, Super and Quantum), 15-18 (DOI 10.4171/owr/2023/33).
- (3) Sachiko Hamano, On rigidity of pseudoconvex domains fibered by open Riemann surfaces according to directional moduli, Mathematische Zeitschrift 300 (2022), no.1, 979-993 (DOI 10.1007/s00209-021-02822-7).
- (4) Sachiko Hamano, Variational formulas for principal functions and applications, Teichmüller Theory and Grothendieck-Teichmüller Theory (Ed. L. Ji, A. Papadopoulos, W. Su), Advanced Lectures in Mathematics 49 (2022), 29-50 (hal-03921666).
- (5) 濱野佐知子, 「特殊関数探訪：三角関数からはじめる不思議な世界」第1部 三角関数：複素数の世界での三角関数, 数学セミナー編集部, 日本評論社 2024年9月 (ISBN: 9784535790193).
- (6) 濱野佐知子, 「数学者の選ぶ「とっておきの数学」」第2部 私の選ぶ「とっておきの数式」：岡の上空移行の原理, 数学セミナー編集部, 日本評論社 2023年9月 (ISBN: 9784535790025).
- (7) 濱野佐知子, 手を動かしてまなぶ 複素関数, 裳華房 (2026年度出版予定).

#### 6. 主要な学会発表等（2021-2025年）：本人に2重下線

- (1) 濱野佐知子, 開リーマン面の擬凸変動におけるスパン関数の劣調和性, 2025年度ポテンシャル論研究集 (名城大学) 2026年2月15日.
- (2) 濱野佐知子, 開リーマン面の変動に関する2階変分公式と擬凸領域, 2025年度多変数関数論冬セミナー (九州大学) 2025年12月20日.

- (3) 濱野佐知子, Subharmonicity of a span associated with the moduli disk, 2023 年度拡大版「リーマン面・不連続群論」研究集会 第一部：松江 THE ファイナル（島根大学）2024 年 3 月 5 日.
- (4) 濱野佐知子, 領域の変動に関する 2 階変分公式と擬凸領域, 「等角写像・値分布論」合同研究集会（九州大学 西新プラザ）2024 年 2 月 11 日.
- (5) 濱野佐知子, Subharmonicity of a span associated with the moduli disk, 2023 年度研究集会「リーマン面に関連する位相幾何学」（東京大学）2023 年 8 月 21 日.
- (6) Sachiko Hamano, Subharmonicity of a span associated with the moduli disk, Oberwolfach Workshop 2331-Teichmüller Theory: Classical, Higher, Super and Quantum; Jul.30-Aug.4, 2023 (The Mathematisches Forschungsinstitut Oberwolfach, ドイツ) 2023 年 7 月 31 日.
- (7) Sachiko Hamano, Subharmonicity of a span associated with the moduli disk, HAYAMA Symposium on Complex Analysis in Several Variables XXIV, July 15-18, 2023 (Shonan village center, JAPAN) 2023 年 7 月 18 日.
- (8) 濱野佐知子, The period matrices of an open Riemann surface and its closings in the Siegel upper half space, 2022 年度「リーマン面・不連続群論」研究集会（オンライン開催）2023 年 2 月 16 日.
- (9) 濱野佐知子, The period matrices of an open Riemann surface and its closings in the Siegel upper half-space, Workshop: Quasi-conformal mappings, hyperbolic geometry and Riemann surfaces（大洲市民会館）2023 年 1 月 9 日.
- (10) 濱野佐知子, Variational formulas for hydrodynamic differentials and application to the simultaneous uniformization problem, 2022 年度 多変数関数論冬セミナー（東京大学数理科学研究科）2022 年 12 月 19 日.
- (11) Sachiko Hamano, The period matrices of an open Riemann surface and its closings in the Siegel upper half-space, Conference in honor of 65th birthday of Athanase Papadopoulos (Galatasaray University, トルコ) 2022 年 6 月 24 日.
- (12) 濱野佐知子, The period matrices of an open Riemann surface and its closings in the Siegel upper half space, 日本数学会年会（オンライン開催）2022 年 3 月 28 日.
- (13) 濱野佐知子, リーマン面の擬凸変動における方向モジュライの剛性について, 大阪市立大学数学研究所談話会（大阪市立大学）2022 年 3 月 23 日.

- (14) 濱野佐知子, On rigidity of pseudoconvex domains fibered by open Riemann surfaces according to directional moduli, Prospects of Theory of Riemann Surfaces (オンライン開催) 2021年12月11日.
- (15) 濱野佐知子, The period matrices of an open Riemann surface and its closings in the Siegel upper half space, 東工大複素解析セミナー (オンライン開催) 2021年7月2日.
- (16) 濱野佐知子, The hydrodynamic period matrices and closings of an open Riemann surface of finite genus, 東京大学複素解析幾何セミナー (オンライン開催) 2021年1月18日.

#### 7. その他特記事項 (2025年度)

参照 URL [https://researchmap.jp/hamano\\_sachiko](https://researchmap.jp/hamano_sachiko)

- (1) 学術研究助成基金助成金 基盤研究(C) 23K03140 (研究代表者)  
「開リーマン面のモジュライと接続を用いた多変数関数論の新展開」
- (2) 大阪公立大学数学研究所 客員教授

# 研究成果報告書

数理科学科 三好 博之

## 1. 研究テーマ

圏論（特に弱高次元圏と計算機科学への応用）、数理論理学（特にホモトピー型理論）、計算の哲学（哲学的、数学的、計算機科学的側面について）

## 2. 要旨

計算という現象について哲学的、数学的、計算機科学的な考察および実践を行う「計算の哲学」プロジェクトは、2002年頃に始まり現在も研究を継続している。2021年度からは圏論と人工知能についての共同研究を始めている。これは JST ムーンショットプロジェクト目標3の一部でもある。

## 3. 研究の背景

2002年頃から始めた「計算の哲学」プロジェクトは、過去3回に渡って三好を研究代表者として科研費基盤研究(B)に採択されており、現在は神戸大学の菊池誠氏を代表者とする科研費基盤研究(B)の研究分担者として補助を受けている。また京都産業大学からも基礎費として補助を受けている。本科研費では昨年度開催した著名な数理論理学者である竹内外史先生の追悼研究シンポジウム(Takeuti Memorial Symposium)を受けて Springer-Verlag 社から著作集の刊行の準備を進めている。また2021年度に本学で開催する予定であったアジア論理学会議(Asia Logic Conference)は新型コロナウイルス流行により残念ながら中止になったが2025年9月に改めて本学で開催した。

## 4. 研究手法・成果

ALCは隔年で開催されている数理論理学分野の国際会議であるが、ALC2021は、神戸大学の菊池誠教授が研究代表者であり三好が研究分担者である科学研究費補助金を主な予算として、本学で開催すべく計画を進めていたが、残念ながら新型コロナウイルス流行により中止となり、2025年にALC2025として改めて開催し成功を収めた。また朝倉書店から圏論に関する著書の出版を予定しており執筆を進めている。また2021年度からはより応用に近い方向として、圏論と人工知能について名古屋大学の丸山義宏氏と谷村省吾教授と共同研究を開始している。これは JST ムーンショットプロジェクト目標3の一部である。また、新たに三好が考案者の一人である gs-モノイダル圏の機械学習・データサイエンスへの応用を試みている。

5. 主要な論文、著者等（2021-2025年）：本人に2重下線、本学学生・大学院生には下線
- (1) 三好博之, 圏論と（少し普通でない）計算機科学（西郷甲矢人氏との対談）, 西郷甲矢人編著『圏論の地平線』2022年11月, 技術評論社, pp.39-77.
6. 主要な学会発表等（2021-2025年）：本人に2重下線、本学学生・大学院生には下線
- (1) 佐原悠太, 三好博之, 「連続な CDU-categories について」, 第41回 記号論理と情報科学 研究集会 (SLACS 2024), 2024年8月21日(水) ~ 22日(木), 東北大学電気通信研究所.
- (2) 佐原悠太, 三好博之, 「因果構造と統計的因果推論に関する圏論的モデル」, 理論計算機科学と圏論ワークショップ (CSCAT 2025), 2025年3月10日(月) ~ 11日(火), 崇城大学.
7. その他特記事項（2025年度）
- 特になし

# 研究成果報告書

数理科学科 柳下浩紀

## 1. 研究テーマ

非線形現象の解析学、特に、動く空間パターンの数学解析

## 2. 要旨

非線形の拡散現象を記述する放物型方程式に関して、その理解に重要な対象である界面と進行波のダイナミクスについて研究を行っている。界面のダイナミクスについては、比較定理や変分構造を有さない一般の連立系に対して、界面ダイナミクスの縮約系として平均曲率流が現れることを数学的に厳密に示すこと、進行波のダイナミクスについては、FitzHugh-南雲方程式、あるいは、類似の方程式の進行波の衝突消滅を数学的に厳密に示すことなどについて、研究している。

## 3. 研究の背景

非線形系の拡散現象は、物理学、化学、生物学、さらに近年は金融工学上のモデル等、多くの分野で現れる。それらの中には、急激な状態変化が狭い領域に集中する界面と呼ばれる局在構造が現れて、この界面の示す振る舞いを理解することが非線形現象を解明する上での鍵になることが数多くある。非線形拡散方程式で記述される拡散現象では、界面の動力学を支配する方程式が、形式的な漸近展開によって、空間内の曲面の発展方程式として導かれている。これらの方程式は、幾何学的には広い意味で平均曲率流方程式と呼ばれるものとなる。そこで、当面の一つの目標として、非線形拡散方程式に関して、界面運動の支配方程式として、平均曲率流方程式を数学的に導出することがある。また、関連する別の目標としては、非線形拡散方程式の進行波（達）が作り出す大域的な解構造を理解することがある。進行波解とは一定の波形と一定の速度を保ちながら進行する解であり、その波形が（進行方向に沿った）空間無限大の極限において一様な状態に収束するものと言う。特別な場合として速度がゼロの進行波解は定常波解とも呼ばれる。実は、界面はこの進行波解を空間的に緩やかに歪めて構成されるものである。特に、進行波の有名な例の一つとしては、神経線維上の信号伝播のモデルであるFitzHugh-南雲方程式の進行波がある。FitzHugh-南雲方程式の2つの進行波が互いに向かい合っていると、その間の距離が離れている段階では波形と速度をほぼ一定に保ったままそれらは近づいていくのだが、最終的に進行波はともに消滅してしまうことが数値実験の結果から確認できる。しかし、このフォークロアを数学的に厳密に示すことは未だになされていない。一方で、単独の双安定拡散方程式に関しては同様の事実が私自身によって厳密に証明され、それ以後も様々な方程式に対して関連する研究が行われている。示すべき事実の第一点目は「2つの進行波の間の距離が離れている限り、それらの波形と速度はほぼ一定に保たれる

こと」である。これについては、連立系の場合であっても、すべての成分の拡散係数が正ならば、私の原論文の手法がそのまま適用できる。しかし、F i t z H u g h - 南雲方程式の場合は抑制因子に関する拡散係数は0である。そのため、進行波とともに動く座標系で解を見ようとする、方程式の主要な線形部分が解析的半群を生成しないために、従来の手法では大きな技術的困難に直面してしまう。そこで、見方を変えることにし、動座標系に乗って見ることを放棄する方向の研究を進めている。示すべき事実の第二点目は「最終的に進行波が消滅すること」である。これについては、従来の研究は、私の研究も含めて、方程式が比較定理を満たすという事実完全に依拠していた。しかしながら、F i t z H u g h - 南雲方程式は、この条件を満たさない。そこで、当面の目標として、F i t z H u g h - 南雲方程式の活性因子の反応項  $u(u - a)(1 - u) - v$  を少し変えて  $u(u - v)(1 - u)$  とした方程式を研究している。こうすることで、特異極限での進行波解について、特異摂動の用語で外部部分と呼ばれる領域での活性因子の値が0または1となって、「衝突による消滅」という空間パターンの大変形を何とか解析できる見込みが立つだろう、と期待をしている。

#### 4. 研究手法・成果

陰関数定理の手法を用いて、曲面上の閉測地線の近くに界面を持つ定常解を構成し、射影作用素のダンフォード積分表示を利用して、界面の安定性の基準を与える。さらに、F i t z H u g h - 南雲方程式を含む一般の連立系においても、複数の進行波が同時に出現したときに、互いの距離が離れている限りは、それらは安定であることを示したい。

#### 5. 主要な論文、著者等 (2021-2025 年) : 本人に2重下線、本学学生・大学院生には下線

#### 6. 主要な学会発表等 (2021-2025 年) : 本人に2重下線、本学学生・大学院生には下線

(1) 柳下浩紀 : 「部分関数を関数記号の解釈とする (広義の) 構造」の意味論, 証明体系, 完全性定理, 日本数学会 (2021), 年会

(2) 柳下浩紀 : 無限次元空間  $R^\infty$  上の Laplace 作用素の変分法的定式化と自己共役性, 日本数学会 (2022), 年会

(3) 柳下浩紀 :  $R^\infty$  上の無限次元干渉 Brown 運動に関する解析的半群, 日本数学会 (2022), 年会

(4) 柳下浩紀 : 無限次元空間  $R^\infty$  上の Gibbs 測度は, コンパクト空間  $(R \cup \{\infty\})^\infty$  上の局所性をもつ正則 Dirichlet 形式を定める, 日本数学会 (2022), 年会

#### 7. その他特記事項 (2025 年度)

# 研究成果報告書

数理科学科 山田 修司

## 1. 研究テーマ

結目理論の DNA 形状シミュレーションへの応用

## 2. 要旨

細胞核内間期における環状クロマチンの形状を、結目理論を用いた数理モデルと、効率的な計算アルゴリズムとを用いてコンピュータシミュレーションにて再現し、さらにその位相幾何学的な形状を解析した。

## 3. 研究の背景

間期におけるクロマチンの形状は、顕微鏡などによってそれを認識することが困難であり、コンピュータシミュレーションによってそれを再現することが有効な研究手段の一つである。しかしながら、シミュレーションした結果が必然的に細胞核内に収まるような数理モデルはあまり知られておらず、さらに、それが環状クロマチンであることを条件とするならば、その有効なシミュレーションはほとんど知られていないのが現状である。本研究の目的は、その両方を満足させるシミュレーション数理モデルとその高速な計算アルゴリズムの開発にある。

## 4. 研究手法・成果

クロマチンのような鎖状のものを計算機によってシミュレートするときに良く用いるモデルは、Wormlike-Chain モデルと呼ばれるものであり、実際に計算するときには、それを逐次追加的に伸ばして行くというアルゴリズムが通常とられている。本研究においても、モデルとしては Wormlike-Chain モデルを採用するが、精度を上げるために、DNA コドンごとの persistence length を設定したモデルとする。実際の計算時においては、従来の逐次追加的な計算では、クロマチンの始点と終点とが一致する保証はなく、環状クロマチンのシミュレーションを行うためには、多数の計算結果の中から、始点と終点とが一致しているあるいは非常に近いものを選び出す必要があり、非効率な方法となる。そこで、本研究においては、persistence length が設定された環状 Wormlike-Chain モデルにおいて、その中の 2 点の位置および状態を設定したときに、chain 上でその 2 点の中間にあたる点の位置および状態について、細胞核内という存在範囲も考慮したときのその確率分布を求め、その分布に従ってランダムにその中間の点を計算し、その計算結果を元にさらに次の中間の点を計算する、という補間アルゴリズムを用いる。その際に問題となってくるのが、前述の確率分布をいかにして算出するかということである。その数学的な厳密解を求

めるのは困難であるが、実用に耐える近似的な確率分布を求めることは可能である。本研究の大きな課題の一つがこの確率分布を求めることと、その実際的な計算法を確立することにある。また、シミュレーション結果を元に、その位相幾何学的な形状に注目し、それが有糸分裂期に至るために必要な DNA トポイソメラーゼの作用回数の評価を行い、それによってトポイソメラーゼが DNA 鎖に作用するときの数理モデルを構築することも研究計画の一つである。

作成したクロマチンの始点と終点とが一致するようなシミュレーションの方法がまだ確立できていない。今後は、その補完アルゴリズムを構築することが目標となる。

5. 主要な論文、著者等 (2018-2024 年) : 本人に 2 重下線、本学学生・大学院生には下線
6. 主要な学会発表等 (2018-2024 年) : 本人に 2 重下線、本学学生・大学院生には下線
7. その他特記事項 (2024 年度)

# 究成果報告書

## 数理科学科 渡辺 達也

1. 研究テーマ 変分的手法による楕円型偏微分方程式の解析 - 微分法の究極のかたち -

2. 要旨

本研究では数理物理に現れる様々な微分方程式について、定常問題の解の存在や漸近挙動、安定性等を考察した。これらの微分方程式の解は、ある関数の極値に対応するという構造に注目し、それぞれの微分方程式の特徴を関数の形状や極値の変化を調べることで解析した。

3. 研究の背景

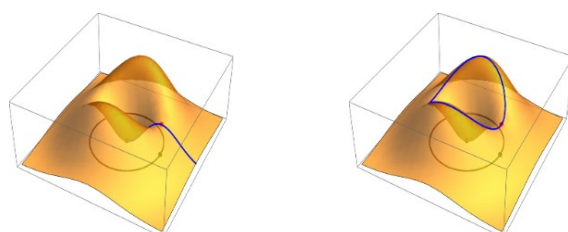
変分法とは、簡単に述べると次のようなものである。

微分方程式  $\Leftrightarrow$  極値問題

一般に、微分方程式の解を具体的に求めることは、簡単な場合以外では出来ない。しかし、自然現象を記述する微分方程式の多くは変分構造を持ち、解はある(エネルギー)関数の臨界点(極大点・極小点)として特徴付けされる。このことにより、グラフの形状を調べることで微分方程式の解の存在が分かり、さらに極値を詳しく調べることで微分方程式の解の性質が分かる。よって、ある意味で変分法は微分法の究極進化系であると言える。また、微分方程式の解のダイナミクスを解析する際は、解の特徴付け・漸近挙動を知ることが重要な役割を持つ。

本研究の目的とは、変分構造を持つ微分方程式において、解の存在・特徴付け・形状および漸近挙動をエネルギー関数の解析を通じて解明することである。特に、数理物理に現れる様々な非線形偏微分方程式、その中でも定常問題として現れる楕円型偏微分方程式を考察する。対応するエネルギー関数の形状・解の特徴付け(極小・鞍点)を解析して、微分方程式の解構造を詳しく調べるのが、本研究の主なアイデアと目標である。

本研究で扱う非線形微分方程式は自明な解を持つが、知りたいのは非自明な解である。その様な解を見つけるには、大きく分けると2つの方法がある。1つ目はエネルギー関数の形状を直接調べる方法であり、その場合は鞍点として非自明な解が得られる(下図左)。2つ目は物理保存則から定まる積分量を拘束条件として最適化を行う方法である(下図右)。この場合の解は、ラグランジュ乗数法を用いることで拘束条件なしのエネルギー関数の臨界点となるが、それが1つ目の方法で得られる解と一致するかは自明ではなく、単純な場合を除いて分かっていない。この対応は解の安定性を解析する上で重要な役割を持つことが知られており、この対応を様々な問題で確立することを目標にしている。



具体的な問題としては、非線形シュレディンガー方程式の定在波解の安定性の研究が挙げられる。非線形シュレディンガー方程式は、レーザー光の凝集等の物理現象を記述する方程式として知られて、定在波解は中心的な役割を果たす。定在波解の安定性については多くの研究があるが、空間2次元・3次元において cubic 非線形項に対する定在波解は不安定であることが知られている。非線形光学では cubic の非線形項が最も基本的なものであるため、定在波解を安定化させるような補正を方程式に行う必要がある。その補正モデルを導出した物理学者が提唱した『定在波解の安定化効果』に興味を持ち、これを数学的に解明することを目標にしている。

その中でも、非局所的相互作用による安定化効果に興味があり、これに関連する研究を行っている。非局所的相互作用は様々な状況で現れるが、例えば次のような効果から導出される。

- (i) 非線形項が空間全体の情報から定まる場合
- (ii) 連立方程式系を単独の方程式に帰着させた場合

(i)のような状況はある結晶内を通るビームの伝播を考えた場合に起こり、(ii)のような状況は磁場と相互作用する粒子の波動関数の運動を記述する方程式や光学におけるカー効果を考慮した連立方程式系で現れる。さらに、定在波解の不安定化も応用上重要な問題であり、特に磁場との相互作用を考慮した場合に、安定性がどう変化するか注目している。

また、膜の変形等、エネルギーを伴う様々な工学の問題にも変分法は相性が良く、流体力学に現れる微分方程式にも変分法が適用できて、興味深い問題が数多く残されている。

#### 4. 研究手法・成果

得られた主な研究成果は以下の通りである。

##### 【1】非局所的シュレディンガー方程式の定常問題の解析

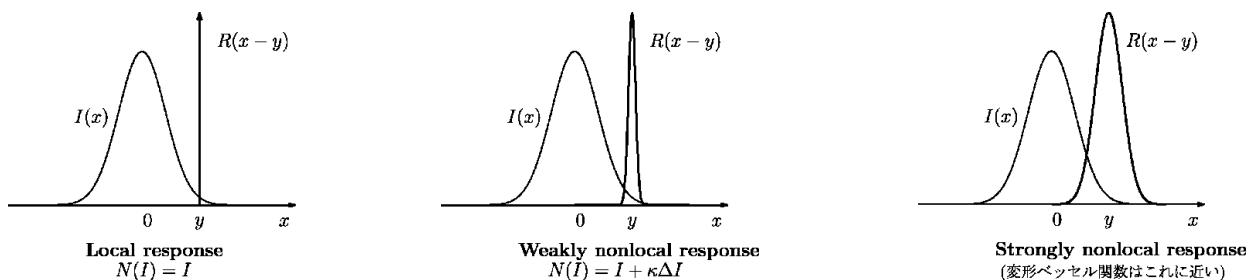
本研究では、非線形シュレディンガー方程式における非局所的相互作用による定在波解の安定化に着目する。 $n$ を空間次元としたとき、そのモデル方程式は次で与えられる。

$$i\psi_t + \Delta\psi + N(I)\psi = 0 \text{ in } \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}. \quad (1)$$

ただし、 $I$ は波動関数 $\psi$ の強度 $I(x) = I(x, t) = |\psi|^2$ であり、 $N$ は次で与えられる非局所項である。

$$N(I)(x) = \int_{\mathbb{R}^n} R(x-y)I(y) dy.$$

$R(x) = \delta(x)$ のとき、 $R$ を local response という。このとき、 $N(I) = I$ となって、(1)は通常の3次非線形項を持つシュレディンガー方程式となる。一方で、ネマティック結晶内のビームの伝播を記述するとき、 $R(x)$ は変形ベッセル関数で与えられ、Bangらは(1)において解の爆発が起こらないことを示した。さらに、weakly nonlocal response と呼ばれる、波動関数の幅に比べて $R(x)$ の幅が狭い場合を考察して、数値計算によって定在波解が安定であることを示し、非局所性が定在波解を安定化させることを示唆した。



ネマティック結晶の場合の $R(x)$ は、楕円型微分方程式 $-\Delta\phi + q\phi = |u|^2$ から得られる。  $N \geq 3$ かつ $q = 0$ の場合は $R(x) = |x|^{-(N-2)}$ となり、(1)はシュレディンガー・マックスウェル方程式の定常問題から3次の非線形項を取り除いたものになる。この問題について、Bordeaux大学のMathieu Colin氏と共に、Doping profileと呼ばれる非斉次項が加わった方程式を考察し、基底状態解の存在や対応する定在波解の安定性・不安定性に関する結果を得た[2, 3, 4]。Anhui理工大学のYu Su氏とは zero mass case と呼ばれる問題を考察して、非自明解の存在を示した。Yu Su氏とは、ソボレフ臨界指数を伴う方程式における基底状態解の存在や、臨界相互作用を持つ基底状態解の変分的特徴付けに関する研究を行って、現在学術雑誌に投稿中である。臨界相互作用を持つ基底状態解については、ある関数不等式の最良定数との関係を明らかにして、方程式に含まれるパラメータの相互依存性を決定した。この結果を元にして、基底状態解の一意性や安定性の改良に取り組みたい。

また、Mathieu Colin氏と対応する空間2次元における方程式の研究にも取り組み、現在学術雑誌に投稿中である。さらに、weakly nonlocal response の場合に得られる準線形シュレディンガー方程式について、静岡大学の足達慎二氏と名城大学の柴田将敬氏と共同で、エネルギー最小解の一意性と非退化性および漸近挙動を解析した[13]。足達氏とは臨界指数を伴う準線形シュレディンガー方程式の基底状態解に関する研究[1]も行い、既存の結果を改良した結果を得た。

## 【2】半線形シュレディンガー方程式の基底状態解および正值解の研究

次の非線形楕円型微分方程式を考える。

$$-\Delta u + V(x)u = \lambda f(u) \text{ in } R^n. \quad (2)$$

ただし、 $\lambda > 0$ はパラメータである。一般に(2)の解を変分法で探す場合、非線形項 $f(u)$ は $u \rightarrow \infty$ のときソボレフ臨界指数以下の増大度を持たないといけませんが、3次や5次の非線形項は、 $n$ の値によっては優臨界となる。本研究では静岡大学の足達慎二氏と慶應大学の生駒典久氏と共に、非線形項がソボレフ優臨界であることを許す場合を扱い、(2)の正值解の存在を示した[11, 12]。また、足達氏と共に、臨界指数を含む一般の非線形項を伴う非線形楕円型方程式における基底状態解の存在を考察した[7]。この問題は近年盛んに研究されているが、新しいテスト関数の構成法を考案することによって、既存の結果を改良することが出来た。

また、非線形光学で現れる他のタイプの準線形微分方程式の研究[14]や、連立シュレディンガー系の研究[10]、4階楕円型微分方程式系の研究[8]、点相互作用を持つシュレディンガー方程式の研究[6]、固有値最適化問題の研究等を進めている。さらに、本学の大学院生と共に、非線形放物型方程式のフィードバック安定化や変形プラトー問題などの研究[9]を行った。本学大学院生とは、現在流体力学に現れる微分方程式の変分法による解の存在・安定性に関する研究に取り組んでいる。特に、表面張力重力水面波と回転赤道波に関する変分問題に取り組んでいる。さらにPython, JuliaやMathematicaを用いた数値解析による微分方程式のシミュレーションおよび解の可視化に取り組んでいる。非局所項が定在波解の形状にどのような影響を与えるかを数値シミュレーションによって推測して可視化したい。

## 5. 論文, 著書等 (2021-2025) 主要なもの

- [1] Shinji Adachi and Tatsuya Watanabe, Ground state solutions for the modified nonlinear Schrödinger equation with critical nonlinearities, to appear in Topological Methods in Nonlinear Analysis.

- [2] Mathieu Colin and Tatsuya Watanabe, Ground state solutions for Schrödinger–Poisson system with a doping profile, to appear in Communications in Contemporary Mathematics.
- [3] Mathieu Colin and Tatsuya Watanabe, Strong instability of standing waves for  $L^2$  – supercritical Schrödinger–Poisson system with a doping profile, Advances in Differential Equations. 31 (2026), 45--82.
- [4] Mathieu Colin and Tatsuya Watanabe, Stable standing waves for Schrödinger–Poisson system with a doping profile, Nonlinearity. 38 (2025) 115019 (38pp).
- [5] Yu Su and Tatsuya Watanabe, Nonlinear Schrödinger–Poisson system with Doping profile: Zero mass case, Journal of Elliptic and Parabolic Equations. 11 (2025), 1647–1668.
- [6] Alessio Pomponio and Tatsuya Watanabe, Nonlinear scalar field equation with point interaction, SIAM Journal on Mathematical Analysis. 57 No.5 (2025), 5243–5274.
- [7] Shinji Adachi and Tatsuya Watanabe, Existence of ground state solutions for the critical case of Berestycki–Lions’ theorem, SN Partial Differential Equations and Applications. 6 (2025), Article number 38.
- [8] Pablo Álvarez–Caudevilla and Tatsuya Watanabe, Existence and characterization of ground states for fourth order nonlinear Schrödinger systems, Discrete and Continuous Dynamical Systems. 45 (2025), 4630–4645.
- [9] Atsuki Fujita and Tatsuya Watanabe, Stability analysis of helical soap films for the Plateau problem confined to a cylindrical tube, Journal of Engineering Mathematics, 153 (2025), Article number 3.
- [10] Mathieu Colin and Tatsuya Watanabe, Stable standing waves for a Schrödinger system with nonlinear  $\chi^3$  response, Journal of Mathematical Physics, 64 (2023), 101506.
- [11] Shinji Adachi, Norihisa Ikoma and Tatsuya Watanabe, Existence and asymptotic behavior of positive solutions for a class of locally superlinear Schrödinger equation, Manuscripta Mathematica, 172 (2023), 933--970.
- [12] Shinji Adachi and Tatsuya Watanabe, G-invariant positive solutions for a class of locally superlinear Schrödinger equations, Journal of Mathematical Analysis and Applications, 507 (2022), Article:125765.
- [13] Shinji Adachi, Masataka Shibata and Tatsuya Watanabe, Uniqueness of asymptotic limit Of ground states for a class of quasilinear Schrödinger equation with  $H^1$ -critical growth in  $R^3$ , Applicable Analysis, 101 (2022), 671–691.
- [14] Alessio Pomponio and Tatsuya Watanabe, Ground state solutions for quasilinear scalar field equations arising in nonlinear optics, Nonlinear Differential Equations and Applications Research (NoDEA), 28 (2021), Article:26.

6. 学会発表等 (2021–2025) 主要なもの 下線: 指導大学院生

- [1] 川原彩花, Variational methods for steady periodic solutions of gravity–capillary water waves, 第 20 回 非線形偏微分方程式と変分問題, 東京都立大学, 2026 年 2 月

- [2] 渡辺達也, 非線形シュレディンガー・ポアソン方程式系に付随する非局所楕円型方程式の基底状態解について, 日本数学会 2025 年度秋季総合分科会, 名古屋大学, 2025 年 9 月
- [3] 渡辺達也, Nonlinear scalar field equation with point interaction, 日本数学会 2025 年度年会, 早稲田大学, 2025 年 3 月
- [4] 渡辺達也, Ground state solutions for nonlocal nonlinear elliptic equation with a doping profile, 日本数学会 2025 年度年会, 早稲田大学, 2025 年 3 月
- [5] 渡辺達也, Existence and characterization of ground states for fourth order nonlinear elliptic systems, 日本数学会 2025 年度年会, 早稲田大学, 2025 年 3 月
- [6] 藤田淳希, Stability analysis of helical soap films for the Plateau problem confined to a cylindrical tube, 第 19 回 非線形偏微分方程式と変分問題, 東京都立大学, 2025 年 2 月
- [7] 川原彩花, Variational formulations of steady rotational equatorial waves, 第 19 回 非線形偏微分方程式と変分問題, 東京都立大学, 2025 年 2 月
- [8] Tatsuya Watanabe, Standing waves for the nonlinear Schrödinger-Poisson system with a doping profile, The 14th AIMS Conference, Abu Dhabi, 2024 年 12 月
- [9] Tatsuya Watanabe, Ground state solution for the nonlinear Schrödinger equation with cubic-quintic type nonlinearities, Séminaire de EDP, Université de Bordeaux, 2024 年 6 月
- [10] 青川太雅, Boundary feedback stabilization for semilinear parabolic equations, 第 18 回 非線形偏微分方程式と変分問題, 東京都立大学, 2024 年 2 月
- [11] 渡辺達也, Stable standing waves for a Schrödinger system with nonlinear  $\chi^3$  response, 日本数学会 2023 年 秋季総合分科会, 東北大学, 2023 年 9 月
- [12] Tatsuya Watanabe, Stable standing waves for a Schrödinger system with nonlinear  $\chi^3$  response, ICIAM2023, 早稲田大学, 2023 年 8 月
- [13] Tatsuya Watanabe, Ground state solutions for quasilinear scalar field equations arising in nonlinear optics, The 13th AIMS Conference, Wilmington, 2023 年 5 月
- [14] 四方健登, Minimal speed selection for the Lotka-Volterra competition model with Allee effect, 第 16 回 非線形偏微分方程式と変分問題, Zoom 開催, 2022 年 2 月

## 7. その他特記事項 (2025 年度)

### (1) 外部資金

- ・学術研究助成基金助成金: 基盤研究 C (24K06804) (2024 年-2027 年) 【研究代表者】  
「基底状態解の変分的特徴付けに基づく非線形分散型微分方程式の定在波の安定性解析」

### (2) 研究集会の主催・セッションオーガナイザー

- ・Workshop on nonlinear partial differential equations and variational problems, LINK FOREST, 2026 年 3 月
- ・Workshop on recent progress in functional inequalities and elliptic PDEs, 京都産業大学, 2025 年 9 月

# 研究成果報告書

物理科学科 伊藤 豊

## 1. 研究テーマ

- 1) 遍歴電子磁性の未解明の謎の研究 —磁氣的量子臨界点近傍の物理—
- 2) 卓上実験による量子類似物の探索 —液面のパラメトリック共鳴—

## 2. 要旨

1) 銅酸化物高温超伝導体  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  の常伝導状態においてスピンのゼロ点ゆらぎの効果を発見したかもしれない。2) Yves Couder の液滴の再現実験を試みた。

## 3. 研究の背景

1) 遍歴電子磁性は様々な機能の源であり謎が尽きない。自己無撞着くりこみ理論 (SCR 理論) は非フェルミ液体的な遍歴電子磁性と量子臨界点 (QCP) の物理を説明することに成功してきた理論である。スピンのゼロ点ゆらぎを取り入れることで2次元反強磁性 QCP 近傍の物性の温度変化が熱ゆらぎのみで展開された理論と大きく異なることが示されていた。銅酸化物高温超伝導体の磁性は2次元反強磁性量子臨界現象と考えられているが、ゼロ点ゆらぎの理論と実験との比較研究の報告は乏しいままであった。実験的に超伝導体  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  (LSCO)系の軽ドーブ域の高温で NMR の縦緩和率  $1/T_1$  の極大が報告されているが、その機構は謎のままであった。

2) 量子素子実現の鍵を学ぶ調査研究の中で流体力学的な量子類似物 (Yves Couder の液滴) の存在を知り、その可能性に着目して実験を試みた。これは液体の鉛直振動に対する液面のパラメトリック共鳴 (ファラデー波: 図1) 近傍で生じ、液面共鳴の「臨界点」直前に生じる一種の「個別励起」のようで興味深い。



図1 : (左) ファラデー波と (右) 振動液滴。

#### 4. 研究手法・成果

1) スピンのゼロ点ゆらぎを含む2次元反強磁性 QCP 近傍の SCR 理論の研究をおこなった。理論式の細かなパラメーターの調整から、LSCO 系の実験で見出されている NMR 縦緩和率  $1/T_1$  のピークを再現することに成功した。スピンのゼロ点ゆらぎが効いている結果であった。

2) 卓上実験装置として、スピーカーの振動板とマーサージ機のヘッドで、シリコンオイルを入れたステンレス製の器で振動実験をおこなった。ファラデー波を発生させる条件から角度を緩めていき、ファラデー不安定性直前条件となるところで局所的な波を伴った振動液滴ができたと思われる (図1)。

#### 5. 主要な論文、著書等 (2021-2025 年) : 本人に2重下線、本学学生・大学院生には下線

(1) " Quest for Nuclear Quadrupole Relaxation in  $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+\delta}$  "

(Y. Itoh, A. Ogawa and S. Adachi) J. Phys. Soc. Jpn. **93**, 124708 (2024)

[doi.org/10.7566/JPSJ.93.124708]

(2) " Nuclear spin-lattice relaxation studies of  $\text{Cu}_2\text{O}$  "

(Y. Itoh) Phys. Rev. B **105** (2022) 094429/1-4 [DOI: 10.1103/PhysRevB.105.094429]

#### 6. 主要な学会発表等 (2021-2025 年) : 本人に2重下線、本学学生・大学院生には下線

(1) " スピン 3/2 核スピン格子緩和曲線の厳密解はかく語りき "

伊藤豊 (日本物理学会 2025 年春季大会、2025 年 03 月 18 日)

#### 7. その他特記事項 (2025 年度)

特になし。

# 研究成果報告書

物理科学科 岩下 靖孝

## 1. 研究テーマ

異方的な粒子の振る舞い  
—微粒子のデザインと平衡・非平衡挙動—

## 2. 要旨

異方的な形状や物性を持つ新規な微粒子の作成、および作成した粒子の異方性がその振る舞いに及ぼす影響の解明に取り組んだ。その結果、新規な特性を持つ粒子の作成に成功した。また、単純な異方性が粒子の挙動に劇的な影響を及ぼし、異方性のない粒子とは大きく異なる平衡・非平衡挙動を示すことを見出した。

## 3. 研究の背景

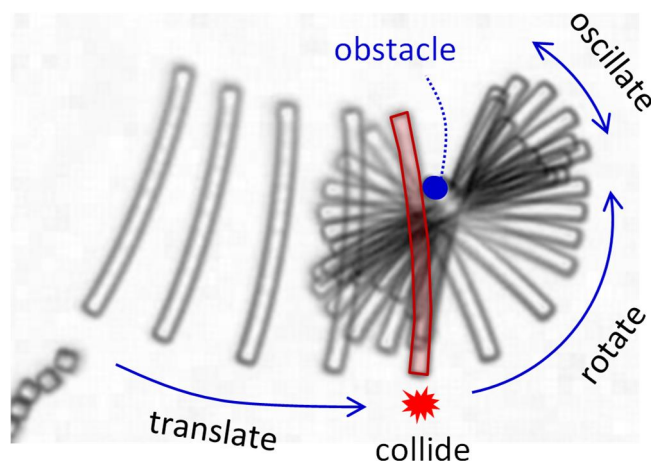
コロイド粒子は「中間的」な大きさを持つ微粒子—目に見えないほど小さいが、原子や分子よりはずっと大きい粒子—である。この粒子は原子や分子のような量子的な振る舞いはしないが、目に見える大きさの物体とは異なり顕著な熱運動（ブラウン運動）を示す。そのため、原子や分子が並び方を指示しなくても自ら整列して結晶化するように、粒子間の相互作用によって自発的に結晶などの秩序を持つ構造を形成する（これを自己組織化と呼ぶ）。近年のナノテクノロジーの発展により、形状や物性に様々な異方性を持つコロイド粒子が作成可能となり、原子や分子の相挙動との共通点や相違点が注目を集めている。また、原子や分子にはない異方的コロイド粒子特有の非平衡挙動は、当該分野において近年の学術研究の中心的なテーマとなっている。コロイド粒子はナノ・マイクロ粒子でもあり、食品・化粧品から医薬品、様々な先端科学材料においても重要な役割を果たしている。よって、このような粒子の基礎的な振る舞いの解明や新規な性質の探求といった学術的な基礎研究は、材料科学の観点からも重要である。

## 4. 研究手法・成果

### ■ 異形状ヤヌス粒子の自己駆動

表面に物性の異なる 2 つの領域を持つ粒子はヤヌス粒子と呼ばれ、最も単純な異方性を持つものとして理論・応用両面から盛んに研究されてきた。我々は微細加工技術であるフォトリソグラフィを用いることで、金属面と誘電体面からなる棒状ヤヌス粒子を作成した。また、このような金属-誘電体ヤヌス粒子は、電場をかけることによって、自らエネルギーを消費して運動する非平衡挙動である、自己駆動運動（Induced charge

electrophoresis, ICEP) を示す。この粒子の ICEP について調べたところ、異方的な形状が ICEP の運動機構および重力と結合することにより、運動状態の不連続な変化、自己駆動力による自励振動現象など、等方的な粒子（球状粒子）には見られない、特異な挙動を示すことを発見した。この新規な研究成果は、アクティブマターと呼ばれる非平衡系の基礎研究の発展に資するだけでなく、ナノ・マイクロロボットなど、微細領域での物体制御の基礎技術としても意義がある。



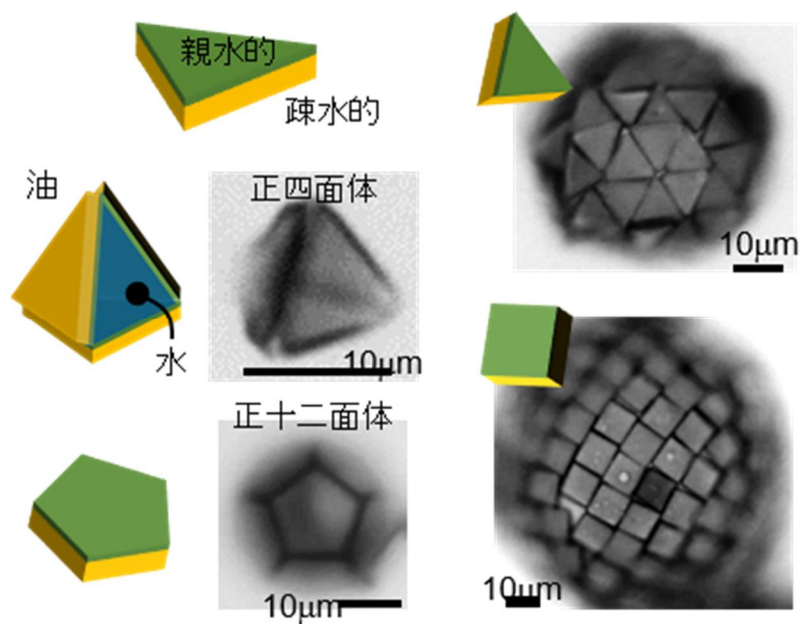
#### ■ 新規なガラス状態の安定化手法の提案

物質科学の観点では、ガラスとは窓ガラスのような特定の物質を指すのではなく、分子の構造が液体のものそのまま固まってしまった状態を指す。身の回りでも窓ガラスやプラスチック（高分子のガラス）が活用されているように、材料として結晶化による固体とは異なる様々な長所を持つが、「なぜ結晶化せずにガラス化するのか？」という根本的な疑問は、現代物理学の大きな未解明問題として残されている。ガラスの最も本質的な特徴であり、その物理の解明を困難にしている要素として、ガラスが分子のエネルギーが最小にならずに固まってしまった非平衡状態であるという点が挙げられる。そこで、よりエネルギーが小さい（＝超安定な）ガラス状態を実現できれば、ガラス状態の本質に迫ることができ、更には材料としても硬さ、化学的安定性などの優れたガラスになると期待される。

これまでに、実験では薄膜のガラスを超安定化する手法が、シミュレーションではランダムに選んだ分子（粒子）を空間に固定する random pinning 法で超安定なガラスを実現できることが知られているが、どちらも 3 次元的な系（物質）に適用することは困難であった。そこで我々は、分子動力学法を用いた数値シミュレーションに取り組み、ガラス化の過程においてランダムに選んだ隣り合う 2 粒子を結合する random bonding 法により、超安定なガラス状態が形成されることを実証した。更にヤヌスコロイド粒子を用いた実験により、random bonding 法が実験系にも適用可能であることを示した。

## ■ 両親媒性コロイド粒子によるエマルション

ヤヌス粒子の一面を親水性、他方の面を疎水性にすると、界面活性分子（セッケン分子）のように一面が水、他方が油に馴染む両親媒性を持たせることができる。すると、この両親媒性コロイド粒子は分子よりも遥かに大きいので桁外れに大きな界面活性を示し、水-油混合状態（エマルション状態）の安定化や、安定化されたエマルション液滴のドラッグデリバリーシステムへの応用などが注目されている。我々は半導体の微細加工手法であったフォトリソグラフィを利用し、正三角形から正六角形の正多角形形状をデザインした両親媒性微粒子を作成した。この粒子によるエマルション状態について調べたところ、正多角形による隙間のない平面充填構造を持つ液滴や正多面体構造を持つ液滴が形成された。つまり、ごく単純な幾何学的特徴がエマルションの自己組織化構造に大きく影響することを解明した。この成果は、上記のような応用におけるエマルションの物性制御だけでなく、例えばタンパク質分子による多面体構造であるウイルスのカプシドなどの生体内の閉殻構造の形成機構の理解にも役立つ可能性がある。



5. 主要な論文、著者等（2021-2025年）：本人に2重下線、本学学生・大学院生には下線

- (1) K. Saito, R. Kawano, C. Sadamatsu, Y. Iwashita and Y. Kimura, "Self-propelled motion of induced-charge electrophoretic Janus particles in viscoelastic fluids", *Physical Review E*, **111**(4), 045409 (2025).
- (2) 岩下靖孝, "ピッカリングエマルジョン技術における課題と応用（監修：柴田雅史）" 第4章, シーエムシー出版 (2024).
- (3) M. Ozawa, Y. Iwashita, W. Kob and F. Zamponi, *Nature Communications* **14**, 113 (2023)
- (4) 岩下靖孝, "パッチコロイド粒子の凝集・結合制御", コロイドおよび界面化学部会誌 **46**, 33 (2021).

6. 主要な学会発表等（2021-2025年）：本人に2重下線、本学学生・大学院生には下線

- (1) \*岩下靖孝, 木村康之、「ICEP により自己駆動するヤヌス粒子の特異な挙動」日本流体力学学会年会 2025、3-38、大阪公立大学、2025/11/4（口頭）
- (2) \*岩下靖孝、「アクティブマターの実験」ソフトマター工学シンポジウム～基礎から応用への連携～、2024/12/14（口頭）
- (3) \*Y. Iwashita, "Unique motion of self-propelled rod by induced charge electrophoresis", 4th meeting on theoretical studies of nonequilibrium phenomena in dissipative- driven systems, Kyoto University, 2024/3/4（招待講演）.
- (4) \*Y. Iwashita and Y. Kimura, "Self-entrapment and non-equilibrium motion of self-propelled rod", The 7th International Soft Matter Conference, Osaka, Japan, September 4-8, 2023 (poster).
- (5) \*岩下靖孝、佐藤大華、日本物理学会 2023 年春季大会、オンライン、2023/3/25（口頭）
- (6) \*岩下靖孝、瀬戸さやか、田中康博、日本物理学会 2021 年秋季大会、オンライン、2021/9/20（口頭）

7. その他特記事項（2025年度）

なし

# 研究成果報告書

物理科学科 内田 和之

## 1. 研究テーマ

ナノ・スケールからの物性理解と物質制御

## 2. 要旨

グラフェン・スクロール（巻物状になったグラフェン）の原子構造の研究を行なった。

## 3. 研究の背景

グラフェンを力学的に引き延ばして破断させるとスクロール状に巻かれたグラフェンが得られるという実験が報告され、注目されている。グラフェンはナノスケールの原子構造を敏感に反映して多彩な物性を示す物質であるから、巻物の巻き方と電子構造の対応関係を明らかにすることが重要である。本年はまず、グラフェン・スクロールがエネルギー的に安定であるような巻きの量と巻きの向きを明らかにするための原子構造探索を行なった。

## 4. 研究手法・成果

巻物になったグラフェンのエネルギーを計算するため、面内で隣接する炭素原子間の共有結合を Tersoff ポテンシャルで、折りたたみによって接触した面間のファンデルワールス結合を Lennard-Jones ポテンシャルで記述した。アルキメデス螺旋に沿った巻きを仮定した巻物を平坦な基板の上に置いた理想構造から出発し、共役勾配法を用いた構造最適化を行なうことにより、いくつかの特徴的な局所安定構造に到達した。構造緩和は、「巻きのほどけ」「基板上での転がり」「基板との相互作用による変形」という3つの視点から理解できることが分かった。

## 5. 主要な論文、著者等

(1) K. Uchida, J. -I. Iwata, and Y. -i. Matsushita, "A New Superstructure Model of the  $\text{Si}(111)-\sqrt{7}\times\sqrt{3}$ -In Surface", J. Phys. Soc. Jpn. 93, 074601 (2024).

- (2) T. Shimizu, D. Kamihara, and K. Uchida, “Atomic Structures of Multiply-folded Graphene Layers on Flat Substrates”, J. Phys. Soc. Jpn. 92, 074602 (2023).
- (3) D. Kamihara, T. Shimizu, K. Uchida, “Discovery of Peculiar Electronic Structures of Decavacancy  $V_{10}$  in Silicon Crystal”, J. Phys. Soc. Jpn, 91, 064709 (2022).
- (4) K. Uchida, “Energetics for Twisted Bilayer Graphene Flake”, J. Phys. Soc. Jpn, 90, 044602 (2021).

## 6. 主要な学会発表等

- (1) 内田和之、グラフェンの折りたたみ過程におけるエネルギー地図、日本物理学会（広島大学、2025/9）
- (2) K. Uchida, “Graphene Layers Folded Many Times”, NT25, University of Kyoto, Kyoto, Japan, June 17, 2025
- (3) K. Uchida, “A Moire Superstructure Model of Si(111)- $\sqrt{7}\times\sqrt{3}$ -In Surface”, APS Global Physics Summit 2025, Anaheim Convention Center, Anaheim, California, US, March 20, 2025
- (4) 内田和之、Si(111)- $\sqrt{7}\times\sqrt{3}$ -Inがモアレ超構造を作ったとき ARPES と STM 像はどうなるか？、日本物理学会（北海道大学、2024/9）
- (5) K. Uchida, “Peculiar Electronic Structure of Decavacancy  $V_{10}$  in Si Crystal”, APS March Meeting 2024, Minneapolis Convention Center, Minneapolis, Minnesota, US, March 5, 2024
- (6) 内田和之、グラフェンの多重折りたたみ構造、日本物理学会（東北大学、2023/9）
- (7) 内田和之、” Multiple Folding of Graphene Layers on Flat Substrates”、フラーレンナノチューブグラフェン学会（九州大学、2023/9）
- (8) 神原大輝、清水泰斗、内田和之、Si 結晶中の 10 原子空孔の特異な電子構造、応用物理学会（上智大学、2023/3）
- (9) 神原大輝、清水泰斗、内田和之、シリコン結晶中の原子空孔  $V_{10}$  の第一原理計算、日本物理学会（東京工業大学、2022/9）

## 7. その他特記事項

なし

# 研究成果報告書

物理科学科 大森 隆

1. 研究テーマ エネルギー技術等による地球温暖化対策

2. 要旨

環境問題、特に地球温暖化、エネルギー問題に関して、電気化学技術等を用いて研究を行っている。

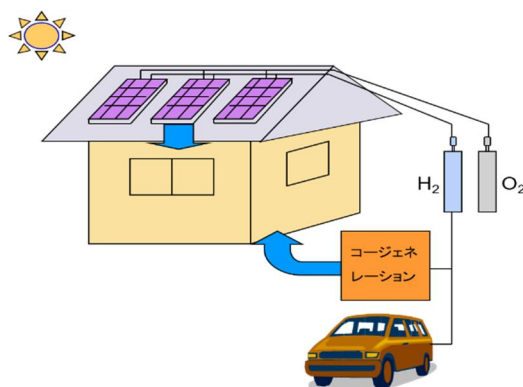
3. 研究の背景 および 4. 研究手法・成果

1. 太陽光利用による水電解水素製造システムに関する研究

燃料電池コージェネレーションに代表されるように、小規模分散型のエネルギーシステムが広がりを見せている。筆者は水素製造システムの中で、優位性のある分散型水素製造システムについて研究開発を行っている。コスト低減のポテンシャルが大きいアルカリ水電解を、自然エネルギー特に太陽光発電と組み合わせ、CO<sub>2</sub> 排出ゼロの水素製造を検討している。

光起電力発生部である太陽電池、および水分解電極触媒を高性能化することが重要である。また、両者を接続するインターフェイス部は、変換効率、利便性、汎用性といった種々のファクターにおいて、高機能、高性能を実現できるような工学的設計が重要である。

本研究開発のターゲットとして、例えば、一般家庭での太陽光発電との連携による水分解水素製造といったものが考えられる。これは太陽光発電—水電解—燃料電池といったシステムによって、一般家庭の電気、熱エネルギー需要をすべていわば自給自足で生産するといった将来展望につながるものである。



水電解、太陽電池の IV 特性をもとに検討を進めている。太陽電池の等価回路

$$I = - I_0 [ \exp \{ q(v + R_s I) / nkT \} - 1 ] + I_{sc} - (v + R_s I) / R_{sh}$$

と水電解 IV の解析を行い高効率化を目指している [1]。

太陽電池パネルの内部接続回路に手を加え工作し実験を行っている。回路抵抗値を考慮に入れることでフィッティング精度が向上した。電流を取り出す接続方法(部材、ハンダ付け)によりデータが著しく影響を受け注意が必要ながわかった [2]。

## 2. 水素吸蔵合金に関する研究

水素貯蔵法の一つである水素吸蔵合金について研究を行っている。水素貯蔵材料として有望な Mg-Ni 合金を化学合成法により作製し評価している。

## 3. CO2 電気化学還元に関する研究

実用化には、低電力すなわち低過電圧で、CO2 を還元できる電極材料を探索することが重要である。Au 電極は、あらゆる電極素材のなかで最も低過電圧で CO2 を還元できることが知られている。Au 電極を用いた場合、還元生成物は主に CO と H2 である。この混合物は合成ガスとして知られており、メタノール等種々の化学製品をつくるための重要な工業中間原料である。またクリーンなエネルギー媒体として注目されている DME の原料でもある。

Au 電極の CV をもとに検討を進めている。CV 波形と CO2 電解挙動に相関があることがわかり、これは H2O, CO2 分子などが Au 電極表面に吸着することが原因と考えられた。Au 表面酸化の還元波のピーク電位を解析している。ピーク電位と電解電圧をプロットしたところ、Au のアニール処理に用いる水素バーナー、ブタンバーナーを含め、また過去実験/研究者のデータを含め、統一的に変化していることがわかった [3]。

## 4. 気候工学による地球温暖化対策に関する研究

近年、気候工学による地球温暖化対策が検討されている。気候工学では主に、成層圏硫酸エアロゾル注入が研究されており、この方法で地表温度が低下できることが知られている。しかし硫酸エアロゾル注入は副作用が懸念される。硫酸エアロゾル注入に代わる安全な方法を、温室効果ガスパラメータなどを変化させて地球気温を計算し検討している。

成層圏の O3 を増量することで、地表温度を低下できることを明らかにし、このことによる地球温暖化対策の提案を行なった [4]。

温室効果ガス(CO2, CH4, NO2, O3)、酸素 O2、太陽定数 の影響について調べた。太陽定数は顕著に地表温度を変化させることがわかった [5]。

また実験データの側面からサポートとなる知見を得ることを最終目標として、実験室(スケール)で、基礎的な、温室効果ガスの光照射実験を行っている。

#### 5. - 7. 主要な論文、学会発表、その他特記事項

- [1] 太陽光利用水電解水素製造に関する研究, 後藤卓哉, 大森隆, 画像関連学会連合会 第8回秋季大会 2022.
- [2] 太陽光水電解水素製造に関する研究, 西岡龍偉, 京都産業大学理学部物理科学科卒業研究論文 2025.
- [3] Au 電極による CO<sub>2</sub> 電気化学還元, 新川真弘, 京都産業大学理学部物理科学科卒業研究論文 2025.
- [4] A Proposal of Geoengineering Method as Global Warming Countermeasure: O<sub>3</sub> Increase to Reduce Earth's Surface Temperature, Takashi Ohmori, J. earth environ. sci. res., 6,6,1,2024.
- [5] 気候工学的方法による地球温暖化対策の検討, 林田寛太, 京都産業大学理学部物理科学科 卒業研究論文 2025.

# 研究成果報告書

物理科学科 齊藤 国靖

## 1. 研究テーマ

ジャミング系の固有振動と弾性定数の摂動論

## 2. 要旨

巨視的な粒子系がランダムな配置のまま固化する現象をジャミング転移といい、平均配位数や弾性定数など、様々な物理量が転移点近傍で臨界的に振舞うことが知られています。ジャミング転移が起きる臨界密度や物理量の臨界指数は粒子間相互作用など粒子系の性質に依存して変化します。例えば、粒子間に働く摩擦力や柔らかさの比率などは臨界密度や臨界指数に強く影響します。一方、粒子系の粒径分布は臨界密度に強く影響しますが、臨界指数には殆ど影響しません。この様に、粒子系の性質によってジャミング転移の臨界密度や臨界指数がどの様に決まるかを把握することは応用上も重要であり、一般的な理論によって予測できる様にしておく必要があります。そこで、本研究では最もシンプルなソフト粒子系のモデルを出発点とし、プレストレスや摩擦力、付着力の効果などを弾性エネルギーに摂動として加え、摂動論の枠組みで様々な粒子系の臨界密度や臨界指数の予測を試みます。また、摂動論によって固有振動数を近似的に求め、粒子系の性質が固有振動および弾性定数にどの様に影響するかを明らかにします。

## 3. 研究の背景

粉体をはじめ、コロイド、エマルジョン、泡など、巨視的な粒子の集りは散逸粒子系と呼ばれ、日々の生活に欠かせない物質の一つです。また、散逸粒子系は産業界でのニーズが高く、工学的な応用研究も大切です。散逸粒子系の構成要素は原子や分子と比べて遥かに大きいため、量子効果や熱的な揺動に影響されず、粒子同士の非弾性相互作用によってエネルギーを散逸するという性質があります。従って、外力が働かなければ系は静止状態になりますが、外力が働くと系は力学的に駆動され、外部からのエネルギー注入と内部のエネルギー散逸がバランスした非平衡定常状態に陥ります。散逸粒子系は通常の流体や固体とは著しく異なる物性を備えており、その流動特性や輸送現象、力学特性を理解することが重要になります。これまで散逸粒子系の性質は実験を中心に調べられてきましたが、近年はコンピューターを使って散逸粒子系をシミュレーションで調べる手法が確立しています。これは分子動力学法と呼ばれ、実験で測定が難しかった粒子一つ一つの運動を精密に調べられるという利点があります。また、散逸粒子系を物理学として理解しようとする傾向もあり、従来の統計力学や数理物理学を基礎とする非平衡統計力学という学問分野が発展してきました。

#### 4. 研究手法・成果

本研究では、粉体をはじめとする散逸粒子系の輸送現象、流動特性、力学特性を、個々の粒子が従うミクロな物理法則に基づいて理解することを目的としています、そのために分子動力学法を駆使し、工学的にも重要なレオロジー試験やメカニクスのコモピューターシミュレーションを行います。また、全粒子の位置や速度といった大量のデータを解析し、非平衡統計力学の観点から複雑な統計法則を解明しようとしています。例えば、圧縮した散逸粒子系がせん断剛性を獲得するジャミング転移という現象があり、粘性率など流動特性を測るパラメータの幾つかが臨界的な発散を示します。そこで、分子動力学法でせん断によるレオロジー試験を再現し、ジャミング転移に伴う降伏応力の発生と、粒子速度の乱流的な統計法則との関係を明らかにしました。また、降伏を引き起こすミクロな応力ネットワークの組み換えをコンピューターで計算し、確率論的な遷移率によって力学応答を予測することにも成功しています。さらに、粉体の音波特性と粒子間摩擦の関係や、降伏状態における雪崩の統計法則も明らかにしており、最近はジャミング転移点近傍における臨界緩和と固有振動の孤立モードの関係、相関長の発散と拡散係数の臨界スケーリング、粘弾性の統一的理解、および応力の非局所的な構成則などの成果があります。

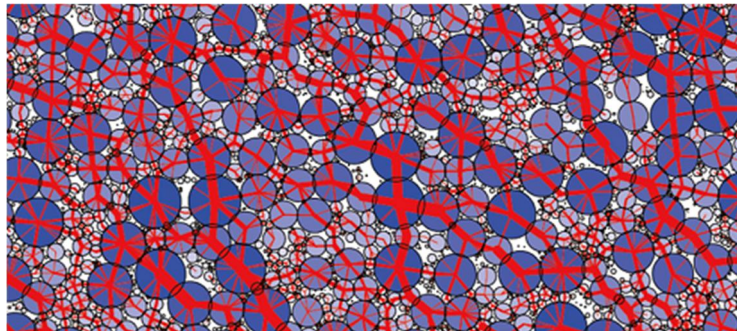


図1：散逸粒子系のせん断変形のみ子動力学シミュレーション

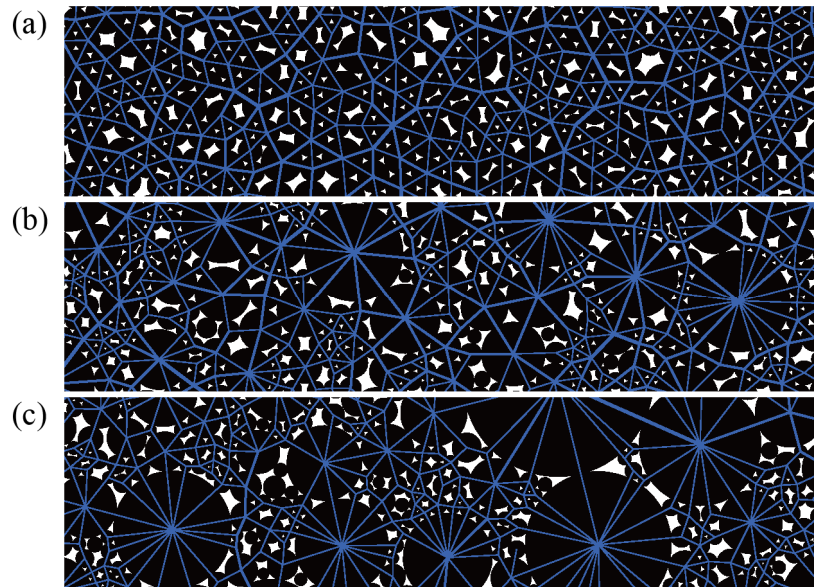


図 2：散逸粒子系の粒径分布を変化させた分子動力学シミュレーション

5. 主要な論文、著者等 (2021-2025 年)：本人に 2 重下線、本学学生・大学院生には下線

- (1) Kuniyasu Saitoh and Takeshi Kawasaki, “Relaxation dynamics and long-time tails explain shear-induced diffusion of soft athermal particles near jamming”, Phys. Rev. Research (in press).
- (2) Kuniyasu Saitoh, “Shear strength, avalanches, and structures of soft cohesive particles under shear”, Front. Phys. 13, 1548966 (2025).
- (3) Kuniyasu Saitoh and Brian P. Tighe, “Jamming transition and normal modes of polydispersed soft particle packing”, Soft Matter 21, 1263 (2025).
- (4) Hideyuki Mizuno, Kuniyasu Saitoh, Yusuke Hara, and Atsushi Ikeda, “Unified study of viscoelasticity and sound damping in hard and soft amorphous solids”, Commun. Phys. 8, 23 (2025).
- (5) Abhinendra Singh and Kuniyasu Saitoh, “Scaling relationships between viscosity and diffusivity in shear-thickening suspensions”, Soft Matter 19, 6631 (2023).
- (6) Kuniyasu Saitoh, Kianoosh Taghizadeh, and Stefan Luding, “Sound characteristics of disordered granular disks: effects of contact damping”, Front. Phys. 11, 1192270 (2023).
- (7) Daisuke Ishima, Kuniyasu Saitoh, Michio Otsuki, and Hisao Hayakawa, “Theory of rigidity and numerical analysis of density of states of two-dimensional amorphous solids with dispersed frictional grains in the linear response regime”, Phys. Rev. E 107, 054902 (2023).

- (8) Daisuke Ishima, Kuniyasu Saitoh, Michio Otsuki, and Hisao Hayakawa, “Eigenvalue analysis of stress-strain curve of two-dimensional amorphous solids of dispersed frictional grains with finite shear strain”, Phys. Rev. E 107, 034904 (2023).
- (9) Kuniyasu Saitoh and Takeshi Kawasaki, “Shear-induced diffusion and dynamic heterogeneities in dense granular flows”, Front. Phys. 10, 992239 (2022).
- (10) Kuniyasu Saitoh, “The role of friction in statistics and scaling laws of avalanches”, Eur. Phys. J. E 44, 85 (2021).
- (11) Norihiro Oyama, Takeshi Kawasaki, and Kuniyasu Saitoh, “Dynamic susceptibilities in dense soft athermal spheres under a finite-rate shear”, Front. Phys. 9, 667103 (2021).
- (12) Kuniyasu Saitoh and Hideyuki Mizuno, “Sound damping in soft particle packings: The interplay between configurational disorder and inelasticity”, Soft Matter 17, 4204 (2021).
- (13) 齊藤国靖 『変形する粒子のジャミング転移と固有振動』粉体工学会誌 62 巻 3 号, p. 164-170 (2025).
- (14) 齊藤国靖 『やわらかい粒子のジャミング 一粒子が変形するとどうなる?』粉体技術 16 巻 10 号, p. 41-46 (2024).
- (15) 齊藤国靖 『粉体のマクロな物性に果たす粘性力の役割』アンサンブル 25 巻 2 号, p. 125-130 (2023).
- (16) 齊藤国靖 『粒子の界面を介して働く力のネットワークと非局所性』表面と真空 66 巻 3 号, p. 170-175 (2023).

6. 主要な学会発表等 (2021-2025 年): 本人に 2 重下線、本学学生・大学院生には下線

- (1) 能登滉太, 齊藤国靖, 早川尚男 『ヘッセ行列の波数表記によるアモルファス固体の局所構造解析』日本物理学会第 79 回年次大会 (2024 年), 講演番号 16aE315-9.
- (2) 岩永大我, 齊藤国靖 『円形境界下でのアクティブマターの流れとジャミング転移』日本物理学会第 79 回年次大会 (2024 年), 講演番号 17aE313-4.
- (3) 細野翔大, 齊藤国靖 『フェーズフィールド格子ボルツマン法を用いたカイラリティをもつアクティブネマティクスの安定性解析』日本物理学会第 79 回年次大会 (2024 年), 講演番号 18aE311-9.
- (4) 東昇吾, 齊藤国靖 『カイラルアクティブマターの異常拡散と時間相関の数値解析』日本物理学会第 79 回年次大会 (2024 年), 講演番号 18aE311-10.

7. その他特記事項 (2025 年度)

- (1) 外部資金の獲得状況

- 科研費・基盤研究 (C) 22K03459 『擬フロッピーモードで解き明かす粒子系の摩擦・変形・形状とレオロジーの関係』 研究代表者

(2) その他

5. 主要な論文(3), (5), (10)はそれぞれ Soft Matter 誌, Soft Matter 誌, Eur. Phys. J. E 誌の表紙に選出されました。

# 研究成果報告書

物理科学科 下村 晋

## 1. 研究テーマ

構造物性物理学

## 2. 要旨

希土類化合物や遷移金属化合物が示す多様な性質の起源を微視的に明らかにすることを目的として、X線回折・散乱・分光実験により格子・電荷・磁性の秩序とその動的性質について調べている。

## 3. 研究の背景

物質の多様な性質を統一的に理解するためには、微視的な視点からその起源を明らかにする必要がある。構造物性物理学では、結晶や電荷や磁性の秩序やゆらぎの観点から物質の性質を解き明かすことを目的としており、X線回折・散乱・分光法は不可欠な実験手法と言える。通常のX線源に加えて放射光のX線を用いることにより、格子・電荷・磁性の秩序とその動的性質についても調べることが可能となる。

## 4. 研究手法・成果

希土類化合物や遷移金属化合物において、相転移に伴う結晶構造や磁気構造の変化、構造不規則系における静的・動的性質をX線回折・X線散漫散乱・共鳴X線磁気回折によって調べた。特に、電荷密度波を示す物質群について、格子と磁気の相関関係を明らかにすることを目的として研究をおこなった。また、共同研究として放射光を用いたメスバウアー一回折実験をいくつかの鉄化合物に対しておこなった。並行して、2次元X線検出器の導入など、回折装置の高度化を進めた。

## 5. 主要な論文、著者等 (2021-2025年) : 本人に2重下線、本学学生・大学院生には下線

- (1) Shin Nakamura, Kosuke Fujiwara, Takaya Mitsui, Susumu Shimomura "Development of synchrotron Mössbauer diffractometer and its possible application to industry" Interactions **245**, 324(15 pages), 2024.
- (2) Kosuke Fujiwara, Shin Nakamura, Susumu Shimomura, and Takaya Mitsui "Synchrotron Mössbauer Micro  $\gamma$ -ray Diffractometer Installed on BL11XU at SPring-8" JPS Conf. Proc. **41**, 011002(10 pages), 2024.
- (3) Shin Nakamura, Kosuke Fujiwara, Takaya Mitsui, and Susumu Shimomura "Anomalous Interference Effect in Pure Nuclear Bragg Reflection of  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ " J. Phys. Soc. Jpn. **92**, 124708:1-5, 2023.
- (4) Shin Nakamura, Takaya Mitsui, Masayuki Kurokuzu, and Susumu Shimomura, "Pure Nuclear Bragg Reflection due to Combined Magnetic and Quadrupole Interaction in  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ " J. Phys. Soc. Jpn. **90**, 104713:1-5, 2021.

6. 主要な学会発表等 (2021-2025 年) : 本人に 2 重下線、本学学生・大学院生には下線

- (1) Shin Nakamura, Kosuke Fujiwara, Takaya Mitsui, Susumu Shimomura "Development of synchrotron Mössbauer diffractometer and its possible application to industry" International Symposium on the Industrial Applications of the Mössbauer Effect (ISIAME 2024), Kitakyushu, Sep. 2, 2024.
- (2) 藤原孝将, 三井隆也, 下村晋, 中村真一「放射光メスバウアー回折分光による  $^{57}\text{Fe}_3\text{O}_4$  のフェルベ-転移前後の B サイトスペクトルの観測」日本物理学会 (第 78 回年次大会, 東北大学) 2023 年 9 月 17 日.
- (3) 中村真一, 藤原孝将, 三井隆也, 下村晋「 $\text{Fe}_3\text{O}_4$  の純核ブラッグ散乱における特異な干渉効果」日本物理学会 (春季大会, オンライン) 2023 年 3 月 23 日.
- (4) 中村真一, 藤原孝将, 三井隆也, 和氣達也, 川口裕介, 下村晋「放射光メスバウアー回折による  $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  のサイト選択的スペクトル」日本物理学会 (第 77 回年次大会, オンライン) 2022 年 3 月 16 日.

7. その他特記事項 (2025 年度)

- ・科学研究費補助金・基盤 (C)「マイクロメスバウアービームを用いた混合原子価鉄酸化物の電荷秩序配列の研究」研究分担者.
- ・田代孝二, 下村晋, 他 (計 15 人), 「SPring-8 利用研究課題審査委員会を終えて 分科会主査報告」SPring-8/SACLA/ NanoTerasu Information, Vol.1, 38-51 (2025).

# 研究成果報告書

物理科学科 鈴木 信三

## 1. 研究テーマ

炭素ナノ構造体の物理化学 –カーボンナノチューブの作製・分離精製と応用–

## 2. 要旨

アーク放電法やその他の方法を用いて作製された単層カーボンナノチューブを含むススを界面活性剤溶液中に分散した後、金属／半導体的性質をもつ単層カーボンナノチューブを分離精製する条件について検討している。今年度は、アーク放電法により作製した単層カーボンナノチューブ溶液を、ゲルクロマトグラフィーの方法を用いて金属／半導体的性質をもつ単層カーボンナノチューブに分離精製する際の充填剤の状態や展開溶媒について検討を進めた。

## 3. 研究の背景

炭素原子が六角形の網目状になったグラファイトシートを丸めた構造をもつ単層カーボンナノチューブは、その直径やねじれ方(キラリティ)の違いにより、電子状態(金属的／半導体的性質)の違いなど、物理化学的性質の異なるものが得られる。その物理化学的性質を詳しく検討するために、単層カーボンナノチューブの生成過程に関する理解と、作製時に得られる不純物(金属微粒子や無定形炭素)をできるだけ簡単に取り除き、更に直径やねじれ方(キラリティ)を区別した単層カーボンナノチューブを分離精製する手法の開発が必要となる。

## 4. 研究手法・成果

アーク放電法で作製した単層カーボンナノチューブを含むススを用いて、界面活性剤(SC)を用いた水溶液中に分散した後に、超遠心分離操作により不純物(金属微粒子や無定形炭素)を取り除いた。その分散溶液を用いて、ゲルクロマトグラフィーにより、金属／半導体的性質をもつ単層カーボンナノチューブの分離精製条件の検討を行った。

今年度はゲルカラムに用いる充填剤の状態や展開溶媒について、可視紫外吸収スペクトルを比較することにより分離精製条件の検討を行った。今年度の分離精製に際して注意した点は、(1)ゲルカラムに用いた充填剤中に含まれるアルコールを除くこと、(2)ゲルカラムの雰囲気と展開溶媒を同一条件で行うこと、(3)これまでの3分画方式から2分画方式に変更すること、等である。図は今年度行った単層カーボンナノチューブの分離精製条件(TN-1, TN-2(再現性))における、各分画の可視紫外吸収スペクトル変化を示す。ゲルカラムに用いた充填剤中に含まれるアルコールを除くことで、金属的性質をもつ単層カーボンナノチューブの相対的な割合が増えたこと、また3分画方式から2分画方式に変えたことで、後の分画で半導体的性質をもつ単層カーボンナノチューブの割合が再現性良く増加していること等が、可視紫外吸収スペ

クトルを比較することにより示された。

これらの分離精製条件をさらに詳しく検討することで、金属／半導体を区別した単層カーボンナノチューブを、高純度かつスケールアップした状態で分離精製することができるようになる  
と期待される。

## 5. 主要な論文、著者等 (2021-2025 年)

特になし。

## 6. 主要な学会発表等 (2021-2025 年)

(1) K. Mishima, M. Kusakabe, Y. Inoue, S. Suzuki

“Raman spectroscopy of SWCNT-dispersed solutions after separated by using gel-chromatography”,

The 68<sup>th</sup> Fullerenes-Nanotubes-Graphen General Symposium,

Meijo University, Nagoya, March 3-5, 2025.

## 7. その他特記事項 (2025 年度)

特になし。

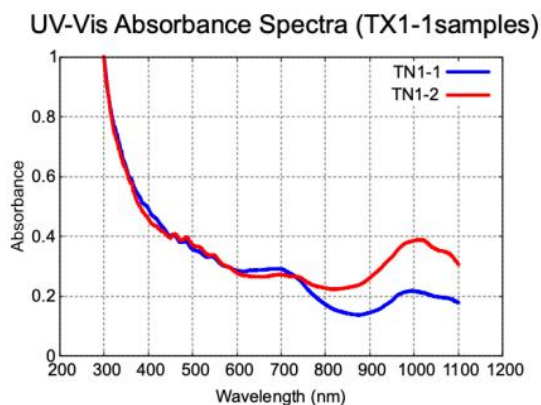


図22: 二段階分離精製分離精製結果

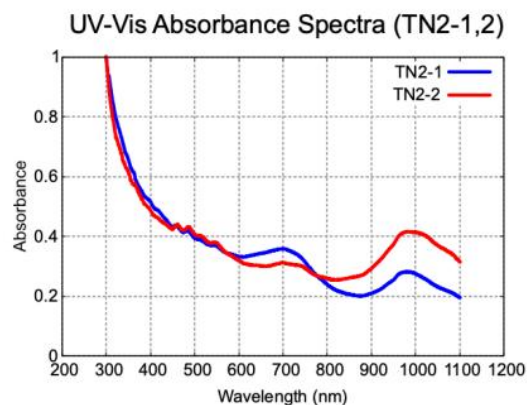


図23: 二段階分離精製結果(再現性)

図：ゲルろ過法により分離精製された単層カーボンナノチューブ分散溶液のラマンスペクトルの例。TN-1, TN-2(再現性)のそれぞれにおいて、最初の分画の可視紫外吸収スペクトルを青い線で、2 番目の分画の可視紫外吸収スペクトルを赤い線で表している。どちらの場合も、2 番目の分画において半導体的性質をもつ単層カーボンナノチューブによる吸収 (1000 nm 付近にピークをもつ) の割合が増えていることが分かる。

# 研究成果報告書

物理科学科 瀬川耕司

## 1. 研究テーマ

トポロジカル物質の実験研究

## 2. 要旨

単結晶および薄膜作製を主な手法として物性物理の実験的研究を行っている。

本年、主に取り組んだ研究を次に挙げる。

- ・ タリウム系トポロジカル絶縁体  $\text{TlBiSe}_2$  の薄膜成長
- ・ トポロジカル物質(ディラック半金属候補物質)単結晶の作製
- ・ トポロジカル絶縁体および関連物質の共同研究用単結晶の作製

## 3. 研究の背景

固体物理学の発展と物質・材料とは常に密接に結びついてきた。古くは半導体から、銅酸化物や鉄系の高温超伝導体、重い電子系といった希土類金属間化合物、などがその例として挙げられる。それらは主に無機化合物をその舞台としており、かつては特定の元素を中心として研究が展開されてきた。半導体でいえば Si やその周辺の典型元素であり、高温超伝導なら銅や鉄、などである。2000 年代半ばからさかんに研究されてきたのがトポロジカル絶縁体をはじめとするトポロジカル物質であり、これらの研究では特定の元素というよりは、そのバンド構造と対称性にスポットが当てられてきた。本研究では、新奇な物性を発現することが期待されるそうした興味深い物質の結晶合成を行っている。

## 4. 研究手法・成果

- ・ タリウム系トポロジカル絶縁体  $\text{TlBiSe}_2$  の薄膜成長および派生技術による特許

タリウム系トポロジカル絶縁体  $\text{TlBiSe}_2$  薄膜は、ターゲットを手作りして膜成長を開始したが、格子マッチングの良い基板単結晶が結局得られず、十分なクオリティの薄膜はまだ得られていない。

ただ、ターゲット作製時に大容量の多結晶試料を作製するノウハウから派生した技術から、石英封管の機械化装置により特許を出願することができた。

・ トポロジカル物質および関連物質単結晶の作製

東北大学から依頼され、磁気スキルミオン物質と言われている  $\text{Eu}(\text{Al}, \text{Ga})_4$  の単結晶成長を、自己フラックス法により行った。この系の Al:Ga 比は仕込み組成とできた単結晶で異なることが ICP-AES 分析で判明し、現在までに狙った組成の単結晶を得ることができるようになった。この Al:Ga 混合フラックスの除去には、従来は酸かアルカリが使われてきたが、本研究では 2 元素混合の場合に限りアルコールで除去できることを見出した（残念ながらこの反応自体は近年、報告されていたことがその後判明）。Al:Ga 混合物は均一に固溶するため、Ga が適度に混ざると Al の表面積が増え、アルコールや水と反応しやすくなったためと考えられる。

5. 主要な論文、著者等(2021-2025 年)：本人に 2 重下線、本学学生・大学院生には下線

- (1) “Observation of edge states derived from topological helix chains”, K. Nakayama, A. Tokuyama, K. Yamauchi, A. Moriya, T. Kato, K. Sugawara, S. Souma, M. Kitamura, K. Horiba, H. Kumigashira, T. Oguchi, T. Takahashi, K. Segawa, T. Sato, *Nature*, **631** 54-59 (2024).
- (2) “Visualizing crystal twin boundaries of bismuth by high-spatial-resolution ARPES”, Ayumi Moriya, Kosuke Nakayama, Kouji Segawa, Takafumi Sato *et al.*, *Physical Review Research*, **5** 023152 (2023).
- (3) “Pb/Bi heterostructure as a versatile platform to realize topological superconductivity”, Ikuko Watanabe, Seigo Souma, Kouji Segawa, Takafumi Sato *et al.*, *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, **2022** 04A103, (2022).
- (4) “Unveiling quasiparticle dynamics of topological insulators through Bayesian modelling”, Satoru Tokuda, Kouji Segawa, Takafumi Sato *et al.*, *Communications Physics* **4**, 170 (2021).
- (5) “Dirac semimetal phase and switching of band inversion in  $\text{XMg}_2\text{Bi}_2$  (X = Ba and Sr)”, Daichi Takane, Kouji Segawa, Takafumi Sato *et al.*, *Scientific Reports* **11**, 21937 (2021).
- (6) “Conversion of a conventional superconductor into a topological superconductor by topological proximity effect”, C.X. Trang, K. Segawa, T. Sato *et al.*, *Nature Communications* **11**, 159 (2020).

6. 主要な学会発表等(2020-2024 年)：本人に 2 重下線、本学学生・大学院生には下線

- (1) “EuAl<sub>4</sub>の多彩な磁性の微視的起源”，新井結喜，中山耕輔，本間飛鳥，相馬清吾，志賀大亮，組頭広志，高橋隆，瀬川耕司，佐藤宇史，日本物理学会第 80 回年次大会(2025 年)，広島大学，2025 年 9 月 18 日.
- (2) ”反強磁性体 RB<sub>4</sub>における線ノード電子状態：マイクロ ARPES”，近藤悠貴，本間飛鳥，大隅拓海，星野銀太，相馬清吾，是常隆，瀬川耕司，佐藤宇史，日本物理学会第 80 回年次大会(2025 年)，広島大学，2025 年 9 月 18 日.
- (3) “トポロジカル絶縁体 Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>の一軸圧力印加 ARPES”，左右田颯，中山耕輔，鈴木崇人，八重樫健，高橋隆，瀬川耕司，佐藤宇史，日本物理学会第 80 回年次大会(2025 年)，広島大学，2025 年 9 月 18 日.
- (4) “希土類四ホウ化物 RB<sub>4</sub>における線ノード電子状態：マイクロ ARPES”，近藤悠貴，本間飛鳥，大隅拓海，星野銀太，相馬清吾，是常隆，瀬川耕司，佐藤宇史，日本物理学会春季大会(2025 年)，オンライン開催，2025 年 3 月 19 日.
- (5) “EuGa<sub>2</sub>Al<sub>2</sub>の電子状態の終端面依存性：μ-ARPES”，新井結喜，中山耕輔，本間飛鳥，相馬清吾，田中清尚，小澤健一，志賀大亮，組頭広志，高橋隆，瀬川耕司，佐藤宇史，日本物理学会春季大会(2025 年)，オンライン開催，2025 年 3 月 19 日.
- (6) “トポロジカル物質の一軸圧力印加 ARPES”，左右田颯，中山耕輔，鈴木崇人，八重樫健，菅原克明，高橋隆，瀬川耕司，佐藤宇史，日本物理学会春季大会(2025 年)，オンライン開催，2025 年 3 月 18 日.
- (7) “スキルミオン物質 Eu(Al, Ga)<sub>4</sub>の電子状態の組成依存性：高分解能 ARPES”，新井結喜，中山耕輔，瀬川耕司，佐藤宇史 *et al.*，日本物理学会第 78 回年次大会，北海道大学，2024 年 9 月 18 日.
- (8) “希土類四ホウ化物 GdB<sub>4</sub>の終端依存した電子バンド構造：マイクロ ARPES”，近藤悠貴，瀬川耕司，佐藤宇史 *et al.*，日本物理学会第 78 回年次大会，北海道大学，2024 年 9 月 16 日.
- (9) “トポロジカルらせん鎖に由来するエッジ状態の観測：マイクロ ARPES”，中山耕輔，瀬川耕司，佐藤宇史 *et al.*，日本物理学会第 78 回年次大会，北海道大学，2024 年 9 月 16 日.
- (10) “マイクロ ARPES による Te(0001)の電子状態イメージング”，中山耕輔，瀬川耕司，佐藤宇史 *et al.*，日本物理学会 2024 年春季大会（オンライン開催），2024 年 3 月 20 日.
- (11) “反強磁性体 Eu(Al, Ga)<sub>4</sub>の角度分解光電子分光”，新井結喜，中山耕輔，瀬川耕司，佐藤宇史 *et al.*，日本物理学会 2024 年春季大会（オンライン開催），2024 年 3 月 18 日.
- (12) “キャリア制御したカルコパイライト CdGeAs<sub>2</sub>の高分解能 ARPES”，岩谷拓実，瀬川耕司，佐藤宇史 *et al.*，日本物理学会第 78 回年次大会，東北大学，2023 年 9

月 15 日.

- (13) “新規トポロジカル絶縁体候補物質 CdGeAs<sub>2</sub> の ARPES”, 岩谷拓実, 瀬川耕司, 佐藤宇史 *et al.*, 日本物理学会 2023 年春季大会 (オンライン開催), 2023 年 3 月 24 日.
- (14) ”トポロジカル絶縁体候補カルコパイライト構造物質の ARPES”, 岩谷拓実, 瀬川耕司, 佐藤宇史 *et al.*, 日本物理学会 2022 年秋季大会, 東京工業大学, 2022 年 9 月 15 日.
- (15) ”Bi における双晶境界の観測: マイクロ ARPES”, 守谷歩美, 瀬川耕司, 佐藤宇史 *et al.*, 日本物理学会第 77 回年次大会 (オンライン開催), 2022 年 3 月 15 日.
- (16) ”Te における一次元電子状態: マイクロ ARPES”, 中山耕輔, 瀬川耕司, 佐藤宇史 *et al.*, 日本物理学会第 77 回年次大会 (オンライン開催), 2022 年 3 月 15 日.
- (17) ”Te(0001)のマイクロ ARPES”, 徳山敦也, 瀬川耕司, 佐藤宇史 *et al.*, 日本物理学会 2021 年秋季大会 (オンライン開催), 2021 年 9 月 22 日.
- (18) ”Bi(111)劈開表面のマイクロ ARPES”, 守谷歩美, 瀬川耕司, 佐藤宇史 *et al.*, 日本物理学会 2021 年秋季大会 (オンライン開催), 2021 年 9 月 21 日.
- (19) ”ディラック半金属候補物質 BaMg<sub>2</sub>Bi<sub>2</sub> の高分解能 ARPES”, 高根大地, 瀬川耕司, 佐藤宇史 *et al.*, 日本物理学会第 76 回年次大会 (オンライン開催), 2021 年 3 月 14 日.
- (20) ”マイクロ ARPES による新奇ディラック半金属の電子状態”, 中山耕輔, 瀬川耕司, 佐藤宇史 *et al.*, 日本物理学会第 76 回年次大会 (オンライン開催), 2021 年 3 月 13 日.
- (21) ”GCIB を用いた劈開困難な結晶方位の ARPES”, 徳山敦也, 瀬川耕司, 佐藤宇史 *et al.*, 日本物理学会第 75 回年次大会 (オンライン開催), 2021 年 3 月 13 日.

#### 7. その他特記事項(2025 年度)

- (1) 科学研究費補助金(継続): 基盤研究(C) 「タリウム系トポロジカル絶縁体の薄膜化によるトポロジカル輸送現象の探究」, 2021-2025 年度
- (2) 石英ガラス封入装置の特許出願 (「ガラス管封止装置及びガラス管封止方法 (国内優先権主張)」特願 2025-54384, 出願日 2025 年 3 月 27 日)

# 研究成果報告書

物理科学科 新山 雅之

## 1. 研究テーマ

素粒子・原子核物理と放射線検出器を用いたミュオグラフィの研究

## 2. 要旨

本研究は、初期宇宙の高温状態で存在したと考えられている特殊なハドロンの性質解明と、宇宙の進化に重要な役割を果たしてきた暗黒物質の探査を目的としています。具体的には、兵庫県のスプリングエイトにおける高エネルギー光子ビームを用いたハドロンの研究、茨城県の J-PARC での暗黒物質探査を進めています。

身の回りの物質の質量の 99%以上は陽子などのハドロンの質量によるものですが、その質量はヒッグス機構では説明できず、強い相互作用によるクォーク凝縮がその起源であると考えられています。原子核中ではクォーク凝縮が変化し、ハドロンの質量も変化すると予想されていますが、この現象の実験的検証は未だ確立されていません。また、4つ以上のクォークで構成されるハドロンの内部構造についても不確定な点が多く残されています。本年度

は、いくつかのハドロンの性質についての研究成果を論文としてまとめました。

さらに、暗黒物質候補としてのステライルニュートリノの探査を進め、短距離ニュートリノ振動によるその存在の検証、およびこれに必要なハドロンの生成量測定についての研究を行いました。

加えて、宇宙線  $\mu$  粒子を利用した火山の透視を目的とし、高時間分解能・高位置分解能を備えた放射線検出器の開発にも取り組んでいます。本手法により、火山内部の密度構造の詳細な観測が可能となり、地質学的・防災的観点からも有用な情報を提供できると期待されます。

### 3. 研究の背景

宇宙はビッグバンによって始まり、その中でクォークなどの素粒子が自由に存在していました。宇宙の膨張と冷却によりクォークが束縛され、陽子や中性子などのハドロロンが形成されました。暗黒物質の密度揺らぎも宇宙進化に重要な役割を果たしています。また、ハドロロンは3つのクォークで構成されるバリオンとクォーク・反クォークで構成されるメソンに分類され、4つ以上のクォークで構成される粒子の存在も注目されています。これらのハド

ロンの内部構造は構成子クォークで記述され、ハドロンの質量などの性質は環境下で変化することが予想されます。

ハドロンは、3つのクォークで構成されるバリオンと、クォーク・反クォークで構成されるメソンに分類され、さらに4つ以上のクォークで構成される粒子の存在も注目されています。これらのハドロンの内部構造は構成子クォークで記述され、ハドロンの質量などの性質が環境によって変化することが予想されています。今世紀に入って、4つ以上のクォークを持つマルチクォークハドロンの候補が報告されるようになり、その性質の解明が重要な研究課題となっています。このような研究には、大強度のビームと高精度な検出器の開発が不可欠です。

加えて、暗黒物質の理解を深めるため、ステライルニュートリノの探査が新たな研究分野として注目されています。この探査には、短距離ニュートリノ振動の詳細な測定が不可欠であり、そのためには加速器でのニュートリノ生成量の精密な見積もりが必要となります。

さらに、宇宙線  $\mu$  粒子を用いた火山の透視に関する研究も進めています。火山内部の密度構造を明らかにするためには、高エネルギーの  $\mu$  粒子を選別する必要がありますが、これまでは大質量の遮蔽体を用いる手法が一般的であったため、装置の大型化によって可搬性が損なわれていました。そ

ここで、高時間分解能と高位置分解能を併せ持つ検出器を開発し、 $\mu$  粒子の速度を測定することで遮蔽体を用いずに高エネルギーの  $\mu$  粒子を選別する方法を採用しました。このアプローチにより、ポータブルな装置の開発を可能にし、より柔軟な観測が期待されます。

#### 4. 研究手法・成果

兵庫県スプリングエイトでは、高エネルギーの光子ビームを用いたハドロンの実験が進行中であり、陽子や重陽子標的にガンマ線を照射し、ハドロンの生成のデータを取得しました。これらの光子ビームを用いたハドロンの最新の研究結果について、論文発表を行いました。また、高エネルギー研究所では、4つのクォークで構成されるハドロンの研究を進め、その成果を論文として公表しました。

さらに、茨城県つくば市の Belle 実験では、電子・陽電子対消滅実験のデータを用いたハドロンの研究を行い、関連論文を発表しました。また、茨城県の J-PARC では、暗黒物質候補となる新種のニュートリノを探索するニュートリノ振動実験が進められており、ハドロンの識別用チェレンコフ検出器の開発も行っています。加えて、ステライルニュートリノの探索に不可欠な検出器の開発も進め、その成果を論文で公表しました。

加えて、宇宙線  $\mu$  粒子を用いた火山の透視を目的とし、高時間分解能・高位置分解能を備えた放射線検出器の開発を進めています。この開発の一環として、兵庫県スプリングエイトにおいて光子ビームを用いた性能試験実験を実施しました。この実験により、目標としていた時間分解能を達成し、さらに高位置分解能を達成するための読み出し電極の最適化を行うためのデータを取得しました。これにより、火山透視に適した検出器の開発が前進しました。

5. 主要な論文、著者等（2021-2025年）：本人に2重下線、本学学生・大学院生には下線

- (1) “Measurement of the  $D^0 \rightarrow K^- \pi^+ e^+ e^-$  branching fraction and search for  $D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- e^+ e^-$  and  $D^0 \rightarrow K^+ K^- e^+ e^-$  decays at Belle”, Phys.Rev.D 112 (2025) 7, L071101, I. Adachi, M. Niyama et al.
- (2) “Search for an Axion-Like Particle in  $B \rightarrow K^{(*)} a(\rightarrow \gamma\gamma)$  Decays at Belle”, JHEP 12 (2025) 109, I. Adachi, M. Niyama et al.
- (3) “Prototype of carbonless MRPC for MARQ experiment”, Nucl.Instrum.Meth.A 1080 (2025) 170768, Ming-Lee Chu, M. Niyama et al.
- (4) “Search for lepton-flavor-violating tau decays to  $\ell \alpha$  at Belle”, JHEP 08 (2025) 155, K. Uno, M. Niyama et al.
- (5) “PMT calibration for the JSNS<sup>2</sup>-II far detector with an embedded LED system”, JINST 20 (2025) 10, T10003, Jisu Park, M. Niyama et al.
- (6) “Prospects for Pentaquark Baryon Search with the Upgraded LEPS2 Facility”, Acta Phys.Polon.B 56 (2025) 3-A13, T. Nakano, M. Niyama et al.

- (7) “Network-Distributed Data-Acquisition System for Photoproduction Experiments With LEPS2”, IEEE Trans.Nucl.Sci. 72 (2025) 3, 348-354, Sun Young Ryu, M. Niiyama et al.
- (8) “Muon tagging with flash ADC waveform baselines”, JINST 20 (2025) 09, P09002, D.H. Lee, M. Niiyama et al.
- (9) “Measurement of  $B^+ \rightarrow \tau + \nu_\tau$  branching fraction with a hadronic tagging method at Belle II”, Phys.Rev.D 112 (2025) 7, 072002, I. Adachi, M. Niiyama et al.
- (10) “First JSNS2 measurement of the electron neutrino flux using the  $C^{12}(\nu_e, e^-)Ng.s.12$  reaction”, Phys.Rev.D 112 (2025) 3, 032012, T. Dodo, M. Niiyama et al.
- (11) “Measurement of the inclusive branching fractions for  $B_s^0$  decays into D mesons via hadronic tagging”, JHEP 04 (2025) 114, I. Adachi, M. Niiyama et al.
- (12) “Production cross sections of light and charmed mesons in  $e^+e^-$  annihilation near 10.58 GeV”, Phys.Rev.D 111 (2025) 5, 052003, R. Seidl, M. Niiyama et al.

- (13) “Measurement of  $B \rightarrow K^*(892) \gamma$  decays at Belle II”, JHEP 09 (2025) 024, I. Adachi, M. Niiyama et al.
- (14) “First Measurement of Missing Energy due to Nuclear Effects in Monoenergetic Neutrino Charged-Current Interactions”, Phys.Rev.Lett. 134 (2025) 8, 081801, E. Marzec, M. Niiyama et al.
- (15) “Determination of  $|V_{ub}|$  from simultaneous measurements of untagged  $B^0 \rightarrow \pi^- \ell^+ \nu_\ell$  and  $B^+ \rightarrow \rho^0 \ell^+ \nu_\ell$  decays”, Phys.Rev.D 111 (2025) 11, 112009, I. Adachi, M. Niiyama et al.
- (16) “Evidence of  $h_b(2P) \rightarrow \Upsilon(1S) \eta$  Decay and Search for  $h_b(1P,2P) \rightarrow \Upsilon(1S) \pi^0$  with the Belle Detector”, PRL 133 (2024) 26, 261901, E. Kovalenko, M. Niiyama et al.
- (17) “Status and prospects of the LEPS2 solenoid spectrometer”, Nuovo Cim.C 47 (2024) 4, 239, M. Niiyama
- (18) “Measurement of the branching fractions of  $B^- \rightarrow D^{(*)} K^- K_{(S)}^{(*)0}$  and  $B^- \rightarrow D^{(*)} D_s^-$  decays at Belle II, JHEP 08 (2024) 206, I. Adachi, M. Niiyama
- (19) “Measurements of the branching fractions of  $\Xi_c^0 \rightarrow \Xi_0 \pi^0 \Xi_c^0$   $\rightarrow \Xi_0 \pi^0$ ,  $\Xi_c^0 \rightarrow \Xi_0 \eta$   $\Xi_c^0 \rightarrow \Xi_0 \eta$ , and  $\Xi_c^0 \rightarrow \Xi_0 \eta'$   $\Xi_c^0 \rightarrow \Xi^0 \eta'$  and

asymmetry parameter of  $\Xi_c^0 \rightarrow \Xi^0 \pi^0$   $\Xi_c^0 \rightarrow \Xi^0 \pi^0$ ", JHEP 10 (2024) 045,

I. Adachi, M. Niiyama et al.

(20) Search for the decay  $B^0 \rightarrow \gamma \gamma$  using Belle and Belle II data", PRD110

(2024) 3, L031106, I. Adachi, M. Niiyama et al.

(21) "Measurement of the branching fraction of the decay  $B^-$

$\rightarrow D^0 \rho(770)^-$  at Belle II", PRD109 (2024), 11, L111103, I. Adachi, M.

Niiyama

(22) "Evaluation of the performance of event reconstruction algorithms in

the JSNS2 experiment using a  $^{252}\text{Cf}$  calibration source", NIMA 1072

(2025) 170216, D.H.Lee, M. Niiyama et al.

(23) "Measurements of the Branching Fraction, Polarization,

and CPAsymmetry for the Decay  $B^0 \rightarrow \omega \omega$ ", PRL133 (2024) 8, 081803,

Y. Guan, M. Niiyama et al.

(24) "Search for Baryon-Number-Violating Processes in  $B^-$  Decays to

the  $\Xi_c^- \Lambda_c^-$  Final State", Phys.Rev.Lett. 133 (2024) 7, 071802, T. Gu,

M. Niiyama et al.

- (25) Search for charged-lepton flavor violation  
in  $Y(2S) \rightarrow \ell^\mp \tau^\pm Y(2S) \rightarrow \ell^\mp \tau^\pm$  ( $\ell = e, \mu$ ) decays at Belle”,  
JHEP 02 (2024) 187, R. Dhamija, M. Niiyama et al.
- (26) The acrylic vessel for JSNS<sup>2</sup>-II neutrino target”, JINST 18 (2023) 12,  
T12001, C.D.Shin, M. Niiyama et al.
- (27) Differential cross sections and photon beam asymmetries of  $\eta$   
photoproduction on the proton at  $E_\gamma = 1.3\text{--}2.4$  GeV”, PHYSICAL  
REVIEW C 106, 035201 (2022), T. Hashimoto, M. Niiyama et al.
- (28) First measurement of differential cross sections and photon beam  
asymmetries for photoproduction of the  $f_0(980)$  meson decaying  
into  $\pi^0\pi^0$  at  $E_\gamma < 2.4$  GeV”, Phys.Rev.C 107 (2023) 4, L042201, N.  
Muramatsu, M. Niiyama et al.
- (29) Study of the lineshape of  $X(3872)$  using B decays to  $D^0 D^{*0} K$ ”,  
Phys.Rev.D 107 (2023) 11, 112011, H. Hirata, M. Niiyama et al.
- (30) Recent Results of Few Body System in the Hadron Physics with  
Photon Beam”, Few-Body Syst. (2021) 62:99, M. Niiyama.
- (31) Search for tetraquark  $X_{ccss}$  states in  $D_s D_s$  ( $D_s^* D_s^*$ ) final states at  
Belle, Phys. Rev. D 105, 032002, X. Y. Gao, M. Niiyama et al.

- (32) Measurements of the branching fractions of  $\Xi_c \rightarrow \Lambda K_S$ ,  $\Xi_c \rightarrow \Sigma_0 K_S$ , and  $\Xi_c \rightarrow \Sigma^- K^+$  decays at Belle”, Phys.Rev.D 105 (2022) 1, L011102, Y. Li, M. Niiyama et al.

6. 主要な学会発表等（2021-2025年）：本人に2重下線、本学学生・大学院生には下線

- (1) 20th International Workshop on Hadron Structure and Spectroscopy and 5th workshop on Correlations in Partonic and Hadronic Interactions, “QCD and the Strange Baryon Spectrum”, M. Niiyama
- (2) 日本物理学会 第79回年次大会(2024)「機械学習の荷電粒子飛跡検出への適用」, 西京太郎, 新山 雅之
- (3) The 20th International Conference on Hadron Spectroscopy and Structure (HADRON 2023), “Status and Prospects of the LEPS2 Solenoid Spectrometer”, M. Niiyama
- (4) The 8th Asia-Pacific Conference on Few-Body Problems in Physics (招待講演) 2021, “Recent Results of Few Body System in the Hadron Physics with Photon Beam”, M. Niiyama

- (5) 日本物理学会 第 77 回年次大会, “Belle II 実験の CDC のための He-  
CO<sub>2</sub>-CF<sub>4</sub> 混合ガスの特性研究”, 黒田有希奈, 新山雅之, 谷口七重, 宇野彰  
二, 尾崎均
- (6) 日本物理学会 2021 年秋季大会, “Performance of LEPS2 Solenoid  
spectrometer (1)”, R. Kobayakawa, M. Niiyama

7. その他特記事項 (2025 年度)

なし

# 研究成果報告書

物理科学科 山縣 淳子

## 1. 研究テーマ

ハドロン-原子核束縛状態から探るハドロン-原子核間相互作用の性質

## 2. 要旨

媒質中のハドロンの性質を探るために、ハドロンと原子核の束縛状態であるハドロン-原子核束縛状態の構造および生成に関する理論計算を行った。具体的には、(a)(p,d)反応による $\eta'$ 中間子原子生成、(b)(pbar,p)反応による反陽子原子生成、(c)Kaonic-He原子の精密測定から探る反K中間子-原子核間相互作用、(d) $^{12}\text{C}(K^-,p)$ 反応から探る反K中間子-原子核間相互作用、(e)確率変分法(SVM)を用いたKbarNN系の構造計算である。反K中間子の性質解明を軸にして、これまで培ってきた研究手法を応用することで、 $\eta'$ 中間子原子や反陽子原子に関する研究にも展開することができた。

## 3. 研究の背景

自然界には4つの力（重力・電磁気力・弱い力・強い力）があり、ハドロンと呼ばれる互いに強い相互作用をする粒子が存在する。ハドロンは、主に3つのクォークから構成されるバリオンとクォーク・反クォークで構成される中間子に分類される。通常の原子核は、バリオンである陽子と中性子というたった2種類の構成要素で構成されている。これに対して中間子が原子核内に束縛された状態を中間子原子核、中間子が原子軌道に束縛された状態を中間子原子という。束縛された中間子は、バリオンのみで構成される原子核の性質を大きく変化させる可能性があり、また中間子と核子（陽子や中性子）の間の強い相互作用に制限を与える。どういうハドロンがどういう性質の変化をもたらすかを系統的に明らかにすることで、有限核密度でのカイラル対称性の部分的回復といった量子色力学の基本的性質に迫ることもできる。

2025年度は反K中間子の媒質中における性質解明の研究を軸として、 $\eta'$ 中間子原子や反陽子原子に関する生成断面積の理論計算を行った。

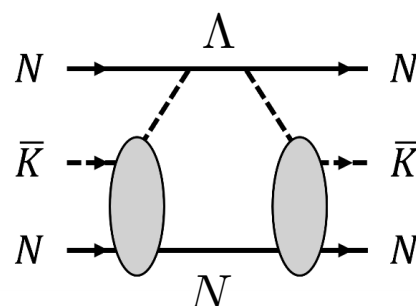
## 4. 研究手法・成果

すでに実験データが得られている(a) $\eta'$ 中間子原子、(c)反K中間子原子、(d)反K中間子原子核に関しては以下のような中間子-原子核間ポテンシャルを導入し、実験データを解析することでポテンシャルの強さおよび吸収の大きさを示すパラメータ( $V_0, W_0$ )を決定した。

$$\text{式(1) : Phenomenological potential } U_{\text{ph}}(r) = (V_0 + iW_0) \frac{\rho(r)}{\rho_0} \quad (\rho_0 = 0.17 \sim \text{fm}^{-3})$$

また、(b)反陽子原子生成に関する生成断面積の理論計算を行い、束縛状態に対応するピーク構造が観測できる可能性を示した。さらに、将来の反陽子ビーム実験において観測が期待される反陽子原子の量子状態と標的核の関係についても明らかにした。さらに、(e)KbarNN系において重要とされる2核子吸収の効果を示すポテンシャルを構築し、SVMを用いて構造計算を行った。その結果、2体力だけでなく2核子吸収の寄与が崩壊幅に有意に現れる可能性を示唆した。

右図は、(e)KbarNN系の構造計算において導入した構築した2核子吸収過程を表すダイアグラムである。このダイアグラムに対応する2核子吸収ポテンシャルを考慮することにより、束縛エネルギーへの寄与は小さいものの、崩壊幅が約20%程度増加する可能性を示した。



#### 5. 主要な論文、著者等 (2021-2025年)：本人に2重下線

- (1) "Structure and Formation of the Deeply Bound pbar atoms", N. Miyazaki, J. Yamagata-Sekihara, S. Hirenzaki, Prog. Theor. Exp. Phys. 誌(2026) に受理済み
- (2) "Excitation Spectra of the  $^{12}\text{C}(p,d)$  Reaction near the  $\eta'$ -Meson Emission Threshold Measured in Coincidence with High-Momentum Protons", R. Sekiya et al., Physical Review Letters 誌(2026) に受理済み
- (3) "Interrelation between pbar-Ca Atom Spectra and Nuclear Density Profiles", K. Yoshimura, S. Yasunaga, D. Jido, J. Yamagata-Sekihara, S. Hirenzaki, PTEP 2025(2025) 11, 113D02.

#### 6. 主要な学会発表等 (2021-2025年)：本人に2重下線、本学学生・大学院生には下線

- (1) "Structure of few-body antikaon-nuclear bound states with the two-body Kbar absorption", J. Yamagata-Sekihara, HYP2025: 15<sup>th</sup> International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics, 2025年9月29-10月3日, 東京大学
- (2) "2核子吸収を考慮した Kbar 中間子原子核束縛状態の構造計算", 小宮良介, 栗野真大, 山縣淳子, 関原隆泰, 日本物理学会第80回年次大会(2025年), 2025年9月16日-19日, 広島大学

#### 7. その他特記事項 (2025年度)

- (1) 外部資金：科研費 基盤 C 「K 中間子原子核およびそれを生み出す K 中間子一核子間の強い相互作用の理論研究」, (研究代表者, 2022-2025年度)
- (2) 外部資金：科研費 基盤 C 「 $\pi$ , K,  $\eta$  (958) 中間子-原子核系で探る有限密度での量子色力学の対称性」, (研究分担者, 2023-2026年度)
- (3) 外部資金：科研費 基盤 S 「反 K 中間子原子核の解明へ向けた新たな展開」, (研究分担者, 2024-2028年度)

# 研究成果報告書

物理科学科 山上 浩志

## 1. 研究テーマ

強相関  $f$  電子系の相対論的バンド理論の構築と電子物性の理論的研究

## 2. 要旨

線形補強されたスレーター型軌道法という新しい相対論的スピン分極した理論を提唱し、その数値計算プログラムの開発と応用を行った。いくつかの典型的な  $f$  電子系化合物に適用して、それらの電子構造を第一原理計算から求めた。観測された物性量との定量的な比較を行い、この新しいバンド理論の有効性を調べた。

## 2. 研究の背景

物理学の中で、固体物理学が取り扱う主題は固体の示す様々な電氣的、磁氣的および熱的な性質を微視的な観点から理解することであり、それらの主な起源は物質中の電子集団が示す性質にほかならない。原子番号が 57 の La から 71 の Lu までの 15 種類の元素はランタノイドと呼ばれ、Ce 以降の元素の内殻に 4f の電子軌道を持つことが特徴である。Sc と Y を合わせて希土類元素と呼ばれる。同じく内殻に 5f の電子軌道を持つ原子番号 90 の Th から 103 の Lw までをアクチノイド元素という。これらの  $f$  電子を持つ希土類あるいはアクチノイド元素を含む金属化合物 ( $f$  電子系) は、原子核のまわりで局在した  $f$  電子とそれ以外の伝導電子が絡み合い、そして織りなす特異な物理現象を示すことが知られている。特に、巨大な電子の有効質量をもつ物質群であることから「重い電子系」と呼ばれる。また、電子間の相互作用が物理現象の本質に重要な役割を果たしているため、「強相関電子系」の一つの典型的な現象である。希土類元素は産業物質として重要な性質をもち、さらにウランなどのアクチノイド元素は原子力発電のエネルギー材料として今日でも使われている。

原子番号の大きな希土類、およびアクチノイド元素の電子には、原子核からの強いクーロン力が働き、遠心力とつり合っている。大きな遠心力を電子が得るためには光速に近い速度で回転する必要があるため、重元素の電子にはアインシュタインの特殊相対論の効果が働く。第一原理計算から固体の電子構造を定量的に解析・予測するためには、相対論的量子力学を基にしたバンド理論が必要である。そのために、局所密度汎関数を基にした新しい相対論的バンド理論を構築することである。これにより、角度分解光電子分光法、X 線磁気円二色性などの測定結果を定量的に解釈し、物質系が示す電氣的および磁性的な物性の起源を微視的な観点から明らかにすることができる。さらに、任意の物質系に対して、小規模な数値計算から定量的な物性予言が可能となるであろう。

#### 4. 研究手法・成果

実空間バンド理論の一つである線形補強されたスレーター型軌道法 (LASTO 法) を、フルポテンシャル形式のスピンの偏極ディラック型密度汎関数に一般化した。スレーター型軌道法のブロッホ和は条件付き収束条件で解析的にフーリエ変換することができるので、フルポテンシャル法に容易に拡張できるだけでなく、以前に提案した 4 成分の相対論的線形補強平面波法 (DLAPW 法) とも高い互換性を持っている。

このフルポテンシャル Dirac 型 LASTO (DLASTO) 法の定式化を自己完結した形式で示した。3d-, 4f-, 5f-各電子系の典型的な物質に適用することで、DLASTO の第一原理計算を実行する際の計算指針を示した。

希土類 Gd 強磁性体における DLASTO 法の計算で見られるように、現象論的に強い斥力を導入した LSDA+V 法という新しい考えで計算することにより、光電子分光スペクトルを矛盾なく説明できることを示した。この LSDA+V 法は、第一原理計算から見れば、理論的に後退したパラメータ理論である。今後の研究で、正しい実験結果を導く条件として LSDA + V 法の物理的概念を考慮しながら、相対論的な第一原理バンド理論にさらに改善していく必要がある。

これまでの実験結果との系統的な研究により、非磁性アクチノイド化合物の電子構造やフェルミ面は局所密度近似の相対論的バンド理論で定量的に説明できることがわかってきている。しかしながら、現在でも磁気秩序状態や価数揺動系の電子構造を第一原理計算から得るにはさらなる理論開発が必要である。特に、希土類やアクチノイド化合物の磁性状態はスピンモーメントと軌道モーメントの合成から成り立っていることを考慮して、相対論的軌道分極効果の第一原理的理論を定式化して、その安定した数値計算プログラムの開発を行った。SPring8 (大型放射光施設)での放射光を用いた実験で重要な研究課題として、「多体系の電子構造」に関する研究開発もまだ残されている。

#### 5. 主要な論文、著者等 (2021-2025 年): 本人に 2 重下線、本学学生・大学院生には下線

- (1) Influence of Magnetic Ordering on Quasiparticle Spectral Functions: Comparison of Electronic States of CeCu<sub>6</sub> and CeRu<sub>2</sub>Ge<sub>2</sub>, I. Kawasaki, S.-i. Fujimori, H. Yamagami, T. D. Matsuda and Y. Ōnuki, Journal of the Physical Society of Japan **94** (2025) 084702 (DOI: 10.1088/2516-1075/ad0a3d)
- (2) Impact of the Ce 4f states in the electronic structure of the intermediate-valence superconductor CeIr<sub>3</sub>, S.-i. Fujimori, I. Kawasaki, Y. Takeda, H. Yamagami, N. Sasabe, Y. J. Sato, A. Nakamura, Y. Shimizu, A. Maurya, Y. Homma, D. Li, F. Honda and D. Aoki, Electronic Structure **5** (2023) 045009-045009 (DOI: 10.7566/jpsj.94.084702)

- (3) Strongly renormalized quasiparticles in UPt<sub>3</sub>, I. Kawasaki, K. Takeuchi, S.-i. Fujimori, Y. Takeda, H. Yamagami, E. Yamamoto and Y. Haga, Physical Review B **108** (2023) 165127 (DOI: 10.1103/PhysRevB.108.165127)
- (4) Element-specific insight into ferromagnetic stability in UCoGe revealed by soft x-ray magnetic circular dichroism, Y. Takeda, J. Pospíšil, H. Yamagami, E. Yamamoto and Y. Haga, Physical Review B **108** (2023) 085129 (DOI: 10.1103/PhysRevB.108.085129)
- (5) Quasiparticle State in 4f Localized Ferromagnet CeRu<sub>2</sub>Ge<sub>2</sub> Studied by Soft X-ray Photoemission Spectroscopy, I. Kawasaki, S.-i. Fujimori, Y. Takeda, H. Yamagami and Y. Ōnuki, Journal of the Physical Society of Japan **92** (2023) 064709 (DOI: 10.7566/jpsj.92.064709)
- (6) Evolution of the electronic structure and correlations accompanied by suppression of itinerant ferromagnetism in Sr<sub>1-x</sub>(La<sub>0.5</sub>K<sub>0.5</sub>)<sub>x</sub>RuO<sub>3</sub>, I. Kawasaki, S.-i. Fujimori, Y. Takeda, H. Yamagami, Rahmanto, Y. Honma, K. Matsuoka and M. Yokoyama, Phys. Rev. B **105** (2022) 195122 (DOI: 10.1103/PhysRevB.105.195122).
- (7) Electronic structure of ThPd<sub>2</sub>Al<sub>3</sub>: Impact of the U 5f states on the electronic structure of UPd<sub>2</sub>Al<sub>3</sub>, S.-i. Fujimori, Y. Takeda, H. Yamagami, J. Pospíšil, E. Yamamoto and Y. Haga, Phys. Rev. B **105** (2022) 115128 (DOI: DOI : 10.1103/physrevb.104.165124).
- (8) Spin-polarized relativistic calculations in linear augmented-Slater-type-orbital method, H. Yamagami and Y. Kitawaki, Electronic Structure **3** (2021) 034003 (DOI: 10.1088/2516-1075/ac0f54).
- (9) Electronic structure of URu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub> in paramagnetic phase: three-dimensional angle resolved photoelectron spectroscopy study, S.-i. Fujimori, I. Kawasaki, Y. Takeda, H. Yamagami, E. Yamamoto and Y. Haga, Electronic Structure **3** (2021) 024008 (DOI: 10.1088/2516-1075/abfd20).
- (10) Core-level photoelectron spectroscopy study of UTe<sub>2</sub>, S.-i. Fujimori, I. Kawasaki, Y. Takeda, H. Yamagami, Y. Homma and D. Aoki, J. Phys. Soc. Jpn. **90** (2021) 015002 (DOI:10.7566/JPSJ.90.015002).

6. 主要な学会発表等 (2021-2025年): 本人に2重下線、本学学生・大学院生には下線

- (1) 「『アクチノイドの物性化学とその応用』の開催趣旨」  
山上浩志 (京都大学複合原子力科学研究所研究会 2025年)
- (2) 「First-principles calculations of orbital polarization in relativistic

- density functional theory」Y. Kitawaki and H. Yamagami (LT29 2022 年)
- (3) 「X 線角度分解光電子分光法による重い電子系物質 EuNi<sub>2</sub>P<sub>2</sub> の電子状態の研究」  
川崎郁斗，小畠雅明，藤森伸一，竹田幸治，山上浩志，辺土正人，仲間隆男，大貫惇睦（日本物理学会 2021 年）

7. その他特記事項（2025 年度）

- (1) 国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構 物質科学研究センター  
アクチノイド科学研究グループ 客員研究員（2022 年 4 月より現在）
- (2) 国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構 施設共用課題審査委員会  
光科学専門部会 放射光分科会委員（2016 年 4 月より現在）
- (3) 日本フンボルト協会 関西支部理事（2017 年 10 月より現在）  
理事（2020 年 10 月より現在）

# 研究成果報告書

宇宙物理・気象学科 安藤 紘基

## 1. 研究テーマ

電波掩蔽観測で調べる気温と硫酸蒸気混合比の長期変動について

## 2. 要旨

日本の金星探査機あかつきと欧州の金星周回機 Venus Express の電波掩蔽観測データを解析することで、金星低緯度の高度 45-80 km における気温の年変化を調べた。その結果、高度 45-55 km では周期が約 10 地球年かつ振幅が 5 K 程度の準周期的な変動が見られた。この変動量は、地球低緯度の地表面におけるそれよりも大きい。また、硫酸蒸気混合比の年変化を調べたところ、気温と良い相関があることが分かった。この結果は、金星の雲底付近における雲量や雲構造は気温がコントロールしていることを示唆する。

## 3. 研究の背景

近年、金星大気の紫外観測や赤外観測によって、雲頂高度における風速や金星雲層アルベドの長期的な変動が指摘されている。また、水蒸気や SO<sub>2</sub> の混合比も長期変動していることが示唆されている。しかし、これらの観測は雲頂付近に限定されたものであり、長期変動がどれくらいの高度範囲で生じているのか不明である。本研究では、あかつきと Venus Express の電波掩蔽観測データを解析して得られた、2006-2024 年における気温の長期変動について、金星低緯度の雲層の下から上（高度 45-80 km）にかけて調べた。さらに、電波掩蔽観測データから硫酸蒸気混合比も導出し、気温の年変化と比較して両者の関係性を考察した。

## 4. 研究手法・成果

あかつき電波掩蔽観測によって得られた、気温と硫酸蒸気混合比をセットで示したものを図 1 に示した。雲底高度付近（高度 46-54 km）では、周期が約 10 地球年かつ振幅が 5 K 程度の準周期的な変動が見られることが分かる。この変動量は、地球低緯度の地表面におけるそれよりも大きい。また、硫酸蒸気混合比にも明確な長期変動が見られ、ばらつきの範囲内で飽和混合比に沿って変動していることが分かる。これは、気温が硫酸蒸気の飽和混合比を決めるので、それに従って硫酸蒸気混合比も変動するためである。これらの結果から、金星の雲底付近における雲量や雲構造は気温がコントロールしていることを示唆する。また、金星硫酸雲は大気運動や大気化学とも密接な関連があるため、気温の長期変動に付随した運動や微量物質分布の変動も生じている可能性がある。長期変動のメカニズムを解明するためには、EnVision や DAVINCI といった将来の金星探査に

て、金星大気を構成する物理パラメータを同時かつ連続的に長期間モニターすることが必要であろう。

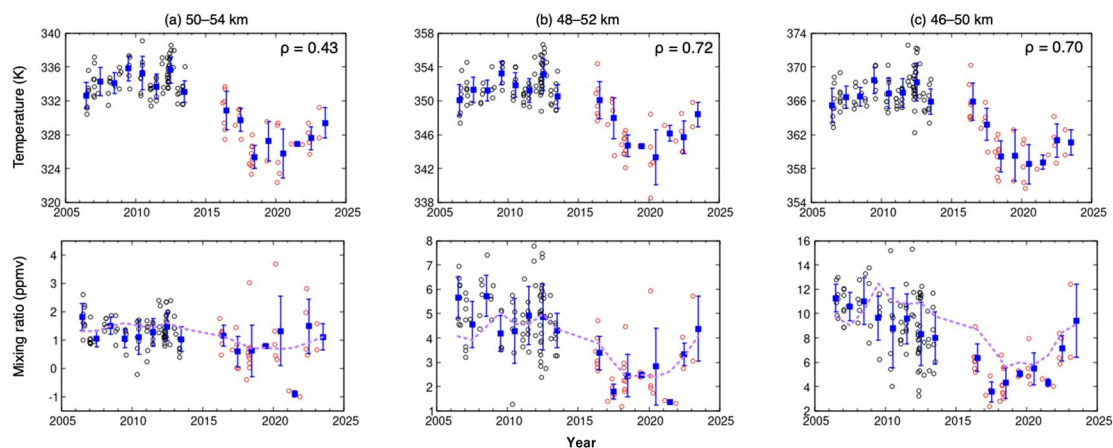


図 1: Venus Express (黒丸)・あかつき (赤丸) の電波掩蔽観測によって得られた、気温 (上段) と硫酸蒸気混合比 (下段) の時間変化。青色の四角と誤差棒は、それぞれ年平均値と標準偏差を表す。また、下段の各パネルに示した紫色の破線は、各高度帯における気温値から求めた硫酸蒸気の飽和混合比を表す。

## 5. 主要な論文、著者等 (2021-2025 年) : 本人に 2 重下線、本学学生・大学院生には下線

- (1) H. Ando, K. Noguchi, T. Imamura, M. Takagi, N. Sugimoto, Y. Matsuda, S. Tellmann, M. Pätzold, B. Häusler, R. Choudhary, M. Antonita (2025), Vertical propagation of Venusian thermal tides above and below clouds revealed by Akatsuki radio occultation, *J. Geophys. Res.*
- (2) H. Ando, S. Nakano, S. Shima, M. Takagi, H. Sagawa (2025), Bifurcation and stability of the co-condensation dynamics of H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O droplets in Venusian clouds, *J. Geophys. Res.*
- (3) H. Ando, K. Noguchi, T. Imamura, M. Takagi, H. Sagawa, A. Yamazaki, Y. J. Lee, J. Oschlisniok, S. Tellmann, M. Pätzold, B. Häusler, R. Choudhary, M. Antonita (2025), Long-term variability of the thermal structure in Venus' s low-latitude atmosphere investigated using Venus Express and Akatsuki radio occultations, *J. Geophys. Res.*
- (4) H. Ando, Y. Fujisawa, N. Sugimoto, M. Takagi, Y. Matsuda (2023), Cold collar

- reproduced by a Venus GCM with the Akatsuki horizontal wind assimilation, J. Geophys. Res.
- (5) A. Suzuki, H. Ando, M. Takagi, Y. Maejima, N. Sugimoto, Y. Matsuda (2023), Dependency of the vertical propagation of mountain waves on the zonal wind and the static stability in the lower Venusian atmosphere, Icarus.
- (6) H. Ando, K. Takaya, M. Takagi, N. Sugimoto, T. Imamura, H. Sagawa, S. Tellmann, M. Pätzold, Y. Matsuda, B. Häusler, S. Limaye, R. K. Choudhary and M. Antonita (2022), Dynamical effect on static stability of the Venus atmosphere simulated using a general circulation model: A comparison with radio occultation measurements, J. Geophys. Res.
- (7) H. Ando, M. Takagi, H. Sagawa, N. Sugimoto, M. Sekiguchi and Y. Matsuda (2021), Quasi-periodic variation of the lower equatorial cloud induced by atmospheric waves on Venus, J. Geophys. Res.

**6. 主要な学会発表等 (2021-2025年) : 本人に2重下線、本学学生・大学院生には下線**

- (1) H. Ando, K. Noguchi, T. Imamura, M. Takagi, N. Sugimoto, Y. Matsuda (2025), Vertical structure of the thermal tides in the Venusian low latitude region revealed by the Akatsuki radio occultation, EPSC2025.
- (2) H. Ando and Akatsuki Science team (2025), Current status of Akatsuki, VEXAG2025.
- (3) H. Ando, T. Imamura, K. Noguchi, S. Tellmann, M. Pätzold, B. Häusler, S. Limaye, R. K. Choudhary and M. Antonita (2023), Venusian atmospheric structure revealed by Venus Express and Akatsuki radio occultation measurements, EnVision Workshop.
- (4) 安藤紘基, 藤澤由貴子, 杉本憲彦, 高木征弘, 松田佳久 (2022), あかつき水平風速データ同化を用いた金星GCMによるコールドカラーの再現, 地球電磁気・地球惑星圏学会 (SGEPSS) .
- (5) H. Ando, K. Noguchi, T. Imamura, M. Takagi, N. Sugimoto, Y. Matsuda, S. Tellmann, M. Pätzold, B. Häusler, S. Limaye, R. K. Choudhary and M.

Antonita (2022), Vertical structure of thermal tides in the Venus equatorial region revealed by Akatsuki radio occultation measurements, Asia Oceania Geosciences Society.

- (6) H. Ando, S. Ikari, T. Imamura, T. Yamamoto, Y. Kawabata, N. Sugimoto, M. Takagi, H. Sagawa, Y. Fujisawa and R. Funase (2021), Cross-link Radio Occultation measurements of Venus Atmosphere by using multiple small satellites (CROVA), ISAS 惑星探査ワークショップ 2021.
- (7) H. Ando, K. Takaya, M. Takagi, N. Sugimoto, T. Imamura, H. Sagawa, S. Tellmann, M. Pätzold, Y. Matsuda, B. Häusler, S. Limaye, R. K. Choudhary and M. Antonita (2021), Dynamical effect on static stability of the Venus atmosphere simulated using a GCM, EPSC 2021.

## 7. その他特記事項 (2025 年度)

# 研究成果報告書

宇宙物理・気象学科 小郷原 一智

## 1. 研究テーマ

火星中緯度でダストストームが発生しやすいのはどのような大気環境のときか？

## 2. 要旨

形状や模様などの外見的特徴、安定度や気温の南北勾配などの発生時の周囲の大気環境をもとに火星ダストストームを数種類に分類し、ダストストームの背景にある大気現象を特定することを目指している。本年度は北半球の Arcadia 平原に着目し、火星再解析データ EMARS を用いてダストストーム発生時に典型的な大気条件を絞り込んだところ、低気圧通過時の、特に暖気中であることが分かった。さらに、観測直前の午前中に、低気圧の暖気中でダストストームが発生する傾向にあることも分かった。

## 3. 研究の背景

火星のダストストームはダストを大気中に供給することで大気温度構造を支配するとともに、水蒸気を効率的に上層大気に輸送することで宇宙への散逸、すなわち温暖湿潤であった過去の火星から現在のように寒冷乾燥なる過程に貢献している。これまでダストストームは漠然と単一の大気現象だと思われてきたが、その発生メカニズムはダストストームごとに全く異なることが近年の観測によって示唆された。それに伴い、水蒸気やダストの鉛直輸送量もダストストームによって大きく異なることが予想される。本研究は、形状や模様などの外見的特徴をもとに火星ダストストームを数種類に分類し、その種類ごとにダストストームの背景にある大気現象を特定する初の研究である。形状や模様の異なるダストストームの発生メカニズムはどのように異なるのか、どのようなダストストームが上空へ効率的に物質を輸送し、大気散逸や水蒸気の減少に寄与しているのか。現在の火星の気候システムのみならず、過去から現在、現在から未来への火星気候変動の理解へとつながっていく。

## 4. 研究手法・成果

2022 年度に開発した火星ダストストーム検出器を使用して抽出した Arcadia 平原におけるダストストームの発生数の季節変化が明らかになった。これ自体は先行研究にも示されていたものであるが、発生日時と正確な場所を自動で記録することで、火星再解析データセット EMARS に含まれる気温や気圧のデータと正確に比較することが可能になった。その結果、Arcadia 平原において北半球秋から春にかけて発生

するダストストームは、平均的には低気圧が当該地域に到来した時、しかも暖気中で観測される傾向にあることが分かった。一方、1日に1回しか観測データがないため、発生日時には約1日の不確実性がある。そこで同様の EMARS を用いて後方流跡線解析を行ったところ、ダストストームは観測日の午前中にやや西で発生する可能

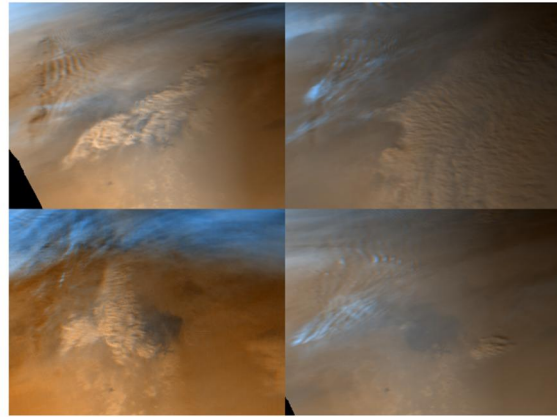


図 1 Arcadia 平原におけるダストストームの例

性が高いことが分かった。そのほか、Elysium Mons の北側斜面において、観測日の夜明け前に発生する可能性もあることが分かった。今後は、同じく火星北半球中緯度の Acidalia 平原に注目し、同じ傾向がみられるか調査する。

5. 主要な論文、著者等 (2021-2025 年) : 本人に 2 重下線、本学学生・大学院生には下線

- (1) Ogohara, K. (2025) Martian Local Dust Storms Associated With Extratropical Cyclones in Arcadia Planitia, *J. Geophys. Res.: Planets*, DOI: 10.1029/2024JE008455
- (2) Ogohara, K. and M. Ro (2023) Cloud trains associated with Martian Mountain Lee Waves on the eastern side of the Phlegra Montes, *Earth Planets Space*, 75, 10, <https://doi.org/10.1186/s40623-023-01767-x>
- (3) Ogohara, K. et al. (2022) The Mars system revealed by the Martian Moons eXploration mission, *Earth Planets Space*, 74, 1, <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01417-0>
- (4) Ogohara, K. and R. Gichu (2022) Automated segmentation of textured dust storms on mars remote sensing images using an encoder-decoder type convolutional neural network, *Comput. Geosci.* 160, 105043, doi: 10.1016/j.cageo.2022.105043

6. 主要な学会発表等 (2021-2025 年) : 本人に 2 重下線、本学学生・大学院生には下線

- (1) 小郷原一智 (2025) 中緯度移動性擾乱に伴う火星のローカルダストストーム, JpGU 2025, PPS09-14, 2025/0527
- (2) 奥野将, 小郷原一智 (2025) 火星低緯度地域大規模斜面での局地風についての研究, JpGU 2025, PPS09-15, 2025/05/27
- (3) 高田和篤, 小郷原一智 (2025) Infrasonic waves from Martian dust devils seen in atmospheric pressure fluctuations, JpGU 2025, MTT39-06,

2025/05/28

- (4) Okuno, S., and K. Ogohara (2024), Whitening events observed in the Valles Marineris on Mars, COSPAR 2024, B4.3-0008-24, 2024/07/19
- (5) 新田 悠翔、佐久間 竜雅、中野 瑛理香、小郷原 一智 (2024), Relationship between equatorial waves and 7-sol period wind oscillations in low latitudes on Mars, JpGU 2024, PCG21-P07, 2024/05/31

7. その他特記事項 (2025 年度)

- (1) 小郷原一智 (2025), 最新研究から見えてきた火星のお天気, 城陽市民大学, 2025/10/29
- (2) 小郷原一智 (2025), 最新研究から見えてきた火星のお天気, NPO 法人花山星空ネットワーク第 35 回講演会, 2025/12/07

# 研究成果報告書

宇宙物理・気象学科 河北 秀世

2026年3月31日

## 1. 研究テーマ

太陽系形成の起源と銀河系の物質化学進化

## 2. 要旨

太陽系の材料となった物質の起源（成分やその形成環境）を探ることが、本研究の最終目的である。最近5年間では、太陽系の過去の情報を残す彗星の観測的研究、および太陽系の材料の一部を担ったと考えられる新星爆発に関する研究を行っている。彗星には、太陽系が誕生した頃からほとんど変性をうけていない原始的な物質が含まれている。現在、宇宙航空研究開発機構 JAXA と欧州宇宙機関 ESA が協力して実施にむけた準備をしている彗星探査計画 Comet Interceptor（2029年打上げ）の一環として、地上望遠鏡による彗星分子組成比の特徴づけを多くのサンプルについて行なうとともに、彗星コマ中の各種分子・原子の空間分布を Direct Simulation Monte Carlo 法によって再現するなど、観測・理論の両面から研究を進めている。また、太陽系の材料物質のひとつである新星爆発放出物についても、可視・近赤外線波長域の中分散分光観測を中心に、観測的研究を進めている。

## 3. 研究の背景

我々の太陽系は、星間分子雲と呼ばれる低温度のガス雲(固体微粒子を含む)から約46億年前に誕生した。この分子雲は、銀河系内で様々な天体から放出された物質をもとにしており、銀河系における物質化学進化の一場面を反映している。分子雲中では、こうした様々な起源をもつ物質が混在一体となっており、分子雲そしてその後の段階である原始惑星系円盤中で物質化学進化（気相中あるいは固体微粒子化学反応による複雑な分子への進化、また微粒子の加熱による変成など）を経て、的に地球をはじめとする惑星の材料となっている。本研究では、こうした太陽系の起ついて、彗星の観測から過去を遡るとい手法と、起源物質の一部を提供したとされ星爆発について、近年の新星爆発を詳細べるという手法とを組み合わせる。

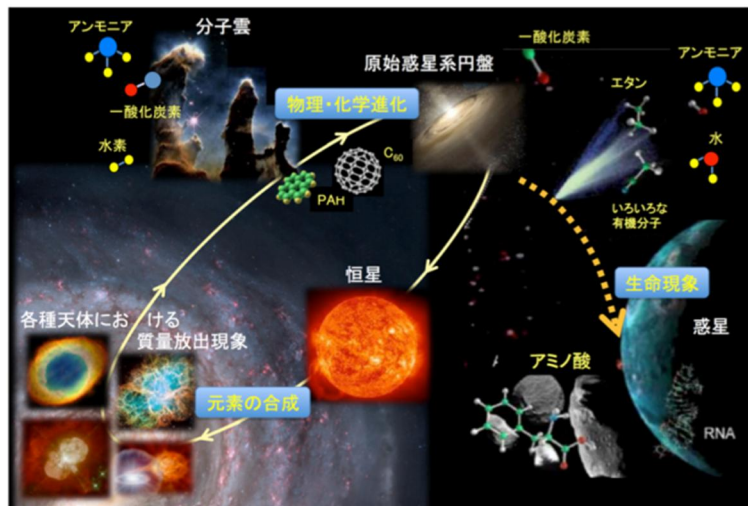


図1：銀河系内の物質化学進化

の物  
上の  
た固  
最終  
って  
源に  
う手  
る新  
に調  
でい

## 4. 研究手法・成果

彗星の観測的研究：原始太陽系円盤中の外縁部分にて形成された氷微惑星の残存物である彗星の化学分析により、それらの材料となる分子や固体微粒子がどのような物理環境で進化したかを明らかにする。これまで、主に可視光線・近赤外線波長における彗星ガスの高分散分光観測を手段として、様々な分子の化学組成比や、特定分子種における重水素/水素比および  $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$  比、原子核スピン異性体比などを明らかにしてきた。太陽系の母体となった分子雲の温度環境が 10–30K 程度であることを突止めている。現在、これまで観測サンプル数の少なかった木星族短周期彗星について、共同研究者らと集中的にサーベイ観測を継続しており、これまで、木星族短周期彗星である 46P/ワータネン彗星、45P/本田・ムルコス・パジュサコーバ彗星、21P/ジャコビニ・チン

ナー彗星、67P/チュリュモフ・ゲラシメンコ彗星などの近赤外線高分散分光観測を、NASA/IRTF(口径 3m 望遠鏡)に取り付けた最新の近赤外線高分散分光器 iSHELL や KeckII 望遠鏡(口径 10m)に取り付けた NIRSPEC を用いて実施してきた。とくに 67P/チュリュモフ・ゲラシメンコ彗星は、2014 年から 2016 年まで欧州宇宙機関 ESA の彗星探査機 Rosetta によって詳細に観測が行なわれた彗星であり、その彗星を地上観測で特徴付けることによって地上望遠鏡によるサーベイ観測結果のアンカー・ポイントとなる、重要な観測ターゲットであった。その結果、67P/チュリュモフ・ゲラシメンコ彗星は一般的な彗星とは言えず、けっして代表的な特徴をもった彗星ではなかったこと、また木星族短周期彗星が、典型的なオールト雲起源彗星に比べて揮発性の高い分子の組成比が少ない傾向が見られることがわかった。このような違いが彗星核形成環境によるものか、あるいは後天的な彗星核の物理化学進化によるものかが、現在、議論が続いている。

また、より始原的であると考えられるオールト雲を供給源とする力学的な新彗星あるいは長周期彗星が Comet Interceptor 計画の主たるターゲットであるため、そうした彗星の観測的研究も精力的に進めている。2022 年には長周期彗星である C/2014 Q2 (Lovejoy) 彗星の近赤外線高分散分光観測結果についても詳細なまとめを論文として出版しており、彗星において初めて遠隔観測からエチレン(C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>)の検出に成功した。また、同彗星のコマ中におけるアンモニア(NH<sub>3</sub>)の空間分布を抽出することにも成功しており、その詳細な検討を行った。従来、アンモニアは氷として彗星核に保持されていたものが太陽光による加熱によって彗星氷が昇華するにともなって宇宙空間へ放出されると信じられてきた。しかし、コマ中に観測されるアンモニア分子の空間分布は、彗星核から直接的に昇華していると仮定した場合の理論的な予想から外れていることが明らかになった。近年、彗星物質における N 元素の(太陽に対する)欠乏問題が、彗星に含まれるアンモニウム塩によって説明できるとする考えが Rosetta 探査機による彗星の直接観測の結果から提案され、今回われわれが観測した彗星アンモニアの起源として有力である。そこで、Direct Simulation Monte Carlo 法によって彗星コマ中でのガス分子の振る舞いをシミュレートするコードを開発し、観測結果と計算結果を比較した。彗星核近傍のコマは十分にガス密度が高く、流体力学と熱力学を組み合わせた取り扱いが可能であるが、コマの外側になるにつれて希薄になるため、希薄大気として扱う必要がある。そのため、ナビエ・ストークスによる定式化ではなく、衝突項を含むボルツマン方程式によって記述する必要がある。衝突有りのボルツマン方程式を数値的に解くための手法として本研究では Direct Simulation Monte Carlo 法を採用し、コマ中での太陽紫外線による分子の光解離、およびその際の余剰エネルギーによるガスの加熱を考慮したコードを開発した(図3)。ガスの成分としては水(H<sub>2</sub>O)、二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)、一酸化炭素(CO)を主たるものとして、微量成分としてアンモニアを含めている。電離したコマに含まれる電子との衝突も ad hoc に取り入れたモデルとなっている。このモデルに基づく景観結果と観測結果を比較したところ、アンモニアは彗星核から



図2 : C/2014 Q2 (Lovejoy)彗星

また、より始原的であると考えられるオールト雲を供給源とする力学的な新彗星あるいは長周期彗星が Comet Interceptor 計画の主たるターゲットであるため、そうした彗星の観測的研究も精力的に進めている。2022 年には長周期彗星である C/2014 Q2 (Lovejoy) 彗星の近赤外線高分散分光観測結果についても詳細なまとめを論文として出版しており、彗星において初めて遠隔観測からエチレン(C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>)の検出に成功した。また、同彗星のコマ中におけるアンモニア(NH<sub>3</sub>)の空間分布を抽出することにも成功しており、その詳細な検討を行った。従来、アンモニアは氷として彗星核に保持されていたものが太陽光による加熱によって彗星氷が昇華するにともなって宇宙空間へ放出されると信じられてきた。しかし、コマ中に観測されるアンモニア分子の空間分布は、彗星核から直接的に昇華していると仮定した場合の理論的な予想から外れていることが明らかになった。近年、彗星物質における N 元素の(太陽に対する)欠乏問題が、彗星に含まれるアンモニウム塩によって説明できるとする考えが Rosetta 探査機による彗星の直接観測の結果から提案され、今回われわれが観測した彗星アンモニアの起源として有力である。そこで、Direct Simulation Monte Carlo 法によって彗星コマ中でのガス分子の振る舞いをシミュレートするコードを開発し、観測結果と計算結果を比較した。彗星核近傍のコマは十分にガス密度が高く、流体力学と熱力学を組み合わせた取り扱いが可能であるが、コマの外側になるにつれて希薄になるため、希薄大気として扱う必要がある。そのため、ナビエ・ストークスによる定式化ではなく、衝突項を含むボルツマン方程式によって記述する必要がある。衝突有りのボルツマン方程式を数値的に解くための手法として本研究では Direct Simulation Monte Carlo 法を採用し、コマ中での太陽紫外線による分子の光解離、およびその際の余剰エネルギーによるガスの加熱を考慮したコードを開発した(図3)。ガスの成分としては水(H<sub>2</sub>O)、二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)、一酸化炭素(CO)を主たるものとして、微量成分としてアンモニアを含めている。電離したコマに含まれる電子との衝突も ad hoc に取り入れたモデルとなっている。このモデルに基づく景観結果と観測結果を比較したところ、アンモニアは彗星核から

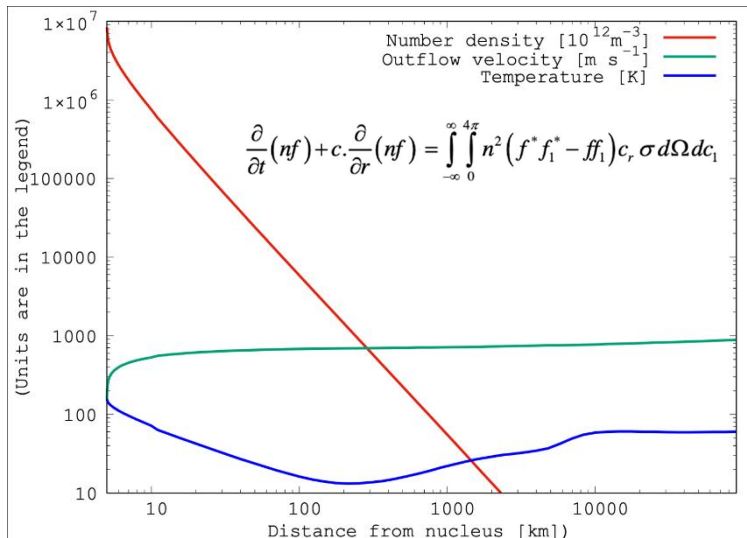


図3 : C/2014 Q2 彗星のコマ空間分布

直接的に昇華して放出されるだけでなく、何らかの分子あるいは粒子からも 2 次的に生成されていることが判明した。その結果、もしもアンモニア塩が太陽 UV 光の光解離反応によってアンモニアを生成していると仮定した場合、その光解離寿命は(太陽から 1 au の距離において) 500–1000 秒程度あるいはそれ以上であることを突き止めた。

また、彗星スペクトルに見られる酸素原子禁制線の輝線幅についても理論的な研究を行っており、2022 年に発表した論文では、彗星研究における 50 年来の謎を解明している。この酸素原子禁制線の気線幅問題についても、前述の DSMC 法によるコマのモデルを組み合わせ、観測された酸素原子禁制線について調査を進めている。更に、21P/ジャコビニ-チンナー彗星のダスト・コマについて直線偏光撮像観測を可視光線波長域で実施し、同彗星のダストが有機物に富む可能性について議論している。

新星の観測的研究：地球に落下した隕石中には、太陽系起源天体から放出された固体微粒子が、僅かながらそのままの状態に残っていることがある（プレソーラー粒子）。その粒子を特徴づけるのは太陽系の平均同位体比からの著しいズレであり、特に  $^{15}\text{N}$  の濃集 ( $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$  比=0.1~1、太陽系平均値：1/440) に関連して、その起源となりうる古典新星における元素合成やダスト生成について研究を行ってきた。古典新星における熱核暴走反応による元素合成過程で、プレソーラー粒子に見られる高い  $^{15}\text{N}$  濃集が実際に生じていることを、へびつかい座の新星 V2676 Oph において、世界で初めて観測的に明らかにした。また、特定の古典新星においては、極大光度期に  $\text{C}_2$ , CN 分子が形成されることを神山天文台における観測から世界で初めて発見している（通常、極大光度期には分子が壊れるほどの高温度になっている）。分子形成の過程についても、神山天文台における観測を通じて詳細に研究をし、分子の連鎖的な生成によるガスの急冷化が引き金となっていることを明らかにした。また、新星におけるダスト生成過程についても、中間赤外線分光観測を実施し、そのメカニズムを議論している。一方、新星爆発初期の形状についても、いるか座の新星 V339 Del について神山天文台において実施した高分散偏光分光観測の結果から、トーラスと双極成分を組合わせた構造になっていることを明らかにした。2020 年には、前述のような「極大光度期に  $\text{C}_2$ , CN 分子が形成される」特殊な新星の 2 例目（カシオペア座新星 V1391 Cas）の検出に成功し、2021 年に論文として報告している。同新星については、 $\text{C}_2$ , CN 分子が形成された直後に CO 分子の輝線も検出に成功しており、続報として 2024 年に論文として報告した（図 4）。

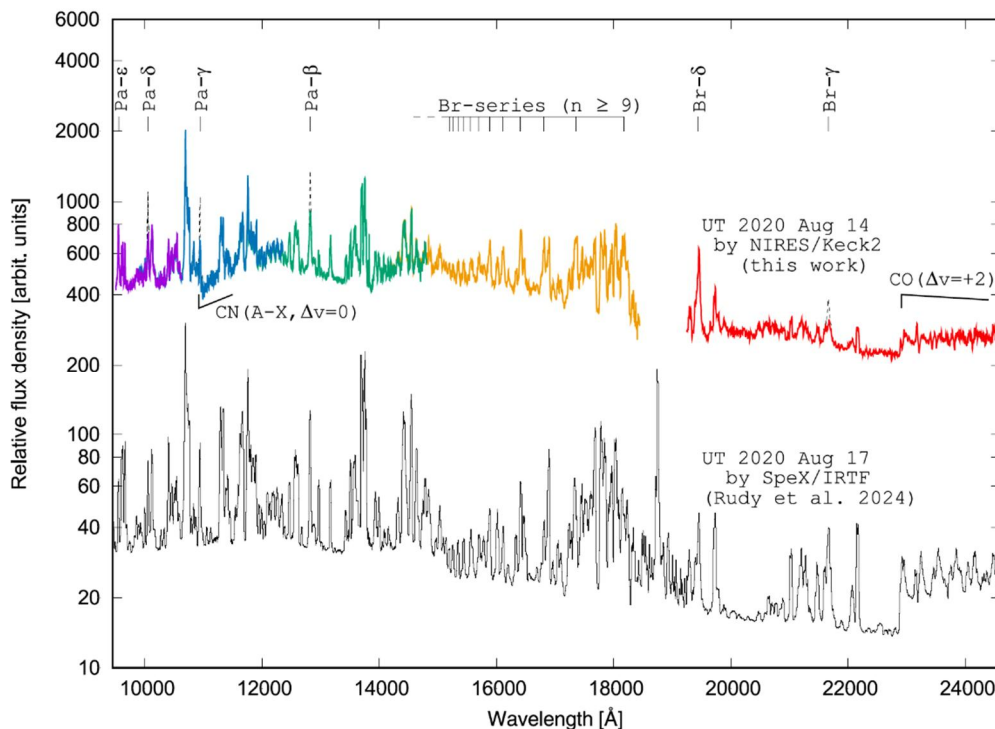


図 4：新星 V1391 Cas の近赤外線スペクトル

5. 主要な論文、著者等 (2021-2025年): 本人に2重下線、本学学生・大学院生には下線

- (1) H. Kawakita, Y. Shinnaka, H. Kobayashi, “Spatial Distribution of H<sub>2</sub>O<sup>+</sup> Ions in the Inner Coma of C/2014 Q2 (Lovejoy)”, *ApJ*, 991, 129 (2025).
- (2) C. Snodgrass, et al. (including H. Kawakita), “Considerations on the process of target selection for the Comet Interceptor mission”, *Icarus*, 447, 116887 (2026).
- (3) Dello Russo, N., et al. (including H. Kawakita), “Nucleus Ice Associations in Comets Derived from Spatially Resolved Properties of Volatile Gases in the Coma”, *PSJ*, 7, 23 (2025).
- (4) Suzuki, Y., et al. (including H. Kawakita), “Contribution of multiple scattering to the Lyman alpha radiance distribution in cometary comae”, *Icarus*, 441, 116720 (2025).
- (5) Thomas, E. M., et al. (including H. Kawakita), “Auroral and Non-Auroral H<sub>3</sub><sup>+</sup> Ion Winds at Uranus With Keck-NIRSPEC and IRTF-iSHELL”, *GRL*, 52, 2024GL112001 (2025).
- (6) H. Kawakita, & J. E. Lyke, “Formation of CN and CO Molecules in the Envelope of Nova V1391 Cas During the Near-maximum Phase”, *AJ*, 168, 266 (2024).
- (7) R. J. Rudy, R. W. Russell, M. L. Sitko, H. Kawakita, “CO and C I Emission in the Early Spectrum of the Nova V1391 Cassiopeiae”, *Research Notes of the AAS*, 8, 80 (2024).
- (8) H. Kawakita, N. Dello Russo, R. J. Vervack, Jr., et al., “Direct Simulation Monte Carlo Modeling of Ammonia in Comet C/2014 Q2 (Lovejoy)”, *AJ*, 166, 207 (2023).
- (9) Y. Shinnaka, H. Kawakita, H. Kobayashi, et al., “Optical Imaging Polarimetry of Comet 21P/Giacobini-Zinner during Its 2018 Apparition”, *Planet. Sci. J.*, 4, 125 (2023).
- (10) B. P. Bonev, N. Dello Russo, H. Kawakita et al., “The Return of the Rosetta Target: Keck Near-infrared Observations of Comet 67P/Churyumov-Gerasimenko in 2021”, *AJ*, 166, 233 (2023).
- (11) H. Kawakita, “Photodissociation Rate, Excess Energy, and Kinetic Total Energy Release for the Photolysis of H<sub>2</sub>O Producing O(<sup>1</sup>S) by Solar UV Radiation Field”, *ApJ*, 931, 24 (2022).
- (12) N. Dello Russo, Vervack, R. J., H. Kawakita, et al., “Volatile Abundances, Extended Coma Sources, and Nucleus Ice Associations in Comet C/2014 Q2 (Lovejoy)”, *Planet. Sci. J.*, 3, 6 (2022).
- (13) T. Ootsubo, H. Kawakita, Y. Shinnaka, “Mid-infrared observations of the nucleus of comet P/2016 BA14 (PANSTARRS)”, *Icarus*, 363, 114425 (2021).
- (14) M. Fujii, A. Arai, H. Kawakita, “Transient Formation of C<sub>2</sub> and CN in the Near-Maximum Phase of Nova Cas 2020 (= V1391 Cas)”, *ApJ*, 907, 70 (2021).

[上記に加え、査読付き学術論文誌掲載論文 24 篇]

6. 主要な学会発表等 (2021-2025年): 本人に2重下線、本学学生・大学院生には下線

- (1) H. Kawakita et al., “Simultaneous spectroscopic observations of comet C/2023 A3 (Tsuchinshan-ATLAS) in the optical and near-infrared wavelength regions: Spatial brightness profiles of H<sub>2</sub>O<sup>+</sup> and H<sub>2</sub>O”, 57<sup>th</sup> DPS Meeting 2025, id. EPSC-DPS2025-1122 (2025). [以下、2021年まで毎年、筆頭著者として DPS meeting で発表]
- (2) H. Kawakita, “A classical nova V1391 Cas” (invited talk), The Golden Age of Cataclysmic Variables and Related Objects – VII, held 1–6 September, 2025, at Palermo, Italy (2025)
- (3) H. Kawakita et al., “Distributed Source of Ammonia in the Coma of Comet C/2014 Q2 (Lovejoy)”, Asteroids, Comets, Meteors Conference, held 18-23 June, 2023 at Flagstaff, Arizona/Virtual. LPI Contribution No. 2851, 2367 (2023).

## 7. その他特記事項（2025 年度）

### （1）外部資金

- 科学研究費補助金・基盤(A)「彗星のメタン分子重水素比の初測定による原始太陽系円盤赤道面の物質輸送過程の解明」・研究代表者

# 研究成果報告書

宇宙物理・気象学科 岸本 真

- 1 研究テーマ 観測宇宙物理学, 特に高空間分解能観測, 巨大ブラックホール周縁の構造
- 2 要旨 全ての銀河の中心にほぼ普遍的に存在すると考えられるようになった巨大ブラックホール。その周縁で何が起きているのか。赤外干渉計などの高空間分解能観測装置を用いて, この様子を直接探っている。
- 3 研究の背景

今世紀に入ってから現在までに, 様々な銀河の中心には, 巨大ブラックホール (太陽質量の数百万倍あるいはそれ以上) がほぼ普遍的に存在すると考えられるようになった。したがって, その形成過程や周りでの質量降着及び放出過程は, 銀河形成・進化過程と密接な関連を持つと推測されている。しかし, これらのブラックホール近傍の物理過程は, 長年研究されてきたにも関わらず, 未だによく理解されていない。また, 銀河は衝突・合体を起こしながら成長すると考えられ, 実際, 衝突中の銀河が多数観測されている。もし巨大ブラックホールが各銀河の中心に普遍的に存在するならば, 銀河の衝突・合体の後, 中心部にはバイナリ (連星) ブラックホールが形成されるはずだが, なかなかその証拠が捕まえていない。

## 4 研究手法・成果

この長年の状況を打開すべく, 観測の空間分解能を飛躍的に上げることによる, 中心核構造の直接探査をめざしている。電波ジェットなどの非熱的輻射ではなく, ダストや電離ガスからの熱的輻射に対して空間分解能を上げるには, 通常の単一望遠鏡ではなく複数の望遠鏡を同時に使う干渉計という技術を用いる。可視域あるいは赤外域で実現する必要がある。しかし, 可視・赤外干渉計の技術は比較的新しく, これによる遠方銀河中心核の観測はまだまだこれからという段階にある。これに対し, 2021年に, カリフォルニアのCHARA観測所において250 m 基線 (望遠鏡どうしの距離) の観測が成功し, これまでの系外銀河の赤外干渉計観測で世界最高の空間分解能を達成することができた。これにより, 質量降着中の巨大ブラックホール周りの「円盤構造」を強く示唆する, ジェットに垂直な「ダストリング」と呼ぶべき構造を検出することができた (Figure 1)。中心部の「降着円盤」を取り囲むガスに含まれるダスト粒子が暖められて赤外線を放つことによって見える構造である。

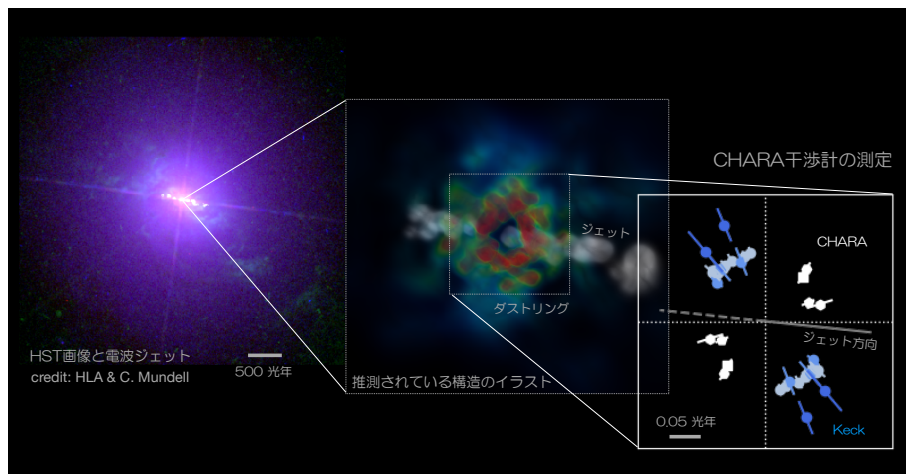


Figure 1: 左: 活動銀河NGC4151の中心部数千光年。中央: 推測されている中心部約1光年の構造。ブラックホールを中心にジェット (白色) が前後に噴出し, その周りをダストリング (赤色) が取り巻いている。右: 中心のブラックホールに対して, 赤外干渉計によって, いくつかの方向に沿って測られたサイズ。ジェットに垂直なリング状の構造を少し斜めから見ていると推測される。Kishimoto et al. (2022)より。

また、南米チリにあるVLT干渉計を用いての銀河中心核観測も行っている。こちらは基線がCHARA干渉計より短く130 m だが、波長方向に細かく分けて観測できるため、輝線のドップラーシフトを使って、ガスの運動を超高空間分解能で観測できる。

これと並行して、ハッブル宇宙望遠鏡や補償光学を用いた地上観測など、単一望遠鏡での高空間分解能撮像分光観測データを用いて、巨大ブラックホールの周辺数百光年の3次元構造の可視化を試みている（一つは Miyauchi & Kishimoto 2020 で本学大学院修了生との共著論文）。これと上記の赤外干渉計での観測結果をあわせて、中心部の構造を求めつつある。

#### 5 主要な論文、著書等 (2021-2025) : 本人に2重下線、本学学生・大学院生には下線

1. P. Lira, M. Kishimoto, et al. 2021, “Spectropolarimetry of NGC3783 and Mrk509: Evidence for powerful nuclear winds in Seyfert 1 galaxies”, *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*, 507, 579
2. M. Kishimoto, M. Anderson, et al. 2022, “The dust sublimation region of the Type 1 AGN NGC4151 at a hundred microarcsecond scale as resolved by the CHARA Array interferometer”, *Astrophysical Journal*, 940, 28
3. E. Lopez-Rodriguez, M. Kishimoto, et al. 2023, “On the Origin of Radio-loudness in Active Galactic Nuclei Using Far-infrared Polarimetric Observations”, *Astrophysical Journal*, 951, 31L
4. F. Drewes, J. Leftley, S. Hoenig, K. Tristram, M. Kishimoto 2025, “I Zw 1 and H0557-385: the dusty tori of two high Eddington AGNs observed in the MATISSE LM bands”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 537, 1369

#### 6 主要な学会発表等 (2021-2025) : 本人に2重下線、本学学生・大学院生には下線

1. M. Kishimoto, “The CHARA Array observations of AGN dusty structure at hundred micro-arcsecond scales”, 国際会議 Observing the Universe in Motion: 5 years of GRAVITY にて招待講演, Ringberg, Germany, 2022 Oct.
2. M. Kishimoto, “赤外干渉計による活動銀河核の構造探査”, 研究会「活動銀河核研究の発展と展望」にて講演, 北海道大学, 2025 Sep.

#### 7 その他特記事項 (2025年度)

- ・ 2024-2027 科学研究費 基盤研究 (B) 「超高空間分解能観測で捉える巨大ブラックホール系の正体と母銀河」 (研究代表者)
- ・ 2025-2029 科学研究費 基盤研究 (A) 「活動銀河核の5次元構造とその起源：多波長精密分光による解明」 (研究分担者)

# 研究成果報告書

宇宙物理・気象学科 佐川 英夫

## 1. 研究テーマ

惑星大気の観測的研究：赤外線高分散分光観測によるタイタン大気の季節変動追跡

## 2. 要旨

土星最大の衛星タイタンは、窒素を主成分としメタンを含む高密度大気を持ち、太陽紫外線による光化学反応によって多様な炭化水素やニトリル化合物が生成される。この化学過程は原始地球の化学進化を理解する上で重要であり、さらにタイタンでは長い季節周期に伴う大気組成の時間変動も知られている。カッシーニ探査機や地上観測により理解は進んだが、完全な季節サイクルは観測されていない。本研究では Keck II 望遠鏡の近赤外線高分散分光装置 NIRSPEC を用いて波長 3  $\mu\text{m}$  帯の高分解能スペクトルを取得し、メタン ( $\text{CH}_4$ )、アセチレン ( $\text{C}_2\text{H}_2$ )、エタン ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ) やシアン化水素 ( $\text{HCN}$ ) の吸収を検出した。また、放射伝達解析から、この波長域は大気ヘイズの光学的厚さに高い感度を持つことが示された。

## 3. 研究の背景

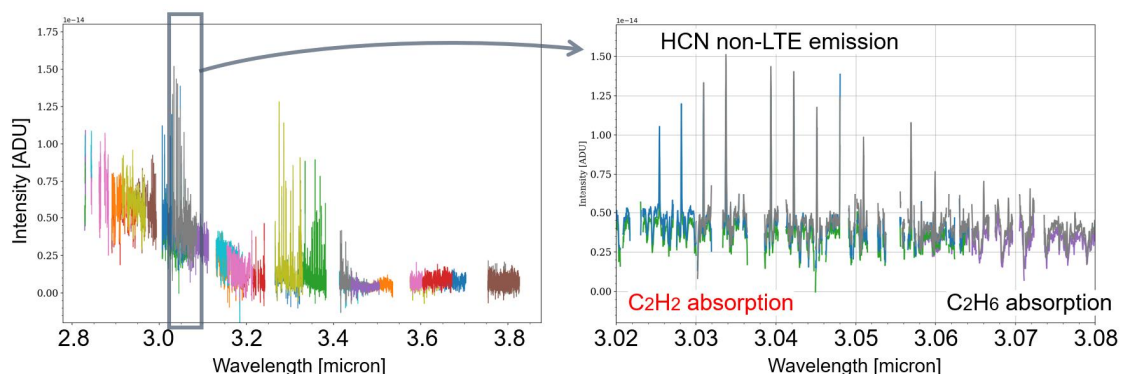
土星最大の衛星タイタンは、窒素を豊富に含む高密度の大気（表面気圧約 1.5 気圧）を有しており、太陽系の衛星の中でも極めて特異な天体である。この大気は窒素を主成分とし、数パーセントのメタンを含む。こうした組成のもとで、タイタン大気では非常に複雑な光化学反応が進行している。上層大気では、太陽からの紫外線や高エネルギー粒子によって連鎖的な反応が引き起こされ、多様な炭化水素やニトリル化合物が生成される。生成物には、エタン ( $\text{C}_2\text{H}_6$ )、アセチレン ( $\text{C}_2\text{H}_2$ )、エチレン ( $\text{C}_2\text{H}_4$ )、シアン化水素 ( $\text{HCN}$ ) などの比較的単純な分子だけでなく、生命誕生前の化学反応の前駆体となり得る、より複雑な有機化合物も含まれる。このような化学的多様性は、原始地球で起こり得た化学過程を理解するための「天然の実験場」として、タイタン大気を極めて重要な研究対象としている。

タイタン大気の化学的複雑さは、顕著な季節変動によってさらに際立つ。土星の約 29.5 年の公転周期と、タイタンの約 26.7 度の自転軸傾斜により、この衛星では長期的な季節変化が生じる。これらの季節変化は温度勾配や大気循環に大きな影響を与え、大気中の物質輸送を変化させる。さらに、半球間の太陽放射量の違いと相まって、微量成分の濃度や空間分布に観測可能な変動をもたらす。特にいくつかの微量化合物は顕著な半球非対称性を示し、その分布がタイタンの季節サイクルの進行に伴って時間的に変化することが報告されている。

過去 20 年間にわたり、探査機観測と地上観測の組み合わせにより、タイタン大気化学に関する理解は大きく進展してきた。特に、カッシーニ探査機に搭載された複合赤外線分光計 (CIRS) は、土星系での 13 年間のミッション期間中に、これまでにない量と質を備えた高解像度の赤外線分光データを取得した。これと並行して、地上の赤外線望遠鏡や電波望遠鏡、さらに Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) などの観測施設も、タイタン大気観測に重要な役割を果たしてきた。これらの観測装置は、空間分解能、スペクトル分解能、測定感度を着実に向上させながら、探査機観測を補完するデータを提供している。カッシーニ探査機は、タイタンの 1 年に対しておよそ半分に相当する期間、継続的な観測を実施したものの、2017 年のミッション終了に伴い、タイタンの完全な季節サイクルを直接観測するには至らなかった。このことは、タイタン大気季節変動や長期的な大気プロセスをより包括的に理解するためには、探査機ミッション終了後も継続的な地上観測が不可欠であるということに他ならない。

#### 4. 研究手法・成果

本研究では、ハワイ・マウナケア山頂の Keck II 望遠鏡に搭載された近赤外線高分散分光装置 NIRSPEC を用いて、波長約 3  $\mu\text{m}$  付近におけるタイタンの高分散スペクトルを取得した。観測は 2024 年 10 月 31 日および 11 月 1 日に実施され、このときのタイタンの太陽黄経は約 173 度であり、タイタンでは北半球の秋に相当する時期であった。観測には幅 0.288 秒角のスリットを使用し、波長分解能約 37,000 で 2.8 - 3.8  $\mu\text{m}$  の波長範囲をカバーした。その結果、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{CH}_3\text{D}$ 、 $\text{C}_2\text{H}_2$ 、 $\text{C}_2\text{H}_6$ 、 $\text{HCN}$  が検出され、これらは先行研究の結果と整合的であった。さらに、放射伝達計算による解析の結果、この波長帯ではタイタン大気中のヘイズ層の光学的厚さに対して高い感度を持つことが明らかとなった。今後、検出された微量成分の存在量の導出を行い、タイタン大気化学モデルのシミュレーション結果との比較を通して、タイタン大気季節変化を定量的に理解していく。



NIRSPEC で観測されたタイタンスペクトル。波長 3.05  $\mu\text{m}$  付近にはアセチレン ( $\text{C}_2\text{H}_2$ ) やエタン ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ) の吸収線およびタイタン大気上層で発光するシアン化水素 ( $\text{HCN}$ ) のラインが観測されている。スペクトルの色分けは分光次数の違いを示している。

5. 主要な論文、著者等 (2021-2025年) : 本人に2重下線、本学学生・大学院生には下線

- (1) Faggi, S., et al. including Sagawa, H. (2025), Following the HCl Cycle Over Three Martian Seasons in Mars Year 36, *Journal of Geophysical Research: Planets*, Volume 130, Issue 11, id.e2025JE009105, 23 pp.
- (2) Iino, T., Taniguchi, K., Sagawa, H., et al. (2025), An Improved Upper Limit of Cyanodiacetylene (HC5N) in the Atmosphere of Titan, *The Astronomical Journal*, Volume 170, Issue 6, id.319, 6 pp.
- (3) Encrenaz, T., et al. including Sagawa, H. (2025), HDO and SO<sub>2</sub> thermal mapping on Venus: VII. SO<sub>2</sub> variations with altitude and influence of the solar cycle, *Astronomy & Astrophysics*, Volume 703, id.A219, 9 pp.
- (4) Iwanaka, T., et al. including Sagawa, H. (2025), Sulfur Dioxide Distribution at the Venusian Cloud-Top Retrieved From Akatsuki UV Images, *Journal of Geophysical Research: Planets*, Volume 130, Issue 7, id.e2024JE008775, 18 pp.
- (5) Gapp, C., et al. including Sagawa, H. (2024), Abundances of trace constituents in Jupiter's atmosphere inferred from Herschel/PACS observations, *Astronomy & Astrophysics*, Volume 688, id.A10, 16 pp.
- (6) Aoki, S., et al. including Sagawa, H. (2024), Global Mapping of HCl on Mars by IRTF/iSHELL, *The Planetary Science Journal*, Volume 5, Issue 7, id.158, 11 pp.
- (7) Daerden, F., et al. including Sagawa, H. (2023), Heterogeneous Processes in the Atmosphere of Mars and Impact on H<sub>2</sub>O and O<sub>3</sub> Abundances, *Journal of Geophysical Research: Planets*, 128, e2023JE008014.
- (8) Kimura, T., et al. including Sagawa, H. (2023), Revealing the dynamics of magnetosphere, atmosphere, and interior of solar system objects with the Square Kilometre Array, *PASJ*, 75, Issue Supplement\_1, pp. S196-S216.
- (9) Sato, T. M. and Sagawa, H. (2023), A new constraint on HCl abundance at the cloud top of Venus, *Icarus*, 390, article id. 115307.
- (10) Aoki, S., et al. including Sagawa, H. (2022), Density and Temperature of the Upper Mesosphere and Lower Thermosphere of Mars Retrieved From the OI 557.7 nm Dayglow Measured by TGO/NOMAD, *Journal of Geophysical Research: Planets*, 127, article id. e07206.
- (11) Rengel, M., et al. including Sagawa, H. (2022), Ground-based HCN submillimetre measurements in Titan's atmosphere: an intercomparison with Herschel observations, *A&A*, 658, id.A88, 8 pp.
- (12) Iino, T., Taniguchi, K., Sagawa, H., et al. (2021), <sup>13</sup>C Isotopic Ratios of

- HC3N on Titan Measured with ALMA, The Planetary Science Journal, 2, id.166.
- (13) Ando, H., Takagi, M., Sagawa, H., et al. (2021), Quasi-Periodic Variation of the Lower Equatorial Cloud Induced by Atmospheric Waves on Venus, Journal of Geophysical Research: Planets, 126, article id. e06781.
- (14) Greaves, J. S., et al. including Sagawa, H. (2021), Phosphine gas in the cloud decks of Venus, Nature Astronomy, Volume 5, p. 655-664.
- (15) Miyamoto, A., et al., including Sagawa, H. (2021), Intense Zonal Wind in the Martian Mesosphere During the 2018 Planet-Encircling Dust Event Observed by Ground-Based Infrared Heterodyne Spectroscopy, GRL 48, e924132.

6. 主要な学会発表等 (2021-2025年): 本人に2重下線、本学学生・大学院生には下線

- (1) Sagawa, H., et al. (2025), Probing seasonal variations of trace gases in Titan's atmosphere using Keck/NIRSPEC, EPSC-DPS Joint Meeting 2025 (EPSC-DPS2025), held 7-12 September, 2025 in Helsinki, Finland.
- (2) Sagawa, H., et al. (2024), Oxygen airglow in the Venusian upper atmosphere: High-spectral resolution spectroscopy using WINERED, Europlanet Science Congress 2024, 8-13 Sep. 2024, at Freie Universität, Berlin, Germany.

7. その他特記事項 (2025年度)

特に無し

# 研究成果報告書

宇宙物理・気象学科 佐藤 浩介

## 1. 研究テーマ

精密 X 線分光観測で解き明かす宇宙の力学的/化学的進化

## 2. 要旨

高いエネルギー分光能力を誇る X 線撮像分光衛星「XRISM」搭載 X 線検出器 Resolve を用いて、銀河の大集団である銀河団中を満たす高温プラズマを観測し速度数十キロメートル毎秒の精度でガスの運動を明らかにし、銀河団の形成過程の解明に大きなヒントを得た。

## 3. 研究の背景

我々が光(電磁波)で直接観測できる通常物質(バリオン)は宇宙のエネルギー密度にして 5%にも満たないが、その大半は温度百万度以上のプラズマの状態で存在しており、その観測は X 線帯が最も適している。また、銀河の大集団である銀河団や活動銀河中心核(超巨大ブラックホール)といった宇宙の高エネルギー天体の活動にはバリオンが大きく影響を及ぼし、強い X 線を放射している。よって、宇宙から飛来する X 線からの情報は、高エネルギー天体や宇宙そのものの進化の解明の手がかりとなる。特に、銀河の大集団である銀河団は、宇宙年齢をかけて進化してきた重力的に束縛された宇宙最大の天体であり、銀河団の質量やパラメータの測定は宇宙そのものの力学的/化学的進化の解明に直結する。しかし、宇宙から飛来する X 線は、地球大気で散乱吸収されてしまうため、観測するためには検出器を大気圏外、すなわち天文衛星に搭載して観測する必要がある。私は、X 線衛星に搭載された検出器で観測されたデータを解析し、宇宙の力学的/化学進化の解明を目指すとともに、将来の X 線天文衛星搭載を目指した超精密 X 線分光検出器の開発を進めている。

## 4. 研究手法・成果

我々の宇宙はビッグバンで始まって以来現在まで、物質同士の間で働く重力の影響を受け、絶えず衝突や合体を繰り返し、現在の宇宙の姿になってきた。この衝突合体によって形成された宇宙最大の天体が銀河の大集団である銀河団である。銀河団の質量は巨大であるため、銀河団中を満たす高温ガスの重力エネルギーの解放により強い X 線を放射している。銀河団の中心部にある高温ガスは非常に明るい X 線を放射しているため、何も加熱機構がなければ放射冷却によって冷えるはずであるが、2000 年代の観測から、銀河団の中心部でもガスの温度は高いままであることがわかり、長年の謎であった。

我々は、2023年に打ち上げたX線撮像分光衛星「XRISM」搭載のX線検出器 Resolve を用いて地球から比較的近く(約1億光年の距離)にあるケンタウルス座銀河団を観測した。X線検出器 Resolve は非常に高いエネルギー分光能力を持ち、ガスの速度を数十キロメートル毎秒の精度で測定することが可能である。観測されたX線エネルギースペクトル(図1)を詳細に解析したところ、ケンタウルス座銀河団内部の高温ガスが毎秒130-310キロメートル毎秒という速度で地球の方向に動いていることがわかった。我々は、このガスの流れによって、銀河団中心部のガスが攪拌されガスの温度を保っていることを世界で初めて観測的に示した。そして、銀河団の構造形成過程を含む宇宙論的数値シミュレーションの結果と比較し、銀河団の衝突合体の名残でこのようなガスの流れが引き起こされていると結論した。

XRISM 衛星搭載 Resolve 検出器は、今回銀河団という宇宙最大の天体の中で起きているガスの動きをかつてない精度で測定し、銀河団が衝突合体を通じて進化している直接的な証拠を示した。Resolve 検出器はガスの速度の高精度分光観測を可能にし、銀河団だけでなく、宇宙に存在する様々な天体の形成と進化の様子の理解を大きく前進させると期待できる。

また、我々は銀河団をも取り巻く宇宙の大規模構造に付随するガスを定量的に観測することにより、宇宙のバリオン進化の解明を目指す将来衛星計画の検討も行なっている。科学的シミュレーションのほか、超精密分光X線分光観測を実現する極低温X線検出器の開発も進めて将来の衛星計画の実現を目指している。

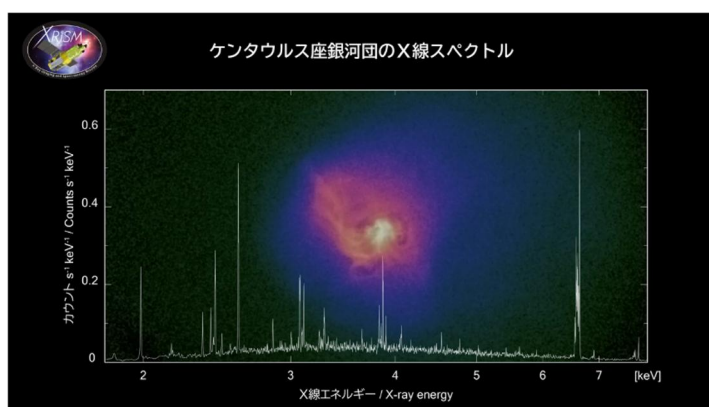


図1: 観測されたケンタウルス座銀河団の中心スペクトル。クレジット: JAXA

5. 主要な論文、著者等 (2021-2025年): 本人に2重下線、本学学生・大学院生には下線

- (1) XRISM Collaboration (including K. Sato) “XRISM Constraints on Unidentified X-Ray Emission Lines, Including the 3.5 keV Line, in the Stacked Spectrum of 10 Galaxy Clusters” *The Astrophysical Journal Letters*, Volume 994, Issue 1, id.L28, 14 pp., 2025
- (2) XRISM Collaboration (including K. Sato) “Stratified wind from a super-Eddington X-ray binary is slower than expected” *Nature*, Volume 646, Issue

8083, pp. 57-61, 2025

- (3) R. L. Kelley, Y. Ishisaki et al. (以下 71 中 51 番目アルファベット順 K. Sato) “Resolve instrument onboard the X-Ray Imaging and Spectroscopy Mission” Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems, Volume 11, id. 042026, 2025
- (4) Y. Fujita, K. Fukushima, K. Sato, Y. Fukazawa, M. Kondo “XRISM observation of the Ophiuchus galaxy cluster: Quiescent velocity structure in the dynamically disturbed core” Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 77, Issue Supplement 1, pp. S270-S275, 6 pp., 2025
- (5) K. Sato, Y. Ishisaki, R. L. Kelley, et al. (他 73 名) “Pre- and post-launch operation of the Resolve soft X-ray spectrometer onboard the XRISM satellite” Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems, vol. 11, Issue 4, 042020, 2025
- (6) J. M. Miller, E. Behar, H. Awaki, A. Hornschemeier, J. Bluem, L. Gallo, S. B. Kobayashi, R. Mushotzky, M. Ohno, R. Petre, K. Sato, Y. Terashima, M. Yukita “XRISM Reveals a Remnant Torus in the Low-luminosity AGN M81\*” The Astrophysical Journal Letters, 985, 2, L41., 2025
- (7) XRISM Collaboration (including K. Sato) “Structured ionized winds shooting out from a quasar at relativistic speeds” Nature, 641, 8065, 1132., 2025
- (8) XRISM Collaboration (**corresponding author** K. Sato) “The bulk motion of gas in the core of the Centaurus galaxy cluster” Nature, 638, 8050, 365., 2025
- (9) S. Yoshida, M. Isshiki, K. Kanao, S. Tsunematsu, K. Otsuka, S. Mizunuma, Y. Takei, A. Hoshino, R. Fujimoto, Y. Ezoe, K. Sato, M. DiPirro, P. Shirron “Performance test results of a helium Dewar for the Resolve instrument onboard the XRISM” Cryogenics, 139, 103831., 2024
- (10) The Micro-X Collaboration (including K. Sato) “First flight performance of the Micro-X microcalorimeter X-ray sounding rocket” Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems, Volume 9(3), 034001, 2023
- (11) H. Sugiyama, M. Ueda, K. Fukushima, S. B. Kobayashi, N. Y. Yamasaki, K. Sato, K. Matsushita “The soft X-ray background with Suzaku. II. Supervirial temperature bubbles?” Publications of the Astronomical Society of Japan, 75, 1324., 2024
- (12) K. Sato, N. Y. Yamasaki, M. Ishida, Y. Maeda, K. Mitsuda, Y. Ishisaki, Y. Fujita, Y. Ezoe, I. Mitsuishi, Y. Tawara, K. Osato, N. Kawai, K. Matsushita, D. Nagai, K. Yoshikawa, R. Fujimoto, T. G. Tsuru, N. Ota, S. Yamada, Y.

Ichinohe, Y. Uchida, Y. Nakashima “Super DIOS Project for Exploring ” Dark Baryon” Journal of Low Temperature Physics, vol. 209, issue 5-6, pp. 971-979, 2022

- (13) M. Ueda, H. Sugiyama, S. B. Kobayashi, K. Fukushima, N. Y. Yamasaki, K. Sato, and K. Matsushita “The soft X-ray background with Suzaku: I. Milky Way halo” Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 74, Issue 6, pp. 1396-1414, 2022
- (14) F. Gastaldello, A. Simionescu, F. Mernier, V. Biffi, M. Gaspari, K. Sato, K. Matsushita “The Metal Content of the Hot Atmospheres of Galaxy Groups” Universe, vol. 7, num. 7, 2021

6. 主要な学会発表等 (2021-2025年): 本人に2重下線、本学学生・大学院生には下線

- (1) K. Sato on behalf of the XRISM team “XRISM observations of galaxy clusters during performance verification phase” 日本天文学会 2024 年秋季年会
- (2) K. Sato 以下 74 名 “Pre- and post-launch operation of the soft X-ray spectrometer Resolve onboard the XRISM satellite” SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation 2024
- (3) K. Sato 以下 73 名 “X 線分光撮像衛星 XRISM 搭載 Resolve の開発現状 XI” 日本天文学会 2023 年秋季年会
- (4) K. Sato 以下 65 名 “X 線分光撮像衛星 XRISM 搭載 Resolve の開発現状 IX” 日本天文学会 2022 年秋季年会
- (5) K. Sato 以下 65 名 “X 線分光撮像衛星 XRISM 搭載 Resolve の開発現状 X” 日本物理学会 2022 年秋季大会
- (6) K. Sato 以下 21 名 “Super DIOS mission for exploring ” dark baryon” SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation 2022
- (7) 佐藤浩介、以下 22 名 “ダークバリオン探査ミッション Super DIOS の開発へ向けた検討 IX” 日本天文学会 2022 年春季年会
- (8) 佐藤浩介、以下 22 名 “ダークバリオン探査衛星: Super DIOS” 第 22 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、2022 年
- (9) K. Sato 以下 22 名 “Super DIOS mission for exploring “dark baryon” 19th International Workshop on Low Temperature Detectors (LTD), July 19-29, 2021
- (10) 佐藤浩介、以下 22 名 “ダークバリオン探査衛星: Super DIOS” 第 21 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、2021 年

7. その他特記事項 (2025 年度)

- (1) 佐藤浩介「XRISM が切り拓く躍動する宇宙像」日本天文学会 2026 年春季年会公開講演、京都産業大学むすびわざ館
- (2) 佐藤浩介「銀河団の構造形成を X 線精密分光で解き明かす」月刊誌「科学」（岩波書店）7 月号
- (3) JAXA 宇宙科学研究所、Research Group “コズミックネットワークを巡るエネルギーと物質の探査” 研究主査 佐藤浩介

# 研究成果報告書

宇宙物理・気象学科 高木 征弘

## 1. 研究テーマ

惑星気象学, 特に金星の大気大循環について

## 2. 要旨

金星大気スーパーローテーション (SR) の角運動量 (AM) 収支を解析し、SR が子午面循環メカニズムと熱潮汐波メカニズムの両方によって維持されていること、雲層高度での寄与率はそれぞれ約 70%と 30%であること、雲層中の AM 収支には擾乱による高緯度での下向き AM 輸送が重要であること、SR を維持する AM 輸送のほとんどが擾乱による南北熱輸送によって駆動されていること、などを明らかにした。

## 3. 研究の背景

金星には大気スーパーローテーションと呼ばれる原因不明の高速東西流が全球的に吹いており、その生成・維持メカニズムは気象学最大の謎ともいわれる。金星大気中の風速分布や温度分布がどのように実現されているか解明することは、地球の気象をより深く理解するのに必要であるだけでなく、太陽系惑星や系外惑星の表層環境を理解するために重要である。

## 4. 研究手法・成果

金星 GCM で再現された大気スーパーローテーションを維持する角運動量収支を Transformed Eulerian-Mean (TEM) 方程式系に基づいて解析した。オイラー平均子午面循環と残差子午面循環の構造は大きく異なっており、オイラー平均にみられる中高緯度のフェレル循環は擾乱の極向き熱輸送によって形成される。高度 45-90 km のスーパーローテーションは残差子午面循環による正味の上向き角運動量輸送によって維持されており、擾乱による下向き輸送とバランスしている。擾乱による角運動量輸送を詳しく調べたところ、熱潮汐波は正味の角運動量を上層で下向き、下層で上向きに輸送し、50-60 km と 67-75 km のスーパーローテーションの加速に寄与していた。雲層高度におけるスーパーローテーションの正味の加速に対する寄与は子午面循環メカニズムが約 70%、熱潮汐波メカニズムが約 30%である。領域別の角運動量収支を調べたところ、残差子午面循環によって低緯度で上向きに輸送された角運動量は子午面循環の極向きブランチによって高緯度に運ばれる。高緯度に運ばれた角運動量の一部は擾乱によって低緯度に戻されるが、54-73 km では高緯度への輸送量の約 15%、73-90 km では約 7%に留まる。これは古典的な子午面循環メカニズムの想定とは大きく異なる。54-73 km の角運動量収支に対しては、擾乱による高緯度での下向き輸送が重要であり、この下向き輸送はほとんど擾

乱による極向き熱輸送によって駆動される。この結果は雲層高度のスーパーローテーションの強度が擾乱による熱輸送によってコントロールされている可能性を示唆する。一方、73-90 km の収支に対しては、擾乱の低緯度での下向き輸送が重要であり、この輸送は熱潮汐波（特に半日潮）によって駆動され、擾乱による南北熱輸送はほとんど寄与しない。

5. 主要な論文、著者等（2021-2025年）：本人に2重下線、本学学生・大学院生には下線

- (1) Ando, H., K. Noguchi, T. Imamura, M. Takagi, H. Sagawa, A. Yamazaki, et al. (2025), Long-term variability of the thermal structure in Venus's low-latitude atmosphere investigated using Venus Express and Akatsuki radio occultations. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 130, e2025JE009218. <https://doi.org/10.1029/2025JE009218>
- (2) Ando, H., Nakano, S., Shima, S.-i., Takagi, M., Sagawa, H. (2025). Bifurcation and stability of the co-condensation dynamics of H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O droplets in Venusian clouds. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 130, e2025JE009177. <https://doi.org/10.1029/2025JE009177>
- (3) Ando, H., Noguchi, K., Imamura, T., Takagi, M., Sugimoto, N., Matsuda, Y., et al. (2025), Vertical propagation of Venusian thermal tides above and below clouds revealed by Akatsuki radio occultation. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 130, e2025JE009165. <https://doi.org/10.1029/2025JE009165>
- (4) Imai, M., M. Takagi, H. Ando, H. Sagawa (2025), A GCM study of synoptic-scale vortices in the lower cloud layer on Venus. *Icarus*, 433, 116523. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2025.116523>
- (5) Suzuki, A., H. Ando, M. Takagi, Y. Maejima, N. Sugimoto, Y. Matsuda (2023), Dependency of the vertical propagation of mountain waves on the zonal wind and the static stability in the lower Venusian atmosphere. *Icarus*, 402, 115615. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2023.115615>
- (6) M. Takagi, H. Ando, M. Imai, N. Sugimoto, Y. Matsuda (2023), Formation and quasi-periodic variation of equatorial jet caused by planetary-scale waves in the Venusian lower cloud layer. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 128, e2023JE007922. <https://doi.org/10.1029/2023JE007922>
- (7) Suzuki, A., M. Takagi, H. Ando, M. Imai, N. Sugimoto, Y. Matsuda (2022), A Sensitivity Study of the Thermal Tides in the Venusian Atmosphere: Structures and Dynamical Effects on the Superrotation, *Journal of Geophysical Research: Planets*, 127, e2022JE007243, <https://doi.org/10.1029/2022JE007243>
- (8) Takagi, M., H. Ando, N. Sugimoto, Y. Matsuda (2022), A GCM study on the 4-day and 5-day waves in the Venus atmosphere, *Journal of Geophysical Research: Planets*, 127, e2021JE007164, <https://doi.org/10.1029/2021JE007164>
- (9) Fukuya, K., T. Imamura, M. Taguchi, T. Fukuhara, T. Kouyama, T. Horinouchi, J. Peralta, M.

Futaguchi, T. Yamada, T. M. Sato, A. Yamazaki, S. Murakami, T. Satoh, M. Takagi, M. Nakamura (2021), The nightside cloud-top circulation of the atmosphere of Venus, *Nature*, 595, 511-515, doi:10.1038/s41586-021-03636-7

6. 主要な学会発表等 (2021-2025 年) : 本人に 2 重下線、本学学生・大学院生には下線
- (1) Takagi, M. (2025), Angular momentum balance of the atmospheric superrotation in the Venusian upper atmosphere, Venus Science Conference 2025 (Venus-SC 2025), Physical Research Laboratory (PRL), Ahmedabad, India, 25-26 September 2025. (Invited)
  - (2) Takikawa, Y., M. Takagi, H. Ando, H. Sagawa, N. Sugimoto, T. Kouyama, Y. Matsuda (2025), Long-term variations of UV albedo and superrotation in the Venusian upper atmosphere. ISSI-BJ Workshop, Beijing, China, 2025/6/2-6.
  - (3) 滝川有希, 高木征弘, 安藤紘基, 佐川英夫, 杉本憲彦, 神山徹, 松田佳久 (2025), 金星紫外アルベドと大気大循環の長期変動, 九州大学応用力学研究所共同利用研究集会「地球流体における波動と対流現象の力学」, 福岡県春日市, 2025/3/3-4.
  - (4) Takagi, M. (2024), Planetary-scale waves and their dynamical roles in the Venus atmosphere. IKI RAS Seminar, Online, 2024/12/4.
  - (5) 滝川有希, 高木征弘, 安藤紘基, 佐川英夫, 杉本憲彦, 神山徹, 松田佳久 (2024), 金星のアルベド変動と大気大循環 (2), 日本気象学会 2023 年度秋季大会, 茨城県つくば市, 2024/11/12-15.
  - (6) M. Takagi, H. Ando, M. Imai, N. Sugimoto, Y. Matsuda (2024), Planetary-scale waves and their dynamical effect on the general circulation in the Venusian cloud layer. 15<sup>th</sup> Moscow Solar System Symposium, Moscow, Russia, 2024/10/21-25.
  - (7) 滝川有希, 高木征弘, 安藤紘基, 佐川英夫, 杉本憲彦, 神山徹, 松田佳久 (2024), 金星のアルベド変動と大気大循環 (2), 惑星科学会秋季講演会, 福岡県福岡市, 2024/9/24-26.
  - (8) Takagi, M. (2024), Planetary-scale waves and their dynamical effect on the general circulation in the Venusian cloud layer, Venus Science Conference 2024 (Venus-SC 2024), Physical Research Laboratory (PRL), Ahmedabad, India, 23-24 September 2024. (Invited)
  - (9) M. Takagi, H. Ando, M. Imai, N. Sugimoto, Y. Matsuda (2024), Planetary-scale waves and their dynamical roles in the Venus atmosphere. PSSE 2024, Daejeon, Korea, 2024/7/22-25.
  - (10) 滝川有希, 高木征弘, 安藤紘基, 佐川英夫, 杉本憲彦, 神山徹, 松田佳久 (2024), 金星上層大気の気候変動, 地球流体力学研究集会, 千葉県柏市, 2024/3/4-5.
  - (11) 高木征弘, 安藤紘基, 今井正堯, 杉本憲彦, 松田佳久 (2024), 金星大気における惑星規模波動と大気大循環の相互作用: 4 日波・5 日波とスーパーローテーション. 惑星圏シンポジウム 2024, 宮城県仙台市, 2024/2/20-22.
  - (12) 滝川有希, 高木征弘, 安藤紘基, 佐川英夫, 杉本憲彦, 神山徹, 松田佳久 (2023), 金星の紫外アルベドと大気大循環の長期変動, 日本気象学会 2023 年度秋季大会, 宮城県仙台市,

2023/10/23-26.

- (13) 高木征弘, 安藤紘基, 今井正堯, 杉本憲彦, 松田佳久 (2023), 金星大気の短周期波動と大気大循環. 日本惑星科学会 2023 年度秋季講演会, 広島県広島市, 2023/10/11-13.
- (14) 滝川有希, 高木征弘, 安藤紘基, 佐川英夫, 杉本憲彦, 神山徹, 松田佳久 (2023), 金星の紫外アルベドと大気大循環の長期変動, 日本惑星科学会 2023 年度秋季講演会, 広島県広島市, 2023/10/11-13.
- (15) Takagi, M., H. Ando, M. Imai, N. Sugimoto, Y. Matsuda (2023), Quasi-periodic variation of the equatorial jet induced by planetary-scale waves in the Venusian atmosphere, JpGU Meeting 2023, Makuhari, Chiba, Japan, 24 May 2023. (Invited)

## 7. その他特記事項 (2025 年度)

特になし。

# 研究成果報告書

宇宙物理・気象学科 高谷 康太郎

## 1. 研究テーマ

異常気象解明のための画期的な力学理論構築

## 2. 要旨

データ解析および理論的手法により、中高緯度の異常気象の発生メカニズムの力学的な解明を目指している。

## 3. 研究の背景

異常気象のメカニズムの解明には、対流圏上層（上空約 10km 付近）を流れる偏西風の蛇行のメカニズムの理解が決定的に重要である。過去の研究により、偏西風の蛇行が「どこで発生し」「どのように広がり」、「どこで収束するか」については、理論的な枠組みが完成しており、それに基づいた観測データの解析が可能であった。しかし、蛇行が「どのように」発生または収束するかについては、理論的枠組みが完成しておらず、従って異常気象のメカニズムの解明には至っていなかった。この問題を解決するため、本研究では、擾乱（つまり蛇行）のエネルギー方程式において、偏西風の持つエネルギーが擾乱（蛇行）エネルギーに変換される項、いわゆるエネルギー変換項を、位相依存性のない形で定式化する事を試み、これに成功していた。さらに、上記の位相依存しないエネルギー変換項を含むエネルギー方程式の強制項も位相依存しない形式に表現出来ることを示した。これにより、例えば熱帯海面水温変動が中高緯度大気に及ぼす影響を定量的に評価出来る事になり、異常気象研究が画期的に進む事が可能となる。

## 4. 研究手法・成果

本研究は大きく二つの要素から成り立っている。一つは大気循環エネルギー変換の理論構築であり、もう一つはその理論成果に基づく大気循環データの解析である。2025 年度においても、その双方において非常に大きな進展を得ることが出来た。

まず、理論構築の面では、位相依存性のないエネルギー変換項の定式化に関して、2025 年度には再び理論の大きな進展があった。2024 年度までには理論がほぼ完成したと考えており、そこには上記「3」で記したように、「エネルギー方程式の強制項の位相依存しない形式」も含まれていた。しかし本年度の研究により、この強制項（外力項）について、位相依存性を持たないより一般的な表式の導出が可能であることが判明し、その定式化にほぼ目処がついた。これにより、例えば熱帯の対流活動に起因する発散風変動が偏西風に与える渦度強制を、いままでよりさらに定量的に正確に評価することが可能となる。現在、上記内容を含む論文を複数、鋭意作成中である。

また、大気科学について網羅的に知見を集約した権威ある文献「Encyclopedia of Atmospheric Sciences (3<sup>rd</sup> Edition)」の編集に携わり、上記の「位相依存性のないエネルギー変換項の定式化」とも密接に関連する「波と平均流との相互作用」の章を担当した。なお、この文献は既に出版済みである。

また、本研究による画期的な成果を実際の大気現象に適用しながら、大気循環の長周期変動の力学的メカニズムを解明するための研究を進めた。その中で、気象庁・東北大学・筑波大学との共同研究により、重み付け温位座標系を用いた冬季における大気の熱・物質輸送および子午面循環の研究を進め、その成果を現在、国際学術誌に投稿中である。

5. 主要な論文、著者等 (2021-2025年) : 本人に2重下線、本学学生・大学院生には下線

- (1) Koutarou Takaya; Takenari Kinoshita; Hisashi Nakamura, 2025. Wave-Mean Flow Interaction: Wave Propagation and Wave-Activity Flux. In: Robinson, W.A. (Ed.), *Encyclopedia of Atmospheric Sciences (3<sup>rd</sup> Edition)* vol. 4. Elsevier, Academic Press, pp. 206-220. eBook ISBN: 9780323958219, <https://dx.doi.org/10.1016/B978-0-323-96026-7.00227-7>
- (2) Masaya Kuramochi; Hiroaki Ueda; Tomoshige Inoue; Meiji Honda; Koutarou Takaya: 2023: Coherent Amplification of the Okhotsk High, Korean Trough, and Northwestern Pacific Subtropical High During Heavy Rainfall over Japan in August 2021, *Progress in Earth and Planetary Science*, <https://doi.org/10.1186/s40645-023-00598-4>
- (3) Masaya Kuramochi, Hiroaki Ueda, Tomoshige Inoue, Meiji Honda, Koutarou Takaya: 2023 Interannual Variability of the Mass-weighted Isentropic Zonal Mean Meridional Circulation in the Northern Hemisphere Winter, *J. Climate*, **37**, 5605-5618, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-22-0895.1>
- (4) Hiroaki Ueda, Masaya Kuramochi, Koutarou Takaya, Yuhei Takaya, Saki Asano, Shuhei Maeda: 2022: Genesis of Upper-Tropospheric Anticyclones over the Asian-Western Pacific Sector from Tropical-extratropical Interaction Perspective, *J. Climate*, **36**, 997-1008, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-21-0004.1>
- (5) Hiroki Ando, Koutarou Takaya, Masahiro Takagi, Norihiko Sugimoto, Takeshi Imamura, Hideo Sagawa, Silvia Tellmann, Martin Patzold, Yoshihisa Matsuda, Bernd Hausler, Sanjay Limaye, Raj Kumar, Choudhary and Maria Antonita, 2022: Dynamical effect on static stability of the Venus atmosphere simulated using a general circulation model: A comparison with radio occultation measurements, *J. Geophys. Res. Planet*,

<https://doi.org/10.1029/2021JE006957>.

- (6) M. Kuramochi, H. Ueda, C. Kobayashi, Y. Kamae, and K. Takaya 2021: Anomalous Warm Winter 2019/2020 over East Asia associated with Trans-basin Indo-Pacific connections, *SOLA*, <https://doi.org/10.2151/sola.17B-001>

6. 主要な学会発表等 (2021-2025年): 本人に2重下線、本学学生・大学院生には下線

- (1) 高谷康太郎: 「テレコネクションの力学に関する一考察」、第2回MIM研究会、神奈川、2026年3月11日
- (2) 高谷康太郎: 「テレコネクションの力学に関する一考察」、第21回「異常気象と長期変動」(異常気象研究会2025)・第13回観測システム・予測可能性研究連絡会、京都、2025年11月27日
- (3) 寺西修二、高谷康太郎: 「新しい位相依存性のない擬運動量の定義について」、日本気象学会、福岡、2025年11月6日
- (4) 高谷康太郎: 「位相依存性のないエネルギー変換について」、新しい気候力学の構築に関する研究集会、仙台、2025年9月18日
- (5) 高谷康太郎: 「位相依存性のないエネルギー変換を用いたテレコネクションの解析」、ArCS II 遠隔影響課題会合、札幌、2025年3月19日
- (6) 寺西修二、高谷康太郎: 「新しい位相依存性のない擬運動量の定義について」、第1回MIM研究会、仙台、2025年3月10日
- (7) 木下武也、高谷康太郎: 「3次元TEM方程式のより厳密な表式について」、第1回MIM研究会、仙台、2025年3月10日
- (8) 高谷康太郎: 「位相依存性のないエネルギー変換について」(招待講演)、2024年度京都大学防災研究所一般研究集会(異常気象研究会2024)「東アジア域の異常天候に対する熱帯や北極域からの遠隔影響と活発化する大気海洋相互作用の役割に関する研究集会」、京都、2024年11月27日
- (9) 高谷康太郎: 「2024年夏季の大気循環の特徴」、「梅雨前線の形成・変動の理解に向けた新しい気団形成論の構築」研究成果報告会、京都、2024年9月12日
- (10) 高谷康太郎: 「北西太平洋ストームトラックの真冬の振幅低下のメカニズムについての一提案」、国立極地研究所一般共同研究合同研究集会「近年の極端気象の激甚化に関わる極域寒気の動態の解明」、東京、2024年3月28日
- (11) 高谷康太郎: 「Transformed Brewer-Dobson circulationについて」、北海道大学低温研究所共同研究集会「顕著な低気圧の発達過程における大気海洋海氷相互作用」、札幌、2024年1月19日
- (12) 高谷康太郎: 「テレコネクションの力学に関する一考察」、気象学の今後に関するワークショップ、札幌、2023年8月23日
- (13) 高谷康太郎: 「テレコネクションの力学に関する一考察」、「梅雨前線の形成・変

動の理解に向けた新しい気団形成論の構築」世界自然遺産・知床をはじめとするオホーツク海南部海域の海氷・海洋変動予測と海洋生への気候変動リスク評価」  
科研費・推進費ジョイント研究成果報告、新潟、2023年2月27日

- (14) 高谷康太郎：「北西太平洋ストームトラックの真冬の振幅低下のメカニズムについての一提案」、科研費「大気渦状擾乱診断新手法」・「海洋熱波の気候系影響」  
合同会合、富山、2022年8月3日
- (15) 高谷康太郎：「梅雨期季節進行について」、「梅雨前線の形成・変動」および「環オホーツク気候システム」に関する科研費・推進費ジョイント会合、北海道、  
2022年7月22日
- (16) 高谷康太郎：「テレコネクションの力学に関する一考察」、国立極地研究所一般共同研究合同研究集会「両極由来の寒気に伴う顕著大気現象発現にかかわる極域ー熱帯域大気海洋結合システムの解明 - 両極の気象・気候と双方向作用する大気・陸・海洋三位一体変動の研究」、東京、2022年2月14日
- (17) 高谷康太郎、「テレコネクションパターンの力学 - 基本場西風の東西非一様性の重要性 -」、筑波大学大気科学特別セミナー、オンライン開催、2021年9月8日、招待講演
- (18) 高谷康太郎：「梅雨期季節進行について」、科学研究費補助金基盤B「梅雨前線の形成・変動の理解に向けた新しい気団形成論の構築」研究打ち合わせ、新潟、  
2021年8月5日
- (19) K. Takaya： Formulation and application of phase-independent energy conversion terms for quasi-geostrophic eddies on a zonally-varying basic flow、2021 JpGU/AGU joint meeting、Chiba (Online)、6th June 2021, invited
- (20) 高谷康太郎、田中佑樹：「冬季東アジアモンスーンの寒気吹き出しに伴う亜熱帯水蒸気前線」、ArCS II 遠隔影響課題 研究成果発表会、オンライン開催、2021年5月13日

## 7. その他特記事項 (2025年度)

### (1) 外部資金

(ア) 科研費：基盤研究 (C)：基金「異常気象解明のための画期的な力学理論構築」：研究代表者：2025年～2028年。

# 研究成果報告書

宇宙物理・気象学科 西道 啓博

## 1. 研究テーマ

天文観測・物理学・計算統計学の融合による宇宙論:ダーク成分の解明に向けて

## 2. 要旨

観測データを理論と照らし合わせることで情報を引き出す工程は、観測的宇宙論分野の中心課題である。数値シミュレーションは宇宙の大規模構造を正確に理論予測する有用なツールであるが、その計算コストは膨大だ。本研究では、機械学習などのデータサイエンスの知見を応用することで、宇宙論的情報の取得を現実的時間で正確に行う手法の開発を進めている。これまでの研究では、高コストな数値シミュレーションを低コストな統計モデルに置き換える「エミュレーション」技術を開発し、Sloan Digital Sky Survey による銀河の大域的3次元地図や、すばる望遠鏡の Hyper Suprime-Cam による「弱重力レンズ」効果に応用した。エミュレーション技術が確立した今、標準宇宙論モデルである  $\Lambda$ CDM モデルの検証や、これを超える新たな宇宙論モデルの兆候を引き出すための新しい方法論を模索している。

## 3. 研究の背景

宇宙のエネルギーの大部分を占めるにもかかわらず、その正体が未解明のダークマターとダークエネルギー、宇宙誕生直後のインフレーション、さらに、素粒子標準模型では説明できないニュートリノの質量など、現代宇宙論には大きな謎が残されている。宇宙の加速膨張を引き起こすダークエネルギーとして宇宙定数  $\Lambda$  を、宇宙の主な重力源として冷たいダークマター (Cold Dark Matter: CDM) を仮定した  $\Lambda$ CDM 模型が現代の宇宙の標準モデルである。

近年、 $\Lambda$ CDM の元では同時に説明できない観測結果間の矛盾が報告されている。特に、初期宇宙を映し出す宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) と、宇宙の大規模構造 (図1) などの近傍観測の間の不整合は、その統計的有意性が無視できないレベルになりつつある。これは、 $\Lambda$ CDM 模型の破綻と新たな宇宙論モデルの必要性を示唆しており、独立な手段による検証が喫緊の課題である。

このような背景のもと、日本が主導するすばる望遠鏡の大型観測プロジェクトをはじめとした

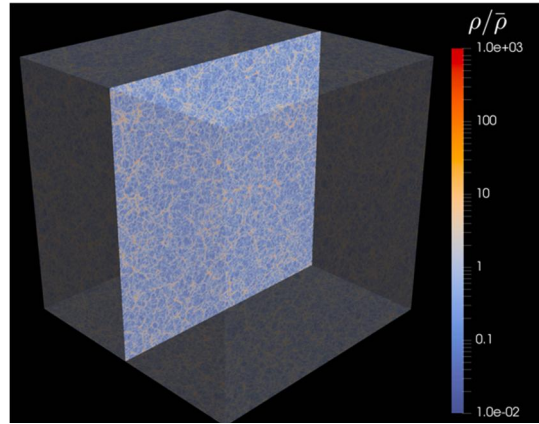


図1. 数値シミュレーションによる宇宙の大規模構造。3次元分布の一部を2次元スライスで強調表示している。赤は高密度領域、青は低密度領域。宇宙の大規模構造は複雑なネットワークを成す。これを実際に観測し、宇宙の構成要素や基本法則を導くことが本研究の目的である。

観測研究に大きな期待が寄せられている。同時に、現代の宇宙論は、膨大な観測データを解析するビッグデータサイエンスの時代へと突入しつつある。可能な限り多くの情報を正確に引き出すには、従来の解析手法にとらわれない新しい方法論の開発が不可欠である。

#### 4. 研究手法・成果

宇宙の大規模構造から宇宙論パラメータを引き出すには、多数のパラメータの組み合わせを網羅的に探索する必要がある。計算コストの制約から、シミュレーションを直接用いたパラメータ推論は長らく困難であった。我々が推進する「ダーククエスト」(DQ) シミュレーションキャンペーンでは、シミュレーションの入力(宇宙論パラメータ)と出力(大規模構造の特徴量)の関係を機械学習し、新たなパラメータ値での予測を高精度かつ高速に行う「エミュレーション」技術の開発を推進している。シミュレーションの持つ高い精度を損なうことなく、低コストで予測を行うことで、シミュレーションに基づく推論が現実的な計算時間で実行可能となった。

初期成果であるDQ1では、DarkEmulator (DE) を構築し、弱重力レンズ効果(すばる望遠鏡 HSC)、銀河クラスタリング(SDSS)、およびそれらの統合解析に適用することで、宇宙論パラメータの制限を得た([5,7,11,12]; 図2)。特に、宇宙の揺らぎの大きさを示すパラメータ  $S_8$  について、銀河の3次元地図の解析では CMB と整合しつつ、弱重力レンズでは統計的有意性  $2\sigma$  レベルながら CMB より小さい値が示唆された。

現在、計画第二期のDQ2としてデータベースの大幅な拡張と新技術の開発を進めている。スーパーコンピュータ「富岳」向けに新たに開発した大規模シミュレーションコード GINKAKU は、従来コードの3~10倍の計算速度を実現し、10,000 CPU コアクラスの並列計算に対応するスケーリング性能を達成した。加えて、ニューラルネットワークの持つ柔軟性を活用し、摂動理論による近似計算を入力層に追加することによる汎化性能の向上、シミュレーションの解像度依存性までも学習させることで、解像度限界を超えた予測を行う可能性の追求を推進している。さらに、 $\Lambda$ CDM のような宇宙論モデルの仮定によらない予測、解析を実現するための「宇宙論フリーエミュレータ」の概念実証や、シミュレーションモデルと観測データを統計的に結合させることで、機械学習モデルを訓練する新たなシミュレーションデータセットを自動的に構築していく「自律的エミュレータモデル」の方法論開発など、新たな取り組みにも着手しつつある。今後の観測データの充実に伴い、エミュレーション技術のさらなる発展と、宇宙の標準模型の検証を進めていく。

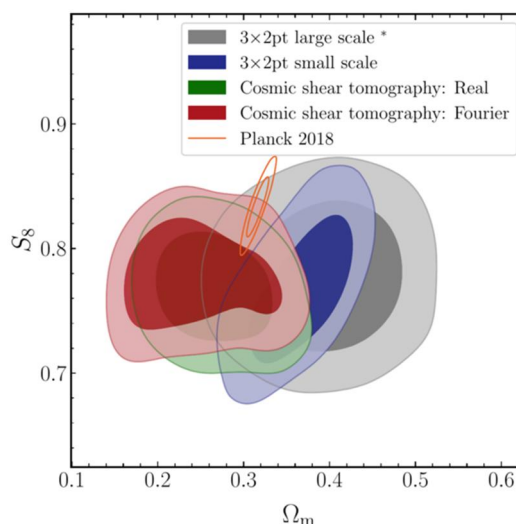


図2. HSC の弱重力レンズと SDSS 銀河の統合解析。従来法(灰色)と比べ、エミュレータを用いた解析(青色)は、より狭い範囲にパラメータを制限している。オレンジはCMBによる制限で、青と若干の矛盾が見られる。論文[7]より転載。

5. 主要な論文、著書等(2021-2025年):本人に2重下線、本学学生・大学院生には下線
- (1) M. Peron, T. Nishimichi, M. Pietroni, A. Taruya, 2025, JCAP, 10, 098
  - (2) S. Y. Pu, T. Okumura, T. Nishimichi, K. Akitsu, 2025, PhRvD Letters, 112, L041302
  - (3) S. Masaki, M. Shiraishi, T. Nishimichi, T. Okumura, S. Yokoyama, 2025, PhRvD Letters, 111, L101301
  - (4) Beyond-2pt Collaboration et al., (incl. T. Nishimichi as the 16<sup>th</sup> author), 2025, APJ, 990, 99
  - (5) R. Terasawa, X. Li, M. Takada, T. Nishimichi, et al., 2025, PhRvD, 111, 063509
  - (6) Y. Enomoto, T. Nishimichi, A. Taruya, 2024, MNRAS, 527, 7523
  - (7) H. Miyatake, S. Sugiyama, M. Takada, T. Nishimichi, et al., 2023, PhRvD, 108, 123517
  - (8) C. Cuesta-Lazaro, T. Nishimichi, Y. Kobayashi Y., et al., 2023, MNRAS, 523, 3219
  - (9) K. Moriwaki, T. Nishimichi, N. Yoshida, 2023, RPPH, 86, 076901
  - (10) S. Arai, et al., (incl. T. Nishimichi as the 16<sup>th</sup> author) 2023, PTEP, 2023, 072E01
  - (11) H. Miyatake, S. Sugiyama, M. Takada, T. Nishimichi, et al., 2022, PhRvD, 106, 083520
  - (12) Y. Kobayashi, T. Nishimichi, M. Takada, H. Miyatake, 2022, PhRvD, 105, 083517
6. 主要な学会発表等(2021-2025年):本人に2重下線、本学学生・大学院生には下線
- (1) 新田 悠翔, 小林 洋祐, 西道 啓博; “N体シミュレーションとの直接比較による3D銀河クラスタリングの宇宙論解析”; 日本天文学会2026年春季年会(京都産業大学; 2026/3/5)
  - (2) 佐久間 竜雅, 西道 啓博; “バンプ入り原始パワースペクトルが強調するlog型非ガウス性と小スケール構造形成への影響”; 日本天文学会2026年春季年会(京都産業大学; 2026/3/5)
  - (3) T. Nishimichi; “Application of AI/ML to Large Scale Structure”; IPNS One-Day Workshop: “DESI and related physics”(KEK; 2026/2/26; 招待講演)
  - (4) 西道 啓博; “宇宙の大規模構造と機械学習”; 理論懇シンポジウム(筑波大学; 2025/12/19; 招待講演)
  - (5) T. Nishimichi; “Machine Learning Cosmology”; East Asian Meeting on Large Scale Galaxy Surveys for Cosmology and Galaxy Formation (YITP, Kyoto Univ.; 2025/6/3; 国際スクール レクチャー講演)
  - (6) T. Nishimichi, Yosuke Enomoto, Hiromu Sugiura, Satoshi Tanaka, Atsushi Taruya, Yann Rasera; “Inner structure of dark matter halos”; Expanding the boundaries of dark matter halo (Shanghai Jiao Tong

- Univ., Shanghai, China; 2025/5/26; 招待講演)
- (7) T. Nishimichi; “GINKAKU and neutrino implementation”; ELG Modelling + Mock Challenge (Donostia International Physics Center, San Sebastian, Spain; 2025/2/20; 招待講演)
  - (8) 西道 啓博; 「宇宙論エミュレータのための基盤技術」; 富岳成果創出加速プログラム 第13回AI班会合 (オンライン; 2025/1/23; 招待講演)
  - (9) T. Nishimichi; “Emulators in Cosmological Inference Problem”; 富岳成果創出加速プログラム 基礎科学合同シンポジウム2024 (アーバンネット神田カンファレンス; 2025/1/8; 招待講演)
  - (10) T. Nishimichi; “Scale-dependent galaxy bias in local-type primordial non-Gaussianities with heavy-tailed models”; Evolution of the inhomogeneous universe (KEK; 2024/11/8; 招待講演)
  - (11) T. Nishimichi; “The Dark Quest Project for Large-Scale Structure Cosmology”; The 11th KIAS Workshop on Cosmology and Structure Formation (Hilton Gyeongju, South Korea; 2024/10/28; 招待講演)
  - (12) T. Nishimichi; “Emulation in Cosmological Inference Problem”; ipi seminar (The Univ. of Tokyo; 2024/10/7; 招待講演)
  - (13) T. Nishimichi, “Emulators for Cosmological Inference”, Statistical Analysis of Random Fields in Cosmology (KEK; 2024/3/6; 招待講演)
  - (14) T. Nishimichi, “Cosmological inference based on emulators”, IAU-IAA online seminar (オンライン開催; 2023/3/14; 招待講演)
  - (15) 西道 啓博, “ML in large-scale structure cosmology: from emulation to field-level inference”, ML@HEP (東京大学ICEPP; 2022/7/8; 招待講演)

## 7. その他特記事項(2025 年度)

- (1) 外部資金の獲得状況
  - 科研費 基盤研究 A 24H00221 「高速エミュレータを用いた広域宇宙観測データ分析」 2024 年度～2028 年度 研究分担者
  - 科研費 基盤研究 A 24H00215 「すばる HSC・PFS ビッグデータの統合宇宙論解析による S8 不一致問題の決着」 2024 年度～2028 年度 研究分担者
  - 科研費 基盤研究 C 22K03634 「数値モデルと解析的モデルを融合した銀河統計精密宇宙論」 2022 年度～2026 年度 研究代表者
- (2) ワークショップ、学会の主催
  - “East Asian Meeting on Large Scale Galaxy Surveys for Cosmology and Galaxy Formation”, YITP, Kyoto Univ., 2025/6/2 – 6/5
  - 「第 14 回観測的宇宙論ワークショップ」, 岡山コンベンションセンター, 2025/10/6 – 10/8
  - “JEC Meeting FY2025”, YITP, Kyoto Univ., 2026/3/2 – 3/3
  - 「日本天文学会 2026 年春季年会」, 京都産業大学, 2026/3/4 – 3/7

# 研究成果報告書

宇宙物理・気象学科 樋口 有理可

## 1. 研究テーマ

太陽系小天体から探る太陽系の起源と進化

## 2. 要旨

太陽系の起源を明らかにすることを大目標に、本研究では主に彗星や小惑星といった太陽系小天体や銀河系内を漂う浮遊小天体に関する理論研究を行っている。太陽系小天体はケプラーの法則に従い太陽の周りを楕円軌道で運動するが、銀河系、近傍の恒星や惑星といった主星以外の天体からの重力、系内外に存在するガスの効果、天体自身の破壊や変形など、さまざまな摂動を受けることで軌道は変化する。このようなさまざまな摂動を考慮し、進化の素過程を明らかにし、45億年前から現在にまで続く太陽系小天体の進化を明らかにする。

## 3. 研究の背景

太陽系ではまず原始太陽系円盤内で小さな天体(微惑星)が誕生し、それが合体成長することで惑星になった。惑星に取り込まれることなく生き残った天体が小天体である。また太陽系外に放り出された小天体は恒星間天体として銀河系内を浮遊していると考えられている。よって、小天体の軌道進化や形状を理解することは惑星の元となった原始太陽系円盤の総質量や分布、銀河系の姿や恒星間天体の分布の解明につながる。

## 4. 研究手法・成果

近年は特に銀河系からの摂動を受けた長周期彗星の軌道や分布の進化を、数値計算と解析的手法を併用して求め、その結果を観測される彗星の分布と比較することで過去の太陽系小天体の分布の解明を目指している。本年度は銀河系内に存在する水素分子と小天体が衝突することによる影響の解明に取り組んだ。銀河系内の水素分子の個数密度には濃淡があり、もっとも高密度な領域は巨大分子雲である。この巨大分子雲を太陽系が通過する際に受ける重力的な影響と、抵抗として現れる非重力効果の解析的表記の導出と比較を行った。その結果、巨大分子雲は小天体の軌道に影響を与えるがその影響は小天体サイズに依存するため、サイズ頻度分布に強く影響する可能性を指摘するに至った。巨大分子雲に加え、星間空間の希薄なガスからのガス抵抗が長期にわたり軌道に与える影響を評価した。

5. 主要な論文、著者等（2021-2025年）：本人に2重下線

- (1) An estimate of resident time of the Oort Cloud new comets in planetary region,  
Takashi Ito, Arika Higuchi, Planetary and Space Science 253 105984-105984  
2024年11月
- (2) What long-period comets tell us about the Oort Cloud, Marc Fouchard, Arika Higuchi and Takashi Ito, Astronomy & Astrophysics, Volume 676, August 2023, A104
- (3) Demonstration of deep-space synchronous two-way laser ranging with a laser transponder aboard Hayabusa2, Hiroto Noda et. al. (21人中16番目の著者), Advances in Space Research, Volume 71, Issue 10, 15 May 2023, Pages 4196-

6. 主要な学会発表等（2021-2025年）：本人に2重下線

- (1) (国際会議・ポスター発表) Orbital Evolution of Distant Comets under Interstellar Gas Drag during the Solar System's Motion through the Galaxy, Higuchi, Arika, Fouchard, Marc, Saillenfest, Melaine, Bougakov, Alexandre, Ito, Takashi, EPSC-DPS Joint Meeting 2025 (EPSC-DPS2025), held 7-12 September 2025 in Helsinki, Finland. Online at <https://www.epsc-dps2025.eu>, id. EPSC-DPS2025-1575

7. その他特記事項（2025年度）

- (1) 日本惑星科学会 編集専門委員会委員（2024年-）
- (2) 天体力学N体力学研究会 世話人
- (3) 日本天文学会 2026年春季年会 現地世話人

# 研究成果報告書

宇宙物理・気象学科 米原 厚憲

## 1. 研究テーマ

重力レンズ現象の天文学的応用に関する研究

～ 重力レンズ現象を用いて系外惑星から宇宙論に至る多様な問題に取り組む ～

## 2. 要旨

多岐に渡る重力レンズ現象の天文学における応用の中でも主に、系外惑星の探査と、クェーサー中心にある巨大ブラックホール周辺の物理解明を目的とした理論的、および観測的研究に取り組んでいる。

## 3. 研究の背景

重力レンズ現象は、対象天体からの輻射に頼ることなく天体の物理に迫ることができるほか、遠方・微小天体の情報の効率良い取得が可能となるユニークな現象である。

例えば系外惑星は、遠方の微小な天体であるため、直接観測・検出は非常に困難である。そのため現在はまだ、系外惑星が中心星の観測量に及ぼす影響を通じて間接的に検出・観測する手法が主流であり、遠方・低質量の系外惑星の検出・観測は困難である。

またクェーサーに関しては、高光度・特異なスペクトル・時間変動から中心部に巨大ブラックホールが存在することはほぼ確実だが、コンパクトであるがゆえ、巨大ブラックホール近傍を空間分解して物理状態を直接調べることは困難である。特に遠方のクェーサーに関しては、電波・近赤外線の干渉計による高空間分解観測の対象にならない。

## 4. 研究手法・成果

クェーサーの研究に関しても、複雑かつ多様な様相を示すクェーサーの重力マイクロレンズ現象を利用したクェーサー中心部の構造解明に向けた研究を行っている。特に近年、これまで適切に考慮されてこなかったレンズ天体の固有運動の効果を考慮した重力マイクロレンズ現象が、レンズ銀河とクェーサーの相対運動を単に大きくするだけの近似的な取り扱いとは異なる性質を持つことが明らかになってきた。典型的な速度が同じ場合で比較したところ、固有運動の効果によって特に増光の小さな現象の頻度が非常に高くなり、単位時間あたりの現象の発生率が2倍程度になることが明らかになった。また、現象の継続時間が1桁程度短くなることや、光源の大きさによって光度変動がならされる効果が弱いことも明らかになった。このことは、多くのクェーサーの重力マイクロレンズ現象で観測されている、比較的短時間で小さな増光を示している現象の解釈にとって、大きな影響を

与えうることを示唆しており、この結果については現在、研究論文としてまとめている。

系外惑星の探査に関しては近年、本学神山天文台・荒木望遠鏡の観測環境を鑑み、系外惑星によるトランジット現象（系外惑星による恒星の蝕）の観測に重点を置いて観測を行っており、データ取得と解析方法の工夫により 0.1%程度という高精度での光度変動を観測することに成功している。特に、TESS 衛星によって発見された系外惑星によるトランジット現象の候補を確認するための追観測による新たな系外惑星の発見や、既知のトランジット現象の詳細な観測によるトランジット開始時刻の変動などを利用した、系外惑星の物理パラメーターの推定を目指した共同研究を進めている。

また近年は、重力レンズ現象を利用したブラックホール探査の可能性についても検討している。そのような現象を発見することは容易ではないが、膨大なアーカイブデータを独自の視点で解析することで、実際にブラックホールの発見、あるいは、ブラックホール存在量の上限值を決める可能性がある。そのためのデータ解析にも取り組んでいる。

5. 主要な論文、著者等（2021-2025年）：本人に2重下線、本学学生・大学院生には下線

- (1) H. Yang et al. (including A. Yonehara), “Systematic reanalysis of KMTNet microlensing events, paper I: Updates of the photometry pipeline and a new planet candidate”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 528, 11 (2024)
- (2) A.J. Cordwell et al. (including A. Yonehara), “Asteroid Lightcurves from the MOA-II Survey: a pilot study”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 514, 3098 (2022)
- (3) S. Miyazaki et al. (including A. Yonehara), “OGLE-2014-BLG-0319: A Sub-Jupiter-mass Planetary Event Encountered Degeneracy with Different Mass Ratios and Lens-source Relative Proper Motions”, The Astronomical Journal, 163, id. 123 (2022)
- (4) C. Ranc et al. (including A. Yonehara), “New giant planet beyond the snow line for an extended MOA exoplanet microlens sample”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 505, 1498 (2021)

6. 主要な学会発表等（2021-2025年）：本人に2重下線、本学学生・大学院生には下線

- (1) 米原厚憲, “固有運動で頻発するクェーサーマイクロレンズ現象”, 日本天文学会 2025 年秋季年会（活動銀河核分科会にて口頭発表）

7. その他特記事項（2025年度）

特に無し

〒603-8555 京都市北区上賀茂本山  
2026（令和8）年5月  
発行：京都産業大学理学部