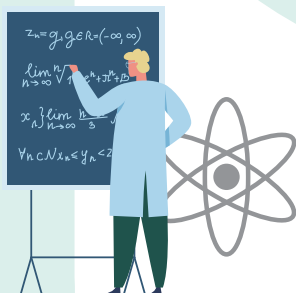


2022-2023

基礎科学 特別研究員年報

Special Postdoctoral Researcher Program
2022-2023 Annual Report



2022-23

基礎科学研究員年報

Special Postdoctoral Researcher Program

2022-23 Annual Report

国立研究開発法人理化学研究所

[凡例]

各研究報告の末尾に揚げた誌上発表 (Publications) の原著論文等のうち、*印を付したものは査読精度がある論文誌であることを示します。

[Note]

In the list of Publications (original papers) at the end of each report, those marked with an asterisk (*) indicate peer review journals.

はじめに

本年報は、理化学研究所に在籍する基礎科学特別研究員の令和4年度における研究報告です。制度の概要については、以下のとおりです。

設立の経緯

今後の科学技術を飛躍的に発展させ、わが国が豊かな社会を築き国際社会に貢献していくためには、創造性豊かな科学技術の発展が不可欠となっています。このような状況を踏まえ平成元年度の新たな施策として、科学技術庁（現 文部科学省）と理化学研究所が連携して独創的・基礎的研究を強力に推進する基礎科学特別研究員制度を創設しました。その後の定員の拡充等制度の充実に伴い、本制度の運用は平成7年度より理研に全面移管されています。平成19年度に創設された基礎科学特別研究員制度の外国人版である国際特別研究員と、平成28年度より統合し、より世界に開かれた、優秀な若手研究者を支援する制度として新たなスタートを切りました。

制度の内容

本制度は、理化学研究所が、創造性、独創性に富む優れた若手研究者に自主的に研究できる場を与え、その力を十分に発現させることにより基礎科学発展の担い手として活躍を期待する制度です。対象とする研究分野は、数理科学、物理学Ⅰ、物理学Ⅱ、化学、生物科学、医科学、工学の学際的分野を含む科学技術分野で、理研で実施可能な研究です。

対象者は博士号取得者で、自らが理研において実施を希望する研究課題と理研の研究領域を勘案して設定した研究課題を自主的に遂行する意志のある者です。毎年、公募により募集を行い、所内研究者と外部有識者で構成される委員会で審査（書類審査、面接審査）・選考を行っています。平成30年度に採用された方より3年間の複数年契約を締結し、更に安定して研究に集中することが可能な環境が整えられました。

基礎科学特別研究員の受け入れにあたっては、研究課題を自主的に遂行できるよう受入研究室を定めて、必要な研究スペースの確保、研究施設及び設備の利用について便宜を図り、基礎科学特別研究員は所属長から助言を受けることができます。

平成20年10月からは育児休業取得者に対する在籍期間延長など規程の見直しもおこない、本制度においてより良い研究環境を提供できるよう、ワークライフバランスにも配慮しています。これまでに、1,907名の基礎科学特別研究員、153名の国際特別研究員（平成30年度で受入 終了）を受け入れており（令和5年3月現在）、現在の在籍者数は基礎科学特別研究員158名となっています。（令和5年8月現在）

令和5年8月
国立研究開発法人理化学研究所

Foreword

This Annual Report is a compilation of the research reports submitted by the Special Postdoctoral Researchers (SPDRs) working at RIKEN in fiscal 2022. The outline of the programs is as follows.

The programs

Creativity is required for the rapid advance of science and technology that will benefit Japanese society and contribute to the international community. To fill this need, RIKEN, in collaboration with the former Science and Technology Agency (currently a part of the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology), launched the Special Postdoctoral Researcher (SPDR) Program in fiscal 1989. In fiscal 1997, the program was expanded to accommodate a larger number of candidates, and the program management was transferred to RIKEN. From fiscal 2016 the SPDR program has been merged with the Foreign Postdoctoral Researcher (FPR) program, launched in fiscal 2007 to provide young foreign researchers with similar opportunities, to form a new SPDR program to support excellent young researchers from Japan and overseas.

Program Features

The SPDR program offers young researchers with creative and innovative ideas an environment in which they can pursue independent research and prepare themselves to play a major role in advancing basic science. Fields covered include mathematical sciences, physics I, physics II, chemistry, biology, medicine, engineering, and any other fields related to research now being conducted at RIKEN.

SPDRs must have a PhD at the time of application, and must be able to independently pursue research themes decided on the basis of what they want to pursue and how that fits in with the research being conducted at RIKEN.

Candidates are recruited every year through open application, and selection is made by a committee comprised of outside experts as well as RIKEN scientists. Selection is based on submitted documents and interviews. From 2018 the SPDR contract has become a multiple-year contract valid for three (3) years in order to provide an environment with greater stability for the researchers so they are able to focus on carrying out their research.

Host laboratories must provide the SPDRs with an environment conducive to independent research, sufficient research space, and support for the use of required research facilities and equipment, as well as guidance from the laboratory head.

Since October 2008, revisions have been introduced in the program regulations to ensure a better work-life balance, such as allowing program extension when an SPDR has to take time off for childcare.

Since the program started, there have been a total of 1907 SPDRs and 153 FPRs and there are currently 158 SPDRs (as of August 2023).

August 2023
RIKEN

目 次

2018年度採用者

XVIII-001	ベクトル中間子の核内質量分布の高統計測定によるハドロン質量の起源の解明	菅野 光樹 15
-----------	-------------------------------------	----------------

2019年度採用者

XIX-001	SPECTRAL ANALYSIS, ANALYTIC NUMBER THEORY, AND APPLICATIONS TO MACHINE LEARNING	Eren Mehmet KIRAL 19
XIX-002	原始惑星系円盤・系外惑星大気の化学構造研究から探る、普遍的な星・惑星形成過程	野津 翔太 20
XIX-003	輻射多流体シミュレーションを用いた星・円盤・惑星系形成の研究	仲谷 峻平 22
XIX-004	強いスピン軌道相互作用を持つ1次元電子系の物性解明と超伝導接合への展開	松尾 貞茂 23
XIX-005	クロマチン構造転移の生物物理：細胞分化現象のマイクロ理解に向けて	深井 洋佑 24
XIX-006	DNA複製蛍光可視化システムの開発とこれを用いたHi-Cコンパートメント制御因子の網羅的探索	大字 亜沙美 25
XIX-007	高速超解像顕微鏡法の開発とこれを用いた生細胞内での1分子から細胞規模に跨る確率過程の直接観察	宮代 大輔 26
XIX-008	ゼブラフィッシュの予測コーディングによる意思決定機構の解明	谷本 悠生 26
XIX-009	Global and Quantitative Analysis of Neuronal RNA Granules	Marek Konrad 27 KRZYZANOWSKI
XIX-010	Modulation of the Strength of Emotional Memories by High States of Anxiety	Nur Zeynep 28 GUNGOR
XIX-011	卵子エピゲノムと胎盤を介した生活習慣病の母子間遺伝機構の解明	小塚 智沙代 29
XIX-012	DYNAMICS OF ENGRAM FORMATION IN HIPPOCAMPAL MICROCIRCUITS USING EXPERIMENTAL AND COMPUTATIONAL APPROACHES	Vladislav SEKULIC 30
XIX-013	レプチンシグナルによる性成熟開始の神経回路基盤	後藤 哲平 32
XIX-014	室温で電子スピン操作可能なカーボンナノチューブ単一量子源の実現	小澤 大知 33
XIX-015	Ultrasensitive SERS Microfluidic Chips Fabricated by Photonic Methods	Shi BAI 34
XIX-016	Microfluidic Assisted Synthesis of RNAi-based Cancer Nanomedicine	Hei Man LEUNG 35

2020年度採用者

XX-001	ランダム行列の有限サイズスケーリング則の解明及び巨大相関グラフのエッジ検定への応用	許 インイン 39
XX-002	ゲージ理論における Floer 理論の一般化と精密化	谷口 正樹 39
XX-003	Origin of Multiplicity in Low-Mass Star Formation	Nadia Mariel MURILLO 40 MEJIAS
XX-004	現実的核力に基づく核多体系の微視的記述およびハドロン間相互作用の研究	福井 徳朗 41
XX-005	重元素合成天体環境解明のための中性子過剰核の系統的核分光	向井 もも 42
XX-006	多波長同時観測・数値シミュレーション・現代統計で解き明かす、ブラックホール降着流の全体像	木邑 真理子 43
XX-007	グラディエントフローを用いた場の理論の新しい解析手法の発展	菊地 健吾 44
XX-008	MeVガンマ線宇宙物理学の開拓	米田 浩基 45
XX-009	汎関数繰り込み群に基づいた密度汎関数理論による量子多体系の新たな第一原理的解析法の開発	横田 猛 46
XX-010	From diffractive to partonic interaction: Precise measurement of the transverse single spin asymmetry of neutral pion at high energy polarized proton-proton collision	Minho KIM 47
XX-011	原始惑星系円盤の化学・物理進化計算と系外惑星大気の化学組成観測から探る惑星形成過程	川島 由依 48
XX-012	Topological quantum links, knot theory and unidirectional magnetoresistance under broken symmetry	Ilya BELOPOLSKI 49
XX-013	Emergent magnetomultipoles and nonlinear responses of a magnetic hopfion	Yizhou LIU 50
XX-014	アト秒硬X線パルスを用いた強相関物質の光励起ダイナミクスの研究	久保田 雄也 51
XX-015	シリコン量子ドット中の電子スピンによる誤り耐性量子計算の基盤技術開発	野入 亮人 52
XX-016	多階層生体構造における相転移・相分離現象	足立 景亮 53
XX-017	Surface-induced Chirality in Organic Semiconductor Thin Films and Its Application to Spin Filter	Chao WANG 54
XX-018	Three dimensionally Architected Nanocatalyst Inspired by Deep-Sea Hydrothermal Vent	Hye-Eun LEE 55
XX-019	テラヘルツ-光STMで観る分子の帯電状態ダイナミクス	木村 謙介 55

XX-020	生体膜チップを用いたアーキアべん毛モーターの再構築	木下 佳昭	56
XX-021	古代RNA/DNAポリメラーゼの復元 ～「セントラルドグマ」の起源に迫る～	八木 創太	57
XX-022	分子動力学計算とクライオ電子顕微鏡の相補的融合による生体高分子の 時空間イメージング	大出 真央	58
XX-023	数理モデルと細胞・分子動態の網羅的計測により、脊椎動物胚における 形態の進化可能性を評価する	内田 唯	59
XX-024	気管陥入を駆動する三つのプロセスの協調機構の解明	山下 慧	60
XX-025	三次元組織における空間情報を保持した1細胞遺伝子発現解析法の 開発と幹細胞研究への応用	北條 望	61
XX-026	Towards a principled deep learning framework for genomics	Hector CLIMENTE GONZALEZ	62
XX-027	アミロイド生成・脱凝集過程におけるタンパク質の動的構造解析	野村 高志	62
XX-028	MEASUREMENT OF CHROMATIN ARCHITECTURE, AND ITS FUNCTION IN REGULATING NEURONAL ACTIVITY	Fangke XU	63
XX-029	結合テンソル分解による異種バイオデータの統合解析	露崎 弘毅	64
XX-030	血球・免疫系細胞の分化に寄与する膜輸送タンパク質 solute carriers (SLCs) の探索および機能研究	橋本 真里	65
XX-031	消化器機能を調節する交感神経系の分子遺伝学的解析	播磨 有希子	65
XX-032	オルガノイド技術を用いた、肺線維症における上皮細胞老化の意義と 新規薬剤の探索	榎本 泰典	66
XX-033	視索前野および扁桃体領域による社会的接触行動の分子神経基盤 の解明	福光 甘齋	67
XX-034	The Flux of GABA Regulates Inflammatory Responses in Macrophages	Baihao ZHANG	68
XX-035	ひらめきによる学習を支える後部頭頂皮質の計算機構と神経基盤	青木 亮	69
XX-036	Attosecond pump-probe spectroscopy: ultrafast dynamics in atoms and molecules	Bing XUE	70
XX-037	高Q値微小光共振器による新たなナノスケール非線形光学の開拓	藤井 瞬	70
XX-038	Exciton physics in 1D-2D heterostructures and its applications	方 楠 (Nan FANG)	71
XX-039	Elucidation of structure and role of protein-protein interactions inside spider glands: Knowledge based development.	Nur Alia OKTAVIANI	72
XX-040	実践的分子シミュレーションで展開する医用工学技術の開発研究	楊 正博	73

2021年度採用者

XXI-001	特性イブシロンサイクル及び導手公式の精密化	竹内 大智 77
XXI-002	定曲率ローレンツ多様体上の大域解析	甘中 一輝 77
XXI-003	Going Beyond Worst-case Mixing Time of Markov chains, and Improving Markov Chain Monte Carlo Algorithms	Geoffrey WOLFER 78
XXI-004	作用素環上の保存問題の研究	森 迪也 79
XXI-005	代数多様体の退化と標準計量	井上 瑛二 80
XXI-006	Development of Data-driven Prediction Model using Deep Learning for Estimating the Evolution of White Matter Hyperintensities Associated with Small Vessel Disease in Brain MRI	Muhammad Febrian 81 RACHMADI
XXI-007	原始惑星系円盤の構造形成とガス衝突の微物理を統括した惑星形成理論の構築	富永 遼佑 82
XXI-008	Implementation of Helium-3 Magnetometers to Extend the BASE Physics Program at CERN	Elisabeth Johanna 84 WURSTEN
XXI-009	非線形量子電磁力学の数値計算コードの開発とその高エネルギー物理過程への応用	田屋 英俊 85
XXI-010	QCD 相図の解明に向けた非摂動的計算手法の開発	松本 信行 86
XXI-011	Sn同位体の中性子スキン構造進化で探る、魔法数を跨ぐ領域での核半径増大現象の解明	田中 聖臣 87
XXI-012	一般相対論的ボルツマン輻射流体コードによる超新星爆発シミュレーション	原田 了 89
XXI-013	DALI, an axion dark-matter telescope probing the 6 to 60 GHz band	Javier DE MIGUEL 90 HERNANDEZ
XXI-014	量子ブラックホールによる量子重力理論および標準模型を超えた素粒子論の検証	大下 翔誉 90
XXI-015	マルチストレンジネス核におけるハイペロン間相互作用の研究	江川 弘行 91
XXI-016	2次元ファンデルワールスヘテロ構造におけるトポロジカル超伝導の実空間探査	成塚 政裕 92
XXI-017	First Observation of Dynamics of Antiskyrmions with Electric Current Excitation	Licong PENG 93
XXI-018	Anomaly-Based Symmetry Constraints on Quantum Gapped Phases and Gapless Phases in Many-Body Systems	Yuan YAO 94
XXI-019	室温トポロジカル磁性体における非散逸輸送現象の開拓	藤代 有絵子 94
XXI-020	室温における量子スピンホール系を用いたスイッチング素子の開発	佐藤 雄貴 96

XXI-021	多自由度が絡みあう強相関電子系物質における軌道状態の実空間観測とその外場応答	鬼頭 俊介 97
XXI-022	ファンデルワールス超薄膜・界面設計に基づく創発二次元物性開拓	松岡 秀樹 98
XXI-023	Non-Hermitian Topological States	XiaoXiao ZHANG 99
XXI-024	Ab initio Approach for Phase Transitions Induced by Fermion Pairing: Superconductivity and Exciton Condensation	Hsiao-Yi CHEN 100
XXI-025	芳香環形成反応を引き金とする生体現地でヒドロゲル形成手法の開発	山本 智也 101
XXI-026	超高速時間分解分光電気化学測定による有機金属錯体の光触媒活性中間体の観測	高梨 司 102
XXI-027	花成を人為的に制御する分子技術	西山 康太郎 103
XXI-028	分子認識型フォトドックス触媒が拓くアミノ酸のラジカルの変換反応	田上 拓磨 103
XXI-029	B型肝炎ウイルスの感染複製機構解明に関する構造生物学研究	山下 規央 104
XXI-030	オスの養育行動促進回路の形成メカニズム	稲田 健吾 105
XXI-031	植物細胞の劇的な分化可塑性を生み出す分子メカニズムの探求	森中 初音 106
XXI-032	環境応答に伴うトランスクリプトーム変化を用いた交差耐性・交差感受性の予測	佐藤 匠哉 107
XXI-033	フナ類をモデルとしたクローン繁殖の分子基盤の解明からクローン繁殖動物作出の応用まで	三品 達平 108
XXI-034	一次繊毛における新規機構「分子コンバータ」システムの解明	加藤 孝信 109
XXI-035	哺乳動物における腎臓間質前駆細胞の発生メカニズム理解と、腎臓発生の試験管内再構成	谷口 純一 110
XXI-036	炎症性腸疾患における腸内細菌とエピトランスクリプトーム制御の相互作用が果たす役割の解明	寺嶋 秀騎 111
XXI-037	遺伝性心筋症における統合的オミックス解析に基づいた心不全進展機序の解明	寺本 了太 112
XXI-038	Using pooled cell libraries to associate genetic variance with responses to stimulus	Steven Matthew HEATON 112
XXI-039	Investigating the Neural and Behavioral Mechanisms of Motor Skill Learning with Robotic Assistance, Passive Movement, and the Sense of Agency	Ethan OBLAK 113
XXI-040	Emergent Prosocial Behavior During Dynamic Human Group Formation	Ryan Paul BADMAN 114
XXI-041	細胞外マトリックスと細胞接着分子による感覚神経末端の伸長・伸縮・剪定における影響と病理への応用	松山 絢子 115

XXI-042	Multi-modal Image Processing and Data Fusion for Collaborative Brain Image Analysis	Matthias Wilfried SCHLACHTER 116
XXI-043	知覚を成立させる皮質広域神経活動に果たすハブニューロンの役割の探索	上森 寛元 117
XXI-044	Towards twisted light devices with single-walled carbon nanotubes	Chee Fai FONG 118
XXI-045	軟X線多次元イメージングシステムの研究開発	江川 悟 118
XXI-046	Experiment-based Mechanistic Modeling of Lumen Formation and Remodeling Principles in Tubulogenesis	Swe Soe MAUNG YE 119
XXI-047	超大型ウォルターミラーの開発とX線顕微鏡・望遠鏡への応用	山口 豪太 120
XXI-048	量子限界性能を有するハイブリッド型超伝導マイクロ波増幅器の開発	沓間 弘樹 121
XXI-049	自己保護機能を持つ永久電流・ヘリウムフリー高温超伝導磁石の開発	末富 佑 122
XXI-050	多波長観測によるブラックホールのスピンの測定とその宇宙論的な解釈	川室 太希 123

2021年度採用者

XXII-001	s-不変量のホモトピー的特徴づけとその応用	佐野 岳人 127
XXII-002	Low-Regularity Gravity and Emergent Geometry via Optimal Transport Theory	Christy Koji KELLY 127
XXII-003	共形場理論の構成と変形の数学的研究	森脇 湧登 128
XXII-004	理想的気候条件下における大規模雲群の自己組織化と多階層構造	柳瀬 友朗 129
XXII-005	三次元アラケロフ多様体の極小モデル理論とその応用	吉川 翔 130
XXII-006	等質空間上の調和q-指数型分布族の分類	東條 広一 131
XXII-007	拡張された平均場理論を用いた原子核短距離相関の研究	内藤 智也 132
XXII-008	分子組成分布と機械学習を活用した星・惑星系形成の最初期過程の解明	大小田 結貴 133
XXII-009	Development of an ultra-sensitive axion-like particle detection standard with 100-fold increased sensitivity and ultra large bandwidth.	Barbara Maria LATACZ 134
XXII-010	New Technologies to Study Electric Properties of Exotic Isotopes	Martha Liliana CORTES 134
XXII-011	対称性とトポロジーに基づいたダイクォークの包括的研究	末永 大輝 135
XXII-012	超高空間分解能の赤外線観測と多波長観測による合体銀河が宇宙進化に果たした役割の解明	山田 智史 136
XXII-013	銀河磁場モデルに基づく最高エネルギー宇宙線起源天体の特定	樋口 諒 138

XXII-014	中間相クラスターにおける陽電子束縛及び陽電子対消滅機構の第一原理理論予見	吉田 大輔	139
XXII-015	ロックアウト反応で見る原子核の中の原子核	茶園 亮樹	140
XXII-016	精密測定による少数系ハイパー核問題の解決	中川 真菜美	141
XXII-017	磁性絶縁体における3次元トポロジカル磁気秩序の探索	巖 正輝	142
XXII-018	Two-Dimensional van der Waals Magnetic Heterostructure Devices for Future Spintronic Applications	Maximilian Thomas BIRCH	143
XXII-019	量子多体ダイナミクスの効率的な量子計算アルゴリズムの開拓	水田 郁	144
XXII-020	量子計算機を制御する超伝導量子インターフェース回路	向井 寛人	145
XXII-021	散逸・ゆらぎに起因した非線形応答の理論構築及び探索	道下 佳寛	145
XXII-022	フラストレート格子上のトポロジカル物性	村山 陽奈子	146
XXII-023	Direct detection of emergent electromagnetic inductance via real-space electron phase measurement.	Fehmi Sami YASIN	147
XXII-024	二重特異性メタロペプチドによる触媒活性制御	六車 共平	148
XXII-025	普遍金属触媒が協働する有機ナトリウム化学の開拓	高橋 一光	149
XXII-026	分子のねじれを利用するエネルギー変換素子の創出	齋藤 仁志	150
XXII-027	強誘電異方性流体の創発物性機能の理解からさらなる新展開へ	西川 浩矢	150
XXII-028	原子分解能を超え、水素、電荷を精密解析する有機結晶構造化学の構築	高場 圭章	152
XXII-029	高機能合金触媒の巨視的・微視的反応解析に基づく反応制御因子の解明	稲垣 万貴	153
XXII-030	Developing a Method for Extracting Cascades from <i>C. elegans</i> Whole-Brain Activities.	Chentao WEN	153
XXII-031	直列重複かつ冗長タイプの重複遺伝子を対象とした環境ストレス応答・馴化メカニズムの探索	江副 晃洋	154
XXII-032	大規模フィールドオミクス解析による、葉-根間の栄養バランス調節を司る遺伝子制御ネットワークの解明	大熊 直生	155
XXII-033	Directing Human Induced Pluripotent Stem Cell-Derived Embryonic-like Organoid with 3D Biomimetic Cryogel Mechanical Microenvironment for Neural Induction.	Raja Kumar VADIVELU	156
XXII-034	新生児マウスにおける低温耐性喪失機構の解明	齋藤 祐一	157
XXII-035	分裂期の染色体動態によって制御される受精卵の核内染色体配置と遺伝子発現プロファイルの解明	竹之内 修	157
XXII-036	植物遺伝学とケミカルバイオロジーの融合による葉緑体オートファジーの分子理解と応用展開	中村 咲耶	158

XXII-037	Understanding the Role and the Limits of Niche Conservatism in Speciation	Jose Said GUTIERREZ 159 ORTEGA
XXII-038	チロシンセンシングを基軸とした新規寿命延長機構の解明	小坂元 陽奈 160
XXII-039	Characterizing Intracellular Viscosity and its functional implications across cell types during <i>Drosophila</i> embryo morphogenesis	Sameer THUKRAL 161
XXII-040	Molecular Mechanisms of De Novo Insect Gall Organogenesis in Plants	Xin TONG 163
XXII-041	新奇植物資源を利用した線虫に対する化学的防御機構の解明	佐藤 一輝 163
XXII-042	Evolution in Class Structured Populations	Thomas James 164 HITCHCOCK
XXII-043	Neocortical Circuits and Physiological States Underlying the Volitional Control of the Vocal Output in Marmoset Monkeys.	Cristina RISUENO 165 SEGOVIA
XXII-044	Elucidating the Brain Mechanisms of Fatigue in Motor and Cognitive Functions Using Ultra-High-Field fMRI	Sofia LAVRENTEVA 166
XXII-045	血管内皮幹細胞を標的とした新規治療法探索のための患者特異的iPS細胞を用いたVHL病モデルの構築	伊藤 秀矩 167
XXII-046	Investigating Information Processing Strategies among Normal Ageing and Mild Cognitive Impairment Populations: An Eye-Movement Study	Alexandra Janina 168 WOLF
XXII-047	自律神経中枢による発熱と免疫応答の制御機構の解明	内田 俊太郎 169
XXII-048	Human Variation Driven by Mobile Genetic Elements: Disease Association and Evolution	Shohei KOJIMA 169
XXII-049	「量子」メタマテリアルを用いた高効率全光スイッチの開発	竹内 嵩 171
XXII-050	微生物を用いたCO ₂ からの高付加価値化合物生産技術の開発	藤原 良介 172
XXII-051	Recording Time-stamped Biological Events into Cellular DNA Through Genome Editing	Chih-Chieh (Jay) YU 172
XXII-052	光合成における光電変換機構の解明を目指した光STMと生体分子蒸着法の融合	今井 みやび 173
XXII-053	Progress Towards a Coplanar Lumped-element Josephson Traveling-wave Parametric Amplifier	Chung Wai Sandbo 174 CHANG
XXII-054	細胞膜の機械特性と遺伝子発現の統合解析による老化の解明	塩見 晃史 175
XXII-055	高分子科学と工学の融合による高感度疾患診断デバイスの開発	上田 智也 176
XXII-056	機械学習技術を用いたイオン源制御手法の開発	森田 泰之 176

基礎科学特別研究員
2018 年度採用者

XVIII-001 ベクトル中間子の核内質量分布の高統計測定による
ハドロン質量の起源の解明
Measurements of Spectral Change of Vector Mesons in Nuclei

研究者氏名：菅野 光樹 Koki KANNO
受入研究室：仁科加速器科学研究センター
中間子科学研究室
(所属長 岩崎 雅彦)

本研究の目的は、ハドロンがハドロン周囲の媒質との関係で決定される動的な性質であることを実験的に示すために、ベクトル中間子の原子核内での質量分布と真空中での質量分布を測定し、その差を明確に測定することである。

一般的なクォーク模型において陽子は3つのクォークから構成されるが、その質量 (938 MeV) は単体のクォークがヒッグス機構によって得る質量の単純和 (数MeV) と比較して非常に重い。これはカイラル対称性の自発的破れという機構で理解され、広く受け入れられている。しかしこの機構を直接的に実証した実験は皆無である。そこで本研究では中間子の質量分布を直接測定することで、質量の起源を解明する。

本研究では原子核内で崩壊するベクトル中間子、特に ϕ 中間子の質量分布を電子陽電子対崩壊チャンネルから再構成することで測定する。 ϕ 中間子は陽子ビームを原子核標的に照射することで生成するが、同時に電子陽電子の背景事象となる荷電 π 中間子が大量に生成され、検出器に入射する。明瞭な質量分布を測定するためには、大量の荷電 π 中間子の中から電子陽電子を高効率かつ低誤

認率で同定する必要がある。そのために、検出器としてハドロンブラインド検出器と呼ばれる電子同定用ガスチェレンコフ検出器の開発を進めてきた。

本年度は、前年度までにスペクトロメーターにインストールした実機ハドロンブラインド検出器の性能を評価した。本課題で使用する陽子ビームを用いて、本番と同様の条件でコミッショニングを行った。詳細なデータ解析は現在も続いているが、開発したハドロンブラインド検出器が入射電子に対して 11 ± 1 個の光電子を検出し、入射電子を想定効率で検出できていることがわかった。また飛跡検出器によって再構成された荷電粒子の飛跡とハドロンブラインド検出器の信号検出位置の残差が、想定と無矛盾であることもわかった。今後は2023年度に予定している物理データ取得に向けて検出器の増強を行う。

●誌上发表 Publications

(原著論文)

1. Satomi Nakasuga et al., : "Commissioning of the electron identification system for Dilepton measurement in pA collisions at J-PARC", Nucl. Instrum. Methods A 1041 (2022) 167335

基礎科学特別研究員
2019 年度採用者

XIX-001 SPECTRAL ANALYSIS, ANALYTIC NUMBER THEORY, AND APPLICATIONS TO MACHINE LEARNING

Name: Eren Mehmet KIRAL

Host Laboratory: Mathematical Science Team

Generic Technology Research Group

RIKEN Center for Advanced Intelligence Project

Laboratory Head : Kenichi BANNAI

In classical machine learning, one constructs a loss function from the data and the model, and tries to find an optimal value θ^* which minimizes the loss function. The classical approach suffers from robustness issues and even though has yielded impressive results, is difficult to analyze mathematically. The Bayesian approach to machine learning on the other hand tries to find a distribution $q(\theta)$ on the parameters such that minimizing the expectation of the loss is balanced with maximizing the entropy of the distribution. The introduction of mathematical objects such as the entropy functional and the space of probability distributions gives a much richer structure to play with. Working with members of the Approximate Bayesian Inference team from AIP, I developed a learning rule which updates distributions on parameters of a machine learning model. The Bayesian problem is distinct from the classical learning problem.

The team leader Emtiyaz Khan had already developed a learning rule for distributions given by exponential families. This work used the exponential family parameters heavily, the updates could end up producing inadmissible parameters (and would have to be projected back) and the calculation of the gradient only feasible in special cases. However apart from these drawbacks was able to recover many of the popular and well functioning learning techniques used in the machine learning field.

In our work we have focused on candidate probability distributions which are parametrized by the action

of a Lie group. Lie groups are mathematical objects that had prominence in both analytic number theory and theoretical physics. Then our learning updates are given using structures on the group such as the group operation and the exponential map of the group. Specializing the result to certain groups we obtain novel learning rules which have different and hopefully more human-explainable behaviors than classical ones.

On the side of analytic number theory I am working on writing Voronoi formula for $SL(3)$ modular forms with a view towards converse theorems. This combines my two previous works on generalized Voronoi formula and $SL(3)$ Kloosterman sums.

● Publications

Papers

- 1.Kiral, Eren Mehmet & Nakasuji, Maki, “*Parametrization of Kloosterman sets and $SL(3)$ Kloosterman sums.*” *Advances in Mathematics*, Vol. 403, 2022, pp108392,

● Oral Presentations

Conferences

- 1.Our submission has been accepted to be presented at AISTATS 2023 in April.

● Poster Presentations

Conferences

- 1.Kiral, Eren Mehmet poster presentation at Young Mathematicians Challenge March 14, 2023 若手数学者交流会

XIX-002 原始惑星系円盤・系外惑星大気の化学構造研究から探る、 普遍的な星・惑星形成過程

Exploration of Universal Star and Planet Formation Processes through the Studies of
Chemical Structures in Protoplanetary Disks and Exoplanetary Atmospheres

研究者氏名：野津 翔太 Shota NOTSU

受入研究室：開拓研究本部

坂井星・惑星形成研究室

(所属長 坂井 南美)

今までに 4000個以上の太陽系外惑星が発見されているが、軌道や質量等が従来の惑星形成理論で説明困難なものも多い。そこで系外惑星を普遍的に説明できる理論の構築が求められている。それには、惑星形成が起こる原始惑星系円盤(以後、“円盤”)の構造と進化を、理論と観測の両面から解明する事が必要である。その中でも様々な円盤およびその前段階の原始星エンベロープにおいて、 H_2O をはじめとした分子の組成分布とスノーライン(昇華半径)の位置を知ることは、微惑星・惑星形成過程や、地球上の水や有機物の起源を理解する上で重要である。

(研究1: 原始星天体&円盤の化学構造 モデル計算研究)

従来の本研究員らの研究(Notsu et al. 2016, 2017, 2018, 2019)を拡張し、スノーライン位置や分子組成分布の進化を探ることを目的として、円盤・エンベロープのダスト進化(成長・破壊・落下)・中心星の光度変化・X線&UV放射などによる影響も順次考慮したモデル構築を進めている。そして最終的に原始星段階から円盤散逸期までの物理構造と化学構造の時間進化を並行して扱うモデルを構築することを目指している。本研究員らは2021年度までに原始星進化初期段階に着目したモデル計算の研究を継続し、ダスト表面反応、及びX線&UV放射による破壊反応などを取り入れた詳細な化学反応ネットワーク計算モデルの構築と実際の計算を進めた。またそれらの結果をもとに、中心原始星のX線放射が周囲のエンベロープにおける化学進化に与える影響について議論した1編の査読論文をまとめた。(Notsu et al. 2021, A&A, 650, A180) これらの計算結果に引き続き、2022年度は主に円盤高さ方向に着目しダスト進化や宇宙線電離率の分布などを考慮した円盤化学構造の議論・計算を進めた。

また、原始惑星系円盤の化学構造の理解は、円盤観測・惑星大気観測・太陽系内小天体(彗星・小惑星)観測・探査の結果を解釈する上でも重要である。(e.g., Notsu et al. 2020, MNRAS, 499, 2229) ここで近年の円盤輻射輸送計算(e.g., Ueda et al. 2019)によると、ダストが動径方向に濃集する領域が存在する場合、中心星からの放射が遮られる事で影構造が形成され、円盤内側領域においても低温な領域が形成されうる可能性が示唆さ

れている。Ohno & Ueda (2021)は、 H_2O スノーライン付近でのダスト濃集に伴う影構造(低温領域)の存在が、揮発性物質に富む木星大気の形成過程をうまく説明しうる事を示した。しかしこの論文では主要分子の組成を固定した上で、それぞれの凍結・昇華のみを考慮した単純な化学モデルを採用しており、円盤影領域の詳細な化学構造は未だ明らかではない状況であった。

そこで発表者らは自ら構築を進めてきたガス・ダスト化学反応ネットワーク計算モデルを用いた上で、影構造を持つT Tauri円盤の赤道面の詳細な化学構造計算を行い、主要分子の組成や炭素-酸素元素組成比(C/O比)の変化などを調べた。その上で円盤内での有機分子形成過程に影構造が与える影響や、電離度・初期化学組成などの初期条件に対する依存性の議論なども進めた。これらの計算結果・議論をまとめた査読論文をThe Astrophysical Journal誌に投稿、査読を経て2022年9月に出版済みである。(Notsu et al. 2022, ApJ, 936, 188)

また、原始星天体の化学構造研究の内容をまとめた日本語解説記事も執筆・投稿した。こちらの記事は天文月報 アストロケミストリー特集の記事の一つとして2022年4月号に掲載された。

(研究2: 原始星天体&円盤の化学構造 観測研究)

(研究1)で取り組んだモデル計算研究の結果も生かし、所属長の坂井南美氏らと協力し原始星天体の CO_2 、 H_2O スノーライン位置や複雑な有機分子組成を探る事を目的としたALMA望遠鏡分子輝線観測の提案を行った。その後観測提案は審査を経て採択、ALMA望遠鏡による観測が実行され、現在データ解析・論文執筆を進めている。その他、坂井南美氏がCo-PIを務めるALMA大型観測プロジェクトFAUSTにも参加し原始星天体の円盤の化学構造データの解析に取り組んだ(2023年1月現在、現在論文執筆中)ほか、東京大学天文学専攻の学生さんとも協力し野辺山45m電波望遠鏡を用いての原始星天体の分子輝線観測にも取り組むなど、理論と観測の垣根を超え新たな研究テーマの開拓にも積極的に取り組んだ。

その他、原始星天体・原始惑星系円盤の分子輝線観測(H₂O輝線など)のサイエンス提案という観点から、複数の赤外線・電波望遠鏡将来計画(GREX-PLUS, ngVLA, LST, TMTなど)の議論にも適宜参加している。2022年にはLST(大型サブミリ波望遠鏡)の日本語版サイエンス白書の宇宙化学(アストロケミストリー)班の一員として、原始星天体の分子輝線観測サイエンスの章の執筆を担当した(現在公開に向け準備中)。GREX-PLUS(銀河進化・惑星系形成観測ミッション)については科学検討メンバーとして2021年から本格的に参加しており、2022年には英語版サイエンスブックの執筆を行った(2023年1月現在、公開に向け準備中)。

●誌上发表 Publications

(原著論文)

1. Notsu, S., Ohno, K., Ueda, T., Walsh, C., Eistrup, C., Nomura, H., “The Molecular Composition of Shadowed Proto-solar Disk Midplanes Beyond the Water Snowline”, *The Astrophysical Journal*, 936, 188 (2022)
2. 野津翔太, “低質量原始星エンベロープと円盤の化学進化: H₂O スノーラインと中心星X線放射”, *天文月報*, vol. 115, No.4, p.252-262 (2022年4月号)

●口頭発表 Oral Presentations

1. Shota Notsu, “The Molecular Composition of Shadowed Proto-solar Disk Midplanes Beyond the Water Snowline”, A half century of millimeter and submillimeter astronomy: Impact on astronomy/astrophysics and the future, Miyakojima Mirai Souzou Center & City Hall of Miyakojima City, Miyakojima, Okinawa, Japan, December 15-18th (2022)
2. Shota Notsu, “X-ray-induced chemistry of water and related molecules in protostellar envelopes and disks”, *Molecules in Extreme Environments: Near and Far*, Mitaka Campus, National Astronomical Observatory of Japan (NAOJ), Tokyo, Japan, November 23-25th (2022)
3. 野津翔太, “将来の中間赤外線・遠赤外線宇宙望遠鏡が切り拓く原始惑星系円盤・惑星形成サイエンス”, 2040年代のスペース天文学研究会, 名古屋大学 東山キャンパス ES総合館, 11月14日-15日(2022年)
4. 野津翔太: “H₂Oスノーライン以遠に影構造を持つ原始惑星系円盤の詳細化学構造”, 招待講演, 計算アストロバイオロジー2022 研究会, 筑波大学 計算科学研究

センター 11月10日-11日(2022年)

5. Shota Notsu, “Chemical layered structures in the NGC1333-IRAS 4C disk”, FAUST plenary meeting at IPAG, Institut de Planétologie et d’Astrophysique de Grenoble (IPAG), Université Grenoble Alpes, Grenoble, France, September 27-29th (2022)
6. 野津翔太, 野村英子, 井上昭雄, “次世代赤外線天文衛星 GREX-PLUS が切り拓く原始惑星系円盤サイエンス”, 日本惑星科学会2022年秋季講演会, 惑星の天文観測と将来計画 セッション, OG-06, ザ・ヒロサワ・シティ会館(茨城県水戸市) + オンライン(ハイブリッド開催), 9月20日-22日(2022年)
7. 野津翔太, 大小田結貴, 坂井南美, 大和義英, 相川祐理, 野村英子, “ALMA 分子輝線観測で迫る低質量 Class 0 原始星天体 IRAS15398-3359 の円盤 H₂O, CO₂ スノーライン”, 日本天文学会 2022年秋季年会, 星・惑星形成(星形成) セッション, P118a, 新潟大学五十嵐キャンパス + オンライン(ハイブリッド開催), 9月13日-15日(2022年)
8. 野津翔太, “ガス惑星大気 of C/N/O/S 元素組成や同位体: 円盤化学との関連 + 観測可能性”, 系外惑星大気研究会 2022, 沖縄県石垣市 大濱信泉記念館 多目的ホール, 8月22日-25日(2022年)
9. 野津翔太, 大野和正, 植田高啓, 野村英子, Catherine Walsh, Christian Eistrup, “H₂O スノーライン以遠に影構造を持つ原始惑星系円盤の赤道面化学構造”, 日本地球惑星科学連合 (JpGU) 2022年大会, セッション: 宇宙における物質の形成と進化, 幕張メッセ, 5月22日-27日(2022年)

●ポスター発表 Poster Presentations

1. 野津翔太, “H₂O スノーライン以遠に影構造を持つ原始惑星系円盤の詳細化学構造”, 第35回 理論懇シンポジウム 2022 「理論天文学・宇宙物理学の広がり: さらなる発展に向けて」, コラッセふくしま, 12月21日-23日(2022年)
2. Shota Notsu, “The Molecular Composition of Shadowed Proto-solar Disk Midplanes Beyond the Water Snowline”, *Symposium on Next Generation Astrochemistry*, Koshiba Hall, Hongo Campus, University of Tokyo, Tokyo, Japan, November 29th-December 2nd (2022)
3. 野津翔太, 大野和正, 植田高啓, 野村英子, Catherine Walsh, Christian Eistrup, “H₂O スノーライン以遠に影構造を持つ原始惑星系円盤の赤道面化学構造 II. 有機分子組成 & 電離度・初期化学組成依存性”, 日本惑星科学会2022年秋季講演会, PA-29, ザ・ヒロサワ・シティ会館(茨城県水戸市) + オンライン(ハイブリッド開催), 9月20日-22日(2022年)

XIX-003 輻射多流体シミュレーションを用いた星・円盤・惑星系形成の研究

Exploring star, protoplanetary disk, and planet system formation with radiation multi-hydrodynamics simulations

研究者氏名：仲谷 峻平 Ryohei NAKATANI
受入研究室：開拓研究本部
坂井星・惑星形成研究室
(所属長 坂井 南美)

本研究は惑星系の形成と進化の過程を多角的に明らかにすることを目的とする。近年、アルマ望遠鏡などの高解像度望遠鏡の活躍により、形成段階にある惑星系の詳細な構造が観測的に明らかになってきている。その発見の中には、これまでの標準的惑星形成モデルと相容れないものも多くあり、惑星系進化モデルのアップデートが急がれる。

今年度の研究では、光蒸発という宇宙で普遍的に起こる物理現象に焦点を当てた研究を行った。光蒸発とは星などの紫外・X線光源によりその周囲にあるガスが加熱され蒸発する現象のことを指す。例えば、惑星系の母天体である原始惑星系円盤は幾何学的に薄いガス円盤であるが、光蒸発によりガスが失われると木星のような巨大ガス惑星は形成がストップしてしまう。また、星の母天体である分子雲についても周囲に高温の星があればこの光源に曝された雲はたちまち蒸発し、星形成に使われるはずだったガスが散逸する。このように、光蒸発は天体の形成時間や質量を制限するため、天文学的に重要な現象である。また、宇宙の始まりから現在まで、大きなスケールから小さなスケールの天体まで普遍的に起こる現象であるため、天文学的に意義深い。

しかしながら、この現象についての基礎的な理解はまだ完全にはなされていない。例えば、ガスが加熱された時に一部は蒸発により流出するが、星に近い領域など重力が強い部分ではガスが流出することができない。このことは定性的な理解は容易だが、定量的な理解は得られておらず重力源からの臨界距離等は未だ知られていない。特に観測的に光蒸発流を発見する際このような臨界値は基準となる上、惑星がどこで形成しやすいかという問題にも関わるため、星惑星形成過程

を解明する上で光蒸発の基礎を定量的に理解することは極めて重要である。

この問題に真正面から挑み、我々は光蒸発の基礎を構築する上での土台となる理論を提唱した。解析的なモデル構築と数値シミュレーションによる検証を行う手法を用いた研究を行い、論文をThe Astrophysical Journalにて出版した。また、他にもさまざまなスケールの天体に関して同様の研究を、博士・修士学生を指導しながら主導し、それぞれについて論文を出版した。更に別の独立な研究で、実験室系に再現した星形成領域から分子輝線を観測する研究室プロジェクトにも参加し、AIを用いたデータ解析自動化ツールを単独で開発した。これまで手動でデータ解析していた場合に比べて、研究効率が10-100倍になった。

●誌上发表 Publications

(原著論文)

1. Ohno Y., Oyama T., Tamanai A., Shaoshan Z., Watanabe Y., Nakatani R., Sakai T., and Sakai N. : "Laboratory Measurement of Millimeter-wave Transitions of $^{13}\text{CH}_2\text{DOH}$ for Astronomical Use", The Astrophysical Journal, 932, 101 (2022)*
2. Mitani H., Nakatani R., and Yoshida N. : "Stellar wind effect on the atmospheric escape of hot Jupiters and their Ly α and H α transits", the Monthly of the Royal Astronomical Society, 512, 855 (2022)*
3. Nakatani R., Takasao S. : "Anatomy of Photoevaporation Base: Linking the Property of the Launched Wind to Irradiation Flux", the Astrophysical Journal, 930, 124 (2022)*
4. Komaki A., Nakatani R., Kuiper R., and Yoshida N. : "The effect of ultra-violet photon pumping of H_2 in dust-deficient protoplanetary disks", the Astrophysical Journal, arXiv:2202.02804, submitted.

XIX-004 強いスピン軌道相互作用を持つ1次元電子系の物性解明と超伝導接合への展開

One-dimensional electron systems with strong spin-orbit interaction and the superconducting junctions

研究者氏名：松尾 貞茂 Sadashige MATSUO
受入研究室：創発物性科学研究センター
量子機能システム研究グループ
(所属長 樽茶 清悟)

電子相互作用を有する1次元電子系はフェルミ液体ではなく朝永ラッティンジャー液体 (TLL) と呼ばれる状態となることが知られている。TLLは電子系のみならず相関を持つ1次元電子系に対して普遍的に適用可能な描像を与えるものであるため、その特性の理解は重要な意義を持つ。

本研究計画では、強いスピン軌道相互作用を有するInAs量子細線でのTLLの振る舞いを実験的に検出することで、強いスピン軌道相互作用を持つTLLの特性を解明することを目指す。スピン軌道相互作用がTLLにおいて重要であるのかどうかを理解することで、今後のTLLに関する物理、スピン軌道相互作用に関する物理へ貢献する。

さらに、強い電子間相互作用を有するTLL二本と超伝導体の接合において、超伝導体中のクーパ対を形成する2個の電子が二本のTLLへと分離するクーパ対分離現象の検出を行い、この系で理論的に提案されている無磁場でのマヨラナ粒子の実現とその実証を行う。マヨラナ粒子の実証には、シャピロ階段の測定を予定している。この系を用いることで、現在までに実験的に検証されてきた磁場印加による超伝導体/量子細線接合にとって代わる新たな無磁場でのマヨラナ粒子の実験舞台を創出する。

本年度はおもに、昨年度中に得られていたコヒーレント結合に由来する超伝導ダイオード効果、および異常ジョセフソン効果について、再現性の確認とデータの高精度化を目指した実験を行った。コヒーレント結合した二つのジョセフソン接合では、一方の接合を流れるジョセフソン電流がもう一方の位相差にも依存性を持つ。このため、測定する接合とは別の接合を超伝導ループの中に入れて、面直磁場で位相差を制御する実験を行うが、この際にバイアス電流と超伝導電極の持つインダクタンスにより作られる磁束の影響を考慮する必要がある。これを定量的に評価するための実験を行い、解析においてインダクタンスを考慮した手法に変更したところ、得られる結果の精度が向上することがわかった。また、得られていたダイオード効果、お

よび異常ジョセフソン効果がインダクタンスに由来するtrivialなものではなく、コヒーレント結合に由来したものであることが明確になった。また、データの精度向上に伴い、詳細なゲート依存性を超伝導ダイオード効果、および異常ジョセフソン効果に関して測定することが可能となった。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

- 1.Sadashige Matsuo, Joon Sue Lee, Chien-Yuan Chang, Yosuke Sato, Kento Ueda, Christopher J. Palmstrom, Seigo Tarucha, "Observation of nonlocal Josephson effect on double InAs nanowires", Communications Physics accepted
- 2.Kento Ueda, Yosuke Sato, Yuusuke Takeshige, Hiroshi Kamata, Kan Li, Lars Samuelson, Hongqi Xu, Sadashige Matsuo, Seigo Tarucha, "Quasiparticle trapping at vortices producing Josephson supercurrent enhancement", Phys. Rev. Lett. 128, 207001 (2022) selected as Editors' Suggestion
- 3.Kazuyuki Kuroyama, Sadashige Matsuo, Jo Muramoto, Shunsuke Yabunaka, Sasha R. Valentin, Arne Ludwig, Andreas D. Wieck, Yasuhiro Tokura, Seigo Tarucha, "Real-time observation of charge-spin cooperative dynamics driven by a nonequilibrium phonon environment", Phys. Rev. Lett. accepted and selected as Editors' Suggestion

●口頭発表 Oral Presentations

- 1.Sadashige Matsuo, Takaya Imoto, Tomohiro Yokoyama, Yosuke Sato, Tyler Lindemann, Sergei Gronin, Geoffrey Gardner, Michael Manfra, Seigo Tarucha, "Josephson diode effect emergent from a coherent coupling of two Josephson junctions", The 24th International Conference on High Magnetic Fields in Semiconductor Physics (HMF-24), online, July 5, 2022
- 2.(Invited) 松尾貞茂, “超伝導接合におけるマヨラナゼロモード物理の現状” 第10回つくば量子情報サロン講演会「半導体ベース量子デバイスの現状と展望」, 物質・材料研究機構 並木地区 WPI-MANA 棟(Hエリア) 1階オーデトリウム, 2022年6月17日
- 3.(Invited) 松尾貞茂, “アンドレーエフ分子が作り出す

非局所ジョセフソン効果” 第69回応用物理学会秋季学術講演会、青山学院大学相模原キャンパス、2022年3月23日

4. 井本隆哉, 松尾貞茂, Aranya Goswami, Connor Dempsey, Mihir Pendharkar, Joon Sue Lee, Christopher Palmstrom, 樽茶清悟、“選択的領域成長型二重ナノ細線を流れる超伝導電流の電氣的制御” 日本

物理学会第77回年次大会、オンライン、2022年3月15日

5. 佐藤洋介, 上田健人, 武重有祐, 鎌田大, K. Li, L. Samuelson, H.Q. Xu, 松尾貞茂, 樽茶清悟、“磁束の準粒子トラップによるInAs細線ジョセフソン接合における超伝導電流の増幅” 日本物理学会第77回年次大会、オンライン、2022年3月15日

XIX-005 クロマチン構造転移の生物物理：細胞分化現象のミクロ理解に向けて

Biophysics of chromatin remodeling: toward microscopic understanding of cell differentiation

研究者氏名：深井 洋佑 Yohsuke FUKAI

受入研究室：生命機能科学研究センター

生体非平衡物理学理研白眉研究チーム
(所属長 川口 喬吾)

多くの多細胞生物では、単一の受精卵から細胞分化によって様々な役割を持った細胞が生まれる。これは、ほぼ同一のDNAの中からそれぞれの細胞種に依存した遺伝子が選択的に発現される機構があることを意味している。近年のシーエンシング・顕微鏡技術の進歩により、ヌクレオソームの化学修飾パターンの変化と密接に関連して起こるクロマチン構造変化が、このような発現制御に深く関わっていることが明らかとなってきている。

このような化学修飾パターンの違いによる構造の変化をどのように理解できるかという問題に取り組むため、ヒストン修飾部分がパターンをもつ長いクロマチンをボトムアップ的に再構成する手法を開発している。具体的には、ヒストンタンパク質八量体にDNA鎖を巻きつけた後に結合することで、ヒストン修飾部分のパターンを12ヌクレオソーム(12mer)単位で制御した長い(96mer)クロマチン鎖を再構成する手法を考案し、前年度までにプロトコルを確立した。このクロマチン鎖について、塩濃度やクロマチン構造を制御すると考えられているタンパク質の濃度変化による構造変化を一分子観察することを目指して実験を進めている。

本年度は特に、多色全反射顕微鏡を用いた一分子観察について、結果の解析を行うとともに再現性の向上を目指して条件検討を行い、さまざまなアセチル化修飾パターンをもつ再構成クロマチンの観察を行った。また、原子間力顕微鏡を用いた一分子観察やメチル化修飾ヒストンを用いた長鎖クロマチンの再構成・粗視

化モデルの検討などを行い、論文化を目指して研究を進めた。

さらに、相補的なアプローチとして、血球がん細胞HL-60を用いて、分化細胞運命の決定が確率的に起こると考えられる条件で分化動態を観察し、細胞運命の決定に関わる因子を明らかにしようとしている。今年度は特に一細胞mRNA-seqの技術検証を行うとともに、関連するソフトウェアの整備に注力した。特にLI最適化を用いた背景補正のソフトウェアBaSiCPyの開発を主導し、国際会議にて発表を行った。また、細胞系譜解析に用いるために開発した口バスタな粒子トラッキングソフトウェアLapTrackについて技術検証を行い、論文を執筆して投稿した。

●誌上发表 Publications

(原著論文)

1. Yohsuke T. Fukai, Kyogo Kawaguchi: “LapTrack: Linear assignment particle tracking with tunable metrics”, *submitted*.

●ポスター発表 Poster Presentations

(学会)

1. Yohsuke T. Fukai, Kyogo Kawaguchi: “Reconstituting and observing long chromatin with defined nucleosome modification patterns”, RIKEN BDR Symposium 2022, online, Mar. (2022)
2. Tingying Peng, Yohsuke Fukai, Timothy Morello, Nicholas Schaub, Yu Liu: “BaSiCPy - a Python tool for microscopy illumination correction”, Bioengineering Solutions for Biology and Medicine 2022, Munich, Germany, July. (2022)

XIX-006 DNA複製蛍光可視化システムの開発とこれを用いた Hi-C コンパートメント制御因子の網羅的探索

Development of a Fluorescent DNA Replication Reporter and Its Application to Genome-Wide Screening of Hi-C Nuclear Compartment Regulators

研究者氏名：大字 亜沙美 Asami OJI

受入研究室：生命機能科学研究センター

発生エピジェネティクス研究チーム

(所属長 平谷 伊智朗)

Hi-C法を用いたゲノム高次構造解析によると、DNAは核内でMb単位のトポロジカルドメイン (TAD) を形成し、複数のTADはさらに集合して転写されやすいAコンパートメントとされにくいBコンパートメントに空間的に分かれている。A/Bコンパートメントの形成はゲノム機能を調節する上で重要と考えられるが、その制御メカニズムはほとんど分かっていない。この現状を打開するため、私はA/Bコンパートメントと相関するDNA複製時期をGFPで可視化するシステムを構築し、DNA複製時期及び核内コンパートメント制御因子を網羅的に同定するゲノムワイドCRISPR-sgRNAスクリーニングに適用した。スクリーニングで得た候補因子にはDNA複製開始複合体構成因子が多数含まれており、これらの単独変異体のHi-C解析(ゲノム三次元構造の網羅的シーケンサー解析)を実施したところ、ゲノム上の広範囲に構造異常を示す変異体を得た。解析に用いた変異体は、標的タンパク質を時期特異的に分解誘導可能な系を持つ。そこで現在は、候補因子の機能発現時期を特定すべく、細胞周期の時期特異的に標的タンパク質を分解し、その表現型を詳細に解析している。これにより、DNA複製開始因子がいつ、どのように核内コンパートメント制御に関与するかを明

らかにし、さらにはその生物学的意義に迫りたいと考えている。

●誌上発表 Publications

(総説)

1. Yamaguchi K, Chen X, Oji A, Hiratani I, Defossez PA: "Large-Scale Chromatin Rearrangements in Cancer", *Cancers*, 14(10)(2022)

●口頭発表 Oral Presentations

(学会)

1. 大字亜沙美: "全ゲノムCRISPRスクリーニングで明らかになったDNA複製因子の核内コンパートメント制御における役割", 第15回日本エピジェネティクス研究会年会, 博多, 6月(2022年)
2. 大字亜沙美: "全ゲノムCRISPRスクリーニングで明らかになったDNA複製因子の核内構造制御における役割", 染色体安定維持研究会, 三島, 7月(2022)

●ポスター発表 Poster Presentations

1. 大字亜沙美, 遊佐宏介, 平谷伊智朗: "全ゲノムCRISPRスクリーニングで明らかになったDNA複製因子の核内コンパートメント制御における役割", 第15回日本エピジェネティクス研究会年会, 博多, 6月(2022年)

XIX-007 高速超解像顕微鏡法の開発とそれを用いた生細胞内での1分子から細胞規模に跨る確率過程の直接観察

Development of the high-speed super-resolution optical microscope system and mathematical analysis of the membrane traffic dynamics of a budding yeast based on high precision measurements using that system

研究者氏名：宮代 大輔 Daisuke MIYASHIRO
受入研究室：光量子工学研究センター
生細胞超解像イメージング研究チーム
(所属長 中野 明彦)

本研究の目的は、分子動態の定量的な可視化と理論化により、膜交通を制御する分子メカニズムの全容を明らかにすることである。具体的には、①独自の4次元像復元計算論により高速性と超解像を両立させた光学顕微鏡法を開発し、②それにより得られた画像データに基づいて、膜交通を駆動する機能タンパク質群の動態の数理モデルを構築する。

本研究で開発した独自の顕微鏡システムは、時間分解能と空間的分解能を両立し、さらに定量性を保証している点が特徴である。特に時間分解能は空間分解能とトレードオフの関係にあるが、これを克服するために、測定精度そのものを向上させることで、その結果増加した情報量を基に時空間分解能を向上させることを可能にした。具体的には、ニポウ式の高速共焦点顕微鏡に、検出系として冷却I.I. (イメージインテンシファイア) と高速CMOSカメラを組み合わせることで、個々の光子由来のシグナルを分離して検出し、これを基に光子計数を行う。これによりノイズがなく極めて高いS/N比かつ1光子精度の共焦点顕微鏡画像が得られる。ここからさらに空間分解能を向上させるため像復元計算を行う。これは従来の逆計算法のような対物レンズの透過帯域内の復元とは異なり、透過帯域外を外挿により復元するもので、S/N比次第で空間分解

能を大きく改善できる。

本年度は9月までの半年間であるが、主に生細胞観察データの収集を行った。それに伴い装置の整備や追加の検証実験や見つかった不具合への対応なども行った。また、独自に開発した解析用ソフトウェア(光子計数と超解像画像再構築計算)について、多くのシリーズの実験データを自動的に処理するために、計算のスケジュールリング機能を追加した。実際に運用していく上で顕微鏡観察画像データの定量的な評価を日常的に行う必要があるが、「パワーメーター付き微細蛍光パターンズライド」を用いた評価方法を提案した。

●誌上发表 Publications

(総説)

1. Takuro Tojima, Daisuke Miyashiro, Yasuhito Kosugi, and Akihiko Nakano. Super-resolution live imaging of cargo traffic through the Golgi apparatus in mammalian cells. *Methods Mol. Biol.* in press. (2022)
2. Daisuke Miyashiro. Development of highspeed and super-resolution microscopy. *PLANT MORPHOLOGY*. In press. (2022)

XIX-008 ゼブラフィッシュの予測コーディングによる意思決定機構の解明

Functional Analysis of Predictive Coding Circuits for Decision-Making in Zebrafish

研究者氏名：谷本 悠生 Yuki TANIMOTO
受入研究室：脳神経科学研究センター
意思決定回路動態研究チーム
(所属長 岡本 仁)

本研究では、ゼブラフィッシュが未来の状況を予測し、それをもとに正しい行動を選択する際に働く神経回路を解明することを目的とする。ゼブラフィッシュは、仮想空間において青色領域に留まると電気ショックによる罰を受け、赤色領域に留まると罰を免れるという経験を繰り返

すと、やがてそのルールを学習して青色領域に置かれると事前に赤色領域へと回避するようになる。これまでの成果から、終脳深部に位置する線条体の活動をカルシウムイメージングで鮮明に計測するため、ゼブラフィッシュ用 Cranial windowの手法を開発し、深部の高解像度での

蛍光画像取得を可能にした。この手法を用いて、線条体の直接路および間接路ニューロンにおいて、学習依存的に活動が変化する神経アンサンブルを同定した。この結果は、ゼブラフィッシュの脳基底核が予測に基づく意思決定において重要な役割を果たすことを支持している。

本年度のコロナによる契約延長期間中は、昨年度に得られた計測結果の解析および成果の取りまとめを行った。さらに、将来的に当研究室で同定した神経アンサンブルを特異的に光遺伝学に制御できる Spatial light modulator を用いた波面制御技術について講習を受けるために、Cold Spring Harbor Laboratory で行われた “Imaging Structure & Function in the Nervous System” に参加し、必要な技術の習得と情報収集を行った。将来的な研究の方向性として、今回同定した神経アンサンブルを特異的に光遺伝学的に操作する実験は極めて重要であると考え。今後はこの実験の実現のために、引き続き岡本研究室で上述の波面制御技術のために必要な

顕微鏡装置の立ち上げや、神経アンサンブル特異的な光遺伝学的操作実験への適用を行う予定である。

●口頭発表 Oral Presentations

(学会)

1. Tanimoto Y., Torigoe M., Islam T., Aoki R., Shiraki T., Kakinuma H., Okamoto H. : “How does zebrafish predict the future and use the prediction for decision-making?”, The 28th Japanese Medaka and Zebrafish Meeting, Osaka, September (2022)

●ポスター発表 Poster Presentations

(学会)

1. Tanimoto Y., Torigoe M., Islam T., Aoki R., Shiraki T., Kakinuma H., Okamoto H. : “Functional segregation and integration by two anatomically different output pathways from the basal ganglia to the cortex for goal-directed behavior of adult zebrafish”, Neuro2022, Okinawa, June (2022)

XIX-009 Global and Quantitative Analysis of Neuronal RNA Granules

Name: Marek Konrad KRZYZANOWSKI

Host Laboratory: Laboratory for Protein Conformation Diseases
RIKEN Center for Brain Science

Laboratory Head: Motomasa TANAKA

Translation of mRNA into proteins is the final step in the expression of protein-coding genes and it is increasingly clear that dynamic regulation of mRNA translation is crucial for normal brain function. In neuronal cells, delivery of specific mRNAs to dendrites for local translation is important for spine development as well as modulation of synaptic strength and consequently underlies higher brain functions such as learning, memory and emotions. Delivery of mRNAs to the dendrites occurs in the form of RNA transport granules, which contain ribosomes, translation factors and RNA-binding proteins. However, despite the potential significance of RNA granules for higher brain functions the mechanisms governing assembly and regulating neuronal RNA granules are unclear. Moreover, there is currently no single published method to isolate them from a variety of sources, such as brain or cultured primary cells, to follow their dynamics or disease-mediated changes in a global and quantitative way.

In earlier stages of this project I performed screening for protein enriched in RNA granules, which

unexpectedly included several proteins involved in translation initiation. In the final part of this project I focused on investigating deregulated translation initiation in neuro-psychiatric disease model mice. To this end I developed methodology to purify pre-initiation complexes from mouse brain. One variant of the method involved separation of 40S small ribosomal subunit on two subsequent sucrose gradients, showing good exclusion of the 60S ribosomal subunit and presence of translation initiation factors. In the second variant I performed immunoprecipitation of eIF3 component. Western blotting showed enrichment of various initiation factors and 40S ribosomal proteins, again excluding the 60S ribosomal subunit. This suggested that purification of the pre-initiation complexes was successful. Next, the obtained complexes were subjected to relative quantification mass-spectrometry analysis, which confirmed enrichment of 40S ribosomal proteins and translation initiation factors. Among the results I found several proteins to be deregulated in the mutant mice, which are promising candidates for a follow-up study.

XIX-010 Modulation of the Strength of Emotional Memories by High States of Anxiety

Name: Nur Zeynep GUNGOR

Host Laboratory: Laboratory for the Neural Circuitry of Learning and Memory

RIKEN Center for Brain Science

Laboratory Head : Patrick JOHANSEN

Relief is a state that arises when an aversive experience ends. We observed that one function of relief is to produce learning about the environmental stimuli which are associated with safety to facilitate future harm-reducing behaviors. We also observed that relief can buffer the impact of negative experiences and provide a state for emotional recuperation. As such, we propose that relief is a critical built-in mechanism to increase the chances of survival and help animals cope with a dangerous environment. Central amygdala is a brain area involved in fear learning and expression, and contains a moderate number of enkephalin (ENK) expressing cells. Our preliminary data show that the enkephalin cells in central amygdala (CeA-ENK) play a critical role in mediating functions of relief described above.

We hypothesized that CeA-ENK cells could be important in learning about the environmental stimuli which are associated with safety. Thus we developed a platform relief learning task where the animal is rescued from the hot-plate by a platform (rescuer platform). In control mice, this experience increased mice's preference to rescuer platform compared to a familiar other platform. Interestingly, we observed that when the CeA-ENK cells are inhibited, this preference is abolished. We also hypothesized that CeA-ENK mediated relief could be important in buffering the negative impact of aversive experiences and mediate both short and long-term recuperation. In the short term recuperation task, the animals were exposed to tail suspension stress and then put into their home-cage for 20 minutes before receiving anxiety tests. While the stressed animals with normal CeA-ENK functioning recuperated well from tail suspension with the home-cage recovery period, CeA-ENK inhibited animals showed increased anxiety-like behaviors. Similarly, in the long term recuperation

experiments, we observed if CeA-ENK was inhibited during a highly aversive hot plate exposure test, 10 days later animals exhibited high associative fear memory. Furthermore, their memories were more resistant to extinguishing when these memories no longer signaled threat, compared to control animals.

By selectively expressing calcium indicators in the pENK-cre-knock-in mice line and using a miniature microscope mounted to animal's head, the activity of CeA-ENK cells was imaged *in vivo*. When the animal received electrical foot-shocks, a strong sustained activity outlasting the foot-shock exposure was observed. We also found that separate subpopulations of CeA-ENK cells were active during aversive hot-plate exposure and afterwards, when animals are recuperating from the hot-plate. Similarly, we observed separate active subpopulations during aversive tail-suspension and home-cage recuperation. Event-triggered single cell analysis showed that some CeA-ENK cells get activated during recuperative behaviors such as grooming. Also, some cells are activated by consumption of rewarding food such as chocolate. We will conduct further work to reveal the network dynamics and their relationship to behavior during stress and home-cage periods.

Overall, our results suggest that CeA-ENK mediated relief signaling is important in learning about the stimuli associated with the ending of aversive experiences and recuperation from negative experiences.

● Oral Presentations

Conferences

1. Recuperation as an active state. Cajal Quantitative Behavioral Analysis Workshop. Champalimaud Center for the Unknown, Lisbon, Portugal. May 2022.

XIX-011 卵子エピゲノムと胎盤を介した生活習慣病の母子間遺伝機構の解明

Understanding the mechanism of intergenerational inheritance of metabolic disorders via the oocyte epigenome and placenta

研究者氏名：小塚 智沙代 Chisayo KOZUKA

受入研究室：生命医科学研究センター

疾患エピゲノム遺伝研究チーム

(所属長 井上 梓)

肥満による二型糖尿病に罹患した母親から生まれた子供において生活習慣病の発症率が高いことが明らかになっているが、その成因における遺伝素因の寄与は僅か30%未満とされている。実験動物を用いた研究から、糖尿病メスの卵子においてエピジェネティックな変化が生じ、それが次世代のエネルギー代謝を変化させる可能性が示唆されているが、そのメカニズムはまったくわかっていない。我々は卵子のヒストンメチル化修飾H3K27me3が欠損すると、着床後発生において胎盤が過形成することを見出しており、卵子のエピゲノムと胎盤形成にはこれまで見過ごされていた深い関係性があることが示唆される。この胎盤肥大と胎盤機能の低下は肥満女性の妊娠時においても高頻度で認められる。そこで本研究では、卵子のエピゲノム異常による胎盤機能の低下が、ゲノム非依存的な生活習慣病の母子間遺伝を担うのではないかと考え、この仮説を胎盤肥大モデルと母体肥満モデルを用いて検証している。

これまでの研究から、卵子のH3K27me3欠損により胎盤において発現状態が変わる8個の遺伝子のうち、2つの遺伝子の発現レベルを正常化することで胎盤サイズが正常化することが明らかとなり、原著論文として報告した。現在、これら2つの遺伝子が出生後の表現型にどのように影響しているのかをそれぞれ検証している。また、卵子のH3K27me3を変化させる母親の環境因子を明らかにするため、未熟な卵子をin vitroで成長させる培養系を用いて環境物質のスクリーニングを

行っている。これらの解析を通して、ゲノム非依存的な母子間の疾患遺伝機構の一端を解明し、介入方法確立の基盤となる知見が得られることを目指す。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

- 1.Kozuka C (senior author), Sales V, Osataphan S, Yuchi Y, Chimene-Weiss J, Mulla C, Isganaitis E, Desmond J, Sanechika S, Kusuyama J, Goodyear L, Shi X, Gerszten RE, Patti ME.: "Bromodomain inhibition reveals FGF15/19 as a target of epigenetic regulation and metabolic control", *Diabetes*, 71 1023-1033(2022)*
2. Matoba S, Kozuka C (senior author, equal contribution), Miura K, Inoue K, Kumon M, Hayashi R, Ohhata T, Ogura A, Inoue A.: "Noncanonical imprinting sustains embryonic development and restrains placental overgrowth", *Genes Dev*, 36 483-494 (2022)*

(総説)

- 3.小塚智沙代、井上梓：“疾患素因の形成に関わる「胎盤」の機能とエピゲノム制御機構”、臨床免疫・アレルギー科、79 114-120 (2023)

●口頭発表 Oral Presentations

- 1.Kozuka C: Bromodomain inhibition reveals FGF15/19 as a target of epigenetic regulation and metabolic control, IMS-McGill Symposium, Canada・Online, 9月(2022)
- 2.小塚智沙代：親のライフスタイルと肥満症の遺伝メカニズム、第43回 日本肥満学会/第40回 日本肥満症治療学会学術集会、那覇、12月(2022)

XIX-012 DYNAMICS OF ENGRAM FORMATION IN HIPPOCAMPAL MICROCIRCUITS USING EXPERIMENTAL AND COMPUTATIONAL APPROACHES

Name: Vladislav SEKULIC

Host Laboratory: Laboratory for Circuit and Behavioral Physiology
RIKEN Center for Brain Science

Laboratory Head : Thomas John MCHUGH

Project 1 – Dissecting the contribution of inhibitory interneurons to memory engram formation

A prominent experimental research question in neuroscience is to study how ensembles of active neurons in the hippocampus that are causally linked to memory expression and recall – so called “engram” cells – are formed during active mnemonic processing during behaviour. This involves studying the link between cellular activities during engram formation and behavioural states, as well as linking how those activities emerge from microcircuit dynamics. One of the most important contributors to microcircuit dynamics in the brain are inhibitory interneurons. Although they comprise only 10% of the total number of neurons, they are incredibly varied in terms of axonal targets, neurochemical markers, and physiological properties including firing patterns during endogenous network rhythms. As such, they play a fundamental role in determining the output activity of the principal excitatory cell population that performs information coding in the brain. Interneurons dictate when, and which populations, of excitatory cells can integrate input streams and produce outputs and hence can dictate the flow of information downstream from the circuit.

One prominent type of interneuron in the hippocampal CA1 area is the oriens-lacunosum/moleculare (O-LM) cell that receives primarily local excitatory input from principal pyramidal neurons and, in turn, projects to the distal dendrites of the principal cell population, thus forming a classic feedback inhibitory loop. However, a recently discovered dis-inhibitory pathway involving O-LM cells shows that they also inhibit another inhibitory cell type, the Schaffer collateral-associated (SCA) interneuron. Thus, O-LM cells seem to be able to simultaneously inhibit the distal principal cell dendrites where sensory inputs arrive, as well as disinhibiting the more proximal dendrites where contextual information arrives. Since these two input streams are required to be simultaneously active in order to induce burst firing and novel plasticity in CA1 pyramidal cells, the question of how these two circuit pathways for O-LM cells interact and affect memory formation in a behaving animal *in vivo*.

To answer this question, I expressed a fluorescent calcium indicator, GCaMP6f, in the hippocampal CA1 region of SST-Cre mice, which allows for targeting of genetically defined populations of dendrite-targeting interneurons containing primarily O-LM cells. I also transfected SST cells in CA1 with chemogenetic receptors (DREADDs) that allow on-demand activation or suppression of O-LM cells when injecting the clozapine-N-oxide (CNO) agonist intraperitoneally in mice prior to behavioural activity for novel memory formation. I also implanted gradient-index (GRIN) lenses above the CA1 region and used miniature endoscope cameras (UCLA Miniscope) to record the output activity of pyramidal cells in real time, *in vivo*, during memory encoding and retrieval after DREADD activation or suppression of SST-Cre (O-LM) cells. I found that, surprisingly, upon activation of O-LM cells, pyramidal cell activity was *increased*; conversely, with inhibition of O-LM cells, pyramidal cell activity was drastically reduced. Incidentally, studies have shown that O-LM cell death upon early Alzheimer’s disease is correlated with reduced memory expression. These results were also seen in another group of mice that had a virally delivered *c-fos* activity marker (immediate early marker of plasticity) expressed in CA1 pyramidal cells, with elevated *c-fos* expression in mice with activation of O-LM cells, and almost completely abolished *c-fos* expression in mice with O-LM cell inhibition. The directionality of behaviour followed the anatomy and physiology results, with mice exhibiting increased freezing upon O-LM cell activation, and decreased freezing (an indicator of impaired memory) upon O-LM cell inhibition.

Thus, it seems that *in vivo*, the disinhibitory pathway of O-LM→SCA→Pyramidal cells is more dominant in skewing the balance of input to contextual coding from CA3 onto proximal CA1 pyramidal cell dendrites. However, further work is required to causally test the disinhibitory pathway of O-LM to SCA interneurons. For the remainder of FY2022, I am injecting mice with a plasticity-dependent synaptic tracing technique called dual-eGRASP that will allow for testing of whether the ensuing changes in synaptic contacts onto CA1 pyramidal cells after O-LM cell manipulation, e.g., activation, results in increased synaptic boutons

along the proximal dendrites. This, and future work along these lines, may help us more deeply understand how engrams are formed in the hippocampus. Since O-LM cells are preferentially impaired during onset of Alzheimer’s disease, determining precisely how hippocampal circuits are affected by these changes can help us develop novel treatments for alleviating the symptoms or slowing the progression of the disease.

Project 2 – Elucidating mechanisms of rapid memory formation in the brain using computational modeling

The ability of the brain to learn rapid representations of the environment and enact motor output to ensure an organism’s survival is an ongoing research topic in experimental as well as computational neuroscience. The dominant model used in artificial neural network approaches consists of simplified, point process representations of neurons that lack spatial structure and that often use a rate code to encode information. These models have nevertheless shown a remarkable capability to learn complex relationships between inputs and to generalize their learned representations to successfully categorize unseen exemplars. However, a wealth of experimental data from neuroscientific studies from the past few decades have demonstrated novel principles of plasticity and learning that have not been fully explored in the context of large-scale artificial neural networks. In particular, neurons are now known to be composed of spatially-extended dendritic processes containing a range of voltage- and calcium-gated ion channels endowing them with a rich repertoire of computational functions. In typical neocortical or hippocampal pyramidal neurons, dendritic integration of synaptic inputs is organized into two electrotonically segregated zones that, together with the expression of voltage-sensitive calcium currents in the distal dendritic regions, endow pyramidal neurons with backpropagation-activated calcium spike (“BAC”) firing, leading to a burst of multiple action potentials in the somatic output region. Burst firing has been shown to be a critical component of cellular long-term plasticity *in vitro* (LTP). Additionally, recent *in vivo* investigations in mice have demonstrated induction of place fields in particular locations on a track after intracellular current injection in hippocampal neurons, leading to induced dendritic plateau potentials and burst firing. Remarkably, the timing of the induced plateau rapidly binds the activity of a neuron to the specific configuration of sensory information representing the location of the animal at the time the burst firing was induced. Indeed,

the conjunction of two different input streams in the proximal and distal dendritic integration zones, coupled with dendritic calcium-evoked burst firing, has been suggested as a general mechanism for association and learning in cortical and hippocampal networks.

During FY2022 I have worked on a computational modelling project where I have applied these principles of BAC firing and plasticity in a computational neural network model to investigate their effects on network learning and generalization as traditionally performed in artificial neural networks. I adapted a two-compartment leaky integrate-and-fire model of cortical pyramidal cells with a somatic spike generating mechanism and dendritic calcium current capable of exhibiting BAC firing. I tuned the model to find a range of noisy somatic and dendritic Poisson rate synaptic inputs able to shift the model between somatic-only single spike and dendritic calcium-dependent burst firing regimes. A network of BAC firing neurons was then constructed in the Brian simulation framework and applied to a paradigmatic digit recognition task using the MNIST database of handwritten digits, a common benchmark in artificial neural networks. The image intensities of the digits were first transduced into a “burst code” using an input layer of BAC firing neurons modified to be more electrotonically compact, and these inputs were then fed into an association layer of BAC firing neurons endowed with a spike timing-dependent plasticity (STDP) learning rule. The requirement of conjunctive input processing used as the baseline BAC firing model in the learning layer introduced novel challenges in network configuration and input representation. For instance, using standard spike timing-dependent plasticity (STDP), burst firing in the information coding network was skewed towards long-term depression (LTD) due to small spike leads in the post-synaptic burst, compared to the presynaptic burst, leading to the negative portion of the STDP curve dominating even though the bursts were largely co-incident. I thus used a modified STDP rule (“skewed STDP”) by scaling up the time constant of the post-synaptic ordinary differential equation (ODE) while keeping the pre-synaptic ODE the same. As a result, the penalty of post-synaptic spike times preceding pre-synaptic spike times in a burst was reduced, while preserving appropriate LTD in salient cases. This allowed the network to encode input digits in increasingly non-overlapping populations of output neurons, a key requirement for learning input patterns, thus performing a traditional artificial neural network task more efficiently using biologically-realistic bursting neurons.

● Oral Presentations

1. RIKEN CBS YIS talk, May 13, 2022, "Impact of bidirectional manipulation of local dendrite-targeting interneurons on hippocampal memory formation"

● Poster Presentations

Conferences

1. Sekulic V, Dong S, McHugh TJ (2022) Plasticity and learning in a computational network model of dendritic calcium-evoked bursting neurons. Dendrites 2022, EMBO Workshop, Heraklion, Greece, May 23-26, 2022.

XIX-013 レプチンシグナルによる性成熟開始の神経回路基盤 Neural Circuit Basis of Puberty Onset by Leptin Signal

研究者氏名：後藤 哲平 Teppei GOTO
受入研究室：生命機能科学研究センター
比較コネクトミクス研究チーム
(所属長 宮道 和成)

ヒトを含む哺乳動物は、良好な栄養状態においてのみ性成熟を迎え生殖機能を獲得・維持することができる。生殖機能を維持するには、生殖中枢を構成するキスペプチンニューロンがパルス状に活動することが必要不可欠である。一方、身体の良い栄養状態下で性成熟を促進する責任ニューロンの実体や、生殖中枢を活性化する神経回路が明らかになっていない。本研究ではこれらにアプローチすることによって性成熟のメカニズムを神経回路レベルで解明することを目的とする。

本年度は、制限給餌を用いた性成熟不全および誘導モデルマウスにおける生殖中枢の変容を介入操作を行うことで、回路的な説明を試みた。

(1) 給餌情報や空腹を伝達する候補ニューロンを薬理遺伝学ツールで操作しつつ、生殖中枢キスペプチンニューロンパルス状活動を記録した。制限給餌下で薬理遺伝学ツールを用いて候補ニューロンを抑制すると2時間あたりのキスペプチンニューロンのパルス状活動数が亢進する傾向が見られた。制限給餌下で薬理遺伝学ツールを用いて候補ニューロンを抑制し続けると、卵胞発育が亢進す

る傾向が見られた。

(2) これまでの研究で生殖中枢キスペプチンニューロンパルス状活動は制限給餌下では自由摂食に比べて有意に抑制されていることがわかっていた。そこで、給餌情報や空腹を伝達する候補ニューロンを選択的に細胞脱落させた状態で、生殖中枢キスペプチンニューロンパルス状活動を記録した。その結果、制限給餌下でのパルス状活動数が亢進し、自由摂食時のパルス状活動数と統計的に有意な差がなくなった。

これらの結果から、性成熟期における制限給餌下でのキスペプチンニューロンのパルス状活動数の抑制はこの候補ニューロンからの抑制入力で部分的に説明できることがわかった。

●発表 Poster Presentations

1. Goto T., Abe T., Kiyonari H., and Miyamichi K.: "Dynamics of kisspeptin neuronal activities in the pubertal female mice under various food conditions", Neuro2022, Okinawa, July (2022)

XIX-014 室温で電子スピン操作可能なカーボンナノチューブ単一量子源の実現
Single Quantum Source Capable of Manipulating Electron Spin at
Room Temperature Based on Carbon Nanotubes

研究者氏名：小澤 大知 Daichi KOZAWA
受入研究室：光量子工学研究センター
量子オプトエレクトロニクス研究チーム
(所属長 加藤 雄一郎)

ナノテクノロジーの最終到達点の一つは、原子や分子を自在に配置することである。単層カーボンナノチューブの量子欠陥は単一光子源として光デバイスへの応用に有望であるが、化学反応によりランダムな場所に形成されるという問題があり、回路に組み込むことの障壁になっている。申請者はごく最近、Si基板の溝上に架橋したナノチューブに量子欠陥をほんの数個だけ形成できることを見出した。この手法は光化学反応を行うことから、さらに顕微分光を組み合わせることで、任意の位置や個数の量子欠陥を決定論的に形成できる可能性が高い。そこで本研究では、単一ナノチューブの発光分光により反応をモニターしながら、前駆体とナノチューブとの反応を単一分子レベルで制御することで、サブミクロン精度で任意の場所に単一量子欠陥を形成する。さらに、失活欠陥の存在しない系で量子欠陥に固有の光物性を理解することを目的とする。これにより、光導波路や共振器との結合が容易になり、量子光デバイスの集積化や新機能実証につながる。

これまでに、申請者らの独自技術である気相光化学反応により、ナノチューブを多数架橋したSi基板全体に紫外線を照射すると、各ナノチューブに数個ずつ量子欠陥を形成できることを見出している。また、これら少数の量子欠陥からでも十分な発光強度が得られること、直径が小さいほど反応性が高いことも明らかにしてきた。

さらに所望の位置と個数で量子欠陥を形成するために、気相光化学反応セルを顕微分光システムに組み込んだ。光化学反応のための紫外レーザー光をカーボンナノチューブ表面に集光し、その回折限界であるサブミクロンの位置精度で、局所的に反応を起こした。同時に励起子共鳴の

レーザーを照射して発光スペクトルの時間変化を調べた。単一分子がカーボンナノチューブと反応していることを示唆する、離散的な発光強度変化が観測されるなど、初歩的なデータが得られつつある。これらの実験からカイラリティごとの化学反応ダイナミクスを明らかにし、所望の位置への単一量子欠陥形成に必要な反応条件を見出すことを考えている。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. D. Kozawa, X. Wu, A. Ishii, J. Fortner, K. Otsuka, R. Xiang, T. Inoue, S. Maruyama, Y-H. Wang, Y. K. Kato, "Formation of organic color centers in air-suspended carbon nanotubes using vapor-phase reaction," *Nature Commun.* 13, 2814 (2022).*

●口頭発表 Oral Presentations

1. D. Kozawa, X. Wu, A. Ishii, J. Fortner, K. Otsuka, R. Xiang, T. Inoue, S. Maruyama, Y. H. Wang, Y. K. Kato, "Formation of Organic Color Centers in Air-Suspended Carbon Nanotubes Using Vapor-Phase Reaction," *JSAP-Optica Joint Symposia, the 83rd JSAP Autumn Meeting 2022, Miyagi, Japan, September (2022).*
2. D. Kozawa, X. Wu, A. Ishii, J. Fortner, K. Otsuka, R. Xiang, T. Inoue, S. Maruyama, Y. H. Wang, Y. K. Kato, "Formation of Organic Color Centers in Air-Suspended Carbon Nanotubes Using Vapor-Phase Reaction," *8th Workshop on Nanotube Optics and Nanospectroscopy (WONTON 2022), Madison, Wisconsin, USA, July (2022).*

XIX-015 Ultrasensitive SERS Microfluidic Chips Fabricated by Photonic Methods

Name: Shi BAI

Host Laboratory: Advanced Laser Processing Research Team
RIKEN Center for Advanced Photonics
Laboratory Head : Koji SUGIOKA

In FY2022, two studies were carried out: 1) formation of ultrafast laser induced periodic surface structures on zinc oxide plate; 2) laser near-field reduction of gold ions to build up plasmonic structures.

For the ultrafast laser induced periodic surface structures, the laser processing conditions were optimized to fabricate homogenous periodic surface nanostructures on zinc oxide substrate. The strip array was fabricated by a linearly polarized beam and dot arrays were fabricated by the elliptically polarized beam. For the elliptical polarization, it was revealed that the orientation of dot array was related to the rotational direction of polarization, resulting in formation of clockwise or anti-clockwise dot arrays. Formability of the dot arrays also depended on laser pulse duration. We compared the dot arrays fabricated by pulse laser beam with a pulse duration in the range of 223 to 2000 fs. The dot arrays with a period of 150 - 250 nm were fabricated at 2000 fs using a wavelength of 515 nm. We further found the laser processing induced the surface defects (oxygen vacancy) in the zinc oxide substrate. Due to the increased surface defects, the property of zinc oxide was modified. In detail, the induced surface defects were verified by XPS and Raman spectra. The FWHM of peak at orientation (002) became broader in XRD and the intensity of Raman peaks at 576 cm^{-1} increased. Moreover, the photoluminescence of zinc oxide showed a blue-shift. The increased oxygen vacancies also improved the performances of surface-enhanced Raman scattering (SERS). The SERS substrate was fabricated by deposition of gold nanoparticles on the zinc oxide nanodot array using an ion sputter. We evaluated the SERS performances for different thickness of gold nanoparticle layer to create a robust SERS platform.

In this year, we also explored the laser near-field reduction to fabricate periodic gold nanostructures. A novel gold precursor, containing chloroauric acid and trisodium citrate, was developed. The laser beam irradiation through glass microspheres enabled focusing the laser beam at the backside of microsphere to form hollow gold nanostructures due to the laser reduction of gold ions. We found that adding molybdenum disulfide quantum dots into the gold precursor, the reduction rate of gold ions was highly improved because of photochemical effect.

● Publications

1. Bai S., Obata K. and Sugioka K.: Femtosecond Laser Near-Field Reduction for Fabrication of 3D Gold Nanocluster Array Assisted by MoS₂ Quantum Dots. *Frontiers in Physics* 2022, 503*
2. Bai S., Hu A., Hu Y., Ma Y., Obata K. and Sugioka K.: Plasmonic Superstructure Arrays Fabricated by Laser Near-Field Reduction for Wide-Range SERS Analysis of Fluorescent Materials. *Nanomaterials* 2022, 12, 970*
3. Bai S., Ren X., Obata K., Ito Y., Sugioka K.: Label-free trace detection of bio-molecules by liquid-interface assisted surface-enhanced Raman scattering using a microfluidic chip. *Opto-Electronic Advances* 2022, 210121*

● Oral Presentations

Conferences

1. Bai S., Obata K. and Sugioka K.: Hybrid Femtosecond Laser Processing for Fabrication of Glass Microfluidic SERS Chips for Ultrahighly Sensitive Sensing. 16th International Conference on Laser Ablation. Matsue Japan 2022, April 24-29.
2. Bai S., Obata K. and Sugioka K.: 1D and 2D LIPSS Formation on ZnO Substrates by Polarization Control of Ultrafast Laser and Applications to SERS for Trace Detection. The 23rd International Symposium on Laser Precision Microfabrication. Dresden Germany 2022, June 7-10.
3. Bai S., Obata K. and Sugioka K.: Comprehensive Research on LIPSS Formation on ZnO Substrates by Ultrafast Laser Irradiation. Conference on Lasers and Electro-Optics PacificRim. Sapporo Japan 2022, July 31 - August 6.
4. Bai S., Obata K. and Sugioka K.: Laser Near-Field Reduction of Metallic Ions for the Fabrication of Plasmonic Superstructure Array. JSAP Autumn Meeting. Sendai Japan 2022, September 20-23.

● Poster Presentations

1. Kawabata S., Obata K., Bai S., Miyaji G. and Sugioka K.: Novel Surface Nanostructuring of Crystalline Silicon by GHz Burst Mode Femtosecond Laser Pulses. 16th International Conference on Laser Ablation. Matsue Japan 2022, April 24-29.
2. Kawabata S., Obata K., Bai S., Miyaji G. and Sugioka K.: 2D LIPSS Formed on Crystalline Silicon by

XIX-016 **Microfluidic Assisted Synthesis of RNAi-based Cancer Nanomedicine**

Name: Hei Man LEUNG

Host Laboratory: Nano Medical Engineering Laboratory
RIKEN Cluster for Pioneering Research
Laboratory Head : Yoshihiro ITO

The objective of this research is to develop microfluidic system for synthesis of RNAi-based drug delivery systems for cancer therapy. Current research focused on separate exosome using microfluidic device and utilize the captured exosomes as drug carriers. Recent studies show exosomes exhibit great potential as drug delivery carriers due to their high biocompatibility, low toxicity and long circulating lifetime within the body. Microfluidic devices, with a peptide-modified ZnO nanowire surface and patterned with pillars inside the microchannels, are

used to capture exosomes. The purpose of peptides is to target the surface protein of exosomes. It has been found that the presence of micropillars increases the concentration of exosomes captured. It is suggested that the presence of improves the capture efficiency by enhanced mixing within the microchannels. Future study will be on loading the captured exosomes with small RNA molecule and evaluate its potential as a drug carrier.

基礎科学特別研究員
2020 年度採用者

XX-001 ランダム行列の有限サイズスケーリング則の解明及び巨大相関グラフのエッジ検定への応用

Analysis of Finite Size Scaling Property of Random Matrix and its Application to High Dimensional Dependence Graph Edge Filtering Certification

研究者氏名：許 インイン Yingying XU
受入研究室：数理創造プログラム
(所属長 初田 哲男)

ランダム行列の有限サイズスケーリング則とは、行列のアスペクト比とバイアス分布を保存すれば、行列の次元を変えても、そこから抽出する情報が不変な性質がある現象である。この現象は我々の先行研究、統計物理のポッツモデルによる小標本高次元ゲノムシーケンスデータから巨大な相関グラフを学習するプロジェクト (Xu et al. PRE2018) で数値的に発見した。これは行列要素の分布に制限なく、一般的に成り立つ現象であることを検証した。この有用な性質は今まで知られてなく、従来のランダム行列理論での行列要素の分布に対する理想的な仮定が不要で、実データに応用しやすい重要な性質だと言える。特に高次元の問題に威力が発揮できる。

本研究では、この現象について解析的に理解することを目指す。さらに、先行研究に引き続き、その結果を帰無仮説分布の予測に使い、高次元データから巨大相関グラ

フ推定した後、巨大相関グラフのエッジをスクリーニングする閾値をより高速かつ精密に推定することを目指している。実問題で重いシミュレーションを必要とする問題をその理論予測の整備によって、シミュレーションなしで、または軽い計算量で達成できるようになる見込みがある。理論研究に関しても、実問題の応用に関しても、それらを結びつけて、両方に貢献できる研究である。

今年度は他の学習方法と比べ、さらに実問題への応用に進展があった。具体的に、UltraneSTというNest sampling アルゴリズムによってモデルのパラメータの事後確率分布を計算し、天文分野の問題 Gamma Ray Burst (GRB) afterglow analysis に応用した。本研究は機械学習分野の最先端の技術と GRB 分野のデータ解析問題の分野間の交流推進に貢献する。

XX-002 ゲージ理論における Floer 理論の一般化と精密化

A Generalization and Refinement of Floer Theory in Gauge Theory

研究者氏名：谷口 正樹 Masaki TANIGUCHI
受入研究室：数理創造プログラム
(所属長 初田 哲男)

4次元多様体に対するゲージ理論とその応用に関する研究を行っている。今年度は、次の項目について研究を行った：

・ 特異インスタントン理論の整備とその結び目理論への応用 (<https://arxiv.org/abs/2209.05400>)

この研究は、Aliakbar Daemi, Christopher Scaduto, 佐藤光樹、井森隼人らとの共同研究である。ASD インスタントン方程式を用いた境界付き4次元多様体の研究はインスタントン Floer 理論として確立しており、多くの研究がある。この研究は、Kronheimer-Mrowka によって導入された、特異集合を許すような ASD インスタントン方程式の解を扱うことで得られる Floer 理論の整備である。特に結び目に対して幾つかの強力な不変量を導き、その応用として結び目の4次元的研究のある予想な部分解を与えた。

・ 族の Seiberg-Witten 理論を用いた3次元多様体から4

次元多様体への埋め込みの研究 (<https://arxiv.org/abs/2210.05029>)

この研究は今野北斗、Anubhav Mukherjee との共同研究である。与えられた3次元多様体に対してその3次元多様体がどのような4次元多様体に埋め込まれるか、という問いは微分トポロジーにおける基本的な問いである。一方埋め込みが存在する場合に、どのような埋め込みが存在するか、という問いは基本的な問いではあったが組織的な研究はなかった。我々は族の Seiberg-Witten 理論を使うことで3次元多様体の埋め込みを見分ける方法を開発し多くの具体例を与えた。

・ コンタクト構造に付随する Bauer-Furuta 不変量とそこから導かれる曲面の種数評価

(<https://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S0129167X22500896>)

この研究は今野北斗、飯田暢生との共同研究である。4次元多様体の中に埋め込まれた曲面の種数の評価は4次元トポロジーにおける伝統的な問題意識であり、Seiberg-Witten理論もしくはHeegaard Floer理論を用いて adjunction inequality と呼ばれる種数の強力な評価が知られていた。一方でこの不等式には4次元多様体に制約があった。この研究ではSeiberg-Witten理論のコンタクト構造に付随する精密化を用いることにより、その制約を一部弱めることに成功した。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. The groups of diffeomorphisms and homeomorphisms of 4-manifolds with boundary, Hokuto Konno and Masaki Taniguchi, *Advances in Mathematics*, 409 (2022)
2. A note on generalized Thurston-Bennequin inequalities, Nobuo Iida, Hokuto Konno, and Masaki

Taniguchi, *International journal of mathematics*, (2022)

3. Filtered instanton Floer homology and the homology cobordism group, Yuta Nozaki, Kouki Sato and Masaki Taniguchi, to appear *J.Eur. Math. Soc*

●口頭発表 Oral Presentations

1. Relative Genus Bounds from Floer K-Theory, MSRI/SLMath, Gauge Theory (Semi)-Virtual Seminar, 11月22日
2. Instantons, special cycles, and knot concordance II, part 3, ハンドルセミナー, 11月8日
3. Instantons, special cycles, and knot concordance II, part 2, ハンドルセミナー, 11月1日
4. Instantons, special cycles, and knot concordance II, part 1, ハンドルセミナー, 10月31日
5. Concordance Invariants from Equivariant Singular Instanton Theory, MSRI/SLMath, FHT Program Seminar, 9月21日
6. Singular instanton knot homology and Rasmussen type invariant, ゲージ理論セミナー, 8月31日, URL

XX-003 Origin of Multiplicity in Low-Mass Star Formation

Name: Nadia Mariel MURILLO MEJIAS

Host Laboratory: Star and Planet Formation Laboratory
RIKEN Cluster for Pioneering Research
Laboratory Head: Nami SAKAI

During FY2022, I worked on two main research projects related to the physical structure of protostellar systems and the factors that dictate multiplicity in star formation.

The physical structure of protostellar systems is studied through observations of different molecular tracers. The distribution of different molecular tracers depends on temperature, density, and chemical reactions. One of the key factors in understanding the dynamics of star and planet formation is the location where a molecular species undergoes the ice-gas phase change. This location is termed snowline. A grid of two-dimensional (cylindrically symmetric) physico-chemical models were used to study the effect of physical structure (presence of protoplanetary disk, outflow, envelope density) on the snowline position of different molecular species. The models demonstrated that source luminosity, presence of disk and envelope density are the key factors in determining snowline location. The results of these models were published in a major astrophysical journal (Murillo et al., 2022, *Astronomy & Astrophysics*, 665, 68), presented in a poster with proceeding at an international conference in Chile (Physics and Chemistry of Star Formation: The Dynamical ISM Across Time and Spatial Scales),

and presented in several university seminar talks. The grid of models was made publically available, and has set the base for future collaborations with other research groups.

Multiplicity is ubiquitous in stellar systems, but the factors that determine multiplicity are not well defined. My project focuses on studying the factors that determine protostellar multiplicity in the low-mass regime in the Perseus Molecular Cloud. This project is based on observational data, using both single dish (Nobeyama 45m Radio Observatory, APEX) and interferometric (ALMA/ACA, SMA) data at frequencies between 80 to 370 GHz. The data enables the measurement and derivation of physical parameters from molecular cloud to protostellar disk scales. The amount of data, analysis and results merits a set of papers to describe the individual scales. The first of these papers is currently in the final preparation stages and is expected to be submitted before the end of the current fiscal year. This paper describes the gas temperature, spatial distribution and density in relation to protostellar multiplicity at molecular cloud scales. The results find a correlation between amount of mass and multiplicity, but a lack of correlation between temperature and density.

Additional papers that explore the same parameters at different scales are under preparation. Analysis of all the collected data was also started during this fiscal year. The results of this project have been presented in talks at two international conferences (Science with LLAMA, Argentina; Physics and Chemistry of Star Formation: The Dynamical ISM Across Time and Spatial Scales, Chile). A brief overview of the full project is given in a proceeding from the conference in Chile, and presented at one university seminar. The broad span of the data provides a good basis for collaboration, which is the basis for a research collaboration trip to Taiwan (Dec 2022 - Jan 2023). Additional observations with Nobeyama 45m Radio Observatory to observe other regions with the same technique as in Perseus are underway. The additional observations aim to determine whether the factors that influence multiplicity in Perseus are also found in other star forming regions.

During the past year, I have become involved in laboratory experiments. One experiment involves infrared spectroscopy, which is carried out at SPring-8. Another experiment aims to study silicate grain size and coagulation with a commercially available dust sensor. Both experiments are relevant to astrophysics since characterization of dust properties are crucial to understanding dust continuum observations and physico-chemical modeling. Participating in experiments has allowed me to develop professionally, gaining skills and experience in a very relevant and crucial branch of astrophysics. Thus, I am capable of carrying out research in observational, numerical and experimental astrophysics.

● Publications

1. Murillo, N. M., Hsieh, T.-H., Walsh, C., "Modeling snowline locations in protostars: Structures within

protostellar cloud cores", 2022, *Astronomy & Astrophysics*, 665, 58

● Oral Presentations

1. N. M. Murillo, "Studying the formation and evolution of multiple protostellar systems", National Tsing Hua University Institute of Astronomy colloquium. Virtual.
2. N. M. Murillo, "Formation and environment of multiple protostellar systems in Perseus", University of Costa Rica, Costa Rica.
3. N. M. Murillo, "Formation and environment of multiple protostellar systems in Perseus" Science with LLAMA, Argentina
4. N. M. Murillo, "Formation and environment of multiple protostellar systems in Perseus" Physics and Chemistry of Star Formation: The Dynamical ISM Across Time and Spatial Scales, Chile
5. N. M. Murillo, "Modeling snowline locations in protostars", Pontificia Universidad Catolica de Chile Department of Astronomy colloquium, Chile
6. N. M. Murillo, "Modeling snowline locations in protostars", Universidad de Chile Department of Astronomy colloquium, Chile
7. N. M. Murillo, "Modeling snowline locations in protostars", Universidad de Valparaiso Institute for Astronomy, Chile
8. N. M. Murillo, "Star Formation: physics and chemistry", outreach lecture given at three high schools: Liceo de Poas, Colegio Superior de Senioritas, Colegio Yurusti, Costa Rica.

● Poster Presentations

1. N. M. Murillo, T.-H. Hsieh, C. Walsh, "Modeling snowline locations in protostars", Physics and Chemistry of Star Formation: The Dynamical ISM Across Time and Spatial Scales, Chile

XX-004 現実的核力に基づく核多体系の微視的記述およびハドロン間相互作用の研究 Microscopic Description of Many-Nucleon Systems with Realistic Nuclear Force and Study of Hadron Interaction

原子における電子の殻構造と同様、原子核においても核子が形成する殻構造の描像がよく成り立つ。この殻構造の微視的起源、すなわち核子間に働く相互作用がどのように寄与して殻構造を発現しているのかは、理解が不十分である。我々は先鋭的原子核理論によって、3核子力(3つの核子

研究者氏名：福井 徳朗 Tokuro FUKUI
受入研究室：仁科加速器科学研究センター
ストレンジネス核物理研究室
(所属長 肥山 詠美子)

間に働く相互作用) が殻構造に重要な寄与を果たしていることを発見した。

また、上記に加え、以下の研究も遂行した：

- (1) 核子の空間分布をガウス波束で記述する手法と先鋭的理論が導く核力を融合する新しい核多体モデルの開発

(2) 解析的な模型を用いて、移行反応断面積によって原子核励起状態の大きさを決定する原理の解明

さらに、今年度は2件の国際会議、1件の国内会議を世話人として開催した他、理研の一般公開でも仁科加速器科学研究センターでの説明員およびダイバーシティ推進室での相談員を務めた。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Coraggio L., De Gregorio G., Fukui T., Gargano A., Ma Y. Z., Cheng Z. H., Xu F. R.: "The role of three-nucleon potentials within the shell model: past and present", Prog. Part. Nucl. Phys., Accepted*.
2. A. Ohnishi, Y. Kamiya, K. Sasaki, T. Fukui, T. Hyodo, K. Morita, K. Ogata and T. Hatsuda, "Femtoscopic study of coupled-channel baryon-baryon interactions with $S = -2$ ", Proc. of Sci., 380, 212 (2022).
3. Y. Kamiya, K. Sasaki, T. Fukui, T. Hyodo, K. Morita, K. Ogata, A. Ohnishi, and T. Hatsuda, "Femtoscopic study on the $\Lambda\Lambda$ - N interaction", Supl. Rev. Mex. Fis., 3, 0308124 (2022).

●口頭発表 Oral Presentations

1. Fukui T.: "カイラル相互作用による軽い核のクラスター構造の理解に向けて", 大阪公立大研究会「原子核におけるクラスター物理の新展開」, 大阪公立大学, 10月(2022).
2. Fukui T., Coraggio L., De Gregorio G., Gargano A., Itaco N.: "カイラル3体力のテンソル構造と軽い核のスピン軌道分離", JPS 2022 Autumn Meeting, Okayama University of Science, Okayama, September 7 (2022).
3. Fukui T.: "Theoretical study of three-nucleon force", GPPU Seminar, Graduate Program on Physics for the Universe, Tohoku University, Sendai, Japan, July 15 (2022).
4. Fukui T.: "Shell model study of chiral three-nucleon force", Physics of RI: Recent progress and perspectives, RIKEN, Saitama, Japan, May 31 (2022).
5. Fukui T.: "Shell model study of chiral three-nucleon force", Developments of Physics of Unstable Nuclei (YKIS2022b), YITP, Kyoto University, Kyoto, Japan, May 23 (2022).

XX-005 重元素合成天体環境解明のための中性子過剰核の系統的核分光

Systematic Nuclear Spectroscopy of Neutron-rich Nuclei to Clarify the Astrophysical Environment of Heavy Element Synthesis

研究者氏名：向井 もも Momo MUKAI
受入研究室：仁科加速器科学研究センター
核分光研究室
(所属長 上野 秀樹)

元素選択型同位体分離器 (KEK Isotope Separation System: KISS) を用いた中性子過剰核の精密核分光に向けてイオン源や検出器の開発を行った。2021年度から、不安定核イオンの引き出し効率改善のために従来のアルゴンガスセルに代わりヘリウムガスセルの開発を進めている。ガスセル内で停止した不安定核イオンをガスセル出口に向かって効率よく輸送するためのRFワイヤカーペットや、小型のプロトタイプガスセルを製作した。アルカリイオン源を用いたオフライン試験でイオン輸送条件の最適化を行った。同時に、ガスセル内の不純物濃度を低下させ、高効率なイオン引き出しに不可欠なベーキングと冷却の試験も行った。オンライン試験では不安定核を約1%の効率で引き出すことができた。冷却時の動作安定性に改善の余地があるものの、引き出し収量の大幅な増大が確認できた。

ヘリウムガスセルではあらゆる核反応生成物が捕集されるため、測定したい核種だけでなく多種の不安定核がイオンとして同時にガスセルから引き出される。よって、単一核

種の崩壊核分光を行うためには、核種を分離・選択して β - γ 検出器系へ打ち込む必要がある。ガスセル下流の既存の多重反射型飛行時間測定式質量測定器MR-TOFで飛行時間による質量分離を行い、さらに下流に β - γ 検出器系を導入することで核種を飛行時間で同定しながら崩壊核分光が行える見込みである。昨年度より、MR-TOFから出射したイオンの β - γ 検出器系での停止タイミングを測定するための検出器開発を進めている。イオンを打ち込むアルミナイズドマイラーテープから発生する二次電子を電磁場によりMCP検出器へと輸送し、停止タイミングを得る仕組みを考案した。昨年度に設計を終え、今年度はオフライン試験で実際にビームを打ち込み、検出効率測定を行った。約35%の検出効率を得られた。今後は検出効率改善と時間分解能測定に取り組む。

中性子過剰なハフニウム (Hf) やタングステン (W) は中性子数116周辺で原子核の形状遷移が予測されている。白金周辺の中性子過剰核の系統的な核構造測定の

一つとして、基底状態の形状変化について明らかにするため、^{182,184}Hf および ^{187,188,190}W のガスセル内レーザーイオン化核分光による同位体シフト測定を予定している。昨年度にレーザーイオン化経路を確立できたため、今年度はオンライン実験で、KISS でこれまでに引き出し実績がない ^{188,190}W の収量調査を行った。両同位体とも、予定通りの日数で同位体シフト測定が可能な収量で引き出せていることが確認できた。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Mukai M., Hirayama Y., Watanabe Y.X., Watanabe H., Koura H., Jeong S.C., Miyatake H., Brunet M., Ishizawa S., Kondev F.G., Lane G.J., Litvinov Yu.A., Niwase T., Oyaizu M., Podolyák Zs., Rosenbusch M., Schury P., Wada M. and Walker P.M.: "Ground-state β -decay spectroscopy of ¹⁸⁷Ta", Phys. Rev. C 105, 034331 (2022)*
2. Hirayama Y., Mukai M., Watanabe Y.X., Schury P., Nakada H., Moon J.Y., Hashimoto T., Iimura S.,

Jeong S.C., Rosenbusch M., Oyaizu M., Niwase T., Tajima M., Taniguchi A., Wada M. and Miyatake H., "In-gas-cell laser resonance ionization spectroscopy of ^{200,201}Pt", Phys. Rev. C 106, 034326 (2022)*

3. Mukai M., Hirayama Y., Watanabe Y.X., Schury P., Jeong S.C., Miyatake H., Niwase T., Oyaizu M., Rosenbusch M., Ueno H. and Wada M.: "Development of a timing detector for decay spectroscopy in conjunction with MRTOF-MS", RIKEN Accel. Prog. Rep. 55, 85 (2022)*

●口頭発表 Oral Presentations

1. 向井もも: "MRTOFと組み合わせた崩壊核分光のための飛行時間検出器の開発", 日本物理学会秋季大会, 岡山理科大学, 9月 (2022)
2. Mukai M.: "Laser ionization spectroscopy of neutron-rich Ir isotopes and recent works at KISS", Workshop on laser spectroscopy/analysis of radioactive isotope and related topics, Nagoya University, Oct. (2022)

XX-006 多波長同時観測・数値シミュレーション・現代統計で解き明かす、ブラックホール降着流の全体像

Studies in Complete Picture of Accretion onto Black Holes through Multi-Wavelength Observations, Numerical Simulations, and Modern Statistics

研究者氏名: 木邑 真理子 Mariko KIMURA

受入研究室: 開拓研究本部

榎戸極限自然現象理研白眉研究チーム
(所属長 榎戸 輝揚)

降着円盤 (以後「円盤」) を介したブラックホールへの質量降着は、宇宙で最も激しい突発現象のエネルギー源である。円盤はその温度分布によりX線から電波まで多波長域の光を放出する。また、質量降着の様子は様々な物理機構により時間と共に変化するため、円盤光度が時間変化する。したがって、円盤の光度変動の観測は質量降着の物理を理解するための良い探針である。しかし、これまでは多波長同時観測が不足していたため、質量降着の全体像はよく理解されておらず、物理的起源が不明の光度変動が数多く存在する。

今年度は、ブラックホール周囲の円盤とよく似た光度変動を示し、観測が容易である矮新星 (白色矮星と普通の星の連星系) の円盤の研究を中心に行った。矮新星は円盤で起こる熱不安定によりアウトバーストと呼ばれる突発的増光を示す。SS Cyg は100年以上に渡ってアウトバーストを繰り返してきた典型的な矮新星であったが、2021年2月からしばらく、アウトバーストと静穏期の区別がつか

なくなる異常な状態を示した。私たちは、X線と可視光の同時観測から、静穏期の粘性の増加がこの天体の異常な現象を生み出していたらと示唆していたため (Kimura et al. 2021, PASJ, 73, 1262)、数値シミュレーションによる検証を行った。その結果、粘性の増加だけではSS Cygの異常な現象を説明できず、伴星から輸送されるガスが円盤表面をオーバーフローすることが必要であると分かった。現在は、この研究に用いた数値計算コードを改良し、ブラックホール連星の円盤で起こる熱不安定を再現する準備を行っている。

また、矮新星はX線で暗く、可視光観測に対してX線観測が圧倒的に不足している。そこで、X線でも可視光でも明るかったAT2021afpiという矮新星のアウトバーストをX線望遠鏡NICERで観測した。その結果、X線スペクトル中に酸素とネオンの強い輝線があることを発見した。さらに、白色矮星の半径を見積もったところ、矮新星の白色矮星の典型的な半径の半分程度まで小さい可能性があ

ることが分かった。これは、この天体が持つ白色矮星が重く、酸素やネオンを主成分に持つレアなタイプであることを示唆する。

現在は、ブラックホール連星のアウトバースト中の秒スケールの短時間変動のX線・可視光同時観測データを解析中である。また、2023年打ち上げ予定のX線衛星XRISMの初期観測フェーズのGuest Scientistsの一人として選出されたため、SS Cygの将来の多波長観測を計画中である。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Kimura, M. and Osaki, Y.: “The light curve simulations of the 2021 anomalous event in SS Cygni”, *Publ. Astron. Soc. Jpn.*, in print*
2. Nishino, Y., Kimura, M., Sako, S., Beniyama, J., Enoto, T., Minezaki, T., Nakaniwa, N., Ohsawa, R., Takita, S., Yamada, S., Gendreau, K. C.: “Detection of highly

correlated optical and X-ray variations in SS Cygni with Tomo-e Gozen and NICER”, *Publ. Astron. Soc. Jpn.*, 74, L17 (2022)*

●口頭発表 Oral Presentations

(学会)

1. 木邑真理子: 「Optical & X-ray simultaneous observations of the brightest dwarf nova SS Cyg」, 連星系・変光星研究会2022, 岡山理科大学, 12月(2022)
2. Kimura, M., : “Optical & X-ray simultaneous observations and numerical simulations of SS Cyg”, XRISM core-to-core Multiwavelength Workshop 2022, Epochal Tsukuba International Congress Center, Dec. (2022)
3. 木邑真理子, 榎戸輝揚, 三原建弘, 山田真也, 牧田佳大, 中庭望, 根来均, 志達めぐみ, 加藤太一, VSNET team 他: 「矮新星 SS Cyg における2021年の異常な光度変動とその前兆現象の正体」, 日本天文学会秋季年会, 新潟大学, 9月(2022)

XX-007 グラディエントフローを用いた場の理論の新しい解析手法の発展

New Approach to Non-perturbative Quantum Field Theory Inspired by Gradient Flow

研究者氏名: 菊地 健吾 Kengo KIKUCHI
受入研究室: 数理創造プログラム
(所属長 初田 哲男)

グラディエントフロー (GF) の方法とは、ゲージ場の量子論の発散を押さえる新しい機構である。GF 方程式は一種の拡散方程式で、その解で与えられる新しいゲージ場 (フロー場) の相関関数は、新たな繰り込みを必要とせず、紫外発散が出ないという性質を持つ。本研究は GF を用いて、場の量子論の新たな解析手法を進展させようとする試みである。本年度の研究は二つのテーマに取り組んだ。一つは、超対称性 GF の場の理論、もう一つは GF を用いた自発的ゲージ対称性の破れの研究である。

超対称性 GF の場の理論の研究では、SU(N) Yang-Mills 理論において提唱された GF の方法は、紫外有限であるという性質に、ゲージ対称性が重要な役割を果たしている。ゲージ相互作用以外の相互作用を含む GF の構成は一般に自明ではない。一方で超対称性は非常に強力な対称性のため、非ゲージ的な相互作用を含む場合でも有限にすることが可能である。この理論を解析することは、GF がもつ特殊な有限性という性質が何に依存しているのか、物理的な意味を解明することに繋がる。本研究では、GF の方法を超対称 Wess-Zumino 模型に適用し、繰り込み不変なパラメータだけを持つように変数変換を行いフロー方程式を構成することで、相互作用を含む超対称性フロー理論が紫外有限になることを、非繰り込み定理と

適切な初期条件によって、摂動の全次数において示した。これにより、ある種の模型に関してはゲージ対称性が無くても相互作用も含むフロー方程式の紫外有限性の議論が可能となり、GF の議論は大きく適用範囲が広がることになる。

GF を用いた自発的ゲージ対称性の破れの研究では、GF は連続変形なため、理論の相構造を変えずに、対象となる理論の相構造を有限フロー時間における相構造と対応づけることができる。GF のもつ有限性の性質を使えば、発散のない、適切な秩序変数を定義できる。そこで自発的対称性の破れの新しい秩序変数をフロー場を用いて定義し、相構造を調べる新しい解析手法を提案した。具体的には U(1) ヒッグス模型に対して解析を行い、対称性相に対し GF 方程式を構成、解析した。U(1) ヒッグス模型でも紫外有限である性質を実際に確かめ、有限部分の計算は GF と相性の良い鞍点法を用いて計算を行い、結果として、フロー時間の無限大極限においてこの秩序変数が 0 になるという無矛盾な結果を得た。

これらの研究成果は GF を用いた場の理論の新しい解析手法を与え、その応用分野を拓げるものである。本研究の発展により、新たな物理的アプローチを与え、様々な理論に対してより多角的な検証が進むことが期待される。

XX-008 MeV ガンマ線宇宙物理学の開拓 Pioneering MeV gamma-ray astrophysics

研究者氏名：米田 浩基 Hiroki YONEDA
受入研究室：仁科加速器科学研究センター
高エネルギー宇宙物理研究室
(所属長 玉川 徹)

核ガンマ線や、宇宙熱的現象と非熱的現象の過渡領域を観測することができる数100 keVから数10 MeVの電磁場領域は、宇宙元素合成や宇宙極限環境物理を解き明かす上で欠かすことができない。しかし、この帯域で実現された感度は、これまで十分でなく、高感度のMeVガンマ線撮像検出器を実現する必要がある。そこで、2030年代のMeVガンマ線衛星観測を目指し、大型の液体アルゴンTPCを用いたコンプトンカメラによる気球観測実験「GRAMS」を進めている。

本年度は、GRAMSの天体データ解析手法を確立することを目的とし、コンプトン望遠鏡の画像再構成手法の研究に取り組んだ。まず、MLEMを始めとした代表的な画像再構成アルゴリズムを複数実装したソフトウェアを開発した。これに、MeVガンマ線全天モデルや気球高度での大気ガンマ線バックグラウンドモデルをもとにした模擬的な観測データに適用することで、天体シミュレーションから観測データの解析まで行うend-to-endのシミュレーションフレームワークを開発することができた。また、GRAMSで用いる液体アルゴンタイムプロジェクトンチェンバーの試作に向け、SiPMを用いたアルゴンシンチレーション光の測定システムの開発も行った。87Kという低温環境下で動作可能なプリアンプの開発と、SiPMの液体アルゴン下での基礎特性評価を進めることができ、試作機に導入する光検出器システムの設計方針を固めることができた。これらをもとに、気球実験の詳細な検討・開発が可能になり、現在は、来年度に予定する工学実証気球実験に向けた準備を行っている。

並行して、MeVガンマ線を強く放射する「ガンマ線連星」に着目したX線観測を行った。ガンマ線連星では、電子が高エネルギーに加速されることでガンマ線が放射されると考えられるが、その背景にある粒子加速機構や物理環境が大きな謎になっている。私は、軟X線帯域で有効面積を持つNICERを用いて、ガンマ線連星 LS 5039を観測し、短時間でのX線放射の安定性を調査した。その結果、数時間程度の時間スケールでのX線強度の変動を明らかにした。この時間変動性は、伴星のO型

星からの星風と中性子星からのパルサー風が形成する衝撃波で、星風のクランプ状の非一様な構造が引き起こす時の理論予測とよく特徴が一致していることが分かった。これにより、高エネルギー放射の起源が、中性子星を起源とする可能性をより高めることができた。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. H. Yoneda, H. Odaka, Y. Ichinohe, S. Takashima, T. Aramaki, K. Aoyama, J. Asaadi, L. Fabris, Y. Inoue, G. Karagiorgi et al., "Reconstruction of multiple Compton scattering events in MeV gamma-ray Compton telescopes using a physics-based probabilistic model", *Astroparticle Physics*, Elsevier BV, 144, 102765, 2023*
2. H. Yoneda, V. Bosch-Ramon, T. Enoto, D. Khangulyan, P. Ray, T. Strohmayer, T. Tamagawa, Z. Wadiasingh, "Unveiling properties of the non-thermal X-ray production in the gamma-ray binary LS 5039 using the long-term pattern of its fast X-ray variability", *The Astrophysical Journal*, American Astronomical Society, submitted*

●口頭発表 Oral Presentations

(学会)

1. 米田浩基(他25名)：“GRAMS計画4: MeV ガンマ線観測・ダークマター探索気球実験”，日本天文学会2022年春季大会，オンライン，2022年3月
2. 米田浩基：“MeVガンマ線宇宙観測の展望と要求されるデータ解析”，データサイエンス的手法により探求する天文学，オンライン，2022年3月

(セミナー)

1. 米田浩基：“コンプトン望遠鏡によるMeVガンマ線宇宙観測”，Joint Seminar of the 35th Nuclear Spectroscopy Lab. & Quantum Beam Application Research (B03)，オンライン，2022年4月
2. H. Yoneda: "Extremely efficient particle acceleration in gamma-ray binary systems - the mystery of their strong MeV gamma-ray emission -", Stanford (KIPAC Tea), US, August, 2022

XX-009 汎関数繰り込み群に基づいた密度汎関数理論による量子多体系の 新たな第一原理的解析法の開発

Development of first-principles methods for quantum many-body systems based on functional-renormalization-group aided density functional theory

研究者氏名：横田 猛 Takeru YOKOTA

受入研究室：数理創造プログラム

(所属長 初田 哲男)

物質を相互作用する多数のミクロな粒子のレベルから記述することは理論物理の大きな目標の一つです。電子や原子核、液体理論といった多体系を記述するのに広く用いられている手法の一つに密度汎関数理論 (DFT) があります。そのDFTを汎関数繰り込み群 (FRG) という場の理論の方法で記述することで、DFTを改良するというのが本研究課題の目的です。前年度までの研究で、電子系や古典液体への応用を通じて一様な密度を持った系の解析を発展させることができました。この手法をさらに様々な場合に使える精度の高いものとするためには、密度勾配の効果の取り入れが重要となります。一つのアイデアは、近年発達している機械学習の手法を取り入れ、FRGで現れる方程式の解をニューラルネットワーク (NN) で表現することで低い計算コストで密度勾配の効果を取り入れるというものです。本年度はその定式化を考案し、特に0次元系という単純な場合における解析を行なった。実際にこの系においてFRGの方程式を機械学習により精度良く導けることを示しました。

FRGを用いた他のテーマとして、ジョセフソン接合の解析にも取り組みました。ジョセフソン接合におけるジョセフソン位相の有効ハミルトニアンはポテンシャル中にある量子力学的な一粒子と同じようなものを書けます。そのためある種の人工原子として実験に活用できます。特にジョセフソン接合と抵抗を繋ぐことで、光子環境に晒された粒子の振る舞いをシミュレーションできます。このような系で、環境と粒子の相互作用を非摂動的に扱うツールとしてFRGを用いた解析を行ないました。

この方向性とは別に、多体系での計算の経験を活かして、高密度核物質において現れると考えられるカラー超伝導の摂動論的解析といった研究も行ないました。このプロジェクトでは、有限密度の量子色力学で現れる符号問題を回避できる複素ランジュバン法を用いてカラー超伝導を解析することを目的としていましたが、その解析に指針を与える目的で摂動計算を行いました。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Yuto Ashida, Takeru Yokota, Ataç İmamoğlu, and Eugene Demler, Nonperturbative waveguide quantum electrodynamics, *Phys. Rev. Research* 4, 023194 (2022)

(その他)

1. Takeru Yokota, Kanta Masuki, and Yuto Ashida, Functional Renormalization Group Approach to Circuit Quantum Electrodynamics, arXiv:2208.14107.

●口頭発表 Oral Presentations

(学会)

1. Takeru Yokota, Towards an ab-initio DFT via functional formalism, Mean-field and Cluster Dynamics in Nuclear Systems, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, Kyoto, June 2022.
2. Takeru Yokota, Jun Haruyama, and Osamu Sugino, Analysis of classical liquids using functional renormalization group, 11th International Conference on the Exact Renormalization Group 2022 (ERG2022), Harnack-Haus, Berlin, July 2022.
3. Takeru Yokota, Density-based functional renormalization group for quantum many-body problems, Functional Renormalization Group at RIKEN 2023, RIKEN, Wako, Saitama, January 2023.

●ポスター発表 Poster Presentations

(学会)

1. 伊藤祐太, 浅野侑磨, 松古栄夫, 滑川裕介, 西村淳, 土屋麻人, 筒井翔一郎, 横田猛, 複素ランジュバン法による低温高密度領域におけるQCD相の解明, HPCI成果報告会, 2022年10月.
2. 横田猛, 後藤ゆきみ, 本郷優, 内藤智也, Mathematical study of analytical methods for neutron-rich nuclear many-body systems, 科技ハブ共同研究プログラム2022年度合同ワークショップ, 理化学研究所神戸キャンパス, 2022年11月.

XX-010 From diffractive to partonic interaction: Precise measurement of the transverse single spin asymmetry of neutral pion at high energy polarized proton-proton collision

Name: Minho KIM

Host Laboratory: Experimental Group
RIKEN BNL Research Center
RIKEN Nishina Center for Accelerator-Based Science
Laboratory Head : Yasuyuki AKIBA

In June, 2017, the RHICf experiment measured the transverse single spin asymmetry (A_N) for very forward π^0 and neutron productions in polarized p + p collisions at $\sqrt{s} = 510$ GeV at the STAR experiment which is one of the high energy collision experiments at the Relativistic Heavy Ion Collider. The A_N is defined by the left-right cross section asymmetry of a specific particle with respect to the beam polarization. A_N for very forward particle production allows us to study the spin-involved diffractive particle production mechanism. During FY 2022, I analyzed the neutron data and started RHICf-STAR combined analysis. To develop the detector for a possible very forward neutral particle measurement in the future, I also joined the ALICE FoCal-E group and was analyzing the beam test data which was taken at CERN-SPS using high energy electron beam.

The neutron analysis follows the procedure of neutron photon separation, neutron reconstruction, unfolding, A_N calculation, and background subtraction. Through these procedures, preliminary result for the neutron A_N as functions of x_F and p_T was released. Theoretical calculation based on the a_1 and π exchange model predicted the A_N would increase in magnitude with p_T but it was estimated only in the p_T range of $p_T < 0.4$ GeV/c. In the preliminary result, in $x_F > 0.46$, the A_N increased following the p_T even in the p_T range of $p_T > 0.4$ GeV/c. In $p_T > 0.25$ GeV/c, it also showed a clear x_F dependence which has not been observed and expected before.

To understand the non-zero A_N for very forward π^0 production, RHICf-STAR combined analysis has been started. Detector correlation between the RHICf and STAR detectors will provide us a clue to understand why the A_N s for both forward and very forward π^0 productions have comparable magnitudes even though their expected production mechanisms are totally different. As the first step, RHICf library was revised in STAR format and submitted to produce the official data at STAR. We are waiting for STAR's review now.

ALICE FoCal-E is a sampling calorimeter which is composed of silicon and tungsten. It consists of low granularity (1cm \times 1cm) pad layers and high

granularity (30 μ m \times 30 μ m) pixel layers. We are contributing to the pad detector development and analyzing the beam test data to estimate the detector performance. In the quick analysis, clear longitudinal shower profile was observed. However, since detailed calibration and analysis conditions to select the true electron events were not properly applied yet, precise detector performance will be studied taking into account those factors this year.

● Publications

Papers

1. Kim M. for the RHICf Collaboration: Non-zero transverse single spin asymmetry of very forward π^0 in polarized p + p collisions at $\sqrt{s} = 510$ GeV, SciPost Phys. Proc. 8, 060 (2022), published*.
2. Kim M. for the RHICf Collaboration: Transverse single spin asymmetry measurement for very forward neutron production at the RHICf experiment, 10.5281/zenodo.7236755 (2022), published*.
3. Kim M. for the RHICf Collaboration: Analysis of transverse single spin asymmetry for the forward neutron at the RHICf experiment, RIKEN Accel. Prog. Rep. 55, 48 (2022), published*.
4. Kim M. for the RHICf Collaboration: Preparation for very-forward particle measurements in RHICf-II experiment, Accel. Prog. Rep. 55, 51 (2022), published*.

● Oral presentations

Conferences

1. Kim M. for the RHICf Collaboration: Transverse single spin asymmetry for very forward neutron production in polarized p + p collisions at $\sqrt{s} = 510$ GeV, Physical Society of Japan, March (2022).
2. Kim M. for the RHICf Collaboration: Transverse single spin asymmetry measurement for very forward neutron production at the RHICf experiment, XXIX International Workshop on Deep-Inelastic Scattering and Related Subjects, May (2022).
3. Kim M. for the RHICf Collaboration: Highlights and future plan of RHICf, RHIC & AGS Annual Users' Meeting, June (2022).

4. Kim M. for the RHICf Collaboration: Multi-dimensional analysis for the transverse single spin asymmetry for very forward neutral pion production, Physical Society of Japan, September (2022).

5. Kim M. for the RHICf Collaboration: Transverse single spin asymmetry for very forward neutron production in polarized p + p collisions at $\sqrt{s} = 10$ GeV, Physical Society of Korea, October (2022).

XX-011 原始惑星系円盤の化学・物理進化計算と系外惑星大気の化学組成観測から探る惑星形成過程

Investigation of Planet Formation Process through the Simulations of Chemical and Physical Evolution of Protoplanetary Disks and Observations of Chemical Composition of Exoplanet Atmospheres

研究者氏名：川島 由依 Yui KAWASHIMA
受入研究室：開拓研究本部
坂井星・惑星形成研究室
(所属長 坂井 南美)

1995年に初めての系外惑星(太陽以外の恒星の周りを回る惑星)が発見されて以降、現在までに5000個以上の系外惑星の発見が報告されている。最近では、いくつかの惑星について大気の化学組成の情報が観測的に得られるようになってきた。大気の化学組成の情報は、惑星の形成過程、また形成時の原始惑星系円盤の環境を解明する手掛かりとなる。

今年度は主に、私が昨年、すばる望遠鏡の高分散分光器IRDを用いて観測した褐色矮星(惑星と恒星の中間質量の天体)の大気スペクトルについて、解析を行った。褐色矮星は系外惑星と温度領域が同様でありながら、系外惑星よりも比較的高精度な観測が可能である。そのため、褐色矮星大気の観測を通して大気の物理・化学過程の理解を確立したり、化学組成の調査に重要な役割を果たす吸収線リストの観測的検証を行ったりすることは、系外惑星大気の観測にとっても非常に重要である。解析にあたっては、昨年度より共同研究者と開発中の、第一原理的な分子の吸収線計算を含む、系外惑星・褐色矮星大気のための高分散スペクトル計算コード exojax (Kawahara, Kawashima et al. 2022) をハミルトニアンモンテカルロ法や変分推論法のパッケージと組み合わせることで逆問題推定を行った。その結果、これまで当該の天体に対して行われていた低・中分散観測と比べて、大気の化学組成や温度構造の高精度な制約に至ることができた。系外惑星・褐色矮星大気逆問題推定は計算コストの兼ね合いで、これまで主に低分散(低波長解像度)観測データに対して行われてきた。今回のように高分散観測データに対して、第一原理的な分子の吸収線計算を含んだ逆問題推定を行った本研究は先駆的である。

また、あまり精度が得られない系外惑星大気の高分散観測において、現状の一番のボトルネックとなっているのが高温環境下での分子の吸収線リストの不定性であるが、今回の観測で現在の水蒸気やメタンの吸収線リストに観測と不一致を示す波長領域があることがわかった。

加えて、ハッブル宇宙望遠鏡を用いて観測した海王星サイズの惑星HD 106315cの大気スペクトルに対して、自身がこれまでに開発してきた輻射輸送・化学反応・雲モデルを用いた解析を行い、大気の化学組成および雲の生成率の制限を行った。その結果を原著論文として発表した。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Kreidberg L., Mollière P., Crossfield I. J. M., Thorngren D. P., Kawashima Y., Morley C. V., Benneke B., Mikal-Evans T., Berardo D., Kosiarek M., Gorjian V., Ciardi D. R., Christiansen J. L., Dragomir D., Dressing C. D., Fortney J. F., Fulton B. J., Greene T. P., Hardegree-Ullman K. K., Howard A. W., Howell S. B., Isaacson H., Krick J. E., Livingston J. H., Lothringer J. D., Morales F. Y., Petigura E. A., Rodriguez J. E., Schlieder J. E. and Weiss L. M.: "Tentative Evidence for Water Vapor in the Atmosphere of the Neptune-Size Exoplanet HD 106315c", *The Astronomical Journal*, 164, 124(2022)*

(総説)

1. 川島由依: "アストロケミストリー特集(2) 系外惑星大気の化学", *天文月報*, vol.115, No.5 (2022)*

●口頭発表 Oral Presentations

(学会)

1. 川島由依, 藤井友香, 松尾太郎, 大野和正: "GREX-PLUS:系外惑星のサイエンス", 光赤天連シンポジウム: 2030年代にどのような戦略的中型計画を推進するのか, オンライン, 7月(2022)

●ポスター発表 Poster Presentations

(学会)

1. Kawashima Y. and Min M.: "Implementation of disequilibrium chemistry to spectral retrieval code ARCiS: Indication of disequilibrium chemistry for HD 209458b and WASP-39b", Symposium on Next Generation Astrochemistry, Tokyo, Japan, Nov.(2022)
2. 川島由依, 河原創, 笠木結, 石川裕之, 増田賢人, 小谷隆行, 工藤智幸, 平野照幸, 葛原昌幸, Stevanus

Nugroho, John Livingston, 田村元秀, IRDチーム: "すばる望遠鏡IRDによる褐色矮星 Gl 229Bの高分散分光観測とスペクトル計算コードExoJAXを用いた大気特性の調査", 日本惑星科学会2022年秋季講演会, 水戸, 9月(2022)

3. 川島由依, 河原創, 小玉貴則, 増田賢人, 小谷隆行, 平野照幸, JASMINE系外惑星検討班(Exo-JASMINEチーム): "JASMINEによる褐色矮星の光度変動観測", 日本天文学会2022年秋季年会, 新潟, 9月(2022)
4. Kawashima Y. and Min M.: "Implementation of Disequilibrium Chemistry to Spectral Retrieval Code ARCiS and Application to Sixteen Exoplanet Transmission Spectra: Indication of Disequilibrium Chemistry for HD 209458b and WASP-39b", COSPAR 2022 44th Scientific Assembly, Athens, Greece, Jul. (2022)

XX-012 Topological quantum links, knot theory and unidirectional magnetoresistance under broken symmetry

Name: Ilya BELOPOLSKI

Host Laboratory: Strong Correlation Quantum Transport Research Team

RIKEN Center for Emergent Matter Science
Laboratory Head: Yoshinori TOKURA

The interplay between broken symmetry, electron interactions, topology and superconductivity is at the frontier of condensed matter physics. A growing zoo of quantum materials exhibits this interplay, including TaAs (the first Weyl semimetal), RhSi (topological chiral crystal), $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ (magnetic Weyl semimetal) and Co_2MnGa (hosting a topological quantum link) [1-7]. In the present work, I explore two aspects of this interplay: the experimental observation of the first topological quantum link [1]; and non-reciprocal diode behavior under broken inversion symmetry [8-10].

Quantum phases can be classified by topological invariants, which take on discrete values capturing global information about the quantum state. Over the past decades, these invariants have come to play a central role in describing matter, providing the foundation for understanding superfluids, magnets, the quantum Hall effect, topological insulators and Weyl semimetals. We introduce a remarkable linking number (knot theory) invariant associated with loops of electronic band crossings in the mirror-symmetric ferromagnet Co_2MnGa [1]. We disentangle this system's rich topological structure through bulk-sensitive soft X-ray and surface-sensitive vacuum ultraviolet angle-resolved photoemission spectroscopy. We directly observe three intertwined degeneracy loops in the bulk Brillouin zone three-torus, T^3 , such that each

loop links each other loop twice. Through systematic spectroscopic investigation of this linked loop quantum state, we explicitly draw its link diagram and conclude, in analogy with knot theory, that it exhibits linking number (2,2,2), providing a direct experimental determination of the topological invariant. On the sample surface, we further predict and observe Seifert boundary states protected by the bulk linked loops, suggestive of a Seifert bulk-boundary correspondence. Our observation of a quantum loop link motivates the application of knot theory to the exploration of quantum matter [1].

As another example of the interplay of symmetry with topological quantum matter, I am examining novel low-dimensional superconductivity probed by exotic non-reciprocal response [8-10]. Recently, my laboratory developed a high-quality epitaxial interface between the Bi_2Te_3 thin film platform and the superconductor PdTe_2 . This unique superconducting topological heterostructure exhibits a remarkable giant, switchable unidirectional magnetoresistance associated with inversion breaking and superconductivity [8]. I consider new non-reciprocal phenomena enabled by this novel materials platform, associated with superconductor-proximitized quantum anomalous Hall states, semi-magnetic TIs and skyrmions. My work will open the way to new superconducting spintronics devices, exotic

two-dimensional superconducting states, and Majorana braiding.

● Publications

1. Belopolski Ilya *et al.* Observation of a linked loop quantum state. *Nature* 604, 647-652 (2022). published*
2. Belopolski Ilya *et al.* Signatures of Weyl fermion annihilation in a correlated kagome magnet. *Phys. Rev. Lett.* 127, 256403 (2021). published*
3. Hasan M. Zahid, Chang Guoqing, Belopolski Ilya *et al.* Weyl, Dirac and high-fold chiral fermions in topological quantum matter. *Nat. Rev. Mat.* 6, 784 (2021). published*
4. Belopolski Ilya *et al.* Discovery of topological Weyl fermion lines and drumhead surface states in a room temperature magnet. *Science* 365, 1278 (2019).
5. Sanchez D.*, Belopolski Ilya* *et al.* Topological chiral crystals with helicoid-arc quantum states. *Nature* 567, 500 (2019).
6. Xu S.-Y.*, Belopolski Ilya* *et al.* Discovery of a Weyl fermion semimetal and topological Fermi arcs. *Science* 349, 613 (2015).
7. Belopolski Ilya *et al.* A novel artificial condensed matter lattice and a new platform for one-dimensional topological phases. *Sci. Adv.* 3, e1501692 (2017).
8. Masuko M., Kawamura M., Yoshimi R. *et al.* Nonreciprocal charge transport in topological superconductor candidate $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{PdTe}_2$ heterostructure. *npj Quantum Materials* 7, 104 (2022).
9. Tokura Y. and Nagaosa N. Nonreciprocal responses from non-centrosymmetric quantum materials. *Nat. Commun.* 9, 3740 (2018).
10. Tokura Y., Yasuda K. and Tsukazaki A. Magnetic topological insulators. *Nat. Rev. Phys.* 1, 126 (2019).

XX-013 Emergent magnetomultipoles and nonlinear responses of a magnetic hopfion

Name: Yizhou LIU

Host Laboratory: Strong Correlation Theory Research Group
RIKEN Center for Emergent Matter Science

Laboratory Head : Naoto NAGAOSA

Magnetic hopfions are three-dimensional (3D) topological spin textures (TSTs) characterized by the Hopf invariant. Although its total emergent magnetic field, a quantity that usually determines TSTs' dynamics, vanishes, hopfion still possesses entangled spin dynamics including translation, rotation, and dilation. However, a proper connection between the dynamics of hopfion and its emergent magnetic field has not been established yet. This year, we solved this problem by systematically investigating the hopfion's ac dynamics. The spin's Berry phase of a hopfion indicates that the dynamical modes of hopfion are coupled through two terms: the emergent toroidal moment and the emergent magnetic octupole component. Therefore, the dynamics of hopfion is determined by the emergent magnetomultipoles instead of the emergent magnetic field itself. Furthermore, the presence of the emergent toroidal moment also suggests possible nonreciprocal response of hopfion as it breaks both time-reversal and inversion symmetry.

Then we performed spin dynamics simulation to check the hopfion dynamics under an ac driving current. When the current is applied along to the hopfion's symmetry axis, the hopfion shows a net translation and rotation along the applied current direction, which can be regarded as a nonreciprocal motion. When the current is applied perpendicular to the hopfion's

symmetry axis, the hopfion shows net translation and rotation perpendicular to the current direction and thus can be identified as a hopfion Hall effect. Moreover, both these dynamics are proportional to the current amplitude nonlinearly. The corresponding equation of motion is derived, revealing that the nonlinear translation (rotation) is induced by the emergent toroidal moment (magnetic octupole component). So the nonreciprocity/hopfion Hall angle can be manipulated by switching the chirality and polarity of hopfion.

In addition to hopfion's spin dynamics, we also studied its counterpart, the electrical response of hopfion. We showed that the emergent toroidal moment is effectively a vector potential and could couple to an electrical current in a similar manner. As a result, the hopfion gives rise to nonreciprocal magnetoresistance (nonlinear Hall effect) under an electric field applied along (perpendicular to) its symmetry axis. Similarly, the nonreciprocity and nonlinear Hall angle are also determined by the direction of the emergent toroidal moment. Such rich electrical responses of hopfion can be employed for its experimental detection. These results uncover the vital roles of emergent magnetomultipoles in nonlinear hopfion dynamics and provide an alternative approach for the potential implementations of hopfion in 3D spintronics.

● Publication

Original Paper

1. Liu Y., Watanabe H., and Nagaosa N.: Emergent magnetomultipoles and nonlinear responses of a magnetic hopfion. *Phys. Rev. Lett.* 129, 267201 (2022)*
2. Kurebayashi D., Liu Y., Masell J., and Nagaosa N.: Theory of charge and spin pumping in atomic-scale spiral magnets. *Phys. Rev. B* 106, 205110 (2022)*

● Poster Presentation

International Conference

1. Liu Y., Watanabe H., and Nagaosa N.: “Emergent magnetomultipoles and nonreciprocal dynamics of a magnetic hopfion” 29th International Conference on Low Temperature Physics, Sapporo, Japan 2022, August 18-24

XX-014 アト秒硬 X 線パルスを用いた強相関物質の光励起ダイナミクスの研究 Photo-Induced Dynamics in Strongly Correlated Materials with Attosecond Hard X-ray Pulses

研究者氏名：久保田 雄也 Yuya KUBOTA

受入研究室：放射光科学研究センター

利用システム開発研究部門

SACLA ビームライン基盤グループ

ビームライン開発チーム

(所属長 矢橋 牧名)

X線自由電子レーザー (XFEL) は、高輝度、超短パルス、高コヒーレンスの特長を持った硬X線パルスである。本研究課題では、特にXFELの超短パルス性を最大限に活かし、光励起された物質の格子や電子秩序状態の超高速ダイナミクスを明らかにすることで、量子状態の発現機構を解明及び制御することを目的として研究を進めてきた。昨年度までに光学レーザーを励起光、XFELを検出光とした、時間分解X線回折法 (trXRD) を極低温下で実施する装置の開発、及び励起光源波長の拡充を実施した。これまで時間分解のポンプ・プローブ測定で多く用いられてきた励起光は波長800 nmの近赤外光レーザーである。これはバンドギャップ間の電子励起に相当するエネルギーを持つ。一方、中赤外～テラヘルツ (MIR-THz) 領域の光のエネルギーは、超伝導ギャップや格子振動の励起エネルギーに相当する。そのため、MIR-THz光レーザーを励起源として用いることで、物質の電子励起を最小限にとどめ、より直接的に超伝導転移や格子振動について調べることができる。

まずMIR光に関しては、XFEL施設SACLAにて励起光源を整備後、上記の冷却装置と組み合わせた、室温から10 Kまでの広い温度範囲でのtrXRD測定を実施した。対象としたのは、鉄系超伝導体FeSeであり、波長7 μm のMIR光レーザー励起における、格子の超高速ダイナミクスを捉えた。これまで知られていた近赤外光励起とは異なる振る舞いを示すとともに、MIR光励起音響フォノンの観測に成功した。現在、観測されたフォノンと超伝導状態の関連を議論している。

次に、THz光に関しては、SACLAおよびSPring-8 BL19LXUにてTHz光レーザー発生システムを構築し、THz

光励起trXRD測定に向けた手法開発を実施してきた。ポンプ・プローブ測定においては、励起光と検出光の試料到達時間を一致させる、タイミング調整が非常に重要である。これまでTHz光とX線を用いたポンプ・プローブ測定では、ゲート光の近赤外光レーザーを介した、複雑で間接的な調整手法しか用いられていなかった。そこで我々は、半導体の光励起キャリアダイナミクスを利用した簡便な手法を考案し、昨年度、SPring-8にて実証に成功した。本年度はさらにSACLAに転用し、XFELの超短パルス性を活かした、フェムト秒スケールの、より高精度なタイミング調整が可能であると証明した。この成果は今後のTHz光とXFELを組み合わせた測定に有用であり、THz光を使った共鳴励起状態、高強度電場下における強相関物質の量子相の解明が期待される。

●誌上发表 Publications

Kubota Y., Tanaka Y., Togashi T., Ebisu T., Tamasaku K., Osawa H., Wada T., Sugino O., Matsuda I. and Yabashi M.: “Suppression of atomic displacive excitation in photo-induced A_{1g} phonon mode of bismuth unveiled by low-temperature time-resolved x-ray diffraction”, *Applied Physics Letters*, 122, 092201 (2023).*

●口頭発表 Oral Presentations

(学会)

1. Kubota Y., Matsuda. I and Yabashi M.: “New Experimental Station for Soft-XFEL Opto-Spintronics at SACLA”, *Magnetics and Optics Research International Symposium 2022 (MORIS2022)*, Shimane, Japan, May (2022).

2. 久保田雄也, 大和田成起, 鈴木剛, 富樫格, 玉作賢治, 大沢仁志, 田中良和, 岡崎浩三, 矢橋牧名: “X線励起THzレーザープローブ測定による半導体中のキャリアダイナミクス”, 日本物理学会2023年春季大会, オンライン, 3月(2023).

3. 久保田雄也, 鍋島冬樹, 中山耕輔, 大隅寛幸, 田中良和, 玉作賢治, 鈴木剛, 岡崎浩三, 佐藤宇史, 前田京剛, 矢橋牧名: “FeSe薄膜における純粋ネマティック相の研究”, 日本物理学会2022年秋季大会, 東京, 9月(2022).

XX-015 シリコン量子ドット中の電子スピンによる誤り耐性量子計算の基盤技術開発 Development of Key Technologies for Fault-tolerant Quantum Computing Using Electron Spins in Silicon Quantum Dots

研究者氏名: 野入 亮人 Akito NOIRI
受入研究室: 創発物性科学研究センター
量子機能システム研究グループ
(所属長 樽茶 清悟)

半導体量子ドット中の電子スピン系は、高い集積性を有する固体量子計算機としての可能性が注目され、量子ビットとしての動作原理検証が完了した。特に近年では、核スピンによる磁場雑音が少なく、集団位相コヒーレンス時間に優れたシリコン系量子ドットを用いて、最大2量子ビットまでの基本操作を行えることが示され、同系での研究機運が急速に高まっている。本研究では、同系での量子誤り訂正の実現を主な目標としている。量子誤り訂正は量子計算に必須の基盤技術であり、その実現条件は、3つ以上の量子ビットで高忠実な単一および二量子ビット操作が可能なことである。本年度は、3量子ビット試料において、前年度達成した高忠実操作を組み合わせて最も基本的な量子誤り訂正の原理検証実験を行った。また、少数量子ビットを用いた原理検証実験が概ね完了したことを受けて、大規模化に向けた課題解決にも取り組んだ。

単一量子ビット(データ量子ビット)の位相もしくはビット反転の誤り検出は、2つの冗長量子ビットに対して2量子ビット操作を用いて3量子ビットもつれ状態に符号化することで実現できる。符号化と逆操作による復号化の際に冗長量子ビットの状態は、誤りの有無を反映するため、冗長量子ビットの状態に応じた補償操作を行うことで誤り訂正を実行できる。今回の試料では測定が遅くコヒーレンス時間内に実行できないため、実験では測定ベースの補償操作ではなく、冗長量子ビットの状態に応じてデータ量子ビットの回転操作を行う制御制御NOT操作によって訂正を実装した。符号化と復号化の間に意図的に入れた誤りを想定通り訂正できることを確かめた。この成果は、シリコン電子スピンを用いた量子コンピュータで初めて量子誤り訂正の原理検証に成功したものであり、関連研究分野の大きなマイルストーンを世界に先駆けて達成したものである。

次に、大規模化に向けて量子ビット間の結合を制御する新しい手法を開発した。量子ビット間の結合は距離に指数関数的な依存性を示すため、2つの量子ビットが近接量子ドット間にある場合のみ有限で、自近接以上に離れると無視できる。従来の実験では隣接量子ドットに2つの量子ビットを用意し、これらの間の障壁を調整することによって量子ビット間の結合を制御していた。今回、3重量子ドットに2つの量子ビットを用意し、片方の量子ビットを端のドットと中央のドット間でシャトルリングすることで結合を制御し、2量子ビット操作を実行できることを実証した。この手法を拡張すれば、ある程度離れた距離で量子ビットを配置することが可能で、大規模化する際の重要な課題である密な領域への配線問題を解決できると考えられる。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Takeda K., Noiri A., Nakajima T., Kobayashi T. and Tarucha S.: “Quantum error correction with silicon spin qubits”, *Nature* 608, 682-686 (2022)*
2. Noiri A., Takeda K., Nakajima T., Kobayashi T., Sammak A., Scappucci G. and Tarucha S.: “A shuttling-based two-qubit logic gate for linking distant silicon quantum processors”, *Nat. Commun.* 13, 5740 (2022)*

●口頭発表 Oral Presentations

(学会)

1. Noiri A.: “Universal quantum gate fidelity exceeding the fault-tolerance threshold in silicon spin qubits”, *The 4th Asian-Pacific Workshop on Trapped Quantum Systems (APTQS 2022)*, online, Apr. (2022)
2. Noiri A., Takeda K., Nakajima T., Kobayashi T., Sammak A., Scappucci G. and Tarucha S.: “A shuttling-based two-qubit gate for linking distant

- silicon quantum processors”, Silicon Quantum Electronics Workshop 2022, Montreal, Oct. (2022)
- Noiri A.: “A high-fidelity universal quantum control for electron spin qubits in silicon”, APS March Meeting 2023, Las Vegas, Mar. (2023)
 - 野入亮人, 武田健太, 中島峻, 小林嵩, Sammak A., Scappucci G., 樽茶 清悟: “シリコン電子スピン量子ビット

- における高忠実2量子ビット操作”, 日本物理学会, 東京, 9月(2022)
- 野入亮人, 武田健太, 中島峻, 小林嵩, Sammak A., Scappucci G., 樽茶 清悟: “離れたシリコン量子プロセッサ間の量子接続に向けた単一電子スピンシャトルによる2量子ビットゲート”, 日本物理学会, オンライン, 3月(2023)

XX-016 多階層生体構造における相転移・相分離現象

Phase Transition and Phase Separation in Multi-Scale Biological Systems

研究者氏名: 足立 景亮 Kyosuke ADACHI
受入研究室: 生命機能科学研究センター
生体非平衡物理学理研白眉研究チーム
(所属長 川口 喬吾)

氷の融解や金属の超伝導転移のように、系の構成要素が相互作用し合うことで集団の性質ががらりと変化する現象は相転移と呼ばれ、物質科学の領域で盛んに研究が進められてきた。最近では、生物系においても細胞内環境や細胞集団といった様々なスケールで相転移が重要な役割を果たしていることが明らかになりつつある。例えば、細胞内では種々のタンパク質やRNAが膜のない構造体を形成しており、その基本的な形成機構は熱力学的な相分離で説明できるのではないかと考えられている。また、細胞集団が自発的に集まったり運動方向をそろえたりする現象は一種の相転移現象とみなすことができ、細胞の運動性や相互作用の強さが相転移を起こすための重要なパラメータであると考えられている。本研究課題では、このような生物系の相転移・相分離のメカニズムを明らかにし、非平衡相転移現象として特徴づけることを目的としている。今年度は、主に細胞集団スケールでの相転移現象の理論研究に取り組んだ。また、より大きな時間・空間スケールの現象に相当する進化や生態のダイナミクスを対象とした理論研究にも取り組んだ。

まず、昨年度に引き続き、細胞集団などの自己駆動する粒子系で起こる非平衡協同現象に注目し、粒子モデルのシミュレーションや理論解析を用いた研究を行った。特に、基板などの空間的異方性が自己駆動粒子の運動に影響することで起こりうる特徴的な密度ゆらぎや凝集現象を提案し、さらに自己駆動性に由来する相転移を量子力学に支配される原子スケールの現象へと拡張した。これらの結果は論文として出版された。また、ここで提案した特徴的な密度ゆらぎや凝集現象が幅広いクラスの自己駆動粒子モデルで現れることを示し、現在論文を執筆中である。

また、非平衡物理の視点から進化・生態ダイナミクスの一般的な性質を調べる研究にも取り組んだ。具体的には、

常微分方程式で記述される幅広いクラスの進化・生態モデルに対し、状態の変化速度に一般的な制限が課されることを示した。得られた制限を、一種の相転移現象とみなせる分岐現象へと応用することで、分岐点付近の遅い緩和に関する普遍的な性質を見出した。これらの結果は論文として出版された。

●誌上发表 Publications

(原著論文)

- Adachi K., Takasan K. and Kawaguchi K.: “Activity-induced phase transition in a quantum many-body system”, *Phys. Rev. Research* 4, 013194 (2022)*
- Adachi K., Iritani R. and Hamazaki R.: “Universal constraint on nonlinear population dynamics”, *Commun. Phys.* 5, 129 (2022)*
- Heyl M., Adachi K., Itahashi Y. M., Nakagawa Y., Kasahara Y., List-Kratochvil E. J. W., Kato Y. and Iwasa Y.: “Vortex dynamics in the two-dimensional BCS-BEC crossover”, *Nat. Commun.* 13, 6986 (2022)*

(その他)

- 足立景亮: “アクティブマターと相分離”, 分子シミュレーション学会誌 アンサンブル 24, 198 (2022)

●口頭発表 Oral Presentations

- Adachi K., Kato Y., Heyl M. and Iwasa Y.: “Vortex Hall effect in the BCS-BEC crossover: Theory”, APS March Meeting, Online, Mar. (2022)
- 足立景亮: “Long-range correlation in self-propelled particle systems with anisotropy”, CREST 計算ダイナミクス全体会合, オンライン, 8月(2022)
- 足立景亮: “BCS-BEC クロスオーバーにおける次元性と磁場効果”, 日本物理学会2022年秋季大会シンポジウム, オンライン, 9月(2022)

4. 足立景亮, 高三和晃, 川口喬吾, 中野裕義: “異方的アクティブ格子ガスが示す長距離相関とモティリティ誘起相分離”, 日本物理学会2022年秋季大会, 東京, 9月 (2022)
5. 足立景亮: “斥力相互作用するアクティブマターモデルの非平衡協同現象”, Online CMT seminars, オンライン, 10月(2022)
6. 足立景亮: “斥力相互作用する自己駆動粒子モデルの相分離と長距離相関”, 第28回交通流と自己駆動粒子系のシンポジウム, オンライン, 12月 (2022)
7. 足立景亮: “BCS-BECクロスオーバーにおける渦糸ホール効果の理論研究”, 第28回渦糸物理ワークショップ, オンライン, 12月(2022)

●ポスター発表 Poster Presentations

1. 足立景亮, 入谷亮介, 濱崎立資: “生態・進化ダイナミクスにおける一般的な速度制限”, 第60回日本生物物理学会年会, 函館, 9月 (2022)

XX-017 Surface-induced Chirality in Organic Semiconductor Thin Films and Its Application to Spin Filter

Name: Chao WANG

Host Laboratory: Emergent Functional Polymers Research Team
RIKEN Center for Emergent Matter Science
Laboratory Head: Keisuke TAJIMA

Developing new organic semiconductors with high transport property for device applications is an essential part of my research topic. In my previous study, a diradicaloid molecule with high semiconducting performance based on the quinoidal benzo[1,2-b:4,5-b']dithiophene structure (DTBDTCN) was synthesized, and an unprecedented link between the diradical character of organic semiconductors and organic magnetoresistance (OMAR) was discovered. Recently, a new quinoidal molecule based on benzo[1,2-b:4,5-b']diselenophene (DTBDSCN) was synthesized. According to the theoretical calculation, DTBDSCN has a diradical character and could work as a spintronic material. Variable-temperature electron spin resonance (VT-ESR) spectra were measured for DTBDSCN powder. A ESR signal was observed over the full temperature range. Unlike DTBDTCN, the ESR of DTBDSCN showed decreasing signal intensity as the temperature was raised from room temperature to 150 °C, although the change in signal intensity at variable temperatures was small. If we can have a good explanation of this phenomenon,

this new material could be a promising material to explore the relationship between quinoidal structure and spintronic effect. In addition, several new organic semiconductors were developed for the applications in organic electronics. A new quinoidal molecule based on thieno[2',3':4,5]pyrrolo[3,2-g]thieno[3,2-b][1,2,3]triazolo[4,5-e]indole (TPTCN) was synthesized. TPTCN showed electron mobilities up to $0.4 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ in organic field-effect transistor (OFET) because of its planar conjugated structure and low-lying energy levels. I also synthesized new conjugated polymers based on dithieno[3',2':3,4;2'',3'':5,6]benzo[1,2-d][1,2,3]triazole (DBT). They could work as electron donors in organic solar cells, and the optimization of their device performance is ongoing.

● Publications

Original Paper

1. Wang C., Hao, H., and Tajima K. Essential Role of Triplet Diradical Character for Large Magnetoresistance in Quinoidal Organic Semiconductor with High Electron Mobility. *Adv. Sci.* 2022, 9, 2201045.

XX-018 Three dimensionally Architected Nanocatalyst Inspired by Deep-Sea Hydrothermal Vent

Name: Hye-Eun LEE

Host Laboratory: Biofunctional Catalyst Research Team
RIKEN Center for Sustainable Resource Science
Laboratory Head : Ryuhei NAKAMURA

Deep-sea alkaline hydrothermal vents (HVs) are of fundamental interest as potential origin-of-life reactors. Here we conducted a detailed structural and compositional analysis of alkaline HVs collected from Shinkai Seep Field in the southern Mariana forearc, and discovered a hidden property of HVs similar to cell functions. We observed an organized hierarchical inorganic structure in HV precipitate. The inorganic wall contains a periodically stacked lamellar structure with a thickness of ~ 10 μm , in which the sublayers consist of consolidated plate-like brucite nanocrystals with ~ 100 nm. TEM analysis show that individual crystals contain porous nanostructures shown as local density variations. Slit-like nanopores with sizes ranging from 2 nm to 100 nm were observed in nitrogen adsorption-desorption isotherm analysis due to the multi-hierarchical stacking of plate-like structures at different scales. From the synchrotron X-ray diffraction analysis, a preferred orientation of brucite crystals was observed in the inorganic wall of HV, and nanocrystals were arranged in a concentric manner radiating from the fluid channel. The alignment was continued for millimeter scale, which can offer long-range ionic transport through the inorganic HV walls. The aligned nanopores also showed surface charges that varied depending on the type of adsorbed ion. The periodic band patterns and crystal arrangements found in the HV are features that mainly appear in the far-from-equilibrium (FFE) system where chemical and physical processes are combined. Structurally, repetitive banded texture was also recognized in the HV, and at the same

time, periodic zone formation of brucite OH bonds was observed, suggesting the HV formed under FFE system. Based on these properties, we demonstrated that HVs selectively transported the cation or anion, and converted ionic gradients (NaCl, KCl, and pH) to electrochemical energy in a process similar to that observed in cellular systems. Our findings show that natural chemical disequilibrium originating from geological setting drives the ordered structure, and consequently built and accumulate the functions in the HV system. This suggest that chemiosmotic conversion can be prevalently observed in hydrothermal fields and that there may have an evolutionary link to the cellular function for harnessing energy from ionic gradients. In addition, this will bring new insights into technology by providing new materials and design strategies for energy conversion and ion transport applications.

● Oral Presentations

1. Hye-Eun Lee : "Selective Ion Transport in Alkaline Hydrothermal Vents" Earth-Life Science Institute (ELSI) Seminar, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan, Dec. 21, 2022.
2. Hye-Eun Lee : "Selective Ion Transport Enables Power Generation in Alkaline Hydrothermal Vents" Prebiotic Chemistry and Early Earth Environments (PCE3) Seminar Series, Online, Nov. 3, 2022
3. Hye-Eun Lee, et al. : "Alkaline Hydrothermal Vents as Chemiosmotic Energy Convertors" Japan Geoscience Union Meeting 2022 (JpGU 2022), Online, May 22- June 3, 2022

XX-019 テラヘルツ - 光 STM で観る分子の帯電状態ダイナミクス Dynamics of the Charged State of Molecule Investigated by THz-photon STM

研究者氏名 : 木村 謙介 Kensuke KIMURA
受入研究室 : 開拓研究本部
Kim 表面界面科学研究室
(所属長 金 有洙)

有機分子への電荷注入、すなわち分子を帯電させることによって誘起される分子構造の歪みや振動は、隣接する分子に電荷を受け渡す電荷伝導、酸化還元反応、絶縁体-金属転移において重要な役割を果たす。本研究では、

有機分子の多様な性質を司る帯電状態のダイナミクスを、走査トンネル顕微鏡 (STM) をベースとした新規な分光手法を開発する事で高い時間・空間分解能で調べ、制御する事を目的とする。

受入研究室が培ってきた光STM技術は単一分子を舞台にした励起と緩和過程を調べることが可能である。また、原子スケールで先鋭なSTM探針から流れるトンネル電流を用いることで単一分子への電荷注入自体は既に可能である。しかし、従来のSTMのトンネル電流は定常的に流れていることから、電荷注入が起こるタイミングを決めることは出来ない。つまり、電荷注入が引き金となって瞬間的に起こる超高速現象(ピコ秒オーダーのダイナミクス)を調べる事が出来ない。このトンネル電流の制限を打破するため、本研究ではテラヘルツ (THz) パルスと光STMを組み合わせることでトンネル電流の超高速制御に注目した。この技術を受け入れ研究室が培ってきた光STM技術と融合させることで、分子ダイナミクスを高い時間・空間分解能で分光計測する新たな分光技術の開発を進めている。

昨年度の研究では、単一分子に光STM技術を適用するため新たに受入研究室に導入された40 W、1-50 MHzの可変高繰り返しファイバーレーザーを用いたTHz光源の開発を行い、THz電場によってSTMを駆動して分子軌道を可視化することに成功した(世界で2例目)。今年度は、この技術を更に発展させ、世界で初めてTHz電場誘起のSTM単一分子発光の観測に成功した。更に、

THz波形を制御することでSTM探針と分子間の電荷移動を自在に操作し、分子の発光強度を変調できるという新しい現象を観測した。現在、時間分解測定に向けてTHzの2パルス化およびTHzパルスと同期して時間分解発光測定を行う検出システムを構築中であり、次年度は世界で初めての単一分子STM発光寿命測定および帯電状態ダイナミクスの可視化を行う。

●口頭発表 Oral Publications

(国際学会・招待講演)

1. Kimura K., Morinaga Y., Imada H., Katayama I., Asakawa K., Yoshioka K., Kim Y. and Takeda J.: "Development of THz-Field-Driven Scanning Tunneling Luminescence Spectroscopy for Future Investigation of Exciton Dynamics", 241st ECS Meeting, Vancouver, Canada, May (2022).

(国際学会)

1. Kimura K., Morinaga Y., Imada H., Katayama I., Asakawa K., Yoshioka K., Kim Y. and Takeda J.: "Investigation of STM-luminescence Induced by THz-field-driven Tunneling Electrons", The 22nd International Vacuum Congress IVC-22, Sapporo, Japan, Sep. (2022).

XX-020 生体膜チップを用いたアーキアべん毛モーターの再構築

Reconstitution of the archaeellar motor using artificial cell-membrane microsystems

研究者氏名：木下 佳昭 Yoshiaki KINOSHITA

受入研究室：開拓研究本部

渡邊分子生理学研究室

(所属長 渡邊 力也)

昨年度までに、アーキアべん毛のin vitro再構成に関わるタンパク質の発現系構築を行った。本年度は少し志向を変えて、アーキアべん毛の細胞内タンパク質ではなく、細胞の砦であるS層タンパク質の精製、および、機能解析を行った。アーキアの細胞よりS層を単離、精製した後、アーキアべん毛の回転運動を検出した。その際、EDTA処理を行うことで回転の停止を確認した後、単離・精製したS層を添加することで、回転運動の再活性化を検出した。この結果はS層が回転運動に必須であることを示している。

昨年度、ATPaseのwalkerBの変異体においてビーズアッセイを行った所、60度の階段状のステップ運動を検出した。本年度はゴーストにおいて、同様のアッセイを行った。その結果、ATP濃度に依存したステップ運動における、

停止時間の変化を検出した。また、ATP濃度の減少と伴に、停止点において頻繁なバックステップを検出した。更に、Walker BとWTのハイブリット型モーターの作製にも成功した。この停止点は奇数個も検出できるため、6量体の対角で2個ATPを同時に分解しながら1方向に回るというモデルとは異なるpathwayが示唆された。

昨年度までに、回転制御に関わる変異体の作製を終えた。今年度はビーズアッセイを行い、回転制御に関わるタンパク質の役割を調査した。また、昨年度AlphaFoldで予測されたアーキアべん毛たんぱく質(FlaD)の点変異体が、方向転換の頻度などに影響することを明らかに出来た。また、CheFというタンパク質が回転制御に重要であると論文が報告されたが、我々の結果はこれを否定しており、CheFがなくとも方向転換は確認された。そこでCheF

とFlaDの2者による方向転換制御モデルを提案し、論文を作製している。

渡邊研では、CRISPR-Cas 技術を活かしたDNA, RNAの検出技術を深化させている。最終年度において、私自身この技術を発展させる目的で、新たな免疫系を探索した。その免疫系に関する発現系の構築、および、DNA切断能などを既に確認しており、渡邊研の独自技術であるデジタルアッセイと組み合わせる所まで達成した。

●誌上発表 Publication

1. Kinoshita Y. "Direct Observation of Archaeal Motor Rotation by Single-Molecular Imaging Techniques" *Methods in Molecular Biology, in press* Corresponding Author.
2. Kinoshita Y., Sugawa M., Miyata M., and Nishizaka T. "Detection of Steps and Rotation in the Gliding Motility of *Mycoplasma mobile*" *Methods in Molecular Biology, in press* Corresponding Author.

●口頭発表 Oral Presentations

1. Yoshiaki Kinoshita, Rikiya Watanabe, "Rotational measurements of archaeal rotor", Online, Flagellar meeting, online, 3月 (2022)
2. Yoshiaki Kinoshita, "Biophysical measurements to characterize the rotary motors in halophilic archaea", Online, MATRIX conference June (2022), 招待講演
3. 木下佳昭, 「生物物理学的アプローチを用いたアーキアペル毛の回転計測」, 京都, 7月(2022)
4. 木下佳昭, 渡邊 力也, 「アーキア運動研究の『これまで』と『これから』」, 東京, 1月(2023)

●ポスター発表 Poster Presentations

1. Yoshiaki Kinoshita, Jun Ando, Tatsuya Iida, Rikiya Watanabe, "Detection of stepwise rotation of the archaeal motor in *Haloferax volcanii*", 北海道, 生物物理学会, 9月 (2022)

XX-021 古代RNA/DNAポリメラーゼの復元 ～「セントラルドグマ」の起源に迫る～ Resurrection of Ancient RNA/DNA Polymerase ～Unraveling a Mystery of Origin of Central Dogma～

研究者氏名：八木 創太 Sota YAGI
受入研究室：生命機能科学研究センター
高機能生体分子開発チーム
(所属長 田上 俊輔)

「生命の起源」は生命科学における究極の謎だと言える。現存生命は共通して転写・翻訳系による遺伝子発現機構を有している。つまり、このセントラルドグマ誕生の理解が「生命の起源」の謎を解き明かす上で大きな鍵になるはずである。そこで、私たちはRNAポリメラーゼの進化に着目した。現代のRNAポリメラーゼは非常に複雑であるが、初期生命のRNAポリメラーゼはもっと単純だったと予想できる。そのため、RNAポリメラーゼはその活性コアにある小さなβバレルドメイン (DPBB; ~80残基) を核として誕生してきたと考えられてきた。そこで、私たちはDPBB構造の初期進化過程の実験的再現を進めてきた。その結果、7種類のアミノ酸のみから構成される約40残基程度の短いペプチド (mk2h_Δ MILPYS変異体) でもDPBBを再構成できることを明らかにした (Yagi et al., JACS, 2021)。

本年度は、この単純化変異体が異なる条件下ではDPBBとは全く異なる新規βバレル構造 (DZBBと命名) を形成することを発見した。つまり、mk2h_Δ

MILPYSは溶媒条件に依存して異なるフォールドを作るMetamorphicタンパク質であることが分かった。さらに興味深いことに、このDZBB構造はリボソームタンパク質で保存される他のβバレル構造 (RIFTバレル、OB-fold) と高い類似性を持つ。そこで、これらβバレル構造間の進化が生じうるかを実証するために、DZBBからRIFTバレル、DZBBからOB-foldへの構造変換を試みた。mk2h_Δ MILPYSに段階的に変異を加えたところ、5残基の置換変異とループ部位のアミノ酸配列欠失/挿入のみでRIFTバレル構造へと変換できた。また、リボソームタンパク質L2のOBドメインとmk2h_Δ MILPYSのキメラタンパク質を作成したところ、OB-fold形成することも確認できた。これらの結果はDZBBを進化中間体として、DPBB、RIFTバレル、OB-foldの3つの古代βバレル構造が進化してきたことを強く示唆する。すなわち、RNAポリメラーゼとリボソームタンパク質は共通祖先タンパク質から分岐進化してきた可能性が高い。これは、タンパク質進化だけでなくセントラルドグマの初期進化過程を理解する上でも

重要な発見であることから、本成果を基に現在国際誌への論文投稿準備を進めている。

●誌上発表 Publications

(総説)

1. 八木創太、田上俊輔、7種類のアミノ酸だけで古代 β バレルを創る、Viva Origino 50(1): pp 1-9 (2022)
2. 八木創太、田上俊輔、Reconstruction of an ancient protein fold with seven amino acid types、Photon Factory Activity Report 2021, 39 (2022)

●口頭発表 Oral Presentations

1. 八木創太、田上俊輔、“Reconstruction of the evolution of the ancient β -barrels with a limited amino acid types”, 第

45回日本分子生物学会年会、幕張、2022.12

2. 八木創太、田上俊輔、“RNAポリメラーゼの進化的起源”、第24回日本進化学会、沼津、2022.8
3. 八木創太、田上俊輔、“古代 β バレルタンパク質のメタモルフォーゼ”、第46回 生命の起源および進化学会学術講演会、オンライン、2022.3
4. 八木創太、“古代タンパク質の復元 セントラルドグマの起源に迫る”、Keio Astrobiology Camp 2022、オンライン、2022.3

●ポスター発表 Poster Presentations

1. Sota Yagi, Shunsuke Tagami, “Reconstruction of the lost β -barrel world for the emergence of the central-dogma machinery”, RIKEN BDR retreat 2022, Yokohama, 2022, 11

XX-022 分子動力学計算とクライオ電子顕微鏡の相補的融合による生体高分子の時空間イメージング

Spatiotemporal Imaging of Biological Macromolecules by Complementary Use of Cryo-electron Microscopy and Molecular Dynamics Simulation

研究者氏名：大出 真央 Mao OIDE
受入研究室：開拓研究本部
杉田理論分子科学研究室
(所属長 杉田 有治)

本研究は、生体粒子の構造揺らぎを高分解能で解析可能なクライオ電子顕微鏡法 (cryoEM) と、高い時間分解能で生体分子の構造変化をサンプリング可能な分子動力学 (MD) 計算を相補的に融合した、生体高分子動態解析手法の開発・実用化を目的とする。申請課題は大きく分けて①MD計算とcryoEMを組み合わせた動態解析法の開発、②開発手法による植物光受容蛋白質フィトクロムB (phyB) の機能発現機構の解明、の二点から成る。

①については、三次元構造分類法 (Class3D) に基づく動態解析法の開発と評価を行った。Class3DはcryoEM構造解析で一般的な手法であり、cryoEM粒子像からの三次元構造再構成を通じて複数構造へ分類する。研究遂行者の提案する解析法では、同一のcryoEM粒子像セットに対して複数回の独立したClass3D計算を行い、ある粒子像がどの三次元構造へ分類されるかをベイズ統計に基づいて評価する。さらに、この評価結果をMD計算で得られた動態と組み合わせることで、動態の実験的な自由エネルギー地形を推定することもできる。この提案手法をこの解析法をプログラムとして実装し、超高度好熱菌由来グルタミン酸脱水素酵素 (GDH) のMD計算構造から生成されたテスト粒子像を用いて性能検証を行った。GDHは二つのドメインと、それらの間隙に形成される活性クレフ

トを有しており、MD計算ではクレフトの開閉運動とそれに垂直なドメイン剪断運動を生じる。解析の結果、支動的なクレフト開閉運動方向の正しい構造推定がされると共に、剪断運動についても正しい構造をある程度反映した推定結果が得られた。従って、提案手法はcryoEM粒子像の構造推定にある程度有効であると示された。これらの進捗について国内・国際学会で1件ずつ口頭発表をした。本提案手法ではMD計算による動態の解析も重要である。この点についても研究を行い、非線形次元削減手法UMAPと独自に考案した特徴量を組み合わせることで、蛋白質の折り畳みのような複雑な動態についても正確に解析が可能なことを示した。これについては査読付き学術誌にて1報の論文を発表した。

課題②については、グラフェン支持膜を使用した活性型phyBのcryoEM観察条件検討を行った。活性型phyBは自己凝集を生じることを遂行者が先行研究で報告しており、拡散・凝集を妨げるグラフェン支持膜は有効であると期待された。その結果、試料を支持膜上で乾燥させる負染色観察では凝集のない良好な観察像が得られた。遂行者自身の今後の研究においてさらなる検討と構造解析を試みていく。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Oide M. and Sugita Y.: "Protein folding intermediates on the dimensionality reduced landscape with UMAP and native contact likelihood", *J. Chem. Phys.* 157, 075101 (2022)*

(総説)

1. 大出真央, 中迫雅由: "クライオ電子顕微鏡マップを用いた生体分子動態の自由エネルギー地形解析", *日本結晶学会誌* 64, 300-305 (2022)*

●口頭発表 Oral Presentations

(国際会議)

1. Oide, M.: "MD-based inference of conformational ensemble from cryoEM particle images", IPR seminar: Frontiers of Dynamics Structural Biology, Osaka, Oct.

(2022)

(学会)

1. 大出真央, 杉田有治: "クライオ電子顕微鏡像に基づく蛋白質動態の自由エネルギー地形推定", 第22回日本蛋白質科学会年会, つくば, 6月(2022)
2. 大出真央: "拡張アンサンブル法による生体分子動態の解析", 第9回「富岳」を中核とするHPCI利用研究課題成果報告会, オンライン, 10月(2022)

●ポスター発表 Poster Presentations

(学会)

1. Oide, M. and Sugita, Y.: "Investigation of interactions between SARS-CoV-2 spike and NTD-binding antibody through glycans.", 第60回日本生物物理学会年会, 函館, 9月(2022)

XX-023 数理モデルと細胞・分子動態の網羅的計測により、脊椎動物胚における形態の進化可能性を評価する

Evaluating Evolvability of Vertebrate Embryonic Morphology by Mathematical Model and by Comprehensive Measurement of Cell Migration and Signal Molecule Distribution.

研究者氏名: 内田 唯 Yui UCHIDA

受入研究室: 生命機能科学研究センター
多階層生命動態研究チーム
(所属長 古澤 力)

動物の形質が進化的に多様化する度合いは一様ではない。この背景には、もちろん環境からの淘汰圧の違いも関わるが、生物内在的な「進化可能性」の違いがあると考えられている。これまでの研究では保存性の高い形質の発生基盤は記述されてきたが、形態進化を長期にわたりバイアスする発生学的性質はまだよくわかっていない。本研究では特に発生安定性（遺伝的背景・環境が一定なら同じ表現型を安定に作る性質）の寄与を検証している。

今年度の1つ目の研究として、祖先集団で安定性の高い発生段階（トランスクリプトームパターン）や遺伝子（発現量）が子孫集団でより保存されやすいか検証した。メダカの遠く離れた2系統を掛け合わせて擬似的にゲノムが多様化した子孫集団を作出することができ、仮説を支持する結果を得た。また作出系統で見られた進化的変化は、野外集団で観測された進化パターンを反映することも明らかになり、これらのメダカの遺伝的背景に共通の安定性が拘束要因になっている可能性が浮上した。本成果により安定性と進化的保存性の因果関係が示唆される。

2つ目の研究として、トランスクリプトームデータで観察さ

れた発生の不安定性が、具体的な発生現象のうち、細胞ごとの遺伝子発現量の不安定性で説明されるか組織構成（細胞種ごとの数）の不安定性で説明されるかを検証した。前者はsmFISH法で転写産物を可視化し、細胞間の発現量の変動を定量することで評価した。後者はWISH法によって遺伝子発現領域を可視化し、個体内の左右の非対称性を定量することで評価した。結果として、トランスクリプトームデータで定量された遺伝子発現量の変動をより説明するのは、細胞間の発現量の変動であることを明らかにした。発生の不安定性は、その後の進化での表現型や遺伝子発現量の多様化しやすさを反映すると考えられる。細胞内の遺伝子発現状態が不安定、すなわち変化可能な余地が大きいために多様性の創出に大きく寄与しているかもしれない。本研究は論文投稿準備中である。また残りの任期期間では、ここで取得したデータを用い、形態形成に対する安定性の寄与をシミュレーションベースで検証したい。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Uchida Y., Shigenobu S., Takeda H., Furusawa C. and Irie N.: "Potential contribution of intrinsic developmental stability toward body plan conservation". *BMC Biol.* 11;20(1):82. (2022) *
2. Seike T., Takekata H., Uchida Y., Sakata N., Furusawa C. and Matsuda F.: "Wickerhamiella bidentis sp. nov., a novel yeast species isolated from flowers and insects in Japan". *Int J Syst Evol Microbiol.* (2022) in print*

●口頭発表 Oral Presentations

(国内学会)

1. 内田唯, 重信秀治, 武田洋幸, 古澤力, 入江直樹: "発生シ

ステムの安定性がもたらす遺伝子発現パターンの進化的な保存性", 第45回日本分子生物学会, 幕張, 12月(2022)
※招待講演

●ポスター発表 Poster Presentations

(国際学会)

1. Uchida Y., Shigenobu S., Takeda H., Furusawa C. and Irie N.: "Potential contribution of intrinsic developmental stability toward body plan conservation", *Euro Evo Devo 2022, Napoli, June (2022)*

XX-024 気管陥入を駆動する三つのプロセスの協調機構の解明

Study of the coordination between three processes driving tracheal invagination

研究者氏名: 山下 慧 Satoshi YAMASHITA
受入研究室: 生命機能科学研究センター
形態形成シグナル研究チーム
(所属長 林 茂生)

ショウジョウバエ胚の気管陥入はアピカルコンストリクション (AC)、超細胞ミオシンケーブル、基底側での細胞分裂によって駆動されている。本研究ではACのモデルの見直しと、ACと超細胞ミオシンケーブルの協調について研究した。

ACは上皮組織の形態形成を駆動する基礎的なメカニズムで、頂端面に局在したミオシンが収縮力を発生し頂端面を縮め、細胞を柱形から楔形に変形させ、平坦な上皮組織を折り曲げるというモデルが提唱され受け入れられてきた。また、このモデルはvertex modelを用いたシミュレーションにおいてACを再現することが確かめられてきた。しかし、本研究で開発した上皮細胞を扱うことのできるcellular Potts modelを用いてシミュレーションにより頂端面に収縮力を発生させた場合の組織の変形を予想したところ、ACは再現されず、細胞が重層化された。細胞の形とエネルギーに関する解析により、先行研究のvertex modelによって予想された組織の変形は直線形に固定された細胞側面の影響によるものであり、実際の細胞では頂端面のミオシンの活性により細胞側面が湾曲するという予想が得られた。

上記の結果を踏まえ、本研究では現在のACモデルに代わるメカニズムとして、エンドサイトーシスによる頂端面の弾性的変化がACを駆動するという新モデルを提唱する。弾性が変化した細胞群は同時に頂端面を収縮させ、細胞内の圧力が上昇するが、その上昇が同程度である場合細胞側面は直線形に保たれると予想される。エンドサイ

トーシスがACに必要であるという遺伝学的な先行研究が近年報告されている。Cellular Potts modelを用いてこの新モデルをシミュレーションしたところ、ACの再現に成功した。また、ミオシンによる収縮力または細胞膜の弾性係数が高く、それらの和である表面張力が高すぎる場合には組織の頂端面は平坦に保たれるという予想が得られた。ショウジョウバエ胚の気管の周囲で圧力の変化を調べたところ、実際に陥入中の細胞内で圧力の上昇が見られた。

ACと超細胞ミオシンケーブルの強調について、上記ACの新モデルと超細胞ミオシンケーブルがadherens junctionに加える力を組み合わせてcellular Potts modelでシミュレーションしたところ、陥入が大きく促進されるという予想が得られた。この結果は頂端面の高すぎる表面張力がACを阻害するという予想と一致する。

●誌上発表 Publication

(原著論文)

1. Satoshi Yamashita, Boris Guirao, and François Graner: "From heterogeneous morphogenetic fields to homogeneous regions as a step towards understanding complex tissue dynamics", *Development* 148:dev199034 (2021)*

●ポスター発表 Poster Presentations

(学会)

1. Satoshi Yamashita and François Graner: "Apical

XX-025 三次元組織における空間情報を保持した1細胞遺伝子発現解析法の開発と幹細胞研究への応用

Development of single cell RNA-seq method for three-dimensional tissue retaining spatial information of each cell and its application to stem cell research.

研究者氏名：北條 望 Nozomi HOJO
受入研究室：生命機能科学研究センター
細胞システム動態予測研究チーム
(所属長 城口 克之)

幹細胞は自己複製能と分化能をもつ細胞である。組織中に少数存在する幹細胞が適切に維持、増殖、分化することで、正常な生体組織の発生・再生・恒常性の維持が行われており、その制御機構の破綻は、がんや変性疾患など様々な難治性疾患の発症に関与する。近年、急速に発展する幹細胞研究において、各組織に存在する幹細胞が次々と同定されるとともに、幹細胞ニッチと呼ばれる幹細胞周囲の微小環境が、幹細胞の維持・増殖・分化の制御に重要な役割を果たすことが明らかにされてきた。この幹細胞ニッチによる幹細胞制御機構をより詳細に解明するためには、幹細胞-ニッチ間相互作用に着目した網羅的な遺伝子発現定量法が有力な手法となる。

従来、三次元組織における幹細胞のふるまいやニッチとの相互作用は、マーカー遺伝子の発現に着目した免疫染色や、幹細胞・ニッチ細胞を標識したトランスジェニックマウスを用いたライブイメージングにより観察されてきた。しかしながら、これらの手法では、観察した細胞を対象に同時に測定できる遺伝子数に限りがある。一方で、近年1細胞RNAシーケンシング(scRNA-seq)が実現し、1細胞レベルでゲノムワイドな遺伝子発現プロファイルを得ることが可能になり、幹細胞研究においても強力な解析ツールとして広く用いられるようになってきた。しかしながら、現在のscRNA-seq手法では、三次元空間での細胞の位置情報を保持することが難しく、発現解析を行った

細胞の組織内でのふるまいを明らかにすることは困難である。

本研究では、これらの技術的課題を克服し、幹細胞-ニッチ間相互作用を詳細に理解するために、三次元組織における細胞の空間情報を保持した1細胞遺伝子発現解析法を開発する。また、開発した新規手法を用いて、幹細胞由来の三次元培養組織であるオルガノイドにおける幹細胞性の維持・細胞分化制御メカニズムの解明を目指す。

これまでに、肺の上皮細胞から三次元培養により作製した肺オルガノイドを用いて、空間情報を記録した細胞の遺伝子発現解析を行うためのツール開発を進め、1細胞遺伝子発現解析も実施した。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Jin J., Yamamoto R., Takeuchi T., Cui G., Miyauchi E., Hojo N., Ikuta K., Ohno H., Shiroguchi K.: “High-throughput identification and quantification of single bacterial cells in the microbiota”, *Nat Commun.*, 13(1):863 (2022)
2. Jin J., Ogawa T., Hojo N., Kryukov K., Shimizu K., Ikawa T., Imanishi T., Okazaki T., Shiroguchi K.: “Robotic data acquisition with deep learning enables cell image-based prediction of transcriptomic phenotypes”, *Proc Natl Acad Sci U S A.* 120(1):e2210283120. (2023)

XX-026 Towards a principled deep learning framework for genomics

Name: Hector CLIMENTE GONZALEZ

Host Laboratory: High-Dimensional Statistical Modeling Team
Generic Technology Research Group
RIKEN Center for Advanced Intelligence Project
Laboratory Head : Makoto YAMADA

In recent years deep learning has made celebrated advances in computer vision and natural language processing. This success is partly attributable to finding new ways to exploit the data's underlying structure. For instance, convolutional neural networks process images by leveraging spatial correlations between the pixels. Deep learning has also made great strides in solving genomic problems, often surpassing solutions based on classical statistical models. In this project, I focus on models whose input is a DNA sequence and whose output is a prediction on that sequence (e.g., whether or not it is a promoter). However, the community is less active, and the results are more modest. Some challenges specific to genomics explain this, including the high cost of obtaining data, the heterogeneity of biological problems, and the lack of structure.

Most architectures in genomics are similar to VGG, an 8-year-old computer vision model. Hence, the following research question: do advances in deep learning for computer vision lead to advances in genomics? What about natural language processing? If that were the case, we could advance deep learning in genomics by transposing advances from those fields.

We have identified four areas in which inspiration from other fields could help, and constated that advances in these areas lead to advances in genomic tasks. Besides experimenting with advances in other fields, genomics presents particularities requiring targeted designs. We are exploring adequate tokenization and exploiting double-strand symmetry. Lastly, we provide a deep-learning library for genomics, torchomics, which will help researchers prototype new ideas.

After establishing this framework, I will apply it to predict the effects of variants and mutations from the surrounding sequence. For that, I will use the best-performing model from the aforementioned study to the biological outcome of interest (e.g., gene expression prediction) and compare the predictions of the wild type and the mutated sequences.

● Publications

Papers

1. Climente-González H., Azencott C.-A., and Yamada M.: A network-guided protocol to discover susceptibility genes in GWAS using stability selection. STAR Protocols. In print*

XX-027 アミロイド生成・脱凝集過程におけるタンパク質の動的構造解析 Capturing Snapshots Of Dynamic Protein Structures In Amyloid Formation And Disaggregation

研究者氏名：野村 高志 Takashi NOMURA
受入研究室：脳神経科学研究センター
タンパク質構造疾患研究チーム
(所属長 田中 元雅)

タンパク質が繊維状に凝集したアミロイドは、アルツハイマー病やパーキンソン病のような神経変性疾患の原因とされている。しかし、神経変性疾患の根本的な治療法は未だ見つかっていない。それはアミロイドの生成・脱凝集メカニズムが明らかになっていないからである。本研究ではアミロイドの生成・脱凝集過程におけるタンパク質の構造変化を、分子レベルで可視化することで、そのメカニズムを明らかにする事を目的とした。生体中でアミロイドの生成・脱凝集をコントロールしている酵母の系 (Sup35) を中心に、哺乳類 (Tau, α -synuclein) の系へと発展さ

せ、それらの生成・脱凝集を比較すれば、その一般原理が明らかになると考えられる。これにより神経変性疾患の予防、抑制、治療へと発展する事を期待する。

アミロイドの生成・脱凝集過程を観測するために、昨年度は顕微FTIRと自作のマイクロフローセルを組み合わせた独自の赤外分光システムを開発した。また、クライオ電子顕微鏡単粒子解析の試料調製法を確立した。本年度は以下について取り組んだ。

- (1) 脱凝集反応の時間分解赤外分光測定。

脱凝集反応を実時間で観測するために、高速混合

マイクロフローセルを使った時間分解赤外分光測定を行った。昨年度はアミロイド脱凝集反応の第一段階である2種類のシャペロン (Ssa1, Sis1) との反応について予備的な実験データが得られていた。しかし、詳しく解析を進めると、アミロイドとシャペロン (Ssa1, Sis1) の混合効率が想定よりも少なく、また測定可能時間が短かったことから十分に反応が進んでいない事が明らかとなった。本年度は新しいセルをデザインし測定可能時間と混合効率の改善を目指した。様々なマイクロミキサーを比較し、赤外分光に合わせたデザインへと改良したもので予備実験を繰り返す事で、アミロイドの脱凝集反応観測に最適な新しい高速混合マイクロフローセルの開発に成功した。

(2) クライオ電子顕微鏡によるアミロイドの構造比較

Sup35は温度により2種類のアミロイド (Sc4, Sc37) を形成する。これらはシャペロンとの反応性が異なっており、その構造を比較する事はアミロイドの脱凝集反応メカニズムの解明において重要である。本年度はSc4, Sc37両方の三次元構造を決定し(投稿準備中)、さらに脱凝集反応中間体の取得にも成功した。脱凝集反応中間体については条件の最適化が必要であるが、様々な条件を比較、検討した結果、おおよそその実験条件が絞り込めたため、近日中にデータを取得する。

また、今後の研究に向け、アルツハイマー病の原因とな

るタウをリコンビナントで精製し、疾患型アミロイドを *in vitro* で調製、加えてクライオ電顕による構造解析も完了した。

●誌上発表 Publications

1. 野村 高志, 田中 元雅: “疾患関連タンパク質の液-液相分離とアミロイドの生成・脱凝集”, 生化学, 94(4): 566-573 (2022) (総説)

●口頭発表 Oral Presentations

1. Takashi Nomura, Yoshiko Nakagawa, Yusuke Komi, Shingo Tamai, Masako Yamazaki, Motomasa Tanaka, “The single-particle cryo-electron microscopic analysis of amyloid disaggregation reaction”, The 60th Annual Meeting of the Biophysics Society of Japan, Hakodate, September (2022)
2. Takashi Nomura “Time-resolved structural analysis of amyloid disaggregation reaction”, 学術変革領域 (A) クロススケール新生物学第一回若手の会, 千葉, 11月 (2022)

●ポスター発表 Poster Presentations

(会議)

1. Takashi Nomura, Yoshiko Nakagawa, Yusuke Komi, Shingo Tamai, Motomasa Tanaka ‘Structural dynamics analysis of amyloid disaggregation’ 学術変革領域 (A) クロススケール新生物学第二回領域会議, 金沢, 7月 (2022)

XX-028 MEASUREMENT OF CHROMATIN ARCHITECTURE, AND ITS FUNCTION IN REGULATING NEURONAL ACTIVITY

Name: Fangke XU

Host Laboratory: Laboratory for Neurodiversity
RIKEN Center for Brain Science

Laboratory Head: Adrian Walton MOORE

To study the chromatin and gene expression changes after the C4da neurons (somatic sensory neurons located in between muscles and epidermis) receive external stimulations, I proposed to apply DamID-seq for *in vivo* C4da neurons isolated after changing their activities. DamID is a technique similar to ChIP, but it is not as widely used as ChIP due to some technical limitations. However, it was more suitable for samples with smaller number of cells when the project was started. With the updated sequencing technologies, it also becomes possible to apply ChIP-seq to a smaller number of cells. In the past year, I have successfully customized ChIP-seq and ATAC-seq for FACS-sorted C4da neurons. The sequencing library profile

shown by bioanalyzer from ChIP anti-h3k27ac from ~1000 C4das is similar to mouse samples against the same histone marker. ATAC-seq library profile from ~600 C4da also displays correct peaks representing mononucleosome, dinucleosome and multinucleated fragments. I will continue utilizing those protocols to study the chromatin changes and the targets of key transcription factors upon stimulations.

It is well known that da neurons are essential for the larvae to make quick behavioral responses to external stimuli such as rolling. But whether longer-term effects could be generated to cause more systematical changes in the larvae is less studied. Therefore, the specific genes that in response to da neurons' activity

changes would be the key to understand the long-term consequences better. I have found that nutrition intake is reduced after C4das are activated. Some genes that are potential targets of the key transcription factor, cut (ct), can also affect nutrition intake. The CUT level also changes upon c4da activation based on previous data. Therefore, I am interested in whether those genes can

be direct targets of CUT and whether their expression level will change after c4da activation. Initial RNA-seq experiments will be soon submitted for sequencing within this month. I am also looking forward to finding out more genes that may mediate the long-term changes and affect the animals' overall fitness.

XX-029 結合テンソル分解による異種バイオデータの統合解析

Integrated Analysis of Heterogeneous Biological Data by Coupled Tensor Factorization

研究者氏名：露崎 弘毅 Koki TSUYUZAKI

受入研究室：生命機能科学研究センター

バイオインフォマティクス研究開発チーム
(所属長 二階堂 愛)

マイクロアレイや次世代シーケンサーなど高出力な生体分子計測技術の発展により、個体を構成する細胞内の生体分子・現象が網羅的に計測され、疾患の理解や生物の進化研究など、幅広い生命科学分野に応用されている。しかしながら、このような実験データは日々公共データベースに蓄積され続けているものの、研究者がそれらを二次利用することは容易ではない。また異なる実験技術で計測した、種類の異なるバイオデータ(ここでは“異種バイオデータ”とする)を利用して、生物学的な知見を得ることはなお難しい。本研究では、研究者が生み出す異種データ同士を繋ぎ合せ、自由に他の研究者の研究成果を自分の研究に活用することを考える。本研究の成果により、散在する生命科学者の知識は融合され、研究コミュニティ全体の新しい発見や技術開発力の促進が期待できる。

本年度は、テンソル分解を利用して、1細胞RNA-Seqデータから細胞間相互作用を検出するR言語パッケージscTensorの論文を執筆・投稿した。また、テンソルはオーダーが大きくなるにつれて、データサイズが巨大化するという問題点があることから、データの一部だけをメモリに展開して利用するOut-of-core実装や、非ゼロの値だけを計算に利用するスパース形式を利用したR言語パッケージDelayedTensorを開発した。また、データ構造が複雑なテンソルデータでも容易にテンソル分解が行えるようにするためのR言語パッケージmwTensorを開発した。現在mwTensorをアミノ酸配列から、タンパク質相互作用を予測する問題に適用しているところである。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Detecting time-evolving phenotypic components of adverse reactions against BNT162b2 SARS-CoV-2

- vaccine via non-negative tensor factorization, Kei Ikeda, Taka-Aki Nakada, Takahiro Kageyama, Shigeru Tanaka, Naoki Yoshida, Tetsuo Ishikawa, Yuki Goshima, Natsuko Otaki, Shingo Iwami, Teppei Shimamura, Toshibumi Taniguchi, Hidetoshi Igari, Hideki Hanaoka, Koutaro Yokote, Koki Tsuyuzaki, Hiroshi Nakajima, Eiryu Kawakami, iScience, 25(10) 105237-105237 (2022/10)
2. Improved MeSH analysis software tools for farm animals, Sabrina T. Amorim, Koki Tsuyuzaki, Itoshi Nikaido, Gota Morota, Animal Genetics, 53(1) 171-172 (2022/2)

(総説)

1. 露崎弘毅、行列・テンソル分解によるヘテロバイオデータ統合解析の数理—第4回 質的データ、距離、グラフ—, JSBi Bioinformatics Review, 3(2), 33-46(2022/11)
2. 露崎弘毅、行列・テンソル分解によるヘテロバイオデータ統合解析の数理—第3回 テンソル分解—, JSBi Bioinformatics Review, 3(1), 20-33 (2022/6)

(単行本)

1. 小野浩雅監修、露崎弘毅、バイオDBとウェブツール：ラボで使える最新70選：知る・学ぶ・使う、バイオDX時代の羅針盤 第1章 研究を効率化する汎用ツール、プロトコル共有、7. Code Ocean - コード、計算環境をまるごと公開、共有するサービス—, 羊土社(2022/11)

●口頭発表 Oral Presentations

(学会)

1. 露崎弘毅、生命科学にパラダイムシフトを起こすテンソル分解技術、IPSP-ONE 2022 2022/3/5

XX-030 血球・免疫系細胞の分化に寄与する膜輸送タンパク質
solute carriers (SLCs)の探索および機能研究
Functionalization of Solute Carriers in Hematopoietic Differentiation

研究者氏名：橋本 真里 Mari HASHIMOTO
受入研究室：生命医科学研究センター
ヒト疾患モデル研究チーム
(所属長 石川 文彦)

細胞は脂質二重膜を有し、細胞外環境と隔てられている。従って、細胞外から細胞内に物質を輸送するために複数の経路が存在する。その代表的な経路がイオンチャンネルや受動拡散、ATP駆動性ポンプによる能動輸送、およびトランスポーターを介した能動輸送系である。Solute carrier (SLC) は400以上のファミリーメンバーを有する膜タンパク質であり、トランスポーターとして機能する。アミノ酸、金属イオン、核酸、ペプチド、およびビタミン類など多様な水溶性物質を濃度依存的に膜内外に輸送し、細胞内の物質濃度の恒常性維持に寄与する。輸送した物質は細胞内において代謝リソースやシグナル分子として機能し、細胞内代謝の維持と不要物の排出に寄与する。また、細胞分化やがん化に伴い代謝プロファイルが変化することが知られ、SLCsは代謝物の輸送を介し、こうした代謝

系変化に寄与することが報告されている。しかしながら、造血幹細胞から免疫細胞系への分化においてSLCsが担う役割は、ほとんど検討されていない。従って、本研究ではRNA-seqデータを用いて造血幹細胞・血球系細胞の遺伝子発現プロファイルを解析し、SLCsの発現量変化を調べた。その結果、分化に伴いSLCs発現プロファイルが変化することが示され、細胞内の代謝と紐づいていることが示唆された。さらに、患者由来白血病細胞を用いて、SLCsの遺伝子欠損実験を行い、SLC機能の欠失は細胞生存率を低下させることが見出された。今後、SLCsの物質輸送が分化に及ぼす機能、および細胞生存に影響する機序を解析する予定である。本研究によって、免疫系細胞の分化や細胞生存に関わる代謝系と、その維持に寄与するSLCの新たな役割が見出されることが期待される。

XX-031 消化器機能を調節する交感神経系の分子遺伝学的解析
Molecular Genetic Analysis Of Sympathetic Nervous System That Modulates
Gastrointestinal Functions

研究者氏名：播磨 有希子 Yukiko HARIMA
受入研究室：生命機能科学研究センター
比較コネクトミクス研究チーム
(所属長 宮道 和成)

脊髄損傷は、運動神経だけではなく自律神経の機能障害も引き起こす。脊髄損傷に関する研究の多くは運動機能の麻痺に着目し、高次中枢と運動神経との失われた接続を回復あるいは代替する努力が基礎や臨床の各分野で続けられている。しかし、心血管系、呼吸器系、消化器系など自律神経によって制御される生命に必須の調節機能の障害は、患者のQOLを著しく低下させるにも関わらず治療はほとんど調べられていない。実際、運動神経と筋肉との接続パターンは深く研究されており、近年の分子遺伝学的手法が広く導入されているのに対して、自律神経の分布やその機能的多様性についての新たな報告は少ない。そこで、消化器を支配することで知られる腹腔・上腸間膜神経節(交感神経節後神経の集合体)を起点に交感神経節前神経の逆行標識を行った。さらに、標識した

節前神経を、2020年の*Nature neuroscience*誌に報告された脊髄における一細胞解析の結果をもとに*in situ hybridization*を行い、遺伝学的特徴を調べた。その結果、消化器機能を特異的に制御する交感神経節前神経に関しては、これまで約40年以上信じられてきた一般的な交感神経節前神経の遺伝学的特徴とは異なることがわかった。これまで、交感神経節前神経の代表的なマーカー遺伝子としてnNosが知られてきたが、消化器に接続する交感神経節前神経はnNos陰性で、Cartpt陽性ということがわかった。そこで、Cartpt-iresCreマウスの作製を新規に行い、Cartpt陽性節前神経の薬理的な活性化を行った。具体的には、Cartpt-Creマウスの脊髄にAAV8-hSyn-DIO-hM3Dq(Gq)-mCherryをinjectionし、約2-3週間後にCNOを投与することにより腸機能や血糖値

の測定を行った。その結果、Cartpt陽性の節前神経を活性化させると、腸機能が低下したが、血糖値は変化しなかった。全ての節前神経はChAT陽性であることが知られているため、ChAT-iresCreマウスを用いて同様の実験を行った結果、腸機能の低下、そして血糖値の上昇が確認された。つまり、これらの結果から、Cartpt陽性の交感神

経節前神経は消化器機能を特異的に制御することが明らかになった。今後は、血糖値制御に関与する交感神経節前神経の遺伝学的特徴を特定するなど、交感神経の臓器機能制御に関して、より網羅的な調査を目指している。これらの成果は、将来的に臓器機能障害に対する新たな治療法に繋がることが期待される。

XX-032 オルガノイド技術を用いた、肺線維症における上皮細胞老化の意義と新規薬剤の探索

Significance of epithelial cellular senescence in lung fibrosis: discovery of new drugs using alveolar organoid technology

研究者氏名：榎本 泰典 Yasunori ENOMOTO
受入研究室：生命機能科学研究センター
呼吸器形成研究チーム
(所属長 森本 充)

1. 背景

肺線維症は加齢に伴い有病率が増加する予後不良な疾患である。発症には上皮、血球、間葉系細胞など複数の細胞種が相互に関与し、肺胞の不完全な組織修復により線維化に至る。病態の起点としては、肺胞上皮の傷害や細胞老化の関与が想定されている。実際、家族性肺線維症や特発性肺線維症患者では、高頻度にテロメアの短縮が見られ、加齢・細胞老化と肺線維症との関連を裏付けている。また最近では、老化細胞のgenetic ablation、あるいは抗老化作用のある薬剤の全身投与がマウスの肺線維症を改善させるという報告もある。しかしこれらの既報では、どの細胞種の老化が、どの線維化プロセスに寄与しているのかが明確でなかった。また、肺線維症の代表疾患である特発性肺線維症は非炎症性疾患として位置づけられており、実際、本症に対する免疫抑制療法の効果は否定されている。よって、炎症に依存しない線維化プロセスの重要性が示唆されるが、既存の実験系では全身性作用と肺胞局所の細胞間相互作用の区別は難しく、本質的な分子病態解明へのアプローチが難しかった。

2. 研究の目的

肺線維症における細胞老化の病態的意義を細胞・分子レベルで明らかにすること。またこれを踏まえた肺線維化モデルを*in vitro*で確立し、炎症に依存しない肺胞上皮由来の線維化プロセスを明らかにすること。

3. 研究の方法

(1) 線維化肺における主たる老化細胞種の同定

ヒト肺やマウス肺における既存のtranscriptomeデータセットや、ブレオマイシン (BLM) 誘導性マウ

ス肺線維症モデル肺切片を用いて、線維化肺においてどの細胞腫が老化状態にあるのか検証した。

(2) 肺胞オルガノイドの作成と細胞老化誘導

マウス肺よりII型肺胞上皮細胞 (AT2) をFACSで単離培養し、肺胞オルガノイドとして*in vitro*で肺胞上皮様組織を作成した。またそこにBLMを作用させ細胞老化を誘導した。

(3) *in vitro* 肺線維症モデルの確立とメカニズムの解析

老化誘導した肺胞オルガノイドと肺線維芽細胞を共培養し、老化AT2が、直接的に線維芽細胞を α SMA (*Acta2*) 陽性の筋線維芽細胞へと分化させるプロセスを再現した。またその分子メカニズムに迫った。

(4) ヒトAT2におけるバリデーション

ヒト肺よりAT2を単離し、マウスで見られた現象がヒトでも保存されているのか検証した。

4. 研究成果

(1) 線維化肺における主たる老化細胞種の同定

既存transcriptomeデータセットの再解析を行うと、ヒト線維化肺において上皮細胞で代表的な老化マーカーであるp53シグナルが活性化していた。またマウスBLMモデルにおいても、AT2-lineage細胞でp53シグナルの顕著な活性化とその下流因子p21の高発現を認めたことから、線維化肺における主たる老化細胞は肺胞上皮、特にAT2-lineage細胞であると結論づけた。

(2) 肺胞オルガノイドの作成と細胞老化誘導

AT2-lineage細胞をマーキングできる*Sftpc-creERT2;Rosa-mTmG*マウスラインを用いて、そ

こからFACSでAT2 (GFP+) を単離し、三次元培養法にてfeeder-free環境で肺胞オルガノイドを作成した。そこにBLMを作用させたところ、*in vivo*同様、p53シグナルの活性化を確認でき、また染色ではSenescence-associated β -gal. 陽性も確認されたことから、細胞老化の再現に成功した。

(3) *in vitro* 肺線維症モデルの確立とメカニズムの解析

肺線維化の代表的指標となる筋線維芽細胞の誘導を可視化するため、*Acta2-DsRed* マウス由来の肺線維芽細胞 (PDGFR α +DsRed-) を単離し、これを老化誘導後の肺胞オルガノイドと共培養した。その結果、オルガノイド周囲にDsRed陽性となった筋線維芽細胞を確認できたことから、炎症細胞を介在せずに傷害を受けたAT2が直接筋線維芽細胞を誘導できることを明らかにした。またこの反応はp53のコンディショナルノックアウト (CKO) マウス (*Sftpc-creERT2;Trp53-flox/flox*) 由来のAT2を用いた場合には抑制された。さらに遺伝子解析や、TGF β 活性化因子であるIntegrin α V β 6中和抗体を用いた実験結果から、AT2由来の活性化TGF β が筋線維芽細胞の直接誘導因子であることがわかった。一方、AT2におけるTGF β シグナルを抑制するTgfbr2-CKOマウス (*Sftpc-creERT2;Tgfbr2-flox/flox*) を用いた場合にも共培養の反応は抑制され、逆にAT2にTGF β を作用させた場合には筋線維芽細胞誘導がより促進されることから、AT2由来のTGF β はオートクラインとしてAT2に作用し、その筋線維芽細胞誘導能をさらに増強するといったpositive feedbackループを形成していることが示唆された。これらの結果と一致して、*in vivo*において、AT2特異的p53-CKO、

Tgfbr2-CKOマウスいずれでもBLM誘導性の肺線維化が軽減されることがわかった。

(4) ヒトAT2におけるバリデーション

マウスにおける実験系をベースとして、ヒト正常肺から単離したAT2の三次元培養及び肺線維芽細胞との共培養を行った。その結果、マウス同様、ヒトAT2においてもBLM刺激に伴うp53シグナルの亢進と筋線維芽細胞誘導能の獲得、ならびにAT2自身へのTGF β 刺激による筋線維芽細胞誘導能の増強を確認できた。

以上の結果により、炎症非依存性の環境下で、傷害を受けたAT2がいかにして肺線維化を誘導するのか、そのプロセスを*in vitro*で再現・可視化し、その分子病態メカニズムを明らかにした。

<今後の展望>

肺の線維化モデルは*in vivo*におけるBLM誘導性肺線維症誘導モデルが一般的であるが、作成に数週間の時間を要すこと、相当数のマウスが必要であること、個体間の実験誤差が大きいといった問題があった。また、既存の肺線維症薬剤はすべて線維芽細胞を主たる標的としており、AT2を起点とした線維化機序へのアプローチができていなかった。今回の研究で確立したAT2と肺線維芽細胞の共培養系を用いることで、新規肺線維症治療薬探索を目的としたハイスループット化合物スクリーニングが可能となる。また、*Acta2-DsRed* マウス由来の線維芽細胞の蛍光強度 (筋線維芽細胞化の程度) を指標とした線維化能の評価は非常に感度が高く、線維化促進因子であるTGF β の増減をpg/mLレベルの超低濃度域で捉えることが可能である。これを用いることで肺・AT2に限らず、全身諸臓器の線維化モデルとしての幅広い応用を検討していく。

XX-033 視索前野および扁桃体領域による社会的接触行動の分子神経基盤の解明

Neural Basis for Affiliative Social Contact in the Preoptic Area and Amygdala

研究者氏名：福光 甘齋 Kansai FUKUMITSU
受入研究室：脳神経科学研究センター
親和性社会行動研究チーム
(所属長 黒田 公美)

社会性動物であるヒトや齧歯類など一部の動物は群れを形成して生活することを好む。それゆえ、社会的接触が絶たれると抵抗反応と呼ばれる社会的な接触を求める行動が見られる。しかし社会的接触に関わる分子神経機構については未解明な部分が多い。前年度までの成熟雌マウスを用いた研究で、内側視索前野 (MPOA) に局在す

るカルシトニン受容体 (CalcR) シグナリングが、網越しに社会的隔離した時に仕切の向こう側の他個体と接触を求める行動 (抵抗反応: contact-seeking)、および社会的隔離2日後に再集団したときにみられる親和的な社会的接触行動 (social contact) の両方の制御に関わることを明らかにした。またCalcRのリガンドとしてしられるアミ

リンおよびアミリンを発現する神経細胞もMPOAに局在し、特に社会的隔離下でみられるcontact-seekingを制御すること明らかにした。

本年度は、以下の実験を行うことで、内側扁桃体(MeA)に局在するカルシトニン受容体の性質を明らかにするとともに、社会的接触行動の制御に重要な役割を果たすことを明らかにした。

- (1) MeAカルシトニン受容体細胞にGad67が発現することが免疫組織学的解析から分かり、MeAカルシトニン受容体細胞はGABA作動性神経細胞であることが明らかになった。
- (2) MPOAカルシトニン受容体細胞とは異なり、MeAカルシトニン受容体細胞にはエストロゲン受容体は発現しないことが分かった。
- (3) カルシトニン受容体遺伝子に対するshort-hairpin RNA (shRNA) を用いMeAカルシトニン受容体発現を抑制すると再集団化飼育後にみられる社会的接

触行動の亢進がみられた。このことから、MPOAカルシトニン受容体は再集団化飼育後にみられる社会的接触行動を促進するのに対し、MeAカルシトニン受容体は社会的接触を抑制する機能があることが示唆された。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Fukumitsu, K., Huang, AJ., McHugh, TJ., Kuroda, KO."Role of Calcr expressing neurons in the medial amygdala in social contact among females" *Molecular Brain* (2023), (in press)

●ポスター発表 Poster Presentations

1. 福光甘斎、黒田公美,"扁桃体領域による社会的接触行動の制御機構", 第45回日本神経科学大会, 沖縄県宜野湾市(2022.6)

XX-034 The Flux of GABA Regulates Inflammatory Responses in Macrophages

Name: Baihao ZHANG

Host Laboratory: Laboratory for Mucosal Immunity
RIKEN Center for Integrative Medical Sciences
Laboratory Head: Sidonia FAGARASAN

Metabolites have emerged as the critical factors of the immune system, involved in both metabolic circuits and signaling cascades. There is growing evidence that immune cell subsets can deliver various metabolites into the local environment as a result of metabolic adaptation. In addition to proteinogenic ligands, secreted immune metabolites (SIMets) also intensively participate in immune communication networks and fine-tune the immune responses in homeostatic and pathological conditions. Recently, we identified the metabolite and neurotransmitter GABA as a signaling molecule synthesized and secreted by activated B cells in humans and mice. We found that B cell-derived GABA promoted monocyte differentiation into anti-inflammatory macrophages which secreted IL-10 and inhibited CD8⁺ T cell killer function. In mice, B cell deficiency or B cell-specific inactivation of the GABA generating enzyme GAD67 let an insufficiency of GABA production, it enhanced cytotoxic function of tumor-infiltrating CD8⁺ T cells and promoted the differentiation of tumor-associated macrophages with pro-inflammatory properties. Moreover, we found that monocytes also expressed GAD67, and synthesized and secreted GABA during their differentiation. We revealed that the ablation of GAD67 specifically in

myeloid cells facilitated monocytes differentiation into pro-inflammatory macrophages, and suppressed tumor growth in mice bearing LLC tumor, which suggests that GABA regulates the phenotype of monocytes and macrophage in an autocrine and paracrine manner. Furthermore, the blockage of GABA receptors and transporters perturbed the effects of both exogenous and endogenous GABA, indicating a critical role in the flux of GABA for macrophage differentiation and polarization. Our study reveals that SIMets engage in immunological synapse through the receptor and transporter, which may be targeted to develop effective therapeutics against inflammatory and immune diseases.

● Publication

Original Paper

1. Baihao Z., Alexis V. and Fagarasan S.: Secreted immune metabolites that mediate immune cell communication and function. *Trends Immunol.* 2022 Dec*

MISC

1. Baihao Zhang: "B細胞由来のGABAはIL-10陽性マクロファージ誘導により抗腫瘍免疫を抑制する",『臨

床免疫・アレルギー科』第78巻 第1号, 2022, 科学評論社.

2. Baihao Zhang: “B細胞由来のGABAは抗腫瘍免疫を抑制する”, 『医学のあゆみ』, 第283巻 第13号, 2022, 医歯薬出版株式会社

● Oral Presentation

Conference

1. Baihao Z (Invited speaker): “GABAを標的とする抗腫瘍免疫機構” The 30th Molecular Immunology Forum Tokyo, Tokyo Japan 2022, March 29.
2. Baihao Z (Invited speaker): “B細胞由来のGABAはIL-10陽性マクロファージ誘導により抗腫瘍免疫を抑

制する” The 17th KIRIN JUKU, Tokyo Japan 2022, July 23.

3. Baihao Z (Invited speaker): “B cell-derived GABA elicits anti-inflammatory macrophages limiting anti-tumor cytotoxic responses” EUROPHYSIOLOGY 2022, Copenhagen Denmark 2022, September 16-18.
4. Baihao Z (Invited speaker): “B cell-derived GABA elicits IL-10+ macrophages to limit anti-tumour immunity” The 81st Annual Meeting of the Japanese Cancer Association, Yokohama Japan 2022, September 29-October 1.

XX-035 ひらめきによる学習を支える後部頭頂皮質の計算機構と神経基盤

Computation and neural implementation for insight-based learning in posterior parietal cortex

研究者氏名：青木 亮 Ryo AOKI

受入研究室：脳神経科学研究センター

視覚意思決定研究チーム

(所属長 Benucci Andrea)

適切な行動の選択を迅速に学習することは動物の生存のために重要である。ひらめきは暗黙的な知識を利用することでそのような迅速な学習を可能にすると考えられているが、その計算原理及び神経基盤は明らかになっていない。本研究課題では遺伝的操作が容易なマウスに新規刺激に対するひらめきを伴う認知心理学的課題を学習させ、その際の神経活動を記録、及び操作することで、ひらめきは新規刺激を表象する神経集団活動と既存の神経集団ダイナミクスの中に結びつきが起こることで引き起こされるという仮説を検証する。

これまでの研究により、研究室で開発した大規模訓練装置を用いてマウスで安定してひらめき行動を引き起こせるような行動課題の確立に成功し、さらに心理物理学的な解析により、その特性及びヒトのひらめき行動との類似性を明らかにしてきた。

本年度は、前年度までに確立された実験系を用いて、行動中のマウスの神経細胞を記録、操作する実験を行った。

- (1) Neuropixelsプローブを用いて課題遂行中のマウスの神経細胞の活動を記録し、課題の遂行にかかわる認知的機能（視覚刺激、行動）を反映した神経細胞を同定した。さらにこれらの神経細胞集団ダイナミクスを一般化線形モデル、targeted dimension reductionなどの数理的手法を用いて詳細に解析し、

学習前後のダイナミクスが類似していることを示唆する結果が得られた。

- (2) Spatial light modulatorを用いたホログラフィック光刺激装置により覚醒下のマウスの神経活動を一細胞単位で操作し、周辺の神経細胞に活動がどのように伝播するのかを詳細に解析した。その結果、神経細胞の自発的な活動パターンから推定される機能的な接続と、一細胞操作に対する周辺細胞の応答性の間に相関があることが示唆された。この結果は日本神経科学大会で発表された。

●誌上发表 Publications

(原著論文)

1. Javier G Orlandi, Mohammad Abdolrahmani, Ryo Aoki, Dmitry R Lyamzin, Andrea Benucci: “Distributed context-dependent choice information in mouse posterior cortex.”, Nature Communications, Jan12; 14(1): 192 (2023)

●ポスター発表 Poster Presentations

1. Ryo Aoki, Javier G Orlandi, Andrea Benucci: Characterizing the recurrent connectivity in the mouse visual cortex with holographic two-photon stimulation., 第45回日本神経科学大会, 沖縄, Jul (2022)

XX-036 Attosecond pump-probe spectroscopy: ultrafast dynamics in atoms and molecules

Name: Bing XUE

Host Laboratory: Attosecond Science Research Team
RIKEN Center for Advanced Photonics

Laboratory Head: Katsumi MIDORIKAWA

During the fiscal year of 2022, the experimental characterization of the generated isolated attosecond pulse by Frequency-Resolved Optical Gating for Complete Reconstruction of Attosecond Bursts (FROG-CRAB) has been successfully implemented. The final reconstructed results show the retrieved IAP pulses are 226 as. This result indicates the output peak power for the isolated attosecond pulse exceeds 1 gigawatt. This result also achieves the highest power record of a table-top high-power attosecond pulse source, which is suitable for further attosecond pulse applications, like ultrafast dynamics research. The reporting paper has been published in the high-impact journal of *Optica*. This work is also reported by the news media Nikkei Inc.

Later this year, all-optical FROG-CRAB measurements are successfully applied for the characterization of the isolated attosecond pulse with higher acquirement speed. The results have good agreements with the original FROG-CRAB measurement. This method will be helpful for the attosecond pulse fast characterization and tuning.

Another application is also attempted to use the intense attosecond pulse to generate the second harmonics in the soft-X-ray region. Due to the limitation of experimental conditions, the current result is not obvious yet, and it is expected to be proved later by upgrading the soft-X-ray focusing system with the new demonstration. The ongoing work has been planned

after this SPDR project.

● Publications

Papers

1. Xue B., Midorikawa K. and Takahashi E.J.: "Gigawatt-class, tabletop, isolated-attosecond-pulse light source", *Optica* 9, 360-363 (2022).

● Oral Presentations

Conferences

1. Xue B., Midorikawa K. and Takahashi E.J.: "Temporal characterization of gigawatt isolated attosecond pulses with the overall all-optical FROG-CRAB", in the 83rd JSAP Autumn Meeting, 23a-C205-2, Japan, September (2022).
2. Xue B., Midorikawa K. and Takahashi E.J.: "Giant isolated attosecond pulse generated on a tabletop", in the International Conference on Ultrafast Phenomena (UP), W3A.4, Canada, July (2022).
3. Xue B., Midorikawa K. and Takahashi E.J.: "Retrieval of a low-repetition intense isolated attosecond pulse by streaking method", in the 1st International Conference on UltrafastX 2021, Or-2, China, April (2022).
4. Xue B., Midorikawa K. and Takahashi E.J.: "Realization of compact GW-scale soft x-ray isolated attosecond pulses", in the High-Brightness Sources and Light-Driven Interactions Congress, HTh3B.5, Hungary, March (2022).

XX-037 高Q値微小光共振器による新たなナノスケール非線形光学の開拓 Exploring Novel Nanoscale Nonlinear Optics using High-Q Optical Microresonators

研究者氏名: 藤井 瞬 Shun FUJII

受入研究室: 光量子工学研究センター

量子オプトエレクトロニクス研究チーム
(所属長 加藤 雄一郎)

高Q値微小光共振器はミクロンスケールの微小な光モード領域にレーザー光を高効率に閉じ込めることのできる光素子である。このような微小光学素子を利用することで、 Q/V に比例して光密度を高めることが可能となり、光パラメトリック発振や四光波混合をはじめとする種々の非線形光学現象を観測することが可能になる。この技術を応用す

ることで、数W級の大型の励起レーザーを用いるようなハイパワーな超高速光技術や、光子数個のコヒーレンスを操作するような光量子技術がチップ上に集積された微小光素子で実現できる。鍵となるのは光の閉じ込め、波長変換に利用される高Q値微小光共振器であり、本研究では微小光共振器に低次元ナノマテリアルを融合し、材料に制限

されない新たな非線形光学の開拓を目指している。

一般的にグラフェンや遷移金属カルコゲナイドに代表される層状二次元材料における非線形光学現象は基板上に成長または転写されたのち、高強度パルスレーザーを集光・照射することで誘起される。一方で二次元材料を高Q値微小共振器素子に直接集積し、内部閉じ込めによって増強された光モードの相互作用を利用するという本研究のアプローチはフォトニクス技術との親和性が高く、将来の光エレクトロニクス技術においても大きな意義がある。

本年度は単層から数層に剥離したセレン化タングステンをシリカ微小光共振器上に転写したデバイスを用いて、第二次非線形光学効果である第二高調波発生および和周波発生が効率的に発生可能であることを世界で初めて実証した。シリカガラスは本来第三次非線形効果しかもたない物質であり、二次（偶数次）の非線形光学効果は抑制される。しかし厚み数ナノメートル以下の薄膜二次元材料を転写したハイブリッドデバイスを用いることで数ミリワット以下の低パワー連続光入力でも二次非線形現象が誘起可能であることを示した。さらに、セレン化タングステン由来のフォトルミネッセンスと共振モードの結合やバンドギャップの変調という興味深い現象も実験的に観測するなど、高Q値微小光共振器と低次元ナノ材料の融合によるナノスケー

ル非線形光学に関する研究を立ち上げ、推進することができた。本研究を足がかりとし、さらなる深化と発展を目指して今後も研究を進めていきたい。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Fujii S., Wada K., Sugano R., Kumazaki H., Kogure S., Yuichiro Kato., and Tanabe T., “Versatile tuning of Kerr soliton microcombs in crystalline microresonators,” arXiv:2206.13782, (submitted)

●口頭発表 Oral Presentations

1. Fujii S., “Systematic microresonator dispersion engineering for frequency comb generation,” The 11th Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS2022), Yokohama, Japan (April, 2022).

●ポスター発表 Poster Presentations

1. Fujii S., Wada K., Kogure S., Kumazaki, and Tanabe T., “Active Thermal Tuning of a Soliton Frequency Comb in a Crystalline Optical Microresonator”, Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2022), San Jose, USA, (May, 2022).

XX-038 Exciton physics in 1D-2D heterostructures and its applications

Name: 方 楠 (Nan FANG)

Host Laboratory: Nanoscale Quantum Photonics Laboratory
RIKEN Cluster for Pioneering Research
Laboratory Head: Yuichiro KATO

After the discovery of graphene, extensive research has been done in nanomaterials. The search for additional two-dimensional (2D) materials has led to the findings of hexagonal boron nitride (h-BN) and transition metal dichalcogenides (TMDCs). These 2D materials are bonded by van der Waals (vdW) force between individual layers, which makes it possible to combine with other low-dimensional materials such as one-dimensional (1D) carbon nanotubes (CNTs) to create mixed-dimensional heterostructures. The electron-hole pairs are tightly bound to form excitons in these low-dimensional materials because of limited screening of the Coulomb interaction. The excitonic behavior varies severely in different dimensions, and the excitons in the mixed-dimensional 1D-2D heterostructures are anticipated to have exceptional properties that are different from excitons in either dimension.

We first study h-BN effects on CNT photoluminescence spectra by transferring h-BN flakes over air-suspended

CNTs grown over trenches to SiO₂/Si substrates. The quenching and broadening effects are clearly suppressed when CNTs are attached on the h-BN substrate because of the low defect density, chemical inertness, hydrophobic nature, and the absence of dangling bonds on the surface. Moreover, the anomalously large redshifts in E₁₁ and E₂₂ of ~50 meV are observed, and are dependent on the diameter of CNTs. The results demonstrate the ideal properties of h-BN as a substrate for CNT photonic devices.

We then investigate Tungsten diselenide (WSe₂)-CNT heterostructures effects with precise control of WSe₂ atomical layer number as well as CNT chiralities. The band alignment between WSe₂ and CNT can be modulated seriously by controlling the chiralities of CNTs. The CNTs with large diameters form type I band alignment with WSe₂, and a clear exciton transfer from WSe₂ A exciton state to CNT E₁₁ state is observed. The PL spectra are enhanced with ~1.8 at WSe₂ A-exciton

excitation because of the large absorption cross section of WSe₂, long A exciton diffusion, and efficient transfer process. We also find a clear trion transfer from WSe₂ to CNT along with the exciton transfer process, which indicates a novel mechanism to form trions without introducing free carriers. The transferred trion has different laser power dependence from the exciton, which indicates individual transfer channels for each process. Type II band structure is formed for CNTs with small diameters, and new low-energy peaks are observed. The excitons of these peaks are strongly localized, which are characterized by laser power dependence and time-trace PL measurement. With careful control of WSe₂ layer number, the appearances of these peaks are clearly modulated. Since the new peaks are affected by both CNT chiralities and WSe₂ layer number, we consider them to be interlayer excitons, whose orbitals locate within both materials.

● Publications

Papers

1. Nan Fang, Daiki Yamashita, Shun Fujii, Keigo

Otsuka, Takashi Taniguchi, Kenji Watanabe, Kosuke Nagashio, and Yuichiro K. Kato: "Quantization of mode shifts in nanocavities integrated with atomically thin sheets," *Advanced Optical Materials* 10, 2200538 (2022).

2. Ruixi Zhang, Ya Feng, Henan Li, Akihito Kumamoto, Shuhui Wang, Yongjia Zheng, Wanyu Dai, Nan Fang, Ming Liu, Takeshi Tanaka, Yuichiro K. Kato, Hiromichi Kataura, Yuichi Ikuhara, Shigeo Maruyama, and Rong Xiang: "Fabricating one-dimensional van der Waals heterostructures on chirality-sorted single-walled carbon nanotubes," *Carbon* 199, 407 (2022).

● Poster Presentations

1. Nan Fang, Keigo Otsuka, Takashi Taniguchi, Kenji Watanabe, Kosuke Nagashio, Yuichiro K. Kato, "Hexagonal boron nitride as an ideal substrate for carbon nanotube photonics," *The 22nd International Conference on the Science and Applications of Nanotubes and Low-Dimensional Materials (NT22)*, Suwon, Korea (June 20, 2022).

XX-039 Elucidation of structure and role of protein-protein interactions inside spider glands: Knowledge based development.

Name: Nur Alia OKTAVIANI

Host Laboratory: Biomacromolecules Research Team
RIKEN Center for Sustainable Resource Science
Laboratory Head : Keiji NUMATA

Spider dragline silk is a hierarchically structured fiber composed primarily of the spider silk proteins (spidroins) MaSp1 and MaSp2. Both MaSp1 and MaSp2 have distinct mechanical properties due to the difference on the repetitive sequences. The self-assembly of spider dragline silk is mediated by N-terminal domain (NTD) dimerization in a response to pH and salt-gradient. A detailed understanding of the pH relay mechanism has been elusive, however, mainly due to the lack of direct experimental observations on the protonation behavior of individual key residues. Here, we elucidated the two NTD structures of the two dragline spidroins, MaSp1 (PDB ID: 7W1O) and MaSp2 (PDB ID: 8GS7), as well as experimental pK_a values of conserved residues involved in dimerization using solution-state NMR. Our results show that the D40 residue is protonated at an unusually high pH (~6.5-7.1) and this process is followed by the protonation of E119 and E79, with elevated pK_as, to form stable dimers. Here, we show the sequential mechanism is conserved for both the MaSp1 and MaSp2, which is the key for regulating rapid pH-dependent self-assembly of spider silks.

Furthermore, due to similarities on the NTD MaSp1 and MaSp2 structures as well as sequential pH-dependent dimerization for both MaSp1 and MaSp2, the mixture of NTD MaSp1 and MaSp2 at acidic pH has the capability to form both homodimer and heterodimer structures, as probed by solution-state NMR spectroscopy. The structure of heterodimer NTD MaSp1 and MaSp2 which was successfully determined by semi empirical method (chemical-shift Rosetta), is very similar to the structure of NTD homodimer. The average of signal intensity ratio of heterodimer and homodimer increases when the ratio of NTD MaSp1 and MaSp2 close to 1. However, the maximum signal intensity ratio between hetero and homodimer NTD is 0.7, suggesting that population of homodimer is slightly more preferred than population of heterodimer. Together, these results open the possibility for facile synthesis of artificial spider dragline silk with tunable properties.

Inside spider glands, the native spider dragline silks undergo post-translational modifications (PTMs). One of particular interest is phosphorylation on NTD

since this domain regulate the spider silk self-assembly. One way to investigate the effect of phosphorylation on structure and dynamics of NTD is by making phosphomimic NTDs, where the serine or threonine residues mutated into aspartic acids. In this study, we investigated the structure and dynamics of wildtype and phosphomimic NTD MaSp1 A1, NTD MaSp1 A2 and NTD MaSp2 from *Triconophila clavata*. The phosphomimic NTDs were based on the identification of the phosphorylation sites from mass spectrometry data. In total, 6 phosphomimic NTDs and 3 wild type NTDs structures at neutral pH and 5 phosphomimic NTDs and 3 wild type NTDs structures at acidic pH (1 phosphomimic NTD could not be determined at acidic pH because this NTDs was easily aggregated) were investigated using solution-state NMR. We found that there is no structure and dynamics differences between wild -types and phosphomimic NTDs. Furthermore, we found that phosphorylation on negative charge cluster causes rapid aggregation on NTD at acidic pH compared to NTD wild types (without phosphorylation), suggesting that one of the function of phosphorylation on NTD is to serve as aggregation nucleus. In contrast, the phosphorylation on positive charge cluster on NTD stabilized the monomeric form of NTD and prefer the NTD heterodimer formation rather than the NTD homodimer. These results provide novel toolbox of spider silk synthesis.

● Publications

Papers

1. Oktaviani, N. A., Malay, A.D., Matsugami, A., Fumiaki, H., Numata, K.: Unusual pK_a values mediate the self-assembly of spider dragline silk proteins. *In*

revision.

2. Arakawa K, Kono N, Malay, A.D., Tateishi, A., Ifuku, N., Masunaga, H., Sato R., Tsuchiya, K, Ohtoshi, R., Pedrazzoli, D., Shinohara, A., Ito, Y., Nakamura, H., Tanikawa, A., Suzuki, Y., Ichikawa, T., Fujita, S., Fujiwara, M., Tomita, M., Blamires, S.J., Chuah J.A., Craig, H, Foong, C.P, Greco, G., Guan, J., Holland, C., Kaplan, D.L., Sudesh, K., Mandal, B.B., Norma-Rashid .Y, Oktaviani N.A., Preda, R.C., Pugno N.M., Rajkhowa. R., Wang, X., Yazawa, K., Zheng, Z., Numata, K.: 1000 spider silkomes: Linking sequences to silk physical properties. *Science Advances*, 8,41, 2022.

● Review article

1. Malay, A.D., Craig, H.C., Chen, J., Oktaviani, N.A., Numata, K.: The complexity of spider dragline silk. *Biomacromolecules*, 23, 5, 2022

● Oral Presentations

Conference

1. Oktaviani, N. A., Malay, A.D., Matsugami, A., Fumiaki, H., Numata, K.: Unusual pK_a values of conserved residues governs the pH response dimerization of N-terminal domain of spider dragline silk protein, 71th symposium on macromolecules, Hokkaido, Japan. Sept 7th, 2022

● Poster Presentation

Conference

1. Oktaviani, N. A., Malay, A.D., Matsugami, A., Fumiaki, H., Numata, K.: Molecular basis of dimerization of N-terminal domain of major ampullate spidroin 1 and 2, ERATO International symposium. March 15th, 2022

XX-040 実践的分子シミュレーションで展開する医用工学技術の開発研究

Molecular Simulation-Based Approach to Protein Engineering for Future Medicine.

研究者氏名：楊 正博 Masahiro YO
受入研究室：脳神経科学研究センター
細胞機能探索技術研究チーム
(所属長 宮脇 敦史)

タンパク質にアミノ酸変異を導入することで、基礎研究および臨床応用に有用な改変タンパク質を作製することができるが、現在はもっぱら、ランダムにもしくは経験則に基づいて変異を導入し変異体群をスクリーニングする手法が主流である。一方、計算機の性能向上と計算手法の改良により、タンパク質の分子デザインが計算可能となりつつある。本研究では独自の分子シミュレーション計算に加えて、光工学、ゲノム編集、幹細胞治療などの領域の

最先端技術を組み合わせることで、従来は開発が難しかった以下の臨床応用ツールの開発を行う。

(i) 新生児の神経毒性の要因となるアルブミン非結合型ビリルビンの定量測定プローブ

赤血球の分解産物である非抱合型ビリルビンは血中でアルブミンと結合して肝臓へと送られるが、アルブミンと結合していないアンバウンドビリルビン (UB) は新生児の脳性麻痺などの重篤症状を引き起こす。非抱合型ビリルビン

と結合して蛍光を発するUnaGタンパク質の基質親和性変異体および波長変異体を複数種類作製し、血液に混ぜた場合の蛍光スペクトルを測定することで、正確なUB値を算出することが可能となる。

今年度は実験動物の血液サンプルからUB値を測定し、従来の測定法と比較した。特に血液成分による内部遮断効果が測定結果に影響することを確認できた。今後は内部遮断を補正することで、より正確な測定技術を開発する予定である。

(ii) 癌治療や再生医療での活用が期待される自殺遺伝子 yCDの改変およびゲノム編集技術

自殺遺伝子 yeast cytosine deaminase (yCD) は、プロドラッグである5-fluorocytosine (5-FC) を抗癌剤の5-fluorouracil (5-FU) に変換することにより細胞死を誘導する。そのため、癌治療や再生医療の安全装置としての活用が期待されている。しかし、現在使用されている野生型yCDは5-FCに対する結合親和性が低く、増殖が激

しい癌細胞や5-FCが浸透しにくい部位の癌では、抗腫瘍効果が不十分な場合がある。

今年度はこれまで作製した高活性yCD変異体の基礎研究を一通り完了し（国際特許出願中）、具体的な癌治療の応用研究に進んだ。yCDを用いた脳腫瘍の臨床試験を最初の目標に定め、慶應大学医学部及び様々な企業と連携して、臨床試験に向けて必要な技術開発を行った。数年以内の臨床試験実施を目指して、引き続き必要な研究に取り組んでいく。

●誌上発表 Publications

1. Tamura R, Miyoshi H, Imaizumi K, Yo M, Kase Y, Sato T, Sato M, Morimoto Y, Sampetean O, Kohyama J, Shinozaki M, Miyawaki A, Yoshida K, Saya H, Okano H, Toda M.: "Gene therapy using genome-edited iPS cells for targeting malignant glioma.", *BIOENGINEERING & TRANSLATIONAL MEDICINE*, e10406 (2022)

基礎科学特別研究員
2021年度採用者

XXI-001 特性イプシロンサイクル及び導手公式の精密化

On Refinements of Characteristic Epsilon Cycles and Conductor Formula

研究者氏名：竹内 大智 Daichi TAKEUCHI

受入研究室：革新知能統合研究センター
汎用基盤技術研究グループ
数理科学チーム
(所属長 坂内 健一)

正標数の体上の代数多様体上のエタール層を調べることは数論幾何の重要な課題である。体の標数が0の時(例えば複素数体)とは異なり、正標数の時には暴分岐と呼ばれる現象(例えば、正標数ではアフライン直線は単連結ではない)が起こり、エタール層の解析はより複雑なものとなっている。Deligne氏による「正標数での暴分岐は(複素代数多様体における)D加群の非正則性と対応する」という示唆のもと、Beilinson氏は正標数の場合にエタール層の特異台を、余接束の閉部分集合として定義することに成功し、斎藤毅氏によって特性サイクルが特異台に台をもつサイクルとして定義され、エタール層を調べる上で強力な道具となっている。

一方でエタール層は混標数のスキーム上にも定義される。例えば、有理数体の絶対Galois群の表現は、混標数スキームのエタール層として解釈出来る。最近になって、正標数の特異台と特性サイクルの理論を混標数のスキームに拡張しようとする試みが始まりつつあるが、特異台を定義するためにはそれを含むべき余接束をまず定義する必要がある。この余接束は未だ定義されていないが、余接束の「影」らしきものは複数のアプローチによって観測されている。今年度はこの余接束が、あるモチーフの圏の中で定義

でき、今まで観測されてきた種々の「影」はモチーフの種々の実現ではないか、という着眼を得ることが出来た。モチーフは数論幾何の様々なところに現れる対象なので、余接束をこのように構成できれば、私が当初想定していたよりはるかに広い応用があることが期待される。この定義がどれほど妥当なのか、来年度も研究を進めていきたい。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Takeuchi D.: "On continuity of Local Epsilon Factors of ℓ -adic Sheaves", International Mathematics Research Notices, rnac233(2022).

●口頭発表 Oral Presentations

(学会)

1. Takeuchi D.: "On local epsilon factors of the vanishing cycles of isolated singularities", Franco-Asian Summer School on Arithmetic Geometry, CIRM, France, May(2022)
2. 竹内大智: "混標数での余接束、nearby cyclesについて"、京都数論幾何研究集会、京都大学、6月(2022)

XXI-002 定曲率ローレンツ多様体上の大域解析

Global Analysis on Lorentzian Manifolds with Constant Sectional Curvature

研究者氏名：甘中 一輝 Kazuki KANNAKA

受入研究室：数理創造プログラム
(所属長 初田 哲男)

本年度も昨年度に引き続き擬Riemann幾何学における剛性問題に取り組んだ。Riemann幾何学が正定値の計量から定まる自然な距離を持つものに対して、本研究の対象となる擬Riemann幾何学は相対性理論で現れるような不定符号の計量を持つ幾何を扱う。

曲率などの局所的な量が図形の的大域的な形を支配してしまう現象は剛性定理と呼ばれる。例えばRiemann幾何学において、断面曲率が1で一定の図形は(有限被覆の差を除いて)球面になるという様に、曲率の条件から大域的

な形が殆ど完全に決定されてしまう。一方で、剛性定理が成立しない場合には局所的な条件だけでは決定できないくらいには豊かな大域構造が存在する。例えば、2次元のRiemann幾何学において曲率が-1で一定という条件では、剛性定理が成立せず、その変形理論はTeichmüller理論と呼ばれ、現在に至るまで広く深く研究されている。本研究ではRiemann幾何学ではなく、擬Riemann幾何学における様々な局所的制約に対して、局所剛性定理の成立・不成立を判定する。局所剛性定理が不成立の場合

には、局所対称空間(宇宙、或いは時空間の大域的モデルを与える)の連続的な族が構成出来る。

Riemann幾何学の枠組みでは、3次元以上の曲がったコンパクトな局所対称空間は剛性を持つ事が知られている一方で、擬Riemann幾何学では、いくらでも高い次元で剛性を持たないものの存在が知られている。この様に擬Riemann幾何学では(Riemann幾何学と比較して)豊かな変形理論(Teichmüller理論)の展開が期待できる。

本年度は筆者の昨年度の研究を受けて、自然数 n のパラメータを持つ不定値スピンの群 $\text{Spin}(n,1)$ なる単純Lie群に注目し、その対称空間への固有作用の分類に取り組んだ。その結果、変形理論が存在する様な高い次元の擬Riemann局所対称空間(10系列)を構成する事に成功した。本構成はクリフォード代数とスピン表現を用いる素朴なものである為、(数学を超えた)他分野への応用を期待したい。

●誌上発表 Publications

(総説)

1. 甘中一輝：ある系列の擬Riemann対称空間への固有な $\text{Spin}(n,1)$ 作用の分類、2022年度表現論シンポジウム講演集

●口頭発表 Oral Presentations

(学会)

1. 甘中一輝、3次元コンパクト反ド・ジッター多様体の安定固有値の重複度、Lie群論・表現論セミナー、大阪大学、May (2022)
2. Kazuki Kannaka, Multiplicities of stable eigenvalues of compact anti-de Sitter 3-manifolds, Symmetry in Geometry and Analysis Conference in honor of the 60th birthday of Toshiyuki Kobayashi, Reims, France June (2022)
3. 甘中一輝、ある系列の擬Riemann対称空間への固有な $\text{Spin}(n,1)$ 作用の分類、2022年度表現論シンポジウム、Zoom、December (2022)
4. 甘中一輝、ある系列の擬Riemann対称空間への固有な $\text{Spin}(n,1)$ 作用の分類、2022年度表現論ワークショップ、鳥取県立生涯学習センター、January (2023)

XXI-003 Going Beyond Worst-case Mixing Time of Markov chains, and Improving Markov Chain Monte Carlo Algorithms

Name: Geoffrey WOLFER

Host Laboratory: Approximate Bayesian Inference Team
Generic Technology Research Group
RIKEN Center for Advanced Intelligence Project
Laboratory Head: Mohammad Emtiyaz KHAN

Computing the expectation of a function with respect to a target distribution over a large space is a notoriously hard problem. The Markov Chain Monte Carlo (MCMC) paradigm consists in designing a Markov chain whose stationary distribution matches the target and approximating the expectation with an empirical mean computed on a Markovian trajectory. The caveat is that the successive observations are correlated. The quality of the approximation of the expectation can be linked to the mixing time of the underlying chain, a quantity which encodes convergence speed to stationarity.

In my research, I investigate the mixing time estimation problem under assumptions that go beyond the worst-case, propose new definitions of mixing that lead to potentially faster sampling, and explore the information geometry of Markov chains, with in mind the goal of connecting geometric and mixing properties of Markov chains.

With my collaborator Aryeh Kontorovich, I have

closed a recently opened problem, on the fundamental topic of minimax estimation of the pseudo-spectral gap of an ergodic Markov chain. The question aims at characterizing the sample complexity of the estimation problem from a single trajectory of observations. We have now pinned down this complexity in terms of the mixing and stationary parameters of the chain. This is relevant because the pseudo-spectral gap is a parameter which offers a good approximation of the mixing time when the state space is of moderate size and is more economical to compute. Applications include reinforcement learning, MCMC diagnostics and recovering generalization bounds for dependent data. Additionally, I am independently pursuing the problem of estimating the mixing time directly (instead of a spectral proxy), and I have confirmed the statistical cost of this task to be larger. Along the way, I have derived tighter confidence intervals for the problem of estimating the parameters of the transition matrix of a Markov chain, which can leverage

sparsity properties of its connection graph. These are important steps towards beyond worst-case analysis for estimation problems in Markov chains.

The typical definition of the mixing time is given in terms of the total variation distance between a chain and its stationary distribution. One promising approach I am pursuing consists of investigating alternative definitions for the mixing time, possibly easier to estimate. Together with Pierre Alquier from the ABI team, we are examining a distance between kernel mean embeddings of distribution, termed maximum mean discrepancy. As a first step, we have established variance-aware convergence bounds for the distribution learning problem with respect to this notion of distance that are thinner than the state-of-the-art.

With my collaborator Shun Watanabe, we are conducting research into the information geometry of Markov models. We have recently proposed a notion of embeddings of Markov chains congruent with the natural operation of lumping and we have shown our embeddings to preserve geometric properties of families of chains. This allows us to refine Markov chains over larger state spaces without changing the geometry of the space. Applications include coding theory and identity testing.

● Publications

Original papers

1. Cohen D., Kontorovich A., Koolyk A. and Wolfer G.: "Dimension-Free Empirical Entropy Estimation". *IEEE Transactions on Information Theory*, 2022+, doi: 10.1109/TIT.2022.3232739. Published.*
2. Wolfer G. and Alquier P.: "Variance-Aware Estimation of Kernel Mean Embedding". Submitted.*
3. Wolfer G. and Watanabe S.: "Geometric Aspects of Data-Processing of Markov Chains". Submitted.*
4. Wolfer G.: "Empirical and Instance-Dependent

Estimation of Markov Chain and Mixing Time". Submitted.*

5. Wolfer G. and Kontorovich A.: "Improved Estimation of Relaxation Time in Non-reversible Markov Chains". Submitted.*

● Oral Presentations

International conferences

1. Wolfer G. and Watanabe S.: "Information Geometry of Reversible Markov Chains". International Conference on Information Geometry for Data Science (IG4DS'22), Online, Sep. 19—23, 2022.
2. Wolfer G. and Watanabe S.: "Geometric Aspects of Data-Processing of Markov Chains". International Conference on Information Geometry for Data Science (IG4DS'22), Online, Sep. 19—23, 2022.
3. Wolfer G. and Watanabe S.: "Geometric Aspects of Data-Processing of Markov Chains". Beyond IID in Information Theory 10 (BIID'22) Workshop, Online, Sep. 26—30, 2022.

Domestic conferences

1. Wolfer G. and Watanabe S.: "Markovian Embeddings of Markov Chains". The 45th Symposium on Information Theory and its Applications (SITA'22), Noboribetsu, Hokkaido. Nov. 29—Dec. 2, 2022.

Seminars

1. Wolfer G.: "Geometric Aspects of Markov Models". Communication, Control and Signal Processing Seminar (CCSP), University of Maryland (Online). Nov. 16, 2022.

● Poster Presentations

Domestic conferences

1. Wolfer G. and Alquier P.: "Variance-Aware Estimation of Kernel Mean Embedding". The 25th Information-Based Induction Sciences Workshop (IBIS'22), Tsukuba, Saitama, Nov. 20—23, 20

XXI-004 作用素環上の保存問題の研究

Preserver Problems on Operator Algebras

作用素環論とは、Hilbert 空間上の有界線形作用素のなす環を研究する数学の一分野である。私は主として、作用素環のあいだの写像であって特定の構造を保つもの的一般形を調べる、保存問題と呼ばれる類の研究を行っている。本年度の9月までで中途退職となった。退職までの研究概要は以下の通りである。

研究者氏名：森 迪也 Michiya MORI

受入研究室：数理創造プログラム

(所属長 初田 哲男)

昨年度、有界作用素のなす*環で、von Neumann 正則性を満たすものの研究を行い、成果をプレプリントとして公開したが、この論文は東北数学雑誌へ掲載されることが決定した。

今年度は、von Neumann 環の射影束の束同型について、研究の成果としてプレプリントを公開した。先行研

究においては、射影束の束同型が局所可測作用素環の環同型で与えられるという定理、および II_∞ 型を除く von Neumann 環に対する局所可測作用素環の環同型の一般形が与えられていたが、このプレプリントでは、残る II_∞ 型 von Neumann 環の局所可測作用素環の環同型の一般形を与えた。これにより、一般の von Neumann 環の射影束に対し束同型の一般形が得られ、古くは1930年代の von Neumann による III_1 型環の研究に端を発する問題に決着がついた。

また、昨年度に引き続き、射影作用素について、距離空間としての特質、線形結合の性質など、多面的な考察を行った。スロベニア・リュブリャナ大学の Peter Šemrl 氏とは、特殊相対論や射影 Hilbert 空間の幾何学に関する問題に共同で取り組んでいる。

昨年度までは、コロナウイルス感染症の影響により他の研究者との交流はオンラインが中心であったが、今年度は直接会う機会が多く得られた。数理創造プログラムのサテライトオフィス(京都・神戸)や国内の研究集会に積極的に出向き、対面でのセミナーや、研究に関する情報交換も行うことができた。また、数理創造プログラムに所属する多彩な研究者たちとも交流を行った。特に、数理創造プログラム内部で未解決問題を共有するイベント「Super Smash Problems」に出題者として参加したことで、自分の研究を様々な視点から再考するきっかけが得られた。

9月には日本数学会賞建部賢弘奨励賞を受賞した。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Mori M.: “On regular $*$ -algebras of bounded linear operators: A new approach towards a theory of noncommutative Boolean algebras”, 東北数学雑誌、印刷中*
2. Mori M.: “Ring isomorphisms of type II_∞ locally measurable operator algebras”, submitted, arXiv:2206.00875.

●口頭発表 Oral Presentations

(学会)

1. Mori M.: “Lattice isomorphisms between projection lattices of von Neumann algebras”, 第61回実函数論・函数解析学合同シンポジウム、日本大学理工学部、8月(2022)
2. Mori M.: “Wigner’s unitary-antiunitary theorem and its variants”, RIMS 共同研究(公開型)「作用素環論の最近の進展」、京都大学、9月(2022)
3. Mori M.: “Lattice isomorphisms between projection lattices of von Neumann algebras”, 日本数学会2022年度秋季総合分科会、北海道大学、9月(2022)

(セミナー)

1. Mori M.: “Lattice isomorphisms between projection lattices of von Neumann algebras and ring isomorphisms of locally measurable operator algebras”, 京都作用素環セミナー、京都大学、7月(2022)

XXI-005 代数多様体の退化と標準計量

Degeneration of variety and canonical metric

研究者氏名：井上 瑛二 Eiji INOUE

受入研究室：数理創造プログラム

(所属長 初田 哲男)

代数幾何では偏極多様体という幾何学的対象(空間)を扱う。偏極多様体の一種のファノ多様体が近年活発に研究され、Kahler-Ricci soliton という標準計量に関する微分幾何の理論、Kahler-Ricci soliton の存在を特徴づけるK安定性に関する代数幾何の理論、K安定とは限らないファノ多様体に対して一意的な方法でK安定なファノ多様体を構成する最適退化の理論、そしてK安定なファノ多様体のモジュライ理論が構築されてきた。本研究の目的は、ファノ多様体に関する近年の進展を一般の偏極多様体に拡張し、偏極多様体の分類理論とも言えるモジュライ理論の全貌を明らかにすることである。

当研究員はこれまでの研究において、ファノ多様体の

Kahler-Ricci soliton の理論を一般の偏極多様体に拡張する μ -cscK計量という概念を提案し、微分幾何・代数幾何両側面からその理論構築をしてきた。その過程で μ -cscK計量がペレルマン・エントロピーという微分幾何的な汎関数によって特徴づけられることや、既存理論には見られなかった“相転移”などの真に新しい現象を引き起こすことを見出し、ファノ多様体のKahler-Ricci soliton の単なる拡張に収まらない豊潤な理論であること示した。一方で代数幾何的な視点から代数多様体の退化に対する非アルキメデス的 μ エントロピーという概念を導入し、これとペレルマン・エントロピーの間の非自明な不等式を証明した。また、偏極多様体のモジュライ理論の構築に關

連して、非アルキメデスの μ エントロピーを最大化する退化(最適退化)の存在と一意性が重要であることを示唆する結果を示してきた。この存在問題に対して代数多様体の退化の空間を何らかの意味で完備化してコンパクト性を用いる解析的なアプローチの有効性が期待できるが、昨年度はその完備化として非アルキメデス計量の空間を構成した。

本年度は、対称性の高い偏極多様体として知られるトーリック多様体に対して、非アルキメデスの μ エントロピーを最大化する非アルキメデス計量の存在と一意性を証明した。さらにこの結果に基づき、これまで懸案だった非アルキメデスの μ エントロピーの熱力学的解釈を明らかにした。現在この結果を論文にまとめている。

●誌上发表 Publications

1. E. Inoue, Constant mu-scalar curvature Kahler metric – formulation and foundational results,

Journal of Geometric Analysis, 32, Article 145, 2022.*

2. E. Inoue, Entropies in mu-framework of canonical metrics and K-stability, II – Non-archimedean aspect: non-archimedean mu-entropy and muK-semistability, arXiv:2202.12168.

●口頭発表 Oral Presentations

1. 井上瑛二 代数多様体の最適退化 専門家向け勉強会「ケーラー多様体上の標準計量とその周辺3」

2. E. Inoue, The non-archimedean mu-entropy in toric case, Seminar on Geometric Complex Analysis at University of Tokyo

3. E. Inoue, A sketch of the future of mu-cscK metrics and muK-stability, The 28th Symposium on Complex Geometry

4. 井上瑛二, An overview of non-archimedean pluripotential theory and its outlook, 2022年度田変数関数論冬セミナー

XXI-006 Development of Data-driven Prediction Model using Deep Learning for Estimating the Evolution of White Matter Hyperintensities Associated with Small Vessel Disease in Brain MRI

Name: Muhammad Febrian RACHMADI

Host Laboratory: Brain Image Analysis Unit

Integrative Computational Brain Science Collaboration Division
RIKEN Center for Brain Science

Laboratory Head: Henrik SKIBBE

White matter hyperintensities (WMH) are neuroradiological features often seen in T2-FLAIR brain MRI, characteristic of small vessel disease (SVD), and associated with stroke and dementia progression. Clinical studies indicate that the volume of WMH on a patient may shrink, stay unchanged, or grow over time. We call this the “evolution of WMH”. Predicting the evolution of WMH is crucial for better care and prognosis of individual patients, but it remains a difficult task because of the different rate and direction of WMH evolution clinical studies.

In this study, we developed various deep learning models for automatically predicting the evolution of WMH from a single brain T2-FLAIR MRI. Prediction models for disease progression from medical image modalities using machine/deep learning can be categorized into the three different approaches: 1) approaches predicting the outcomes of a disease (e.g., COVID-19, multiple sclerosis, trauma brain injury), 2) approaches predicting the progression of a disease with regards to the pathological timeline

(e.g., progression of Alzheimer’s Disease (AD) from normal to mild cognitive impairment (MCI) and then to AD, and 3) approaches predicting dynamic changes (evolution) of specific disease features (e.g., nodule progression of pulmonary tumor and evolution of WMH). Thus, our study belongs to the third category, in which a predictive model is used to estimate spatial dynamic changes of the evolution of WMH identified on an MRI scan. In this study, brain MRI data from stroke patients enrolled in a study of stroke mechanisms, imaged at two/three time points (baseline scan, about 3 months, and a year after) are used.

Last year, we focused on dealing with incorporating risk factors of WMHs evolution for improving the prediction of the evolution of WMH. So far, previous studies focused exclusively on the image modality as input and the appearance of WMH themselves while ignoring other clinically relevant factors. Note that a growing number of clinical studies have indicated that clinical factors such as previous strokes, age, and

genetics, influence the rate and direction of WMH evolution. By including stroke lesions, a clinically relevant factor, in our prediction model, we were able to improve the accuracy of our results. The results show that incorporating clinical risk factors are important for better prediction of WMH evolution.

● Preprint

1. Rachmadi M.F., Valdés-Hernández M.D., Makin S., Wardlaw J., and Skibbe H.: "Improving the prediction of white matter hyperintensities evolution in brain MRI of patients with small vessel disease using stroke lesions information". bioRxiv. doi: <https://doi.org/10.1101/2022.12.14.520239>. Submitted to *Medical Image Analysis*.

● Oral Presentation

Domestic Conference/Symposium

1. Rachmadi M.F., Valdés-Hernández M.D., Makin S., Wardlaw J., Komura T., and Skibbe H.: "Development of a Data-driven Prediction Model for the Evolution of White Matter Hyperintensities using Deep Learning: Progress and Challenges". In *NEURO 2022*, Okinawa, Japan, 2022, June 30 – July 3.
2. Rachmadi M.F., Valdés-Hernández M.D., Maulana R., Wardlaw J., Makin S., Komura T., and Skibbe H.: "Modelling the Progression and Evolution of White Matter Hyperintensities using Deep Learning". In *the 2022 International Conference on Advanced Computer Science and Information Systems (ICACSIS 2022)*, Jakarta, Indonesia. 2022, Oct 1-3.

● Poster Presentation

Domestic Conference/Symposium

1. Rachmadi M.F., Valdés-Hernández M.D., Makin S., Wardlaw J., Komura T., and Skibbe H.: "Development of a Data-driven Prediction Model for the Evolution

of White Matter Hyperintensities using Deep Learning: Progress and Challenges". In *International Symposium on Artificial Intelligence and Brain Science (AIBS) 2022*, 2022, July 4-5.

● Other Activities

Teaching/Lectures/Talks/Meetings/Research Collaborations

1. I gave a plenary talk at the 2022 International Conference on Advanced Computer Science and Information Systems (ICACSIS 2022) which was held by the Faculty of Computer Science, Universitas Indonesia.
2. I gave a talk in a workshop in a conjunction to the ICACSIS 2022 conference. The title of my workshop was "Fundamentals of Learning from Data and Uncertainty in Machine Learning".
3. I gave some lectures in the advanced machine learning course for graduate students within the Faculty of Computer Science, Universitas Indonesia together with a principal lecturer. The lectures were usually given once a week for 6 to 8 weeks (depending on the principal lecturer of the course) and were given in English and Indonesian languages (bilingual).
4. I visited Cipto Mangunkusumo Hospital (RSCM) in Jakarta, Indonesia where the Faculty of Medicine, Universitas Indonesia is located and held a few meetings with radiologists and researchers there for joint research activities. They shared some data for us to work with.
5. I am actively collaborating with other members of Brain Image Analysis Unit to develop better loss function for segmentation of clustered objects in biomedical image and deep learning model for image registration and image translation.

XXI-007 原始惑星系円盤の構造形成とダスト衝突の微物理を統括した惑星形成理論の構築 Development of a planet formation theory based on structure formation in protoplanetary disks and microphysics of dust collisions

研究者氏名： 富永 遼佑 Ryosuke TOMINAGA
受入研究室： 開拓研究本部
坂井星・惑星形成研究室
(所属長 坂井 南美)

これまでの観測により惑星は太陽系外にも普遍的に存在する天体であることがわかっているが、その起源は未だ解明されていない。古典的な惑星形成シナリオでは、生まれたばかりの星の周りに形成されるガス円盤(原始惑星系円盤)の中で固体微粒子(ダスト)が付着合体していくこと

で惑星が形成されると考えられてきた(e.g., Hayashi et al. 1985)。しかしダストの付着成長には様々な困難があり、キロメートルサイズの間天体「微惑星」にすら到達できないということが大きな問題として残っている。

前年度の研究では、我々が発見したダスト成長駆動の

不安定性(coagulation instability ; Tominaga et al. 2021) に対する衝突破壊の影響を数値シミュレーションで調べ、従来の微惑星形成理論にある「ダスト落下問題」と「衝突破壊問題」を同時に回避できることを示した。この研究は東北大学の田中秀和教授と議論を行いつつ私が主体的に行い、本年度に学術論文を2本出版した(Tominaga et al. 2022a, 2022b)。本年度はさらに、この不安定性による円盤進化が観測可能量に基づいてどのように議論できるかを輻射計算に基づき調べた。その結果次のことがわかった：(1) 不安定性は主に半径数十au以内の領域に構造を作る、(2) 構造が非常に細かく、半値幅5auの正規分布関数で輻射強度分布を平滑化すると複数の鋭いリングが1つの緩やかなリングとして観測され得る、(3) 平滑化に伴い0.9mm-1.3mmのスペクトル指数には不安定成長の痕跡が残りにくい、(4) coagulation instabilityが起すダスト濃集過程ではリングはサブミリ波・ミリ波で光学的に薄いままとなる。また不安定性の成長時間が10万年程度で観測されている円盤の年齢と比べて短いことを考慮し、不安定成長後の微惑星形成後がすでに起こっている状況を想定し、観測が示す連続波放射を説明するために必要な破片の量を議論した。その結果、円盤質量が0.1太陽質量程度の若い時期に、微惑星総質量のたった3-5%を破片として放出すれば観測されているミリ波放射が期待できることがわかった。この時間発展の場合、円盤の内側はミリ波で光学的に厚くなり、低いスペクトル指数を示した円盤観測と調和的な可能性がある(e.g., Ansdell et al. 2018)。

上記に加え、多次元数値実験にも取り組んだ。coagulation instabilityに関してはダストサイズ軸を新たに考慮し、サイズ分布の時間進化を同時に追う高次精度コードの開発を行った。現状の結果ではサイズ分布の影響で小スケールの不安定性が安定化されることがわかり、今後より影響を受けにくい長波長側を探索する必要がある。またcoagulation instabilityの後に続き微惑星形成を起す永年重力不安定性の多次元シミュレーションを行うため、その準備として3次元線形解析を行い多次元性の影響を調べた。その結果、ダスト層上空のガスも整合的に解く必要があることがわかった。これは広く行われている「ダスト層のみを扱った数値シミュレーション」では不十分であることを示唆しており、今後ダイナミックレンジの大きい数値シミュレーションを推進する必要があることがわかった。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Tominaga R. T., Kobayashi H., and Inutsuka S.: “Nonlinear Outcome of Coagulation Instability in Protoplanetary Disks. I. First Numerical Study of

Accelerated Dust Growth and Dust Concentration at Outer Radii”, *The Astrophysical Journal*, Volume 937, Issue 1, id.21, 15 pp. (2022)*

2. Tominaga R. T., Tanaka H., Kobayashi H., and Inutsuka S.: “Nonlinear Outcome of Coagulation Instability in Protoplanetary Disks. II. Dust-ring Formation Mediated by Backreaction and Fragmentation”, *The Astrophysical Journal*, Volume 940, Issue 2, id.152, 17 pp. (2022)*

(単行本(査読なし))

1. Tominaga R.: “Dust-Gas Instabilities in Protoplanetary Disks: Toward Understanding Planetesimal Formation”, Springer, Part of the book series “Springer Theses”, ISBN: 978-981-19-1764-6 (Hardcover Book), 978-981-19-1765-3 (eBook), (2022)

●口頭発表 Oral Presentations

1. Tominaga R. T., Tanaka H., Kobayashi H., and Inutsuka S.: “Coagulation instability and planetesimal formation in protoplanetary disks”, NCTS-ASIAA Workshop: Stars, Planets, and Formosa, hybrid (Taipei + online), August (2022)
2. Tominaga R. T., Tanaka H., Kobayashi H., and Inutsuka S.: “Numerical studies of a new instability driven by dust growth in protoplanetary disks”, The 9th East Asian Numerical Astrophysics Meeting (EANAM9), hybrid (Okinawa + online), September (2022)
3. 富永遼佑: “原始惑星系円盤におけるダスト成長が駆動する不安定性とダスト濃集”、惑星形成討論会、東北大学とオンラインのハイブリッド開催、3月(2022)
4. 富永遼佑、田中秀和、小林浩、犬塚修一郎: “ダスト成長・破壊を伴う原始惑星系円盤の不安定性によるダスト濃集”、日本天文学会2022春季年会、オンライン、3月(2022)
5. 富永遼佑、田中秀和、小林浩、犬塚修一郎: “ダスト成長が駆動する原始惑星系円盤の不安定性”、新学術領域「新しい星形成理論によるパラダイムシフト」大研究会、名古屋大学とオンラインのハイブリッド開催、3月(2022)
6. 富永遼佑、田中秀和、小林浩、犬塚修一郎: “ダスト成長駆動の不安定性による原始惑星系円盤での微惑星形成”、JpGU 2022、幕張メッセとオンラインのハイブリッド開催、5月(2022)
7. 富永遼佑、犬塚修一郎、高橋実道: “原始惑星系円盤の鉛直構造を考慮した永年重力不安定性の線形解析”、日本天文学会2023春季年会、立教大学とオンラインのハイブリッド開催、3月(2023)

●ポスター発表 Poster Presentations

1. Tominaga R. T., Tanaka H., Kobayashi H., and Inutsuka S.: “Dust transport and outer planetesimal

formation via dust-growth-driven instability in protoplanetary disks”, Symposium on Next Generation Astrochemistry, hybrid (University of Tokyo + online), November (2022)

2. 富永遼佑、犬塚修一郎：“原始惑星系円盤の鉛直構造を考慮した永年重力不安定性の線形解析”、第35回

理論懇シンポジウム、福島県 コラッセふくしま、12月 (2022)

3. 富永遼佑、田中秀和、小林浩、犬塚修一郎：“原始惑星系円盤におけるダスト駆動不安定性の観測的検証に向けたモデル化”、日本天文学会2023春季年会、立教大学とオンラインのハイブリッド開催、3月(2023)

XXI-008 Implementation of Helium-3 Magnetometers to Extend the BASE Physics Program at CERN

Name: Elisabeth Johanna WURSTEN

Host Laboratory: Fundamental Symmetries Laboratory
RIKEN Cluster for Pioneering Research
Laboratory Head: Stefan ULMER

Even though the Standard Model of Particle Physics has proven to be very successful in explaining a large amount of experimentally observed phenomena, it is still lacking answers for a number of observations. One of these is the baryon asymmetry of our Universe, why is the amount of antimatter observed in the Cosmos negligible compared to the amount of matter? Another puzzle is related to the observation of a significantly larger amount of mass in our galaxies than what we predict from the particles described by the Standard Model. The search for this so-called ‘dark matter’ is currently at the forefront of fundamental Particle Physics and has triggered research on both the theoretical and experimental side. In an effort to investigate both problems at the same time, I have joined the Baryon Antibaryon Symmetry Experiment (BASE) at the Antiproton Decelerator of CERN (Switzerland) for this SPDR project. The aim of the BASE experiment is to measure the properties of protons and antiprotons with ultra-high precision to learn more about the matter-antimatter asymmetry. Our most recent results were published in Nature in 2022, comparing the charge-to-mass ratio of the proton to that of the antiproton. I have re-analysed these data in FY2022, searching for signatures of dark matter interacting more strongly with antimatter than with matter. No such signals were found under the assumption that dark matter is comprised of spin-0 particles. A paper is in preparation detailing the model, the analysis and the results.

The current objective of the BASE collaboration is to measure the antiproton magnetic moment to the 100-parts-per-trillion level of uncertainty. In order to achieve such a 10-fold improvement in precision, we have implemented a set of superconducting shim coils that enable tuning of the magnetic field gradients present in the Penning trap setup. With these coils, we can homogenise the magnetic field of

the measurement Penning trap, which will suppress the dominant systematic uncertainty of the previous BASE magnetic moment measurement by more than a factor of 1000. Furthermore, we have developed techniques that reduce the antiproton sub-thermal cooling time by more than a factor of 60, which will considerably increase the data sampling rate in the planned proton and antiproton magnetic moment measurements. The four traps of the BASE experiment have been commissioned successfully with protons during FY2022, resulting in the observation of single spin flips of one proton with world-record fidelity, an important milestone for g-factor measurements. These improvements mean that magnetic moment measurements with protons and antiprotons at the 100-parts-per-trillion level of uncertainty are in reach for FY2023.

● Publications

Papers

1. Borchert M. J., Devlin J. A., Erlewein S. R., Fleck M., Harrington J. A., Higuchi T., Latacz B. M., Völksen F., Wursten E. J., Abbass F., Bohman M. A., Mooser A. H., Popper D., Wiesinger M., Will C., Blaum K., Matsuda Y., Ospelkaus C., Quint W., Walz J., Yamazaki Y., Smorra C. and Ulmer S.: “A 16-parts-per-trillion measurement of the antiproton-to-proton charge-mass ratio”, Nature 601, 53 (2022)*
2. Will C., Bohman M., Driscoll T., Wiesinger M., Abbass F., Borchert M. J., Devlin J. A., Erlewein S., Fleck M., Latacz B., Moller R., Mooser A., Popper D., Wursten E., Blaum K., Matsuda Y., Ospelkaus C., Quint W., Walz J., Smorra C. and Ulmer S.: “Sympathetic Cooling Schemes for Separately Trapped Ions Coupled via Image Currents”, New Journal of Physics 24, 3 (2022)*
3. Völksen F., Devlin J. A., Borchert M. J., Erlewein S. R., Fleck M., Jäger J. I., Latacz B. M., Micke P.,

- Nuschke P., Umbrazunas G., Wursten E. J., Abbass F., Bohman M. A., Popper D., Wiesinger M., Will C., Blaum K., Matsuda Y., Mooser A., Ospelkaus C., Smorra C., Soter A., Quint W., Walz J., Yamazaki Y. and Ulmer S.: "A High-Q Superconducting Toroidal Medium Frequency Detection System with a Capacitively Adjustable Frequency Range >180 kHz", *Review of Scientific Instruments* 93, 9 (2022)*
4. Wursten E. J., Borchert M. J., Devlin J. A., Erlewein S. R., Fleck M., Harrington J. A., Jäger J. I., Latacz B. M., Micke P., Umbrazunas G., Abbass F., Bohman M. A., Kommu S., Popper D., Wiesinger M., Will C., Yildiz H., Blaum K., Matsuda Y., Mooser A., Ospelkaus C., Soter A., Quint W., Walz J., Yamazaki Y., Smorra C. and Ulmer S.: "Testing CPT invariance by high precision comparisons of the fundamental properties of protons and antiprotons at BASE", *Proceedings of the Ninth Meeting on CPT and Lorentz Symmetry (CPT'22)*, Indiana University, Bloomington, May 17-26 (2022)
5. Abel C., Ayres N. J., Ban G., Bison G., Bodek K., Bondar V., Chanel E., Chiu P.-J., Clément B., Crawford C. B., Daum M., Emmenegger S., Ferraris-Bouchez L., Fertl M., Flaux P., Fratangelo A., Griffith W. C., Grujic Z. D., Harris P. G., Hayen L., Hild N., Kasprzak M., Kirch K., Knowles P., Koch H.-C., Koss P. A., Kozela A., Krempel J., Lauss B., Lefort T., Lemièrre Y., Mohanmurthy P., Naviliat-Cuncic O., Pais D., Piegsa F. M., Pignol G., Prashanth P. N., Quémener G., Rawlik M., Ries D., Rebreyend D., Rocca S., Rozpedzik D., Schmidt-Wellenburg P., Schnabel A., Severijns N., Thorne J. A., Virot R., Weis A., Wursten E., Wyszynski G., Zejma J. and Zsigmond G.: "Mapping of the magnetic field to correct systematic effects in a neutron electric dipole moment experiment", *Physical Review A* 106, 032808 (2022)*
6. Abel C., Ayres N. J., Ban G., Bison G., Bodek K., Bondar V., Chanel E., Crawford C. B., Daum M., Dechenaux B., Emmenegger S., Flaux P., Griffith W. C., Harris P. G., Kermaidic Y., Kirch K., Komposch S., Koss P. A., Krempel J., Lauss B., Lefort T., Naviliat-Cuncic O., Pais D., Piegsa F. M., Pignol G., Rawlik M., Ries D., Rocca S., Rozpedzik D., Schmidt-Wellenburg P., Severijns N., Stadnik Y. V., Thorne J. A., Weis A., Wursten E. and Zejma J.: "Search for Ultralight Axion Dark Matter in a Side-Band Analysis of a 199Hg Free-Spin Precession Signal", submitted*
- **Oral Presentations**
- Conference
1. Wursten E. J.: "Testing Lorentz and CPT symmetry with protons and antiprotons at BASE", RCNP workshop: Fundamental Physics Using Neutrons and Atoms, Osaka, Japan, August (2022)
- Seminar
1. Wursten E. J.: "Studying fundamental symmetries using antimatter with BASE", CNS seminar, CNS, RIKEN Wako campus, Japan, August (2022)

XXI-009 非線形量子電磁力学の数値計算コードの開発とその高エネルギー物理過程への応用 Numerical Study of Non-linear QED and its Application to High-energy Physics

研究者氏名：田屋 英俊 Hidetoshi TAYA
受入研究室：数理創造プログラム
(所属長 初田 哲男)

強い電磁場を系に印加する。すると、電磁場の強さが結合定数の小ささを補うことで、量子電磁力学(QED)は、素朴な摂動論では捉えることのできない、非自明な非線形応答を見せる。このような非線形QED現象は、理論・実験的解析が未だ満足になされていない未開の領域であり、基礎的な重要性がある。また、レーザー・重イオン衝突・高エネルギー天体など、素粒子・原子核・物性・宇宙のスケールの枠を超え、さまざまな分野のさまざまな高エネルギー物理過程で強い電磁場が現実生成され、それに伴う非線形QED現象が重要な現象論的役割を果たすと考えられている。さらに、近年の実験・観測技術の目覚ましい進展によって、非線形QED現象を実験室でつづさに調べる準備が整い始めている。

本研究課題は非線形QED過程の理論的基礎付けとその数値計算コードを開発することである。昨年度は、強い場によって不安定になった真空の下で起こる散乱や放射の素過程の定式化に取り組んだ。本年度は、昨年度の結果をより具体的に精査することで、実際の物理系における現象論的な帰結を明らかにすることを目指し研究を行った。特に、QEDにおける強い電場中の複屈折と初期宇宙の再加熱過程における粒子生成の過程を解析した。従来の研究では見逃されていた新しい過程が、強い場や真空不安定性の効果によって起こることを見出した。例えば、再加熱過程においては、強い場の効果によって素朴な摂動論では運動学的に不可能だと思われていたパラメータ領域で粒子生成が可能になることを示した。また、本

研究課題に関連した成果として、強い場の物理に関する包括的なレビュー論文を国際的なコラボレーションの下に完成させた。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Hidetoshi Taya, Yusuke Yamada, "QFT approach to dressed particle processes in preheating and non-perturbative mechanism in kinematically-forbidden regime," arXiv:2207.03831
2. Zheng Cao, Koichi Hattori, Masaru Hongo, Xu-Guang Huang, Hidetoshi Taya, "Gyrohydrodynamics: Relativistic spinful fluid with strong vorticity," PTEP 2022 (2022) 7, 071D01*
3. A. Fedotov, A. Ilderton, F. Karbstein, B. King, D.

Seipt, H. Taya, G. Torgrimsson, "Advances in QED with intense background fields," arXiv:2203.00019

●口頭発表 Oral Presentations

1. 田屋 英俊, "「無」から「有」をつくる: 素粒子物理学の視点から", 武蔵野大学数理工学シンポジウム, 11月(2022年)
2. H. Taya, "Strong-field physics in heavy-ion collisions", Reimei Workshop "Polarization phenomena and Lorentz symmetry violation in dense matter", Korea (hybrid), 10月(2022年)
3. H. Taya, "Enhancement of chirality production from the vacuum by time-dependent electromagnetic fields", LPHYS '22, Paris (online), 7月(2022年)
4. 田屋英俊, "「無」から「有」をつくる", 数理で読み解く科学の世界2022、オンライン、4月(2022年)

XXI-010 QCD 相図の解明に向けた非摂動的計算手法の開発

Development of non-perturbative methods for investigating the phase structure of QCD

研究者氏名: 松本 信行 Nobuyuki MATSUMOTO
受入研究室: 仁科加速器科学研究センター
理研 BNL 研究センター
計算物理研究グループ
(所属長 出淵 卓)

昨年度に引き続き、私は格子量子色力学(QCD)の研究を中心に進めた。格子計算の方法はQCDの理論計算を非摂動的に行うほぼ唯一の方法であり、素粒子論において重要な役割を果たしている。実際の計算時にはモンテカルロ法を用いた数値的手法が取られるが、その適用可能性を実用的に狭めている問題が2つある:(1) 符号問題および(2) 臨界減速の問題である。私はこれらの問題を解決するためのアルゴリズム開発を行った。

(1)「符号問題」は、モンテカルロ法に用いる重み関数が複素数値になる場合に起こる問題である。これが問題になる系として「有限密度化のQCD」および「実時間形式の経路積分」が挙げられる。このために「重イオン衝突」に関係するジェットのプロセスや、衝突のコア部で実現されていると考えられている「クォーク・グルーオン・プラズマ相」について、定量的理解が不足している。私は今年度、特に「実時間経路積分」について、符号問題以前に、経路積分から連続極限を得るためには、正しく $i\epsilon$ 処方を施す必要があることを指摘した。 $i\epsilon$ 処方自体は理論物理の様々な場面で用いられるものであるが、ヤン・ミルズ理論の実時間経路積分における必要性はこれまで十分に認知されていなかった。この結果は、量子計算を用いてQCD計算をしようとする試みにも影響を与えるものと考えている。

(2) 格子計算に基づく物理量の計算において、大きな不定性を与えている要因の1つに連続極限への外挿がある。これを極力抑えるためには、格子間隔を小さくしたシミュレーションが望まれるが、このとき「臨界減速の問題」が生じる。これらの問題は格子QCDが提案された当初から議論されてきたが、数値精度が実験精度と競合するようになってきた今、より切迫した問題になりつつある。我々はLuscher氏によって提案されたtrivializing mapを近似的に求める方法として、様々なウィルソン・ループをフローに含め、その係数を非摂動的に求める方法を提案した。本手法により、摂動的な計算に基づく「フロー時間展開」の方法に比べてフロー後の有効作用をよりコントロールできたが、臨界減速を凌駕するような計算効率は今のところ得られておらず、さらなる研究が必要である。この研究の結果は国際学会LATTICE2022のプレナリー講演にて報告した。

また、(1)、(2)の研究に加えて、重力理論で境界を持つ時空が抑制される機構の提案(Hamada-NM 2210.10167[hep-th])、およびRBC/UKQCDコラボレーションとしてミュー粒子の異常時機能率に対するハドロン真空偏極の寄与の計算(近々arXivへ掲載予定)の研究を行った。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Matsumoto N.: "Comment on the subtlety of defining a real-time path integral in lattice gauge theories", Progress of Theoretical and Experimental Physics, Volume 2022, no.9, 093B03 (2022)*
2. Boyle P., Izubuchi T., Jin L., Jung C., Lehner C., Matsumoto N., Tomiya A.: "Use of Schwinger-Dyson equation in constructing an approximate trivializing map", Proceedings of Science, Volume LATTICE2022, 229 (2022)*

●口頭発表 Oral Presentations

(国内学会等)

1. 松本信行: "Comment on the subtlety of defining real-time path integral in lattice gauge theories", 理研 iTHEMS インフォーマルセミナー、和光(オンライン)、6月(2022)
(国際会議)
2. Matsumoto N.: "Comment on the subtlety of defining

a real-time path integral in lattice gauge theories", Colorado University informal seminar, Colorado, USA (online), July (2022)

3. Matsumoto N.: "Comment on the subtlety of defining a real-time path integral in lattice gauge theories", KEK theory seminar, Tsukuba, Japan (online), July (2022)
4. Boyle P., Izubuchi T., Jin L., Jung C., Lehner C., Matsumoto N., Tomiya A.: "Use of Schwinger-Dyson equation in constructing an approximate trivializing map", LATTICE 2022 (Plenary), Bonn, Germany, August (2022) Matsumoto N.: "Comment on the subtlety of defining a real-time path integral in lattice gauge theories", SIGN 2022, Tel Aviv, Israel, September (2022)
5. Matsumoto N.: "Comment on the subtlety of defining a real-time path integral in lattice gauge theories", Osaka University Particle Physics Group seminar, Osaka, Japan (online), July (2022)
6. Matsumoto N.: "Toward conquering critical slowing down", HU Berlin/NIC DESY Zeuthen joint lattice seminar, Germany (online), December (2022)

XXI-011 Sn 同位体の中性子スキン構造進化で探る、魔法数を跨ぐ領域での核半径増大現象の解明

Elucidation of enhancement phenomenon on nuclear radii across magic number via evolution of neutron skin in Sn isotopes

研究者氏名: 田中 聖臣 Masaomi TANAKA
受入研究室: 仁科加速器科学研究センター
RI 物理研究室
(所属長 櫻井 博儀)

原子核半径が魔法数を境に急激に増大することが荷電半径の系統的測定を通じて知られているが、この現象について根本的な理解は得られていない。一方、近年Ca同位体の物質半径や中性子スキン厚測定でも同現象が発見された。かつ、その増大は荷電半径に比べてはるかに大きく、理論計算からも核内中性子の寄与が重要な役割を担っていることが示唆されている。本研究では、二重魔法数核 ^{132}Sn を跨いで $^{114-137}\text{Sn}$ の物質半径および中性子スキン厚を測定することで中性子魔法数82領域での核内中性子の寄与を明らかにし、増大現象の起源に迫る。

本年度は、(1) 荷電変化断面積測定による核内陽子分布半径の導出手法の確立、(2) 理研RIBF施設での実験準備を行った。

(1) 中性子スキン厚を導出するためには、荷電変化断面積から陽子分布半径を導出する必要があるが、その手法は十分には確立していない。そこで、電荷数(陽子数)

の変化が、核破碎過程に加えて核子蒸発過程でも起こることを考慮に入れた計算モデルを導入した。その結果、現象論的なパラメータなしに荷電変化断面積の測定データを矛盾なく系統的に説明することに成功した。本成果を2022年7月にPhysical Review C誌にて出版、および国際会議にて口頭発表した。この手法の確立により、陽子分布半径が既存手法で測定不可能な超中性子過剰なCa、Sn同位体において中性子スキン厚を導出する目処がたった。また、このモデルを精度向上のために、量研HIMAC施設にてCa、Ti同位体の荷電変化断面積のエネルギー依存性・標的依存性の系統的データを測定した。

(2) 上記の確立した手法で中性子数32、34の新魔法数領域に位置する超中性子過剰 $^{52-55}\text{Ca}$ 同位体や二重魔法数 ^{132}Sn を超えたSn同位体の荷電変化断面積・相互作用断面積の実験を行うべく理研RIBF施設で実験準備を行なった。2022年12月中旬にCa同位体の実験を予

定していたものの、実験数日前に加速器故障により実験中止を余儀なくされた。加速器復旧後の速やかな実験実施に備えているところである。

●誌上発表 Publication

(原著論文)

1. Tanaka M., Takechi M., Homma A., Prochazka A., Fukuda M., Nishimura D., Suzuki T., Moriguchi T., Ahn D. S., Aimaganbetov A., Amano H., Arakawa H., Bagchi S., Behr K.-H., Burtebayev N., Chikaato K., Du H., Fujii T., Fukuda N., Geissel H., Hori T., Hoshino S., Igosawa R., Ikeda A., Inabe N., Inomata K., Itahashi K., Izumikawa T., Kamioka D., Kanda N., Kato I., Kenzhina I., Korkulu Z., Kuk Y., Kusaka K., Matsuta K., Mihara M., Miyata E., Nagae D., Nakamura S., Nassurlla M., Nishimuro K., Nishizuka K., Ohnishi K., Ohtake M., Ohtsubo T., Omika S., Ong H. J., Ozawa A., Sakurai H., Scheidenberger C., Shimizu Y., Sugihara T., Sumikama T., Suzuki H., Suzuki S., Takeda H., Tanaka Y., Tanaka Y. K., Tanihata I., Wada T., Wakayama K., Yagi S., Yamaguchi T., Yanagihara R., Yanagisawa Y., Yoshida K. and Zholdybayev T. K.: "Charge-changing cross sections for $^{42-51}\text{Ca}$ and effect of charged-particle evaporation induced by neutron-removal reactions", *Physical Review C*, 106 014617 (2022)*.
2. Tanaka M., Brionnet P., Du M., Ezold J., Felker K., Gall B. J.P., Go S., Grzywacz R. K., Haba H., Hagino K., Hogle S., Ishizawa S., Kaji D., Kimura S., King T. T., Komori Y., Lemon R. K., Leonard M. G., Morimoto K., Morita K., Nagae D., Naito N., Niwase T., Rasco B. C., Roberto J. B., Rykaczewski K. P., Sakaguchi S., Sakai H., Shigekawa Y., Staracener D. W., VanCleve S., Wang Y., Washiyama K. and Yokokita T.: "Probing Optimal Reaction Energy for Synthesis of Element 119 from $^{51}\text{V}+^{248}\text{Cm}$ Reaction with Quasielastic Barrier Distribution Measurement", *Journal of the Physical Society of Japan* 91, 084201 (2022)*.

3. Fukutome M., Fukuda M., Tanaka M., Nishimura D., Takechi M., Ohtsubo T., Mihara M., Matsuta K., Suzuki T., Yamaguchi T., Izumikawa T., Sato S., Fukuda S., Kitagawa A., Takahashi H., Kimura Y., Sugawara S., Takatsu K. and Takayama G.: "One-Neutron Removal Cross Sections for ^{16}N Isomeric State", *Few-Body Syst.* 63, 37 (2022)*

●口頭発表 Oral Presentations

1. Tanaka M. for nSHE collaboration: "Quasielastic backscattering measurement for $\text{V-51} + \text{Cm-248}$ reaction toward element-119 synthesis at RIKEN", TASCA22 19th Workshop on Recoil Separator for Superheavy Element Chemistry (invited), Online, May (2022)
2. Tanaka M.: "Nuclear-radius studies via reaction cross section measurements", *Physics of RI: Recent progress and perspectives* (invited), Online, May (2022)
3. Tanaka M. for nSHE collaboration: "Optimal energy for element 119 synthesis via $^{51}\text{V}+^{248}\text{Cm}$ reaction probed by quasielastic barrier distribution measurement", *Zakopane conference on nuclear physics 2022*, Zakopane, Poland, Sep. (2022)
4. Tanaka M., Takechi M., Homma A., Prochazka A., Fukuda M., Nishimura D., Suzuki T and Moriguchi T. for RIKEN-RIBF123 collaboration: "Charge-changing cross section measurements for Ca isotopes and new methods to extract point-proton radius of exotic unstable nucleus in medium-mass region", *International Nuclear Physics Conference 2022 (INPC2022)*, Cape Town, Republic of South Africa, Sep. (2022)
5. M. Tanaka for nSHE collaboration: "Optimal reaction energy for synthesis of element 119 via $^{51}\text{V}+^{248}\text{Cm}$ reaction probed by quasielastic barrier distribution measurement", *19th International Conference on Electromagnetic Isotope Separators and Related Topics (EMIS2022)*, Daejeon, Korea, Oct. (2022)

XXI-012 一般相対論的ボルツマン輻射流体コードによる超新星爆発シミュレーション Core-collapse Supernova Simulations with the General Relativistic Boltzmann-radiation-hydrodynamics Code

研究者氏名：原田 了 Akira HARADA
受入研究室：数理創造プログラム
(所属長 初田 哲男)

重力崩壊型超新星爆発は大質量星が死ぬときの爆発現象であり、その爆発メカニズムは自然界の4つの力が絡み合う、非常に難しいものになっている。その有力なシナリオは以下の通りである。進化しきった大質量星は中心に鉄でできたコアを持ち、これはやがて重力崩壊を起こす。中心が原子核密度になるまで潰れると、そこで核力由来の反発力で外層が跳ね返され、衝撃波が生じる。この衝撃波は途中で伝搬を止めるが、中心に残された原始中性子星からのニュートリノ放射で加熱され、やがて再度伝搬し始め、星表面まで到達して爆発が起こる。これをニュートリノ加熱メカニズムと呼ぶ。このメカニズムを検証するために数値シミュレーションが多く行われてきたが、それらはどれも精度が不明な近似を用いている。それゆえ、得られた結果が正しいものなのかどうかは議論が続いている。本研究はそうした近似を廃し、第一原理的、すなわち重力を一般相対論で扱い、ニュートリノ輸送のためにボルツマン方程式を解くシミュレーションで爆発メカニズムを解明することを目的としている。

本年度は時空計量を固定した状態で一般相対論的ボルツマン輻射流体シミュレーションを行い、原始中性子星からのニュートリノ放射がルドー条件に基づく多次元的な対流によって増強される様子を定量化した。それと並行して、アインシュタイン方程式ソルバーとのボルツマン輻射流体コードの結合を進めており、近いうちに時空計量の時間発展を同時に解く星の重力崩壊シミュレーションを行う予定である。

加えて、爆発メカニズムを調べるための包括的な取り組みも進めている。ボルツマン輻射流体計算で得られたニュートリノ輻射場を新しい解析手法で精査し、従来よく使われていたニュートリノ輸送の近似法に含まれる誤差を定量的に評価して今後必要になる高精度近似法への足場を固めたほか、複数の核物質状態方程式に基づく星の重力崩壊シミュレーションを通して、原子核組成がダイナミクスに大きな影響を及ぼしうることを示した。さらに、将来的な超新星ニュートリノ観測に備えて、それを高速に解析して超新星の物理パラメータを推定するパイプラインを開発するなど、理論と観測にまたがる境界的な研究を進めている。

●誌上发表 Publications

(原著論文)

1. Iwakami, W., Harada, A., Nagakura, H., Akaho, R., Okawa, H., Furusawa, S., Matsufuru, H., Sumiyoshi, K., Yamada, S.: "Principle-axis Analysis of the Eddington Tensor for the Early Post-bounce Phase of Rotational Core-collapse Supernovae", *The Astrophysical Journal*, 933, 91 (2022)
2. Suwa, Y., Harada, A., Harada, M., Koshio, Y., Mori, M., Nakanishi, F., Nakazato, K., Sumiyoshi, K., Wendell, R. A.: "Observing Supernova Neutrino Light Curves with Super-Kamiokande. III. Extraction of Mass and Radius of Neutron Stars from Synthetic Data", *The Astrophysical Journal*, 934, 15
3. Akaho, R., Harada, A., Nagakura, H., Iwakami, W., Okawa, H., Furusawa, S., Matsufuru, H., Sumiyoshi, K., Yamada, S.: "Protoneutron Star Convection Simulated with a New General Relativistic Boltzmann Neutrino Radiation-Hydrodynamics Code", *The Astrophysical Journal*, in print (2023)* (preprint version: arXiv:2206.01673)
4. Sumiyoshi, K., Furusawa, S., Nagakura, H., Harada, A., Togashi, H., Nakazato, K., Suzuki, H.: "Effects of nuclear matter and composition in core-collapse supernovae and long-term proto-neutron star cooling", *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, in print (2023)* (preprint version: arXiv:2209.02474)

●口頭発表 Oral Presentations

(学会)

1. 原田 了, 「星の重力崩壊計算のための一般相対論的ボルツマン輻射流体コードの開発」、日本天文学会2022年秋季年会、オンライン/新潟大学五十嵐キャンパス、9月(2022)
ほか4件

●ポスター発表 Poster Presentations

(学会)

1. Harada, A.: "Probing the properties of NS1987A in SN1987A using neutrino observation data", *SuperVirtual 2022 -From Common to Exotic Transients-*, Online, Nov. (2022)
ほか2件

XXI-013 DALI, an axion dark-matter telescope probing the 6 to 60 GHz band

Name: Javier DE MIGUEL HERNANDEZ

Host Laboratory: Terahertz Sensing and Imaging Research Team
RIKEN Center for Advanced Photonics

Laboratory Head: Chiko OTANI

DALI presents a number of novelties that make it unique: it is an innovative proposal for a dark matter telescope resulted from mounting a haloscope on an altazimuthal platform at an assumable cost increase. This allows one to carry out axion-astronomy through the simultaneous observation for DM substructures, plus the classic (stationary) search for galactic halo axions. DALI benefits from a high manufacturability at a reasonable cost. It presents a high sensitivity over a broad band of frequencies with only minimal reconfiguration. Finally, dark-photon, another interesting DM candidate, naturally mixes with

ordinary photons so it could be also explored by DALI.

● Publications

Papers

1. De Miguel, J. and Otani, C. "Axion-photon multimessenger astronomy with giant flares." *Physical Review D* (2022): n. pag. 4, L041302
2. De Miguel, Javier and Otani, C. "Superdense beaming of axion dark matter in the vicinity of the light cylinder of pulsars." *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 2022 (2021): n. pag. 08(2022)026

XXI-014 量子ブラックホールによる量子重力理論および標準模型を超えた素粒子論の検証 Probing Quantum Gravity and Beyond Standard Model of Particle Physics with Quantum Black Holes

研究者氏名: 大下 翔誉 Naritaka OSHITA

受入研究室: 数理創造プログラム

(所属長 初田 哲男)

ブラックホールの量子論的側面を解明することで、重力の量子論の理解に近づき、最終的には宇宙誕生の起源に迫ることができると期待される。曲がった時空での場の量子論や量子重力の現象論などから、ブラックホールの表面は、量子揺らぎが大きくなる領域であると考えられている。これにより、ブラックホール表面で電磁波や重力波が反射される可能性も議論されている。これはホーキング放射(ブラックホールが量子効果で熱放射する現象としてホーキング博士によって予言された)によるブラックホールの蒸発現象にも反作用として影響し得ると考えられている。また、太陽質量よりもずっと小さい原始ブラックホールは、その質量に反比例した高い温度をもつ。これが、準安定かもしれないヒッグス場の相転移の触媒として作用する可能性が指摘されている。従って、観測可能な宇宙内に原始ブラックホールを生成するような宇宙論モデルや素粒子論モデルは棄却される可能性が議論されている。

本年度は、ブラックホールの地平面近傍での量子効果により、電磁波や重力波が反射される場合、それがホーキング放射にどの程度影響し得るかを数値計算で調べた。この計算は、地平面付近での波動の境界条件を調整して、

ブラックホール時空での波動方程式を解くことで行われた。その結果、ブラックホールの角運動量や反射率などで張られるパラメーター空間の広い領域で、ブラックホールのホーキング放射による寿命は、ファクター倍程度の影響しか受けないことが明らかとなった。また、太陽質量よりも十分小さい原始ブラックホールが存在する際には、そのブラックホールが準安定なヒッグス場の相転移の触媒として機能し得ることが予言されている。この計算で用いられた計算手法には問題視されている点があり、それがユークリッド経路積分の手法(時間を虚数として導入する手法)である。これを改善するべく、実時間での経路積分で場の相転移を扱う手法を提唱した。特に、Picard-Lefschetz理論やWheeler-DeWitt理論に基づいた定式化をおこなった。

●誌上发表 Publications

(原著論文)

1. Hayashi T., Kamada K., Oshita N., Yokoyama J.: "Vacuum decay in the Lorentzian path integral", *JCAP* 05 (2022) 041*
2. Koga I., Oshita N., Ueda K.: "Global study of the

scalar quasinormal modes of Kerr-AdS5 black holes: Stability, thermality, and horizon area quantization”, *Physical Review D* 105 (2022) 12, 12*

3. Oshita N., Motohashi H., Noda S.: “Evaporation of echoing black holes”, *Physical Review D* 106 (2022) 4, 4*
4. Oshita N., Shoji Y., Yamaguchi M.: “Polychronic Tunneling: New Tunneling Processes Experiencing Euclidean and Lorentzian Evolution Simultaneously”, *Physical Review D* 印刷中*

●口頭発表 Oral Presentations

(学会)

1. Oshita N.: “Lorentzian description of vacuum decay”,

PPP2022 (素粒子物理学の進展2022)、Kyoto (hybrid), August (2022)

2. Oshita N.: “Thermal ringdown and the excitation of Kerr overtones”, JGRG31, online, October (2022)
3. Oshita N.: “Black hole ringdown and overtones”, The 15th Asia Pacific Physics Conference, online, August (2022)
4. Oshita N.: “On the excitation of overtones”, Gravity: Current challenges in black hole physics and cosmology, June (2022)

(セミナー)

1. 大下翔誉: “Probing gravity with ringing black holes”, KEKセミナー(hybrid)、10月(2022)

XXI-015 マルチストレンジネス核におけるハイペロン間相互作用の研究 Study of Hyperon-Hyperon Interaction in Multi-Strangeness Nuclei

研究者氏名: 江川 弘行 Hiroyuki EKAWA

受入研究室: 開拓研究本部

齋藤高エネルギー原子核研究室
(所属長 齋藤 武彦)

昨年度末から今年度の頭にかけて、ドイツGSIで重イオンによるハイパー核生成実験(WASA-FRS実験)のデータ取得を遂行した。この実験では、 ${}^3\Lambda\text{H}$ ・ ${}^4\Lambda\text{H}$ の寿命測定、 $\text{nn}\Lambda$ 束縛状態の有無を確かめることを計画している。そのため、私が日本で開発したファイバー検出器を主に担当しつつ種々の検出器群の動作確認を行い、物理データの取得を完遂した。その後日本に戻ってきてからはWASA-FRS実験のデータ解析を行っている。各検出器の位置情報の較正、荷電粒子のトラッキング手法の開発、粒子識別や質量測定等の物理量の解析など、ハイパー核を検出するための基礎の解析を順調に進めている。また、昨年度に私が開発した機械学習によるトラック検出・粒子識別の手法について結果をまとめ、論文を執筆した。すでにジャーナルに投稿していて、現在は査読を待っている状況である。WASA-FRS実験の基礎的なデータ解析がまとまりつつあるので、早々に機械学習の手法を実験データに適用させる予定である。そして、従来の手法と比べることで機械学習による解析手法の有用性を確かめる。また、機械学習によるエマルション中のダブルストレンジネス事象の探索も進めている。これまでに当研究室が培ってきた機械学習による画像識別の手法をもとに、モンテカルロシミュレーションによって作成した教師データを用いてダブルストレンジネス核を検出するためのモデルを開発している。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Miwa K., Ahn K. J., Akazawa Y. *et al.*, : “Precise measurement of differential cross sections of the $\Sigma^+p \rightarrow \Lambda n$ reaction in momentum range 470-650 MeV/c”, *Phys.Rev.Lett.* 128, 7 072501 (2022)*
2. Fujita M., Ishikawa Y., Ukai M. *et al.*, : “Results of the Ξ^- atomic X-ray measurement in J-PARC E07”, *EPJ Web Conf.* 271, 03005 (2022)*
3. Gogami T., Achenbach P., Ahn K. J. *et al.*, “Strangeness physics programs by S-2S at J-PARC”, *EPJ Web Conf.* 271, 11002 (2022)*
4. Nakagawa M., Kasagi A., Liu E. *et al.*, “Unique approach for precise determination of binding energies of hypernuclei with nuclear emulsion and machine learning”, *EPJ Web Conf.* 271, 11006 (2022)*
5. Ekawa H. for the WASA-FRS Collaboration, “WASA-FRS HypHI experiment at GSI for studying light hypernuclei”, *EPJ Web Conf.* 271, 08012 (2022)*
6. Miwa K., Nanamura T., Sakao T. *et al.*, “Recent progress and future prospects of hyperon nucleon scattering experiment”, *EPJ Web Conf.* 271, 04001 (2022)*
7. Nanamura T., Miwa K., Ahn K. J. *et al.*, “Measurement of differential cross sections for Σ^+p elastic scattering in the momentum range 0.44–0.80 GeV/c”, *PTEP* 2022, 9 093D01 (2022)*
8. Yamamoto O. T., N. Chiga, H. Ekawa *et al.*, (E03/E07 Collaborations), “X-ray spectroscopy experiments on

exotic Ξ^- atoms at J-PARC”, PoS 380, PANIC2021, 211 (2022)*

9. Kasagi A., Liu E., Nakagawa M. *et al.*, “Precise measurement on the binding energy of hypertriton from the nuclear emulsion data using analysis with machine learning”, Rev.Mex.Fis.Suppl. 3, 0308122 (2022)*
10. Muneem A., Yoshida J., Ekawa H. *et al.*, “Study on the reusability of fluorescent nuclear track detectors using optical bleaching”, Radiation Measurements 158, 106863 (2022)*

●口頭発表 Oral Presentations

(学会)

1. Ekawa Hiroyuki for the WASA-FRS Collaboration : “WASA-FRS HypHI experiment at GSI for studying light hypernuclei”, 14th International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics - HYP2022, Prague, Czech Republic, June(2022)
2. 江川弘行 for the WASA-FRS Collaboration : “GSIにおける重オンハイパー核実験(WASA-FRS HypHI 実験)”, 日本物理学会2022年秋季大会、岡山、9月(2022)

XXI-016 2次元ファンデルワールスヘテロ構造におけるトポロジカル超伝導の実空間探査 Real-space Investigation of Topological Superconductivity in Two-Dimensional Van der Waals Heterostructures

研究者氏名：成塚 政裕 Masahiro NARITSUKA
受入研究室：創発物性科学研究センター
創発物性計測研究チーム
(所属長 花栗 哲郎)

トポロジに基いた超伝導状態の分類は、多彩な超伝導状態を理解する新たな視点を与えることから物性研究における新たな潮流となっている。しかしながら、バルク物質のトポロジカル超伝導体は非常に数が限られ、さらなる実験系の確立が必要である。そこで本研究では、主に分子線エピタキシー法を用いたボトムアップの薄膜作製技術により二次元超伝導薄膜や磁性体/超伝導体ヘテロ積層構造を作製し、極低温走査トンネル分光イメージングから、トポロジカル超伝導状態を実験的に検証する新たなプラットフォームを確立することを目的とする。さらに、磁性体を用いたヘテロ積層構造にひねりを導入することで磁気状態を制御し、バルクには見られないような空間変調構造を人工的に実現させ、期待されるトポロジカル相転移などを実験的に検証することを目標とする。

本年度は、超伝導状態の研究を行うプラットフォームとして2次元ファンデルワールス超伝導体NbSe₂に着目した。具体的には、分子線エピタキシー法を用いてSiC(0001)上のエピタキシャルグラフェン基板に原子層NbSe₂を成長させた薄膜試料を作製し、極低温走査トンネル分光イメージングによるNbSe₂単層薄膜の超伝導状態の評価を行った。その結果、極低温の準粒子干渉効果測定から、超伝導ギャップ内のゼロエネルギー付近にNbSe₂の結晶軸方向とも基板の結晶軸方向とも異なる、新たな軸を持ったシグナルを観測した。この超伝導状態は単純な単層NbSe₂の電子状態からでは説明のつかないため、試料と基板がつくるモアレポテンシャルが超伝導状態

に影響を与えていると考えられる。現在は、モアレポテンシャルの影響を念頭にデータの解析を行うとともに、現象の再現性の確認を行っている。

これまでの研究から基板層の均質性や面内配向性がNbSe₂単層薄膜の超伝導特性に影響することが明らかになってきた。そのため、基板となるエピタキシャルグラフェンの合成方法を見直す必要に迫られている。そこで、今後はまず、新たにアルゴンガス雰囲気でのエピタキシャルグラフェン合成によりグラフェンの大ドメイン化を試みる。その上で、2次元ファンデルワールス磁性体薄膜とNbSe₂単層薄膜を組み合わせたヘテロ積層系を作製し、走査トンネル分光イメージングを用いてトポロジカル超伝導状態で期待されるエッジ状態などの実空間測定を行うことを今後の計画としている。

●口頭発表 Oral Presentations

1. 成塚政裕：“単層NbSe₂の分子線エピタキシー成長と走査トンネル分光イメージング”、新学術領域研究「量子液晶の物性科学」第2回量子物質開発フォーラム、東北大学、1月(2023)

●ポスター発表 Poster Presentations

1. M. Naritsuka, T. Machida, and T. Hanaguri: “Symmetry breaking in quasiparticle interference imaging of superconducting monolayer NbSe₂”, The 13th TOYOTA RIKEN International Workshop: Integrated Spectroscopy for Strong Electron Correlation -Theory, Computation and Experiment, University of Tokyo, Japan, December (2022)

XIX-017 First Observation of Dynamics of Antiskyrmions with Electric Current Excitation

Name: Licong PENG

Host Laboratory: Electronic States Microscopy Research Team
RIKEN Center for Emergent Matter Science
Laboratory Head : Xiuzhen YU

Magnetic skyrmions with vortex-like spin textures have been extensively studied in fields of fundamental physics and spintronics. Recently, antiskyrmions have attracted much more attention because of their unique spin configurations with Bloch- and Néel-type domain walls arising from an anisotropic Dzyaloshinskii–Moriya interaction (DMI). Driving and controlling their motions promises skyrmion/antiskyrmion-based spintronic devices.

In this year, I have studied the formation of stable antiskyrmion by chemical doping controlled magnetic anisotropy in (Fe, Ni)₃P with S4 symmetry. We directly observed the in-plane domains (attributed to the easy-plane anisotropy) transit into easy-axis anisotropy induced antiskyrmions. We then demonstrate the formation and control of confined metastable antiskyrmions by way of quenching the thermodynamically stable phase in the S4-symmetry magnet Fe_{1.9}Ni_{0.9}Pd_{0.2}P. These antiskyrmions persist in a wide temperature-magnetic field region, which importantly includes room temperature and zero magnetic field. We reveal that the formation of metastable antiskyrmions depends strongly on the magnitude of the cooling magnetic field, while less depends on the cooling rate. We also investigate the topological transitions among antiskyrmions, skyrmions, and non-topological bubbles as functions of temperature and external magnetic field. These results are very helpful for understanding and controlling antiskyrmion properties and their dynamics.

Furthermore, I have investigated the electric current controlled antiskyrmions dynamics. First, we used millisecond pulsed current to excite antiskyrmion to skyrmion transformation. The long-duration pulse may induce too much Joule heating, which will induce the temperature increase and the transformation of skyrmion/antiskyrmions and their annihilation. These experimental results inspire us to reduce the pulse width, and try the nanosecond pulsed current to drive antiskyrmions. We then setup the nanosecond pulsed current availability system within Lorentz TEM. We have successfully driven the single antiskyrmion, antiskyrmion cluster, and antiskyrmion lattice motions, systematically performed the electric current j , magnetic B , pulse width dependence of

antiskyrmion motion, and additionally performed the current-drive antiskyrmion motion in two kinds of devices: one is the current flowing along the Bloch line, the other is the current flowing along the Bloch Walls. These results have basically reached the research purpose in present project.

● Publications

Original papers

1. Karube K., Peng L. C., Masell J., Hemmida M., Nidda H. A. K., Kézsmárki I., Yu X. Z., Tokura Y., Taguchi Y.: Doping Control of Magnetic Anisotropy for Stable Antiskyrmion Formation in Schreibersite (Fe,Ni)₃P with S4 symmetry, *Advanced Materials* 34, 2108770 (2022).
2. Peng L. C., Iakoubovskii K. V., Karube K., Taguchi Y., Tokura Y. and Yu X. Z.: Formation and Control of Zero-Field Antiskyrmions in Confining Geometries, *Advanced Science* 9, 2202950 (2022).*

● Oral Presentations

Conferences

1. Peng L. C., Takagi R., Karube K., Koshibae W., Masell J., Shibata K., Kagawa F., Seki S., Nagaosa N., Tokura Y., Taguchi Y., and Yu X. Z.: “Real-space imaging of topological skyrmions/antiskyrmions and their transformation”, Joint MMM-INTERMAG, Online, 2022, Jan. 10-14
2. Peng L. C., Karube K., Taguchi Y., Nagaosa N., Tokura Y., Yu X.Z.: “Current-driven single-skyrmion motion in a room-temperature chiral-lattice magnet”, Joint MMM-INTERMAG, Online, 2022, Jan. 10-14
3. Peng L. C., Karube K., Taguchi Y., Nagaosa N., Tokura Y., and Yu X. Z.: “Dynamic transition of current-driven single-skyrmion motion in a chiral-lattice magnet”, 29th International Conference on Low Temperature Physics, Sapporo, Japan 2022 Aug.18-24
4. Peng L. C. “In-situ L-TEM observations of magnetic skyrmion and antiskyrmion dynamics” Third Japan-Canada Microscopy Societies Joint Symposium, Okayama, Japan 2022 Nov. 04-05

XIX-018 Anomaly-Based Symmetry Constraints on Quantum Gapped Phases and Gapless Phases in Many-Body Systems

Name: Yuan YAO

Host Laboratory: Condensed Matter Theory Laboratory
RIKEN Cluster for Pioneering Research
Laboratory Head: Akira FURUSAKI

The present study focuses on the symmetry constraints on quantum phases in many-body systems. It consists of the following two parts.

1) Gappability index in quantum-many body systems: We propose an integral index which characterizes the degree of ingappability, namely the difficulty to induce a unique ground state with a nonvanishing excitation gap, in the presence of a symmetry. It represents the dimension of the subspace of ambient uniquely-gapped phases in the entire G -symmetric parameter space. The celebrated Lieb-Schultz-Mattis theorem corresponds, in our formulation, to the case that index vanishes for the symmetry including translation symmetry. We illustrate the usefulness of the index by discussing the phase diagram of spin-1/2 antiferromagnets in various dimensions, which do not necessarily have the translation symmetry.

2) Lieb-Schultz-Mattis ingappabilities from lattice rotation and duality symmetry:

There are two works on the topic of Lieb-Schultz-Mattis ingappabilities; symmetry enforces the system not to have a trivially gapped ground state. In the first one, we propose a geometric framework to study quantum many-body systems with discrete spin-rotation symmetries and lattice inversion or rotation symmetry, but without translation symmetry assumed. In the second work, we study quantum many-body systems which are self-dual under duality transformation connecting different symmetry protected topological (SPT) phases. We provide a geometric explanation of the criticality of

these self-dual models. More precisely, we show a ground state (quasi)degeneracy under the periodic boundary conditions, i.e., the ingappability of the bulk spectrum. Equivalently, the symmetry group at criticality, including the duality symmetry, has a mixed 't Hooft anomaly. This approach can not only predict the spectrum of the self-dual model with ordinary 0-form symmetry but also be applied to that with generalized symmetry, such as higher form and subsystem symmetry. As an application, we illustrate our results with several examples in one and two dimensions, which separate two different SPTs.

● Publication

Original Paper

1. Yao Y., Oshikawa M., Furusaki A.: Gappability Index for Quantum Many-Body Systems, Phys. Rev. Lett. 129, 017204 (2022)
2. Yao Y., Furusaki A.: Geometric approach to Lieb-Schultz-Mattis theorem without translation symmetry under inversion or rotation symmetry, Phys. Rev. B 106, 045125 (2022)
3. Li L., Yao Y., Duality viewpoint of criticality, Phys. Rev. B 106, 224420 (2022)

● Poster Presentation

International Conference

1. Yao Y., Oshikawa M., Furusaki A., "Gappability Index in Quantum Many-Body Systems", Novel Quantum States in Condensed Matter 2022, Kyoto, JAPAN 2022, Oct. 31 - Dec. 2.

XIX-019 室温トポロジカル磁性体における非散逸輸送現象の開拓

Exploration of Non-dissipative Transport Phenomena in High-temperature Topological Magnets

研究者氏名: 藤代 有絵子 Yukako FUJISHIRO
受入研究室: 創発物性科学研究センター
強相関物性研究グループ
(所属長 十倉 好紀)

トポロジカルに非自明な磁気構造・電子構造は伝導電子との結合を通して多彩な輸送現象をもたらす。本研究ではトポロジカル磁性体を対象とし、既存の創発輸送現象の

巨大化・高温化に加えて、質的に新しい電荷輸送現象の開拓にも取り組むことで、次世代の省電力エレクトロニクスへの貢献を目指す。本年度は主にダイヤモンドアンビルセ

ル(DAC)を用いた超高压実験とFIB加工デバイスを用いた創発インダクタンズ(EEMI)探索等のテーマを基軸に研究を行った。

[1]FeGeにおける圧力下トポロジカル非フェルミ液体と金属絶縁体転移の探索

カイラルならせん磁性体FeGeは室温スキルミオンをもつ代表物質であり、一方同じ結晶構造をもつFeSiは強い電子相関とスピン揺らぎをもつ非磁性狭ギャップ半導体として注目を集めてきた。本研究テーマではDACを用いた超高压印加により両者の非自明な相転移を探索する。圧力下での磁気輸送特性の振る舞いから、長距離磁気秩序が消失する量子臨界点(~19GPa)よりもさらに上の高压領域で多彩な磁気相・電子相が存在する可能性を見出しつつある。

[2]K-TCNQにおける圧力下電気抵抗とX線回折実験

1次元有機モット絶縁体でスピンパイエルズ(SP)転移を示すK-TCNQに超高压を印加することで、室温における電気抵抗が20 GPaの印加で約6桁小さくなることを発見した。また、He媒体を用いた非常に静水圧性の高い環境で、圧力下单結晶X線回折の実験をKEKにおいて行うことに成功し、SP相の圧力誘起量子臨界現象やリエントラントSP相の可能性を発見した。

[3]多彩な機構による創発インダクタンズ(EEMI)の探索

短周期ならせん磁気構造を持つトポロジカル半金属のZintl化合物Euln₂As₂において巨大なEEMIを発見し、ならせん磁気構造の詳細(commensurate/incommensurate)やスピンフリップ転移などに対応して、EEMIが様々な符号・周波数依存性を示す可能性を明らかにした。また、「共線的」磁気構造を持つカゴメ強磁性体Nd₃Ru₄Al₁₂の磁気転移温度直上においても、スピン揺らぎによるvector spin chiralityのみでEEMIが発現する可能性を見出し、従来のならせん磁気構造の枠組みを超えて、EEMIが多彩な磁性体で発現する可能性を見出した。

●誌上发表 Publications

(原著論文)

1. Topological magnetic structures of MnGe: a neutron diffraction and symmetry analysis study
2. V. Pomjakushin, I. Plokhikh, J. S. White, Y. Fujishiro, N. Kanazawa, Y. Tokura and E. Pomjakushina
[arXiv:2209.15468](https://arxiv.org/abs/2209.15468)

(総説)

1. Topological phase transitions and critical phenomena associated with unwinding of spin crystals by high magnetic fields
N. Kanazawa, Y. Fujishiro, K. Akiba, R. Kurihara, H. Mitamura, A. Miyake, A. Matsuo, K. Kindo, M. Tokunaga and Y. Tokura
J. Phys. Soc. Jpn. **91**, 101002 (2022)

●口頭発表 Oral Presentations

1. Y. Fujishiro, “Emergent transport phenomena and phase transitions in topological chiral magnets”, Workshop on topology in magnetic materials, Switzerland, November 2022
2. 藤代有絵子, 寺倉千恵子, 三宅厚志, 徳永将史, 金澤直也, 小川直毅, 清水克哉, 十倉好紀, 「カイラルならせん磁性体FeGeにおける圧力誘起量子相転移と多彩な磁気輸送現象」, 第63回高压討論会, 大阪, 2022年12月
3. Y. Fujishiro, C. Terakura, A. Miyake, M. Tokunaga, N. Kanazawa, N. Ogawa, K. Shimizu, Y. Tokura, “Quantum phase transition and magneto-transport properties in FeGe under pressure”, APS March Meeting 2023, Las Vegas, USA, March 2023

●ポスター発表 Poster Presentations

1. Y. Fujishiro, “Versatile topological spin textures and emergent transport phenomena in pressure controlled cubic chiral magnets”, Symposium on Quantum Material Synthesis 2022, Hawaii, USA, September 2022
2. Y. Fujishiro, C. Terakura, A. Miyake, M. Tokunaga, N. Kanazawa, K. Shimizu, Y. Tokura, “Quantum phase transition and magneto-transport properties of a chiral helimagnet FeGe under pressure”, 29th International Conference on LOW TEMPERATURE PHYSICS, Sapporo, August 2022

XXI-020 室温における量子スピンホール系を用いたスイッチング素子の開発 Engineering a Quantum Spin Hall Switching Device at Room Temperature

研究者氏名：佐藤 雄貴 Yuki SATO
受入研究室：創発物性科学研究センター
強相関量子伝導研究チーム
(所属長 十倉 好紀)

近年電子状態のトポロジーに着目した物性研究が盛んに行われており、これらの系にしばしば現れる無散逸エッジ流やマヨラナ準粒子などは量子計算や次世代スピントロニクスデバイスなどの応用的側面からも注目を集めている。これらの系の物性を高い自由度で設計・制御する方法の一つとして、物質の組成制御や人工超格子構造の作製が容易な薄膜成長技術が有力な手法として期待されている。今年度はまずトポロジカル超伝導体の候補物質である鉄系超伝導体 $\text{Fe}(\text{Se}_{1-x}\text{Te}_x)$ の薄膜試料を分子線エピタキシー法により作製し、成長条件が結晶の品質や超伝導の特性に与える影響を調べた。さらにこの物質とトポロジカル絶縁体とのエピタキシャルヘテロ積層構造を作製し、この系に現れるトポロジカル表面状態や時間反転対称性・空間反転対称性の破れに起因する新規量子輸送特性の観測を目指した。本研究課題で今年度達成された成果は主に以下の通りである。

(1) Se:Te比を連続的に変化させ、 $x = 0$ から1の全ての領域において単結晶薄膜試料の作製に成功した。また各組成の試料において超伝導転移温度 T_c を最適化するアニール条件を調べ、 $x = 0.9$ 付近で T_c が最大となることを確認した。この結果はバルク試料で得られたものと定性的に異なる結果である。

(2) トポロジカル絶縁体とのヘテロ構造において非相反輸送特性を観測した。更なる顕著な例として超伝導ダイオード効果も確認した。非相反輸送効果は系の超伝導の次元性が低くなるにつれて増大する様子が観測されたが、これは系の空間反転対称性の破れの効果が増大したためと考えられる。一方で低次元系においては量子揺らぎのため超伝導転移がブロードになることが知られており、

これにより超伝導ダイオード効果の効率は別の物質における先行研究の結果よりも非常に低いことが判明した。

(3) 上記デバイスにおいてパルス電流の印加による磁化のスイッチングを確認した。この効果が超伝導状態においてどのような特性を示すかは今後検証したい課題である。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Xiang Z., Chen K.-W., Chen Lu, Asaba T., Sato Y., Zhang N., Zhang D., Kasahara Y., Iga F., Coniglio W. A., Matsuda Y., Singleton J. and Li Lu : "Hall anomaly, quantum oscillations and possible Lifshitz transitions in Kondo insulator YbB_{12} : evidence for unconventional charge transport", *Phys. Rev. X*, 12, 021050 (2022)*
2. Murayama H., Tominaga T., Asaba T., de Oliveira Silva A., Sato Y., Suzuki H., Ukai Y., Suetsugu S., Kasahara Y., Okuma R., Kimchi I. and Matsuda Y. : "Universal scaling of the specific heat in the $S = 1/2$ quantum Kagome antiferromagnet herbertsmithite", *Phys. Rev. B*, 106, 174406 (2022)*

●口頭発表 Oral Presentations

1. Sato Y., : "Charge-neutral fermions and magnetic field-driven instability in insulating YbIr_3Si_7 ", 29th International Conference on Low Temperature Physics, Sapporo, invited (2022)
2. Sato Y., : "Nonreciprocity as a probe of exotic quantum many-body states in iron-based superconductors", APS March Meeting, Las Vegas, (2023)

XXI-021 多自由度が絡みあう強相関電子系物質における軌道状態の実空間観測とその外場応答

Real-space observation of orbital states in strongly correlated electronic systems with multiple degrees of freedom and its external response

研究者氏名：鬼頭 俊介 Shunsuke KITOU
受入研究室：創発物性科学研究センター
強相関量子構造研究チーム
(所属長 有馬 孝尚)

全ての物性は電子の空間的な分布状態(電子軌道)と密接に関係している。強相関電子系物質においては、電子軌道の自由度が、電荷、スピン、格子などの自由度と結合することで、エキゾチックな量子物性が出現する。本研究では大型放射光施設 SPring-8 や Photon Factory の高品質な X 線を活用することで、強相関電子系物質中における軌道自由度に着目した新規研究手法の開拓と物性解明を行った。本年度は主に以下の2つのテーマに取り組んだ。

(1) パイロクロア型酸化物 $Y_2Mo_2O_7$ における短距離軌道秩序の解明

$Y_2Mo_2O_7$ は構造的な欠陥が存在しない純良な系にも関わらず、スピングラス転移を示す珍しい物質である。高品質な単結晶試料を用いた放射光 X 回折実験の結果、 $q_{diff}=(1/3, 1/3, 0)$ に対応する逆格子空間位置において、特徴的な散漫散乱の観測に成功した。さらに、逆モンテカルロシミュレーションを用いた散漫散乱解析と共鳴軟 X 線散乱実験の結果、3次元的なパイロクロア格子内において1次元的な短距離軌道秩序が実現していることを明らかにした。短距離軌道秩序に起因した内因的な乱れがスピングラス転移に大きく影響していると考えられる。

(2) パイロクロア型酸化物 $R_2Ir_2O_7$ ($R=Eu, Pr$) における $4f, 5d$ 軌道電子の直接観測

$R_2Ir_2O_7$ は希土類元素 R のイオン半径の変化に起因した $Ir-O-Ir$ 角の微小な変化によって、基底状態が反強磁性絶縁体 ($R=Eu$) から常磁性金属 ($R=Pr$) へ量子相転移をする。この系の放射光 X 線回折実験及び、精密電子密度解析の結果、 Pr 及び Eu サイトにおいて、 $4f$ 電子の空間分布状態の可視化に成功した。さらに、得られた電子密度の異方性は、 LS 結合描像において強いスピン-軌道相互作用を考慮した計算結果とよく一致した。また、 Ir サイトにおいては、 $R=Eu$ と $R=Pr$ で同じ $5d$ 電子配置が予想されるにも関わらず、電子密度分布は異なる異方性を示した。この結果はこの系の局在性の違いと関連する。詳細については現在解析中である。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. T. Manjo, S. Kitou, N. Katayama, S. Nakamura, T. Katsufuji, Y. Nii, T. Arima, J. Nasu, T. Hasegawa, K. Sugimoto, D. Ishikawa, A. Q. R. Baron, and H. Sawa: "Do electron distributions with orbital degree of freedom exhibit anisotropy?", *Mater. Adv.* 3, 3192 (2022).
2. K. Ueda, H. Ishizuka, M. Kriener, S. Kitou, D. Maryenko, M. Kawamura, T. Arima, M. Kawasaki, and Y. Tokura: "Experimental signatures of versatile Weyl semimetal in pyrochlore iridate with spin-ice like magnetic orders", *Phys. Rev. B* 105, L161102 (2022).
3. L. Spitz, T. Nomoto, S. Kitou, H. Nakao, A. Kikkawa, S. Francoual, Y. Taguchi, R. Arita, Y. Tokura, T. Arima, and M. Hirschberger: "Entropy-assisted, long-period stacking of honeycomb layers in an AlB_2 -type silicide", *J. Am. Chem. Soc.* 144, 16866 (2022).
4. T. Kurumaji, M. Gen, S. Kitou, H. Sagayama, A. Ikeda, and T. Arima: "Anisotropic magnetotransport properties coupled with spiral spin modulation in a magnetic semimetal $EuZnGe$ ", *Phys. Rev. Materials* 6, 094410 (2022).

(総説)

1. 澤 博、萬條 太駿、鬼頭 俊介: "放射光 X 線単結晶 X 線回折による価電子密度分布解析", *日本結晶学会誌* Vol. 64, No. 2, p98-106/ May 2022

●口頭発表 Oral Presentations

(学会)

1. 鬼頭俊介、上田健太郎、中村唯我、杉本邦久、野村悠祐、有田亮太郎、十倉好紀、有馬孝尚: 「パイロクロア型酸化物 $Pr_2Ir_2O_7$ 及び $Eu_2Ir_2O_7$ における $4f, 5d$ 軌道電子の直接観測」、日本物理学会 2022年秋季大会、12pW331-17、東京工業大学、2022年9月12-15日
2. 鬼頭俊介、森仁志、福田光、上田健太郎、金子良夫、原武史、澤博、佐賀山基、萬條太駿、石川大介、Alfred Q. R. Baron、有田亮太郎、十倉好紀、有馬孝尚: 「非弾性 X 線散乱実験によるスピングラスパイロクロア $Y_2Mo_2O_7$ におけるフォノンダイナミクスの観測」、日本物理学会 2022年秋季大会、14pW331-9、東京工業大学、2022年9月12-15日
3. 鬼頭俊介、福田光、上田健太郎、金子良夫、細木雄斗、

- 澤博、中村唯我、杉本邦久、十倉好紀、有馬孝尚：「単結晶X線散漫散乱解析によるスピングラスパイロクロア $Y_2Mo_2O_7$ における1次元短距離軌道秩序の観測」、日本物理学会 2022年秋季大会、14pW331-10、東京工業大学、2022年9月12-15日
4. 鬼頭俊介：「放射光X線回折を用いた強相関電子系物質における電子軌道観測」、量子液晶の物性科学 第8回QLC若手コロキウム、オンライン、2022年9月26日(招待講演)
5. 鬼頭俊介、森仁志、福田光、上田健太郎、金子良夫、原武史、澤博、佐賀山基、萬條太駿、石川大介、Alfred Q. R. Baron、有田亮太郎、十倉好紀、有馬孝尚：「非弾性X線散乱実験によるスピングラスパイロクロア $Y_2Mo_2O_7$ におけるフォノンダイナミクスの観測」、第36回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム、3F07、立命館大学、2023年1月7-9日
6. 鬼頭俊介、福田光、上田健太郎、金子良夫、細木雄斗、澤博、中村唯我、杉本邦久、十倉好紀、有馬孝尚：「スピングラスパイロクロア $Y_2Mo_2O_7$ におけるリバースモンテカルロシミュレーションを用いた単結晶X線散漫散乱解析」、第36回日本放射光学会年会・放射光科学

合同シンポジウム、3F08、立命館大学、2023年1月7-9日

7. 鬼頭俊介、巖正輝、中村唯我、杉本邦久、徳永裕介、石渡晋太郎、有馬孝尚：「放射光X線回折実験による立方晶ペロブスカイト $SrFeO_3$ における3d電子トリガンドホールの直接観測」、日本物理学会 2023年春季大会、オンライン開催、2023年3月22-25日
8. 鬼頭俊介、森仁志、福田光、上田健太郎、金子良夫、原武史、澤博、山崎裕一、中尾裕則、十倉好紀、有馬孝尚：「共鳴軟X線散乱実験によるパイロクロア型酸化物 $Y_2Mo_2O_7$ における短距離軌道秩序の直接観測」、日本物理学会 2023年春季大会、オンライン開催、2023年3月22-25日

●ポスター発表 Poster Presentations

1. S. Kitou, Y. Kaneko, Y. Tokura, H. Sawa, and T. Arima: "Direct observation of the valence electron density distribution in strongly correlated electron systems", 29th International Conference on Low Temperature Physics, P19-SF3B-22, Sapporo, Japan, August, 18-24, 2022

XXI-022 ファンデルワールス超薄膜・界面設計に基づく創発二次元物性開拓

Emergent Two-Dimensional Properties on Van der Waals Ultrathin Films and Heterointerfaces

研究者氏名：松岡 秀樹 Hideki MATSUOKA
受入研究室：創発物性科学研究センター
創発デバイス研究チーム
(所属長 岩佐 義宏)

ファンデルワールス(VdW)物質の単層あるいは数層、即ち二次元物質やそのヘテロ構造は、二次元系特有の物性が発現する場として近年注目を集めている。本研究では、MBE(分子線エピタキシー法)で作製した二次元物質中の超伝導・磁性を開拓することを目標に研究を行った。その成果について報告する。

①ファンデルワールス物質同士を積層させて得られるファンデルワールス層は良質なヘテロ構造が原子層数層レベルで作製できることから近年注目を集めている。そこで自分は、二次元磁性体 V_5Se_8 と二次元金属 $NbSe_2$ を組み合わせた二次元磁性ヘテロ界面 $V_5Se_8/NbSe_2$ に注目した。特に、 $NbSe_2$ は特殊な結晶構造を反映したゼーマン型と呼ばれるスピン軌道相互作用を有するため、このゼーマン型スピン軌道相互作用と磁性がいかに関与し合うかが興味の対象であった。以前、 $NbSe_2$ 側が V_5Se_8 側に与える影響、つまり V_5Se_8 中の磁性が $NbSe_2$ によって強化されることを報告した。今年度の成果はその逆の効果、つまりもともと非磁性体であった $NbSe_2$ 側が V_5Se_8 の磁性を感じて

それ自体磁化したことの発見である。それだけでなく、この時 $NbSe_2$ では、伝導電子のスピンとバレーの両方が自発的に分極した「フェロバレー強磁性」という新しい状態が形成されていることを実験と理論の比較から明らかにした。ファンデルワールスヘテロ構造でこのような非磁性金属への磁性の誘起を実現した例は初であった。

②ファンデルワールス超薄膜として作製可能な $3R-TaSe_2$ は超伝導体であるが、この物質のユニークさはその結晶構造の持つ反転対称性の破れにある。一般に反転対称性の破れた超伝導は面直方向の対称性が破れたラッシュバ型と面内方向の対称性が破れたイジング型の二種類に大別されるが、 $3R-TaSe_2$ の反転対称性の破れでは面直方向と面内方向の両方が共存しており、従ってラッシュバ-イジング複合型超伝導体と言えるものである。そこで、この $3R-TaSe_2$ において対称性の破れを反映した輸送現象を開拓することを目標に研究を行っている。今年度のアップデートとしてマイクロデバイスの作製プロセスを改善し、プロセス前後でほぼ変わらない良質な超伝導物性を

得ることに成功したとともに、以下に述べる興味深い現象を観測することに成功した。(1) 巨大な非相反伝導現象を観測することに成功した。この巨大さは、非相反伝導シグナルと金属状態での抵抗値の比をパラメータとしたときに、これまで報告された超伝導非相反伝導現象に比べておよそ一桁以上上回る大きさである。(2) 磁場下反対称縦抵抗を観測した。この輸送現象は通常は生じえない異常なシグナルであるが、系がラッシュバ系かつイジング型であった場合にのみ許されることが群論から導ける。これまで、対称性の破れを反映した超伝導輸送現象と言えば非相反伝導現象のみであったが、この輸送現象は対称性の破れを反映した全く新たな輸送現象である可能性がある。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Matsuoka H., Habe T., Iwasa Y., Koshino M. & Nakano M.: "Spontaneous spin-valley polarization in NbSe₂ at a van der Waals interface", *Nature Communications* 13, 5129 (2022)*
2. Saika B. K., Hamao S., Majima Y., Huang X., Matsuoka H., Yoshida S., Kitamura M., Sakano M., Hatanaka T., Nomoto T., Hirayama M., Horiba K., Kumigashira H., Arita R., Iwasa Y., Nakano M., and Ishizaka K.: "Signature of topological band crossing in ferromagnetic Cr_{1/3}NbSe₂ epitaxial thin film", *Physical Review Research* 4, L042021 (2022)*
3. Wang Y., Kajihara S., Matsuoka H., Saika B. K., Yamagami K., Takeda Y., Wadati H., Ishizaka K., Iwasa Y., and Nakano M.: "Layer-Number-

Independent Two-Dimensional Ferromagnetism in Cr₃Te₄", *Nano Letters* 22, 9964–9971 (2022)*

●口頭発表 Oral Presentations

(学会)

1. Matsuoka H., Musashi M., Tanaka Y., Endo K., Ogawa N., Iwasa Y., Nakano M.: Nonreciprocal transport properties in a polar Ising superconductor, Recent Progress in Graphene Research 2022, Online, November, 2022.
2. Matsuoka H., Habe T., Iwasa Y., Koshino M. & Nakano M.: Van der Waals interfacial proximity effect induced spin polarization in NbSe₂, Recent Progress in Graphene Research 2022, Online, November, 2022.
3. 松岡 秀樹、武藏 摩紀、田中 勇貴、遠藤 幹大、小川 直毅、岩佐 義宏、中野 匡規：極性イジング超伝導体におけるバルク整流効果、日本物理学会2022年秋季大会、東京、9月、2022年
4. Matsuoka H., Habe T., Iwasa Y., Koshino M. & Nakano M.: Spin-valley polarization in NbSe₂ at van der Waals interface, APS March Meeting 2023, Las Vegas, March, 2023.

●ポスター発表 Poster Presentations

(学会)

1. Matsuoka H., Habe T., Iwasa Y., Koshino M. & Nakano M.: Ferromagnetic state in NbSe₂ at van der Waals interface, 29th International Conference on Low Temperature Physics 2022, Sapporo, August, 2022.

XXI-023 Non-Hermitian Topological States

Name: XiaoXiao ZHANG

Host Laboratory: Strong Correlation Theory Research Group
RIKEN Center for Emergent Matter Science
Laboratory Head : Naoto NAGAOSA

From the beginning of this year, I have two projects carried over from the previous year. In one work published this year, we proposed the new concept of nonequilibrium topological spin texture in the momentum space, which is based on ultrafast optical pump-probe ARPES detection of the surface state of a three-dimensional topological insulator. The main finding is the emergence of novel nonequilibrium tornado-like textures in the spin channel and momentum space, which bear a topological-winding correspondence to the intrinsic and extrinsic helicity factors in this light-matter interacting system. In the other work published this year, motivated by

the recent proposal and experimental investigation of a three-dimensional (3D) quantum Hall effect (QHE) in Weyl semimetals, we asked the question of whether this 3D QHE is largely the same as the conventional 2D QHE. If not, this system will be a new quantum state of matter. We tackled this problem by calculating the fully 3D mesoscopic quantum transport, based on wave function scattering or nonequilibrium Green's function. We revealed a strong 3D anisotropy in the quantum transport, where QHE remains intact only when the current is orthogonal to the Weyl point alignment. This finding will have a strong impact to experimentalists.

Combining two topics of our continual interest, spin texture in momentum space and non-Hermitian physics, I also worked on an experimentally highly relevant problem -- although non-Hermitian systems and related new phenomena are gaining great attention recently, a pressing issue is the lack of concrete solid-state proposals accessible to experimental detection. We bridge this gap by proposing a new platform: topological insulator surface state with magnet doping induced relaxation provides the nontrivial non-Hermitian system; spin-resolved ARPES detects the non-Hermitian effects. The non-Hermiticity manifests as exotic spin textures in the energy-momentum space not seen in the Hermitian counterpart, which include topological skyrmions, monopoles, merons, and vortex pairs, depending on the type of non-Hermiticity. This surpasses the common perspective of effective non-Hermitian Hamiltonian and opens much wider observation windows in the spin channel rarely inspected previously. This work has been submitted and is under review. A closely related and subsequent study has also begun, which explores the further interplay with optical pumping.

● Publications

Original Paper

1. X.-X. Zhang, N. Nagaosa, Anisotropic 3D quantum Hall effect and magnetotransport in mesoscopic Weyl semimetals, *Nano Lett.* 22, 3033 (2022)
2. X.-X. Zhang, N. Nagaosa, Nonequilibrium topological spin textures in momentum space, *Proc. Natl. Acad. Sci.* 119, e2116976119 (2022)

● Oral presentations

International conference

1. X.-X. Zhang, 'Anisotropic 3D Quantum Hall effect in Weyl semimetals', International Conference on Physics and Its Applications, July 18-20, 2022, San Francisco, USA

University Academic Talk

1. X.-X. Zhang, 'Dirac quantum material – from transport to nonequilibrium', Invited Talk at Kavli Institute of Theoretical Physics at UCAS, May 9, 2022, Beijing, China

● Poster presentations

International conference

1. X.-X. Zhang, P22-SF4-05 - 'Anisotropic 3D Quantum Hall effect in Weyl semimetals', 29th International Conference on Low Temperature Physics, August 18-24, 2022, Sapporo, Japan

XXI-024 **Ab initio Approach for Phase Transitions Induced by Fermion Pairing: Superconductivity and Exciton Condensation**

Name: Hsiao-Yi CHEN

Host Laboratory: First-Principles Materials Science Research Team
RIKEN Center for Emergent Matter Science
Laboratory Head : Ryotaro ARITA

While the Pauli exclusion principle forbids the fermions to occupy the same quantum state, a composite particle involving an even number of fermions shows a bosonic identity and follows the even statistics. Thus, with finite correlation, a fermion pair can condensate and induce the instability of the electronic structure to trigger a phase transition in a crystalline material. While such a mechanism has been proposed for decades, current theoretical approaches can only provide qualitative descriptions, and a quantitative predicting tool is still urgently desired. Therefore, this research project aims to develop a numerical methodology free from empirical parameters to investigate this phenomenon.

Starting from the last fiscal year, we focus on the condensation of correlated electron-hole pairs, i.e., excitons. Exciton condensation indicating the spontaneous formation of electron-hole pair can cause

the phase transition from a semimetal to an insulator by a gap opening at the Fermi surface. However, this excitonic insulator shares several properties with the charge-density-wave (CDW) state phase, so it is hard to distinguish them in an experimental setting. While a numerical study can guide the interpretation of the measured data and break through the dilemma, the existing ab initio methods are insufficient since they can not evaluate the correlation within a many-body system.

To shed insight into this problem, we generalize the density functional theory (DFT) by including the nonlocal part of charge density and rederive the so-called Kohn-Sham (KS) equation. In contrast to the standard DFT, our formalism acquires a nonlocal part in KS-potential, which induces the electron-hole correlation. Using the many-body perturbation theory, we can evaluate the nonlocal KS-potential

self-consistently and solve the excitonic gap at finite temperatures to compute the transition temperature and investigate the critical behavior.

With the tool in hand, we apply the theory to study the candidate material, monolayer TiSe₂, for which the underlying mechanism for the phase transition is still under debate. Although an early calculation claims the instability is induced by the anharmonic interatomic interaction and concludes the phase transition as conventional CDW, the electronic factor is totally ignored in the study. In contrast, our numerical computation carefully includes the electron-hole correlation and shows that the correlation is the origin of the ordered state observed in this compound.

Overall, the methodology introduced in this project is general and paves the way to searching for candidate excitonic insulators in natural material systems.

● Publications

1. H.-Y. Chen, T. Nomoto, and R. Arita, "Development of ab initio method for exciton condensation and its application to TiSe₂," arXiv 2208.10019

● Oral presentations

1. H.-Y. Chen, T. Nomoto, and R. Arita: "Development of ab initio method for exciton condensation and its application to TiSe₂", Integrated Spectroscopy for Strong Electron Correlation -Theory, Computation and Experiment (ISSEC2022), Tokyo, Japan

XXI-025 芳香環形成反応を引き金とする生体現地でのヒドロゲル形成手法の開発

Development of Methods for *in vivo* Hydrogelation Triggered by Benzannulation Reactions

研究者氏名：山本 智也 Tomoya YAMAMOTO

受入研究室：開拓研究本部

田中生体機能合成化学研究室

(所属長 田中 克典)

生体内での治療標的部位選択的に超分子ゲルを形成させるために、様々な外部刺激をゲル化の引き金とする低分子ゲル化剤の開発が進められている。これらのゲル化剤は引き金となる外部刺激によってゲルを形成しやすい構造へと化学変換されることで、自発的にゲルを形成する。これまでにゲル化の引き金として、主に酵素反応が用いられてきた一方、治療標的となる部位に局在する酵素反応が少ないために、その適用範囲には限界があった。一方、我々はこれまでに、生体内でも触媒活性を保ち、生体内の特定の臓器や細胞に局在できる遷移金属触媒として、人工金属酵素を開発してきた。この手法をゲル化の引き金として用いることができれば、生体内でのゲル化制御に新たな手法を提供することが可能となり、その適用範囲を広げることができる。そこで私は、遷移金属触媒反応をゲル化の引き金とする低分子ゲル化剤の開発を目指した。

本年度は金触媒反応を引き金としてゲル化する候補化

合物の開発や、ゲル化の引き金となる反応条件の検討を行った。その結果、昨年開発したEpoC保護基を持つジケトピペラジン誘導体について、ペプチド添加物共存下で金触媒反応を行うことで、ヒドロゲル化が起こることを見出した。この条件における生成物の構造解析を行った結果、従来利用する予定であった芳香環形成反応とは異なり、芳香環形成反応の反応中間体が水分子と反応した化合物が得られていることを見出した。実際に起こっている反応は従来利用する予定だった反応とは異なるものの、遷移金属触媒を引き金としてヒドロゲル化を引き起こす系を初めて開発することができた。NMRによるゲル化剤の相互作用解析やペプチド添加物の構造検討等を通して、開発した系でのゲル形成機構について解析を行った。また、形成したゲルに細胞を添加し、開発したヒドロゲルを細胞外マトリックスとして応用する研究を行った。これらの成果を現在論文にまとめている。

XXI-026 超高速時間分解分光電気化学測定による有機金属錯体の光触媒活性中間体の観測 Photocatalytic Active Intermediate of Organometallic Complex Revealed by Ultrafast Time-Resolved Spectroelectrochemistry

研究者氏名：高梨 司 Tsukasa TAKANASHI
受入研究室：開拓研究本部
田原分子分光研究室
(所属長 田原 太平)

有機金属錯体は光触媒や有機ELの発光材料、太陽電池の電極材料等の光機能性材料として利用されている。金属錯体が示す酸化還元能や発光といった機能の発現過程では、通常とは異なる価数を持った”多価状態”が活性種である例が光合成過程などで知られている。とりわけ金属錯体多価状態活性種が示す光励起ダイナミクスの観測は光機能発現過程を分子レベルで理解する上で不可欠である。従来、光励起状態の超高速過程の観測にはパルスレーザーを用いた時間分解分光法が適用されてきた。しかし、励起レーザーのみでは多電子の移動を要する多価状態の生成は不可能であり、先端的レーザー分光法を用いてさえ、活性に直接関与する多価状態が示す光励起ダイナミクスの観測は実現されていない。そこで本研究では、精密制御した電圧の印加によりいかなる多価状態でも生成できる電気化学的手法と超短パルスレーザーを用いた超高速分光測定法を複合し、多価有機金属錯体の超高速光励起ダイナミクスの観測を目指している。

初年度は、電解酸化で生成する多価ルテニウム(Ru) トリスビピリジン錯体($[\text{Ru}^{\text{III}}(\text{bpy})_3]^{3+}$) を対象に、市販の分光電気化学セルを用いた電気化学測定システムを時間分解吸収分光測定と複合することで、“フェムト秒時間分解電気化学分光測定”を実現した。一方で、不完全な電解により残留した $[\text{Ru}^{\text{II}}(\text{bpy})_3]^{2+}$ の信号が $[\text{Ru}^{\text{III}}(\text{bpy})_3]^{3+}$ の過渡吸収信号に重畳し、結果の解釈に深刻な影響を及ぼしていることが判明した。

そこで本年度は、電解が起こる作用極を対極と空間的に分離することで電解生成物を蓄積できる”二室型バルク電解槽”を設計し、自作することでほぼ完全な電解が実現した。これにより、 $[\text{Ru}^{\text{III}}(\text{bpy})_3]^{3+}$ 基底状態のブリーチ信号の時間変化を追跡することが可能となり、 $[\text{Ru}^{\text{III}}(\text{bpy})_3]^{3+}$ 種の励起状態寿命は高々数十ピコ秒であり、 $[\text{Ru}^{\text{II}}(\text{bpy})_3]^{2+}$ と比較して数万倍も速く失活してしまう

ことが明らかとなった。さらに、Gaussian09/16を用いた密度汎関数理論により、開殻系である $[\text{Ru}^{\text{III}}(\text{bpy})_3]^{3+}$ 種の電子状態を計算する方法を確立した。得られた結果は実測の電子スペクトルを極めてよく再現し、光励起直後に生成するのはビピリジン配位子の $\pi-\pi^*$ 励起状態であり、さらに励起状態の緩和過程には配位子から中心金属への電荷移動状態が関与しているという $[\text{Ru}^{\text{III}}(\text{bpy})_3]^{3+}$ 種の励起状態ダイナミクスの全貌が明らかとなった。今後は、Ruアキア錯体系を対象に、このフェムト秒時間分解電気化学分光測定法をさらに高い価数状態に適用していく。

●口頭発表 Oral Presentations

(学会)

1. 高梨司、田原太平：“フェムト秒時間分解電気化学分光測定による高価数ルテニウム(III)錯体の励起状態ダイナミクスの観測”、第16回分子科学討論会、横浜、9月(2022)

●ポスター発表 Poster Presentations

(学会)

1. Takanashi T., Watanabe H., Iwamura M., Nozaki K., Shichibu Y., Konishi K., Kuramochi H. and Tahara T.: “Ultrafast Excited-state Dynamics in Au Hexa-core Clusters Observed by Femtosecond Time-resolved Absorption Spectroscopy”, The 24th International Symposium on the Photochemistry and Photophysics of Coordination Compounds, Vancouver, Canada, Jul.(2022)
2. Takanashi T., Watanabe H., Iwamura M., Nozaki K., Shichibu Y., Konishi K., Kuramochi H. and Tahara T.: “Observation of Excited-state Dynamics in Au Hexa-core Clusters by Femtosecond Time-resolved Absorption Spectroscopy”, 理研シンポジウム：第10回「光量子工学研究」ーポストコロナ時代の新しい光科学ー、和光、12月(2022)

XXI-027 花成を人為的に制御する分子技術 Molecular Technologies for Artificial Flowering Regulation

研究者氏名：西山 康太郎 Kotaro NISHIYAMA
受入研究室：環境資源科学研究センター
分子生命制御研究チーム
(所属長 萩原 伸也)

本研究では、人工分子を投与するだけで花成の時期を調節できる、革新的な分子技術の開発を目指した。花成は、植物における栄養成長から生殖成長への転換を指す。つまり、花を咲かせ、種子を得て、世代交代するために必須であり、植物の基礎研究から農作物の育種や栽培に至るまで、関心の高い植物生理応答の一つである。花成までの期間は、植物研究に用いるモデル植物では数カ月、果樹などの多年生植物では数年と非常に長い。そのため、世代交代が必要な場面、例えば、品種改良や遺伝子組換え実験では、花成の長さがボトルネックとなる。そのため、花成を人為的に誘導する技術は、育種や植物科学を爆発的に加速させる。一方で、農業においては、花成までの長さ、つまり栄養成長の長さが長いほど、農作物の収穫量が増大する。また、開花すると味が低下して商品にならない農作物も存在する。天候や栄養状態に左右されやすい花成を抑制できれば、農作物の安定な供給や、品質の低下によって捨てられているフードロス問題の解決につながる。

花成は、花咲かホルモン「フロリゲン」の分子実体であるFTタンパク質とともに、転写因子FDと、アダプタータンパク質14-3-3との複合体形成によって誘導される。そこで、FDと14-3-3との相互作用を阻害する低分子化合物

物の探索と、花成の制御を試みた。まず、シロイヌナズナ14-3-3に対して、約5,000化合物の中から阻害剤候補1を選抜した。しかし、種々の検討の結果、化合物1は阻害活性を持たず、DMSO溶液中で保存されることで発生した化合物2が、真の阻害活性種であることを突き止めた。合成・単離した化合物2は、14-3-3に対して高い*in vitro*阻害活性を示した($IC_{50} = 1.21 \mu M$)。シロイヌナズナに対して阻害剤2を投与したが、花成時期は変化しなかった。これは、阻害剤2の化学的安定性が不十分であり、培地上で分解したためであると考えられる。一方で、14-3-3は、気孔の開閉に関与することが知られている。そこで、阻害剤2をシロイヌナズナの葉へ投与したところ、気孔を閉口させる作用を持つことが認められた。当初の目的とは異なるが、気孔閉口作用によって蒸散を抑制でき、乾燥地域での農業や、観賞用植物や農作物の品質保持への応用が期待できる。

●ポスター発表 Poster Presentations (学会)

1. 西山康太郎、相原悠介、中村咲耶、鈴木健裕、高橋宏二、木下俊則、堂前直、佐藤綾人、萩原伸也：“14-3-3阻害剤の探索と気孔開閉の化学的制御”、第16回バイオ関連化学シンポジウム、名古屋、9月(2022)

XXI-028 分子認識型フォトレドックス触媒が拓くアミノ酸のラジカルの変換反応 Substrate-Directed Photoredox Catalysis for Selective C-H Functionalization of Amino Acids

研究者氏名：田上 拓磨 takuma TAGAMI
受入研究室：環境資源科学研究センター
触媒・融合研究グループ
(所属長 袖岡 幹子)

近年、ペプチドは、医薬から材料までの幅広い分野で活発に研究されている。今後、このペプチド分野がさらなる発展を遂げるには、ペプチドを構成するアミノ酸を詳細に検討する必要がある。その際、天然のアミノ酸に加えて人工的なアミノ酸があれば、より多くの機能性ペプチドを創造できる。人工的なアミノ酸合成には、アミノ酸骨格を構築する方法と天然アミノ酸を修飾する方法があり、合成コストの観点からは後者が理想的である。天然アミノ酸の

α 位官能基化では、イミン型やエノラート型のアミノ酸誘導体を経由するイオニックな反応が一般的であり、ラジカル型のアミノ酸誘導体を活性種とする反応はほとんど開発されていない。そこで本研究では、炭素中心 α -アミノ酸ラジカルを活性種とする官能基化反応の開発に取り組むこととした。具体的には、以下2つの目標を掲げている。i) 既知の光触媒を用いてアミノ酸のラジカル的な変換反応を開発する。ii) 分子認識型触媒の設計により無保護アミ

ノ酸の変換を可能にする。この反応では、有機ラジカル種や不飽和炭化水素などのラジカルアクセプターをアミノ酸の α 位に導入できるため、従来のイオンの反応とは全く異なるケミカルスペースの拡張が期待される。

本年度は、水素原子引き抜きによるアミノ酸ラジカルの発生手法を検討し、種々のラジカルアクセプターとの反応を試みた。所望の反応を開発するに至っていないが、前年度の研究過程で発見した反応を使ってアミノ酸の側鎖を選択的に変換することに成功した。この反応は、空気下およびフォトレドックス条件下で特異的に進行し、有用なオキザメート化合物を生成する。この研究については、安全かつ簡便なオキザメート合成法として論文を作成している。また、同反応の活性化手法を活用して、ペプチド合成を指向したアミド結合形成反応の開発にも取り組んでいる。一方、将来的な含フッ素アミノ酸合成への展開も視野に入れ、本テーマと並行して進めていたラジカルフルオロアルキル化反応によるZ-エナミド合成の研究結果をまとめることができた。

●口頭発表 Oral Presentations

1. 田上拓磨、青木雄真、関根大介、河村伸太郎、袖岡幹

子：“アリルアミドのラジカルフルオロアルキル化反応による立体選択的なZ-エナミド合成”、第45回フッ素化学討論会、京都市、11月(2022)

2. 田上拓磨、青木雄真、関根大介、河村伸太郎、袖岡幹子：“ラジカルフルオロアルキル化反応によるZ-エナミドの立体選択的合成法の開発”、第121回有機合成シンポジウム、新宿区、11月(2022)

3. 田上拓磨、青木雄真、関根大介、河村伸太郎、袖岡幹子：“Z-Enamide Synthesis by Stereoselective Radical Fluoroalkylation Reaction”、第103回春季年会、野田市、3月(2023)(発表予定)

●ポスター発表 Poster Presentations

1. 田上拓磨、青木雄真、関根大介、河村伸太郎、袖岡幹子：“アリルアミドの立体選択的ラジカルフルオロアルキル化反応によるZ-エナミド合成”、第38回有機合成化学セミナー、北九州市、9月(2022)

2. 田上拓磨、青木雄真、関根大介、河村伸太郎、袖岡幹子：“ラジカルフルオロアルキル化反応によるZ-エナミドの立体選択的合成法の開発”、第121回有機合成シンポジウム、新宿区、11月(2022)

3 田上拓磨：“Stereoselective Z-Enamide Synthesis via Radical Fluoroalkylation of Allylamides with Fluorocarboxylic Anhydride”、第3回大津会議合同研究発表会、大津市、1月(2023)

XXI-029 B型肝炎ウイルスの感染複製機構解明に関する構造生物学研究

Structural and functional analyses of hepatitis B virus

研究者氏名：山下 規央 Mio YAMASHITA

受入研究室：生命機能科学研究センター

転写制御構造生物学研究チーム

(所属長 関根 俊一)

全世界のB型肝炎ウイルス(hepatitis B virus :HBV)の持続感染者は約2.4億人と推定されている。一般的にDNAウイルスはRNAウイルスと比較して遺伝子変異が少ないとされるが、HBVはDNAウイルスであるにも関わらず、ウイルス増殖の中に逆転写過程を持つため、高率に変異を起こすことが知られている。また、逆転写酵素阻害剤の治療ではウイルス排除に向けた根治は困難であり、逆転写酵素(Reverse Transcriptase: RT)の機構に関わるDNAポリメラーゼ構造の情報もなく機構も不明のままである。本研究では、HBV DNAポリメラーゼ構造の解明を行い、B型肝炎ウイルスの感染複製機構解明を目指す。

本年度では、HBVポリメラーゼ全長(1-832aa)、またはTP(Terminal protein(1-191aa))ドメインとPOL/RT(Reverse transcriptase)-RNaseH(308-832aa)ドメインの大量発現検討を試みた。N末端にHis-MBP-tagを付加し、pCR2.1-TOPOベクターに挿入後、大腸菌

KRX cellで発現確認を行なった。まず、ポリメラーゼ全長においては目的物の発現を確認した。次にアミロースレジソ、陰イオン交換カラム、ゲル濾過カラムで精製を行ったが、最終的にはサンプルが分解しているように見え、濃縮時で消失してしまう傾向があった。そのため、十分な量を得ることが困難であると考えられる。また、TPドメインとPOL/RT-RNaseH(308-832aa)ドメインの大量発現検討では、全長と同様にHis-MBP-tagを付加した後、pCR2.1-TOPOまたはpMAL-c5xベクターに挿入し大腸菌KRX cellまたはBL21(DE3)で発現確認を行なった。その結果、目的物の発現を確認することができた。精製では、それぞれの菌体を超音波破碎し、全長と同様の条件で精製を行った。精製したサンプル(0.3 μ M)とDNAまたはRNAの鑄型(1 μ M)のポリメラーゼ活性を行なった。その結果、DNA鑄型のみ活性が見られた。またクライオ電子顕微鏡により、スクリーニングを行ったが凝集体また

はグリッド表面に氷の膜が張っておらず、複合体構造を形成したような粒子は見られなかったため、Buffer条件や

濃度等を再度検討する必要がある。

XXI-030 オスの養育行動促進回路の形成メカニズム

Formation of Neural Circuits That Facilitate Parental Behavior in Males

研究者氏名：稲田 健吾 Kengo INADA

受入研究室：生命機能科学研究センター

比較コネクトミクス研究チーム

(所属長 宮道 和成)

オスは生来仔に対して非常に攻撃的である。しかし自らの子孫を残すために、交尾から出産までの間に仔への親和性を高め、父親になるころには養育行動(子育て行動)をとるようになる。このオスの養育行動を生み出す神経回路基盤や、行動変化を引き起こす神経メカニズムについてはよく分かっていない。

本研究ではオスマウスをモデル動物として、まずメスマウスにおいて養育行動促進作用を持つことが知られている神経ホルモン物質オキシトシンと、それを分泌する脳視床下部にあるオキシトシン神経細胞の機能解析を行った。その結果、父親マウスが養育行動を発揮するためにオキシトシン分泌が必須であること、またオキシトシン分泌を人為的に引き起こすことで、仔に対して攻撃的な交尾未経験オスにおいても養育行動を誘起させることができることが分かった。オキシトシン分泌がオスの養育行動発現を促進することから、我々は交尾から出産までの間に、オキシトシン神経細胞が活性化しやすくなるような脳神経回路変化が起きているのではないかと仮説を立てて検証を行った。具体的には交尾未経験オスと父親マウスのオキシトシン神経細胞について、(1) シナプス前細胞の数や分布の解析、(2) シナプス前細胞とオキシトシン神経細胞の間の神経伝達強度の解析を行った。その結果、交尾未経験オスと父親では、オキシトシン神経細胞への興奮性入力の強度が異なることが分かった。具体的には外側視床下部と呼ばれる神経核から、オキシトシン神経細胞への興奮性入力が、父親において顕著に増加していた。さらに外側視床下部興奮性細胞は、オスの仔への攻撃行動を抑制する働きを担っていることも明らかとなった。我々は今年度、以上の結果を論文としてまとめNeuron誌に発表した。

脳においては1つの神経ホルモンは複数の機能に関与していることが多い。オキシトシンも例外ではなく、養育行動促進に加えて、体重や摂食量の恒常性に関与していることが知られている。我々が上述の研究の過程で新規に作成したオキシトシンコンディショナルノックアウトマウスは、従来の全身性オキシトシンノックアウトマウスによる、

体重だけが増え摂食量は変わらないという結果と異なり、体重も摂食量も増える過食性肥満を示した。またオキシトシンによる体重や摂食量の恒常性維持は、オキシトシン神経細胞から弓状核という神経核への投射が担っていることも見出した。我々はこの過食性肥満に関する結果も論文としてまとめeLife誌に発表した。

●誌上发表 Publications

(原著論文)

1. Inada K., Hagihara M., Tsujimoto K., Abe T., Konno A., Hirai H., Kiyonari H. and Miyamichi K.: "Plasticity of neural connections underlying oxytocin-mediated parental behaviors of male mice", *Neuron*, 110, 2009-2023.e5, (2022)
2. Inada K., Tsujimoto K., Yoshida M., Nishimori K. and Miyamichi K.: "Oxytocin signaling in the posterior hypothalamus prevents hyperphagic obesity in mice", *eLife*, 11, e75718, (2022)

(総説)

1. 稲田健吾：“父親の子育てを支える神経回路の変化”、日本神経科学学会誌、2022-4, 41-42, (2022)
2. 稲田健吾、宮道和成：“父親マウスの養育行動を引き出す神経回路の変化”、LABIO21, 87, 16-19, (2022)
3. 稲田健吾、宮道和成：“父親マウスの養育行動を引き出す神経回路の変化”、実験医学、40, 2079-2083, (2022)

●口頭発表 Oral Presentations

1. 稲田健吾：“父性養育行動を生み出す神経回路の解析”、第19回若手中堅脳科学者のオンライン勉強会(招待)、オンライン、2022年10月
2. 稲田健吾：“父性養育行動発現の神経メカニズム”、2022年度情動研究会(招待)、愛知県、2022年9月
3. Inada K., Hagihara M. and Miyamichi K.: "A vasotocin-to-oxytocin receptor signaling underlies paternal caregiving behaviors", 第45回日本神経科学会、沖縄県、2022年7月

●ポスター発表 Poster Presentations

XXI-031 植物細胞の劇的な分化可塑性を生み出す分子メカニズムの探求 Molecular Mechanism for Extreme Differentiation Plasticity of Plant Cells

研究者氏名：森中 初音 Hatsune MORINAKA
受入研究室：環境資源科学研究センター
細胞機能研究チーム
(所属長 杉本 慶子)

トレニア(*Torenia fournieri*) では表皮起源の直接茎葉再生を高効率で誘導できる組織培養系が知られている。この培養系は、高度に分化した細胞から幹細胞へのリプログラミングや、直接茎葉再生の初期におけるパターンニングの分子メカニズムを研究する上で好適なモデルとなることが期待される。本研究では、この組織培養系を活用し、植物細胞の分化可塑性を支える分子基盤を明らかにすることを目指している。

本年度は、培養前後の表皮について10x Chromium システムを利用したsingle-nucleus RNA-seq(snRNA-seq) 解析を行い、異なる遺伝子発現プロファイルを持つ14個の細胞群を、各細胞群で特異的に高い発現を示すマーカー遺伝子とともに同定した。中でも培養後特異的に現れ、活発に分裂する細胞を含む細胞群では細胞リプログラミングや多能性の獲得との関連が窺われる因子が高い発現を示しており、幹細胞へのリプログラミングを制御する因子の候補として注目される。

細胞一つ一つについてより多くの遺伝子数を検出することができるVISA-seq法を用いたsnRNA-seq解析も行い、培養前と培養後の表皮について合計9つの細胞群をマーカー遺伝子とともに同定した。これらには培養前の表皮細胞の細胞群や、培養後に他の細胞より高いレベルでサイトカニン応答を示している細胞群などが含まれた。後者の細胞群は、細胞分裂を活発に行っている群とそうでない群にさらに分けられ、これら2つの比較から、初期のパターンニングにサイトカニン応答の抑制が関与している可能性が示唆された。

並行して、培養前後の細胞を対象にATAC-seq解析を行い、リプログラミングに伴ってクロマチン構造が変化していると思われる部位を多数特定した。

これらの成果について、1つの国内学会(日本植物学会)と2つの国際学会(FASEB-The Mechanism of Plant Development Conference, CSHA-Integrative Epigenetics in Plants) で発表した。さらに、分化細胞からのリプログラミングに関して、最新の知見(東大と理

研での自身の成果を含む) を歴史的な研究とともに紹介する総説をPlant and Cell physiology誌に掲載した。

●誌上发表 Publications

(総説)

1. Morinaka H., Coleman D., Sugimoto K., Iwase A.: “Molecular Mechanisms of Plant Regeneration from Differentiated Cells: Approaches from Historical Tissue Culture Systems”, *Plant and Cell Physiology*, pccac172, (2022) *

●口頭発表 Oral Presentations

(学会)

1. Morinaka H., Shi D., Kawamura A., Mamiya A., Tamaki H., Suzuki T., Ikeuchi M., Iwase A., Higashiyama T., Sugimoto K. and Sugiyama M.: “Transcriptomic Analysis of epidermal reprogramming leading to direct shoot regeneration at the single-cell level”, Federation of American Societies for Experimental Biology-The Mechanism of Plant Development Conference, Vermont, US, July (2023)
2. 森中 初音、石 東博、河村 彩子、間宮 章仁、玉置 裕章、鈴木 孝征、岩瀬 哲、東山 哲也、杉山 宗隆、杉本 慶子: “トレニアの表皮起源直接シュート再生におけるシングルセルレベルでのトランスクリプトーム解析”、日本植物学会第86回大会、京都、2022年9月
3. Morinaka H., Shi D., Kawamura A., Mamiya A., Tamaki H., Suzuki T., Ikeuchi M., Iwase A., Higashiyama T., Sugimoto K. and Sugiyama M.: “Single-cell transcriptomic analysis of epidermal reprogramming in direct shoot regeneration”, the 64th Annual Meeting of the Japanese Society of Plant Physiologists, Miyagi, March (2023)

●ポスター発表 Poster Presentations

(学会)

1. Morinaka H., Shi D., Kawamura A., Mamiya A., Tamaki H., Suzuki T., Ikeuchi M., Iwase A., Higashiyama T., Sugimoto K. and Sugiyama

M.: "Transcriptomic Analysis of epidermal reprogramming leading to direct shoot regeneration at the single-cell level", Federation of American Societies for Experimental Biology-The Mechanism of Plant Development Conference, Vermont, US, July(2023)

2.Morinaka H., Shi D., Kawamura A., Mamiya A., Tamaki H., Suzuki T., Ikeuchi M., Iwase A., Higashiyama T., Sugimoto K. and Sugiyama M.: "Single-cell Transcriptomic Analysis of epidermal reprogramming in direct shoot regeneration", Cold Spring Harbor Asia-Integrative Epigenetics in Plants, Hyogo, December (2022)

XXI-032 環境応答に伴うトランスクリプトーム変化を用いた交差耐性・交差感受性の予測 Prediction of Cross Resistance and Collateral Sensitivity with Transcriptomic Changes in Response to Environmental Changes

研究者氏名：佐藤 匠哉 Takuya SATO
受入研究室：生命機能科学研究センター
多階層生命動態研究チーム
(所属長 古澤 力)

細胞の適応進化における交差耐性や交差感受性は、古くより議論されてきた重要な問題である。近年、実験技術の進歩により、交差耐性や交差感受性を実験室進化において調べることが可能になってきている。しかしながら、交差耐性や交差感受性を、進化前の細胞から得られる情報によって予測する理論は今のところ存在していない。その困難の一つは、異なる環境変化を統一的に扱う方法が存在していないことである。熱や飢餓、抗生物質など、細胞は様々な環境変化を経験する。これらを従来の遺伝子制御ネットワークへの影響を詳細に調べる方法により比較することは困難であり、多種多様な環境変化を統一的かつ簡単に比較することができる指標を考える必要がある。

近年、環境変化に対して細胞が応答・進化する際の表現型変化が、細胞の構成要素や環境変化の多様さに反して、はるかに少数の変数によって説明できることが明らかになってきている。この事実は、細胞による外部環境の認識が、少数自由度によって行われていることを示唆している。また、細胞の表現型変化は任意の環境で測定、比

較可能な量であり、様々な環境変化を統一的に表現する指標となる可能性も有している。そこで本研究では、細胞の表現型変化(トランスクリプトーム変化)によって環境の特徴づけを行い、それを元に交差耐性および交差感受性を予測する理論を構築するとともに、実験室進化のデータを用いてその検証を行うことを目的とする。

本年度は、所属研究室における過去の進化実験データの解析を行うとともに、遺伝子制御ネットワークモデルを用いた交差耐性進化の数値シミュレーションを行なった。(1) 大腸菌のトランスクリプトームデータにおいて、そのストレス応答と進化における変化の間の相関と交差耐性の関係を調べた。

(2) 遺伝子制御ネットワークモデルの進化シミュレーションを通して、交差耐性を予測するための理論を構築した。

●発表 Poster Presentation

1. 佐藤 匠哉、金子邦彦：“細胞モデル進化における表現型拘束に起因した交差耐性”、生物物理学学会、函館、9月(2022)

XXI-033 フナ類をモデルとしたクローン繁殖の分子基盤の解明からクローン繁殖動物作出の応用まで

Molecular basis of clonal reproduction in *Carassius* fish and its application for engineering clonal animals.

研究者氏名：三品 達平 Tappei MISHINA

受入研究室：生命機能科学研究センター

染色体分配研究チーム

(所属長 北島 智也)

クローン繁殖をする生物の作出は、同一遺伝背景生物の迅速な確立や、雑種強勢により生じた有用形質の固定・永続化を可能にすることで、実験動物や農林水産分野への応用に革新をもたらすと期待される。本研究では、自然界で「有性型」と「クローン型」が多型として見られるコイ科フナ属魚類をモデルとして、(1) フナ類におけるクローン繁殖責任遺伝子・変異を同定し、(2) 得られた責任遺伝子・変異が減数分裂や核構造制御に果たす役割を解明する。そして、最終的には(3) 遺伝子改変によるクローン繁殖魚の作出を目指す。

本年度は、まず、フナ類のクローン繁殖の機構を詳細に分析した。この機構は、これまで3つの細胞学的プロセス：a) 組換えの欠如、b) 第一減数分裂における極体放出の抑制、およびc) 受精後の父核で前核形成がなされず脱核すること、が重要と考えられてきた。このことから、クローン繁殖の獲得は進化的に困難な複合形質と考えられる。そこで、この表現型の安定性を各プロセスで調べたところ、組換えの欠如や極体放出の抑制は100%、父核の脱核も79-100%と非常に安定した機構であることが分かった。

次に、この結果を踏まえた上で、前年度に全ゲノム関連解析から絞り込まれた8遺伝子(DNA二重鎖切断、紡錘体形成、細胞周期、核構造の変化などの機能が知られる)の解析を進めた。DNA二重鎖切断に関連する候補遺伝子を欠損させたゼブラフィッシュを用いて表現型を調べたところ、組換えが欠如されるものの、成熟した卵母細胞が得られることが分かった。一方で、得られた卵母細胞の第一極体放出はやや抑制されるが不安定で、染色体数異常となるものが多く見られた。したがって、フナ

類のようなクローン繁殖を獲得するには、組換えの欠如に加えて、細胞周期や紡錘体形成などの機構改変も必要であることが示唆された。実際に、ゼブラフィッシュの卵母細胞でクローン繁殖型アリルを人為的に発現させたものは、候補遺伝子の有性型アリルを発現させたものとは比べて、有意に極体放出率が低下した。

今後は、フナの卵母細胞における候補遺伝子のノックダウンや、組換え欠損ゼブラフィッシュと遺伝子発現操作を併用した解析を進めることで、クローン繁殖の分子基盤の解明を目指す。

●誌上发表 Publications

(原著論文)

1. Mishina T, Nomoto K, Machida Y, Hariu T, Watanabe K. Origin of scarlet gynogenetic triploid *Carassius* fish: Implications for conservation of the sexual-gynogenetic complex. PLoS One. 2022 Oct 20;17(10):e0276390.*

(総説)

1. 三品達平、山崎曜、2022年度魚類学会年会シンポジウム「ゲノムが拓く魚類表現型多様性研究の新展開：分野横断的自然史研究と今後の展望」を開催して、魚類学雑誌、2022. 69(2): 252-257.*

●口頭発表 Oral Presentations

1. 三品達平、フナ属魚類における雌性発生の遺伝基盤から見た性の進化的制約、日本魚類学会、大阪公立大学、2022年9月
2. 三品達平、フナ属魚類におけるクローン繁殖の遺伝基盤から見た性の進化的制約、細胞分裂研究会、国立遺伝学研究所、2022年7月

XXI-034 一次繊毛における新規機構「分子コンバータ」システムの解明 Mechanism of Novel System “Molecular Converter” in Primary Cilia

研究者氏名：加藤 孝信 Takanobu KATOH
受入研究室：生命機能科学研究センター
個体パターンニング研究チーム
(所属長 濱田 博司)

細胞から伸びたアンテナのような小器官である一次繊毛は、細胞外の生体情報を感知するセンサーとしての機能を担う。これまでの研究から、細胞外の流れ刺激にตอบสนองして繊毛の膜に局在するCa²⁺チャンネルが活性化すると考えられているが、繊毛という体積わずか~300aL(アトリットル)の微小空間に集積したCa²⁺が、その1万倍大きな細胞のシグナルをコントロールするメカニズムは謎に包まれている。本研究では「繊毛自体が情報を処理する能力をもつ」可能性を提唱し、プロテオミクス・先進的な光学顕微鏡技術・そして遺伝子改変動物を組み合わせることにより、マウス初期胚と培養細胞を用いてそのメカニズムを解明することを目的とした。

本研究を推進する中で、昨年度に「マウス初期胚において繊毛内でメカノセンシティブチャンネルが非対称に局在している」という予想外の大きな発見があり、研究が大きく進展した。今年度はこの発見について集中的に研究を進め、最終的に「マウスノード不動繊毛が曲げられる向きを感知できる新しいタイプのメカノセンサー」であること、そしてこの仕組みを用いて「ノード流による曲げの向きを感知して、左右軸が決定されている」という教科書を書き換える画期的な発見をした。多くの共著者の多大なサポートのもと、本研究は私を筆頭・責任著者として、Science誌から出版することが出来た。

まず私たちは独自の光学顕微鏡を構築することによって、左右軸を決定する生体外流れであるノード流を光制御することに成功した。その結果、ノード流によって初期胚ノード不動繊毛が左右で逆向きに曲げられていることを明らかにした。次に、光ピンセットを用いた独自の顕微鏡によって、初期胚ノード不動繊毛が特定の方向の曲がりだけにตอบสนองしてCa²⁺応答を見せることを明らかにした。最後に共同研究者である岡田康志TL(理研・東大)と共に超解像顕微鏡(3D STED)を用いて、繊毛内のPKD2チャンネルの局在に非対称性があること。そして共同研究者である大森俊宏助教(東北大)と共に、ノード流によって繊毛表面に局所的な張力が生じる事によって、繊毛が向きを感知できることを証明した。

今後は、こうしたメカニズムが他の繊毛にも共通しているのか。また繊毛内でどのようにメカノセンシティブチャンネルの非対称な分布が生じるかなど、繊毛の力学情

報受容による生命機能制御について迫っていきたいと考えている。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Katoh T. A., Omori T., Mizuno K., Sai X., Minegishi K., Ikawa Y., Nishimura H., Itabashi T., Kajikawa E., Hiver S., Iwane A.H., Ishikawa T., Okada Y., Nishizaka T. and Hamada H.: “Immotile cilia mechanically sense the direction of fluid flow for left-right determination”, *Science*, 379 6627 pp. 66-71 (2023)*
2. Sai X., Ikawa Y., Nishimura H., Mizuno K., Kajikawa E., Katoh T. A., Kimura T., Shiratori H., Takaoka K., Hiroshi H and Minegishi K.: “Planar cell polarity-dependent asymmetric organization of microtubules for polarized positioning of the basal body in node cells”, *Development*, 149 9 dev.200315 (2022)*
3. Katoh T. A., Omori T., Ishikawa T., Okada Y. and Hamada H.: “Biophysical analysis of mechanical signals in immotile cilia of mouse embryonic nodes”, bio-protocol, submitted

●口頭発表 Oral Presentations

(学会)

1. Katoh T.A.: “Immotile cilia of the mouse node sense a fluid flow-induced mechanical force for left-right symmetry breaking”, 40th BSCB GenSoc UK Cilia Network e-symposium, オンライン, 5月(2022)
2. 加藤 孝信、大森 俊宏、水野 克俊、石川 拓司、濱田 博司: “マウスノード不動繊毛は変形の向きを感知して左右軸を決定する: 非対称性を生み出すメカニカルな機構”, 第55回 日本発生生物学会年会、金沢、5月(2022)
3. 加藤 孝信、大森 俊宏、水野 克俊、石川 拓司、濱田 博司: “マウスノード不動繊毛は変形の向きを感知して左右軸を決定する: 非対称性を生み出すメカニカルな機構”, 第74回日本細胞生物学会年会、東京、6月(2022)
4. 加藤 孝信、大森 俊宏、水野 克俊、板橋 岳志、岩根 敦子、石川 拓司、岡田 康志、西坂 崇之、濱田 博司: “マウスノード不動繊毛は変形の向きを感知して左右軸を決定する: 非対称性を生み出すメカニカルな機構”, 第60回日本生物物理学会年会、函館、9月(2022)
5. 加藤 孝信、大森 俊宏、水野 克俊、板橋 岳志、岩根 敦子、石川 拓司、岡田 康志、西坂 崇之、濱田 博司: “マウスノード不動繊毛は変形の向きを感知して左右軸を

決定する：非対称性を生み出すメカニカルな機構”、第45回日本分子生物学会年会、幕張、12月(2022)

6. Katoh T. A., Omori T., Mizuno K., Itabashi T., Iwane A.H., Ishikawa T., Okada Y., Nishizaka T. and Hamada H.: “Mouse nodal immotile cilia sense bending direction for left-right determination: Mechanical regulation in initiation of symmetry breaking”, CELL BIO 2022 (ASCB), Washington DC, USA, Dec. (2022)
7. 加藤 孝信、大森 俊宏、水野 克俊、板橋 岳志、岩根 敦子、石川 拓司、岡田 康志、西坂 崇之、濱田 博司：“マウスノード不動繊毛は変形の向きを感知して左右軸を決定する：非対称性を生み出すメカニカルな機構”、2023年生体運動合同班会議、東京(ハイブリッド)、1月(2023)

●ポスター発表 Poster Presentations (学会)

1. 加藤 孝信、大森 俊宏、水野 克俊、石川 拓司、濱田 博司：“マウスノード不動繊毛は変形の向きを感知して左右軸を決定する：非対称性を生み出すメカニカルな機構”、第55回日本発生生物学会年会、金沢、5月(2022)
2. 加藤 孝信、大森 俊宏、水野 克俊、板橋 岳志、岩根 敦

子、石川 拓司、岡田 康志、西坂 崇之、濱田 博司：“マウスノード不動繊毛は変形の向きを感知して左右軸を決定する：非対称性を生み出すメカニカルな機構”、第60回日本生物物理学会年会、函館、9月(2022)

3. Katoh T. A., Omori T., Mizuno K., Itabashi T., Iwane A.H., Ishikawa T., Okada Y., Nishizaka T. and Hamada H.: “Mouse nodal immotile cilia sense bending direction for left-right determination: Mechanical regulation in initiation of symmetry breaking”, 19th International Congress of Developmental Biology, Portugal, Oct. (2022)
4. 加藤 孝信、大森 俊宏、水野 克俊、板橋 岳志、岩根 敦子、石川 拓司、岡田 康志、西坂 崇之、濱田 博司：“マウスノード不動繊毛は変形の向きを感知して左右軸を決定する：非対称性を生み出すメカニカルな機構”、第45回日本分子生物学会年会、幕張、12月(2022)
5. Katoh T. A., Omori T., Mizuno K., Itabashi T., Iwane A.H., Ishikawa T., Okada Y., Nishizaka T. and Hamada H.: “Mouse nodal immotile cilia sense bending direction for left-right determination: Mechanical regulation in initiation of symmetry breaking”, CELL BIO 2022 (ASCB), Washington DC, USA, Dec. (2022)

XXI-035 哺乳動物における腎臓間質前駆細胞の発生メカニズム理解と、腎臓発生の試験管内再構成

Understanding the Developmental Mechanism of the Renal Stromal Progenitors in Mammals and Reconstituting the Kidney Development In Vitro

研究者氏名：谷口 純一 Junichi TANIGUCHI
受入研究室：生命機能科学研究センター
ヒト器官形成研究チーム
(所属長 高里 実)

哺乳動物の初期原腸胚において、原始線条を通過したエピプラストは内胚葉および中胚葉へ分化し、原始線条よりも前方に位置するエピプラストは外胚葉へ分化する。このとき、未分化細胞としてのエピプラストは原始線条付近に残り、長期間にわたって外胚葉と中胚葉を供給し続け、胚の後方が伸長する。したがって、エピプラストにとどまっている時間が長い細胞ほど、より後方の組織に寄与すると考えられる。実際、体軸伸長に伴ってエピプラストにおける遺伝子発現は変化し、特定組織への寄与能も変化することが知られている。私は、このエピプラストの性質の変化をエピプラストの後期化と定義した。エピプラストの後期化は体軸伸長や胚後方組織の発生のために重要な現象であると思われるが、それがどのようなシグナルによって制御されているのかは不明である。本研究では、ヒト多能性幹細胞を用いてエピプラストの後

期化メカニズムを明らかにし、後期エピプラストを経由した胚後方組織(腎臓間質前駆細胞など)の誘導法を確立する。

本年度はまず、前年度に同定したエピプラストの後期化因子の濃度最適化を行った。また、最適化した条件下で後期エピプラストを誘導した際の遺伝子発現の経時変化を調べたところ、未分化エピプラストマーカーPOU5F1の発現が減少すると同時にGDF11の発現増加が見られた。実際のエピプラストでもPOU5F1からGDF11への発現シフトがおり、これが体軸伸長における胴部形成から尾部形成への移行メカニズムであることが提案されている。したがって、本研究で見られた発現シフトは、胴部をつくるエピプラストから尾部をつくるエピプラストへの後期化を示している可能性が考えられた。次に、誘導した後期エピプラストが中胚葉へ分化する条件の探索を行

い、TBX6陽性の未分化な中胚葉を得る条件を同定した。興味深いことに、後期エピブラストからの中胚葉誘導に必要な条件は未分化多能性幹細胞からの中胚葉誘導条件とは異なっていた。現在は、後期エピブラスト誘導を長期間継続した場合に何が起こるかを調べるとともに、エピブラスト後期化から中胚葉誘導へ移行するタイミングと得られる中胚葉の種類の間を解析している。

●ポスター発表 Poster Presentations

(学会)

1. Junichi Taniguchi, Minoru Takasato: "Self-organization of Wolffian duct-like tubes derived from human pluripotent stem cells." JSDB 55th annual meeting, May, 2022, Kanazawa, May(2022)

XXI-036 炎症性腸疾患における腸内細菌とエピトランスクリプトーム制御の相互作用が果たす役割の解明

The Role of Functional Interaction Between Microbiota and Epitranscriptome in Inflammatory Bowel Disease

研究者氏名：寺嶋 秀騎 Hideki TERAJIMA

受入研究室：生命医科学研究センター

消化管恒常性研究チーム

(所属長 本田 賢也)

炎症性腸疾患(IBD)は、腹痛・血便・発熱などの症状が見られる慢性疾患であり、その発症には免疫機構の異常や腸内細菌叢のバランス不全などが複雑に関与すると考えられている。近年、RNA修飾(エピトランスクリプトーム)を含む転写後制御の自然免疫応答における重要な役割が明らかにされつつある。そこで本研究では、腸内細菌叢の乱れが宿主のRNA制御異常を引き起こすという仮説を検証し、IBDなど腸内細菌叢の異常を起因とする様々な疾患のメカニズム解明への貢献を目指した。

昨年度までに我々は、宿主のRNA制御における腸内細菌叢の寄与を調べるために、通常のSpecific Pathogen Free(SPF)環境下で飼育されたマウスと、無菌マウス(GF; germ-free)組織細胞のRNA-seq解析を行なった。その結果、GFマウスと比較してSPFマウスではトランスクリプトームワイドにA-to-I RNA編集効率が増加していた。A-to-I RNA編集の機能として、RNAの構造変化を介したインターフェロン応答の制御が知られているが、実際に、SPFマウスにおいてはインターフェロン応答遺伝子群が発現増加していることを見出した。本年度はそれらインターフェロン応答遺伝子群の中から、炎

症性腸疾患に関与する候補遺伝子の抽出に取り組んだ。興味深いことに我々は、RNA結合タンパク質XがSPFマウスにおいて発現誘導を受けることを発見した。Xは炎症反応や細胞死に関与することが知られている。そのため、腸内細菌がXの発現調節を介して炎症性腸疾患の病態に寄与するという仮説が考えられた。実際に、XがSPFマウスにおいて腸上皮細胞特異的に強く発現しており、GFマウスにおいては発現が観察されないことを組織免疫染色によって明らかにしている。現在この仮説を検証するため、Xの欠損マウスを用いたRNA-seq解析や腸炎症モデル実験などを計画しており、腸内細菌によるRNA制御の分子メカニズムとその生理学的な重要性について解明を目指している。

●ポスター発表 Poster Presentations

1. Hideki Terajima, Mijia Lu, Linda Zhang, Qi Cui, Yanhong Shi, Jianrong Li and Chuan He: "N6-methyladenosine suppresses aberrant interferon responses by regulating A-to-I RNA editing", 第23回日本RNA学会年会、京都、7月(2022)

XXI-037 遺伝性心筋症における統合的オミックス解析に基づいた心不全進展機序の解明 Investigation for Progression Mechanism of Heart Failure Using Integrative Omics Approaches to Inherited Cardiomyopathies

研究者氏名：寺本 了太 Ryota TERAMOTO

受入研究室：生命医科学研究センター

応用ゲノム解析技術研究チーム

(所属長 岡崎 康司)

心不全パンデミックと形容される心不全患者の増加が近年著しいが、その分子病態を標的とした薬剤は未だ存在しない。病態モデルとなる遺伝性心筋症における逆遺伝学的アプローチは、心筋の収縮単位であるサルコメア蛋白をコードする遺伝子の変異が心筋細胞膜電位維持機構を変質させる機序を明らかにした。しかしながら、心不全の病理学的本態である心筋細胞肥大および間質線維化のメカニズムは未だ不明である。本研究では多層的オミックス解析により心不全を醸成する因子を多層的に理解し、その分子病態において創薬シーズを見出すことを目指す。申請者は特定のサルコメア遺伝子が家系ごとに異なる病理表現型を引き起こすことに注目し、迅速な生体機能評価が可能なゼブラフィッシュ変異モデルの心臓において発生段階的に一細胞RNAシーケンスおよびエピゲノム解析を行うことにより心筋組織の変性に関わる分子パスウェイを網羅的に同定する心不全病態の責

任修飾分子探索研究を実施する。さらに、迅速生体モデルで確認された分子について、ヒトiPS細胞由来心筋細胞プロテオーム解析を用いて細胞内での挙動を明らかにし、心不全の基礎病理を形成する機構の解明を目指す。

2022年度は前年度に整備した研究環境を基盤として以下の実験および実験設備拡充を行なった。

- ①ゼブラフィッシュ飼育設備の改修(漏水防止、水質改善)
- ② tnnt2遺伝子、vcl遺伝子について、CRISPRガイドRNAを設計し、受精卵にマイクロインジェクションを実施し、心機能解析法にてその表現型を確認した。
- ③インジェクションシステムの改良(油圧式マニピュレーターの導入)
- ④心筋特異的蛍光タンパクモデルにおける成魚心臓を摘出し、一細胞トランスクリプトーム解析に向けた細胞分離実験を行い、良好な生細胞率と分離状態を得られた。

XXI-038 Using pooled cell libraries to associate genetic variance with responses to stimulus

Name: Steven Matthew HEATON

Host Laboratory: Genome Immunobiology RIKEN Hakubi Research Team
RIKEN Center for Integrative Medical Sciences

Laboratory Head: Nicholas PARRISH

Cultured cell lines enable convenient investigation of cellular responses to viral infection, therapeutic drugs, and innumerable other stimuli. But humans are genetically diverse, and this diversity can lead to substantially different stimulus-response phenotypes between individuals. Due to various issues including scale, cost, and reproducibility, traditional cell culture models are rarely able to account for this genotype-phenotype diversity. We have now developed a method for massively multiplexed genotype-phenotype analysis by leveraging the enormous genetic diversity present in cells of the immune system. This technology enables pooled cells to be reliably tracked to their individual donor-of-origin, allowing stimulus-response phenotypes among hundreds of genetically

diverse cell donors to be measured simultaneously at single-cell resolution.

We have applied this method to test the genotype dependence of stimulus-response phenotypes for anticancer agents, immune agonists, latent viral infections, and SARS-CoV-2 (severe acute respiratory syndrome-coronavirus 2) gene expression. We have identified donor-specific, sex-specific, and population-specific patterns of differentially expressed genes induced by exposure to these various stimuli. These include sex-specific patterns of long non-coding RNA (lncRNA) expression induced by Toll-like receptor (TLR) immune stimulation; a novel generalized perturbation in immune chemokine and G-protein coupled receptor (GPCR) signaling induced by SARS-

CoV-2; and donor-specific gene expression signatures that may protect or predispose certain individuals to severe COVID (coronavirus disease). These results will enable genome-wide association studies (GWAS) and mapping of gene expression response quantitative traits (eQTLs), revealing the genetic underpinnings of human diseases and informing potential therapeutic interventions including personalized medicines.

● Publications

Original Paper

1. Kojima S., Koyama S., Ka M., Saito Y., Parrish E.H., Endo M., Takata S., Mizukoshi M., Hikino K., Takeda A., Gelinas A.F., Heaton S.M., Koide R., Kamada A.J., Noguchi M., Hamada M., Biobank Japan Project Consortium, Kamatani Y., Murakawa Y., Ishigaki K., Nakamura Y., Ito K., Terao C., Momozawa Y., Parrish N.F.: Mobile elements in human population-specific genome and phenotype divergence. *bioRxiv* (2022) published

Review Article

1. Heaton S.M., Gorry P.R. and Borg N.A.: DExD/H-box helicases in HIV-1 replication and their inhibition. *Trends Microbiol.* (in print) *

● Oral Presentations

Conference

1. Heaton S.M.: "Querying the genotype-dependence of stimulus-response phenotypes using single-cell sequencing of genetically diverse human cell libraries", 45th Annual Meeting of the Molecular Biological Society of Japan (MBSJ), Chiba Japan, Nov30-Dec2 (2022)

International Conference

1. Heaton S.M.: "Querying the genotype-dependence of stimulus-response phenotypes using single-cell sequencing of genetically diverse human cell libraries", RIKEN-Karolinska Institutet (RIKEN-KI) Bioinformatics Exchange Program, Solna Sweden, Oct12-21 (2022)

XXI-039 Investigating the Neural and Behavioral Mechanisms of Motor Skill Learning with Robotic Assistance, Passive Movement, and the Sense of Agency

Name: Ethan OBLAK

Host Laboratory: Laboratory for Human Cognition and Learning
RIKEN Center for Brain Science

Laboratory Head : Kazuhisa SHIBATA

Humans have a remarkable ability to reproduce motor skills in an effector-independent manner, for example by using different tools or even different hands to complete the same goals. Transfer of skills from one hand to the other, known as intermanual transfer, can occur in extrinsic, world-centric coordinates or in an intrinsic, body-centric coordinate frame. It is controversial whether transfer of skills is stronger in the intrinsic or extrinsic coordinate system. Our eventual goal in this project is to investigate how humans can learn motor skills with robotic assistance, by using a robot to mirror movements from one hand to the other. Towards this goal, we first investigated how motor skills transfer between hands at a baseline level, without using help from a robot. In an initial pilot experiment (N=24), participants learned two different 5-button sequences with their right hand on one day, then reproduced these sequences on a second day with their left hand, either as an extrinsic mirror or as an intrinsic mirror. Both sequences were produced faster than a novel sequence with

the left hand, but not as fast as a left-hand sequence trained during day 1. The extrinsic mirror was reproduced faster than the intrinsic mirror, but was hypothesized to be due to extrinsic coordinate cues within the experimental design. Therefore, a follow-up experiment (N=30) was conducted to investigate the effect of the cued coordinate system. Ten 9-button sequences were selected to be trained with the right hand over two days, with identical training for all 30 participants: sequences were cued with each finger of the right hand numbered 1-5 from left to right (thumb=1). On day 3, participants were evenly split into extrinsic (thumb=5) and intrinsic (thumb=1) coordinate groups for testing with the left hand. Both intrinsic and extrinsic mirrors of the ten sequences were tested on day 3 (20 sequences total). Participants showed a significant bias towards congruent cues and mirrors: intrinsic mirrors were reproduced significantly faster for the intrinsic coordinate group, and vice versa. This congruency bias was also related to participants' skill level as baseline: faster

participants at the end of day 2 were even faster at the congruent cue-mirror pair compared to slower participants. Finally, we investigated the structure of sequence executions and how it related to skill transfer, using the inter-press interval (IPI) of button presses. We correlated the IPI patterns for each participant at the end of day 2 with their IPI patterns of the same mirrored sequences during day 3. For the intrinsic coordinate group, we found a significant correlation between faster congruent sequence executions and IPI pattern matching, while no such relationship existed within the extrinsic coordinate group, suggesting that chunking of motor sequences may transfer more readily for intrinsic mirrors than extrinsic mirrors.

Overall, our results demonstrate that intermanual motor skill transfer depends heavily on the context during testing: although all participants experienced the exact same training for the first two days, their observed ability on the third day varied significantly based on the cued coordinate system. Furthermore, the degree of skill transfer and timing of movements depended on participants' baseline skill and assigned coordinate system. These results provide insight into the mechanisms of motor skill transfer and will also serve as a baseline for further experiments using robotic assistance to investigate the sense of agency and intermanual skill transfer.

XXI-040 Emergent Prosocial Behavior During Dynamic Human Group Formation

Name: Ryan Paul BADMAN

Host Laboratory: Social Value Decision Making Collaboration Unit
RIKEN CBS-Toyota Collaboration Center,
RIKEN Center for Brain Science

Laboratory Head : Rei AKAISHI

Probing the emergent changes in human cognition as group sizes increase is vital for understanding the evolution of large cooperative societies. Larger group sizes often require complex self-versus-other trade-offs, as well as possibly greater cognitive load to process than smaller groups or dyads—an issue which has rarely been studied in social neuroscience. Specifically, there has been few studies exploring how cognitive changes associated with group size increases, or decreases, affect cooperation within economic decision-making experiments, as group size is typically fixed rather than modulated within-session. We thus deployed a novel, social network-embedded-dyad version of the classic iterative prisoner's dilemma (PD) task to study how preference for cooperation changes, within-subject, as a function of group size ($N=75$ for behavior, $N=26$ for fMRI). Each trial consisted of a two-way PD game with one randomly chosen group member. New group members were added every ~5-10 trials in 180-trial sessions (up to a group size of 5 partners), but both the subject and current partner could unilaterally break ties on select trials. Being in larger groups was assumed to affect both memory and social behavior, which we examined by behavioral and neural analyses. Subjects consistently followed a well-performing decision policy (*tit-for-tat*, *TFT*), in which subjects imitated the prior choice of the current partner from their previous interaction, suggesting subjects could strategically track and respond to multiple partners

even in larger groups. However, subjects became more forgiving as group size increased, with higher cooperation rates that resulted in larger group sizes being maintained from partners breaking social ties less (despite defection being more optimal for score). Response time (RT) also increased with group size, suggesting larger group sizes required more cognitive load to process, while there was a default preference shift from faster RT for defect in dyads to faster RT for cooperate in larger groups. Larger group sizes were associated with changes in both activity and connectivity within brain networks that have been associated with social cognition, working memory, and deliberation. Overall, humans seem to default to more cooperative strategies in groups partly due to intrinsic preference for larger group sizes, and the observed prosocial behavioral transitions may be mediated by interactions/conflicts between intrinsic valuation of social connections, extrinsic valuation of material reward, and cognitive load.

● Publication of Original Papers

1. Badman, R.P., Nordström, R., Ueda, M. and Akaishi, R., 2022. Perceptions of Social Rigidity Predict Loneliness Across the Japanese Population. *PsyArxiv*. (2022).
2. Badman, R. P., Zajkowski, W., Haruno, M., & Akaishi, R.: Emergent prosocial behavior during dynamic human group formation. *PsyArxiv*. (2021).
3. Badman, R.P., Wang, A.X., Skrodzki, M., Cho, H.C.,

Aguilar-Lleyda, D., Shiono, N., Yoo, S.B.M., Chiang, Y.S. and Akaishi, R., 2022. Trust in Institutions, Not in Political Leaders, Determines Compliance in COVID-19 Prevention Measures within Societies across the Globe. *Behavioral Sciences*, 12(6), p.170.

● **Poster Presentation Conference**

1. -Badman, R. P., Zajkowski, W., Haruno, M., & Akaishi, R.: The Precuneus Mediates Prosocial

Phase Transitions During Human Group Formation. RIKEN CBS Lab Summer Poster Session, Wako Campus of RIKEN, Japan 2022, July 4.

2. -Badman, R. P., Zajkowski, W., Haruno, M., & Akaishi, R.: Neural Bases of Prosocial Phase Transitions During Human Group Formation. RIKEN CBS – Toyota Collaboration Center (BTCC) Summer Retreat, Wako Campus of RIKEN, Japan 2022, July 26.

XXI-041 細胞外マトリックスと細胞接着分子による感覚神経末端の伸長・伸縮・剪定における影響と病理への応用

The effects of extracellular matrix and cell adhesion molecules on extension, retraction and pruning of sensory nerve endings, and their application to pathology

研究者氏名：松山 絢子 Ayako MATSUYAMA
受入研究室：生命医科学研究センター
組織動態研究チーム
(所属長 岡田 峰陽)

本研究は、神経軸索伸長阻害因子の表皮における感覚神経終末の伸縮・剪定及び神経配置における役割と、それらが搔痒等の感覚にどのように影響するかを探究し、疼痛・搔痒を抑制する新たな治療法の開発に寄与することを目的としている。

本課題では、神経軸索伸長阻害因子として中枢神経系で多くの研究成果が得られていながら、感覚神経の神経終末では報告のないコンドロイチン硫酸プロテオグリカン (CSPGs) とミエリン関連タンパク質である Nogo について研究を進めた。

1-1. CSPGs については、TJ が減弱することが知られているアトピー性皮膚炎モデル *Spade Nav1.8-tdTomato* を用いて評価を試みた。本年度は、神経が異常な活性化を起こしうる部位に CSPGs を皮内投与し、経時的に神経を生体イメージングする解析方法を確立した。CSPGs の皮内投与、または側鎖のナノ型コンドロイチンの塗布により、*Spade* マウスの角層水分量、経表皮水分蒸発量、搔破回数の測定を行なった。

1-2. Nogo について、本年度は、昨年度作製したノックアウトマウスのキャラクタリゼーションを行なった。まず、Nogo の表皮への発現を確認した。次に、表皮内の神経配置を免疫染色により解析した。Nogo のグローバルノックアウトマウスでは、表皮の感覚

神経の一部のサブセットが野生型と比較してより表皮に貫入し、さらに表皮内の神経も伸長していることを見出した。また、表皮に配置している感覚神経における Nogo のシグナル伝達を調べるため、下流のタンパク質リン酸化酵素 Rho/ROCK 経路を、阻害剤投与後に生体イメージングを行うことにより評価した。Rho/ROCK 経路の阻害により神経終末の伸長がより活発になることを発見した。これらにより Nogo-Rho/ROCK シグナル経路が表皮の神経配置と伸長を制御することが示唆された。

● **口頭発表 Oral Presentations**

(学会)

1. Matsuyama A. and Okada T. "Axon growth inhibitory molecule Nogo regulates sensory neuron innervation of epidermis", The 47th Annual Meeting of the Japanese Society for Investigative Dermatology, Nagasaki, Japan, Dec.(2021)

● **ポスター発表 Poster Presentations**

(学会)

1. Matsuyama A. and Okada T. "Axon growth inhibitory molecule Nogo regulates sensory neuron innervation of epidermis", The 47th Annual Meeting of the Japanese Society for Investigative Dermatology, Nagasaki, Japan, Dec.(2021)

XXI-042 Multi-modal Image Processing and Data Fusion for Collaborative Brain Image Analysis

Name: Matthias Wilfried SCHLACHTER

Host Laboratory: Brain Image Analysis Unit Integrative Computational Brain Science Collaboration Division
RIKEN Center for Brain Science

Laboratory Head : Henrik SKIBBE

In interdisciplinary projects the interaction between research groups of different fields is an important factor for the overall success and efficiency of the project. Bringing together different areas of expertise, such as computer science and life science, is frequently difficult. The goal of this project is to establish a collaborative web-platform for brain image analysis, which integrates artificial intelligence into algorithms to enable users from different disciplines to set up a dynamic processing pipeline tailored to their data and automatically improves from user provided feedback. Researchers from different labs can leverage the results of artificial intelligence driven algorithms to do analysis of MRI and microscopic images, like neuronal tracer data. The goal is two-fold: Firstly, researchers should be able upload, process, analyze their data sets with the possibility to leverage the results of algorithms in the early prototype stage. Secondly, we use the collaborative system to incrementally improve the developed algorithms by allowing users to provide feedback utilizing data annotations by the means of an intuitive web-browser interface. The focus is on integrating artificial intelligence into algorithms for users to set up and interact with a dynamic processing pipeline tailored to their data which automatically improves by learning from user provided feedback.

In the past year we focused on establishing such a platform and integrated existing projects, such as Brain/MINDS for processing marmoset brain images. Furthermore, we started a new collaboration, and developed an initial pipeline for processing microscopy images of *Drosophila* fruit fly brain images. This pipeline includes the extraction of neuronal structures, the registration to an existing

reference space (Bogovic et al. 2020) and the identification of the segmented neurons.

The general idea is that the system will improve itself over time in these two key areas, image registration and image segmentation. The more data and annotations are added the better the performance of the underlying system and the less additional user corrections are required. Once the system has been trained, it will be able to perform all tasks without any supervision.

We will include (anatomical) landmarks into the pipeline, which can be added by users in regions where registration algorithms have difficulties finding an optimal mapping, and provide AI-tools which use these landmarks to improve over time.

We want to establish a fully automated landmark-based registration pipeline, where user annotations are included in the training. We will establish a neural network-based approach for learning anatomical landmarks from an initial set of landmarks. Further landmarks can be manually added within the online platform and will be used to adapt and refine the existing underlying neural network.

Another important aspect is image segmentation to support different tasks of quantitative analysis. We will establish a fully automated image segmentation pipeline based on neural networks which can learn and improve over time from user annotations. New objects can be learned by providing initial segmentation masks or annotated regions. For the adaptation and refinement of the network, we will include user annotations in the form of corrected segmentation masks.

XXI-043 知覚を成立させる皮質広域神経活動に果たすハブニューロンの役割の探索 The role of hub neurons in wide-field cortical neural activity underlying perception

研究者氏名：上森 寛元 Hiroyuki UWAMORI
受入研究室：脳神経科学研究センター
触知覚生理学研究チーム
(所属長 村山 正宜)

知覚の背後の神経活動には広域にわたる複数の脳領域が関与する。既存研究によって、感覚刺激に対し1次感覚野の特定の神経細胞集団の活動(アンサンブル活動)が誘起されること、またその細胞集団内の多くの細胞との活動の相関が高い少数のニューロン(ハブニューロン)の活動がアンサンブル活動に影響を与えることが報告された。このことは、1次感覚野における感覚刺激情報の符号化が少数のハブニューロンの活動を起点に生じることを示唆する。しかし、知覚に伴う広域での神経活動における脳領域間の情報伝達様式は不明な点が多い。1次感覚野などの局所脳領域でみられる少数のハブニューロンは、他脳領域にも機能的に結合し、脳領域間の情報の伝達を担うのか。それとも、他の脳領域への伝達は広域に分布する多数の細胞と結合するような異なるタイプのハブニューロンによって担われるのだろうか。そこで、皮質内神経活動を大規模に記録できる広視野2光子顕微鏡を用いて、局所脳領域内でのハブニューロンと多領域にまたがる広域でのハブニューロンをそれぞれ同定する。さらに光遺伝学の技術を組み合わせ、知覚課題中のマウスに対しハブニューロンの活動操作を行うことで、知覚を成立させる皮質広域での神経活動に対するハブニューロンの役割を明らかにすることを目指す。

本年度は、知覚課題に対するマウスの行動の評価を行うとともに、広視野2光子顕微鏡を用いたカルシウムイメージング中の単一神経細胞の光刺激手法の確立を目指した。本顕微鏡は観察視野が極めて広く、その視野内の任意の神経細胞に対して走査したレーザーを照射して光

活性化することは極めて難しい。観察視野の中心部ではなく周辺においてはわずかな照射のズレが生じてしまうため、観察視野全域において光刺激時のズレを試料を用いて計測し、その情報をもとに刺激位置を補正するようなソフトを別途作成して対応した。周辺位置でも光刺激に対する神経細胞の応答を確認できたため、速やかに調整を完了させ、観察視野全域で光刺激が可能な実験系を構築する。また、予備実験として、カルシウムイメージングを行いながら高速で神経活動の波形を抽出し、ハブニューロンを同定し、その観察視野における座標を取得するためのパイプラインを整えた。これにより、来年度は自発活動中や知覚課題中のマウスからハブニューロンを同定し、その光刺激を行う実験を進める。

●誌上発表 Publications

(総説)

1. Ota K., Murayama M.: "Breaking trade-offs: Development of fast, high-resolution, wide-field two-photon microscopes to reveal the computational principles of the brain", *Neuroscience Research*, 179 3-14 (2022)

●ポスター発表 Poster Presentations

1. Uwamori H., Murayama M.: "Fast and wide field-of-view two-photon microscopy enabling multi-plane imaging with three-dimensional single-cell optogenetics", *The 1st Joint Presentation for Young Scientists, RIKEN*, 2022.

XXI-044 Towards twisted light devices with single-walled carbon nanotubes

Name: Chee Fai FONG

Host Laboratory: Nanoscale Quantum Photonics Laboratory
RIKEN Cluster for Pioneering Research
Laboratory Head: Yuichiro KATO

Carbon nanotube is a promising material system for next generation optoelectronic devices. Carbon nanotubes can be thought of as a rolled sheet of graphene, which exhibits different so-called chirality and handedness depending on the “rolling” configuration and direction. Given these additional structural degrees of freedom, the optical properties of carbon nanotube could be amenable to light with nonzero angular momentum. For example, circularly polarized light has nonzero spin angular momentum, while twisted light has nonzero orbital angular momentum giving rise to spiral wavefronts. However, the carbon nanotube is only a few nanometers in diameter, compared to a focused excitation light beam spot which is of the order of a few microns, there is a large mismatch in their characteristic sizes hampering the interaction between the carbon nanotube and the optical fields. To facilitate the interaction between carbon nanotube and the excitation light, one could couple the carbon nanotube to photonic structures to manipulate the optical properties of both the excitation light and the emitter.

We propose and experimentally verify a novel type of photonic nanocavity that is suitable for coupling to carbon nanotubes. To form this cavity, we first

prepare photonic crystal waveguides using standard nanofabrication techniques, then we deposit a suitably-sized flakes of 2D material such as hexagonal boron nitride onto the waveguides such that the flake only covers the middle portion of the waveguides. Based on finite-difference time-domain simulations, 2D material/waveguide heterocavities could support cavities with high Q-factors approaching 10⁷. By performing photoluminescence and transmission measurements, we were able to verify the formation of such heterocavities, with one particular sample showing a high Q-factor of ~400 000. By using the anthracene dry transfer technique developed in our group, we can pick-up and transfer carbon nanotubes onto the heterocavity to enable light-matter interactions.

● Oral Presentations

Conference

1. C. F. Fong, Y. Ota, Y. Arakawa, S. Iwamoto, Y. K. Kato, “Intrinsically chiral modes near exceptional points in modified H1 photonic crystal cavity modes,” Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2022), San Jose, USA (May 16, 2022)

XXI-045 軟 X 線多次元イメージングシステムの研究開発

Development of Soft X-ray Multidimensional Imaging System

研究者氏名: 江川 悟 Satoru EGAWA

受入研究室: 量子工学研究センター
先端光学素子開発チーム
(所属長 山形 豊)

軟 X 線は、波長が1~10nm程度の短波長の光である。軟 X 線顕微鏡を用いることで、細胞など軽元素で構成された物体を、高空間分解能・高コントラストで観察することができる。従来、軟 X 線によるバイオイメージングはラベルフリーで行われていたため、観察対象の組織を同定することが困難であった。細胞を蛍光標識すれば、軟 X 線顕微鏡で観察した組織を可視蛍光画像と比較することで識別することができる。そこで本研究では、軟 X 線顕微鏡撮影時に生体組織のその場での識別を可能にする軟 X 線・可視蛍光複合顕微鏡を開発した。

光学系は、光源、集光光学系、試料、対物光学系、画像検出器から構成される標準的な透過型顕微鏡をベースとした。光学系の瞳を2つに分割し、一方を軟 X 線イメージングに、もう一方を可視光イメージングに利用する。対物光学系の下流でミラー反射により可視光の光路をずらすことで、軟 X 線画像と可視光画像を別々の検出器に結像させる。照明光学素子と対物光学素子には、光ビームを斜め入射で反射させるウォルターミラーを使用している。このミラーは、可視光から軟 X 線領域まで高い反射率を持ち、色収差が無い。そのため、軟 X 線と可視光を

同時利用する顕微システムを構築できる。

提案した光学系を構築し、哺乳類細胞の観察を行った。SPring-8 SACL Aの軟X線自由電子レーザービームラインにて過去に開発した軟X線顕微鏡を改造して利用した。細胞周期インジケータFucci2が導入されたHela細胞(Hela/Fucci2)を可視蛍光と軟X線とで観察することで、細胞周期を確認しながら細胞の詳細構造を明らかにすることができた。

また、フェムト秒パルスのシングルショット露光による細胞の軟X線観察も行った。チャイニーズハムスター卵巣由来細胞(CHO K-1)をマイクロ流体チャンバに封入して観察し、良好なSN比の像を得ることができた。軟X線は細胞に放射線ダメージを与えるため、生きた細胞には問題があった。フェムト秒パルスによるシングルショット露光により生きたままの細胞の姿を捉えることができる。

●口頭発表 Oral Presentations

1. S. Egawa, G. Yamaguchi, S. Owada, S. Yokomae, T. Kimura, M. Shimura, Y. Takeo, K. Sakurai, N. Furuya, H. Motoyama, K. Tono, M. Yabashi, Y. Yamagata, and H. Mimura, "Development of a soft X-ray full-field microscope at SACL A," International conference on X-ray optics and applications, Yokohama, Japan, 19-21 April, 2022.
2. 江川悟、大和田成起、木村隆志、志村まり、竹尾陽子、櫻井快、古谷登、本山央人、山口豪太、横前俊也、登野健介、矢橋牧名、三村秀和、「超短パルス軟X線レーザーによる結像イメージング」、第14回放射光学会若手研究会「次世代放射光で切り拓く軟X線科学」、東北大学、2022年9月1日～9月2日
3. 江川悟、櫻井快、竹尾陽子、古谷登、横前俊也、大和田成起、矢橋牧名、木村隆志、志村まり、「軟X線FELと可視蛍光による水中の生体細胞の観察」、第36回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム、立命館大学びわこ・くさつキャンパス、2023年1月7日～1月9日

XXI-046 Experiment-based Mechanistic Modeling of Lumen Formation and Remodeling Principles in Tubulogenesis

Name: Swe Soe MAUNG YE

Host Laboratory: Laboratory for Vascular Morphogenesis
RIKEN Center for Biosystems Dynamics Research
Laboratory Head: Kun PHNG

Despite growing evidence that physiological blood flow is necessary for healthy organism development, the mechanisms of how blood flow forces regulate the various stages of angiogenesis is not established. Hence, I combine computational modeling with experiments on zebrafish to study the role of hemodynamic forces in the regulation of blood vessel lumen expansion and vascular network pattern. A semi-automated blood flow imaging and data processing method was established for the analysis of blood flow in embryos/larvae between 2 to 6 days post fertilization (dpf). The high-throughput analysis indicated a peaking of flow velocities at 2 – 3 dpf and reductions in both flow and stress gradients towards 6 dpf thereafter. Next, I focused on the 2-dpf stage for a high resolution calculation the flow forces during lumen remodeling. For this, I developed a computational fluid dynamics (CFD) model of red blood cell (RBC) and plasma flow in the microvascular networks. Flow-imaging data provided population-averaged flow boundary conditions for the CFD model. The model predicted that reduction in arterial pressure in zebrafish with

vessel networks of reduced diameter (Marcks11 knock-out) enabled network WSS to be maintained at levels similar to wild type control – suggesting a systemic regulation of hemodynamics to maintain setpoint WSS despite local diameter changes. On the other hand, non-stereotypical network patterning as seen with arterial venous shunt formation in PlxnD1 knock-down morphants exacerbated flow and WSS distribution asymmetry – suggesting that network mis-patterning may lead to loss of flow adaptability and ability to maintain physiological WSS. Lastly, a caveolin1 transgenic zebrafish line was established for visualization of tension in endothelial cells (ECs) lining the blood vessel lumen. Subsequently, I will study how membrane tension and EC reorganization interplay during vessel lumen expansion (1 – 2 dpf).

● Publications:

Original Papers

1. Ye SSM, Kim JK, Carretero NT, Phng L-K. High-Throughput Imaging of Blood Flow Reveals Developmental Changes in Distribution Patterns of Hemodynamic Quantities in Developing Zebrafish.

Front Physiol 13:881929. (2022) published*

2. Ye SSM, Phng L-K. A cell-and-plasma numerical model reveals hemodynamic stress and flow adaptation in zebrafish microvessels after morphological alteration. Biorxiv 2022.12.07.519059. (2022) submitted

● Oral Presentations

Conferences

1. Ye SSM. and Phng L-K.: "Mapping hemodynamic forces in zebrafish vascular networks through numerical modelling", 55th JSDB annual meeting (6th June 2022)
2. Ye SSM. and Phng L-K.: "Mapping hemodynamic stresses in microvascular networks using microscopy and numerical modeling", RIKEN BDR Organoid

Project Annual Meeting (23rd Dec 2022)

● Poster Presentations

Conferences

1. Ye SSM. and Phng L-K.: "Mapping hemodynamic forces in zebrafish vascular networks through numerical modelling", 55th JSDB annual meeting (6th June 2022)
2. Ye SSM. and Phng L-K.: "Mapping hemodynamic forces in zebrafish vascular networks through numerical modelling", RIKEN BDR Retreat (9th Nov 2022)
3. Ye SSM. and Phng L-K.: "Mapping hemodynamic stresses in microvascular networks using microscopy and numerical modeling", RIKEN BDR Organoid Project Annual Meeting (23rd Dec 2022)

XXI-047 超大型ウォルターミラーの開発と X 線顕微鏡・望遠鏡への応用

Development of Very Large Wolter Mirrors and Their Applications to X-ray Microscopes and Telescopes

研究者氏名：山口 豪太 Gota YAMAGUCHI

受入研究室：放射光科学研究センター

利用システム開発研究部門

SACLA ビームライン基盤グループ

ビームライン開発チーム

(所属長 矢橋 牧名)

顕微鏡や望遠鏡の性能は対物レンズの性能で決まると言っても過言ではない。顕微鏡の解像度・明るさは、対物レンズの作動距離と有効径の比である開口数(NA)の値により決まる。一方、観察対象が無制限にある望遠鏡では、有効面積の大きさで解像度・明るさが決まる。より高性能な顕微鏡・望遠鏡の実現のため、電波から X 線・ガンマ線に至るまで、波長を問わず高 NA・大面積な対物レンズの開発が進められてきた。しかしながら X 線領域では、X 線の波長の短さ・エネルギーの高さゆえに、可視光領域ほどの高 NA・大面積な対物レンズは実現していない。本研究の目的は、従来の X 線光学素子と比較して桁違いに大きな NA・有効面積を特徴とする X 線ミラーの開発と、その X 線顕微鏡・望遠鏡への応用である。これまで、独自の精密電鍍プロセスをベースとした、硬 X 線用超大型ウォルターミラーの高精度な作製に取り組んできた。

本年度は、直径 60mm、全長 220mm の X 線望遠鏡用ウォルターミラーを作製し、その結像特性を SPring-8BL29XU において評価した。本実験では、本ミラーが、先行する欧米の研究グループの報告を上回る分解能特性を有することを示すことができた。実験により得ら

れた分解能・反射特性をもとに、太陽観測ロケット実験 FOXSI-4 の主鏡として本ミラーを用いた場合に得られる科学成果について予測を進めている。

さらに、ウォルターミラーの X 線顕微イメージングへの応用に向けたインフラ開発を進めた。ウォルターミラーのような高 NA 集光素子と、SPring-8 や SACLA などの高輝度 X 線光源を組み合わせれば、電子顕微鏡では観察の難しい厚みのある試料のナノスケール微細構造を高速に可視化することができる。本年度は、X 線インラインホログラフィ法への応用に向け、波動伝搬シミュレーションに基づく性能予測、撮像後のデータ処理、高量子効率な検出器開発のそれぞれについて研究を進めた。今後、SPring-8 および SACLA のビームラインに実際にイメージングシステムを組み上げ、その性能評価を進める。

●口頭発表 Oral Presentations

1. Yamaguchi G., Ito A., Kume T., Matsuzawa Y., Saito T., Hiraguri K., Takigawa A., Sakuta K., Ampuku K., Kashiwakura K., Shimura T., Okada K., Yoshihira K., Kanoh T., Ishida N., Tamura K., Miyata K., Mitsuishi I., Hashizume H., Yabashi M. and Mimura H.: "Fabrication of nickel electroformed mirrors

for lightweight and high-resolution Wolter type-I telescopes”, XOPT 2022 (International Conference on X-ray Optics and Application), Yokohama, Japan, April(2022)

2. 山口豪太、山田純平、田中優人、伊藤篤輝、大坂泰斗、井上伊知郎、犬伏雄一、山内和人、矢橋牧名：“高空間分解能XFELインラインホログラフィの開発”、第36回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム、草津市、1月(2023)

●ポスター発表 Poster Presentations

1. Yamaguchi G., Yamada J., Tanaka Y., Ito A., Osaka T., Ichiro I., Inubushi Y., Yamauchi K. and Yabashi M.: “Hard X-ray phase-contrast microscopy with Wolter III-advanced KB optics”, iSAP2022 (International Symposium on Advanced Photonics), Hamamatsu, Japan, Oct. (2022)

XXI-048 量子限界性能を有するハイブリッド型超伝導マイクロ波増幅器の開発

Development of quantum-limited microwave amplifiers using hybrid superconducting circuits

力学的インダクタンスの性質を利用した進行波型増幅器(Kinetic-inductance Traveling-Wave Parametric Amplifier: KTWPA)の開発は、Microwave Kinetic Inductance Detector(MKID)などの宇宙素粒子実験用超伝導検出器や量子ビットの読み出し増幅器として近年注目を集めている。

MKIDへの応用としては、この増幅器を初段増幅器として使用することで、読み出しマイクロ波によって生じる準粒子によって引き起こされる抵抗の問題を改善し、高感度な観測を実現できる。超伝導量子コンピュータの読み出しへの応用としては、この増幅器は4Kと比較的高温でも動作できるため、4Kで使用される半導体増幅器の代わりとして使用することができる。それにより一般的な半導体増幅器で問題となる10mWもの大きな消費電力を1 μ W程度まで抑えることができ、将来計画されている1000個の超伝導量子ビットを搭載した量子コンピュータの読み出しにも対応できる。さらに、昨今では、従来の超伝導量子回路に比べて磁場耐性が強い点から、高磁場駆動が必須なスピン量子ビットの読み出し増幅器としても注目が高まりつつある。

今年度は、KTWPAを開発する上で重要な力学的インダクタンスの評価と力学的インダクタンスの電流依存性の評価を行った。また、これらの測定から得られた結果を基にKTWPAの作製を行った。力学的インダクタンスの評価はハンガーフック型の共振器を使用し、力学的インダクタンスの電流依存性評価は、Bragg mirrorと呼ばれるフィルターに共振回路を挟んだデバイスを使用した。測定の結果、期待通りの共振を確認することができ

研究者氏名：沓間 弘樹 Hiroki KUTSUMA

受入研究室：量子コンピュータ研究センター

超伝導量子エレクトロニクス研究チーム
(所属長 中村 泰信)

た。また、デバイス温度を調整しながら測定することで、先行研究よりも厳密な力学的インダクタンスの温度依存性と電流依存性をモデル化することに成功した。これらの測定結果を踏まえて、実際のKTWPAの設計、作製を行った。KTWPAは約1.5cm²のチップの上に幅2 μ mの細線を20cm以上集積化する。そのため、回路間の隙間があまりなく、レジスト塗布中にダストが1つでもパターンに被ってしまうと増幅器として使用できない。作製は困難を極めたが、様々な工夫を凝らすことで、今年中に作製を終えることができた。また、測定のための読み出し環境の構築も今年中に完了した。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Sueno Y., Honda S., Kutsuma H., Mima S., Otani C., Oguri S., Suzuki J., and Tajima O.: “Characterization of two-level- system noise for a microwave kinetic inductance detector comprising niobium film on a silicon substrate”, Progress of Theoretical Physics 2022, 3 (2022)*

●口頭発表 Oral Presentations

1. Kutsuma H., Baselmans J., Bueno J., Endo A., Hattori M., Honda S., Huiting R., Karatsu K., Otani C., Sueno Y., Tajima O. : “Development of a design optimization method for hybrid-type MKIDs”、日本天文学会2022年春季大会、オンライン、3月(2022)
2. 沓間 弘樹、C. W. Sandbo Chang、武田正典、寺井弘高、浦出芳郎、玉手修平、竹田悠大河、中村泰信：“力学的インダクタンス進行波型パラメトリック増幅器に向けた窒化ニオブチタン薄膜の評価”、日本物理学会2022年秋季大会、東京都目黒区、9月(2022)

XXI-049 自己保護機能を持つ永久電流・ヘリウムフリー高温超伝導磁石の開発 Developments of a “Persistent-Current”, “Helium-Free” and “Self-Protected” High-Temperature Superconducting Magnet

研究者氏名：末富 佑 Yu SUETOMI
受入研究室：生命機能科学研究センター
機能性超高磁場マグネット技術研究ユニット
(所属長 柳澤 吉紀)

高温超伝導磁石は、強磁場・小型・低冷却コストといった利点をもつが、未だ広範な社会普及に至っていない。従来の磁石巻線手法では(a) 磁石保護、(b) 永久電流運転、(c) 冷凍機冷却を全て満たした理想的な高温超伝導磁石が成立しないためである。これに対して、筆者が考案した層内無絶縁レイヤー巻(intra-Layer No-Insulation:LNI)法は、上記3つの技術を同時に満たせる。LNI法は、磁石内部に銅と絶縁のシートを挿入しながら、絶縁が施されていない高温超伝導線材を巻線する手法であり、銅シートを(a) 磁石保護に必要な電流迂回経路、また(c) 冷凍機冷却に必要な冷却パスとして使用できる。本研究では、LNI法を軸に3つの技術要素を満たした理想的な高温超伝導磁石の開発を目指す。本年度の成果を下記に示す。

課題の抽出を目的として、開発目標である小型900 MHz(21T級) NMR用高温超伝導磁石の設計を実施した。結果、装置のサイズを小型にするために、インナーノッチ構造を採用した新しい巻線構造の実証、磁石軸方向の電磁力の定量化・補強法の考案が必要だと見出した。また、設計した磁石に対して、昨年度構築した数値解析コードを用いて、超伝導磁石の異常現象であるクエンチに対する(a) 磁石保護の性能を評価した。本磁石は小型・高電流密度運転によって高いエネルギー密度を保持し、従来技術では保護が不可能な磁石であるが、LNI法によって磁石を保護し得ることが明らかになった。ただし、線材と銅シート間の電氣的接触抵抗率 ρ_{ct} を $\sim 100\text{m}\Omega\text{cm}^2$ 級の値に制御する必要がある。

ρ_{ct} を制御する技術の検討を実施した。短尺の高温超伝導線材を用いたモデル実験の結果、接着剤であるエポキシ樹脂に、抵抗率が比較的高い黒鉛(グラファイト)粉末を混ぜた導電性エポキシを用いて接触界面を形成することで、所望の $\sim 100\text{m}\Omega\text{cm}^2$ 級の ρ_{ct} が得られることが

分かった。一方で、接触界面の厚さの抑制、磁石に実装した場合の ρ_{ct} 制御の実証が課題として挙げられる。

(a) 磁石保護が可能なLNI法に対して(c) 冷凍機冷却を適用した際の冷却特性について数値解析を用いて調査した。磁石内部のある単一の層に対して熱伝導解析を実施した結果、室温から4Kまで冷却するのに、従来手法の高温超伝導磁石では約8.5時間の冷却時間を要したのに対し、LNI高温超伝導磁石では約2時間に短縮できることが明らかになった。LNI高温超伝導磁石は、巻線内部に熱伝導が良い銅シートを有しているため、従来の高温超伝導磁石よりも冷却特性が向上する。

●誌上発表 Publications

(総説)

1. 末富 佑、柳澤 吉紀：“レイヤー巻REBCOコイルのクエンチ保護に向けたintra-Layer No-Insulation(LNI)法の開発”、低温工学、57巻5号(2022)*

●口頭発表 Oral Presentations

1. 末富 佑、田中 湧也、高尾 智明、小林 賢介、柳澤 吉紀：“伝導冷却All-HTS 900 MHz NMR磁石に向けたintra-Layer No-Insulation (LNI) REBCOコイルの設計検討”、2022年度秋季第104回 低温工学・超電導学会研究発表会、岐阜、12月(2022)
2. 田中 湧也、末富 佑、有園若葉、高尾 智明、小林 賢介、柳澤 吉紀：“導電性エポキシを用いたintra-Layer No-Insulation(LNI) REBCOコイル接触抵抗率制御技術の構築”、2022年度秋季第104回 低温工学・超電導学会研究発表会、岐阜、12月(2022)
3. Suetomi Y., Yanagisawa Y., Yamazaki T., Ono M., Hamada M., Saito K. and Maeda H.: “Quench protection study on
4. an intra-layer no-insulation (LNI) REBCO coil in a 1.3 GHz (30.5 T) LTS / HTS magnet”, Applied Superconductivity Conference 2022, Honolulu Hawaii US, Oct. (2022)

XXI-050 多波長観測によるブラックホールのスピンの測定とその宇宙論的な解釈 Measurements of Black Hole Spins Based on Multi-wavelength Observations and Its Cosmological Interpretation

研究者氏名：川室 太希 Taiki KAWAMURO

受入研究室：開拓研究本部

榎戸極限自然現象理研白眉研究チーム

(所属長 榎戸 輝揚)

巨大な銀河の中心には、太陽の100万倍以上もの質量になる超巨大ブラックホール(SMBH: super-massive black hole)が普遍的に存在すると考えられている。そして、それらSMBHがどのようにして成長してきたのかは天文学における大きな謎の一つである。主流な考えとして、SMBHへガスが回転しつつ降着して成長する場合と、複数のSMBHが合体する場合が考えられる。そして、どちらが成長に重要かによってSMBHの自転スピンの変化すると考えられている。そのような中、本年度は以下のような研究を進めた。(1) まずガス降着の重要性を定量的に議論するために必要なガス降着中SMBHの無バイアスなサンプルを構築するのに、ミリ波を用いた有用な手法を構築した。(2) SMBH合体による成長の可能性を議論するために、合体する前のSMBH候補の検出、また多波長データによる研究を進めた。(3) 実際のスピンの計測に使えると考えられているSMBHによる星潮汐破壊現象について、次期天文衛星を用いた場合の科学検討を行った。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Kawamuro T., Ricci C., Imanishi M., Mushotzky R. F., Izumi T., Ricci F., Bauer F. E., Koss M. J., Trakhtenbrot B., Ichikawa K., Rojas A. F., Smith K. L., Shimizu T., Oh K., den Brok J. S., Baba S., Baloković M., Chang C.-S., Kakkad D., Pfeifle R. W., Privon G. C., Temple M. J., Ueda Y., Harrison F., Powell M., C., Stern D., Urry M., and Sanders D. B.: "BASS XXXII: Studying the Nuclear Millimeter-wave Continuum Emission of AGNs with ALMA at Scales ≤ 100 -200 pc", *Astrophysical Journal*, 938, 1, 87 (2022)*
2. Gandhi P., Kawamuro T., et al., Diaz Trigo M., Paice J. A., Boorman P. G., Gappi M., Fabian A.

C., Fukumura K., Garcia J. A., Greenwell C. L., Guainazzi M., Makishima K., Tashiro M. S., Tomaru R., Tombesi F., and Ueda Y.: "Frontiers in accretion physics at high X-ray spectral resolution", *Nature Astronomy*, 6 1364-1375 (2022)*

●口頭発表 Oral Presentations

(学会)

1. 川室太希, Ricci Claudio, 泉拓磨, 今西昌俊, 馬場俊介, Nguyen D. Dieu, 大西響子: "Chandra と ALMA CO(J=2-1) データを用いた AGN の X 線放射が周辺ガス に与える影響の研究", 日本天文学会2022年春季年会, 広島, 日本, 2022年3月
2. Kawamuro T.: "Tight Relation between X-ray and Millimeter Emission in Nearby AGNs Revealed by ALMA", Chile-Japan Academic Forum at Los Lagos 2022, Puerto Montt, Chile, Dec. 2022
3. Kawamuro T.: "Study of Geometrical and Multi-phase-gas Properties of the AGN Torus with XRISM and Other Observatories", Multiwavelength observation with XRISM, Chiba, Japan, Dec. 2022
4. Kawamuro T.: "Discovery of a Tight Correlation between Mm-wave and X-ray emission for Hard X-ray Selected Nearby AGNs", Kyoto, Japan, Feb. 2022

(セミナー)

1. Kawamuro T.: "X-ray and Millimeter Studies of AGN X-ray-driven Feedback", 知の共有ゼミ、オンライン、2022年5月
2. 川室太希: "X 線とサブミリ・ミリ波の高空間分解能観測で探る超巨大ブラックホールから銀河への影響", 立教・高エネルギー天文学コロキウム、東京、日本、2022年5月
3. 川室太希: "X 線とサブミリ・ミリ波の高空間分解能観測で探る超巨大ブラックホールから銀河への影響", SS433/W50勉強会、オンライン、2022年7月

基礎科学特別研究員
2022 年度採用者

XXII-001 s-不変量のホモトピー的特徴づけとその応用

Homotopical characterization of the s-invariant and its applications.

研究者氏名：佐野 岳人 Taketo SANNO
受入研究室：数理創造プログラム
(所属長 初田 哲男)

「Khovanov homology 理論」は、2000年に M. Khovanov が「Jones 多項式の圏論化」として構成した結び目のホモロジー理論である。「s-不変量」は Khovanov ホモロジー理論から取り出せる整数値の不変量である。s-不変量はその実態が未解明な点が多いが、ミルナー予想の別証明や、Conway 結び目の非スライス性の判定に用いるなど、数々の非自明な応用がある。本研究は s-不変量を空間的(ホモトピー論的)に特徴づけて、さらなる応用を行うことを目指している。

本年度にはこの前段となる、「Bar-Natan ホモトピー型の構成」に関する論文が受諾された。これと並行して、6月から佐藤光樹氏(名城大学)との共同研究を行い、11月には論文のプレプリントを公開した。

●誌上発表 Publications

1. Taketo Sano: “A Bar-Natan homotopy type”, International Journal of Mathematics. (Accepted Dec 2022, publication in progress)

●口頭発表 Oral Presentations

1. Sano T. “A Bar-Natan homotopy type”, Differential Topology Seminar, Kyoto U., May (2022)

2. Sano T. “Introduction to Categories and Categorifications”, Math Seminar, RIKEN iTHEMS, May (2022)
3. Sano T. “A Bar-Natan homotopy type”, Khovanov-Rozansky Study Group Seminar, Ibaraki College (online), May (2022)
4. Sano T. “A Bar-Natan homotopy type”, Geometry Seminar, Chiba U., Jun (2022)
5. Sano T. “Introduction to Categories and Categorifications”, Yahoo! Japan corp. (online), Jul (2022)
6. Sano T. “Introduction to Categories and Categorifications”, Rigaku Seminar, Japan Women’s U. Oct (2022)
7. Sano T. “A family of slice-torus invariants from the divisibility of reduced Lee classes”, Topology and Computer, Hiroshima-U., Oct (2022)
8. Sano T. “A family of slice-torus invariants from the divisibility of reduced Lee classes”, N-KOOK Seminar, Osaka-U. (online), Nov (2022)
9. Sano T. “A family of slice-torus invariants from the divisibility of reduced Lee classes”, Friday Tea Time Zoom Seminar, Ochanomizu U. (online), Dec (2022)

XXII-002 Low-Regularity Gravity and Emergent Geometry via Optimal Transport Theory

Name: Christy Koji KELLY

Host Laboratory: Interdisciplinary Mathematical Sciences Program

RIKEN Interdisciplinary Theoretical and Mathematical Sciences Program

Laboratory Head: Tetsuo HATSUDA

Many existing models of quantum gravity indicate that in regimes where quantum fluctuations become sufficiently strong, the smooth structure of spacetime is lost. Classically this is perhaps indicated by the existence of spacetime singularities, but the fractal structure of spacetime observed in a variety of approaches to quantum gravity—from Liouville theory through dynamical triangulations to the asymptotic safety programme—indicates that the lack of differentiability is a generic property of ‘quantum spacetime’. The aim of this project is to extend recent

insights from mathematics—in particular metric-measure geometry and optimal transport theory—to the geometry of coarse spaces to the study of gravity.

Concretely, I am considering three main directions: firstly, the development of Lorentzian optimal transport theory. The field of optimal transport theory has emerged over the past decade or so as a fundamental extension of metric geometry to the study of rough Riemannian spaces through the discovery of several types of synthetic Ricci curvature.

Extending these insights to the Lorentzian case is still an incipient programme; one of the main difficulties is the lack of a canonical notion of convergence for Lorentzian spaces (e.g. a Lorentzian analogue of the Gromov-Hausdorff distance between compact metric spaces) and this is a key focus of my present work. Secondly, I am working on extensions of an existing statistical model of random networks inspired by Euclidean gravity displaying some nice features relating to the emergence of network geometry. Numerical work is currently in progress. Finally I am attempting to study the coarse local geometry of

the so-called Brownian map, a mathematical object describing the emergent structure of 2D Euclidean quantum gravity.

● Oral Presentations:

Seminars

1. Kelly, C., 'Coarse Notions of Curvature', iTHEMS Coffee Meeting, RIKEN Wako, September (2022).
2. Kell, C., 'An Introduction to Rough Geometry (with a View to Euclidean Gravity)', iTHEMS Maths Seminar, RIKEN Wako, October (2022).

XXII-003 共形場理論の構成と変形の数学的研究

Mathematical study of construction and deformation of conformal field theory

研究者氏名：森脇 湧登 Yuto MORIWAKI

受入研究室：数理創造プログラム

(所属長 初田 哲男)

本研究の目的は、(2次元)共形場理論の構造を数学的に調べることである。今年度はクラスター分解原理と共形場理論の関係性について調べた。

場の量子論のN点相関関数は「点をp個とq個の二つのクラスター($N=p+q$)に分けて、p点のグループとq点のグループが十分に離れていると仮定するとこれらは互いに相関しない」という性質を持つ(べきである)(Osterwalder-Schrader axioms)。これは「十分に離れた二つの実験は相関しない」という物理における基本的な仮定であり、クラスター分解原理と呼ばれる。

「二次元共形場理論のクラスター分解原理は、オペラッドと呼ばれる代数構造を用いて理解できる」というのが我々の提案である。p点を固定したリーマン面(p点付きリーマン面)とq点付きリーマン面があると、それぞれから点を選ぶことでその点でリーマン面を張り合わせることができ。点付きリーマン面全体の集合もそれ自身、多様体の構造(幾何構造)を持ち、モジュライ空間と呼ばれる。張り合わせはモジュライ空間上にオペラッドと呼ばれる代数構造を定義している。

我々はカイラル共形場理論の共形ブロック(相関関数を定義するデータ)が種数0のリーマン面のモジュライ空間のオペラッド構造に対して整合的に振る舞うことを証明した。この成果はプレプリントとして公開し、いくつかの国際学会において講演を行った。

また我々は以前の論文でfull vertex algebraという数学的な概念を二次元の共形場理論の定式化として提案し、その例を構成してきた。我々の定式化ではクラ

スター分解原理は原理ではなく証明すべき定理である。我々は先述の論文を用いてfull vertex algebraが"強い意味で"クラスター分解原理を満たすことを(今まで構成した全ての例が満たす)ある仮定の下で証明した。逆に、"強い意味で"クラスター分解原理を満たす相関関数系はfull vertex algebraを与えることも示した。これらの研究成果については次年度中の発表を目指している。

●誌上発表 Publications

1. Y. Moriwaki, Vertex operator algebra and colored parenthesized braid operad, arXiv:2209.10443.

●口頭発表 Oral Presentations

1. Y. Moriwaki, Vertex operator algebra, braided tensor category and colored parenthesized braid operad, Representation theory and geometry of loop space, Laboratoire de Mathématiques d'Orsay, France, January, 2023.
2. Y. Moriwaki, Vertex operator algebra, braided tensor category and colored parenthesized braid operad, Conference in finite groups and vertex algebras, Academia Sinica, Taiwan, December 2022.
3. Y. Moriwaki, Vertex operator algebra, braided tensor category and colored parenthesized braid operad, Quantum symmetries: Tensor categories, Topological quantum field theories, Vertex algebras, Canada, October 2022.
4. Y. Moriwaki, Construction and Formulation of Conformal Field Theory, 代数学シンポジウム, Japan, Aug 2022.
5. Y. Moriwaki, Conformal field theory and real

analytic modular form, Work shop, Modular forms and Representation theory, France, July 2022.

6. Y. Moriwaki, Non-chiral conformal field theory and vertex algebra, Research Seminar Algebra and Mathematical Physics, Germany, July 2022.

7. Y. Moriwaki, A method for constructing conformal

field theories using quantum groups, Algebraic Lie theory and Representation theory, May 2022.

8. Y. Moriwaki, A mathematical formulation of two-dimensional conformal field theory, iTHEMS math seminar, Japan, May 2022.

XXII-004 理想的気候条件下における大規模雲群の自己組織化と多階層構造

Self-Organization and Multiscale Hierarchical Structure of Large-Scale Cloud Cluster under Idealized Climate Conditions

研究者氏名：柳瀬 友朗 Tomoro YANASE

受入研究室：開拓研究本部

富田数理気候学研究室

(所属長 富田 浩文)

本研究の目的は、大気モデルを用いた理想化数値実験により、雲がなぜ自己組織化し水平数kmから数1000kmにわたるスケール間相互作用の下で多階層構造を生み出すのか、また組織化した雲が地球大気的气候というマクロな熱力学的システムにおいてどのような役割を果たしているのか、を明らかにすることである。今年度は、気候モデリングの中で最も基礎的な枠組みであり、本研究計画における一連の数値実験の中の基準となる、放射対流平衡実験を行った。特に、放射対流平衡下における雲の大規模な自己組織化である Convective Self-Aggregation (CSA) の発生メカニズムおよび特徴的な形態と長さについて調べた。またそれぞれの成果を国際学術誌に論文掲載した。

CSAの発生メカニズムについては、雲解像放射対流平衡実験に用いる水平格子幅および水平領域幅に関するパラメータ走査実験の詳細なデータ解析により調べた。このデータセットは、過去に非静力学大気モデルSCALE-RMを用いて、スーパーコンピュータ「京」上で数値実験を実行して作成したものである。特にCSAの最大の特徴である大気水蒸気量の水平コントラストの自発的な増幅を引き起こす物理メカニズム調べた。そこで領域幅が十分大きくCSAが起きる場合においては、逆勾配的な水平水蒸気輸送を担う特徴的な下層循環が発達することを発見した。

CSAの特徴的な形態と長さについては、スーパーコンピュータ「富岳」を活用することで、前例のない大規模な計算領域(10000 km以上)における放射対流平衡実験を実施した。これにより、計算領域幅が約5000 kmを超えると領域平均量が領域幅に対して収束し、大規模な水蒸気場が約3000-4000 kmの水平スケールを持つメッシュ状の組織パターンを示すようになることを明らか

にした。

また現在、雲の組織化に与える地球自転効果の影響を理解するために、上述の基準実験に対してコリオリパラメータを系統的に変化させる回転放射対流平衡実験も進めている。今後、実験結果の詳細な解析を行うことで、台風のような渦状で強い風を伴う雲システムの形成メカニズムの基礎的理解を深めることを目指す。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Yanase T., Nishizawa S., Miura H. and Tomita H.: "Characteristic form and distance in high-level hierarchical structure of self-aggregated clouds in radiative-convective equilibrium", *Geophysical Research Letters*, 49 e2022GL100000 (2022)*
2. Yanase T., Nishizawa S., Miura H., Takemi T. and Tomita H.: "Low-level circulation and its coupling with free-tropospheric variability as a mechanism of spontaneous aggregation of moist convection", *Journal of the Atmospheric Sciences*, 79 3429-3451(2022)*

●口頭発表 Oral Presentations

(学会)

1. Yanase T., Nishizawa S., Miura H., Takemi T. and Tomita H.: "Numerical study on the self-aggregation of moist convection in radiative-convective equilibrium", 6th Asia Pacific Conference on Plasma Physics, Virtual, Oct.(2022)
2. Yanase T., Nishizawa S., Miura H., Takemi T. and Tomita H.: "A mechanism of convective self-aggregation: Coupling between low-level circulation and free-tropospheric variability", AOGS 19th Annual Meeting, Virtual, Aug.(2022)

3. Yanase T., Nishizawa S., Miura H., Takemi T. and Tomita H.: "A mechanism of convective self-aggregation: Coupling between low-level circulation and free-tropospheric variability", JpGU Meeting 2022, Chiba, May.(2022)
4. 柳瀬友朗, 西澤誠也, 三浦裕亮, 富田浩文: "放射対流平衡下における自己集合化した雲の上位階層構造の特徴的な形態と距離", 日本気象学会2022年度秋季大会, 札幌, 10月(2022)
5. 柳瀬友朗, 西澤誠也, 三浦裕亮, 富田浩文: "放射対流平衡下における自己集合化した雲の上位階層構造の特徴的な形態と距離", 日本流体力学会年会2022, 京都, 9月(2022)
6. 柳瀬友朗, 西澤誠也, 三浦裕亮, 竹見哲也, 富田浩文:

"下層循環と自由対流圏変動の結合を通じた湿潤対流の自己集合化メカニズム", 日本気象学会2022年度春季大会, オンライン, 5月(2022)

●ポスター発表 Poster Presentations
(学会)

1. Yanase T., Nishizawa S., Miura H., Takemi T. and Tomita H.: "Low-level circulation and its coupling with free-tropospheric variability as a mechanism of spontaneous aggregation of moist convection", 2022 Model Hierarchies Workshop, Stanford University, California, USA, Aug.-Sep.(2022)

XXII-005 三次元アラケロフ多様体の極小モデル理論とその応用

Minimal model theory for Arakerov three folds and its applications

研究者氏名: 吉川 翔 Shou YOSHIKAWA
受入研究室: 数理創造プログラム
(所属長 初田 哲男)

代数多様体の分類は, 代数幾何学における主要な目的の一つであり, 他分野への応用という観点でも非常に重要な問題である.

例えば, 複素数体上の代数幾何学は微分幾何学に深く関連しており, 古くから研究されている分野である. また, 正標数の代数幾何学は数論幾何学に関連しているだけでなく, 正標数還元という手法を使うことで, 複素幾何学にも応用があることが知られている. アラケロフ幾何学とは正標数の代数幾何学, 微分幾何学, 数論幾何学という三つを同時に扱う幾何学であり, その分類理論は, それぞれの分野に全く新しい視点を与えることが期待されている. 代数多様体の分類においてよく使われる手法として, 極小モデルプログラムがあげられる. 昨今では, \mathbb{C} 上の多様体に対するものだけでなく, 正標数の多様体に関する極小モデル理論の研究が盛んにおこなわれており, 様々な応用があることが知られている.

本研究の目的は, 三次元アラケロフ多様体の極小モデル理論を研究することである.

すなわち, ある種の良い性質をもった三次元アラケロ

フ多様体に極小モデルが存在するかどうかを検証する. また, 極小モデルが数論幾何学, 微分幾何学的な観点でも重要な対象になっており, それらの分野に豊富な応用を持つと考えている. アラケロフ多様体の極小モデル理論は, 近年研究され始めている混標数の双有理幾何学と関係が深く, 最新の研究結果を多く使うことになる. 一方, アラケロフ幾何学は, 微分幾何学や数論幾何学の古典的研究にも応用されている. したがって, 上述の問題に取り組むことで, 古典的研究に対する全く新しい手法の開発が期待できる.

●口頭/ポスター発表 Oral/Poster Presentations
(学会)

1. 吉川 翔: "混標数の極小モデル理論", 名古屋大学代数幾何セミナー, 名古屋大学, 2022/7
(学会)
1. 吉川 翔: "ベクトル束のモジュライ空間の構成(混標数の場合)", ベクトル束のモジュライと高さ, 京都大学, 2022/8

XXII-006 等質空間上の調和 q -指数型分布族の分類

Classification of Harmonic q -exponential Families on Homogeneous Spaces

研究者氏名：東條 広一 Koichi TOJO
受入研究室：革新知能統合研究センター
汎用基盤技術研究グループ
数理科学チーム
(所属長 坂内 健一)

本研究の目的は、等質空間上の“良い” q -指数型分布族を表現論によって統一的に扱う枠組みを与え、それによって“良い” q -指数型分布族を分類することである。

機械学習や、情報幾何、統計学において、正規分布族やガンマ分布族などを含む指数型分布族は、理論上も応用上も重要な研究対象である。さらに近年、指数型分布族の拡張とみなせる q -指数型分布族が、複雑系の数理や統計力学分野で重要な役割を果たしている。また、ユークリッド空間のみならず、データの構造と相性のよい幾何構造を持った標本空間による現象の解析も近年大きく進歩しつつある。 q -指数型分布族は定義上無数にある一方、解析によく用いられるものはその一部に過ぎない。それらは、数学的には標本空間を等質空間 G/H とする、 G 不変な対称性を持つ分布族とみなすことができる。ここで G はリー群、 H は G の閉部分群である。そこで、次のような問題が自然に考えられる：

問題：等質空間 G/H 上の G 不変 q -指数型分布族を統一的に扱う枠組みを与えよ。さらに重要な等質空間 G/H に対して、 G 不変 q -指数型分布族を分類せよ。

部分問題：重要な等質空間 G/H 上に应用可能で具体的な q -指数型分布族を与えよ。

この問題に対して次の2Stepで取り組む：

Step 1: 等質空間 G/H 上の G 不変指数型分布族の分類を行う。

Step 2: 等質空間 G/H 上の G 不変 q -指数型分布族を分類する。

Step 1について、表現論を用いて等質空間 G/H 上の G 不変指数型分布族の構成法を吉野太郎氏との共同研究で提案した。今年度は、提案手法の詳細とそれによって様々な重要な分布族の例を実際に構成した論

文を発表することができた。さらに G 不変指数型分布族は、本手法で得られる分布族の部分族として実現できることも示される。これと表現論におけるspherical representationの理論を用いて分類に取り組む。

Step 2について： G/H 上の G 不変指数型分布族から G 不変 q -指数型分布族を作る手法を提案した。今年度は部分問題について上半平面上の $SL(2, \mathbb{R})$ 不変な良い部分分布族に対して、本手法を適用することで、上半平面上の $SL(2, \mathbb{R})$ 不変な q -指数型分布族を具体的に与えることができた。

●誌上发表 Publications

(原著論文)

1. Tojo K., Yoshino T. “A method to construct exponential families on homogeneous spaces”, *Information Geometry*, 5, 493-510 (2022)*

●口頭発表 Oral Presentations

1. 東條 広一, “A method to construct exponential families by representation theory”, EPFL-CIS & RIKEN-AIP Joint Online Workshop on Machine Learning, オンライン, 9月 (2022)
2. 東條広一, “表現論を用いた指数型分布族の構成法”, 数理情報科学セミナー, 広島大学, 4月 (2022)
3. 東條 広一, “Classification problem of invariant q -exponential families on homogeneous spaces”, Mathematical optimization and statistical theories using geometric methods, 大阪公立大学文化交流センター, 10月 (2022)
4. 東條広一, “表現を用いた古典型リー環の半単純部分環の分類について”, 表現論ワークショップ, 鳥取県立生涯学習センター, 1月 (2023),

XXII-007 拡張された平均場理論を用いた原子核短距離相関の研究 Study of nuclear short-range correlation by beyond mean-field theory

研究者氏名：内藤 智也 Tomoya NAITO
受入研究室：数理創造プログラム
(所属長 初田 哲男)

原子核は、陽子と中性子(核子) から構成される量子多体系である。核子自由度から出発して、原子核構造を計算する手法として、平均場理論(密度汎関数理論) が知られている。この、密度汎関数理論による原子核構造計算は広く成功を収めているものの、計算に用いるエネルギー密度汎関数(有効相互作用) が第一原理的に導かれていないこと、核子間の短距離相関が正確に考慮できないこと、という2つの大きな課題が知られている。この2つの課題を解決することが、本研究課題である。

本年度は、量子化学・物性物理分野で広く成功を収めている手法について、先行研究を確認するとともに、原子核構造計算に適用すべく解析計算を行った。また、量子色力学の和則に基づき、核力の一部であるアイソスピン非対称項について第一原理的に導出する研究も行った。

関連研究として、核力の一部であるスピン軌道相互作用の荷電半径に対する影響についての研究を行った。本研究で得られた成果は、有効核力の第一原理的な導出に際し有用な知見を与えると考えられる。

また、他にも、原子核が負ミュオンを捕獲するプロセスに関する研究など、原子核構造に関連する研究を行った。

●誌上発表 Publications

1. Sagawa H., Yoshida S., Naito T., Uesaka T., Zenihiro J., Tanaka J. and Suzuki T.: "Isovector density and isospin impurity in ^{40}Ca ", Phys. Lett. B, 829, 137072 (2022)*
2. Naito T.: "Relativistic correction of the Coulomb interaction in the local density approximation for energies and radii in doubly-magic nuclei", Prog. Theor. Exp. Phys., 2022, 093D04 (2022)*
3. Naito T., Roca-Maza X., Colò G., Liang H. and Sagawa H.: "Isospin symmetry breaking in the charge radius difference of mirror nuclei", Phys. Rev. C, 106, L061306 (2022)*
4. Sotani H. and Naito T.: "Empirical neutron star mass formula based on experimental observables", Phys. Rev. C, 107, 035802 (2023)*

●口頭発表 Oral Presentations

(国際会議・招待)

1. Naito T. "Can we improve energy density functionals?—A perturbative method—",

SSNET'22—International Conference on Shapes and Symmetries in Nuclei: from Experiment to Theory—, オンライン (現地開催場所: オルセー), 6月 (2022)

2. Naito T.: "Isospin symmetry breaking in nuclear ground state", NuSym22, X International Symposium on Nuclear Symmetry Energy, オンライン (現地開催場所: カターニャ), 9月 (2022)

(国際会議・一般)

1. Naito T.: "Toward *ab initio* charge symmetry breaking in nuclear energy density functionals", Symposium on "Developments of Physics of Unstable Nuclei" (YKIS2022b), 京都, 5月 (2022)
2. Naito T., Colò G., Liang H., Roca-Maza X. and Sagawa H.: "Isospin symmetry breaking in the nuclear ground state", VIth Topical Workshop on Modern Aspects in Nuclear Structure—The Many Facets of Nuclear Structure— (Bormio2023), ボルミオ, 2月 (2023)

(国内会議・招待)

1. Naito T.: "Isospin symmetry breaking in nuclear ground state", RIBF Users Meeting 2022, オンライン (和光), 9月 (2022)
2. Naito T.: "Towards First-Principles Energy Density Functionals", Fundamentals in density functional theory, 京都, 12月 (2022)
3. Naito, T. "原子核電荷分布を考慮した電子・ミュオン波動関数計算コードの開発", 学術変革領域B 光子対診断医療学 第2回研究会, オンライン (現地開催場所: 京都), 2月 (2023)

(招待セミナー)

1. Naito T.: "Isospin symmetry breaking in nuclear ground state", High Energy Theory Group Seminar, オンライン (台北), 4月 (2022)
2. Naito T.: "Isospin symmetry breaking in nuclear ground state", 309th RIBF Nuclear Physics Seminar/RIKEN SNP Lab Seminar, オンライン (和光), 6月 (2022)
3. 内藤智也: "原子核基底状態におけるアイソスピン対称性の破れ", 日本物理学会四国支部特別企画 科学セミナー, 高知, 11月 (2022)
4. Naito, T.: "Isospin symmetry breaking in the nuclear ground state", 核多体セミナー, 京都, 12月 (2022)

XXII-008 分子組成分布と機械学習を活用した星・惑星系形成の最初期過程の解明

Unraveling the Very Early Stage of Star and Planet Formation with the Aid of Molecular Distributions and Machine Learning

研究者氏名：大小田 結貴 Yuki OKODA

受入研究室：開拓研究本部

坂井星・惑星系形成研究室

(所属長 坂井 南美)

惑星系はいつから作られ始め、どのように進化していくかを観測的に明らかにすることを目指している。惑星系形成の「始まり」はその後の進化の方向を決定付け、惑星系の多様性の要因となると考えられるが、未だに新たな観測的発見が続く未解明課題である。私は、①非常に若い原始星と円盤構造の形成過程の徹底解明と、②初期円盤が原始星とともに進化する「共進化描像」の確立という2つの研究を進めている。本研究では、そこでの複雑な構造を切り分けるため、観測される分子輝線が特定の物理状態を選択的に反映することに着目し、それらを「分子マーカー」として利用する。

本年度は、上記の目的に向けて、主に以下のような研究を行った。

1. 孤立した分子雲にある若い低質量原始星 B335 の円盤 / エンベロープ構造における降着衝撃波を観測的に明らかにし、論文としてまとめた。
2. 物理構造のみならず、コアの化学組成にも着目して共進化の研究を進めた。原始星 IRAS15398-3359 において、高分解能観測のデータを活用し原始星近傍 50 au スケールの化学組成を明らかにした。
3. 所属研究室との共同研究を進め、原始星 B335 の重水素濃縮度を調べ、円盤 / エンベロープ構造における化学組成に迫った。
4. J W S T と ALMA のデータを比較し、原始星が成長する段階で重要な物理構造(アウトフロー) の理解を進めた。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Yuki Okoda , Yoko Oya , Muneaki Imai , Nami Sakai , Yoshimasa Watanabe , Ana López-Sepulcre, Kazuya Saigo , and Satoshi Yamamoto : “Chemical Differentiation and Temperature Distribution on a

Few au Scale around the Protostellar Source B335”, *The Astrophysical Journal*, 935, 136 (2022)

●口頭発表 Oral Presentations

(学会)

1. 大小田結貴, 小山貴裕, 坂井南美, 渡邊祥正, Ana López-Sepulcre, 大屋瑠子, 今井宗明, 山本智: 「低質量原始星 B335 における CH₃OH の重水素化物」、日本天文学会秋季年会、p119a、新潟大学、9月(2022)
2. Okoda Y. : “Physics and Chemistry in the Beginning of Low-Mass Star Formation”, 241 st AAS meeting, Seattle WA USA, Jan (2023)
3. Okoda Y., Oya Y., Logan Francis, Doug Johnstone, Cecilia Ceccarelli, Claire Chandler, Claudio Codella, Sakai N., Yamamoto S., and FAUST Team: “Detection of A Hot Corino in the Prototypical Warm Carbon-Chain Chemistry Source IRAS 15398–3359”, East-Asian ALMA Science Workshop 2023 New Taipei City Taiwan, Feb (2023)
4. 大小田 結貴, 大屋 瑠子, Logan Francis, Doug Johnstone, 犬塚修一郎, Cecilia Ceccarelli, Claire Chandler, Claudio Codella, 坂井 南美, 山本智, and FAUST Team: 「FAUST: 非常に若い低質量原始星 IRAS 15398–3359 の物理・化学構造」、日本天文学会春季年会、Z110a、立教大学、3月(2023)
5. 大小田結貴, 小山貴裕, 坂井南美, 渡邊祥正, Ana López-Sepulcre, 大屋瑠子, 今井宗明, 山本智: 「若い低質量原始星天体 B335 周りの化学組成」、次世代アストロケミストリー、東京大学、3月(2023)

●ポスター発表 Poster presentations

(学会)

1. 大小田結貴, 小山貴裕, 坂井南美, 渡邊祥正, Ana López-Sepulcre, 大屋瑠子, 今井宗明, 山本智: 「低質量原始星 B335 における CH₃OH の重水素化物」、次世代アストロケミストリー、東京大学、11月(2022)

XXII-009 Development of an ultra-sensitive axion-like particle detection standard with 100-fold increased sensitivity and ultra large bandwidth.

Name: Barbara Maria LATA CZ

Host Laboratory: Fundamental Symmetries Laboratory
RIKEN Cluster for Pioneering Research
Laboratory Head : Stefan ULMER

For the first four months of my SPDR position, I mainly contributed to setting up a new antiproton magnetic moment measurement, which will improve the previous result by at least a factor of 10 and will reach a 100 p.p.t. precision level. I was mainly working on the commissioning of the new cooling trap, which by subthermal resistive cooling allows cooling antiprotons to temperatures below 200 mK in less than 10 minutes. This gives a factor of 100 improvements in the particle preparation time for the next magnetic moment measurement and thus will allow to largely improve the collected data statistics and as a result will largely increase the precision of the measurement.

Also, I contributed to the development of the new axion detection experiment. One of our results about a high-Q superconducting toroidal medium frequency detection system with a capacitively adjustable frequency range >180 kHz was just accepted for publication.

Given the period of 4 months of the duration of my SPDR position, I achieved planned progress. From the 1st of August 2022 I will continue working with Prof. Stefan Ulmer in the RIKEN-led BASE collaboration, but from a position at CERN, Switzerland.

● Publication

Original Paper

1. Volksen F., Devlin J.A., Borchert M.J., Erlewein S. E., Fleck M., Jaeger J. I., Latacz B. M., Micke P., Nuschke P., Umbrazunas G., Wursten E. J., Abbass F., Bohman M. A., Popper D., Wiesinger M., Will C., Blaum K., Matsuda Y., Mooser A., Ospelkaus C., Smorra C., Soter A., Quint W., Walz J., Yamazaki Y., and Ulmer S.: "A High-Q Superconducting Toroidal Medium Frequency Detection System with a Capacitively Adjustable Frequency Range >180 kHz", Rev. Sci. Instrum., published*

● Oral Presentation

Conference

1. Latacz B. M. on behalf of the BASE collaboration: "Model based extreme vacuum pressure measurements at BASE" PBC Technologies mini-workshop on Vacuum, Coating and Surface Technologies, CERN, Switzerland, 2022, April.
2. Latacz B. M. on behalf of the BASE collaboration: "BASE, testing fundamental symmetries by high precision comparisons of the fundamental properties of protons and antiprotons", International Conference on Precision Physics of Simple Atomic Systems, Warsaw, Poland, 2022, May.

XXII-010 New Technologies to Study Electric Properties of Exotic Isotopes

Name: Martha Liliana CORTES

Host Laboratory: Radioactive Isotope Physics Laboratory
RIKEN Nishina Center for Accelerator-Based Science
Laboratory Head : Hiroyoshi SAKURAI

This research proposal aims to develop a new experimental technique which will allow for the first time the simultaneous accurate determination of electric dipole and quadrupole transition probabilities of exotic nuclei. Such a setup will contribute to studies of shell evolution of exotic isotopes and at the same time help the understanding of the nature of the Pygmy Dipole Resonance (PDR) for exotic isotopes. This technique is based on the use of a new scintillation material, Cerium-doped Aluminum-

Galium Garnet (GAGG). This solid and non-hygroscopic material has a high light yield of around 46000 photons/MeV, a density of 6.6 g/cm³ and an effective atomic number of $Z_{\text{eff}} = 54$, therefore combines a very high γ -detection efficiency with a good energy resolution. During the last months, 8 samples of GAGG crystals were tested and characterized in terms of their energy resolution, time response, and uniformity. For these tests, each sample was read out using Silicon photomultipliers,

which have a higher detection efficiency on the emission range of the GAGG as compared to standard photo-multiplier tubes. The results are very promising, showing a very good energy resolution and uniformity. Nevertheless it was found that if the crystals are exposed to ambient light, an average of 7 days is necessary to stabilize their time response, therefore the mounting of the samples must be done in low-light conditions. The results obtained regarding the energy resolution of the detectors have been implemented in realistic Monte Carlo simulations to study the performance of the future setup and an initial paper detailing these results is in preparation.

In addition, the electric properties of exotic nuclei is being studied. In particular data analysis of a Coulomb excitation measurement on ^{102}Sn is being carried out. Being presumably the heaviest, particle bound, doubly magic $N = Z$ nucleus, ^{100}Sn offers a fundamental testing ground for the nuclear shell model. Therefore, the region around ^{100}Sn has become a subject of particular interest in recent decades. Due to its low production cross section, it is not yet possible to perform Coulomb excitation on ^{100}Sn , therefore ^{102}Sn is our last anchor point to extrapolate different models on the nuclear structure and electric properties of the region around ^{100}Sn . The data analysis has progressed steadily, the particle identification of the incoming and outgoing ions has been obtained and gamma-ray spectra for the reaction of interest show the expected peak corresponding to the decay of the 2^+ state. A preliminary value of the interaction cross section, and therefore the $B(E2)$ value, has been obtained and the interpretation of the

results is being discussed among the collaboration. A manuscript with this important results is under preparation.

In the next steps, a prototype GAGG cluster will be fully developed and mounted in the current set up. This will potentially allow the simultaneous determination of the dipole response together with the quadrupole excitation in the same measurement, in particular the PDR.

● Publications

Papers

1. Enciu M., Liu H.N., Obertelli A. et al., Extended $p_{3/2}$ Neutron Orbital and the $N = 32$ Shell Closure in ^{52}Ca . *Physical Review Letters* 129, 262501 (2022).
2. Elekes Z., Juhasz M.M., Sohler D. et al., "Southwestern" boundary of the $N = 40$ island of inversion: First study of low-lying bound excited states in ^{59}V and ^{61}V . *Physical Review C* 106, 064321 (2022).
3. Zago L., Gottardo A., Valiente-Dobón J.J, et al, High-spin states in ^{212}Po above the α -decaying (18+) isomer, *Physics Letters B* 834, 137457 (2022).

● Oral Presentations

1. Cortes M. L.: "In-beam gamma-ray spectroscopy towards ^{100}Sn : Recent results and future perspectives", RIBF Users meeting, Wako-shi Japan, September 20-22 (2022).
2. Cortes M. L.: "In-beam gamma-ray spectroscopy towards ^{100}Sn : Recent results and future perspectives", Reimei Workshop, Darmstadt Germany, October 10-12 (2022).

XXII-011 対称性とトポロジーに基づいたダイクォークの包括的研究

Comprehensive Study of Diquarks Based on Symmetry and Topology

研究者氏名：末永 大輝 Daiki SUENAGA
受入研究室：仁科加速器科学研究センター
ストレンジネス核物理研究室
(所属長 肥山 詠美子)

我々の身の回りの物質の基礎となる陽子や中性子を構成する、クォークと呼ばれる素粒子の性質の理解が、量子色力学(QCD)の重要な学術的課題となっている。特に、クォーク2個が結合した「クラスター」であるダイクォークの解明は、重いクォークを含むハドロン(Λ_c 粒子等)の質量や崩壊幅といった実験的性質を説明するのに必要不可欠である。一方で、中性子星の深層部などの極限的な高密度系では、ダイクォークがボース・アインシュタイン凝縮を引き起こす、ダイクォーク凝縮現象の発現が期待

されるが、その発現機構は未解明である。本研究ではこのダイクォークに関して、ハドロン分光における役割から、高密度系でのダイクォーク凝縮の発現に至るまでの、包括的な理解を進めている。

ダイクォーク凝縮が発現する高密度系といった「極限的環境」は、格子QCD計算と呼ばれる数値シミュレーションによって数値実験が可能となる。特に近年、 $T^2 \times R^2$ というトラスを含む複雑な極限的時空上での格子QCD計算による数値シミュレーションが遂行された。本研究で

は、その格子QCD計算結果との比較を可能にする、 $T^2 \times R^2$ 上でのQCDの有効理論の開発に成功した。これにより、極限的環境におけるQCDの性質の理解に向けた新しいアプローチ法を構築することが出来た。

また、格子QCD計算の大きな利点の一つとして、陽子や中性子がクォーク2個で出来た仮想的な世界(2カラーQCDの世界)での数値シミュレーションが可能である、という点が挙げられる。すなわち、2カラーQCDでは、陽子や中性子がそのまま観測量となるダイクォークとして振る舞うため、ダイクォークの有限密度系での性質変化を明白に調べることが可能となる。この利点に着目し本研究では、仮想的な2カラーQCDにおける有限密度系でのハドロン質量変化を調べた格子QCD計算グループと連携し、その数値シミュレーション結果を定性的に説明する有効理論の構築を行なった。そして、有限密度系でのダイクォーク質量変化とダイクォーク凝縮発現機構の関係性、更にはその他のハドロン質量変化に関する、カイラル対称性や軸性アノマリーの観点に基づいた知見を深めることに成功した。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Suenaga D. and Kitazawa M.: "Effective model for pure Yang-Mills theory on $T^2 \times R^2$ with Polyakov loops", Phys. Rev. D, submitted.
2. Suenaga D., Murakami K., Itou E. and Iida K.: "Probing hadron mass spectrum in dense two-

color QCD with linear sigma model", Phys. Rev. D, submitted.

●口頭発表 Oral Presentations

(学会)

1. Suenaga D. and Kitazawa M.: "Phase structure of pure Yang-Mills theory in an anisotropic system: A new extreme condition of QCD", The XVth Quark confinement and the Hadron spectrum conference, University of Stavanger, Norway, Aug.(2022)
2. Suenaga D. and Kitazawa M.: "Phase structure of pure Yang-Mills theory in an anisotropic system: A new extreme condition of QCD" The 9th International Conference on Quarks and Nuclear Physics QNP2022 - The 9th International Conference on Quarks and Nuclear Physics, online, Sep.(2022)
3. 末永大輝, 北沢正清: "QCDの新しい極限環境としての非等方ユークリッド空間", 日本物理学会2022年秋季大会, 岡山理科大学, 9月(2022)
4. 末永大輝, 村上耕太郎, 伊藤悦子: "線形シグマ模型を用いた2カラーQCD物質中のハドロン質量変化", 日本物理学会2022年秋季大会, 岡山理科大学, 9月(2022)
5. 末永大輝: "非等方空間におけるpure Yang-Mills理論の相構造: QCDの新しい極限環境としての非等方系", 基研研究会「熱場の量子論とその応用」, 京大基研, 9月(2022)
6. 末永大輝: "カイラル対称性とアノマリーに着目したペンタクォーク的ヘビーバリオンの性質", ELPH研究会C033「ハドロン分光に迫る反応と構造の物理」, 東北大学ELPH, 12月(2022)

XXII-012 超高空間分解能の赤外線観測と多波長観測による合体銀河が宇宙進化に果たした役割の解明

Role of Mergers in Evolution of Galaxies and Supermassive Black Holes Revealed with Ultrahigh-spatial-resolution Infrared and Multiwavelength Observations

研究者氏名: 山田 智史 Satoshi YAMADA

受入研究室: 開拓研究本部

榎戸極限自然現象理研白眉研究チーム

(所属長 榎戸 輝揚)

本研究課題は、宇宙に存在する銀河と、その中心に普遍的に存在する超巨大ブラックホールの両者の形成過程の解明が主な目的である。これらは単調に成長するのではなく、銀河同士の合体とそれに伴うブラックホールへの質量降着により急激に成長する。両者の進化過程を知るには、銀河の合体時に起きる物理現象を観測する必要があるが、ガスやダストに深く覆われて観測することが難しい。

そこで今年度は、84天体の合体銀河に対し、透過力の高いX線、ダスト吸収により再放射される赤外線、星間物質による電波放射などを考慮し、独自に開発した多波長放射モデルを用いて、波長毎の放射源を網羅的に調査した。その結果、合体段階が進んだ天体ほど両者の成長が活発であることを解明することに成功した。さらにはブラックホールからの強い放射により噴出する「アウトフロー」により、莫大な物質が銀河にまで還元される描像

を得た。現状の進捗は総じて順調であり、採択された科研費(スタート支援、早川幸男基金)も活用し、積極的に観測と理論の専門家との密な議論の元で観測/モデル開発/衛星開発を行い、論文執筆や学会発表を行った。

さらに次の段階として、アウトフローの多スケール構造の解明を目的とした研究の準備にも取り組んだ。アウトフローは合体末期において活発になることで、ブラックホールと銀河の両者に物理的な相互作用をもたらすと予想され、その影響を正しく理解することが近年の天文学における最重要課題の一つとされている。ブラックホール近傍は超高温な領域となり、アウトフローの高電離ガス成分がX線放射として検出できる。また、ブラックホールから遠ざかるにつれて、銀河の中心核領域からは電離ガスによる赤外線放射、銀河スケールでは低電離ガスによる可視光の放射が卓越する。アウトフローが噴出されてから銀河にまで伝播する物理を解明する上で、特にX線と赤外線で観測される中心部の強いアウトフローの定量的評価が必要とされてきた。そこで、来年度に打上げ予定のX線衛星XRISMの装置開発に携わりつつ、そのX線精密分光能力を活かしたアウトフローの運動量測定による新たな研究の準備を進めた。また、2024年度に稼働予定の東京大学アタカマ天文台(チリの世界最高標高5,640mに設置された6.5m望遠鏡)による高空間分解能赤外線観測の実施に向けて、望遠鏡の装置開発メンバーと共にサイエンス検討も行った。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Yamada S., Ueda Y., Herrera-Endoqui M., Toba Y., Miyaji T., Ogawa S., Uematsu R., Tanimoto A., Imanishi M., and Ricci C.: "Hard X-Ray to Radio Multiwavelength SED Analysis of Local U/LIRGs in GOALS Sample with Self-consistent AGN Model Including Polar-dust Component", The Astrophysical Journal Supplement, in print (2023)
2. Toba Y., Yamada S., Matsubayashi K., Terao K., Moriya A., Ueda Y., Ohta K., Hashiguchi A., Himoto K. G., Izumiura H., Joh K., Kato N., Koyama S., Maehara H., Misato R., Noboriguchi A., Ogawa S., Ota N., Shibata M., Tamada N., Yanagawa A., Yonekura N., Nagao T., Akiyama M., Kajisawa M., and Matsuoka Y.: "Optical IFU observations of GOALS sample with KOOLS-IFU on Seimei Telescope: Initial results of nine U/LIRGs at $z < 0.04$ ", Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 74, Issue 6 (2022)
3. Inaba K., Ueda Y., Yamada S., Ogawa S., Uematsu R., Tanimoto A., and Ricci C.: "Broadband X-Ray Spectral Analysis of the Dual AGN System Mrk

739", The Astrophysical Journal, Volume 939, Issue 2, id.88 (2022)

4. Tanimoto A., Ueda Y., Odaka H., Yamada S., and Ricci C.: "NuSTAR Observations of 52 Compton-thick Active Galactic Nuclei Selected by the Swift/Burst Alert Telescope All-sky Hard X-Ray Survey", The Astrophysical Journal Supplement Series, Volume 260, Issue 2, id.30 (2022)
5. Uematsu R., Ueda Y., Kohno K., Yamada S., Toba Y., Fujimoto S., Hatsukade B., Umehata H., Espada D., Sun F., Magdis G. E., Kokorev V., and Ao Y.: "ALMA Lensing Cluster Survey: Properties of Millimeter Galaxies Hosting X-ray Detected Active Galactic Nuclei", The Astrophysical Journal, in print (2023)
6. Noda H., Mineta T., Minezaki T., Sameshima H., Kokubo M., Kawamuro T., Yamada S., Horiuchi T., Matsumoto H., Watanabe M., Morihana K., Itoh Y., Kawabata K. S., and Fukazawa Y.: "Narrow Fe-K α Reverberation Mapping Unveils the Deactivated Broad-Line Region in a Changing-Look Active Galactic Nucleus", The Astrophysical Journal, Volume 943, Issue 1, id.63 (2023)

(その他)

1. 山田智史: "多波長観測で探る合体銀河中の銀河-ブラックホール共進化機構", 天文月報, vol. 116, No.1, p.5-14 (2022年12月20日発行)

●口頭発表 Oral Presentations

1. Yamada S.: "Comprehensive Multiwavelength Studies of Local U/LIRGs observed with NuSTAR and/or Swift/BAT", What drives the growth of black holes: a decade of reflection, Reykjavik, Iceland, Sep. (2022)
2. Yamada S.: "Latest Picture of Torus and Polar Dust in Merging Galaxies Revealed by Hard X-ray to Radio Multiwavelength Analysis", Torus 2022 Workshop Smoke and Mirrors, Leiden, the Netherlands, Dec.(2022)
3. Yamada S.: "Hard X-Ray to Radio Multiwavelength SED Analysis of Local U/LIRGs in GOALS Sample with Self-consistent AGN Model Including Polar-dust Component", Tracing the SMBH growth: outlook beyond the HSC-SSP, and future collaborations, Kagoshima University, Dec.(2022)
4. Yamada S.: "Hard X-ray to Radio Multiwavelength SED Analysis of Local U/LIRGs with Self-consistent AGN Model Including Polar-dust Component", The 9th Galaxy Evolution Workshop, Kyoto University, Feb.(2023)
5. Yamada S.: "Multiwavelength Study of Galaxy-Supermassive Black Hole Coevolution in Galaxy Mergers", ISAS Astrophysics Colloquia, JAXA, Jul. (2022)

6. Yamada S.: "Multiwavelength Study of Galaxy and Supermassive Black Hole Growth in Galaxy Mergers", Monthly Seminar, RIKEN, Aug.(2022)
7. 山田智史: "ポーラーダスト成分を含めたAGNモデルによる超/高光度赤外線銀河の多波長SED解析", AGNミニワークショップ, 鹿児島大学, 8月(2022)
8. 山田智史: "多波長観測による超/高光度赤外線銀河が持つX線で暗い活動銀河核の調査", 日本天文学会2022年秋季年会, 新潟大学, 9月(2022)

9. 山田智史: "ポーラーダストを考慮した多波長データ解析で探る合体銀河中の共進化過程", 日本天文学会2023年春季年会, 立教大学, 3月(2023)

●ポスター発表 Poster Presentations

1. 山田智史: "X線分光撮像衛星XRISMの観測データ処理ツールの開発状況", 日本天文学会2023年春季年会, 立教大学, 3月(2023)

XXII-013 銀河磁場モデルに基づく最高エネルギー宇宙線起源天体の特定

Search for UHECR sources considering the deflection by the galactic magnetic field

研究者氏名: 樋口 諒 Ryo HIGUCHI
 受入研究室: 開拓研究本部
 長瀧天体ビッグバン研究室
 (所属長 長瀧 重博)

10の20乗電子ボルトを超えるエネルギーを持つ宇宙線を最高エネルギー宇宙線(UHECR)と呼ぶ。UHECRの起源の観測的証拠は見つかっていない。北半球のテレスコープアレイ実験(TA 実験)・南半球のAuger 実験の両者の観測結果から、UHECRの到来方向分布の異方性(異方性)が報告されている。異方性はUHECR 起源天体の分布と相関すると考えられる。そのためUHECRの観測事象数を増やす事・得られた異方性の統計解析から起源天体の種族を同定する事がUHECRの起源の解明において重要となる。

近年のAuger 実験の最尤度推定では、地球近傍のスターバースト銀河(SBG)の分布の約10%が異方性に寄与していると報告されている(SBGモデル, Aab et al. 2018, ApJL, 853, L29)。一方宇宙線は起源から地球へ到達するまでの間に磁場の偏向を受ける。宇宙線の偏向の報告と角度は磁場構造と宇宙線の核種に依存する。そのため、宇宙線の起源の特定には磁場構造と質量組成(宇宙線のエネルギー毎の核種の存在比)をモデルとして仮定し解析を行う必要がある。

これまでの研究で報告者は従来の推定手法に銀河磁場モデルを導入し、従来の推定手法ではSBGの異方性への寄与が有意に低く見積もられてしまう事を示した。今年度報告者はSBG起源モデルと宇宙線の質量組成を仮定した上で、銀河磁場モデルを組み込んだ疑似データセットを生成した。生成されたデータセットに対して従来の解析手法を適用する事で、南半球における観測結果を再現し得るSBG起源モデルのパラメータ範囲を制限した。磁場による散乱角が小さい場合はSBGモデルで全てのUHECRを説明する事は難しい一方で、現在の観測イ

ベント数では広い領域において起源モデルが成立する事が示された。今後は南北両半球における観測イベント数の拡大と質量組成を加味した解析が重要となる。また、よりエネルギーの低く質量の大きい宇宙線は銀河磁場のランダム成分の影響をより大きく受けるため、これらの定量的な評価も課題となる。

以上の成果はThe Astrophysical Journalに投稿され(arXiv:2209.00305)、現在出版に向けて改訂中である。また、2つの国際学会・2つの国内学会において報告された。観測実験メンバーとしても報告者はTAx4実験の観測シフトにも関わる他・TA実験内部の会議・議論でも発信を行った。

●口頭発表 Oral Presentations

(学会)

1. Higuchi R, "Effects of galactic magnetic field on the UHECR correlation studies with starburst galaxies", THE GOLDEN UNIVERSE: Nuclear Astrophysics & Cosmic Rays in the Multimessenger Era, Quy Nhon, Vietnam, Jul. (2022)
2. 樋口 諒, 「TA 実験391: 最高エネルギー宇宙線の到来方向異方性と銀河磁場モデルによるスターバースト銀河起源モデルへの制限」, 日本物理学会2022年秋季年会, 岡山, 9月(2022)
3. 樋口 諒, 「最高エネルギー宇宙線起源探索における磁場モデル・質量組成モデルの影響」, 宇宙線で繋ぐ文明・地球環境・太陽系・銀河, 京都, 10月(2022)

●ポスター発表 Poster presentations

(学会)

1. Ryo Higuchi, "Estimation and reduction of the

XXII-014 中間相クラスターにおける陽電子束縛及び陽電子対消滅機構の第一原理理論予見

First-Principles Study for Predictions of Positron Binding and Positron Annihilation Mechanisms for Intermediate Phase Clusters

研究者氏名：吉田 大輔 Daisuke YOSHIDA
受入研究室：仁科加速器科学研究センター
ストレンジネス核物理研究室
(所属長 肥山 詠美子)

電子の反粒子である陽電子は、物質固有の物性を非破壊的に識別するためのプローブとして用いられている。近年では、分子の多様な構造異性体や同位体を同定するためのプローブとしての可能性が示唆されている。本研究では、単分子や原子・分子クラスター等の中間サイズ物質における陽電子束縛状態に対するSchrödinger方程式を精密に解くための第一原理計算手法の開発を行なった。また、水素結合分子クラスターの陽電子親和力および陽電子対消滅率を理論的に予測し、水素結合固有の物性化学特性と陽電子特性の関係性を明らかにした。

水、ハロゲン化水素、アンモニアのような分子は陽電子捕獲に有利である双極子モーメントを持つ極性分子であるが、準安定な陽電子束縛状態を作れない・あるいは束縛エネルギーが非常に小さいことが実験的に知られている。これら分子種がクラスター構造を形成することにより陽電子がどのように捕獲されるかという問題を解明することは、液相や気相の微視的構造における陽電子の相互作用を理解するうえでも重要である。これら分子種および重原子置換分子を含めた約20種類の水素結合クラスターの陽電子束縛エネルギーの計算を行い、全ての系が陽電子捕獲能を持つことを明らかにした。さらに系統的に解析することにより、それらの対消滅率が、プロトンドナー・アクセプタ分子のそれぞれの電子特性と強く結びついていることを発見した。特に、水素結合形成によ

り誘起する分子間の電荷移動あるいは長距離分極と、分子内プロトンの遮蔽効果が極めて重要な機構であることを解明した。

今後さらに信頼性のある理論予見を行うために、少数多体系の厳密な変分計算手法の拡張・開発を行ってきた。特に、精密な相関波動関数を記述する方法の1つであるExplicitly-correlated Gaussian法を用いて、粒子数任意な大規模変分計算コードを実装することで、原子核や原子分子のエキゾチック粒子系の多体問題に関する高精度第一原理計算を実現する。

●誌上发表 Publications

(原著論文)

1. Yoshida, D., Kita Y., Shimazaki T. and Tachikawa T.: "A comprehensive theoretical study of positron binding and annihilation properties of hydrogen bonded binary molecular clusters", *Phys. Chem. Chem. Phys.* 24, 26898-26907 (2022).

●口頭発表 Oral Presentations

(学会)

1. 吉田大輔, 北幸海, 島崎智実, 立川仁典: "2成分水素結合クラスターにおける陽電子束縛及び対消滅機構に関する理論研究", 第24回理論化学討論会, 金沢市, 5月 (2022).

XXII-015 ノックアウト反応で見る原子核の中の原子核 Knockout Reactions to See a Nucleus in Nuclei

研究者氏名：茶園 亮樹 Yoshiki CHAZONO
受入研究室：仁科加速器科学研究センター
スピン・アイソスピン研究室
(所属長 上坂 友洋)

原子核に対しては、陽子と中性子(合わせて核子)がその内部をほぼ独立に運動しているという描像が良く成り立つ。その一方で、数個の核子が集まってクラスターという塊を形成し得ることも知られている。このクラスターの存在を実験的に観測する手法の一つとして、高速の陽子で核内からクラスターを叩き出すノックアウト反応が挙げられる。ノックアウト反応の利点は、適切な条件の下で観測を行うことで、反応全体を入射した陽子とクラスターの衝突と見なして理論的に記述できる点であり、これにより、他のプローブよりも小さい不定性で核内でのクラスターの状態を調査することができる。本年度、本研究では、クラスターの候補の一つである「重陽子クラスター」をプローブする為に、このノックアウト反応を記述する理論モデルの開発・改良を行った。

「重陽子クラスター」の面白さは、他のクラスター(候補)と比較して脆いと予想されることにある。その脆さ故に、入射陽子との衝突により、構成要素である陽子と中性子に壊れてしまう可能性が十分考えられる。また、「重陽子クラスター」が叩き出された後の原子核との相互作用(FSI)により、再び重陽子を形成することも量子力学的にはあり得る。これらの過程は、ノックアウト反応を記述する既存の標準的なモデル(DWIA)では扱うことができない。本研究では、入射陽子と衝突するのは、「重陽子クラスター」そのものではなく、それを構成する陽子または中性子であると考え、前者の過程をモデルに組み込んだ。また、FSIによる遷移を定量的に扱うことに長けた手法(CDCC)を採用することで、後者の過程を組み込んだ。これにより、「重陽子クラスター」のような脆いクラスターが関与するノックアウト反応を記述する下地ができた。加えて、開発したモデルを用いて数値計算を行った結果、計算で得られるノックアウト反応の断面積が、既存のモデルを用いて得られるものから有意に変化することを明らかにした。興味深い点としては、陽子を入射する原子核の種類によって、断面積の変化が増大と減少のどちら

も見られることである。この現象の系統的な調査と原因の追及は、来年度中に行う。

来年度以降は、反応モデルの改良を進める。現時点では、モデルの適用範囲には、反応のエネルギーや扱える「重陽子クラスター」の状態に強い制限がある。これらを緩和・撤廃し、より汎用性のあるモデルへと改良していく。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Chazono Yoshiki, Yoshida Kazuki, and Ogata Kazuyuki, "Importance of deuteron breakup in the deuteron breakup reaction", *Physical Review C* 106, 064613, (2022)*

●口頭発表 Oral Presentations

(国内)

1. 茶園亮樹・吉田数貴・緒方一介, 「重陽子ノックアウト反応の断面積と重陽子の脆さ」, RCNP研究会「原子核反応研究の最近の話題と展望」, 大阪大学核物理研究センター, 2022年7月
2. 茶園亮樹・吉田数貴・緒方一介, 「核内重陽子を実証する新しい反応モデル」, おのころ戸隠夏合宿, JA長野県ビル, 2022年7月, 世話人
3. 茶園亮樹・吉田数貴・緒方一介, 「重陽子の脆さに対する重陽子ノックアウト反応断面積の応答」, 日本物理学会2022年秋季大会, 岡山理科大, 2022年9月
4. 茶園亮樹・吉田数貴・緒方一介, 「核内核子対のプローブとしてのノックアウト反応」, RCNP研究会「微視的系と巨視的系における核子対凝縮相」, 大阪大学核物理研究センター, 2022年9月

(国際)

1. Chazono Yoshiki, Yoshida Kazuki, and Ogata Kazuyuki, "Importance of the breakup state of deuteron in the deuteron knockout reaction", *Mean-field and Cluster Dynamics in Nuclear System 2022*, Kyoto University, May – June (2022).

XXII-016 精密測定による少数系ハイパー核問題の解決

Solving the puzzles of few-body hypernuclear systems by precise measurements

研究者氏名：中川 真菜美 Manami NAKAGAWA

受入研究室：開拓研究本部

齋藤高エネルギー原子核研究室

(所属長 齋藤 武彦)

$^3\Lambda\text{H}$ はハイパー核のベンチマークとして長年様々なハイパー核理論計算の基準とされてきたが、近年その寿命及び束縛エネルギーが従来の理解と異なる結果が報告されてきており、その精密測定が求められている。本研究課題は、このような少数系ハイパー核の(1)寿命及び(2)束縛エネルギーを精密に測定することで、ハイパー核の理解を深めることである。

(1)ドイツGSIにて、かねてより準備を進めてきた $^3\Lambda\text{H}$ の寿命測定実験であるWASA-FRS実験を2022年1-3月にかけて遂行した。データ取得は無事完了したため、そのデータを解析中である。

(2)束縛エネルギー測定については、すでに原子核乾板にビーム照射実験を行い、その乾板を所有しているため、乾板内からハイパー核事象の探索を進めている。乾板画像内から事象を検出するために機械学習モデルの開発を行った。現状の統計量での $^3\Lambda\text{H}$ 及び $^4\Lambda\text{H}$ の束縛エネルギーの結果をまとめているところである。国際会議にて原子核乾板解析について口頭発表を行った。加えて、応用物理学会にて、放射線分野の機械学習利用について招待講演を行い、この内容に関して分科会誌の記事を投稿した。また、 $^4\Lambda\text{H}$ を含む他ハイパー核事象検出するための機械学習モデルの開発も進めている。現状でも世界最高レベルの束縛エネルギー決定精度が見込めるが、今後のハイパー核束縛エネルギーの精密測定のレベルをさらに向上させるため、新たな原子核乾板の開発を名古屋大学の協力を得つつ始めた。本

研究は自らが主体になって立案し、その実験計画について名古屋大学でのセミナーを行った。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Nakagawa M, Kasagi A, Liu E, et al., “Unique approach for precise determination of binding energies of hypernuclei with nuclear emulsion and machine learning”, EPJ Web of Conferences 271, 11006 (2022)*

(その他)

1. 中川 真菜美, “ハイパー核探索のための機械学習手法の開発と応用”, 応用物理学会放射線分科会誌「放射線」, Vol.47-4, (2022), 依頼原稿

●口頭発表 Oral Presentations

(学会)

1. 中川 真菜美, “ハイパー核探索のための機械学習手法の開発と応用”, 第69回応用物理学会春季学術講演会, 3/22-3/26, 青山学院大学 相模原キャンパス, 招待講演
2. Nakagawa M, Kasagi A, Liu E, et al., “Unique approach for precise determination of binding energies of hypernuclei with nuclear emulsion and machine learning”, HYP2022 - 14th International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics, Prague, Czech Republic, 6/27 - 7/1(2022).
3. 中川真菜美, “原子核乾板を用いたハイパー核質量の精密測定”, 名古屋大学F研セミナー(2022).

XXII-017 磁性絶縁体における3次元トポロジカル磁気秩序の探索

Search for a three-dimensional topological magnetic order in magnetic insulators

研究者氏名：巖 正輝 Zhenghui YAN

受入研究室：創発物性科学研究センター
強相関量子構造研究チーム
(所属長 有馬 孝尚)

スキルミオン格子やヘッジホッグ格子などのトポロジカルな磁気構造は、三角格子や正方格子、立方格子といった高対称な結晶構造を有する物質で数多く発見されてきた。また、螺旋磁気構造の発現には空間反転対称性の破れ、もしくは磁気フラストレーションの存在が必須である。このような観点から、大小2種類の正四面体の3次元ネットワークであるブリージングパイロクロア格子が、3次元トポロジカル磁気秩序探索の舞台として有力であると考えられる。一方で、スキルミオン相の発現には必ずしも高対称な結晶構造が必要というわけではない。その実証例として、正方格子遍歴磁性体 EuAl_4 においてc軸に磁場を印加すると、正方格子スキルミオン相に加えて4回回転対称性が破れた菱形スキルミオン相を発現することが昨年報告された。 EuAl_4 では、ゼロ磁場・低温で正方晶-直方晶の構造相転移が起きることから、磁場中でも有限の直方晶歪みが残っており、磁気構造の回転対称性の破れと密接に関連している可能性がある。したがって、低対称スキルミオン相が発現するメカニズムの解明は、当該分野において非常に重要な課題である。以上を踏まえ、本年度は(1)トポロジカルな磁気秩序を実現するフラストレート磁性絶縁体の探索、および(2)結晶格子歪みとスキルミオンの回転対称性の破れの関連性の2点をテーマに、研究を遂行した。

(1) ブリージングパイロクロア格子物質 $\text{CuInCr}_4\text{S}_8$ において、強磁場下においてスキルミオン相の発現を彷彿とさせる特徴的な温度-磁場相図を示すことを発見した。そこで、磁場誘起相の正体解明を目指して、単結晶育成と結晶構造解析に基づく試料評価、ゼロ磁場下での中性子散乱実験などを行なった。その結果、現状得られている単結晶はわずかな組成ずれが生じており、磁気構造やマクロ物性に多大な影響を及ぼしていることが明らかになった。一方で、類縁物質 $\text{CuGaCr}_4\text{S}_8$ の合成と強磁場下でのマクロ物性測定を行い、本物質が $\text{CuInCr}_4\text{S}_8$ と同様の有効磁気モデルで記述でき、かつ $\text{CuInCr}_4\text{S}_8$ の温度-磁場相図と部分的に類似した相図を示すことを明らかにした。

(2) 定常磁場下におけるファイバー・ブラッグ・グレーティング法による熱膨張・磁歪測定プローブを作製し、多軸歪み同時測定技術を確立した。この手法を用いて、

EuAl_4 の磁場中での直方晶歪みを詳細に調べ、菱形スキルミオン相や正方格子スキルミオン相においてそれぞれ0.1%と0.03%の直方晶歪みが存在していることを明らかにした。さらに、共鳴X線散乱実験によって直方晶歪みと磁気変調の対応関係を微視的に明らかにした。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Gen M. and Suwa H.: "Nematicity and fractional magnetization plateaus induced by spin-lattice coupling in the classical kagome-lattice Heisenberg antiferromagnet", *Physical Review B* 105, 174424 (2022)*
2. Gen M., Miyake A., Yagiuchi H., Watanabe Y., Ikeda A., Matsuda Y., Tokunaga M., Arima T., and Tokunaga Y.: "Enhancement of giant magnetoelectric effect in Ni-doped $\text{CaBaCo}_4\text{O}_7$ ", *Physical Review B* 105, 214412 (2022)*
3. Gen M., Ishikawa H., Ikeda A., Miyake A., Yang Z., Okamoto Y., Takenaka K., Sagayama H., Kurumaji T., Tokunaga Y., Arima T., Tokunaga M., Kindo K., Matsuda Y., and Kohama Y.: "Complex magnetic phase diagram with a small phase pocket in a three-dimensional frustrated magnet $\text{CuInCr}_4\text{S}_8$ ", *Physical Review Research* 4, 033148 (2022)*
4. Gen M., Takagi R., Watanabe Y., Kitou S., Sagayama H., Matsuyama N., Kohama Y., Ikeda A., Ōnuki Y., Kurumaji T., Arima T., and Seki S.: "Rhombic skyrmion lattice coupled with orthorhombic structural distortion in EuAl_4 ", *Physical Review B* in print.*

●口頭発表 Oral Presentation

(学会)

1. 巖正輝, 高木里奈, 渡辺 義人, 松山 直史, 小濱 芳允, 池田 暁彦, 車地 崇, 有馬 孝尚, 関 真一郎: "遍歴磁性体 EuAl_4 の磁気スキルミオン相における直方格子歪み", 日本物理学会秋季大会, 東京工業大学, 9月(2022)
2. 巖正輝: "ブリージングパイロクロア磁性体 $\text{CuInCr}_4\text{S}_8$ における強磁場誘起有限温度相の発現とその正体解明に向けて", 強磁場科学研究会, 東北大学金属材料研究所, 11月(2022)
3. 巖正輝: "ブリージングパイロクロア格子上で実現する多彩な磁気物性", 産業貿易センタービル, 12月(2022)
4. 巖正輝, 高木里奈, 鬼頭俊介, 佐賀山基, 関真一郎, 有

馬孝尚:"共鳴X線磁気散乱実験によるスキルミオンホスト物質EuAl₄の直方晶歪みと磁気構造の同時観測", 日本物理学会春季大会, オンライン, 3月(2023)

5. 巖正輝, 石川孟, 三宅厚志, 矢島健, Jeschke H. O., 佐賀山基, 池田暁彦, 松田康弘, 金道浩一, 徳永将史, 小濱芳允, 車地崇, 徳永祐介, 有馬孝尚:"新規ブリーディングパイロクロア格子磁性体CuGaCr₄S₈の構造および磁気物性", 日本物理学会春季大会, オンライン, 3月(2023)

●ポスター発表 Poster presentations

(学会)

1. Gen M., Ishikawa H., Ikeda A., Miyake A., Yang Z., Okamoto Y., Mori M., Takenaka K., Sagayama H., Kurumaji T., Tokunaga Y., Arima T., Tokunaga M., Kindo K., Matsuda H., and Kohama Y.: "Diverse magnetic phase diagrams in breathing pyrochlore chromium spinel sulfides", The 29th International Conference on Low Temperature Physics (LT29), Sapporo, Japan, Aug.(2022)

XXII-018 Two-Dimensional van der Waals Magnetic Heterostructure Devices for Future Spintronic Applications

Name: Maximilian Thomas BIRCH

Host Laboratory: Strong Correlation Quantum Transport Research Team
RIKEN Center for Emergent Matter Science

Laboratory Head: Yoshinori TOKURA

Following the isolation of monolayer graphite – graphene – in 2004, there has been a huge interest in the research of two dimensional (2D) materials. The family of these materials now includes a wide range of archetypes, from insulators to metals, or topological insulators and superconductors. However, it is only since 2017 that single layers of 2D magnets have been observed, in the form of monolayer Cr₂Ge₂Te₆ and CrI₃. Now, a wide range of 2D magnets have been discovered, with Curie temperatures approaching 300 K. These developments open up a large range of possibilities for integrating 2D magnets into spintronic applications.

So far, the imaging of magnetic spin textures in single to few layer 2D magnets has proved challenging. This year, I have utilised soft x-ray microscopy techniques to image the magnetic textures in exfoliated flakes of the van der Waals magnet Fe₃GeTe₂ (FGT). This material has been found to possess monochiral magnetic skyrmions. Using the imaging experiments we successfully determined the magnetic phase diagram for the first time, and shed light on the primary stabilisation mechanism of these states [1].

With this basic characterisation completed, we proceeded to attempt fabrication of device-like heterostructures. In one case, when stacking exfoliated hBN and graphite layers in combination with FGT, we discovered a manner to nucleate single skyrmions with single nanosecond current pulses via a vertical nanocontact through the material stack [2]. Detailed analysis revealed that this nucleation process was primarily thermally activated.

While performing other imaging experiments, we

discovered the possibility to form skyrmionium states when zero-field cooling flakes of FGT. Upon further investigation, we determined that using this specific temperature and magnetic field history, it was possible to stabilise a wide range of composite skyrmion states with varying topological configurations, including skyrmion bags and skyrmion sacks [3]. The general nature of the formation mechanism strongly suggests that such structures should be realisable in a wide range of materials, indicating they may have been overlooked in well-known systems.

Alongside this work on 2D magnets, I have performed x-ray microscopy studies of traditional skyrmion hosts: the bulk chiral magnets. My studies in this area have mainly focused on the study of three dimensional topological spin textures, such as extended magnetic skyrmion strings. Here, we utilised current pulses to demonstrate the possibility to manipulate the length of the hosted skyrmion strings [4]. In the future, the exploration of topological magnetic structures in 3D may prove to be an interesting direction.

● Publication

Original Paper

1. Birch M. T., Powalla, L., et al.: History-dependent domain and skyrmion formation in 2D van der Waals magnet Fe₃GeTe₂. *Nature Communications* 13, 3035 (2022). published*
2. Powalla L., Birch M. T., et al.: Single Skyrmion Generation via a Vertical Nanocontact in a 2D Magnet-Based Heterostructure. *Nano Letters* 22, 9236-9243 (2022). published*
3. Powalla L., Birch M. T., et al.: Seeding and

Emergence of Composite Skyrmions in a van der Waals Magnet. *Advanced Materials* (2023). accepted*

4. Birch M. T., et al.: Toggle-like current-induced Bloch point dynamics of 3D skyrmion strings in a room-temperature nanowire. *Nature Communications* 13, 3630 (2022). published*

● Oral Presentation

Conference

1. Birch M. T., et al.: "Toggle-like current-induced Bloch point dynamics of 3D skyrmion strings in a room temperature nanowire" Sol-SkyMag, San Sebastian, Spain. June (2021).

XXII-019 量子多体ダイナミクスの効率的な量子計算アルゴリズムの開拓

Simulating quantum many-body dynamics with quantum computers

研究者氏名：水田 郁 Kaoru MIZUTA

受入研究室：量子コンピュータ研究センター

量子計算理論研究チーム

(所属長 藤井 啓祐)

量子計算において量子多体系の時間発展を再現する量子回路を構築することは、量子ダイナミクスのシミュレートや量子系のエネルギー計算など、物性物理・量子化学に幅広い応用を持つ最も重要な課題の一つである。本研究では、中長期の量子コンピュータにおいて量子多体ダイナミクスを効率的に計算するアルゴリズムの定式化を行った。

(1) 局所変分量子コンパイルアルゴリズムの構築：

量子多体系で情報の伝播速度を与える理論である Lieb-Robinson 限界と変分量子アルゴリズムを組み合わせることで、効率よく量子多体系をシミュレートする量子回路の設計法を確立した。従来法と異なり、小さな量子デバイスでの最適化によって大規模な量子系のための量子回路を構築できる。また、Lieb-Robinson 限界は有限距離、短距離、一部の長距離相互作用を持つ様々な量子系で存在することがわかっていることから、それのみに依拠した我々の手法は、物性物理等の広範な系に適用可能である。本成果は、中長期の量子コンピュータの物性物理・量子化学への応用を加速するものと期待される。

(2) 時間周期的な量子系の最適なシミュレーションアルゴリズムの構築：

時間周期系を解析する Floquet 理論と量子固有値変換と呼ばれる行列多項式を実装する量子アルゴリズムを組み合わせ、時間周期的な量子系の時間発展を再現する量子回路の最適な構築法を明らかにした。時間変化する系の時間発展はその表式の複雑さにより効率と精度を担保しつつ量子コンピュータでの実装は困難であった。我々はまず、Floquet 理論や Lieb-Robinson 限界など量子

多体系の理論的枠組みによって、時間発展を精度よく再現できる簡潔な表式を導いた。そしてそれを量子アルゴリズムによって最適な効率でシミュレートすることで、時間依存する量子多体系を時刻・要求精度について理論限界に近い効率で計算できることを明らかにした。時間結晶や光を照射した物質など物性物理・量子化学における重要な非平衡現象に対して、量子コンピュータによってアプローチする手法を与えている。

●誌上发表 Publications

(原著論文)

1. Kaoru Mizuta, Yuya O. Nakagawa, Kosuke Mitarai, Keisuke Fujii : "Local Variational Quantum Compilation of Large-Scale Hamiltonian Dynamics", PRX Quantum, 3 040302 (2022)

●口頭発表 Oral Presentations

1. 水田 郁, 中川 裕也, 御手洗 光祐, 藤井 啓祐, "量子多体ダイナミクスに対する局所量子コンパイル", 第46回 量子情報技術研究会 (QIT46), オンライン開催, 2022年5月
2. 水田 郁, 中川 裕也, 御手洗 光祐, 藤井 啓祐, "量子多体ダイナミクスに対する局所変分量子コンパイル", 日本物理学会 2022年秋季大会, 東京工業大学, 2022年9月
3. 水田 郁, 藤井 啓祐 : "時間周期ハミルトニアン of 最適準最適な量子シミュレーション", 基研研究会「熱場の量子論とその応用」, 京都大学, 2022年9月
4. Kaoru Mizuta, Keisuke Fujii : "Optimal and nearly-optimal quantum simulation of time-periodic systems", YITP workshop "Quantum extreme universe from quantum information", Kyoto University, September 2022

XXII-020 量子計算機を制御する超伝導量子インターフェース回路 Superconducting Quantum Interface Circuits For Control To Quantum Processors

研究者氏名：向井 寛人 Hiroto MUKAI
受入研究室：量子コンピュータ研究センター
超伝導量子シミュレーション研究チーム
(所属長 蔡 兆申)

量子コンピュータは近年多くの注目を集め大きく進歩している分野の一つです。その中でも超伝導体を用いたマイクロ波回路は広く用いられ最も量子コンピュータの実現に近いプラットフォームの一つとなっています。

超伝導量子回路からなる量子コンピュータの基本構成単位の超伝導量子ビットは希釈冷凍機と呼ばれる装置の中で10 mKという非常に極低温で動作させる必要があります。一方で、その量子状態の求められる精密な観測・制御のために室温から極低温までマイクロ波の配線が必要となります。既存の研究では少数の量子ビットの操作であったため、個別配線による冷凍機への影響は小さく抑えられていました。しかし、実用的な量子コンピュータには多くの量子ビットを集積することが求められ、それに伴う配線の影響は大きくなり冷却能力を超えてしまいます。

本研究ではこれまでの超伝導量子ビット制御を活かしながらも、配線数を削減できるインターフェースを開発しています。具体的には、本年度はインターフェースとなる超伝導マルチプレクサーの回路構築と、量子ビットを使用した量子スイッチの応用を研究し、その周辺技術についても研究を実施しました。

量子マルチプレクサーの基本要素である量子スイッチについて、超伝導量子回路の解析や実際のマイクロ波回路の設計、製造などを共同研究者も交えて実施しました。この素子の実験は進行中で、理想的には、量子重ね合わせを生成し、直接結合の無い量子ビット間にゲート操作

をかける事ができると期待しています。

次に、超伝導マルチプレクサーについて、時間領域で量子ビット間へのドライブパルスを切り替える、マイクロ波スイッチング回路を考案しました。また周波数領域における分配器として、超伝導体を用いた可変なバンドパスフィルタ (BPF) を使用し、周波数多重にしたマイクロ波パルスを、BPF を使用して分配し各量子ビットに届けるマルチプレクサーを提案し、こちらも実験を行っています。

最後に本テーマの適応先である超伝導量子ビットチップの開発も行いました。基幹要素であるジョセフソン接合蒸着装置の導入及び立上げを実施しました。また、マルチ量子ビットチップについても設計、作成、評価を実施し問題なく最低限の動作することを確かめました。

このようにテーマの研究だけでなく適宜必要となる技術を開発し、研究課題を遂行しています。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Gopika Lakshmi Bhai, Hiroto Mukai, Tsuyoshi Yamamoto, and Jaw-Shen Tsai: "Noise properties of a Josephson parametric oscillator", *Physical Review Applied*, accepted 8 Dec. 2022
2. Gopika Lakshmi Bhai, Hiroto Mukai, and Jaw-Shen Tsai: "Mitigation of noise in Josephson parametric oscillator by injection locking" *Applied Physics Letter*, accepted 17 Jan. 2023

XXII-021 散逸・ゆらぎに起因した非線形応答の理論構築及び探索 Analysis of nonlinear responses induced by dissipation and fluctuation

研究者氏名：道下 佳寛 Yoshihiro MICHISHITA
受入研究室：創発物性科学研究センター
強相関理論研究グループ
(所属長 永長 直人)

実験において、臨界領域で大きな非線形応答が見られている一方で、臨界領域や散逸の効果を加味した理論体形は乏しい。本課題では、散逸・ゆらぎに起因した非線形応答の理論を構築し、実用可能な大きさの非線形応答の実現を目指すことを目的としている。

本年度は、Markov的な散逸の効果をfullに考えるため、Green関数法から出発し、band-indexによる表現を用いる事で散逸に由来した幾何学項を同定することに成功した。特に、縦の非相反伝導が、ベリー曲率を高次の微分項に拡張した“一般化ベリー曲率”によって表せる

事を示した。またワイル半金属においてその分散のタイプによって、非線形ホール伝導度の化学ポテンシャル依存性が大きく異なり、特に type-2 のワイル半金属においては化学ポテンシャルがワイル点上にかかる際に log 発散的な振る舞いを見せる事が分かった。(もちろん散逸によって有限の bound を持つ。)

更に、非線形光学伝導度を(光に対して非摂動的に)解析するために、光の周波数と系のギャップが同じスケールである共鳴領域におけるフロケ理論における解析手法を構築するために、機械学習を援用して適切な回転基底を構築する事を試みた。結果として、共鳴領域においては、機械学習を用いても(人間が解析できるような簡単かつ)適切な回転基底を見つける事は出来なかったが、高周波領域においては機械学習を援用した(人間が解析しやすい)適切な基底の探索に成功した。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Michishita Y., and Nagaosa N., : “Dissipation and geometry in nonlinear quantum transports of multiband electron systems”, Physical Review B, 106.125114(2022)
2. Michishita Y.,: “Machine-learning-assisted

construction of appropriate rotating frame”, submitted (arXiv:2211.15269(2022))

●口頭発表 Oral Presentations

(学会)

1. Michishita Y.,: “Machine-learning-assisted construction of appropriate rotating frame”, NQS2022, Kyoto, Japan Nov. (2022)

(セミナー講演)

2. 道下佳寛 : 「強相関電子系と非エルミート物性」, 813rd ASRC Seminar, 茨城県東海村, 4月(2022)
3. 道下佳寛 : 「"非〇〇"物理学入門」, 中央大学素粒子オンラインセミナー, online, 6-7月(2022)
4. 道下佳寛 : 「機械学習を援用した適切なフレームの探索」, DeepLearning&Physics online seminar, 1月(2023)

●ポスター発表 Poster Presentation

1. Michishita Y., and Nagaosa N., : “Dissipation-induced geometric term in nonlinear conductivity”, LT29, Sapporo, July(2022)
2. Michishita Y.: “Machine-learning-assisted construction of appropriate rotating frame”, NQS2022, Kyoto, Japan Nov. (2022)

XXII-022 フラストレート格子上的トポロジカル物性

Topological Phases on Geometrically Frustrated Lattices

研究者氏名 : 村山 陽奈子 Hinako MURAYAMA
受入研究室 : 創発物性科学研究センター
強相関物性研究グループ
(所属長 十倉 好紀)

カゴメ格子やハニカム格子などのフラストレート格子と呼ばれる構造を持ついくつかの磁性絶縁体では、量子スピン液体など、トポロジカルに非自明な基底状態や準粒子励起が知られている。近年では、フラストレート格子をもつ遍歴電子系も盛んに研究され、多くのトポロジカル電子構造や磁気構造が発見されており、そのような格子構造は新しいトポロジカル物性を探索するプラットフォームになると考えられている。そこで本研究では、フラストレート格子の一つである Shastry-Sutherland 格子に着目した。この格子構造は磁性絶縁体としてよく研究されてきたモデルで、相互作用の大きさ次第ではダイマー状態を基底状態にもつことが知られている。一方で、この格子上的遍歴電子系についての研究はそれほど進んでおらず、他の格子構造とは本質的に異なる物性を有する可

能性がある。とくに、フラストレート格子構造に由来した磁気構造や、結晶対称性によるトポロジカルバンド構造が期待できる。そこで本年度は、Shastry-Sutherland 格子をもつ物質の一つとして Gd_2Cu_2In の合成に取り組み、フラックス法を用いた単結晶試料合成方法を確立した。今後は合成した試料を用いて輸送測定を行うほか、元素置換をした物質の合成にも取り組み、フェルミ準位や磁気構造を制御する。さらに、カゴメ格子をもつ量子スピン液体候補物質について前年度から行ってきた研究をまとめ、論文として発表し、国際会議でのポスター発表を行った。また、今年度はレーザーフローティングゾーン法での $Nd_{2-x}Ce_xCuO_4$ の単結晶試料も行った。この物質は銅酸化物高温超伝導体の一つで、電子ドープ系の代表的な物質である。今後は合成した試料を用いて、熱輸

送測定や圧力下での輸送測定を行い、超伝導機構や超伝導相付近に現れる擬ギャップ状態の理解を進める。ほかにも、前年度から続けてきたイリジウム酸化物についての研究をまとめ、総説として発表した。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. H. Murayama, T. Tominaga, T. Asaba, A. de Oliveira Silva, Y. Sato, H. Suzuki, Y. Ukai, S. Suetsugu, Y. Kasahara, R. Okuma, I. Kimchi, and Y. Matsuda, "Universal scaling of specific heat in the $S = 1/2$ quantum kagome antiferromagnet herbertsmithite", *Phys. Rev. B*, 106 174406 (2022).*

(総説)

1. 村山陽奈子, 笠原成, 松田祐司: "スピン軌道モット絶縁体 $\text{Sr}_2\text{Ir}_{1-x}\text{Rh}_x\text{O}_4$ におけるアナポール秩序", *固体物理*, 57 37-46 (2022).*

●ポスター発表 Poster Presentations

1. H. Murayama, T. Tominaga, T. Asaba, A. de Oliveira Silva, Y. Sato, H. Suzuki, Y. Ukai, S. Suetsugu, Y. Kasahara, R. Okuma, I. Kimchi, and Y. Matsuda, "Universal scaling of specific heat in the $S = 1/2$ quantum kagome antiferromagnet herbertsmithite", 29th International Conference on Low Temperature Physics, Sapporo, Aug (2022).

XXII-023 Direct detection of emergent electromagnetic inductance via real-space electron phase measurement.

Name: Fehmi Sami YASIN

Host Laboratory: Electronic States Microscopy Research Team
RIKEN Center for Emergent Matter Science
Laboratory Head: Xiuzhen YU

Emergent electromagnetic induction based on electrodynamics of noncollinear magnetic spin states has seen a surge of interest as it may enable miniaturization of inductor elements used in electric circuits. Theory predicts that an AC current flow drives a time-dependent deformation of the helical magnetic spins (modulation \mathbf{q} vector parallel to current direction, $\mathbf{j} \parallel \mathbf{q}$). This deformation is a spin tilt towards and relaxation away from the \mathbf{j} direction, oscillating with AC current amplitude. Spin translation or \mathbf{q} vector rotation may also be an origin of emergent electromagnetic induction.

This year, I studied the electric current-driven deformation of magnetic skyrmions and helimagnetic domain walls using a DC current. While an emergent electromagnetic inductance cannot be generated with a DC current, the same spin deformations may still be measured and identified. Magnetic skyrmions in $\text{Co}_{10}\text{Zn}_{10}$ are typically thought of as being rigid, circular discs that flow through magnets above some critical depinning threshold current. Using DC current in tandem with Lorentz transmission electron microscopy (LTEM), I found that the skyrmions readily deform under electric current application into an elliptical shape with an increased average distortion of up to 90% when compared with their intrinsic shape. Additionally, I demonstrated an average skyrmion core size increase of up to 120%, confirming its robust topological protection against

annihilation.

In another helimagnet with composition $\text{Co}_8\text{Zn}_6\text{Mn}_3$, I used the same experimental setup to measure the deformation of the magnetic helices' domain walls in LTEM. I found that the domain walls show a deformation consistent with helical spin tilts towards the electric current axis while the current density is lower than the helical depinning density. In order to confirm that all of the helices' spins tilt under electric current application, I recently measured the helices deformation using differential phase contrast (DPC) scanning transmission electron microscopy (STEM), which is sensitive to a unidirectional spin tilt (i.e. a uniform increase in an in-plane magnetic field) and am processing the data. We will also install a new experimental design within STEM capable of detecting real-space spin deformations while isolating the aforementioned spin tilt signal from both translation and rotation signals. Real-space detection of the spin dynamics responsible for the emergent electromagnetic induction would reveal the fundamental electromagnetic induction mechanism, which may guide new device engineering design and allow for tunability or control of the inductance value.

● Publications

Papers

1. Yasin, F. S., Masell, J., Karube, K., Kikkawa, A., Taguchi, Y., Tokura, Y., Yu, X. Z.: Real-

space determination of the isolated magnetic skyrmion deformation under electric current flow., *Proceedings of the National Academy of Sciences* 119, 41, e2200958119 (2022).

● Oral Presentations

Conferences

1. Yasin, F. S., Masell, J., Karube, K., Kikkawa, A., Taguchi, Y., Tokura, Y., Yu, X. Z. "Current-driven deformation of isolated magnetic skyrmions." Joint MMM-INTERMAG, New Orleans, LA, USA, 2022, Jan. 10-14.
2. Yasin, F. S., Masell, J., Karube, K., Kikkawa, A.,

Taguchi, Y., Tokura, Y., Yu, X. Z. "Real space demonstration of electric current-induced isolated skyrmion deformation." *Microscopy and Microanalysis Annual Meeting*, Portland, OR, USA, 2022, Jul. 31 - Aug. 4.

● Poster Presentations

Conferences

1. Yasin, F. S., Masell, J., Karube, K., Shindo, D., Taguchi, Y., Tokura, Y., Yu, X. Z. "Topological transformation of magnetic skyrmions via thermal current." *International Conference on Low Temperature Physics*, Sapporo, JP, 2022, Aug. 18-24.

XXII-024 二重特異性メタロペプチドによる触媒活性制御

Catalytic Activity Regulation System with a Bispecific Metallopeptide

研究者氏名：六車 共平 Kyohei MUGURUMA
受入研究室：開拓研究本部
田中生体機能合成化学研究室
(所属長 田中 克典)

遷移金属触媒は、多様かつ複雑な反応を引き起こす魅力的な性質を有しているにもかかわらず、不安定であるためグルタチオンなどの触媒毒が存在する生体内での利用は難しいものとされてきた。一方で、遷移金属触媒をタンパク質との複合体(人工金属酵素; Artificial metalloenzyme) とすることで、触媒単体とは異なる反応性や基質選択性を示すことが知られている。所属研究室ではこれまでに、ヒト血清アルブミンの疎水性ポケット内に遷移金属触媒を配置した人工金属酵素では、触媒中心が触媒毒から保護されるため生体内で利用できることを報告している。この安定化された人工金属酵素を利用すれば、体の中(特に疾患部位) で薬物を合成することができ、副作用の少ない疾患治療法となると期待されている。

ヒト血清アルブミンの人工金属酵素では、触媒中心が疎水性ポケット奥に存在するため、疎水性の反応基質を好む傾向があり、水溶性反応基質は適していない。そこで本研究では、水溶性反応基質についても生体内で効率的に薬物へと変換するために、親和性ペプチドおよび小分子リガンドを利用し、遷移金属触媒がタンパク質上を乗り替わることで基質選択性や反応効率が切り替わる新規触媒活性制御法の開発をめざした。

本年度は、ヒト血清アルブミン結合構造と親和性ペプチド構造を持つルテニウム触媒(二重特異性メタロペプチド) を合成し、機能評価を行った。表面プラズモン共鳴法および蛍光の消光を利用し、各タンパク質との複合体形

成能を評価することで、最適なペプチド配列を有するメタロペプチドを見出した。メタロペプチドは三元複合体を経由しない相互作用様式を取ることが示唆され、結合タンパク質によって触媒活性が変化することが期待される。今後、疎水性ポケットに入らない水溶性反応基質を利用した触媒機能評価を実施し、生体内での薬物合成へとつなげていく。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Chang T. C., Nasibullin I., Muguruma K., Kusakari Y., Shimoda T., and Tanaka K., "Evaluation of acute toxicity of cancer-targeting albumin-based artificial metalloenzymes", *Bioorg. Med. Chem.*, 73, 117005–117010 (2022)*

(総説)

1. Yamada K., Muguruma K., and Tanaka K., "Therapeutic in vivo Synthetic Chemistry using an Artificial Metalloenzyme with Glycosylated Human Serum Albumin", *Adv. Carbohydr. Chem. Biochem.*, 82, 11–34 (2022)*

(その他)

1. Muguruma K., Ahmadi P., Chang T. C. and Tanaka K.: "Metal-catalyzed selective cell tagging of a cytotoxic peptide for cancer therapy", *Peptide Science* 2021, 33-34, (2022)*

●口頭発表 Oral Presentations

1. 六車共平, 田中克典: "親和性ペプチドを利用したルテニウム触媒の触媒活性制御", 日本薬学会 第143年会, 札幌, 3月(2023)
2. 六車共平, Ahmadi P., 今井恭祐, Chang T. C., Pradipta A. R., 田中克典: "ルテニウム触媒複合体と天然ペプチド誘導体を用いた生体内タギング反応によるがん治療", 第64回 天然有機化合物討論会, 静岡, 9月(2022)

●ポスター発表 Poster presentations

1. Muguruma K., Imai K., Pradipta A. R. and Tanaka K.: "Peptide/protein-mediated delivery of a ruthenium catalyst for in vivo tumor therapy", 59th Japanese Peptide Symposium, Sendai, Oct., (2022)
2. 六車共平, 今井恭祐, Pradipta A. R., 田中克典: "がん治療に利用可能なルテニウム触媒複合体の開発", 第39回メディシナルケミストリーシンポジウム, オンライン, 11月(2022)

XXII-025 普遍金属触媒が協働する有機ナトリウム化学の開拓

Exploring Organosodium Chemistry with Earth-Abundant Metal Catalysis

研究者氏名: 高橋 一光 Ikko TAKAHASHI
受入研究室: 環境資源科学研究センター
機能有機合成化学研究チーム
(所属長 Ilies Laurean)

有機ナトリウム化合物は1840年代に発見された。これは有機リチウム化合物や有機マグネシウム化合物 (Grignard 反応剤) といった有機金属反応剤の歴史の中でも最初期に当たる。それにも関わらず、現代において有機ナトリウム化合物の利用は皆無である。その理由として、有機ナトリウム化合物は反応性が高く不安定である点が挙げられる。そのため有機ナトリウム化合物の調製は元来より難しく、これが応用展開への大きな障害となっていた。本研究では1世紀に渡り日陰者であった有機ナトリウム化合物に焦点を当てる。第一段階として、これまで調製が困難あるいは不可能であった有機ナトリウム化合物の調製法を確立する。第二段階では、調製した有機ナトリウム化合物を用いて触媒的クロスカップリング反応を達成する。本研究課題を達成した暁には、これまで未開拓であった有機ナトリウム化学を現代の有機金属化学のレベルにまで一挙に引き上げられる。

今年度は主に3つの研究テーマについて従事した。1つ目は「有機触媒によるハロゲン-ナトリウム交換反応」、2つ目は「ニッケル触媒による有機ナトリウム化合物のビアリール合成クロスカップリング反応」、そして3つ目は「鉄触媒によるアリアルナトリウム化合物とハロゲン化アルキルのクロスカップリング反応」である。いずれのテーマについても有望なデータが得られおり、現在は3つ目のテ

マに重点的に取り組んでいる。反応条件の網羅的探索を行ったところ、ある鉄触媒と添加剤を用いた条件でのみクロスカップリング反応が特異的に進行した。鉄触媒については対アニオンの選択が重要であった。また、この添加剤を用いない反応条件ではアリアルナトリウム化合物のクロスカップリング反応ではなくホモカップリング反応が主として進行した。そこで、添加剤を使用しない条件において酸化剤を検討したところ、ホモカップリング生成物を良好な収率で得ることに成功した。今後はこれらカップリング反応の基質一般性を検討する。

●口頭発表 Oral Presentations

(学会)

1. 高橋一光, 浅子壮美, イリエシュ ラウレアン: "Iron-Catalyzed Coupling of Organosodium Compounds", 日本化学会第103春季年会, 東京理科大学, 3月(2023)

●ポスター発表 Poster presentations

(学会)

1. 高橋一光, 中島啓貴, イリエシュ ラウレアン, 浅子壮美, 高井和彦: "Organic Synthesis Utilizing Sodium Dispersion", 11th JACI/GSC Symposium, オンライン, 6月(2022)

XXII-026 分子のねじれを利用するエネルギー変換素子の創出 Energy Conversion Devices Using Molecular Twisting

研究者氏名：齋藤 仁志 Hitoshi SAITO
受入研究室：創発物性科学研究センター
創発機能高分子研究チーム
(所属長 但馬 敬介)

本研究は、共役有機分子のねじれに起因する電子状態の変化を利用した新たなエネルギー変換素子の創出を目的としている。特に現在、共役系内に二重結合を挟んで双生イオン性を持つ化合物に着目して研究を進めている。このような共役双生イオン化合物は、主として非線形光学材料やクロミック材料など、外環境および光と特異的な相互作用を起こす点が注目され研究されてきた。一方で、本研究では中心となる二重結合が動的にねじれることで基底状態からさらに電子雲の偏りを大きくし、最高被占軌道(HOMO)のエネルギー準位を大きく上昇させる点に着目し、光に限らずエネルギー変換を行う電子デバイスへの応用が可能ではないかと考えている。具体的には、共役双生イオン分子をドナー性の有機半導体とアクセプター性の有機半導体の界面に配置したデバイスの作成を行う。この電子デバイスは熱的刺激や機械的刺激にตอบสนองして材料界面で共役双生イオン分子がねじれて電子軌道を変化させることで、各有機半導体材料と電荷

のやり取りを行い、特異的な電流発生を行うことを期待している。すなわち、非平衡開放系の熱流や温度変化、機械的刺激を電流へと変化させるデバイスの創出を目指す。

本年度はDFT計算により基底状態のエネルギー状態や、ねじれの活性化エネルギー、HOMO準位の変化などを予測し、それらを考慮したうえで有望な共役双生イオン化合物の合成をいくつか行った。また、固体中でのねじれを促進するために分子を高立体障害基で覆った化合物の合成も行った。これら合成した分子で、熱分析や、溶液/薄膜の吸収スペクトルの温度依存性による変化、薄膜状態の仕事関数の測定、電子、ホール移動度の測定といった基礎物性の測定を行った。また、各有機半導体材料との混合層を有する素子の作成も行った。素子の温度-電圧-電流特性の測定を行ったところ、熱にตอบสนองして極めて微弱な電流発生が見られているかのような結果が得られたが、今後さらに慎重な検証が必要である。

XXII-027 強誘電異方性流体の創発物性機能の理解からさらなる新展開へ

Ferroelectric nematic materials: from scientific deepening and new developments

研究者氏名：西川 浩矢 Hiroya NISHIKAWA
受入研究室：創発物性科学研究センター
ソフトマター物性研究チーム
(所属長 荒岡 史人)

近年、申請者らは強誘電異方性流体が示すフェロネマチック(NF)状態において破格の分極特性を観測し、その巨大分極発現メカニズムを種々の実験結果から総体的に理解する研究を行ってきた。本研究はNF状態の特異的な創発性を流動・分極・トポロジー相関に結びつけ、実験的・解析的アプローチにより明確化し、特異的な創発性を活かしたユニークな機能性の探求を目指すものである。NF状態に関する体系的な知見を得るためには、より多くのNF分子群を合成する必要がある。また通常のネマチックからNF相に転移する際にどのように分子配向変化が生じるのかを理解することも重要である。前者に関しては、NF分子の迅速な合成アクセス法としてメカノケミカル合成を採用し、後者に関しては、二次元相関分

光法を用いて理解することに努めた。

メカノケミカル(MC)合成は、機械的エネルギーの直接吸収を駆動源とした化学反応合成法であり、強力な分子合成法として注目されている。MC合成に関する報告例は大半が溶媒化学合成に変わる代替合成開拓に関するものであるが、機能性材料およびその多工程にわたる一連の合成プロセスをまるごとMC合成に置換した例はない。既存NF分子は、エーテル合成、エステル化、酸化、アセタール化、クロスカップリングを駆使して合成することができるが、本研究ではこれら一連の合成方法をMC合成に置換することに成功し、さらに各種MC合成法を組み合わせることで新規な300 °C付近までNF相が発現する新規NF分子の開発にも成功した。重要なことは、各

合成工程がわずか5~20分で完了するため、合成経路が5段階であっても約2時間で最終化合物にアクセスできることである。

続いて、MC合成したNF分子を用い、二次元相関分光(2D-COS)解析を試みた。この解析方法を用いると、外的刺激(本研究では温度)によって誘起される種々のスペクトルバンドの動的な交差相関を計算することによって二次元摂動相関スペクトルを取得し、各々の相関強度や符号から温度に対応したスペクトル変化、方向の情報を得ることができる。本実験では、試料に対して一定の温度間隔でFTIRスペクトルを取得し、一方で、NF分子のDFT振動計算から各置換基のFTIRスペクトルをシミュレートし、各種振動モードと対応する波数をライブラリー化した。以上のデータを2D-COS法で自己相関を評価し、分子間相互作用に関する情報を得た。2D-COS解析の結果、高温側からNF相に転移する際に、①まずエステル基が反応し、②続いて π - π 相互作用並びにCH- π 結合が相関する。③さらに芳香族間のF...H水素結合とアルキル鎖と末端芳香族の相互作用が相関すると考えられる。以上のようにNF相の発現機構においては、種々の多点相互作用を経てon-axisな双極子-双極子相互作用(DDI)が生じていると解釈される。興味深いのは、on-axis DDIが生じるのは種々の相互作用の中でも遅い段階で生じることが本研究で明らかになったことである。今後は他のNF分子群に対しても2D-COS解析を行い、NF相発現機構の解明に取り組む予定である。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Nishikawa, H., Sano, K., Kurihara, S., Watanabe, G., Nihonyanagi, A., Dhara, B. and Araoka, F.: "Nano-clustering mediates phase transitions in a diastereomerically-stabilized ferroelectric nematic system", *Commun. Mater.*, 3, 89 (2022)*
2. Lee, J.-J., Kim, S., Nishikawa, H., Takanishi, Y., Iwayama, H., Kim, C., Choi, S.-W. and Araoka, F.: "Chiroptical performances in self-assembled hierarchical nanosegregated chiral Intermediate phases composed of two different achiral bent-core

molecules" *Int. J. Mol. Sci.*, 23 23 (2022)*

3. Emelyanenko, A. V., Rudyak, V. Yu., Shvetsov, S. A., Araoka, F., Nishikawa, H. and Ishikawa, K.: "Emergence of paraelectric, improper antiferroelectric, and proper ferroelectric nematic phases in a liquid crystal composed of polar molecules", *Phys. Rev. E* 105, 064701 (2022)*

(解説)

1. 西川浩矢, : "強誘電性ネマチック相の示す巨大分極特性を利用した革新的液晶材料創製", *日本液晶学会誌*, Vol.27, No.1, 2023年1月発行

●口頭発表 Oral Presentations

1. [国際・招待講演] Nishikawa, H. and Araoka, F.: "The Emerging Ferroelectric Nematics Creating New Application Challenges", The 19th Optics of Liquid Crystals (OLC2021) Satellite Workshop (SWS) 2022, Okinawa, Japan Dec. (2021)
2. [国内・招待講演] Nishikawa, H.: "From discovery of a ferroelectric nematic phase to present developments: Scientific deepening and applications challenge", 2022 Japanese Liquid Crystal Conference, Virtual Conference, Sep. (2022)
3. [国際] Nishikawa, H., Sano, K. and Araoka, F.: "A Photovisible Condenser with Enormous Capacitance Tunability Based on the Ferroelectric Nematic", 28th International Liquid Crystal Conference (ILCC2022), Hybrid Conference (Virtual), Jul. 24 (2022)
4. [国内] Nishikawa, H., Sano, K. and Araoka, F.: "Cybotactic-Clustering Mediates Phase Transitions in a Diastereomerically-controlled Ferroelectric Nematic System", 2022 Japanese Liquid Crystal Conference, Virtual Conference, Sep. (2022)

●ポスター発表 Poster presentations

1. [国際] Nishikawa, H., Sano, K. and Araoka, F.: "Diastereomeric Control of Polymorphic Nematicity for Architypal Ferroelectric Nematogen 'DIO'", 28th International Liquid Crystal Conference (ILCC2022), Hybrid Conference (Virtual), Jul. (2022).

XXII-028 原子分解能を超え、水素、電荷を精密解析する有機結晶構造化学の構築

Sub-atomic Resolution Organic Crystallography by Complementary Use of Cryo-Electron Microscope, X-ray Free Electron Laser and Synchrotron X-ray --- Visualization of Hydrogen and Charges ---

研究者氏名：高場 圭章 Kiyofumi TAKABA

受入研究室：放射光科学研究センター

利用技術開拓研究部門

生体機構研究グループ

(所属長 米倉 功治)

分子上での水素原子位置や電荷分布は、化合物の物性・反応性を説明する上で必要不可欠な構造情報である。しかし、その実験的な観察はこれまでごくわずかな事例に留まっていた。本研究では電子顕微鏡と放射光X線を相補的に利用することで、有機分子結晶構造を電子レベルで解像することを目的としている。これらの線源を活用することで高解像度分子像を得るための試料要件を大幅に緩和し、水素と電荷の観察を汎用技術化する。

22年度は予備実験として検証していたX線自由電子レーザーによる微小結晶構造解析法をさらに拡張し、理想試料として準備したローダミン結晶だけでなく、構造未知試料を含む多様な微小結晶について同手法による構造決定が可能であることを確認した。ここでは電子顕微鏡での回折像から得た結晶格子情報を与えることで、有効なフレーム割合を大幅に向上させている。また、測定効率を改善するために複数種類の結晶試料を連続的に露光できる試料基板を運用し、実用可能であることを確認した。このようなX線と電子線での回折測定によって、ローダミン結晶において水素上の電子の偏極度・電荷値をそれぞれ実験的に決定した [Takaba and Maki-Yonekura et al., Nat. Chem. 2023]。これらの微細構造情報を得るためにこれまでは数百 μm 角の結晶が要求されていたが、本研究手法では数 μm 以下の粉末結晶を用いており、様々な試料への適用が期待できる。一方で、結晶配向が限定される場合や、サイズを数百nm程度まで極端に小さくした場合には、それぞれ電子線、X線での回折測定・構造決定が困難になることを確認した。これは試料特性に応じて各手法を使い分ける上での基準を示すことにつながる。

手法複合の新たな試みとして、光電子相関顕微鏡による微小結晶試料の蛍光観察を取り入れている。これによって結晶の状態を光学特性によって特定可能となり、同一分子の異なる電荷状態での観測が期待できる。23年度は手法の適用拡大を継続するとともに、連続光としての放射光X線も加えた複合解析に取り組む。各回折測定結果を試料間で比較し、それぞれの手法を適用するた

めの定量指標を示す。電荷と偏極度の解像は水素を含む分子の一部に留まっていたため、分子全体でこれらのパラメータを決定する解析手法の開発を進める。

●誌上发表 Publications

(原著論文)

1. Takaba K., Maki-Yonekura S., Inoue I., Tono K., Hamaguchi T., Kawakami K., Naitow H., Ishikawa T., Yabashi M. and Yonekura K.: "Structural resolution of a small organic molecule by serial X-ray free-electron laser and electron crystallography", Nat. Chem., 15, 491-497 (2023).

(総説)

1. 高場 圭章: "電子線と放射光での結晶化学", 日本結晶学会誌, 64巻2号115-116(2022)*

●口頭発表 Oral Presentations

1. Takaba K., Maki-Yonekura S., Inoue I., Tono K., Tai Y., Takeda R., Takeda K., Ishikawa T., Yabashi M. and Yonekura K.: "Synchrotron and electron crystallography to evaluate noncovalent interactions in soft matters", The second International Conference on Noncovalent Interactions 2021-22, Strasbourg, France, Jul.(2022)
2. 高場圭章: "電子顕微鏡と放射光の相補による微小結晶構造解析と材料分子化学への応用", CREST「革新材料開発」領域会議(第9回), 東京, 10月(2022)
3. 高場圭章, 眞木さおり, 米倉功治: "3D EDのためのFIBSEM利用の現状", 日本顕微鏡学会 生体解析分科会研究会「バイオ向けクライオ透過電子顕微鏡の多様性の最前線3」, 岡崎, 11月(2022)
4. 高場圭章, 眞木さおり, 米倉功治: "電荷決定のためのmicroEDへの期待と課題", AMED/BINDS 第1回 クライオ電子顕微鏡 施設技術交流会, 札幌, 11月(2022)
5. 高場圭章: "MicroEDとSPRING-8/SACLAから得られる結晶構造とその利用", CBI研究機構量子構造生命科学研究所/中性子産業利用推進協議会/中性子構造生物学研究会/生物・生体材料研究会合同シンポジウム「MicroEDの現状と未来」, オンライン, 12月(2022)

XXII-029 高機能合金触媒の巨視的・微視的反応解析に基づく反応制御因子の解明

Elucidation of reaction control factors based on macroscopic and microscopic analyses of high-performance alloy catalyst

研究者氏名：稲垣 万貴 Maki INAGAKI

受入研究室：開拓研究本部

Kim 表面界面科学研究室

(所属長 金 有洙)

様々な触媒反応で用いられる担持金属触媒は、反応分子が吸着し反応する場となる担持金属の組成や構造を変化させることで触媒反応性を制御することが可能である。なかでも二種、あるいはそれ以上の金属を混合させた合金触媒は、活性や選択性、耐久性など様々な面での優位性が報告されており、研究が盛んである。合金化により反応性が変わる要因として第二金属添加による電子状態の変化や表面構造の変化が挙げられ、前者をリガンド効果、後者をアンサンブル効果と呼んで議論することが多い。一方で、このような金属表面の局所的な合金効果を原子・分子レベルで評価することは容易ではなく、研究例も少ない。そのため本研究では基本的な合金の効果と、それらが分子の吸着状態に及ぼす影響を走査トンネル顕微鏡 (STM) などの手法を用いて、原子・分子レベルの分解能で解明することを目的とした。STMでは先が鋭利な探針を用い、探針と試料間に流れるトンネル電流を検出することで原子レベルの分解能で表面の像を得る。さらに、探針の高さを固定しバイアス V を変化させて測定したトンネル電流 I を V に関して微分することで得られる微分コンダクタンス dI/dV のスペクトルは試料の電子状態密度を反映していると考えられるため、探針直下の局所的な電子状態を評価することも可能である。このような測定法を走査トンネル分光 (STS) と呼ぶが、第二

金属添加による局所的な電子状態の変化を評価するために有効であると考えられる。本年度はまず、Pd系合金を研究対象とし、研究の第一段階としてSTM観測が可能で平滑な合金表面を作製することを目標とした。合金表面は、清浄化したPd単結晶基板に、第二金属を真空担持した後焼成を行うことで作製した。さらに、担持条件および焼成条件を緻密に制御することで異なる構造の合金表面を得ることが出来、それらの表面構造をSTM観測により原子レベルで明らかにした。今後は、合金表面においてSTS測定を行うことで第二金属添加による局所的な電子状態の変化を評価していく予定である。

●口頭発表 Oral Presentations

1. Torimoto M., Sekine Y.: "Evaluation of the effects of alloying Pd-Zn and its application for the catalytic reaction", 82nd Physical Electronics Conference, Chicago, USA, Jun.(2022)

●ポスター発表 Poster presentations

1. 鳥本万貴、館田匠馬、李民喜、勝部大樹、数間恵弥子、金有洙：“Cu(111)表面に吸着した α , β -不飽和アルデヒドの走査トンネル顕微鏡観察”、表面界面スペクトロスコピー2022、愛知県岡崎市、12月(2022)

XXII-030 Developing a Method for Extracting Cascades from *C. elegans* Whole-Brain Activities.

Name: Chentao WEN

Host Laboratory: Laboratory for Developmental Dynamics
RIKEN Center for Biosystems Dynamics Research
Laboratory Head: Shuichi ONAMI

This research aims to extract cascades of neuronal activities in the brain of *C. elegans* using dynamic influences among neurons. Recent imaging techniques have enabled scientists to record whole-brain activities at the individual neuron level, but the quantitative analysis of these comprehensive data has largely been limited to the connectivity strength among neurons.

This research will expand those researches to gain new insights into the interactions among individual neurons which are dynamically changing.

In this year, I have been focusing on developing the methods required for extracting the neuronal activity cascades:

1. Developing a method for determining the timings of interventions. Here the intervention is defined as the big changes in each neuronal activity that are unexpected from its history. This step is required because the cascade, the focus in this research, is a series of activation/deactivation of neuronal activities caused by signals from other neurons or from sensory inputs. To estimate the cascades, the timings of these activations/deactivations, i.e. interventions, must be firstly estimated. To accomplish this, I forecasted the activity at each next time point based on its preceding activities and calculated the difference between each prediction and the actual activity, which measures the degree of the interventions. I started by attempting a simple autoregressive model at first but discovered that a local model based on nearest neighbors produced more accurate predictions of future activity, and thus provides more reliable estimates of intervention timings.

2. Improving my previous tracking method, 3DeeCelltracker (Wen *et al.* eLife 2021), to obtain more accurate tracking results of the neurons. This improvement is critical because the more accurate tracking can be used to extract more accurate neuronal activities, which largely affects the

reliability of the subsequent quantitative analysis of neuronal cascades. One of the big challenges the researchers in the field need to solve is tracking the worm neurons with large degrees of rotations, which occurs in some experimental conditions, e.g. in freely moving worms. To address this issue, I improved the deep neural network for tracking by adopting a spherical coordinate system instead of the previous Cartesian coordinate system. This approach substantially improved the tracking performance for large rotations. In the test on the simulated data, the new method was able to track an arbitrary degree of rotation with even higher accuracy.

In addition to the two aspects mentioned above, I have also been working on estimating the directional influences on each downstream neuron from their potential upstream neurons, which will form the directional edges of the estimated cascades graph in the brain. I have also worked on improving the accuracy of the cell detection, which is another bottleneck in obtaining accurate cell tracking results. These efforts are still ongoing and will be continued in the coming year.

XXII-031 直列重複かつ冗長タイプの重複遺伝子を対象とした環境ストレス応答・馴化メカニズムの探索

Exploring New Mechanisms of Abiotic Stress Response and Acclimation in Tandem Duplicates with Redundancy

研究者氏名：江副 晃洋 Akihiro EZOE
受入研究室：環境資源科学研究センター
植物ゲノム発現研究チーム
(所属長 関 原明)

真核生物のゲノムには、互いに冗長な機能を持つ冗長タイプの重複遺伝子と、異なる機能を持つ機能分化タイプの重複遺伝子が混在している。冗長な重複遺伝子は互いの機能を相補するため、一方の遺伝子を破壊したときの影響が現れにくい。そのため、冗長タイプの重複遺伝子は、変異体スクリーニングなどの順遺伝学解析を用いた効率的な機能解析手法が使用できず、ほとんど機能解析されていない。特に植物には冗長タイプの重複遺伝子が数多く存在するため、作物の品種改良における大きな障害となっている。そこで先行研究において、シロイヌナズナのゲノム配列情報やタンパク発現情報といったパラメータをもとに機械学習で、重複遺伝子を冗長タイプと機能分化タイプに分類した。その結果、環境ストレス対応

にかかわる重複遺伝子が、シロイヌナズナで数多く発見された。この手法を環境ストレス耐性が非常に高い作物であるキャッサバ (*Manihot esculenta* Cranz.) や、重要作物であるコムギ (*Triticum aestivum* L.) に適用し、多くの冗長タイプと機能分化タイプの重複遺伝子を同定した。それらの中で、冗長タイプと機能分化タイプの重複遺伝子それぞれに、興味深い機能を持つ遺伝子が存在していたため、各重複遺伝子の発現情報に合わせた機能解析を検討している。さらに、キャッサバではゲノムアノテーション情報が十分確立されていないことから、所属する研究チームで作成した Full-length cDNA library を活用して、重複遺伝子の同定も併せて行った。その結果、キャッサバでは、重複遺伝子を含む多くの新規遺伝子座

と post-transcription modification が同定され、それらがキャッサバの農業形質に重要であることが分かった。これらのキャッサバ Full-length cDNA library に関する成果を論文としてまとめ、現在投稿中である。新規遺伝子や post-transcription modification の同定によって、キャッサバの重複遺伝子を過小評価することなく調査することができるかと期待される。今後は、Full-length cDNA library から同定された環境ストレス耐性遺伝子の重複遺伝子について、シロイヌナズナにおいて似た役

割を持つかといった進化解析も行う予定である。

●ポスター発表 Poster Presentations

(学会)

1. 優秀ポスター賞, 島田 祐樹, 江副 晃洋, 澤田 隆介, 柴田 友和, 門脇 真, 山西 芳裕: "パスイウェイを考慮した漢方薬の作用機序解析と効能予測", 2022年日本バイオインフォマティクス学会年会・第11回生命医薬情報学連合大会 (IIBMP2022), 大阪, 9月 (2022)

XXII-032 大規模フィールドオミクス解析による、葉 - 根間の栄養バランス調節を司る遺伝子制御ネットワークの解明

Elucidation of gene regulatory networks involved in the modulation of nutrient supply/uptake balance between leaves and roots by large-scale field-omics.

研究者氏名: 大熊 直生 Nao OKUMA

受入研究室: バイオリソース研究センター

植物 - 微生物共生研究開発チーム

(所属長 市橋 泰範)

作物生産は、植物-微生物-土壌という多層的で複雑なネットワークを構成する農業生態系を背景に行われている。そのため、作物の収量などの重要形質を決定する因子もまた階層を超えて相互に関係しあっていると考えられ、その統合的理解は非常に困難である。本研究課題では、農業圃場において様々な環境条件で栽培したマメ科・ダイズおよびアブラナ科・コマツナの遺伝子発現や代謝産物データ、土壌および土壌細菌の大規模マルチオミクスデータを用いた統合オミクス解析により、農業生態系の統合理解を目指すとともに、植物の成長及び栄養獲得戦略に重要な遺伝子や、土壌細菌、農業環境要因などの同定を目的としている。

これまでに、大規模マルチオミクスデータについて、ネットワーク解析や機械学習の手法、統計的因果探索などを組み合わせて、オミクスの階層を超えた解析を行ってきた。これらの解析により、コマツナとダイズでは収量関連要素に関連するファクターが異なることが明らかになってきた。コマツナでは、生育関連のパラメーターは土壌細菌叢と強く関わっており、植物-土壌細菌間の相互作用が適切な生育に重要な役割を持つ可能性が示唆された。一方で、ダイズでは、収穫期より時期的に以前の開花期における葉の栄養元素濃度が、収量関連パラメーターと強い関係性を持っており、コマツナとは異なる特性を示すことが明らかになってきた。

このような全体を網羅した解析に加えて、植物の栄養獲得や根圏微生物の多様性など、特定の因子と関連する

パラメーターの探索も行ってきた。例えば、植物の必須栄養元素である、窒素やリンのコマツナ葉中の濃度と強い関係性を示す遺伝子を上述した解析手法の組み合わせで探索したところ、窒素やリンの獲得に重要な働きを持つ既知の遺伝子を含む遺伝子群の発現量が重要な特徴量として抽出されてきている。この結果は、使用しているマルチオミクスデータから、現段階の解析手法によって、狙った形質に寄与する遺伝子を十分に発見しうることを示していると考えている。今後は、植物の逆遺伝学的手法や土壌細菌の植物への接種試験を中心に、ラボスケールでの実証試験を行っていく予定である。

●口頭発表 Oral Presentations

1. 大熊 直生, 杉浦大輔, 寺島一郎, 川口正代司, "根粒の数を制御する HARA1 受容体の窒素代謝制御に関わる新たな役割", 日本植物学会第 86 回大会, 京都府立大学, 9月 (2022)
2. 大熊 直生, 川口正代司, "葉で働くミヤコグサ HARA1 受容体による根粒形成の遠距離制御と窒素代謝の制御", 第95回日本生化学会大会, 名古屋国際会議場, 11月 (2022)
3. Nao Okuma, Kie Kumaishi, Atsushi Fukushima, Natsuko I. Kobayashi, Shoichiro Hamamoto, Miyako Kusano, Megumi Narukawa, Yasuhiro Date, Keitaro Tanoi, Naoto Nihei, Yasunori Ichihashi, "Comparative analysis of large-scale field-omics of soybean and komatsuna (*Brassica rapa* var. *perviridis*) dataset", 第64回日本植物生理学会年会, 東北大学, 3月 (2023)

XXII-033 Directing Human Induced Pluripotent Stem Cell-Derived Embryonic-like Organoid with 3D Biomimetic Cryogel Mechanical Microenvironment for Neural Induction.

Name: Raja Kumar VADIVELU

Host Laboratory: Human biomimetic system
RIKEN Hakubi Research Team
RIKEN Cluster for Pioneering Research
Laboratory Head : Masaya HAGIWARA

Mammalian development and early organogenesis is a highly coordinated process that relies on cell fate transitions. Cellular reorganization during embryogenesis is a physical process and relies on mechanical constraints exerted by surrounding maternal tissue. Elucidating the mechanistic effect during embryonic morphogenetic events plays a pivotal role in understanding tissue homeostasis. Deciphering this biological behavior *in vivo* is unachievable. Since the process is difficult to study in mammals or humans due to ethical boundaries and inaccessibility to developing embryos within the uterus. Hence, there is a rising demand to recapitulate developmental processes in a 3D *in vitro* by using assemblies of pluripotent stem cells. Under specific culture conditions, the human pluripotent stem aggregates grown in suspension culture gives rise to distinctly organized germ layers as three-dimensional gastruloid. These constructs attributes of a developing embryo by displaying symmetry breaking, exhibiting convergent extension of body plan along the anterior-posterior axis, and consequences of gastrulation. In the context of advance, multi-organogenesis current 3D gastruloids protocols are still inadequate. Notably, *in vitro* gastruloid protocol lacks extraembryonic tissue (EXT). Thus, likely to endure from loss of mechanical constraint exerted by EXT. The EXT tissues mimic the mechanical microenvironment in utero, which is critical for controlling cellular responses during embryogenesis. The EXT tissue provides mechanical forces that are crucial for controlling cellular responses during embryogenesis by mimicking the mechanical microenvironment in utero. Crucially to this standpoint, it will be advantageous to compensate the EXT by mimicking certain aspects of the physical microenvironment. Given this advantage, improving the 3D gastruloid culturing protocol is possible. For instance, the use of natural hydrogels can provide greater control over

tuning viscoelastic and elastic properties. In addition to that natural hydrogels lack chemical cues and have no binding site to support cell adhesions. Thus, potentially act as a substrate for cells to create their niche by secreting extracellular matrix (ECM). In this study, we showed that agarose-cryogel generates large interconnected macropores that appear as voids-like microcavities on the surface. As a result, functions as a cell-substrate interface that entraps and constrains cells within a tight boundary condition. Similarly, like mimicking the tissue compaction during post-implantation in utero. Interestingly, the softer cryogel (0.5% agarose) cryogel promotes hiPSCs differentiation to germ layers and favors tissue morphogenesis towards anterior-posterior (A-P) axis polarity. In this study we aim to understand the role of substrate stiffness and topological constraints in controlling cell differentiation and self-organization is important. As a result, it is necessary to design a cell-substrate interface that may be used to manage mechano-geometrical input over tissue morphogenesis on a scalable basis. a more comprehensive framework for understanding how instructive physical signals is involved in tissue patterning and the early stages of organogenesis in the setting of the embryo. Taking together, this work for the first time shows the applicability of agarose cryogel mechanics to differentiate iPSCs into embryonic morphogenesis and neuronal fates without the use of exogenous chemical stimulation.

● Publications

Original Papers

1. Khadim, R.R., Vadivelu, R.K., Utami, T., Torizal, F.G., Nishikawa, M. and Sakai, Y.: Integrating Oxygen and 3D Cell Culture System: A Simple Tool to Elucidate the Cell Fate Decision of hiPSCs. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(13), p.7272.

XXII-034 新生児マウスにおける低温耐性喪失機構の解明

Understanding the mechanism of the transient cold tolerance in neonatal mice

研究者氏名：齋藤 祐一 Yuichi SAITO
受入研究室：生命機能科学研究センター
心臓再生研究チーム
(所属長 木村 航)

多くの生物はしばしば訪れる生存困難な環境変化を乗り越えるために体温や呼吸、心臓の拍動などが低下した低代謝状態で生き残る能力を持っているのに対し、ほとんどの哺乳類はこの能力を持たない。しかし、新生児期のマウスは生後数日に限り低温暴露に耐性をもつことが報告されている。新生児マウスの低温耐性は現象として報告されてはいるものの、低温暴露とその後の復温による障害の時空間的メカニズム(いつ致命的な障害を受けるか、どの組織が障害を受けるか)、またこの障害に対してどのように新生児マウスが低温耐性を発揮しているのか。なぜ出生後数日で低温耐性が失われるのか。このいずれもが未解明である。本研究課題では、複数の低温処置モデルを用いて、低温および復温による障害メカニズムの包括的な解析、および低温耐性喪失メカニズムとして出生後の新生児に起こる内因性・外因性環境変化が与える影響の詳細な解析を行う。

本年度は複数の評価系確立および、それらの系を用いた内因性・外因性環境変化による低温耐性への影響評価を行った。低温による障害の評価は複数の指標によって実施できることを確認し、新生児期にこれらの障害に対する耐性がどのように変化するか、どのような環境変化がこのような耐性変化を惹起するかについていくつかの候補を得た。今後はこれらの検討結果にもとづき、実際に環境変化の下流において低温耐性を変化させる分子

機構の詳細な解析を進める。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Chihiro Nishiyama, Yuichi Saito, Akane Sakaguchi, Mari Kaneko, Hiroshi Kiyonari, Yuqing Xu, Yuichiro Arima, Hideki Uosaki, Wataru Kimura. "Prolonged Myocardial Regenerative Capacity in Neonatal Opossum" *Circulation*, 146, 125-139 (2022).

●口頭発表 Oral Presentations

(学会)

1. 齋藤 祐一, 木村 航: "心筋細胞増殖制御の新規標的としての核酸代謝", 2022年度生理研心臓血管研究会, 長野, 11月(2022年)
2. Yuichi Saito, Wataru Kimura: "Nucleotide metabolism as a novel and potential target to regulate cardiomyocyte proliferation", 第39回国際心臓研究学会日本部会, 東京, 11月(2022年)

●ポスター発表 Poster Presentations

(学会)

1. Yuichi Saito, Wataru Kimura: "Exploration of Triggers for Postnatal Loss of Cold Tolerance in Mice", BDR Retreat, Kobe, 11月(2022年)

XXII-035 分裂期の染色体動態によって制御される受精卵の核内染色体配置と遺伝子発現プロファイルの解明

Embryonic Chromosome Territory and Gene Profiles Regulated by Dynamic Behavior during Mitosis

研究者氏名：竹之内 修 Osamu TAKENOUCI
受入研究室：生命機能科学研究センター
染色体分配研究チーム
(所属長 北島 智也)

ひとつの細胞の中には大きさや遺伝子密度が異なる染色体が存在し、核内で特有の配置(染色体テリトリー)をとる。近年、FISHやHi-C解析によって、個々の染色体テリトリーがサイズやコードされる遺伝子の数に依存する

というモデルが提唱された。しかし、検証された染色体は一部に限られ、染色体全て、あるいは他の細胞種にも共通するかは不明であった。

受精卵では発生のステージごとに、遺伝子発現プロ

ファイルが変化していく。ステージ特異的な遺伝子発現プロファイルが発現を適切に進めるうえで重要であることが知られている。しかし、受精卵が遺伝子発現プロファイルをどのように変化させていくのかについては未解明な部分が多い。一方、FISHによる解析によって、マウスやウシ初期胚内の一部の染色体のテリトリーが変化することが確認された。特に、遺伝子発現が大きく活性化されるステージ以降にテリトリーが大きく変化することが明らかとなり、遺伝子発現プロファイルと染色体テリトリーの相関が示唆された。しかし、染色体テリトリーを攪乱・制御する方法は確立されておらず、染色体テリトリーと遺伝子発現が本当に関連しているのか検証できていない。また、間期における染色体は、比較的安定的な局在を示し、ダイナミックな動きが少ないことが知られており、初期胚の染色体テリトリーがどのように変化しているのかは不明である。そこで、本研究では、dCasを用いた新規DNA配列標識技術を用いて、マウス初期胚における個々の染色体の動的挙動を分裂期から間期に至るまで網羅的に解析し、受精卵における染色体テリトリーと遺伝子発現プロファイルの制御メカニズムを解明する。本研究では、分裂期の個々の染色体の動的挙動に注目する。仮説として、分裂期において個々の染色体の動原体-微小管接合の安定性やタイミングがステージごとに変化し、

細胞分裂の瞬間における染色体配置が間期の染色体テリトリーに変化を与え、遺伝子発現プロファイルの変化につながるという仮説を設定し、その証明を行っていく。

●口頭発表 Oral Presentations

1. 竹之内修、Bakhtiyor Nosirov、京田耕司、大浪修一、北島智也：“Development of an imaging toolbox for analysis of individual chromosome dynamics in live mouse oocytes”, 理研Decode seminar, 神戸, 10月(2022)
2. Takenouchi O., Kitajima T.: “Chromosome-specific dynamics in meiosis revealed by DNA labeling technology”, 理研Young Researcher Forum, 神戸, 11月(2022)

●ポスター発表 Poster Presentations

(シンポジウム)

1. 竹之内修、北島智也：“生きた卵母細胞内の染色体を識別するイメージングツールを用いた個別染色体の動態解析”, 細胞分裂研究会, 三島, 7月(2022)
2. Takenouchi O., Kitajima T.: “Analysis of individual chromosome dynamics in live mouse oocytes by CRISPR-based DNA labeling technique”, Totipotency and Germ Cell Development, 博多, 11月(2022)

XXII-036 植物遺伝学とケミカルバイオロジーの融合による葉緑体オートファジーの分子理解と応用展開

Interdisciplinary Approach between Plant Genetics and Chemical Biology for Understanding Molecular Mechanism of Chloroplast Autophagy

研究者氏名：中村 咲耶 Sakuya NAKAMURA
受入研究室：環境資源科学研究センター
分子生命制御研究チーム
(所属長 萩原 伸也)

植物細胞内で光合成を担うオルガネラ「葉緑体」の機能は、植物の成長能力や作物の生産性を強く規定する。これまでの研究で、細胞内分解系である「オートファジー」が、太陽光に由来するダメージによって膜に異常が生じた葉緑体を選択的に取り除くことを明らかにしてきた。この仕組みを「クロロファジー」と呼んでいる。本研究では、クロロファジーのトリガーとして異常葉緑体とオートファジーの主要因子とを結びつける「クロロファジー・レセプター機構」の詳細を明らかにすることを目指し、そのために遺伝学、合成化学、ケミカルバイオロジーを活用する融合研究を行っている。

1) クロロファジー制御化合物のスクリーニングとターゲット同定

本年度は、クロロファジーを抑制する化合物のケミカルスクリーニングを完了し、さらに安定して抑制効果を示す化合物の選抜を進めた。特に抑制効果の高い化合物を固相担体（ビーズ）に固定し、クロロファジー誘導処理をした植物サンプルに対して、ビーズ付き化合物と結合する作用タンパク質の精製を行い、質量分析に供した。現在は、得られた結果から作用タンパク質の候補を複数選抜し、それらのT-DNA挿入欠損株の整備を進めている。

2) クロロファジー機能関連因子の解析

遺伝学的なアプローチとして、すでに獲得しているクロ

クロファジー特異的欠損株の原因遺伝子について解析を進めた。T-DNA挿入変異株やゲノム編集CRISPR/Cas9法による遺伝子欠損株を複数整備し、クロロファジー活性への影響を試験することで、同定した遺伝子がクロロファジーの過程で機能していることを確認した。これと並行して、原因遺伝子を対象に、蛍光タンパク質融合コンストラクトを作製し、植物体内での局在解析を行った。原因遺伝子の一つに、膜交通に関わる因子が含まれていたため、現在はゴルジ体やトランスゴルジネットワークな

ど単膜オルガネラマーカの整備を進め、クロロファジー経路で分解対象を液胞内へと取り込む際に膜交通因子が関与するかどうかを調査している。

●ポスター発表 Poster Presentations

1. 中村咲耶, 石田宏幸, 萩原伸也, 泉正範: "デンブン代謝産物の過剰蓄積はオートファジー依存的な葉緑体分解を誘導する", 第64回日本植物生理学会年会, 仙台, 3月 (2023年)

XXII-037 Understanding the Role and the Limits of Niche Conservatism in Speciation

Name: Jose Said GUTIERREZ ORTEGA

Host Laboratory: Interdisciplinary Mathematical Sciences Program

RIKEN Interdisciplinary Theoretical and Mathematical Sciences Program

Laboratory Head: Tetsuo HATSUDA

Species form biodiversity, and speciation is the evolutionary process that gives origin to species. Speciation is attributed to ecological, genetic or geographic factors. However, how the three factors interplay to influence speciation in general is poorly understood because the three factors vary across biological groups and geographic areas. The "niche" concept integrates those factors, and is defined as the set of environmental factors that a species needs for its persistence within its natural geographic space. Then, clarifying the patterns of niche evolution and constructing models to predict how the niche evolves across species and across regions can elucidate how speciation works. In this research, I am studying plants as a model group to understand the general patterns of niche evolution. So far, I have focused on cycads from the tropical regions of Mexico and Central America. In the genus *Ceratozamia* (38 species), I evaluated the genome-wide variation to reconstruct the phylogenetic relationships among species. I also evaluated the environmental variation and traced how the environmental variation varied throughout the phylogenetic history among species and geographic regions. I found that the niche evolution in *Ceratozamia* depends of where species are distributed: low-latitude species are more prone to retain their niche more than expected from random due to a process called "niche conservatism" (NC); high-latitude species tend to diverge their niches more than random due to a process called "niche divergence" (ND). These results suggest that NC and ND are two processes of a same continuum that is correlated with latitude. The evolution of these

tropical plants at low-latitudes are mostly constrained by NC, suggesting that the speciation of tropical plants often do not require the evolution of traits to enhance adaptability to new environments. On the other hand, species at high-latitudes needed the evolution of new traits (e.g. tolerance to temperature seasonality) that facilitated their evolution via ND. Besides, in the genus *Dioon* (18 species), phylogenetic and niche analyses revealed that NC is common when comparing species-pairs that recently separated from their common ancestor, whereas ND is common when their elapsed time since separation from their common ancestor is longer. This suggest that the NC-ND continuum is also correlated with time due to stochastic phylogenetic processes. My future studies will include other plant groups and larger geographic stages in order to test these patterns of correlation.

● Publications

Papers

1. Gutiérrez-Ortega J.S., Pérez-Farrera M.A., Matsuo A., Sato M., Suyama Y., Calonje M., Vovides A.P., Kajita T. and Watano Y.: The phylogenetic reconstruction of the Neotropical cycad genus *Ceratozamia* (Zamiaceae) reveals disparate patterns of niche evolution. *Molecular Phylogenetics and Evolution*. Submitted.*
2. Gutiérrez-Ortega J.S., Pérez-Farrera M.A., Sato M.P., Matsuo a., Suyama Y., Vovides A.P., Molina-Freaner F., Kajita T. and Watano Y.: Evolutionary and ecological trends in the Neotropical cycad genus *Dioon* (Zamiaceae): An example of success of the evolutionary stasis. *Ecological Research*. Submitted.*

3. Gutiérrez-Ortega J.S., Pérez-Farrera M.A., López S. and Vovides A.: Demographic history and species delimitation of three *Zamia* species (Zamiaceae) in south-eastern Mexico: *Z. katzeriana* is not a product of hybridization. *Botanical Journal of the Linnean Society* 202: 110–133. (2023). Published.*
4. González-García J., Pérez-Farrera M.A., Gutiérrez-Ortega J.S., Vovides A.P. and Díaz-Jiménez P.: *Ceratozamia rosea* (Zamiaceae): A new species from the northern mountains of Chiapas, Mexico. *Phytotaxa* 595: 73–88. (2023). Published.*
5. Vovides A.P., Pérez-Farrera M.A., Salinas-Rodríguez M.M., Galicia S., Díaz-Jiménez P., Calonje M. and Gutiérrez-Ortega J.S.: Morphological and anatomical analyses clarify the species definition of *Ceratozamia latifolia* Miq. (Zamiaceae) and lead to the description of a new species: *Ceratozamia reesii*. *Phytotaxa* 575(3): 224–252. (2022). Published.*
6. Santos Hernández N.G., Pérez-Farrera M.A., Eguiarte L.E., Vovides A.P. and Gutiérrez-Ortega J.S.: Morphological variation between the two species of the palm genus *Gaussia* (Arecaceae) from Mesoamerica. *Nordic Journal of Botany* 2022 (12): e03770. (2022). Published.*
7. Fujiwara T., Egashira T., Gutiérrez-Ortega J.S., Hori K., Ebihara A. and Watano Y.: Establishment of an allotetraploid fern species, *Lepisorus yamaokae* Seriz., between two highly niche-differentiated parental species. *American Journal of Botany* 109: 1456–1471. (2022). Published.*
8. Pérez-Farrera M.A., Gutiérrez-Ortega J.S., Gregory T.J., Chemnick J., Salas-Morales S., Calonje M. and Díaz-Jiménez P.: *Ceratozamia schiblii* (Zamiaceae): a new cycad species from the eastern mountains of Oaxaca, Mexico. *Taxonomy* 2(3): 324–338. (2022). Published.*

Books

1. Calonje M., Vovides A. and Gutiérrez-Ortega J.S.: An overview of Cycadales in Mesoamerica and the Caribbean: Biology, distribution, and a brief history of cycad research in Mexico. In: Carrasco M.D., Cibrián-Jaramillo A., Bonta M.A. and Englehardt J.D. (Eds). *Under the Shade of Thipak: The ethnoecology of cycads in Mesoamerica and the Caribbean*. Pp: 27–61. ISBN: 081306936X. University Press of Florida. Gainesville, United States of America. (2022). Published.

● Oral Presentation

Conferences

1. Gutiérrez-Ortega J.S., Pérez-Farrera M.A., Matsuo A., Sato M., Suyama Y., Calonje M., Vovides A.P., Kajita T. and Watano Y.: “The phylogenetic history of the Neotropical cycad genus *Ceratozamia* (Zamiaceae) reveals diverse patterns of niche evolution”. The 22nd Annual Meeting of the Japanese Society of Plant Systematics, Chiba, Japan, 2023, March 1-5.
2. Gutiérrez-Ortega J.S., Pérez-Farrera M.A., Matsuo A., Sato M., Suyama Y., Calonje M., Vovides A.P., Kajita T. and Watano Y.: “The phylogenetic history of the Neotropical cycad genus *Ceratozamia* (Zamiaceae) reveals diverse patterns of niche evolution”. The 70th Annual Meeting of the Ecological Society of Japan, online meeting, 2023, March, 17-21.
3. Gutiérrez-Ortega J.S.: “Phylogeographic studies on Neotropical cycads: progress, knowledge gaps, and challenges when studying threatened species”. The 70th Annual Meeting of the Ecological Society of Japan, online meeting, 2023, March, 17-21.

XXII-038 チロシンセンシングを基軸とした新規寿命延長機構の解明

Novel mechanisms of lifespan extension triggered by sensing tyrosine scarcity

研究者氏名：小坂元 陽奈 Hina KOSAKAMOTO
 受入研究室：生命機能科学研究センター
 栄養応答研究チーム
 (所属長 小幡 史明)

体内アミノ酸量の感知は、あらゆる動物にとって栄養環境への適応のために必須の能力である。しかし、必須アミノ酸と比較して、食餌から摂らずとも体内で十分に合成できるとされる「非必須」アミノ酸を感知するメカニズムの理解は立ち遅れている。ショウジョウバエを用いた解析から、非必須アミノ酸であるチロシンが体内で欠乏すると、4E-BPの発現上昇に代表される飢餓応答が脂肪組織特異的に誘導されることを見出した。興味深いこ

とに、チロシンの単一摂取制限を行うことで、ショウジョウバエの寿命が延長することがわかった。チロシン制限が惹起する飢餓応答を介在する転写因子としてATF4を同定しているが、その活性化には古典的経路を介さない新規経路の存在が示唆された。そこで本研究課題では、チロシン制限が飢餓応答を誘導し、寿命延長をもたらす新たな分子機構の解明を目的とした。

本年度は、チロシンセンサー実体に迫るため、in silico

でのチロシン結合性タンパク質の探索と、見出された候補タンパク質についての機能解析を行った。チロシン結合に重要であると思われる部位について点変異を導入したショウジョウバエを作成し、チロシン感知への影響を解析している。また、チロシン制限によるATF4標的遺伝子の誘導をモニターできる哺乳類培養細胞株を用いて、センサー候補タンパク質のアゴニスト・アンタゴニストによる影響を解析した。一方で、ノンバイアスにチロシン感知に関与する遺伝子を探索するために哺乳類培養細胞を用いたスクリーニングを行った。一次スクリーニングの結果を受けて、上位遺伝子についての二次スクリーニングを行い、さらにショウジョウバエでのスクリーニングへと展開した。同時に、ショウジョウバエ成虫のチロシン制限中における表現型解析をさらに深め、産卵数の低下や飢餓耐性の向上、摂食行動の変化、mTORC1シグナルの変化などを見出した。これらの表現型に関与することが知られる因子が寿命延長に対しても関与しているか検証を進めている。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Hina Kosakamoto, Naoki Okamoto, Hide Aikawa, Yuki Sugiura, Makoto Suematsu, Ryusuke Niwa, Masayuki Miura, and Fumiaki Obata: "Sensing of the non-essential amino acid tyrosine governs the response to protein restriction in *Drosophila*", *Nature Metabolism* 4(7):944-959. (2022)

●口頭発表 Oral Presentations

(学会)

1. Hina Kosakamoto, Naoki Okamoto, Ryusuke Niwa, Masayuki Miura, and Fumiaki Obata: Sensing of the non-essential amino acid tyrosine governs the response to dietary protein intake in *Drosophila*, 第15回日本ショウジョウバエ研究集会、名古屋、9月(2022)
2. 小坂元陽奈、岡本直樹、丹羽隆介、三浦正幸、小幡史明: チロシン感知が可能とするタンパク質飢餓をしのぐ適応応答, 第45回日本分子生物学会年会、幕張、12月(2022)

(その他講演)

1. 小坂元陽奈: チロシン感知から始まるタンパク質飢餓をしのぐ適応応答、留日中国人生命科学協会講演、オンライン、6月(2022)
2. 小坂元陽奈、非必須アミノ酸チロシンが司る、タンパク質欠乏をしのぐ適応応答、がん制御学セミナー、北海道、8月(2022)

●ポスター発表 Poster presentations

1. Hina Kosakamoto, Naoki Okamoto, Ryusuke Niwa, Masayuki Miura, and Fumiaki Obata: Adaptive responses to protein restriction governed by nonessential amino acid tyrosine in *Drosophila* larvae, 55th Annual Meeting of the Japanese Society for Developmental Biology, Kanazawa, Jun. (2022)
2. Hina Kosakamoto, Naoki Okamoto, Ryusuke Niwa, Masayuki Miura, and Fumiaki Obata: Sensing of the non-essential amino acid tyrosine governs the response to dietary protein intake in *Drosophila*, 19th International Congress of Developmental Biology, Salgados Palace, Algarve, Portugal, Oct. (2022)

XXII-039 Characterizing Intracellular Viscosity and its functional implications across cell types during *Drosophila* embryo morphogenesis

Name: Sameer THUKRAL

Host Laboratory: Laboratory for Epithelial Morphogenesis
RIKEN Center for Biosystems Dynamics Research
Laboratory Head: Yu-Chiun WANG

Cytoplasm is a gel-like medium that is crowded with membrane-bound organelles, biomolecular condensates and macromolecular complexes. The physical properties of the cytoplasm, especially its viscosity and crowdedness, have gained renewed interest, in light of the recent discovery that it is spatio-temporally heterogeneous and can be modulated by signaling, environmental stimuli and cell state, suggesting that the medium where all reactions take place is malleable.

In the present study, our aim is to measure cytoplasmic viscosity in different cells in the *Drosophila* embryo and understand its functional implications on cell and tissue mechanics. Currently, we have generated reagents for measuring intracellular viscosity at different size scales, by subcloning existing probes into *Drosophila* plasmid vectors and have generated transgenic flies. We were successful in generating the following reagents.

A: Probes reporting viscosity using

microrheology based approach:

1. 20nm-Genetically Encoded Multimer (20-nm GEM), fluorescently tagged bacterial protein which self-assembles into a defined particle of 20 nm diameter.
2. uNS-GFP, encoding self-assembling viral particles tagged with GFP, generating multimers ranging from 20 to 100 nm diameter,

B: Probes reporting viscosity using Fluorescence resonance energy transfer (FRET):

1. CRONOS, crowding sensor with mNeonGreen and mScarlet-I, which uses FRET signal between the two fluorescent proteins to provide a readout for crowding
2. GimRET, glycine-inserted mutant FRET, wherein a mutant form of Yellow Fluorescent Protein (YFP) changes its fluorescence responding to the hydrophobicity of the cellular environment

C: Crowding sensor based on Phase separation.

This sensor encodes tandem repeats of SUMO (Small Ubiquitin like Modifier) and SIM (SUMO interacting motif) tagged to a fluorescent protein. It has been reported that changes to cytoplasmic viscosity lead to different sizes of the phase separated SUMO-SIM droplet.

These probes have been generated and well characterized in other systems, but not in *Drosophila*.

This year we focussed on further characterization of 40-nm (generated previously for *Drosophila*) and 20nm GEM probes for our primary screen, since FRET based probes require highly sensitive measurements and controls which require more time. We developed a pipeline to image these probes using Spinning disk microscopy followed by segmentation of images and tracking of these fluorescent particles using Fiji software. Lastly, we extract diffusion related data using a custom MATLAB script.

In the pilot survey conducted thus far, we found that different cell types can be characterized by unique intracellular cytoplasmic viscosities, correlating with cell-type specific intracellular organization and behavior. We found that cytoplasmic viscosity is low during pre-blastoderm stages, increases during

blastoderm interphase and metaphase cycles and reduces again during cellularization, which may correlate with intracellular organization during these stages. Post gastrulation, dorsally located large and flat amnioserosa cells have higher viscosity. It would be of interest to determine whether the increased viscosity is related to its flat shape and/or its intracellular organization, given that the microtubule network in these cells is organized with parallel arrays of microtubule filaments.

Mitotic cells represent a natural context to study cytoplasmic viscosity. Cytoplasm inside mitotic cells is reported to be more dilute than in interphase cells. The dilute cytoplasm may be caused by mitotic swelling resulting from acto-myosin cortical tension and an increase in volume driven by osmosis. How this dilution impacts the biochemistry of reactions and mechanics of cytoskeletal filaments is not yet fully understood.

In our experiments, we confirmed that the mitotic cells, which undergo volume increase and rounding prior to cytokinesis, exhibit low viscosity as compared to cells in the interphase, suggesting cytoplasmic dilution. We standardized a protocol for inducing hyperosmolar shock for *Drosophila* embryos using a mild detergent and Sorbitol solutions. Perturbing osmosis using a hyper-osmolar Sorbitol solution is sufficient to inhibit dilution within mitotic cells. Specifically, we found that cytoplasmic viscosity in mitotic cells under hyperosmotic shock is equivalent to control interphase cells. Unexpectedly, interphase viscosity causes significant mitotic delays, membrane blebbing and chromosome condensation defects. These data suggest that mitotic chromosomes are highly sensitive to viscosity. We are particularly interested in the possibility that following nuclear envelope breakdown cytoplasmic dilution during mitotic swelling plays a critical role in partially 'dissolving' mitotic chromosomes in the cytoplasm such that the spindle microtubule apparatus can have effective access to the kinetochore during chromosome segregation.

Our current line of work involves further investigation of the molecular players involved in the osmoregulation of cell swelling, cytoplasmic dilution and their significance during mitosis and morphogenesis. We would be characterizing the FRET and phase separating probes and use them to map cytoplasmic viscosity at different size ranges.

● Poster Presentations

1. Poster presented at RIKEN BDR Retreat, 2022

XXII-040 Molecular Mechanisms of *De Novo* Insect Gall Organogenesis in Plants

Name: Xin TONG

Host Laboratory: Cell Function Research Team
RIKEN Center for Sustainable Resource Science
Laboratory Head: Keiko SUGIMOTO

Some insects in particular plant-sucking insects can dramatically alter plant cell fates to redirect plant development, and surprisingly induce organogenesis-like *de novo* formation of plant tissues. The abnormal tissues are named galls (虫こぶ), and they are usually well-organized tissues as microhabitats for development and reproduction of the inducer insects. To interpret the deep-seated mechanisms of insect gall formation in molecular basis, I raised three main questions for my current research: 1) what is a gall in cellular basis? 2) What are those uncovered gall effectors and their functions in gall formation? 3) whether we can apply those gall effectors for future crop production? Currently I am employing aphid galling system on Japanese elm trees for the whole experiment design, though there are more than 30,000 gall-forming insect species noticed by scientists. By using scanning electron microscope to track changes of cell types in gall tissues, we found that cell types are changed dramatically in gall tissues compared to normal leaves: cells in galls are actively in division

and in particular the acquisition of vascular cells and tissues. The preliminary comparison also shows that palisade cells may be the main targets of gall effectors to be transformed into gall tissues by potentially dedifferentiation and redirected differentiation for vascular formation. In addition, a list of gall effector candidates was selected after careful sample comparison and proteomic analysis using LC-MS/MS as well as bioinformatic analysis using SingalP 6.0 and TMMHM. The functions in gall formation and potential application of those effector candidates on crop plants are undergoing further investigation as well as more potential effector candidate are under investigation.

● Oral Presentations

Conferences

1. Tong, X., Akimoto SI., & Shigenobu, S.: Symbiotic Interactions by Aphids Galling on Elm Trees. XI International Symposium on Aphids, Targanice Poland 2022, September 11-17.

XXII-041 新奇植物資源を利用した線虫に対する化学的防御機構の解明

Elucidation of Chemical Defense Mechanism against Plant-Parasitic Nematode Using a Novel Plant Resource

研究者氏名: 佐藤 一輝 Kazuki SATO
受入研究室: 環境資源科学研究センター
植物免疫研究グループ
(所属長 白須 賢)

植物寄生線虫は農業上の重要病害虫であるが、植物の線虫抵抗性機構の理解は進んでいない。その理由の一つに、モデル植物を用いた抵抗性機構の解析ができないことが挙げられる。一方、農業現場では線虫病を防ぐため、抵抗性植物の根を台木として利用する、接ぎ木栽培が行われている。接ぎ木栽培では、地下部で線虫害を抑制しつつ、地上部で果実を収穫できる。このように台木は重要な遺伝資源だが、台木の病害抵抗性機構はほとんど研究されてこなかった。日本やEUで線虫抵抗性台木として利用されているトルバム (*Solanum torvum*) という植物はアレナリアネコブセンチュウ沖縄型 (*Meloidogyne*

arenaria, *Ma* 沖縄) など多くの線虫に対して抵抗性であるが、興味深いことにアレナリアネコブセンチュウ本州型 (*Ma* 本州) に対しては感受性である。したがって *Ma* 沖縄、及び *Ma* 本州感染時に特異的なトルバムの応答を明らかにすることで、線虫感染に対する抵抗性応答と感受性応答を明らかにできる。そこで本研究課題ではナスの台木であるトルバムと *Ma* 沖縄/*Ma* 本州の感染系を用いて、線虫抵抗性機構の解明に取り組む。

本年度は以下の成果が得られた。

- ・トルバムのゲノム情報を新たに整備するため、1分子リアルタイムDNAシーケンサー (PacBio Sequel II)

によって取得したロングリードをもとにしたゲノムの *de novo* アセンブリを行なった。その結果、近縁種であるナスの高品質なゲノムアセンブリ (Wei et al., *Hortic Res* 7, 153) を凌ぐ高品質なゲノムアセンブリが得られた。

・*Ma* 沖縄に感染したトルバムの根端では、二次代謝物の生合成に関わる遺伝子群が誘導される (Sato et al., *Front. Plant Sci.* 12:680151)。そこでトルバム根端で誘導される防御物質を明らかにするため、「*Ma* 沖縄が感染したトルバムの根端」と「感染していないトルバム根端」とを比較メタボローム解析に供した。その結果、線虫感染根に特異的な化合物の候補を絞り込むことに成功した。

●口頭発表 Oral Presentations

1. 佐藤一輝, 門田康弘, Pamela Gan, 植原健人, 榎紀子, M. Shahid Mukhtar, 白須賢: “RNA 結合タンパク質を標的とするネコブセンチュウエフェクターによる免疫抑制機構の解析”, 令和5年度植物病理学会大会, オンライン, 3月(2023)
2. Sato K., Kadota Y., Gan P., Uehara T., Maki N.,

Mukhtar S.M. and Shirasu K.: “Understanding the molecular basis of plant and root-knot nematode interaction”, International Symposium on Plant Development and Biotic Interaction, Kumamoto, Japan. Dec.(2022)

3. 佐藤一輝, 門田康弘, Pamela Gan, 植原健人, 榎紀子, M. Shahid Mukhtar, 白須賢: “ネコブセンチュウエフェクターによる植物免疫抑制機構の解析”, 日本線虫学会第29回大会, オンライン, 11月(2022)
4. 佐藤一輝: “植物と線虫の双方から寄生の分子メカニズムに迫る”, 線虫研究の未来を創る会 2022, オンライン, 8月(2022)

●ポスター発表 Poster Presentations

1. Sato K., Kadota Y., Gan P., Uehara T., Bino T., Yamaguchi K., Ichihashi Y., Iwahori H., Maki N., Shigenobu S., Suzuki T., Favery B., Mukhtar S.M., Shirasu K.: “Molecular insights into an interaction of resistant plant *Solanum torvum* and virulent/avirulent root-knot nematodes”, 7th International Congress of Nematology, Antibes(Online), France. May(2022)

XXII-042 Evolution in Class Structured Populations

Name: Thomas James HITCHCOCK

Host Laboratory: Interdisciplinary Mathematical Sciences Program

RIKEN Interdisciplinary Theoretical and Mathematical Sciences Program

Laboratory Head: Tetsuo HATSUDA

Populations are often structured by factors such as age, geography, or sex. As genes flow between these different states of the world, it may structure the ancestry of the population, such that certain classes of individual contribute more to the future than others. Understanding such class structure and its consequences is key to understanding a whole swathe of biological phenomena, from trade-offs between sexes (sexual antagonism), to the evolution of senescence.

In the past financial year, I have been developing a series of models to understand different aspects of this problem, with three main threads of research. The first considers trade-offs between males and females in species which change sex through the course of their lives (sequential hermaphrodites). To investigate this phenomenon, I first described how genes flow between different ages and sexes within these different types of life cycle. Doing this enables a calculation of the reproductive values, i.e. the expected contributions

of these states to future populations, and thus how relatively strong selection will be in these different classes. I then built an explicit population genetics model of a simple two-sex, two-age model to illustrate these principles, and which enables us to relax assumptions about the strength of selection. Secondly, I have been adapting a series of classical population genetic models to the unusual sex chromosome system found in certain species of flies (Sciaridae and Cecidomyiidae), whereby there are two distinct types of female (gynogenic and androgenic), who are determined by the combination of X chromosomes they carry. This has included calculations of effective population size, the deleterious mutation load, and the fixation probability for different types of beneficial allele. These predictions will be compared to empirical data collected by collaborators at the University of Edinburgh. Finally, I have been synthesizing and reviewing recent developments in demography and connecting them to the relatively misunderstood concept of reproductive value.

● Publications

1. Hitchcock, T. J., & Gardner, A. (2023). Sexual antagonism in sequential hermaphrodites. *Submitted*

● Oral Presentations

1. "Genetic drift and natural selection" – iTHEMS

Biology Seminar Series (Online, November 2022)

2. "Reproductive value and selection in age-structured populations" - Population Genetics Group 56 (London, UK, January 2023)

3. "Paternal genome elimination promotes altruism in viscous populations" – Ecological Society of Japan (Online, March 2023)

XXII-043 Neocortical Circuits and Physiological States Underlying the Volitional Control of the Vocal Output in Marmoset Monkeys.

Name: Cristina RISUENO SEGOVIA

Host Laboratory: Brain Functional Dynamics Collaboration Laboratory
RIKEN Center for Brain Science

Laboratory Head : Masanori MATSUZAKI

The cortical circuitry and physiological states underlying vocal signaling in primates are largely unknown. To achieve simultaneous recordings of the premotor and motor neural population with calcium imaging technique and of the calling behavior, marmoset monkeys, *Callithrix jacchus*, have to be trained to vocalize on command under fixated conditions. This can be combined with physiological telemetric recordings for monitoring the cardiorespiratory fluctuations during spontaneous to controlled vocalizations. Additionally, laryngeal electromyography could provide important insights into the learning process to control the laryngeal muscles. The final goal of the project will be to understand the organization and plasticity of the neocortical microcircuits responsible for vocal motor preparation, initiation and execution, vocal cue and reward processing, as well as call-type representations based on spectrotemporal features and call-associated arousal states. To achieve this goal, four marmoset monkeys have been habituated to the recording setup under body-fixed conditions and have been trained to vocalize under positive reinforcement to receive a reward. In this experimental context, they initially produce predominantly phee calls, to contact conspecifics in the distance. At a later training phase, it is expected that will increase the variety of calls they utter. When trained to volitionally vocalize they might tend to produce short calls more often and decrease the duration of longer ones. To know if not only in the setup but also in the facility environment they modify the vocal *repertoire* we acquired an acoustic camera. This system will be implemented to visualize the monkey caller on the camera images in the animal facility, where pairs of marmosets are housed together. It will allow us to monitor the difference between

the spectrotemporal features of the vocalizations during pre-training and post-training, to see if the monkeys can extrapolate the learned behavior to their routine vocalizations. In addition, to visualize the premotor and motor neural population during 1-photon and 2-photon calcium imaging recordings, a cranial window has to be placed at the target area. Craniotomy and durotomy operations have been done on rats to perform them on marmosets at a later stage. This process has been refined with an ultrasonic drill: piezoelectric vibrations cut the bone and make the process safer to protect the soft tissue. Furthermore, laryngeal examinations have been performed on both rats and marmosets, to later obtain electromyography recordings from the larynx of vocalizing marmosets. The main internal laryngeal muscles involved in phonation and contributing to the voice pitch are cricothyroid and thyroarytenoid. The anatomical structure of the larynx and specifically of these muscles have been identified and studied in anesthetized rats and in a marmoset cadaver through a ventral neck incision and by laryngoscopy. Electromyography recordings will be performed on rats and marmosets to relate the vocal output to the laryngeal activity through a collaboration with an expert in the field, Dr. Riede. Finally, a non-invasive setup to record electrocardiography and respiration has been arranged and tested on anesthetized and behaving marmosets. The visualization of a large-scale neuronal population including premotor and motor areas would be highly beneficial to disentangle the organization and plasticity of the vocal cortical microcircuits involved in vocal communication. With this multimethod approach, we will be able to study the learning process to volitionally vocalize at the behavioral, physiological, and neural scales.

● Publications

Original Papers

1. Risueno-Segovia C., Koc O., Campéroux P. and Hage SR.: Cardiovascular mechanisms underlying vocal behavior in freely moving macaque monkeys. *Iscience* 25(1), 103688*
2. Risueno-Segovia C., Dohmen D., Gultekin YB., Pomberger T. and Hage SR.: Linguistic law-like compression strategies emerge to maximize coding efficiency in marmoset vocal communication. submitted*

● Oral Presentations

International Conferences

1. Risueno-Segovia C., Koc O., Campéroux P. and Hage SR.: "Cardiovascular mechanisms underlying vocal behavior in freely moving macaque monkeys" CIN-NIPS-Asia Pacific Systems Neuroscience Symposium 2022, virtual, March 7-10.

● Poster Presentations

Domestic Conferences

1. Risueno-Segovia C., Dohmen D., Gultekin YB., Pomberger T. and Hage SR.: "Selection for efficiency of vocal coding in marmoset monkeys" RIKEN CBS Retreat 2022, Kawagoe Japan, December 9-12.

XXII-044 Elucidating the Brain Mechanisms of Fatigue in Motor and Cognitive Functions Using Ultra-High-Field fMRI

Name: Sofia LAVRENTEVA

Host Laboratory: Laboratory for Human Cognition and Learning
RIKEN Center for Brain Science
Laboratory Head : Kazuhisa SHIBATA

Performance in most of our everyday tasks is affected by physical and mental fatigue, which can lead to negative consequences, such as sports injuries and driving accidents. Recent research suggests that fatigue occurs not only due to peripheral physiological processes, but also due to control signals from the central nervous system. However, the mechanism of such central fatigue is still unknown. We hypothesized that the brain actively suppresses our performance to prevent the body and brain from being damaged due to excessive use. In this study we aimed to elucidate the neural mechanism of such active suppression. To achieve this goal, it is necessary to establish an experimental paradigm that would allow to manipulate the extent of active suppression. This was the goal of this year's research.

First, we tested the possibility that active suppression might be inhibited by diverting attention away from a fatiguing task. We designed a fatiguing muscular endurance task in which participants repeatedly had to grip a force sensor with the highest force they could sustain for 12 seconds. To divert participants' attention from the primary gripping task, on some trials we added a simultaneous short-memory task, which was either moderately or highly demanding. Grip force was higher in double-task conditions, especially when the additional task was highly demanding, than when participants performed the grip task alone. This is consistent with our prediction

that diverting attention away from the fatiguing task can inhibit active suppression.

This effect should be distinguished from possible facilitatory processes in the brain. Such processes might entail heightened motivational state (e.g., due to a monetary reward) and improve performance. In additional experiments we introduced monetary reward and confirmed that facilitatory influence of motivation is distinguishable from active suppression. Double-task paradigm allowed us to inhibit active suppression. We are currently developing a paradigm in which the effect of active suppression can be both increased and decreased. We plan to focus participants' attention on either the gripping or the opposite arm by introducing a task in which participants will be required to detect subtle electrical stimulation to one of their arms. We predict that attending to the gripping arm will increase and away from it decrease active suppression, thus respectively decreasing and increasing gripping force.

Overall, this year's experiments established a robust paradigm to manipulate active suppression in a grip task and facilitated our understanding of the processes behind it. Moreover, since our experiment used MRI scanner compatible force sensor, these experiments can easily be translated to an MRI experiment, which provides a ground for investigation of the mechanism of active suppression on the neural level.

XXII-045 血管内皮幹細胞を標的とした新規治療法探索のための患者特異的 iPS 細胞を用いた VHL 病モデルの構築

Development of a disease model for von Hippel-Lindau syndrome using patient-specific iPS cells to identify novel therapeutics targeting for vascular endothelial stem cells.

研究者氏名：伊藤 秀矩 Hidenori ITO

受入研究室：バイオリソース研究センター

iPS 細胞高次特性解析開発チーム

(所属長 林 洋平)

フォン・ヒッペル・リンドウ(von Hippel Lindau: VHL)病は、VHL 遺伝子変異を主原因とする過剰な血管新生を介した全身性血管芽腫を特徴とする遺伝性難病である。その治療法として、外科的治療・放射線治療が標準的であるが、再発率が高く、根本的治療法は存在しない。これまでに、ヒトVHL病の模倣を目的としたVHL遺伝子欠損マウスを用いた解析が試みられたが、ホモ欠損では、胎盤における血管新生の欠損による胚性致死となり、ヘテロ欠損では、高齢での肝臓における血管芽腫が一部で見られる程度で、病態モデルとしては不十分なものとなっている。そこで本研究では、患者特異的iPS(induced Pluripotent Stem)細胞を用いて、血管新生において主要な血管内皮細胞へと分化誘導を行い、生体予見性の高い血管オルガノイドモデルを新規に構築することで、ヒトVHL病の病態解析を試みた。本研究で得られた結果として、第一に、理化学研究所バイオリソース研究センターで既に保有しているVHL病特異的iPS細胞(患者3名分、18株)を使用し、主因となるVHL遺伝子変異箇所を同定した。第二に、健常者iPS細胞ならびにVHL病特異的iPS細胞から血管内皮細胞への分化誘導系を確立し、それら血管内皮細胞をコラーゲンゲル内で三次元培養することで、新生血管が発芽・伸長する血管オルガノイドモデルを作製した。第三に、VHL病特異的iPS細胞由来の血管オルガノイドでは、健常者iPS細胞由来の血管オルガノイドと比較して、血管内皮細胞の

増殖能が高く、新生する血管長が顕著に長いことを見出した。一方で、VHL病特異的iPS細胞に対し、レンチウイルスベクターを用いてVHL遺伝子を導入したVHL発現修復iPS細胞では、血管オルガノイドモデルにおける新生血管の伸長が抑制することを明らかにした。これらの結果は、VHL遺伝子変異を有する血管内皮細胞の増殖異常が、血管新生を促進する一因であることを示唆している。今後、構築した血管オルガノイドを免疫不全マウスに腎臓被膜移植し、血管芽腫を生じさせるヒト化マウスモデルの作製に着手するとともに、ヒトVHL病の新規治療因子の探索を進める予定である。

●口頭発表 Oral Presentations

1. 伊藤秀矩、佐藤伊織、辺見康子、若林玲実、高崎真美、林洋平：患者特異的iPS細胞由来の血管オルガノイドを用いた病態モデルの構築、第1回東京理科大学-明治大学-理研 生命科学合同シンポジウム、東京理科大学森戸記念館1階第2フォーラム、9月17日(2022年)

●ポスター発表 Poster Presentations

1. 伊藤秀矩、佐藤伊織、辺見康子、若林玲実、高崎真美、林洋平：患者特異的iPS細胞由来の血管オルガノイドを用いた病態モデルの構築、第9回Wakate BRC Conference(WBC)、理化学研究所筑波事業所 オンライン開催、10月4日(2022年)

XXII-046 Investigating Information Processing Strategies among Normal Ageing and Mild Cognitive Impairment Populations: An Eye-Movement Study

Name: Alexandra Janina WOLF

Host Laboratory: Cognitive Behavioral Assistive Technology Team
Goal-Oriented Technology Research Group
RIKEN Center for Advanced Intelligence Project
Laboratory Head : Mihoko OTAKE

A trend to capture subconscious and unbiased data through implicit methods is growing. Interestingly, eye-tracking technology provides a moment-by-moment assessment of thought processes. Notably, this non-invasive technology has been proposed to be highly effective in revealing information about one's cognitive abilities. Nevertheless, few investigations have taken advantage of eye-tracking to study visual attention among clinical populations, such as patients with Alzheimer's disease (AD). Moreover, in the context of AD, the neuropsychological "pen-and-paper" tests have been thoroughly researched in the past years. However, although these traditionally used cognitive screening tests are clinically valid, they are neither simple nor sufficiently short as routine screening tools for dementia. Since many older adults encounter cognitive impairments, this project investigates their decision-making processes and memory recall. In short, three experimental tasks aim to (1) examine gaze behavior strategies under two different evaluative processes and (2) clarify the cognitive processes involved in memory recall and recognition among patients with mild cognitive impairment (MCI) and AD. The proposed paradigm opens new opportunities to harvest gaze metrics as potential biomarkers for MCI. Future results will contribute to a better understanding of visual impairments during the early stage of AD. Furthermore, this project is hoped to provide directions in future diagnosis procedures of AD and MCI and empower next-generation digital health care.

● Oral Presentations

1. Wolf, A., Tamura, S., Mitsudo, T., Ueda, K., & Hirano, Y. Information Processing Abnormalities among Patients with Schizophrenia in a Decision-making Task, 38th Annual Meeting of the International Society for Psychophysics (FechnerDay) 2022, Lund, Sweden, August 2022

2. Wolf, A., The Potential of Gaze Parameters in the Diagnosis of Mild Cognitive Impairment, First International Workshop on Complex Systems Science & Health Neuroscience, Doshisha University, Kyoto, Japan, November 2022
3. Wolf, A., Eye Movement Abnormalities in Older Adults with and without Mild Cognitive Impairment, A*STAR CFAR / RIKEN-AIP Workshop, Hybrid event, Singapore and Japan, December 2022
4. Wolf, A., Eye Movement Abnormalities among Clinical Populations, ETH ZURICH EYE-TRACKING WINTER SCHOOL, Ascona, Switzerland, January 2023

● Poster Presentations

1. Wolf, A., Tamura, S., Mitsudo, T., Ueda, K., and Hirano, Y., A Preliminary Study on Evaluative Responses towards Naturalistic Food Images among Patients with Schizophrenia and Healthy Controls, European Conference on Visual Perception 2022, In-person conference, Nijmegen, the Netherlands, August 2022
2. Wolf, A., Tamura, S., Mitsudo, T., Ueda, K., Hirano, Y., Otake, M., Evaluative Responses towards Food Pictures among Clinical Populations, ETH ZURICH EYE-TRACKING WINTER SCHOOL, Ascona, Switzerland, January 2023

● Other:

1. Hosted Research Topic in *Frontiers in Psychology*, entitled "Early Indicators of Cognitive Decline, Alzheimer's Disease, and Related Dementias Captured by Neurophysiological Tools": <https://www.frontiersin.org/research-topics/44219/early-indicators-of-cognitive-decline-alzheimers-disease-and-related-dementias-captured-by-neurophys>

XXII-047 自律神経中枢による発熱と免疫応答の制御機構の解明

Identification of brain centers controlling thermogenesis and immune

研究者氏名：内田 俊太郎 Shuntaro UCHIDA
受入研究室：生命機能科学研究センター
比較コネクトミクス研究チーム
(所属長 宮道 和成)

発熱は生命活動の維持に必須の反応であり、骨格筋の収縮によるふるえ熱産生と、褐色脂肪組織 (BAT) によるふるえ熱産生によって発現される。BATは交感神経および感覚神経に支配され、ミトコンドリア内膜に特異的に局在するUncoupling Protein 1 (UCP1) を介してエネルギーを熱に変換する。近年、特定のニューロンを人為的に操作する技術によって、体温のセットポイントを規定する視床下部内の詳細な神経集団が解明されているが、その下流で発熱を制御する延髄からBATに至るまでの交感神経の詳細な回路接続や細胞構成は不明であった。本研究の目的は、BATを介した発熱を担う「延髄の前運動ニューロン→交感神経の節前ニューロン→節後ニューロン」という3つのコンポーネントに着目し、その細胞集団と詳細な回路接続、およびその生理的な活動動態を明らかにすることである。

まず、先行研究で交感神経前運動ニューロンであることが示唆されている延髄縫線核のvGluT3陽性ニューロンに着目した。本年度はこのニューロン特異的に組み換え酵素を発現するマウスの作製に成功した。このマウスを用いて延髄縫線核のvGluT3陽性ニューロンに興奮性操作を行ったところ、著明な発熱効果を示すことを確認した。現在はファイバーフォトメトリーによる集団的活動イメージングによって、体温が上昇するタイミングに一致

して、このニューロン群のカルシウム動態も上昇することを確認している。

さらに本年度はマウスの肩甲骨間BATから逆行性に交感神経の節後ニューロンを同定する実験も行った。肩甲骨間BATに投射する節後ニューロンは、先行研究で明らかにされている節後ニューロンの遺伝子マーカーのクラスターのうち数種類にまたがって存在することが分かった。また、この遺伝子クラスターの分画が、心臓に投射する節後ニューロンを構成する分画とは異なることが明らかになった。さらに、この節後ニューロンの軸索は肩甲骨間BATだけでなく腋窩や頸部など体表のBATに出力し、心臓など縦郭臓器には投射しないことが明らかになった。これらの結果は、交感神経節後ニューロンは、投射する臓器によって特異的な細胞集団に分かれていることを示している。

このように本年度の研究によって、延髄側と節後ニューロン側から熱産生の神経回路メカニズムの全貌が高い解像度で明らかになりつつある。さらに近年齧歯類において能動的低代謝状態が誘導できることが報告されており、これらのニューロンの寄与や活動動態を理解することで、熱産生だけでなく能動的低代謝状態のメカニズムを解明することも期待できる。

XXII-048 Human Variation Driven by Mobile Genetic Elements: Disease Association and Evolution

Name: Shohei KOJIMA

Host Laboratory: Genome Immunobiology RIKEN Hakubi Research Team
RIKEN Center for Integrative Medical Sciences

Laboratory Head: Nicholas Fredric PARRISH

Applying the bioinformatic tool we developed to global humans and Japanese, we cataloged mobile element variations in over 7,000 subjects. Integrating mobile element variations in the framework of statistical genetics, we evaluated the influence of those on gene expression and disease.

• Biology of mobile elements

LINE-1 and SVA insertions were more frequently

found in East Asians, particularly in Japanese. LINE-1 insertions were often found in late-replicating domains of human genome, while SVA insertions showed opposite trends; these were frequently found in early-replicating domains. Alu insertions identified in Europeans were often found in late-replicating domains, however, this trend was not observed for those found in Japanese. These suggests

that the activity and the insertion preference of mobile elements are not the same between human populations.

• Influence on gene expression

Integrating mobile element variations in eQTL mapping, we evaluated the gene regulatory potential of mobile elements in 49 tissues. In testis, mobile element variations were more frequently associated with differential gene expression compared to SNVs. Mobile elements with pol-II promoter (i.e. LINE-1 and SVA) had higher effect sizes compared to Alu, which carries pol-III promoter. By checking overlaps with epigenetic marks, we found mobile element insertions in enhancers can attenuates its regulatory activity. Alu insertions in 3'UTR also often influence gene expression interacting with a RNA-binding protein FAM120A. Those represents class-wide interpretability of mobile elements.

• Risk of disease

Performing genome-wide association study (GWAS) with MEVs for 42 diseases in Biobank Japan, we identified 5 mobile element insertions tightly associated with risk of disease. Notably, we identified a LINE-1 insertion in an intron of NEDD-4 gene is strongly associated with the risk of pathogenic response of skin, called keloid as well as the increased expression of NEDD-4. Knocking out the LINE-1 in iPSCs, we validated the LINE-1 insertion is the cause of increased NEDD-4. Increased expression of NEDD-4 is an already known cause of keloid, the LINE-1, suggesting that the LINE-1 is a genetic factor increasing risk of keloid.

Those results were submitted and provisionally accepted in Nature Genetics.

● Publication

Original paper

1. Kojima S, Koyama S, Ka M, Saito Y, Parrish EH, Endo M, Takata S, Mizukoshi M, Hikino K, Takeda A, Gelinas AF, Heaton SM, Koide R, Kamada AJ, Noguchi M, Hamada M, Kamatani Y, Murakawa Y, Ishigaki K, Nakamura Y, Ito K, Terao C, Momozawa

Y, and Parrish NF: Mobile element variation drives population-specific genome diversification, gene regulation, and disease risk. submitted *

2. Ito J, Seita Y, Kojima S, Parrish NF, Sasaki K, and Sato K: A hominoid-specific endogenous retrovirus may have rewired the gene regulatory network shared between primordial germ cells and naïve pluripotent cells. PLoS genetics. published *

Book Chapter

1. Kojima S: Preparation of Non-overlapping Transposable Elements (TEs) Annotation by Interval Tree. Methods in Molecular Biology (Clifton, N.J.). published

● Oral presentation

Domestic conference

1. Kojima S and Parrish NF: Deciphering the human genome from genome's components. The 94th Annual Meeting of the Genetics Society of Japan, Sapporo Japan, 2022 September 14-16.
2. Kojima S and Parrish NF: Polymorphisms of endogenous retroviruses in humans: from detection methods to disease risk. The 45th Annual Meeting of the Molecular Biology Society of Japan, Chiba Japan, 2022 November 30-December 2.

International conference

1. Kojima S and Parrish NF: Mobile element variation drives population-specific genome diversification, gene regulation, and disease risk. RIKEN-McGill Symposium, Montreal Canada, 2022 September 19-20.

● Poster presentation

International conference

1. Kojima S and Parrish NF: Mobile element variation drives population-specific genome diversification, gene regulation, and disease risk. Cold Spring Harbor Laboratory Meeting on Transposable Elements, New York USA, 2022 October 11-15.

XXII-049 「量子」メタマテリアルを用いた高効率全光スイッチの開発

Development of a High-Efficiency All-Optical Switch Using “Quantum” Metamaterials

研究者氏名：竹内 嵩 Takashi TAKEUCHI

受入研究室：開拓研究本部

田中メタマテリアル研究室

(所属長 田中 拓男)

メタマテリアルとは、光の波長より小さいナノ構造を周期配列した人工物質であり、ナノ構造の材料・形状に応じ自然界では見られない特異な光物性を発現する。しかし、これまでのメタマテリアルでは、ナノ構造中の電子の振る舞いが「古典的」であることを前提とし、メタマテリアルの発現できる光物性はその範疇に限定されていた。本研究は電子の「量子性」を用いることで、従来とは全く異なる性質を持ったメタマテリアル、すなわち「量子」メタマテリアルを新たに創生し、その応用展開を狙うものである。

本年度は、金属ナノ構造で生じる量子力学的効果として昨今注目されている「電子染み出し」に焦点を当て、これをメタマテリアルに用いることで、どのような光物性が発現できるかを明らかにした。まずは報告者が「量子」メタマテリアルの解析を目的に開発した、光・物質科学融合計算手法を用い、電子染み出しが与える影響を調査した。結果、電子染み出しは金属ナノ構造表面にて、常におおよそ一定の染み出し長を持つため、ナノ構造の粒径が小さいほど、その影響が相対的に大きくなることがわかった。そして、そのような電子染み出しの影響は、全光スイッチを含む様々な光応用で需要がある、高い非線形光学効果の発現に帰着することを明らかにした。この内容についてまとめた内容が、Physical Review A誌に掲載された。

計算により得られた上記の知見を実証すべく、本年度は並列して実験の準備も進めた。まずは「量子」メタマテ

リアルを構成するための銀ナノ粒子合成手法を習得し、合成レシピの調整により、粒径の制御を行った。また、得られた銀ナノ粒子の線形応答スペクトルの測定方法を習得した。現在は次年度に向け、合成した銀ナノ粒子のメタマテリアル化および非線形光学効果測定のための準備に取り掛かっている。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Takeuchi T., Yabana K.: “Electron spill-out effect on third-order optical nonlinearity of metallic nanostructure”, Physical review A, vol.106, no.6, pp.063517-1-063517-9 (2022)

●口頭発表 Oral Presentations

1. 竹内嵩, 田中拓男: “光・物質科学融合計算手法の開発と応用 – 「量子」メタマテリアルへの挑戦 –”, 理研シンポジウム: 第10回「光量子工学研究」–ポストコロナ時代の新しい光科学–, 和光, 12月(2022)
2. Takeuchi T., Yabana K., Takeuchi Y., and Tanaka T.: “Nonlinear Optical Response Analysis of Metallic Nanostructures - A Relationship between Electron Spill-out and 3rd-order Optical Nonlinearity-”, JSAP-Optica-SPP Joint Symposia 2022, Sendai, Sept.(2022)
3. Takeuchi T., Yabana K.: “Quantum hydrodynamic theory calculations for nonlinear optical response of metallic nanostructures”, The 13th Asia-Pacific Conference on Near-Field Optics, Sapporo, Jul. (2022)

XXII-050 微生物を用いた CO₂ からの高付加価値化合物生産技術の開発

Development of Technology for Valuable Chemicals Production from CO₂ Using Microorganisms

研究者氏名：藤原 良介 Ryosuke FUJIWARA
受入研究室：環境資源科学研究センター
細胞生産研究チーム
(所属長 近藤 昭彦)

本研究では、代謝改変大腸菌を用いたCO₂からの直接発酵生産技術を開発し、高付加価値化合物を生産する。まず、独自技術であるパラレル代謝工学(PMPE)により目的化合物生産に関わる代謝系を他の代謝系から独立させ、生産収率を向上させる。次に、CO₂から生産可能なメタノール及びエタノールを資化する外来代謝経路を導入し、これらの炭素源から効率的な目的化合物の生産を行う。最終的に、メタノール資化経路とCO₂固定化反応を組み合わせ、CO₂からの直接的な有用化合物生産技術の開発を目指す。本年度は、有用化合物であるβ-アラニンやイソプレノイドを高効率に生産可能な微生物の構築を目指し、大腸菌の遺伝子破壊株の構築を行った。解糖系やTCAサイクルといった、中央代謝に関わる多くの遺伝子破壊に成功した。β-アラニンの生産では、過去の報告を上回る収率を達成することに成功した。イソプレノイド生産においても、物質生産と細胞増殖を分離するようデザインしたPMPE代謝系を実現するために破壊プラスミドの構築は既に完了しており、それらのプラスミドを用いて引き続き破壊株の構築を行っていく。

また、*Methylobacterium extorquens*を宿主に用いて、上記と異なるアプローチでのCO₂由来原料からの物質生産技術の開発にも取り組んだ。*M. extorquens*はメタノールやエタノールといったCO₂由来の低分子化合物を資化することが出来る点で近年注目を集めている。一方

で、*M. extorquens*を利用した物質生産技術の報告は少なく、収率や生産性においては、大腸菌などの産業利用実績のある宿主に劣る。その大きな原因の一つとして、*M. extorquens*は取り込んだ炭素源の多くをCO₂に酸化しているという問題がある。特にメタノールを炭素源とした場合、取り込んだメタノール由来の炭素の約8割が、ギ酸を経てCO₂に酸化されてしまうことが知られている。そこで本年度は、この反応を触媒するギ酸デヒドロゲナーゼの破壊に取り組んだ。現在、4つあるギ酸デヒドロゲナーゼ遺伝子のうち1つを破壊することに成功し、引き続き他の遺伝子破壊に取り組んでいる。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Kosuke Sakae, Daisuke Nonaka, Mayumi Kishida, Yuuki Hirata, Ryosuke Fujiwara, Akihiko Kondo, Shuhei Noda and Tsutomu Tanaka: "Caffeic acid production from glucose using metabolically engineered *Escherichia coli*", *Enzyme and Microbial Technology*, 164 110193-110193 (2023)*

(総説)

1. 藤原良介, 野田修平, 田中勉: "大腸菌ペリプラズムでのグルコース-6-リン酸の捕捉は芳香族アミノ酸合成を促進する", *バイオサイエンスとインダストリー* 80(6) 474-475 2022年11月

XXII-051 Recording Time-stamped Biological Events into Cellular DNA Through Genome Editing

Name: Chih-Chieh (Jay) YU

Host Laboratory: Laboratory for Cell Function Dynamics
RIKEN Center for Brain Science

Laboratory Head: Atsushi MIYAWAKI

Studies of biology and medicine will benefit from a method that can monitor biological events over extended periods of time and throughout an entire mammalian organism, but existing tools, primarily based on optical microscopy, cannot fulfill these

needs due to limitations associated with optical systems. Recent advances in genome editing and next-generation DNA sequencing offer powerful and inexpensive ways to write and read cellular genome, raising the possibility of storing the history of

biological events into cellular DNA, which can then be retrieved from biopsied or post-mortem animal tissue. While pioneering studies have demonstrated the feasibility of such approach, existing tools generally lack the capability to record the timing of events. The present research aims to build an intracellular clock that is capable of storing the timing of user-defined biological events in the genome of single cells. To achieve this, a biological timer was designed based on a DNA element that continuously accumulates mutations over time, so quantification of the mutations will potentially allow the user to infer the elapsed time since clock activation, which can be coupled to the timepoint when a user-defined event occurs. Successful implementation of this intracellular clock can potentially enable non-invasive, long-term tracking of physiologically relevant events, such as viral infection, inflammation, or exposure to a ligand, across an entire animal, and find diverse applications in biology and medicine.

Research efforts this year focused on implementing the proposed biological clock in mammalian cell culture, where extensive characterization and optimization will be performed prior to in vivo testing in animal subjects. Components of the clock were assembled into DNA plasmids, and were integrated into selected locations in the genome of a human cell line via twin prime editing, a state-of-the-art genome editor. Efforts next year will focus on confirming the intended behavior of the timer in the integrated cell line, characterizing the mutation rate and its variability, and designing a strategy for recording the timing of multiple recurring events.

• Publications

Books

1. Yu C.C., Orozco Cosio D.M. and Boyden E.S.: "ExCel: Super-Resolution Imaging of *C. elegans* with Expansion Microscopy," *Methods of Molecular Biology*, 2468: 141-203 (2022)

XXII-052 光合成における光電変換機構の解明を目指した光 STM と生体分子蒸着法の融合

Development of Biomolecular Deposition-Photon STM for Elucidation of Photoelectric Conversion Mechanism in Photosynthesis

研究者氏名：今井 みやび Miyabi IMAI
受入研究室：開拓研究本部
Kim 表面界面科学研究室
(所属長 金有洙)

光合成の重要な初期過程の一つに、光励起された葉緑素からの電子移動(光電変換)がある。その効率は極めて高く、詳細な機構解明のため盛んに研究が行われてきた。従来の研究には主に光学分光法が用いられてきたが、その空間分解能は光の回折限界程度(数百 nm)に制限されていた。そのような状況下において、我々は本年、走査トンネル顕微鏡(STM)に光照射・検出機構を組み合わせた光 STM という装置を用いて、原子分解能での光電変換観測を世界で初めて実現し、原著論文として報告した[M. I-Imada, *Nature* 2022]。今後は、開発した原子分解能の光電変換計測法を、葉緑素に用い、光合成における光電変換機構の解明を目指す。これまでに、光 STM で葉緑素など構造が柔軟な生体単一分子の構造を直接見て、その性質を極限の空間分解能で測ったという報告例はほとんど存在しない。この理由のひとつとして、生体分子を用いた試料の作製が困難であることが挙げられる。超高真空・極低温の STM 実験では、原子レベルで清浄な試料を作製することが何より重要であり、一

般的に加熱・昇華を伴う真空蒸着法が用いられる。しかし、生体分子は熱に弱く真空蒸着に適さないのである。この点を解決するため、我々は加熱を伴わないエレクトロスプレー蒸着法(ESD)という生体分子蒸着が可能な機構を光 STM に融合することで、葉緑素の光 STM 観測が実現できるのではないかと考えた。本年度は、まず ESD の設計を行った。設計した ESD 装置では、大気中で発生されたイオン化された試料分子液滴を、超高真空チャンバー内に導入するため、4段階の差動排気チャンバーを設置した。そして、ESD-光 STM の立ち上げを行い、その性能を確認するために、STM 観測の報告例のある長鎖オリゴチオフェン分子(24T-Si-Dod) を Au(111) 単結晶基板上に蒸着し、STM 観測を行った。基板のステップエッジやテラス上にオリゴチオフェン分子は主に孤立分子の状態で吸着しており、蒸着によって多くの分子は分解されていないようであった。詳細な観測によって、様々な折れ曲がり角度の分子を判別することができた。一方で、STM 観測は可能であるものの、溶媒分子と予想され

る不純物も基板には観測された。今後は、不純物の量をさらに減らすために、ESDに質量フィルターを導入する。そして、葉緑素分子を蒸着し、光STMによる構造観測と光物性計測を行う。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Imada H., Imai-Imada M., Ouyang X., Muranaka A., and Kim Y.: "Anti-Kasha emissions of single molecules in a plasmonic nanocavity" J. Chem. Phys. 157, 104302(2022)*

(総説)

1. 今井 みやび, 金 有洙: "単一分子で生じる光電エネルギー変換", 化学 77, 21-24(2022).

●口頭発表 Oral Presentations

(学会)

1. Imai-Imada M.: "Photoelectric energy conversion in a single molecule", NYCU-KU Workshop 2022, Online (Taiwan), Nov. (2022). (Invited)
2. Imai-Imada M.: "Atomic-scale investigation of photocurrent generation in a single molecule", Workshop: Light-Matter Interaction at Nanoscale (LMI2022), Online (Chez), Oct. (2022).(Invited)
3. Imai-Imada M., Imada H., Miwa K., Tanaka Y., Kimura K., Zoh I., Jaculbia R., Yoshino H., Muranaka A., Uchiyama M. and Kim Y.: "Orbital-resolved visualization of single-molecule photocurrent channels", The 22nd International Vacuum Congress IVC-22, Sapporo, Japan, Sep. (2022).

XXII-053 Progress Towards a Coplanar Lumped-element Josephson Traveling-wave Parametric Amplifier

Name: Chung Wai Sandbo CHANG

Host Laboratory: Superconducting Quantum Electronics Research Team
RIKEN Center for Quantum Computing

Laboratory Head: Yasunobu NAKAMURA

In this work, we focused on the design and fabrication of a four-wave-mixing Josephson traveling-wave parametric amplifier (JTWPA) based on a periodically loaded nonlinear microwave transmission line, with the goal of developing crucial building blocks for quantum computer. To realize a high performance JTWPA where gain is typically evaluated using a lumped-element model, it is critical to develop a microwave waveguide circuit which exhibits well-predicted behavior that can be mapped to the corresponding model. With various waveguide designs studied in simulations and experiments, we have arrived at a scalable spiral-line waveguide design which minimized any undesired periodicity previously observed in a meandered-waveguide design. Using a novel waveguide architecture densely loaded with air bridges, the minimum separation between the adjacent spiral lines has been further reduced, significantly improving the utilization of chip area comparing to similar spiral-line waveguides. Also critical to the operation of a JTWPA are Josephson junctions with highly homogeneous critical current over the whole JTWPA waveguide. A small standard deviation of five percents in the junction critical current can already significantly affect the transmission of the waveguide, deviating it from the

lumped-element model and further degrading the performance of the JTWPA. To achieve the desired junction homogeneity, various existing junction fabrication recipes used in the field were studied. Conventional Dolan-bridge techniques were avoided due to its free-hanging resist structures which could introduce uncertainties in junction formations. While other designs such as sun-glass-type junctions were able to produce a sufficiently low uncertainties in junction critical current, we observed a lack of robustness due to its thin-wire structures. Based on the Manhattan-type junction design, we developed a new recipe which allowed us to increase the achievable junction area from typically being less than 100 nm square to over 1 μm square, a large junction area desirable for JTWPA fabrications. Without any narrow structures nor free-hanging structures in the junction geometry, the new recipe has shown higher robustness against fabrication error, while also maintaining a low uncertainty in critical current as small as two percents over a chip area of a 4WM JTWPA. With these, we have fabricated new 4WM JTWPA samples, and have tested the new design in a dilution refrigerator. We have observed a significant improvement in the waveguide transmission behavior, where the device gave an expected smooth transmission with minimal

ripples and a well-defined bandgap at frequencies within a few percent from our simulations, while the obtained gain fell below the expected value, to a maximum gain of 10 dB over a bandwidth of 1 GHz. We have identified the possible reasons to be with the

aggressive modulation in the periodic loading design and will next fabricate and test the corresponding new samples in hope of obtaining higher gain and bandwidth.

XXII-054 細胞膜の機械特性と遺伝子発現の統合解析による老化の解明

Integration of Mechanical Phenotyping of Cell Membrane and Transcriptome along Aging

研究者氏名：塩見 晃史 Akifumi SHIOMI

受入研究室：開拓研究本部

新宅マイクロ流体工学理研白眉研究チーム
(所属長 新宅 博文)

細胞の機械特性の一つである細胞表面張力は、細胞老化における重要な表現型の一つであると同時にそれらの制御因子としても注目されている。しかし、細胞の細胞表面張力は細胞間の不均一性が高く、遺伝子発現変動と細胞の細胞表面張力を繋ぐ詳細な分子カスケードには未だ不明な点が多い。そこで本研究では、これまで技術的に困難であった細胞の機械特性解析と遺伝子発現解析を統合するマルチオミクス解析法を開発し、細胞老化における細胞の細胞表面張力の制御機構を解明することを目標に研究を行った。初年度は、細胞表面張力と遺伝子発現を1細胞解像度かつ大規模に統合解析する新規手法としてELASTomics (Electroporation-based Lipid-bilayer Assay for cell Surface Tension and transcriptomics)を開発した。100 nmの貫通孔をもつ非導電性膜に細胞を接着させ、電気パルスを加えると、貫通孔の直上の細胞膜にのみ可逆的なナノポアを形成することができる(Nanopore-electroporation)。この時、細胞表面張力が高いほど形成されるナノポアの半径は大きくなるため、電気泳動によってナノポアを經由して細胞内に分子を輸送した場合、理論上輸送量と細胞表面張力は正の相関を示す。この仮説は、理化学研究所CPRの磯島隆史と共同研究により、AFMで測定した細胞表面張力とNanopore-electroporationにより細胞内に輸送したFITC-BSAの蛍光強度を比較することで実験的に確認した。次に、輸入された分子の量を定量するために、DNAタグ付きデキストラン(DTD)を開発した。このDNAタグには、デキストランの種類を特定するためのバーコード配列が含まれており、Nanopore-electroporationによって細胞内にDTDを取り込んだ細胞に対して1細胞RNA-seqを行うことで、数千の単一細胞における遺伝子発現と細胞表面張力を測定することが可能である。このELASTomicsを用いて、複製老化を

示すTIG-1細胞に対してELASTomics解析を行い、細胞老化による細胞表面張力の増加には、糖代謝の制御に関わるRRADが関与していることを見出した。現在、これらの成果を論文として海外雑誌に投稿する準備を進めている。

●誌上发表 Publications

(原著論文)

1. Hirano, K., Tsuchiya, M., Shiomi, A., Takabayashi, S., Suzuki, M., Ishikawa, Y., Kawano, Y., Takabayashi Y., Nishikawa, K., Nagao, K., Umamoto, E., Kitajima, Y., Ono, Y., Nonomura, K., Shintaku H., Mori, Y., Umeda, M. and Hara, Y. "The mechanosensitive ion channel PIEZO1 promotes satellite cell function in muscle regeneration" *Life Science Alliance*, 6.2 (2023)

●口頭発表 Oral Presentations

(学会)

1. 塩見晃史, 金子泰洸, 西川香里, 新宅博文: "細胞の機械特性と遺伝子発現の統合解析", 第95回日本生化学会大会, 名古屋国際会議場, 11月(2022)

●ポスター発表 Poster Presentations

(学会)

1. 塩見晃史, 金子泰洸, 西川香里, 新宅博文: "微小電気穿孔法を用いた細胞の膜張力と遺伝子発現の統合解析", シングルセルゲノミクス研究会2022FES, みやこめっせ, 8月(2022)
2. 塩見晃史, 金子泰洸, 西川香里, 新宅博文: "細胞の機械特性と遺伝子発現の統合解析", 第95回日本生化学会大会, 名古屋国際会議場, 11月(2022)
3. 塩見晃史, 金子泰洸, 西川香里, 新宅博文: "老化における細胞の膜張力と遺伝子発現の統合解析", 第13回マイクロ・ナノ工学シンポジウム, アスティとくしま, 11月(2022)

XXII-055 高分子科学と工学の融合による高感度疾患診断デバイスの開発

Development of High-Sensitive Disease Diagnostic Device by Integrating Polymer Science and Engineering

研究者氏名：上田 智也 Tomoya UEDA

受入研究室：開拓研究本部

渡邊分子生理学研究室

(所属長 渡邊 力也)

本研究では、高分子科学と工学の融合により、機能的な高分子によって高度化したデジタルバイオ分析システムを開発し、疾患関連生体分子の単離・補足の高効率化を実現するとともに、それらを指標とした高感度かつ高精度な疾患診断基盤の確立を目的としている。本年度は、植物のウイルス防除対策に資するべく、トマトの病害因子である感染性ウイルス8種(TMV, CMV, PVX, PVY, ToMV, TAV, TSWV, TNV)の迅速・並列検出法の開発を行った。トマトのウイルス感染症は、葉の奇形や着果の不良を引き起こすことで、生産量や品質の大幅な低下をもたらすと同時に、短期間で感染拡大する病原性の強さから、病害発生時の迅速かつ正確な検査が必要不可欠となる。従来の検査法では、抗原検査と遺伝子増幅検査が

併用されてきたが、感度・精度・検出時間のいずれかに技術的な欠点を内包しており、新しい原理原則に基づいた検査方法の開発が強く期待されていた。そこで、本研究では、1) 高分子/界面活性剤を用いた効率的なウイルス遺伝子の抽出方法の開発、2) CRISPR-Cas13aを用いたウイルス遺伝子の非増幅デジタル検出技術の最適化を行うことで、高感度(検出限界値: 1 fM)、迅速(10分以内)、かつ、多項目・自動検出(ウイルス8種類)を実現するトマトウイルス感染症の新規検査法を確立した(論文準備中)。今後は、その他の疾患関連分子へと測定対象を拡張するとともに、より汎用的な疾患診断デバイスの開発を進める予定である。

XXII-056 機械学習技術を用いたイオン源制御手法の開発

Development of ion source operation method applying machine learning

研究者氏名：森田 泰之 Yasuyuki MORITA

受入研究室：仁科加速器科学研究センター

加速器基盤研究部

イオン源開発チーム

(所属長 中川 孝秀)

加速器ではビーム強度向上のため、常に繊細で高度な調整が行われている。しかし加速器の運転パラメータは数百から数千にまでのぼり、その調整は容易ではない。一般的にはオペレーターの経験則に基づき調整が行われている。そのためオペレーターによってビームの強度や調整時間に多少のばらつきが生まれる。そこで機械学習技術を持ちこることで再現性良く、また短時間でビーム強度を向上させるための自動制御システムの開発を行う。

本研究では加速器の一部としてイオン源及び周辺のビーム輸送の調整の自動化を目指す。機械学習手法として、ベイズ最適化を用いることで短時間での調整を実現する。本研究最大の特徴は、オートエンコーダーなどの手法を用いることで調整パラメータの次元削減を行う点にある。すでに10パラメータ程度の調整は実現している。しかしこの手法では加速器全体の一括調整は不可

能であり、ビーム測定器までなどパートごとに分けて調整が必要である。しかしその場合、ローカルマキマムに陥るリスクがあり、真の最適解にはたどり着かない可能性がある。この問題を解決するために、次元削減技術を活用する。次元削減を用いることで数百のパラメータを数個~15個程度の特徴量で表現する。さらにはその特徴量空間内でベイズ最適化を行うことで数百の運転パラメータを15個程度のパラメータとして制御することができる。本手法が実現することによって、従来のシステムよりもはるかに高次元のパラメータ調整が可能となり、既存のシステムが各パートの調整にかかる時間と同程度の時間で加速器全体を調整することが期待でき、加速器実験をより効率的に行うことができるようになる。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Y. Morita, et. al., : "Control of a cyclotron and an ECR ion source using Bayesian optimization method", (国際会議 Proceedings、現在査読中)

●ポスター発表 Poster Presentations

1. [森田泰之, et.al.,:] "ベイズ最適化を用いたイオン源制御手法の開発", 第19回日本加速器学会年会, オンライン開催, 2022]
2. [Y. Morita, et.al.,:] "Control of a cyclotron and an ECR ion source using Bayesian optimization method", 23rd International Conference on Cyclotrons and their Applications, オンライン開催, 2022]

2022-23 基礎科学特別研究員年報

令和5年8月31日 印刷

令和5年8月31日 発行

編集兼 国立研究開発法人理化学研究所
発行者 人事部 研究 人事 課

〒351-0198 埼玉県和光市広沢2番1号



2022-2023 基礎科学特別研究員年報

Special Postdoctoral Researcher Program
2022-2023 Annual Report