

駒場で 創る。

科学史 科学哲学

素粒子 原子核理論

物性理論 統計力学

物性物理学 一般物理学

分子科学 物質科学

相関基礎科学系

広域科学専攻

総合文化研究科

大学院

東京大学

構成研究室一覧			部屋番号	
Aグループ(科学史・科学哲学)				
石原 孝二	研究室	(科学・技術の哲学、現象学、精神医学の哲学)	14号館	707B
岡本 拓司	研究室	(科学史・技術史・高等教育史)	14号館	309B
鈴木 貴之	研究室	(心の哲学、実験哲学、メタ哲学)	14号館	309A
藤川 直也	研究室	(言語哲学、意味論、語用論、形而上学)	14号館	705A
三村 太郎	研究室	(イスラーム科学史)	14号館	309A
鈴木 晃仁	研究室	(医学史)※兼任	農学部	411
			総合研究棟B	
Bグループ(素粒子・原子核理論)				
大川 祐司	研究室	(素粒子論・超弦理論・場の量子論)	16号館	321A
菊川 芳夫	研究室	(素粒子論・場の量子論)	16号館	325A
野海 俊文	研究室	(素粒子論・宇宙論)	16号館	322A
Cグループ(物性物理学・一般物理学)				
池田 昌司	研究室	(統計力学・化学物理・ソフトマター物理)	16号館	727A
石原 秀至	研究室	(生物物理・非線形物理)	16号館	807B
今泉 允聡	研究室	(数理統計・機械学習)	16号館	203B
加藤 雄介	研究室	(超伝導・超流動・量子物性)	16号館	301B
国場 敦夫	研究室	(可積分系, 数理物理)	16号館	302A
白石 直人	研究室	(統計力学)	16号館	430A
高木 隆司	研究室	(量子情報理論)	16号館	327A
福島 孝治	研究室	(統計物理・物性理論)	16号館	221A
堀田 知佐	研究室	(物性理論・強相関量子多体系)	16号館	301A
D1グループ(物性物理学・一般物理学)				
●粒子線物理学				
松田 恭幸	研究室	(変わりものの原子の物理)	16号館	222A
●凝縮系物理学				
上野 和紀	研究室	(薄膜・界面の電子物性)	16号館	222B
塩見 雄毅	研究室	(トポロジ・磁性・スピントロニクス)	16号館	622
深津 晋	研究室	(量子物性・フォトニクス)	16号館	507A
●量子光学・量子エレクトロニクス				
鳥井 寿夫	研究室	(原子物理学・レーザー冷却実験)	16号館	224A
素川 靖司	研究室	(原子・分子・光物理学 量子エレクトロニクス)	16号館	121
野口 篤史	研究室	(量子技術・量子サイバネティクス)	10号館	403B
●生物物理学・脳科学				
澤井 哲	研究室	(生命システムの物理学)	16号館	710B
柳澤 実穂	研究室	(ソフトマター物理学・生物物理学)	10号館	403A
若本 祐一	研究室	(細胞ダイナミクスの生物物理学)	16号館	330
酒井 邦嘉	研究室	(脳機能計測・言語脳科学)	16号館	711
D2グループ(分子科学・物質科学)				
●分子分光学・反応動力学				
奥野 将成	研究室	(分子分光学・構造化学)	16号館	402A
長谷川 宗良	研究室	(高強度レーザー科学・分子分光学)	16号館	509B
真船 文隆	研究室	(化学反応学・物理化学)	16号館	425A
横川 大輔	研究室	(理論化学・電子状態理論)	16号館	729A
羽馬 哲也	研究室	(物理化学・天文学)	生産研T棟	306
●無機物質化学				
平岡 秀一	研究室	(超分子化学・有機化学)	16号館	525B
内田 さやか	研究室	(機能性固体の化学)	16号館	424
永田 利明	研究室	(クラスター化学・物理化学)	16号館	421B
桐谷 乃輔	研究室	(有機無機ハイブリッド・分子技術・電子物理工学)	16号館	502
堀内 新之介	研究室	(超分子化学・錯体化学)	16号館	521B
●有機物質化学				
岩井 智弘	研究室	(触媒有機化学・材料機能化学)	16号館	703
小林 広和	研究室	(触媒化学・バイオマス変換化学)	10号館	403F
寺尾 潤	研究室	(分子建築学)	16号館	702B
豊田 太郎	研究室	(分子集積システム創成・ソフトマター)	16号館	604
●兼任教員(GPESから)				
ウッドワード ジョナサン	研究室	(スピン化学・光化学)	駒場国際教育研究棟	210B

History and Philosophy of Science

A グループ: 科学史・科学哲学



ゼミの様子

科学と技術、およびそれらと社会の関わりを、 人文社会科学の手法を用いて分析する

科学技術は、誕生以来、自然現象の謎をつぎつぎに解明してきましたが、現代では、社会を動かす原動力としての役割も果たし、人々と社会に大きな恩恵をもたらしています。その一方で、科学技術がひきおこした自然と社会の急激な変化は、深刻な問題も生み出してきました。当研究室では、そのような科学技術を、科学者・技術者の視点からではなく、人文・社会科学の視点から検討しようとしています。現代社会のなかでは、科学技術の急速な発展の結果として、人間やそれを取り巻く環境に対する思想的・社会的考察を抜きにしては解決の得られない問題が急増しています。本グループでは、こうした状況に対応して、科学や技術とは何であるのか、という基本問題を、メタサイエンスの視点から、すなわち、歴史的、哲学的、倫理的あるいは社会学的観点から解明することを目的とする研究と教育を行っています。

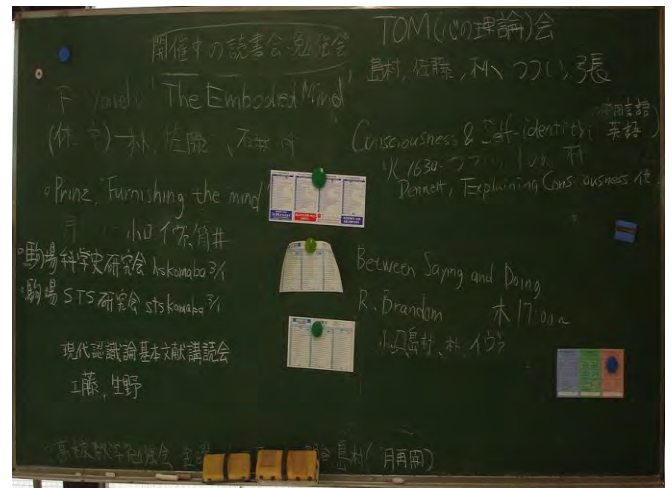
スタッフの概要など

本研究室の専任スタッフは7名、兼担1名です。(橋本教授は2022年度で定年を迎えられます。) 専門とするテーマは、物理学史、生物学史、医学史、技術史、高等教育史、イスラーム科学史、科学哲学、技術哲学、心の哲学、分析哲学、言語哲学、現象学、生命倫理、医療倫理、脳神経倫理、科学技術倫理、リスクコミュニケーション、生命思想、環境思想、脳神経哲学、実験哲学、メタ哲学、精神医学の哲学、当事者研究、障害の哲学などです。

専任スタッフは、大学院の講義と大学院学生の指導を担当するほか、教養学部後期課程(科学技術論コース)の講義も担当しています。大学院学生(修士課程)も後期課程の単位を一定程度取得することができます。また、このほかに、様々な分野の非常勤スタッフにより、講義やセミナーが行われています。

紀要

本研究室の大学院生は東京大学教養学部哲学・科学史部会の紀要『哲学・科学史論叢』に論文を投稿することができます(査読あり)。



研究会の参加者募集の掲示など

グループの歴史など

1951年、東京大学教養学部にて教養学科が創設されました。教養学科は、後期課程において general education を行う新しい試みであり、そのなかに自然科学を歴史的、哲学的に考察するコースとして、科学史および科学哲学学科が誕生しました。科学史および科学哲学学科の実現に意をそそいだのは、その前年にアメリカの大学を見学した際、ハーヴァード大学の general education program のなかに哲学の N. ホワイトヘッドと科学史の G. サートンの影響をみてとった玉蟲文一教授でした。玉蟲教授の回顧によれば、この特異な課程は、学外から三枝博音教授、矢島祐利教授らの協力を得て運営され、さらに大森荘蔵教授の中心的な役割によって成長し、大学院課程である科学史科学基礎論専攻が1970年に拡充されることとなりました。現在、科学史科学哲学研究室のスタッフは大学院総合文化研究科・広域科学専攻・相関基礎科学系に所属し、Aグループとして大学院生を受け入れています。

研究室ウェブサイト <http://hps.c.u-tokyo.ac.jp/>

事務室 14号館 305B号室

電話 03-5454-6135 ファクシミリ 03-5454-6978

web-admin@hps.c.u-tokyo.ac.jp

開室時間:原則11時~17時で開室。昼休みを除く。

修士論文・博士論文の題目の例

- ヘルマン・フォン・ヘルムホルツの初期生理学における数量化—機械論との関係に着目して—
- クオリア表象理論の擁護 ～表象内容と色のハードプロブレム～
- 社会モデルと合理的配慮—「障害学」の可能性と限界について—
- 科学的实在論論争とは何か
- 放射能の探求から原子力の解放まで：戦前日本のポピュラーサイエンス

大学院生から

「社会人として修士課程に入学し、科学史を専攻しています。本講座では、科学史専攻と哲学専攻の学生とが同じ講座に属しているのですが、分野を越えて一緒に勉強会をする有意義な機会も得ることができました。そして、博士課程に進学した今でもよく心に浮かぶのは、『求めよ、さらば与えられん。尋ねよ、さらば見出さん。門を叩け、さらば開かれん。』という言葉です。探究心を持ち続けることの大切さを、先生方をはじめ先輩方から学んでいます。」

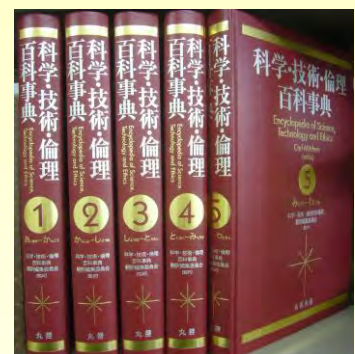
「科学史・科学哲学研究室に在籍する学生の専門分野は科学史、科学哲学、科学技術社会論などですが、各自が関心を持つテーマは様々です。自由度が高く、また関連分野について知るのにもよい環境ではないかと思えます。院での研究生活では、一人でじっくりと文献を読むことも重要ですが、議論を通して思考を深めることもとても有意義です。研究会・検討会などでの仲間との議論は、これまでの自分の研究に大きく役立ったと感じています。」

「基本的に科哲での研究は文献を探し、1人で読むところから始まります。私自身は卒業論文で分離脳患者の人格の同一性について考え、修士課程でも引き続き心や人格について研究しています。ゼミや勉強会、論文指導での議論、学会での口頭発表など、この1年間さまざまな経験をすることができました。先輩がたも伝統的な哲学の文献に限らず、自然科学や社会科学の文献など幅広く読んで研究を進めておられるようです。伝統に縛られないのが科哲の特徴だと思います。」

講義題目の例

- ・幸福とウェルビーイングの哲学
- ・診断と分類の科学哲学
- ・科学史と科学哲学
- ・歴史の変動の中の科学技術
- ・哲学的自然主義
- ・生—資本主義

こんなものも研究対象です



Encyclopedia of Science, Technology, and Ethics の邦訳を、2012年に丸善出版社から刊行しました。多くの学生の皆さんが翻訳に参加されました。

Philosophy of Science 石原研究室

精神医学の哲学、現象学、科学技術哲学



石原孝二 教授

石原孝二 教授 Kohji Ishihara, Prof.

<http://researchmap.jp/read0052179/>

学生の頃はハイデガーを中心とした近現代哲学・現象学を研究してきたが、その後科学技術哲学、リスク論、科学技術コミュニケーション、脳神経倫理などの研究をへて、近年（2012年度以降）では、精神医学の哲学と歴史を中心に研究を行い、当事者研究、精神医療と人権、障害の哲学などについても研究を行っている。

精神医学の哲学

哲学とは何か、という問いに対する明確な答えはないが、私自身は、知的行為や言説、社会的制度や社会的活動などの前提や構造、論理を探究し、何らかのアウトプットを作り出す実践だと考えている。

そのように考えるならば、精神医学の哲学とは、精神医学という知や臨床実践の前提や構造、論理を探究するものと言える。精神医学の知と実践は、いくつかのユニークな特徴をもっている。その一つが、医学・医療における独特の位置づけである。例えばWHOが作成しているICD（国際疾病分類）における精神疾患(mental disorder)の扱いに見出すことができる。ICDの分類は、伝統的に（感染症などは別として）、「呼吸器系の疾病」や「消化器系の疾病」などのように身体特定の部位や組織、システムの機能不全に基づいて大分類

（章分け）を行ってきた。しかし、ICDの第6次改訂（1948年）以来、「統合失調症」などの精神疾患は、「神経系の疾病」とも区別されて、身体の部位による分類という原則から外れて独自のグループを形成してきた。

精神疾患の境界は曖昧であり、通常とは異なった考え方や情動、行動のすべてが、精神医療の対象となりうる。そのため様々な軋轢が生じ、論争や議論が行われてきた。例えば「同性愛」が精神疾患の一つとされていたことに対する1960年代末～1970年代の激しい抗議活動、アメリカ精神医学会の統計診断マニュアルDSMの改訂（2013年）における「アスペルガー障害」の削除をめぐる議論、近年の発達障害全般の医療化と薬物治療に関する議論などを挙げることができる。

精神疾患とは何か、精神疾患をどのように分類すべきか、どのような治療を提供すべきかという問題には、生物学的、医学的、心理的な問題が絡み合うだけでなく、社会的な要因も直接影響を及ぼしている。このような一つの領域では捉えることができない問題への対処には、様々な知の領域に足を踏み入れながらその前提と枠組みを問い直す哲学という知のあり方が適しているだろう。

最近では特にフィンランドで開発されたオープンダイアログ(OD)というアプローチに注目し、その研究を進めている。ODは、その名の通り「対話」を基盤に据えたアプローチであるが、診断を重視せず、投薬や入院を可能な限り避けるなどの特徴があり、従来の精神医療の実践の枠組みとは大きく異なっている。ODの研究は、精神医学の枠組みを問い直す作業でもある。

精神医療と人権

日本を含めた多くの国では、強制入院や強制治療など、精神疾患を診断された人の行動を制限する法律を制定している。そうした制限は、精神科医による判定を必要とするが、その知の基盤は必ずしも明確なものではない。どのようなふるまいを精神疾患の対象とし、行動制限の対象とするのか、その手続きはどのようなものであるのかは、国や地域、歴史によって大きく変動する。精神疾患の診断を受けた人の人権をどのように考えるのかは、その地域や国の人権一般に対する考え方に大きく依存し、逆に人権一般の捉え方や国のあり方を規定してもいる。精神医療と人権の問題は精神医学と精神医療の枠組みに大きくかかわる問題であり、精神医学の哲学の問題群の中でもその中核に位置するものの一つである。

連絡先

教授 石原孝二 14号館707B室 03-5454-6206

cishi08@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp

主な論文・書籍

- 石原孝二(2023) G.ドゥヴルー(Devereux)の ethnic psychosis と相補性の概念—学際性と多元主義—こころと文化 21(2), 139-145.
- 石原孝二・斎藤環編(2022)『オープンダイアログ 思想と哲学』東京大学出版会
- 石原孝二・斎藤環編(2022)『オープンダイアログ 実践システムと精神医療』東京大学出版会
- 石原孝二(2021) 診断と精神医学. 臨床精神医学 50(7): 681-686.
- 石原孝二(2020) 現象学的精神病理学と反精神医学を考える. 哲学雑誌, 134(807), 1-15.
- Kohji Ishihara (2019) Phenomenological Psychopathology of Common Sense and Medicalization: Blankenburg and Kimura on Schizophrenia and Depersonalization. *Thaumazein* (7), 21-37.
- 石原孝二(2019) 診断から対話へ：ニード適合型治療からオープンダイアログへの転換点. 臨床心理学 19(5), 546-550.
- 石原孝二(2018)『精神障害を哲学する：分類から対話へ』東京大学出版会、332p.
- 石原孝二・河野哲也・向谷地生良編(2016)『精神医学と当事者』（シリーズ精神医学の哲学3）、東京大学出版会.
- 石原孝二・信原幸弘・糸川昌成編(2016)『精神医学の科学と哲学』（シリーズ精神医学の哲学1）、東京大学出版会.
- Kohji Ishihara (2015) Learning from *tojisha kenkyu*: Mental health “patients” studying their difficulties with their peers. T. Shakespeare (ed), *Disability Research Today. International Perspectives*. London: Routledge, pp. 27-42.
- 石原孝二(2014) 精神医学における記述的方法と「機能不全」モデル：精神障害概念と「自然種」.科学哲学 47(2): 17-32.
- Kohji Ishihara (2014) Roboethics and the Synthetic Approach. A Perspective on Roboethics from Japanese Robotics Research. In F. Michael & B. Irrgang (eds.), *Robotic in Germany and Japan: Philosophical and Technical Perspectives*, Peter Lang.
- 石原孝二編 (2013)『当事者研究の研究』医学書院.
- S.ギャラガー、D.ザハヴィ(2011).『現象学的な心：心の哲学と認知科学入門』、石原孝二・宮原克典・池田喬・朴嵩哲訳、勁草書房

博士論文・修士論文のテーマの例

- 当事者研究の誕生（博士論文）
- 摂食障害の歴史社会学—摂食行動の逸脱はどのように語られてきたのか—（博士論文）
- エナクションの現象学：身体的行為としての事物知覚と他者知覚（博士論文）
- 臨床における不確実性への耐性（修士論文）
- 認知行動療法の哲学（修士論文）
- 社会モデルと合理的配慮——「障害学」の可能性と限界について（修士論文）

研究室メンバーと研究テーマ(2023年度)

博士課程学生、修士課程学生、研究生、あわせて10名ほどが在籍しています。研究テーマは、現象学、精神医学の哲学、医学の哲学、認知行動療法の哲学などです。

学生へ一言

本研究室では、哲学や現象学のほか、臨床心理学、医学などをバックグラウンドとしている大学院生が所属しています。また医療の専門職などとして働いている社会人学生や外国人留学生が所属するなど、多様なメンバー構成となっています。哲学や現象学を専門的に研究したい方のほか、精神医学や臨床心理学、障害に関する問題などに関して学際的な視点から研究したいと考えている方を歓迎します。

科学史・技術史・高等教育史



岡本拓司教授

岡本拓司 教授 Takuji Okamoto, Prof.

物理学史を中心に、19世紀から現代に至るまでの、日・欧・米の科学史を研究している。この時期の科学は技術に与えた影響も大きく、また技術の発展が科学に直接に関わってくる場合も多いので、電気技術など、技術の歴史も研究対象としている。さらに、科学や工学の展開は、高等教育機関の形態や社会において占める位置に強く規定される側面があるので、高等教育機関の歴史にも関心がある。

資料としてノーベル賞の選考資料（授賞から50年たつと研究者には公開される）を用いることがあり、その関連から医学史の研究も行っている。また、主として教育目的であるが、たとえば生命が脅かされるような危機的状況で科学技術の果たす役割についての検討を行っており、NBCテロ、大地震、新型コロナウイルス等についての調査と教材化も試みている。

一緒に勉強してくださる大学院生の皆さんは、岡本の専門の物理学史や技術史に近い方々が多い。しかし、科学史・技術史の個別の研究対象は、分野（物理学、化学…）、時代（古代、中世…）、地域（言語・文化等による区分）によって細かく特色づけられ、上記三つの要素が全く同じ対象を研究している人を見つけるのはなかなか難しい。二つでも重なれば共同研究さえ可能になるが、一つも重ならない場合でも「科学」や「技術」を対象にしていれば一緒に勉強することはできる。

以下では、なかなかまとめるところまで手が出ていないものも含めて、現在までに取り上げてきた対象のうちのいくつかについて簡単に記すことにする。

日本の近代化と科学技術

日本と科学技術の関わりは、産業や軍事への応用など、実

用面を主体として理解されることが多い。しかし、古くは長岡半太郎の土星型原子模型、やや時代が下ると湯川秀樹の中間子論など、日本が世界に誇る科学上の業績には、実用上の価値がそれほど高くないものも多い。そのような点に注目しながら、明治維新以来、日本の科学研究を支えた思想的な柱は何であったのかを、学問や教育の歴史全般を見渡しながら考察しようと考えている。その際、もちろん、科学技術の実用面での役割にも十分注意を払いながら、多様な科学技術の姿をとらえていくことを志している。また、いまのところ十分には検討できていないが、日本の旧植民地における科学技術の役割についても関心がある。



レーヴェンフックの顕微鏡を使ってみる（2005年7月、ユトレヒト大学で開催されたセミナーで）

ノーベル賞選考資料を用いた各国間の研究水準の比較

学生のころから、P. W. ブリッジマンという物理学者を研究の対象にしてきたが、この人物がノーベル賞を受賞した経緯を研究するため、ストックホルムでノーベル賞の選考資料の調査を行っていたところ、同資料が各国間の研究水準の比較に利用できるのではないかと思いついた。いまのところ、日本の科学研究に対する国際的な評価が、20世紀前半期にどのように変化していったかを検討している。ノーベル賞の受賞者は多くの推薦状を参考にして選考されるが、研究対象としている時期に、50年後に公開されると知って推薦状を書いた人物はもちろんいないので、日本関連のものに限らず、推薦状の内容は多くの興味深い情報を含んでいる。資料としては、研究水準の比較以外にも多様な用途が考えられる。

<http://hps.c.u-tokyo.ac.jp/staff/>

連絡先

教授 岡本拓司 14号館 309B号室 03-5454-6694
okamototakui@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

実験および機器の役割の(再)評価

科学の大きな特徴は、実験を行って情報を収集する点にある。しかし、資料として残されるのは、論文などの文書であるため、実験（必ずしも特定の「機器」が用いられるわけではない）を研究対象とすることは容易ではなく、また歴史的機器が残されている場合でも、文書のみを扱ってきた研究者には利用の方法が分からない場合も多い。岡本は幸いに駒場キャンパスに残されていた第一高等学校旧蔵の実験機器を整理する機会に恵まれ、いままで大学院学生の皆さんに助けて

いただきながら、歴史的実験機器に親しむことができた。また、学生時代から研究の対象としてきたブリッジマンという物理学者は、操作主義と呼ばれる一種の実験の哲学の提唱者でもあった。実験を行う学問として科学をとらえることにより、知識としての科学の特徴や、科学と技術の関わりを明らかにすることが可能になるものと考えている。

機器類の整理に携わるようになってから、駒場キャンパス内の駒場博物館などで機会を得て行う展示の企画・制作にも、機器を用いることが多くなった。

修士論文・博士論文の題目

- 1) ソヴィエト連邦における物理学哲学論争：1930－1941年
- 2) 電子技術総合研究所における走査型トンネル顕微鏡の開発：原子像はいかにして得られたか
- 3) 第一次世界大戦期における日本の国勢調査の目的の変遷
- 4) メートル副原器 No.20c の来歴—保管と使用の実態—

主な論文

- 1) ノーベル賞文書からみた日本の科学、1901年-1948年：物理学賞・化学賞、『科学技術史』3号(1999年)、87～128ページ
- 2) ノーベル賞文書からみた日本の科学、1901年-1948年：北里柴三郎から山極勝三郎まで、『科学技術史』4号(2000年)、1～66ページ
- 3) Uncertainty and Controllability: Bridgman, Dingler, and Dewey, *Historia Scientiarum*, 12:3 (2003), pp. 233-253.
- 4) アインシュタインが来る：大正11年、土井不曇理学士の恍惚と不安、『科学技術史』第9号(2006年)、67～85ページ

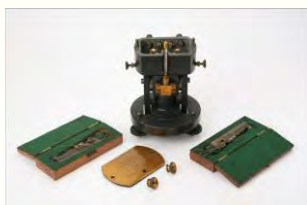
主な著書

- 1) 科学と社会：戦前期日本における国家・学問・戦争の諸相、サイエンス社、2014年
- 2) 近代日本の科学論—明治維新から敗戦まで—、名古屋大学出版会、2021年

学生へ一言

近現代を対象にしていると、文書に限らず多様な資料がまだまだ未発見のまま残されていることに気づきます。次々に新しい資料にぶつかると、整理や目録作成のためにいくら時間があっても足りないという状況になります。数行の文章に呻吟した末に論考をまとめるのも面白くはありますが、抱えきれないほどの資料から溢れ出る言葉を文章にするのも歴史研究の醍醐味です。時代に連れて変化する科学や技術の姿を正確にとらえることを可能にする資料の山が、あなたを待っています。

一高これくしょん(測量機器は情報・図形科学部会蔵)



弦線電流計(イギリス。1910年頃)



ブーソルエクリメートル(測量機器)



トランシット(測量機器)

Philosophy of Science 鈴木研究室

心の哲学、実験哲学、メタ哲学



鈴木貴之 教授

鈴木貴之 教授

Takayuki Suzuki, Prof.

鈴木研究室では、哲学的自然主義の立場から、常識的な世界観と科学的な世界観の関係にまつわる諸問題を研究している。現在は、意識のハード・プロブレムを中心とした心の哲学の諸問題、人工知能の哲学や精神医学の哲学といった心の哲学の応用問題、哲学という学問の本性に関するメタ哲学の問題を主な研究テーマとしている。

意識の問題

われわれがものを見たり音を聞いたりするときには、脳のさまざまな部位が活動する。それらの活動が意識経験の基盤であることは疑いようがない。しかし、なぜ特定の脳の活動が生じると特定の意識経験が生じるのだろうか。これは、意識のハード・プロブレムと呼ばれる問題である。

科学的な世界観のもとで意識のハード・プロブレムが解決可能かどうかを明らかにするには、さまざまな問題について考えてみる必要がある。意識の物質的基盤によって意識を説明することと、生命の物質的基盤によって生命を説明することのあいだには、本質的な違いはあるのだろうか。もし違いがあるとしたら、それは何に由来しているのだろうか。知覚、感覚、感情といった多様な意識経験には、何らかの共通性があるのだろうか。意識的な心的状態と無意識的な心的状態の本質的な違いはどこにあるのだろうか。これらの問いに答えることによって、意識を科学的に理解するための道筋が明らかになるかもしれない。

人工知能の哲学・精神医学の哲学

コンピュータ・プログラムは真の知能をもつことができるだろうか。真の自律型ロボットをつくることは可能だろうか。

これらの問題は、1980年代から90年代にかけて活発に議論されていたが、その後、人工知能研究そのものの停滞によって、下火になっていった。深層学習などの技術的進展によって人工知能研究が大きく前進し始めた現在、これらの問題はふたたび重要なものとなっている。

精神疾患は脳の異常なのだろうか。そうだとしたら、なぜ、薬物療法だけでなく心理療法や精神療法も効果を持つのだろうか。精神医学における多様な理論や方法論は、本当に共存可能なのだろうか。このような問題を考察する精神医学の哲学も、近年研究が活発になっている。

これらはいずれも、いわば心の哲学の応用問題である。心の哲学、あるいはその背景にある分析哲学の研究手法や研究成果を活用することで、その進展に貢献することができる。

メタ哲学

哲学が論じる問題は、過去2500年ほどのあいだそれほど変わっていない。そこには、誰もが認める進歩が見られるわけでもない。さらに、過去に哲学の一部とされてきた問題領域の多くは、現在では自然科学の一部となっている。このような歴史的経緯をふまえると、哲学という学問の本性に関して、さまざまな疑問が浮かぶ。哲学には固有の問題領域が存在するのだろうか、固有の研究手法は存在するのだろうか、哲学の問題に正解や進歩は存在するのだろうか、正解が存在するとしたら、どのような方法によってそれを発見できるのだろうか。哲学と人文科学者や社会科学の諸領域には、どのような共通点や相違点があるのだろうか。これらの問いは、心や道德などの問題領域でも経験的な研究が急速に進展しつつある現在、あらためて切実な問題となりつつある。認識論をはじめとする分析哲学の成果を援用しつつ、これらの問題の検討を通じて、哲学という学問そのものの本質について哲学的に考察するのがメタ哲学である。

その他の研究領域

以上の問題領域のほか、心の哲学(素朴心理学、心の理論、身体化された心など)、実験哲学(自由意志や幸福の実験哲学)、脳神経倫理学(自由意志と責任の問題)、科学論(近未来のテクノロジーと社会)の諸問題も研究している。

連絡先

教授 鈴木貴之 14号館 701A号室 5454-6200

tkykszk@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

主な著書

- 鈴木貴之『人工知能の哲学入門』勁草書房、2024年
- 鈴木貴之編『人工知能とどうつきあうか—哲学から考える』勁草書房、2023年（編著）
- 鈴木貴之編『実験哲学入門』勁草書房、2020年（編著）
- 榊原英輔・田所重紀・東畑開人・鈴木貴之編『心の臨床を哲学する』新曜社、2020年（編著）
- 鈴木貴之『100年後の世界—SF映画から考えるテクノロジーと社会の未来』化学同人、2018年（単著）
- 鈴木貴之『ぼくらが原子の集まりなら、なぜ痛みや悲しみを感じるのだろうか—意識のハード・プロブレムに挑む』勁草書房、2015年（単著）
- 信原幸弘・太田紘史編『シリーズ 新・心の哲学 II 意識篇』勁草書房、2014年（共著）
- 信原幸弘・原塑・山本愛実編『脳神経科学リテラシー』勁草書房、2010年（共著）
- 信原幸弘編『シリーズ 心の哲学 I 人間篇』勁草書房、2004年（共著）

主な原著論文

- 「分析哲学における新たな哲学方法論の可能性」『哲学雑誌』第136巻809号、pp.24-41、2022年
- The Evolutionary Origins of Consciousness: A Key to the Solution of the Hard Problem of Consciousness? *Annals of the Japan Association for Philosophy of Science*, 31: 55-73. 2022.
- 「深層学習の哲学的意義」『科学哲学』第53巻第2号、pp.151-167、2021年
- 「バイオサイコソーシャルモデルと精神医学の統合」『精神神経学雑誌』第120巻第9号、pp.759-765、2018年
- 「哲学における直観の信頼性」『中部哲学会年報』中部哲学会、第47号、pp.126-139、2016年
- 「意識のハード・プロブレムと思考可能性論法」『哲学』日本哲学会、第55号、pp.193-205、2004年
- 「心の理論」とは何か? 『科学哲学』日本科学哲学会、第35号、pp.83-94、2002年

学生へ一言

研究を進めるうえでの私の基本方針は、分析哲学的な明晰で厳密な論証を行うことと、関連する経験科学の知見を十分に参照することの両方を重視すること、そして、哲学の問題に内在的な視点と外在的な視点の両方をもって研究を進めることです。心の哲学の諸問題に関心のある人はもちろん、認知諸科学の理論的・方法論的問題に関心のある人、質問紙調査などの手法を用いて哲学の諸問題に新たな切り口から挑もうという人、哲学という学問の存在意義自体に疑問をもつ人など、さまざまな人の参加を歓迎します。

研究室メンバー

2024年4月現在のメンバーは博士課程の学生6名と修士課程の学生3名です。大学院生の研究テーマはおもに心の哲学で、そのほか倫理学、形而上学、生物学の哲学などを研究している学生が所属しています。

Philosophy of Science 藤川研究室

言語哲学、意味論、語用論、形而上学



藤川直也 准教授

藤川直也 准教授

Naoya Fujikawa, Assoc. Prof.

言語、特に意味の問題に言語哲学と言語科学の両方の観点から取り組んでいる。固有名の意味論・語用論を出発点に、言語諸科学における意味概念についてのメタ意味論、言語の社会的・倫理的側面に関する応用言語哲学、非古典論理の形而上学と形式意味論への応用などをテーマとして研究を進めている。

固有名の意味の問題

人や建造物には大抵、名前がついている。そして私たちは日々そうした名前を難なく使っている。にもかかわらず、固有名の意味はいったいなんなのかという問いに答えるのは容易ではない。実際その問いは多くの言語哲学者たちを悩ませてきた（カプランの言葉を借りれば、固有名というのは、乗るのは簡単だが乗り方を正確に説明するのは難しい自転車のようなものである）。現代言語哲学の古典中の古典であるフレーゲの「意義と意味について」やラッセルの「表示について」で考察されたいくつかの問題—命題的態度報告文での固有名の代入の問題や、存在しないものの名前の問題—はいまだに決着がついていない。最近では、固有名が述語的に使われるケースをどう扱うのかという問題が盛んに論じられている。さらには固有名をめぐる問題は実験哲学においても重要な役割を担っている。

言語哲学の「自然化」

自然言語の意味や使用を対象とする哲学的探求は、形式意味論と語用論という研究分野へと発展し、それらはいまだに理論言語学の一部となっている。上で見た固有名の意味の問

題に取り組むには、こうした自然言語の経験探求としての意味論・語用論という観点が不可欠である。意味論と語用論は、経験科学と哲学が生産的な仕方でも交流する研究領域である。言語学と言語哲学の共同作業はときに、哲学者が提供した基礎的な道具立てや枠組みを、言語学者がさまざまな具体的な言語現象に適用するという形をとる。自然言語に対するモデル論的意味論はモンタギューの仕事の端緒とする。グライスの会話的推意の理論は現代の語用論の基礎である。より最近の事例としては、表出表現の意味論はカプランの仕事に基づいているし、あるいはファインの truth-maker semantics はこれから意味論の新たな枠組みとなるかもしれない。

意味論と形而上学

意味論の基礎に関する哲学者たち仕事は、ある種の形而上学的、すなわち、自然言語の意味論にとってなにが基礎的な存在者なのかという観点から考察される形而上学と見ることができる。自然言語形而上学と呼ばれるこの形而上学は、自然言語の意味を形而上学理論のデータとすることで、その他の形而上学とは幾分異なる評価基準を私たちに与えてくれる。たとえば、しばしば異様な存在論と見なされるマイノング主義を、自然言語の体系的意味論の中に組み込むことで自然言語形而上学の観点から見直す、ということも可能だ。

意味の科学とメタ意味論

言語に関する現代の科学的探求は多岐にわたるが、異なる理論的アプローチには、方法論的な違いがあるだけでなく、「意味」のような基礎概念の理解においても食い違いも見られる。異なる分野で用いられている意味概念を精査し、言語的意味とはいったいなんなのかについて、言語科学の諸理論が共有可能な（もしかすると複数の）見方を提示するというメタ意味論的探求は、言語哲学における重要な課題の一つであろう。

応用言語哲学

時に人は平気で嘘をつき、適当なデタラメを並べたりする。ヘイトスピーチは直接人々を傷つけ、同時に差別的構造の維持・強化に寄与する。フェイクニュースやプロパガンダは民主主義にとっての深刻な脅威だ。このように実社会には言葉が関わる様々な実践的問題が存在する。従来の言語哲学があまり扱ってこなかったこうした実践的課題に取り組む応用言語哲学とでも呼ぶべき研究が近年盛んになっている。応用言語哲学は、その進展によっては、従来の言語哲学における基礎概念・理論の見直しが必要とされるかもしれないという点でも重要である。

連絡先

准教授 藤川直也 14号館 705A室 5454-6202

cfjnaoya@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

主な著書

藤川直也 (2014) 『名前に何の意味があるのか—固有名の哲学—』、勁草書房

主な原著論文

- Casati, F. and N. Fujikawa (2021). Against Gabriel: On the Non-Existence of the World, in Bernstein, S. and T. Goldschmit (eds.) 2021. *Non-Being: New Essays on the Metaphysics of Nonexistence*, Oxford: Oxford University Press, pp. 69-81.
- Deguchi, Y and N. Fujikawa (2021). Dialetheism in the Work of Nishida Kitaro, in Deguchi, Y., J. Garfield, G. Priest and R. Sharf (eds.) 2021. *What Can't Be Said: Paradox and Contradiction in East Asian Thought*, Oxford University Press, pp. 123-142.
- Fujikawa, N. (2020). Hallucination as Perceiving Nonexistent Objects: Noneist Direct Realism of Perception, in D. Hyde (ed.), *Noneist Explorations II: The Sylvan Jungle - Volume 3*, Synthese Library 432, Springer, pp. 391-420.
- Priest, G., N. Fujikawa, F. Casati and F. Berto (2020). Modal Meinongianism and Object Theory: a Reply to Bueno and Zalta, *Australasian Journal of Logic*, 17:1, 1-21.
- Fujikawa, N. (2018). 'Exploring Routley's Nuclear Meinongianism and Beyond', *Australasian Journal of Logic*, 15:2, 41-63.
- Casati, F. and N. Fujikawa (2017). 'Nothingness, Meinongianism and Inconsistent Mereology', *Synthese*, online first publication.
- Fujikawa, N. (2016). 'Coordination and Anaphora in Attitude Contexts', *Proceedings of the Thirteenth International Workshop of Logic and Engineering of Natural Language Semantics (LENLS 13)*, pp. 27-40.
- Casati, F. and N. Fujikawa (2016). 'Nonexistent Objects as Truth-Makers: Against Crane's Reductionism', *Philosophia*, 44: 2, 423-434.
- Casati, F. and N. Fujikawa (2015). 'Better than Zilch?', *Logic and Logical Philosophy*. 24, 255-264.
- Fujikawa, N. (2014). 'The Semantics of Intensional Transitive Verbs in *Towards Non-Being*', *Contemporary and Applied Philosophy*, 6, 1-15.

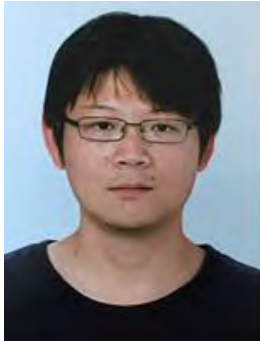
学生へ一言

言語哲学、言語科学についての専門的研究を軸足としつつ、その他の分野にも関心のアンテナを張りながら研究していきましょう。

研究室のメンバー

2024年4月現在の研究室のメンバーは、修士課程の学生が2名、博士課程の学生が3名、日本学術振興会特別研究員(PD)が1名です。言語哲学、心の哲学、知覚の哲学、形而上学などのテーマで研究を進めています。

イスラーム科学史



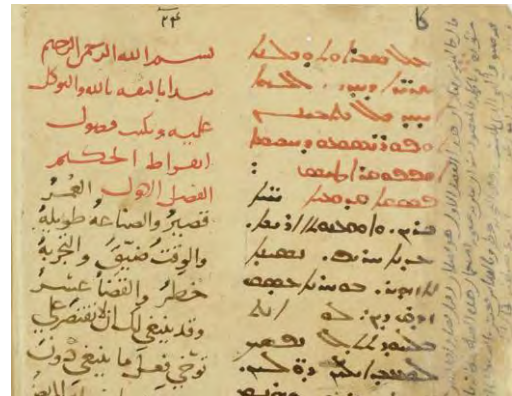
三村太郎 准教授

三村太郎 准教授 Taro Mimura, Assoc. Prof.

科学史上重要な位置を占めているにも関わらず一次資料の大半が写本のまま残されており研究課題が数多く存在するイスラーム文化圏における科学史に関心を持ち研究を行っている。とりわけ、ギリシャ語科学文献のアラビア語訳といった翻訳活動が科学史上で果たした役割を、アラビア語写本の文献学的研究から明らかにしようとしている。

ギリシャ語科学文献のアラビア語翻訳活動

イスラームによる支配体制を確立した初期アッバース朝において、大量のギリシャ語科学文献がアラビア語に翻訳された。その代表的な翻訳者がフナイン・イブン・イスハーク（830頃活躍）である。彼は、ギリシャ医学の中心人物のひとりガレノスの著作の大半をアラビア語に翻訳した。さらにフナインは息子のイスハーク・イブン・フナイン（830頃～900頃）や数人の親族たちと翻訳サークルを結成し、大量のギリシャ語科学文献のアラビア語訳を作成した。その結果、イスラーム文化圏では、アラビア語翻訳文献のみでギリシャ科学を学ぶことのできる土壌が出来上がった。このように、アッバース朝でのアラビア語翻訳活動はイスラーム科学史にとって重要である。にもかかわらず、アラビア語訳活動の全貌はつかめていない。その主たる理由は、主要なギリシャ語科学書のアラビア語訳のテキストが公開されていないためである。そのため、アラビア語翻訳活動の実態を解明しようと、アラビア語訳のテキストの確定を進めてきた。（例えば、医学教育で盛んに用いられたヒポクラテス『箴言』とそれに対するガレノスによる注釈書のフナインによるアラビア語訳の本文校訂作業を行ってきた。）今後は、フナインの翻訳サークルが編んだアラビア語訳文献群を校訂し、その内容をギリシャ語原典と比較し詳細に分析することで、彼らのアラビア語翻訳技術を明らかにしていきたい。



（上図は、ヒポクラテス『箴言』シリア語アラビア語対訳写本の冒頭部分。パリ国立図書館所蔵。）

天文学者としてのイブン・ハイサム

さらに、以上のアラビア語翻訳活動に支えられたイスラーム文化圏での科学研究活動に関しても研究してきた。例えば、近年はイブン・ハイサム（965～1040頃）によるギリシャ天文学研究の展開に関心を寄せている。

イブン・ハイサムは、ラテン名アルハゼンとして知られており、彼の『光学』が十二世紀頃ラテン語に翻訳されることで、ヨーロッパにそれまで存在しなかった実験に基づく数理的科学的な光学研究がもたらされ、その後のヨーロッパでの光学研究は大いに発展した。イスラーム科学史における彼の業績を総覧すると、その研究対象は光学にとどまらず、むしろ数学や天文学に関して数多くの著作を残したことに気づく。とりわけ、天文学書『世界の構造について』はプトレマイオスの惑星モデルを忠実に用いてそれを立体化する仕方をはじめめて明示したのとして知られている。他方、イブン・ハイサムは『プトレマイオスへの疑問』という別の著作において、プトレマイオス惑星モデルに含まれるアリストテレス自然学に反する要素を多数指摘することで厳しくプトレマイオスを批判した。

ここで『プトレマイオスへの疑問』にみられるイブン・ハイサムのプトレマイオスに対する態度が『世界の構造について』での態度と全く異なることは興味深い。彼が天文学研究を進める中でプトレマイオスへの態度を大きく変化させたことはたしかである。そこで、彼の天文学書群を詳細に検討することで、プトレマイオス観の変遷を跡付けようとしている。このケース・スタディーを通じて、イスラーム文化圏でのギリシャ科学研究の実際について考えている。

連絡先

准教授 三村太郎 14号館 309A号室
taromimura@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

主な著書

1. 三村太郎『天文学の誕生—イスラーム文化の役割』岩波科学ライブラリー、岩波書店、2010.
2. F. Jamil Ragep and Taro Mimura eds. and trs., *Epistles of the Brethren of Purity: On Astronomia (an Arabic Critical Edition and English Translation of EPISTLE 3)*, Oxford; New York: Oxford University Press in association with the Institute of Ismaili Studies, 2015.

主な原著論文

1. Taro Mimura, "Barhebraeus between Ptolemy and Ṭūsī: the Influence of Ṭūsī's Hay'a Works on Barhebraeus' Ascent of Mind", *Historia Scientiarum* 33-1 (2023), 25-44.
2. Taro Mimura, "The Attribution of an Arabic Commentary on Naṣīr al-Dīn al-Ṭūsī's Taḥrīr al-Majisī to Shams al-Dīn al-Samarqandī", *Nazariyat: Journal for the History of Islamic Philosophy and Sciences* 8-2 (2022).
3. Taro Mimura, "Greek Scientific and Philosophical Knowledge as a Survival Tool for a Religious Minority at the Abbasid Court: The Case of Thābit ibn Qurra", 『上智アジア学』 39 (2021).
4. Taro Mimura, "Ghulāms (Slave Boys) and Scientific Research in the Abbasid Period: The Example of the Amājūr Family", *Historia Scientiarum* 29 (2020), 182-197.
5. 三村太郎「イスラームと科学技術」、金子務監修・日本科学協会編『科学と宗教—対立と融和のゆくえ』中央公論新社、2018、115-137.
6. Taro Mimura, "Too Many Arabic Treatises on the Operation of the Astrolabe in the Medieval Islamic World—Athīr al-Dīn al-Abharī's Treatise on Knowing the Astrolabe and His Editorial Method", in Rodríguez-Arribas, J., Burnett, C., Ackermann, S., & Szpiech, R. eds., *Astrolabes in Medieval Cultures*, Leiden: Brill, 2018, pp. 367-405.
7. Taro Mimura, "Comparing Interpretative Notes in the Syriac and Arabic Translations of the Hippocratic *Aphorisms*", *Aramaic Studies* 15 (2017), 183-199.
8. Taro Mimura, "A Reconsideration of the Authorship of the Syriac Hippocratic *Aphorisms*: The Creation of the Syro-Arabic Bilingual Manuscript of the Aphorisms in the Tradition of Ḥunayn ibn Ishāq's Arabic Translation", *Oriens* 45 (2017), 80-104.

学生へ一言

ぜひ一緒にいろいろな言語で書かれた科学文献を読みましょう。

研究室のメンバー

2024年4月現在での研究室のメンバーは、博士後期課程の学生が3名(和算史、ヨーロッパ錬金術史、イスラーム天文学史)、修士課程の学生が2名(ヨーロッパ錬金術史、ヨーロッパ医学史)です。

医学史



鈴木晃仁 教授

鈴木晃仁 教授 Akihito Suzuki, Prof.

医学史という学問の視点と主題は、20世紀の後半から、大きく変化した。それまでの古い医学史の主な主題は、医師などの医療者であったが、そこに新たに疾病と患者が付け加わり、疾病・医療者・患者の三者が構成する全体を医療と呼ぶようになった。この変化の間接的な背景にはミシェル・フーコーや社会史が存在している。そして、政治・経済・思想・文化・環境など、社会全体に大きな影響を与える複数の要因が医学史によって取り上げるようになった。これが、「新しい医学史」と呼ばれている大きな流れである。現在研究されている医学史においては、時代・地域・学問的な方法論など、広さと深さと多様性を持っている。

疾病・医療者・患者の三者が作り出す医療

医療は、疾病・医者・患者の三者を考察しなければならないという視点。これはヒポクラテス文書に遡る概念であり、「ヒポクラテスの三角形」と呼ばれている。疾病を理解する上で重要な医学と環境の立場、医者などの医療者を把握する上で大切な思想や経済の視点、そして患者の多様な反応と対応を社会とつなげてつかむ着眼点。これらが医学史の中核である。その周辺には、本当にさまざまな方向の研究が存在する。内政と外交の政治学、生活水準や病原体の移動に影響を与える経済学、政策や倫理などを左右する思想・哲学、文学や芸術などの文学・芸術学、自然と人工の双方である環境学などが、三者から構成される医療に大きな影響を与える。そのため、医学史は、政治史、経済史、思想史、文化史、環境史などと深い関係を持つとともに、大学や研究機関などに広がっている。また、政治学や経済学などと結びつく医療人文学や医療社会科学の重要な要素になっている。医学史を学ぶことは、医学系・薬学系はもちろん、人文系、社会科学系のさまざまな領域の中で大きな意味を持つことになる。そのような多様性を意識しながら、講義とセミナーを設計してある。

精神医療と感染症

その中で、筆者が主に研究をしてきた対象は、精神医療と感染症である。地域と時代は、精神医療が18世紀から19世紀のイングランド・スコットランドと19世紀後半から20世紀中葉までの日本、感染症は19世紀後半から20世紀中葉の日本である。それを対象にして、思想史、行政史、数量的な経済史などを使いながら、著書や論文を発表してきた。史料としては、医学書や医学論文などの基礎的な史料や、国際的・全国的な統計のデータベース、より局地的な市や村などの範囲における疾病記録、そして患者が前面に出てくる病床日誌などを用いている。特に、精神医療における病床日誌は、疾病・医師・看護師・患者たちが、急速な近代化、関東大震災、東京大空襲を経験した中での医療に関する史料であり、近年では、精神病院がどのような環境におかれているのかという環境の視点、日本語とドイツ語の双方が用いられている病床日誌などの言語性、芸術作品に登場する疾病などにも注目している。それ以外にも、まだ使ったことがない多くの題材、視点、方法論があるので、学生は積極的にそのような手法を身につけてほしい。

大学での講義とセミナー

講義・セミナーのいずれにおいても英語が用いられる。教師は英語で講義をし、学生も英語で対応することが基本概念である。講義とセミナーの中心は、疾病・医療者・患者である。それぞれを主題にして、中級の講義と中・上級のセミナーを行う。いずれも古代から現代までをカバーするが、やはり1800年付近から現在までの近現代が中心となる。学生から見ると、専門職につくうえで、古代から現代まで医療の大きな枠組みとローカルな分析を知っていることは、大きなメリットになるだろう。

教師が用いる言語と、テキストが書かれている言葉、学生諸君のディスカッション、毎週提出する1,000語ほどのエッセイはいずれも英語である。多くの学生はもともと英語ができるだろうし、できない学生も、最初の数週間は英語を書くことができない経験をするだろうが、すぐにプロフェッショナルな英語を書く方向に向かっていることを実感できるだろう。また、英語でのディスカッションの能力についても、毎週積極的に参加すれば、英語で発言する力を身につけることができるだろう。

連絡先

教授 鈴木晃仁 大学院人文社会系研究科

附属死生学・応用倫理専門課程

akihitos@l.u-tokyo.ac.jp

主な著書

1. *Reforming Public Health in Occupied Japan, 1945-52: Alien Prescriptions?* with Chris Aldous (London: Routledge, 2011)
2. *Madness at Home: The Psychiatrist, the Patient and the Family in England 1820-1860* (Berkeley: University of California Press, 2006)

主たる編集雑誌

1. Special Issue Editor, with Wen-Ji Wang, "History of Psychiatry and Mental Illness in East Asia in the Twentieth Century", in *History of Psychiatry*, vol. 33, issue 3 (2022).
2. Special Issue Editor, with Takabayashi Akinobu, "Life, Science, and Power in History and Philosophy", *East Asian Science, Technology and Society: An International Journal*, vol.13, number 1 (2019).

主たる論文

1. 鈴木晃仁・鈴木淳『関東大震災と東大医学部第二外科 東京大学ヒューマニティーズセンター オープンセミナー第57回より』 <https://hmc.u-tokyo.ac.jp/ja/booklet/>
2. "Imperial Psychiatry of Japan and Its Practice in Tokyo: Two Korean Immigrants in a Psychiatric Hospital c.1920-c.1945", *História, Ciências, Saúde-Manguinhos*, 29(2022)
3. "Psychiatric Hospital, Domestic Strategies and Gender Issues in Tokyo c.1920-1945", *History of Psychiatry*, 33(2022)
4. "Public Health, Laboratory Experiment, and Asymptomatic Carriers in Japan, ca. 1920–1950", *East Asian Science and Technology Studies*, 13(2019), 39-55.
5. "Voices of Madness in Japan: Narrative Devices at the Psychiatric Bedside and the Modern Literature", in *The Routledge History of Madness and Mental Health*, edited by Greg Eghigian (London: Routledge, 2017), 245-260.
6. "Psychiatric Surveys and Eugenics in the Family and Community in Japan". in *Zentrum und Peripherie in der Geschichte der Psychiatrie*, edited by Thomas Mueller (Stuttgart: Franz Steiner Verlag, 2017), 189-201

学生へ一言

疾病・医療者・患者の三者が、政治・経済・思想・文化・環境などの中で作り出される、大きな構造と小さな社会。そこでダイナミックに動いていき、患者個人などが死や生にいたる歴史。それらを勉強して、多くの専門職にふさわしい力を身につけてください。

研究室のメンバー

坂本美里(大学院博士課程)、片山紀子(大学院博士課程)、Jing SUN(ペンシルヴェニア大学)、Tianyuan HUANG (コロンビア大学)、Isaac C.K. TAN(コロンビア大学)

High Energy Theory

B グループ: 素粒子論

●グループ概要

B グループは素粒子論および関連する理論物理学を研究する以下の研究室から構成されます。

大川 祐司 研究室 (素粒子論・超弦理論・場の量子論)

菊川 芳夫 研究室 (素粒子論・場の量子論)

野海 俊文 研究室 (素粒子論・宇宙論・弦理論)

大学院生の受け入れは研究室ごとに行っていますが、セミナーや文献紹介、勉強会などの研究活動は研究室の垣根を超えて共同で行なっています。また、研究分野の性質を踏まえ、助教を特定の研究室に紐づけることはせず、B グループ所属の独立助教としています。現在、奥田拓也助教(素粒子論)が所属し、2024 年度秋に新たな助教 1 名の着任を予定しています。以上のスタッフに加え、ポスドク研究員 3 名 (いずれも学振 PD)、博士課程大学院生 8 名 (うち受託生 2 名)、修士課程大学院生 4 名が在籍しています。

●グループの特色

駒場の素粒子論グループは、伝統的に場の量子論(素粒子標準模型の基礎となる理論)と弦理論(量子重力理論への有力なアプローチ)の研究で強みを発揮してきました。詳細は各研究室の紹介欄で述べますが、場の量子論や弦理論の基礎研究、それに根ざした素粒子論、重力理論、宇宙論の研究、ハドロン物理の理解に不可欠なゲージ理論の非摂動的解析手法の研究などを行なっています。場の量子論と弦理論という共通言語を核として互いに刺激しあうことで、大学院生を含むそれぞれの研究者が自身の問題を追究し、新たな研究テーマを発掘する、そのような研究グループを目指しています。

●グループの活動

学期中は、国内外の研究者を招いて様々な研究テーマについて発表を聞き討議するセミナー、グループメンバーが最新の進展を紹介する文献紹介をそれぞれ毎週開催しています。セミナーと文献紹介がグループの中心的な活動となっており、大学院生も早い時期から議論へ積極的に加わることが期待されています。これらに加えて、メンバー自身の研究発表や勉強会等も随時行われています。

日々の研究活動においてもグループが大きな単位となっています。大学院生やポスドク研究員のオフィス、議論用のセミナー室などを共有しているほか、歓送迎会や遠足などのレクリエーション活動もグループ内で行なっています。研究室の垣根を越えて日々交流し、議論や研究をすることを奨励しています。また、グループの運営は大学院生にも役割の一部を分担して行なっています。



2023 年度の新入生歓迎会より

●大学院生の進路

過去約 10 年の実績では、修士課程修了者の約 6 割が博士課程へ進学しています。博士号取得者の約半数が研究員等として国内外の大学・研究機関に、約半数が企業等に就職しています。企業での就職先としては、金融保険業やコンサルティング業、量子技術関係などが近年増えています。そのほか、システムエンジニアや公務員として活躍されている方もいます。

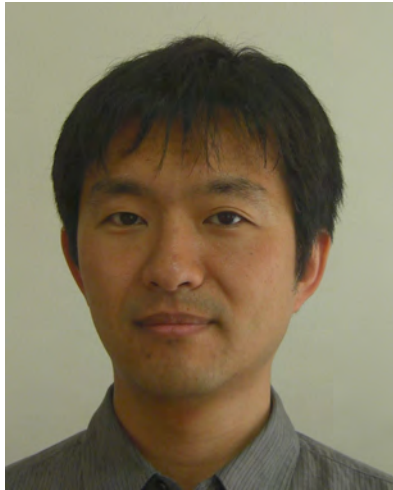
●博士論文・修士論文のテーマ

- 1) Quantum Simulation of Finite Temperature Schwinger Model
- 2) dS/CFT correspondence for heavy scalar field
- 3) Arf invariant in two-dimensional conformal field theories and partition functions of U(1) Chern-Simons theory on lens spaces
- 4) Scale-dependent effects on the inflationary dynamics in asymptotically safe gravity
- 5) De Sitter 空間における自由スカラーの準固有モード展開
- 6) Kennedy-Tasaki 変換とその 3+1d 1-form 対称性への拡張
- 7) 重力の正準形式と T^2 deformation
- 8) 格子, ゲージ化, エマナント対称性
- 9) 量子重力理論における von Neumann 代数
- 10) 格子模型, 連続場の理論における広義の対称性
- 11) 量子ブラックホールの情報喪失問題
- 12) ホモトピー代数を用いた場の量子論の再構成



奥田拓也助教 (素粒子論)

超弦理論の非摂動的定式化に向けて



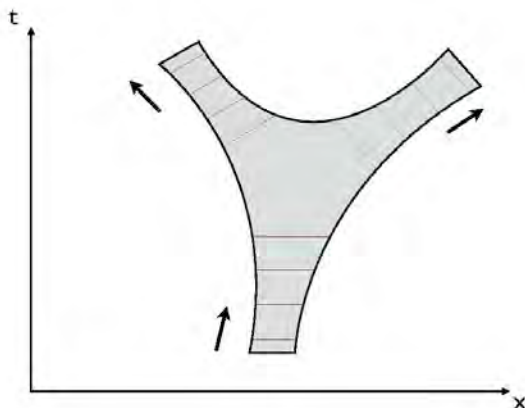
大川祐司教授

大川祐司 教授 Yuji Okawa, Prof.

一般相対性理論と量子力学をひとつの理論的な枠組みの中で矛盾なく記述することは、現在の理論物理学における最も重要な課題のひとつです。超弦理論はこの難問に対する重要な手がかりを与えると期待されていますが、摂動的にしか定義されていない未完成的な理論であり、その非摂動的な定式化に向けての研究を行っています。特に近年は弦の場の理論を集中的に研究しています。

弦理論の基本的な自由度は何か？

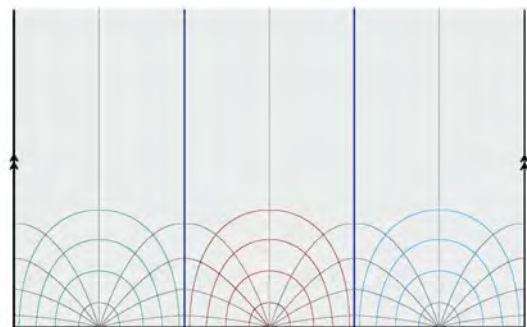
弦理論は、素励起が粒子的ではなく、1次元に広がった弦のようにふるまうと考える理論です。例えば次のファインマン図は、ひとつの弦が2つに分裂する過程を表わしています。



場の量子論には非摂動的な定義があり、摂動論で使うファインマン図の規則はその定義から導かれるものですが、弦理論ではこのファインマン図の規則が与えられているだけで、それが何から導かれるのかは分かっていません。これが弦理論が摂動的にしか定義されていないという意味です。すなわち、弦理論の基本的な自由度は何なのかが分かっていないのです。

弦の場の理論

弦理論の非摂動的な定式化に向けてのひとつの自然なアプローチとして、弦理論の摂動論を再現するような弦の場の作用を構成するということが考えられ、そのような理論は弦の場の理論と呼ばれています。弦の異なった振動状態は無限種類の異なった粒子を表わし、弦の場の理論の運動方程式は無限種類の無限個の場が無限回の微分を含む非局所的な相互作用をする非線形な連立方程式になります。とても手に負えないような非常に複雑な系ですが、私の友人でもある Schnabl が2005年に運動方程式の解析解の構成に成功しました。Wittenがこの運動方程式を書き下したのが1986年ですから、約20年を経て初めて構成された解析解です。



この解析解の構成の際に重要な役割を果たしたのは、共形場の理論を用いた弦の場の理論の記述です。上の図は、先ほどのファインマン図を共形場の理論の対称性である等角写像を用いて座標変換したものです。左右の半直線は同一視されています。

<http://okawa.c.u-tokyo.ac.jp/>

連絡先

教授 大川 祐司 16号館 321A号室

okawa@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

弦の場の理論における解析的手法の発展

この座標系では、赤、青、緑の線で表わした弦の運動がそれぞれ短冊状の領域で表わされ、複雑な相互作用が短冊を張り合わせたりすることで視覚的に理解できます。これまでこのような解析的手法を開発・整備し、Schnabl による解析解の構成以来、急速に進展している弦の場の理論の研究に貢献してきました。2007 年には米国マサチューセッツ工科大学 (MIT) や米国ニューヨーク州立大学のグループとの共同研究で、新たな解析解の構成に成功しました。さらにそれまでは

単純化されたボゾニックな弦理論でしか構成されていなかった解析解の超弦理論への拡張に、Erler というやはり友人でもある若手研究者と同時期に独立に世界で最初に成功しました。現在、このような世界最先端のテクノロジーを使って、世界各国の共同研究者と議論しながら弦の場の理論の研究を進めています。そのほか過去には行列模型や非可換幾何学に基づくゲージ理論などの研究をしており、弦理論の非摂動的定式化に関して幅広い興味を持っています。

主な原著論文

- 1) H. Kunitomo and Y. Okawa, "Complete action for open superstring field theory," *PTEP* 023B01 (2016).
(日本物理学会第22回論文賞受賞)
- 2) Y. Okawa, "Comments on Schnabl's analytic solution for tachyon condensation in Witten's open string field theory," *JHEP* 0604, 055 (2006).
- 3) N. Berkovits, Y. Okawa and B. Zwiebach, "WZW-like action for heterotic string field theory," *JHEP* 0411, 038 (2004).
- 4) Y. Okawa and H. Ooguri, "Exact solution to the Seiberg-Witten equation of noncommutative gauge theory," *Phys. Rev. D* 64, 046009 (2001).
- 5) Y. Okawa and T. Yoneya, "Multibody interactions of D particles in supergravity and Matrix theory," *Nucl. Phys. B* 538, 67 (1999).

学生へ一言

私は駒場素粒子論研究室の出身で、その後米国カリフォルニア工科大学 (Caltech) で3年間、続いて米国マサチューセッツ工科大学 (MIT) で3年間、ポスドクとして経験を積み、さらにドイツのハンブルクにある DESY という研究所で1年間を過ごしてから地球を1周して駒場に戻ってきました。超弦理論に興味のある方は、ぜひ私の研究室の扉を叩いて下さい。場の理論と弦理論の基礎をしっかりと身につけ、小さな問題でも良いですからそのことについては世界中の誰にも負けない、というところまでつきつめて博士論文を書き、その実績と経験を手に世界に旅立ち、今までと違う環境で研究の幅を広げて行って欲しいと思っています。そういう意欲のある学生のみなさん、ぜひ一緒に研究しましょう。

素粒子論・場の量子論（格子ゲージ理論）



菊川芳夫 教授

菊川芳夫 教授 Yoshio Kikukawa, Prof.

素粒子の標準模型によれば、相互作用を媒介するゲージ粒子も、物質の基本単位をなすフェルミ粒子も、素粒子は質量ゼロの場によって記述される。ゲージ場はゲージ対称性によって、物質場（フェルミオン）はカイラル対称性によって、質量項が禁じられていて、素粒子の質量は、これらの対称性が自発的に破れることによって有効的に生じる。

この質量生成の機構を担うヒッグス場の励起状態、すなわちヒッグス粒子と見なされる新粒子の実験的証拠が2012-2013年について発見されたが、ヒッグス機構の背後にあるダイナミクスや対称性の解明は未だになされていない。

また自発的に破れたゲージ対称性は、宇宙初期の高温状態では回復した状態にあると考えられ、この相転移のダイナミクスはヒッグス機構と密接に関係してくる。特に、一次相転移が起きる場合には、相転移に伴う非平衡過程によってバリオン数非対称性が生成される可能性がある（電弱バリオンジェネシス）。

このような視点から、本研究室では、質量の生成機構の本質的な解明を目指して、カイラルゲージ対称性とその実現に関する基礎的な研究を行っている。

カイラルフェルミオンの魅力

カイラル対称性によって質量項を禁じられると、フェルミオンのスピン右巻き成分と左巻き成分は全く独立に振る舞うようになる。例えば、右巻き成分の電子を、観測者が追い越せば、左巻き成分に見えるから、電子の右巻き、左巻き成分

は互いに独立でないことがわかる。しかし、光速で運動する質量ゼロのフェルミオンは決して追い越されることはない。この”カイラル”なフェルミオンが、ゲージ場と相互作用すると、量子的効果によって、真空凝縮、ゲージ対称性の自発的破れ、フェルミオン数（バリオン数）の生成、質量ゼロの複合フェルミオンの出現などの興味深い現象が起こる可能性が指摘されている。SU(3)xSU(2)xU(1)ゲージ対称性に基づく素粒子の標準模型や大統一模型(SU(5) Georgi-Glashow 模型など)は、カイラルゲージ理論の代表例になっている。(次項の図を参照のこと。)しかし、このような理論の力学的な可能性を探求するためには、カイラルゲージ対称性を明白に保つ、場の量子論の非摂動的な定式化が必要になる。

カイラルゲージ理論の非摂動的な構成にむけて —格子ゲージ理論におけるカイラル対称性—

格子ゲージ理論は、長さの最小単位として格子間隔 a を導入して、時空を格子とみなし、格子点やリンクの上に場の自由度を配して、あたかもスピン系のように、ゲージ場の量子論を構成・解析する手法である。格子ゲージ理論は量子色力学を記述する SU(3)ゲージ理論(QCD)の構成的な定義を与え、クォークの閉じ込めの一つの理論的な理解を与えることができる。

格子ゲージ理論には、カイラル対称性に関する理論的困難のあることが知られていた(Nielsen-Ninomiya, 1981)が、近年、Ginsparg-Wilson 関係式を満足し、かつ、ゲージ共変で局所的な格子 Dirac 演算子が構成された(Neuberger, 1998)ことにより、格子上でも厳密なカイラル対称性を実現できるようになった。この枠組みでは、さらに、カイラルゲージ理論の構成が可能になっている。既に、標準模型の一部、SU(2)xU(1)ゲージ対称性に基づく電弱統一模型(Weinberg-Salam model)については、格子定式化が得られていた(Kadoh-Kikukawa, 2009)が、その後、SO(10)に基づいて、大統一理論や標準模型のカイラルゲージ理論の定式化も可能なことが明らかになっている (Kikukawa, 2017)。これらの定式化は、宇宙初期のバリオン数非対称性の生成に関する研究に応用できると期待される。

これらの定式化を用いて、標準模型や大統一模型のカイラルゲージ理論の力学的性質を明らかにすることを目指して、研究を進めている。

<http://hep1.c.u-tokyo.ac.jp/~kikukawa/>

連絡先

教授 菊川芳夫 16号館325A号室

kikukawa@hep1.c.u-tokyo.ac.jp

**SO(10) Chiral Lattice Gauge Theories
with Overlap Weyl fermions/the Ginsparg-Wilson relation**

SU(3)xSU(2)xU(1)xU(1)_{B-L}

(3, 2)_{1/6} (1, 2)_{-1/2}
(3*, 1)_{-2/3} (3*, 1)_{1/3} (1, 1)₁ (1, 1)₀

SU(5)xU(1)_Q

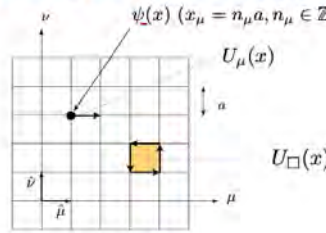
(10)₁
(5*)₋₃
(1)₅

SU(4)xSU(2)xSU(2)

(4, 2, 1)
(4*, 1, 2)

SO(10)

(16)



Overlap Weyl fermions !

Action and Path Integral measure

$$S_G = \frac{1}{g^2} \sum_{x, \mu, \nu} \text{ReTr} (1 - U_{\square}(x))$$

$$S_W = \alpha^4 \sum_x \bar{\psi}(x) D \psi(x)$$

$$\gamma_5 D + D \gamma_5 = 2a D \gamma_5 D$$

$$\bar{\psi}_-(x) = \hat{P} \psi(x) \quad \bar{\psi}_+(x) = \bar{\psi}(x) \hat{P}_+$$

$$\mathcal{D}[U_{\mu}(x)] = \prod_{x, \mu} dU_{\mu}(x)$$

$$\mathcal{D}[\psi] \mathcal{D}[\bar{\psi}] = \prod_x d\psi(x) d\bar{\psi}(x)$$

$$\prod_{x \in \Lambda} F(T_+(x)) \prod_{x \in \Lambda} F(\bar{T}_+(x))$$

gauge transformation

$$\psi(x) \rightarrow g(x) \psi(x) \quad g(x) \in G$$

$$U_{\mu}(x) \rightarrow g(x) U_{\mu}(x) g^{-1}(x + \hat{\mu}) \quad U_{\mu}(x) \in G$$

$$\nabla_{\mu} \psi(x) = \frac{1}{a} (U_{\mu}(x) \psi(x + \hat{\mu}a) - \psi(x))$$

$$[\nabla_{\mu}, \nabla_{\nu}] \psi(x) = (1 - U_{\square}(x)) U_{\mu}(x) U_{\nu}(x + \hat{\mu}a) \psi(x + \hat{\mu}a + \hat{\nu}a)$$

$$U_{\square}(x) = U_{\mu}(x) U_{\nu}(x + \hat{\mu}a) U_{\mu}(x + \hat{\nu}a)^{-1} U_{\nu}(x)^{-1}$$

Gauge-invariance!

Fermion # symm. breaking !

主な原著論文

- 1) D. Kadoh and Y. Kikukawa, "A construction of the Glashow-Weinberg-Salam model on the lattice with exact gauge invariance," JHEP 0805:095 (2008), Erratum-ibid. 1103:095 (2011)
- 2) Y. Kikukawa, "Domain wall fermion and chiral gauge theories on the lattice with exact gauge invariance", Phys. Rev. D65 (2002) 074504
- 3) Y. Kikukawa and Y. Nakayama, "Gauge anomaly cancellations in SU(2)LxU(1)Y Electroweak theory on the lattice", Nucl. Phys. B597 (2001) 519
- 4) Y. Kikukawa and A. Yamada, "Weak coupling expansion of massless QCD with a Ginsparg-Wilson fermion and axial U(1) anomaly", Phys. Lett. B448 (1999) 265-274
- 5) Y. Kikukawa and H. Neuberger, "Overlap in odd dimensions", Nucl. Phys. B 513, 735 (1998)

研究室のアクティビティ

現在, 研究室には D1, D2, D3 の大学院生と PD 学振研究員の計 5 名が所属しており, 場の量子論, 格子ゲージ理論, スピン系や Higgs 機構の物理に関する研究を進めている。これまでのテーマは, 例えば,

- a. Kennedy-Tasaki 変換の 3+1 次元 1-form 対称性への拡張, 格子 QED のカイラル対称性非可逆 Defect の構成
- b. Celestial ホログラフィーにおける共形ソフトカレント, 重力理論と双対な模型としての SYK 模型
- c. 格子ゲージ理論におけるアノマリー流入機構の定式化
- d. 格子理論に基づく, N=2 Landau-Ginzburg model と N=2 超対称共形場理論との関係の解明
- e. Ginsparg-Wilson 関係式に基づく格子ゲージ理論における Unitarity(positivity)の問題

学生へ一言

この研究室では, 場の量子論の基本的問題やダイナミクスの研究に基礎をおきながら, Higgs セクターの構造の解明等の素粒子論の中心的な(現象論的な)課題に取り組む, そういう研究を目指しています。場の量子論や素粒子現象論の研究をすることに意義を感じられる, 一癖も二癖もある, 意欲的な学生が研究室に加わってくれることを希望しています。

素粒子論・宇宙論・弦理論



野海俊文 准教授 Toshifumi Noumi, Assoc. Prof.

本研究室では、この宇宙を記述する基本法則の解明およびそれに基づく宇宙像の確立を目指しています。場の量子論や弦理論をはじめとする理論研究の進展と日々進化する宇宙観測や素粒子実験の状況の双方に目を向け、自由な発想で多角的な視点から宇宙の謎に迫る、そのような研究の場を研究室メンバーと共に作っていきたくと考えています。

以下では、本研究室で行なっている研究の一例として野海の近年の興味を具体的に説明します（大学院生やポストドク研究員がこれらのテーマに捉われる必要はありません）。

宇宙を実験場として重力や素粒子の性質を探る

観測技術の進展により、宇宙論の理解は急速に進んでいます。特に、インフレーション、暗黒物質、暗黒エネルギーなどの新たなパラダイムが実験的に検証され、その現象論的性質が徐々にわかってきています。2015年には重力波も直接検出され、人類は「宇宙を見る新しい目」を獲得しました。今後も進展が期待される精密宇宙観測のデータを用いて重力や素粒子の性質を探りたいというのは自然な発想でしょう。

例えば、インフレーション宇宙の膨張エネルギーは典型的に 10^{14} GeV にも迫ります。これは世界最大の加速器 LHC の衝突エネルギーより 10 桁も高く、大統一理論や弦理論をも視野に捉えます。本研究室では、「インフレーション宇宙を天然の加速器 Cosmological Collider とみなす」というアイデアを突き詰めることで、宇宙背景放射や銀河の大規模構造などの観測データを用いて「高エネルギー理論が予言する新粒子」を探索する手法を提案してきました。技術的には、曲がった時空上の場の量子論や有効理論の考え方に基づいた研究となっていて、理論と現象論のバランス具合が気に入っています。

今後は、インフレーションに加えて、例えばブラックホールなどの天体由来の重力波にもターゲットを広げ、宇宙を実験場とした素粒子・重力研究を進めたいと考えています。

量子重力の立場から宇宙の謎に迫る

従来の宇宙論・素粒子論では場の量子論と一般相対性理論を用いて理論模型を構成します。一方で、量子重力理論の有効候補である弦理論を用いて宇宙論・素粒子論模型を構築しようという研究も長年行われています。実際、弦理論の枠組みで様々な理論模型が提案され、その多様性はランドスケープと呼ばれています。弦理論に基づく理論模型は典型的にどのような性質を持つのか？という問題意識のもと、弦理論のランドスケープに関するビッグデータが蓄積されてきました。

このデータを紐解いていくと、従来の宇宙論・素粒子論で提案されてきた模型の中には「弦理論で構成できない模型」が一定数存在することもわかってきました。その他の傍証から、現在ではより一般に「量子重力とは相容れない理論模型」が存在する、つまり量子重力は特有の整合性条件（総称してスワンプランド条件と呼ばれる）を持つと考えられています。これを解明できれば、インフレーションの機構や暗黒物質の候補を量子重力の立場から絞り込めるかもしれません。場の量子論の枠組みでは謎とされている「暗黒エネルギーはなぜ小さいのか？」「ニュートリノはなぜ軽いのか？」といった問題にも新たな切り口を提供できるかもしれません。

このような期待のもと、本研究室ではスワンプランド条件の解明とその宇宙論・素粒子論への応用を進めています。具体的には、因果律やユニタリ性などの基本原理やブラックホール熱力学の視点を用いて理論模型を絞り込む「ブートストラップ法」の考え方を重力理論や宇宙論に応用しています。これにより、量子重力の立場から宇宙の謎に迫ると同時に、宇宙観測や素粒子実験から量子重力研究にフィードバックを与える、という双方向研究を展開したいと考えています。

この宇宙を記述する量子重力理論は何か？

弦理論の進展により、平坦時空や（負の宇宙項を持つ）反ド・ジッター (AdS) 時空における量子重力の理解が大きく進みました。実際、AdS/CFT 対応やホログラフィー原理、量子情報理論との双方向研究などを通じて、ブラックホールの情報問題に代表される量子重力の諸問題が解決されつつあります。

その一方で、我々の宇宙を記述する量子重力理論は何か？という問いに対する理解は大きく遅れています。例えば、弦理論の枠組みで加速膨張宇宙を記述するのは難しく、現実世界を記述する上で弦理論は使い勝手が悪そうです。これからは、弦理論の成功に必ずしも捉われるのではなく、「宇宙の加速膨張」といった観測事実に基づいて、量子重力理論へのアプローチを再考する必要もあるだろうと感じています。

<https://sites.google.com/view/tnoumi/>

連絡先

准教授 野海 俊文 16号館 322A号室

tnoumi@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

そのほかの研究など

以上では野海の最近の興味をいくつか挙げましたが、友人や学生との日々の議論を通じてその他の研究テーマにも積極的に取り組みたいと考えています。大学院の研究室選びの参考にもなると思うので、これまでに行なってきたその他の研究についても簡単にいくつか触れたいと思います。

大学院生時代には、弦理論が量子重力理論としてうまく機能しているのはなぜだろう？という問題意識のもと、弦の場の理論を研究していました。ポスドク時代には、ハドロン物理の専門家と議論する機会に恵まれ、時空の対称性に基づく有効場理論の定式化やそのハドロン物理学、流体力学への応用、非平衡系の場の理論に関する共同研究も行ないました。

どの共同研究においても、単純に「友人と議論していて楽しい」という気持ちに押されて研究している場合が多いのですが、その積み重ねが自分自身の研究に繋がる場合も多々あります。特に、ハドロン物理や相対論の専門家との共同研究は、重力のダイナミクスや時間について考えるときの基礎になっています。宇宙には様々な現象が溢れているので、研究テーマが後々繋がるのはある意味当然なのかもしれません。

本研究室でポスドクをしてくれた方には、場の量子論や弦理論の専門家だけでなく、素粒子現象論や宇宙論、ハドロン物理で学位を取られた方もいます。今後も様々なバックグラウンドの研究者と刺激し合いながら、面白い物理を考えたいと思っています。そして新しい学生のみなさんとも！

修士論文・博士論文題目(前任地で指導したのも含む)

- 1) The weak gravity conjecture and thermodynamics of spacetime
- 2) String Regge Trajectory on de Sitter space
- 3) Enlarging the Scope of the Cosmological Collider Physics
- 4) ゲージ理論における't Hooft アノマリーとその応用
- 5) ブラックホールの蒸発現象と対称性
- 6) 摂動的ユニタリ性と相対エントロピーを用いたインフレーション模型に対する制限
- 7) 非線形電磁気学におけるブラックホール熱力学

主な原著論文

- 1) T. Noumi, S. Sato and J. Tokuda, "Phenomenological motivation for gravitational positivity bounds: A case study of dark sector physics," Phys. Rev. D 108, 056013 (2023).
- 2) K. Aoki, T. Q. Loc, T. Noumi and J. Tokuda, "Is the Standard Model in the Swampland? Consistency Requirements from Gravitational Scattering," Phys. Rev. Lett. 127, 091602 (2021).
- 3) S. Kim, T. Noumi, K. Takeuchi and S. Zhou, "Heavy Spinning Particles from Signs of Primordial Non-Gaussianities: Beyond the Positivity Bounds," JHEP 12, 107 (2019).
- 4) Y. Hamada, T. Noumi and G. Shiu, "Weak Gravity Conjecture from Unitarity and Causality," Phys. Rev. Lett. 123, 051601 (2019).
- 5) Y. Imori, T. Noumi, Y. Okawa and S. Torii, "From the Berkovits formulation to the Witten formulation in open superstring field theory," JHEP 03, 044 (2014).
- 6) T. Noumi, M. Yamaguchi and D. Yokoyama, "Effective field theory approach to quasi-single field inflation and effects of heavy fields," JHEP 06, 051 (2013).

学生へ一言

2023年に発足した新しい研究室です。自由な発想を持つ研究者が一堂に会して思いのままに議論し、新たな着想が生まれていく、そのような研究室を目指しています。みなさんと日々切磋琢磨することで、自分自身も新たな研究テーマに挑戦していきたいと考えています。興味や問題意識が近そうという方はもちろんのこと、自分の世界を切り拓くのにこの環境が使える！という自我の強い方も歓迎します。

研究室のメンバー

2024年4月現在、准教授1名、ポスドク研究員2名、博士課程3名、修士課程2名。

Theoretical Physics

C グループ: 物性理論・統計力学

多彩な研究内容

C グループは、広い意味での物性理論、統計力学を研究する理論グループです。その範囲は、電子物性、臨界現象、非平衡現象、非線形現象、生物物理、数理物理、非平衡物理、数理統計、量子物理学、量子情報科学にわたり、生命現象、ガラス、複雑系、機械学習、可積分系、磁性、超伝導、統計力学基礎論、量子計算など幅広いテーマをカバーします。研究手法も、数理的・解析的手法、古典系および量子多体系に対する大規模コンピューターシミュレーションなど、問題に応じて実に様々です。詳細は、それぞれの研究室の紹介を参照してください。C グループは以下の9名が構成するメンバーの主催する研究室からなります。

池田 昌司 研究室	(統計力学・ソフトマター物理)
石原 秀至 研究室	(生物物理・非線形物理)
今泉 允聡 研究室	(数理統計・機械学習)
加藤 雄介 研究室	(超伝導・超流動・量子物性)
国場 敦夫 研究室	(可積分系・数理物理)
白石 直人 研究室	(統計力学)
高木 隆司 研究室	(量子情報理論)
福島 孝治 研究室	(物性理論・統計物理)
堀田 知佐 研究室	(物性理論)

他にも4名の助教(簗口友紀, 水野英如, 角田峻太郎, 光元亨汰)が所属しています。

いわゆる物性理論と呼ばれる分野は非常に広く多彩で、研究対象を選ばず発展し続ける分野ですが、一つの研究グループでこれだけの範囲がカバーできている物性理論グループは国内外でも非常に稀です。この広い研究範囲の各パートで、各々のスタッフが非常に個性の強い研究を展開しています。ある種の共通点としては、基本的に本質的な研究に重きが置かれる傾向があることです。一般に“最先端”と呼ばれるグループは、流行を素早く追いかけがち傾向がありますが、我々は独自路線を展開し、まだ注目されていないテーマを新たに発掘し、真に新しいものを見出すことを常に目指しています。

各研究室の研究成果は、着実にそれぞれの分野のトップジャーナルに学術論文として掲載され続けます。さらに、Physical Review Letters や Nature Physics, Nature Communications, 英国物理学会刊行

(IOP) の学術誌の注目論文に選ばれた仕事、Journal of Physical Society of Japan 誌の Editor's choice や News and Comments で取り上げられた仕事など、注目を集める論文が多数公表されています。そのほかにも久保亮五記念賞、日本 IBM 科学賞、日本物理学会若手奨励賞、文部科学大臣表彰若手科学者賞など、多数の受賞があることからグループの水準の高さが理解できると思います。

緩やかな相互作用

C グループは理論物理の研究者の集団で、基本的には独立に研究活動をしています。これほど研究分野が広いと、ともすれば各研究グループはバラバラになりがちですが、このグループでは多様な研究室間に緩やかな相互作用を導入することで、有機的な関係がうまく築かれています。修士課程の学生が異なった研究室に属しながらも同じ部屋で研究生活を過ごし日々議論する、互いの研究室セミナーに顔を出すなどの日常的な交流がいたるところで見られます。異なった研究室間の共同研究も盛んです。このような交流を通して広い視野、多様な興味が自然な形で形成されることは、将来研究者を志す人にとっても、社会で活躍する人にとっても意義のあることだと考えています。

さらに幾つかの研究室では、複雑系生命システム研究センター/普遍生物学研究機構主催のセミナーなどをはじめとする合同のセミナーを行っており、学外からも研究者が参加しています。C グループと D グループの一部が中心となって運営している駒場物性セミナーもその一つです。このセミナーでは学内外から一流の若手研究者を招いて、大学院生を意識して最先端の話題を講演してもらっています。駒場セミナーは学内外に公開しており、他大学のスタッフやポスドク研究者、学生も話題に応じて出席しています。詳しくは次頁の URL などをご参考ください。大学院では研究室に所属して、専門分野を極めるとともに、広い知見を持つことも重要です。このようなセミナーに積極的に出席することは自分の専門のすぐ近傍の研究分野の面白さを知るうえで大切な機会です。こうした基礎研究においては、分野をまたがって互いに刺激しあうことでより理解が深まる問題がたくさんあるからです。

以上のように、各々がユニークで多様な研究室構成とそれらの緩やかな相互作用が相まって、何処にもない駒場だけの、駒場学派ともいえるべき独特の空気を作り出しています。

物性セミナーは 次の URL で公開されています(下記のリンクを辿ってください)

<http://www.dbs.c.u-tokyo.ac.jp/seminar/list.html>

その他, 各研究室で外部講師を呼んでセミナーが行われています。

過去の修士論文・博士論文

修士論文

- 連続多分散性を持つ剛体球系のレプリカ理論
- 単分散ソフトコア粒子からなるガラスの緩和と結晶化動力学
- 粒子間接着を取り入れたアクティブブラウン粒子モデル
- 球面同相 Wasserstein 距離: 点群データへの応用
- Sup ノルムを用いた Transformer の普遍近似定理
- 2次元超伝導体における量子渦の微視的運動論
- スピン軌道相互作用の強い電子系における SU(2)ゲージ場とバンド構造
- 量子化された Yang-Baxter 方程式と q-Weyl 代数に付随する解に関する研究
- 学習を反映した重みパラメータを持つ深層ボルツマンマシンの統計力学的解析
- 確率化された句構造文法の統計力学

など

博士論文

- Theory of thermal mixed to pure quantum state
- Thermalization in an isolated quantum system in the linear nonequilibrium regime
- Studies toward an understanding of jammed particles in reality: the size dispersity and microrheology
- Theory of Cellular and Community Metabolism: Approaches from Economics and Physics
- Pattern Dynamics on Curved Surfaces: Propagation, Oscillation, and Chaos Generated by Curvature
- Numerical Study of Phase Transition and Dynamics in Coarse-Grained Chromatin Polymer Models
- Principles of the Emergence of Diverse Human Social Structures: Constructing Universal Anthropology

など

スタッフにより執筆された教科書や書籍など

C グループのスタッフは研究成果を論文で発表する一方で, 多くのユニークな専門書や教科書を執筆しています。



統計力学・化学物理・ソフトマター物理



池田昌司准教授

池田昌司 准教授 Atsushi Ikeda, Assoc. Prof.

水野英如 助教 Hideyuki Mizuno, Assist. Prof.

物質の三態を越えて

気体・液体・固体という物質の三態は高校理科の初等的な概念ですが、我々の身の回りには、この概念でうまく分類できない物質も多数あります。私たちが研究している「乱れた物質」は、その好例です。例えば氷のような結晶状態は、熱力学や平衡統計力学で明快に定義できる固体であり、液体と結晶は一次相転移で紛いなく峻別されています。しかしガラスに代表される「乱れた物質」は往々にして非平衡状態にあり、問題とする現象やタイムスケールに応じて、液体的なこともあれば、固体的なこともあります。このような物質は、どのように理解すべきでしょうか？ 21世紀にもなって、と思うかもしれませんが、乱れた物質の物理は驚くほど進んでいません。むしろ、統計力学・化学物理・ソフトマター物理・非平衡物理・弾性理論・情報理論などの幅広い分野の研究者がアイデアを出し合い急速に研究を進めている、現代物理のフロンティアの一つとなっています。私達は統計力学をベースにして、(1) ガラス転移の本質を理解すること、(2) 数多ある乱れた物質を理解して分類すること、を目指した理論的・数値的研究を行っています。以下では、もう少し踏み込んで研究テーマを説明しましょう。

ガラス転移とは？

液体を急冷あるいは急圧縮すると、粘性が発散的に増大し、ついには構造が乱雑なままで固体になってしまう。これがガラス転移です。粘性が発散するという事は、分子の運動がスローダウンして凍結してしまうということです。

ではガラス転移は相転移でしょうか？ 実験室で見られるガラス転移は、単に分子運動の緩和時間が人間の観測時間を越えてしまい、人間にとって凍結してしまっただけのことです。むしろ問うべきは、無限の観測時間が与えられたときに、真正な相転移があるかということです。言い換えれば、熱力学

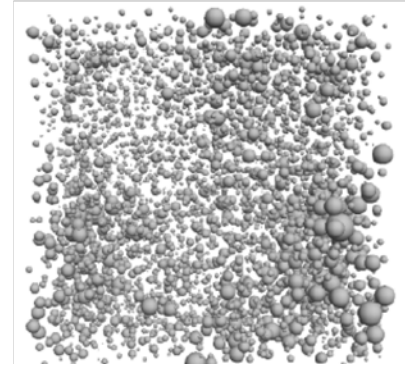


図1 ガラス転移点近傍での分子の運動の様子。球の大きさは分子運動の速さを表す。

的相図上にガラス相は存在するか、ということです。実は、この最も初歩的な問いの答えすら分かっていません。ごく最近になって興味深い知見が蓄積されてきましたが、本質的解決を見るには更なるアイデアが必要です。

一方でガラス系の実験で実際に見られるのは、分子運動の劇的なスローダウンです。では何がスローダウンを引き起こしているのでしょうか？ 液体がガラスになる直前の分子の運動を可視化してみると(図1)、単に乱れた配置をとっているとは見えなかった分子達が、実は、早く運動する粒子同士・遅く運動する粒子同士が固まって運動している、つまり協同的に運動していることがわかります。これは動的不均一性と呼ばれるガラス系で幅広く見られる特徴であり、スローダウンの本質に関わると考えられていますが、現状では、十分な理解はありません。紙面の都合上ここでは詳述できませんが、フラストレーション描像、動的促進描像、ランダム一次相転移描像など、本質的に異なるメカニズムを想定する理論が提案され、世界中で喧々譁々の議論が続いています。

私達は、この錯綜した状況にあるガラス転移研究に筋道をつけることを大目標にして、理論的・数値的研究を進めています。具体的には、無限次元極限や平均場極限から問題を解いていく方向の研究や、ガラス転移の存在やメカニズムの決定的な証拠をつかむことを目標にして、新規なモデルの徹底的な数値計算による研究などを進めています。

ガラス、歯磨き粉、マヨネーズ、砂山・・・

実は乱れた物質は非常に多彩で、身の回りにありふれてい

連絡先

准教授 池田昌司 16号館 727A

atsushi.ikeda@phys.c.u-tokyo.ac.jp

ます。例えば窓ガラスやガラスコップが、ケイ素原子や酸素原子が乱れた配置のまま固まったものであることは良く知っているでしょう。それ以外にも、歯磨き粉（コロイド粒子が液中に分散した系）はコロイド粒子が乱雑な配置のまま固まった系ですし、マヨネーズ（油滴が水中に分散した系、エマルションという）は油滴が乱雑な配置のまま固まった系です。さらに視野を広げると、砂場にある砂山は、砂粒が乱雑な配置のまま固まった系だし、交通渋滞などもその一例といえるでしょう。さて、我々がこれらの系の粒子の配置を見ても、単に乱れているとしか見えません。では、本質的にもこれらの系は同じものなのでしょうか？それとも人間の目が節穴だ

から同じに見えるだけであって、実は「乱れ方」に違いがあって、本質的には区別すべきものなのでしょうか？

私達は、多彩な乱れた物質を理解し、正しく分類することを目指した研究を進めています。例えば、粉体が乱れたまま固まる現象はジャミング転移と呼ばれています。このジャミング転移は、実はガラス転移と非常に似た性質を持っており、両者の関係の正確な理解は分野のホットトピックとなっています。私達は、新しい問題設定・視点を導入することにより、両者を正確に分類する研究を進めています。その他にも、多様なガラスをレプリカ対称性の破れという概念を用いて分類する研究などが進行中です。

和文解説

- 1) 「ガラス転移とジャミング転移を分離する」日本物理学会誌 第 68 巻 第 7 号 (2013 年 7 月号)

主な原著論文

- 1) “Johari-Goldstein β relaxation in glassy dynamics originates from two-scale energy landscape”, Kumpei Shiraishi, Hideyuki Mizuno, Atsushi Ikeda, Proc. Natl. Acad. Sci. USA 120 (14) e2215153120 (2023).
- 2) “Structural, mechanical, and vibrational properties of particulate physical gels”, Hideyuki Mizuno, Makoto Hachiya, Atsushi Ikeda, J. Chem. Phys. 155, 234502 (2021).
- 3) “Universal relaxation dynamics of sphere packings below jamming”, Atsushi Ikeda, Takeshi Kawasaki, Ludovic Berthier, Kuniyasu Saitoh, Takahiro Hatano, Phys. Rev. Lett. 124, 058001 (2020).
- 4) “Glassy dynamics of a model of bacterial cytoplasm with metabolic activities”, Norihiro Oyama, Takeshi Kawasaki, Hideyuki Mizuno, Atsushi Ikeda, Phys. Rev. Research 1, 032038(R) (2019).
- 5) “Spatial structure of quasi-localized vibrations in nearly jammed amorphous solids”, Masanari Shimada, Hideyuki Mizuno, Matthieu Wyart, Atsushi Ikeda, Phys. Rev. E 98, 060901(R) (2018).
- 6) “Continuum limit of the vibrational properties of amorphous solids”, Hideyuki Mizuno, Hayato Shiba, Atsushi Ikeda, Proc. Natl. Acad. Sci. USA 114 (46) E9767 (2017).

学生へ一言

私は 2016 年 3 月に東京大学に着任しました。それ以前は、京都大学福井謙一記念研究センターで 2 年ほど准教授（化学系）を、その前はフランスのモンペリエ大学で 3 年・筑波大学で 3 年ポスドク（物理系）をしていました。学位は京都大学大学院分子工学専攻（化学系）で頂きました。物理と化学を行ったり来たりしているのが特徴でしょうか。このキャリアパスの現れかもしれませんが、多彩な物質と概念がつながる瞬間が大好きです。

乱れた物質の物理の研究の魅力は、その広さと奥深さにあると思います。身の回りにあるありとあらゆる乱れた固体が考察の対象になるという広さ、そして見た目からは想像できない不思議かつ複雑な現象が見られるという奥深さです。一緒に研究してみたいという学内・学外の志望者を歓迎いたします！

研究室のメンバー

准教授 1 名、助教 1 名、大学院生 5 名

生物物理・非線形物理



石原 秀至 准教授 Shuji Ishihara, Assoc. Prof.

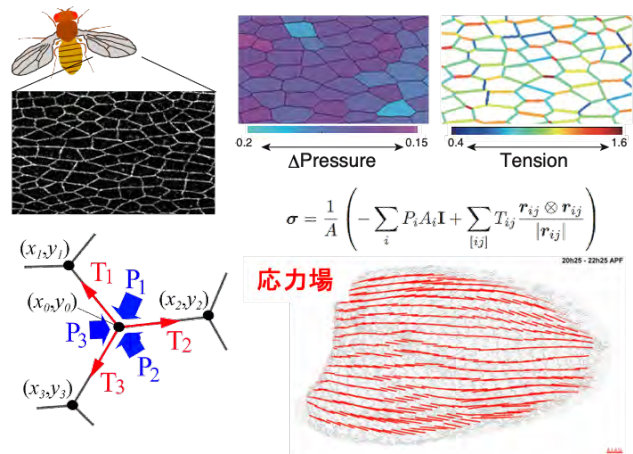
光元 亨太 助教 Kota Mitsumoto, Assist. Prof.

物理の言葉で、生命現象をどう理解すれば良いのでしょうか？ 本研究室では、細胞や細胞集団を対象とした生物物理学を、非線形物理学やソフトマター、非平衡物理学の理論を用いて研究しています。これらの分野は、近年の実験の進歩によって定量的な測定とそのモデル化が可能になってきました。また、現象のモデリングから、逆に新しい数理や物理を見つけ出すことも重要だと考えており、理論的な興味に基づいた研究も行っています。

分子から細胞へ、細胞から組織・個体へ

分子の集まりに過ぎない細胞が、どのように構造を生成・維持し、外部環境を検知して行動に結びつけているのでしょうか？ また、動物の体では、細胞増殖や分化を通してそのサイズやプロポーシオン、左右対称性の制御などが高精度に行われていますが、細胞集団がシステムとして自律的に働く背景には、どのような制御原理が働いているのでしょうか？ このような問いには、細胞の物理的基盤や物理的制約(モノ)と、システム論的・情報論的思考(コト)を融合させたアプローチが必要となってきます。近年のライブイメージングをはじめとする実験技術の進歩により、細胞内や組織スケールでのタンパクの発現・活性の時空間的振る舞いが見えてきており、分子の局在や振動といった時空間ダイナミクスが、上に述べたような生命機能に大きな役割を果たしていることがわかってきました。

このような過程においては、分子や細胞という要素が相互作用することで、細胞や組織という、個々の要素より大きな構造が形成されますが、このような協同的・自己組織化的な振る舞い、「要素から集団へ」という様式は、統計力学や非線形物理学が得意とするものです。私たちは、これらの物理理論に基づいて、生命システムにたち現れる集団運動やその制御原理の問題を調べています。例えば、細胞性粘菌の示すアメーバ運動において一見ランダムに見える運動パターンの遷移



発生中のショウジョウバエの翅内の応力分布。力の釣り合い方程式とベイズ推定を組み合わせ、組織内応力の可視化手法を開発した。翅は遠近軸方向に引っ張り力を受けており、この力学環境の異方性が細胞の整列を促すことも示した。

の背後に、トポロジカルな遷移ルールがあることを、非線形振動理論に基づいて見出しています(論文5)。

細胞と生体組織のメカニクス

細胞集団は、シグナル分子と共に、力学的な相互作用を介して協調しあひ集団的な運動を引き起こします。生体組織は、そもそも固体なのでしょうか、液体なのでしょうか？ このような問いは、発生段階か、成長しきった状態か、さらには癌の転移という文脈において重要になりますが、個々の細胞の接着能や硬さ/柔らかさ、運動能、細胞分裂頻度等が細胞集団の機械的物性を決めます。そして、生体組織の成長や変形を理解するためには、組織内にはたらく「力」の動態や、組織の物性(レオロジー)を調べるのが重要となります。この問題はソフトマターやアクティブマター物理の対象ともなり、近年多くの物理的な解析が行われています。私たちは、ベイズ推定の枠組みを用いて細胞形態データから組織内に働く力(細胞膜の張力や組織内の応力)を推定する手法を開発し、ショウジョウバエ翅や背板に適用することで、世界で初めて成長する組織内の応力場の可視化を行いました(図1)。また、細胞増殖や細胞形態変化、細胞の相対位置の変化を幾何学的な分解した定量化解析手法を開発し、力と変形の間関係を明らかにすべく、生体組織のための連続体力学の構築を進めています。他にも、培養細胞系に対する新規な内部応力推定手法の開発を行うなど、物理的知見に基づいた新規なデータ解析(機械学習)手法の開発と、力学モデルや非線形理論に基づいた理論解析の両面から、個体発生等の細胞集団が示す多様な運動の研究を行っています。

<http://webpark1976.sakura.ne.jp/>

連絡先

准教授 石原秀至 16号館 808B

csishihara[at]g.ecc.u-tokyo.ac.jp

新しい非線形・非平衡現象

上で述べた研究では、実際の生物現象に見られる問題を取り扱っていますが、実際の現象から、数理的に新しく興味深い問題を見出し、その本質を抜き出すことも重要だと考えています。例えば、これまでに反応拡散系における相分離現象

や、曲面上で起こる新規なパターン伝播メカニズムを見出してきました(論文 2)。これらの研究では、生命現象を表すモデルを非線形力学や非平衡力学の観点からの解析を進めた結果として、具体的な現象を離れてモデルの詳細によらない数理的に新規で普遍的な機構を捉えることができました。

主な著書・解説

- 1) 金本理奈, 石原秀至「弱点克服 大学生の物理数学」東京図書(2019)
- 2) 杉村薫, 石原秀至「組織の力・応力の定量生物学」小林徹也(編)定量生物学第7章 化学同人(2018)
- 3) 石原秀至, 杉村薫「理論生物学の眺め方」望月敦史 (編) 生命科学の新しい潮流「理論生物学」第1章第2節 共立出版(2011)
- 4) 西出亮介, 石原秀至「新しいパターン伝播機構:Turing パターンは曲面上で動き出す」生物物理 64(1), pp38-41(2-24)
- 5) 石原秀至, 杉村薫「組織変形の定量手法と多階層連続体モデル」生物物理 60(1), pp37-43 (2020)
- 6) 中島昭彦, 石原秀至, 澤井哲「動く細胞が読み取る時間と空間:走化性のパラドクスと整流作用」生物物理 56(2), pp98-101 (2016)
- 7) 石原秀至, 澤井哲「反応-拡散-駆動系として理解する細胞の形態変化」日本物理学会誌 70 pp.25-30 (2015)

主な原著論文

- 1) K. Ikawa, S. Ishihara, Y. Tamori and K. Sugimura, Attachment and detachment of cortical myosin regulates cell junction exchange during cell rearrangement in the Drosophila epithelium. *Current Biology* 33 (2), 263-276 (2023)
- 2) R. Nishide and S. Ishihara, Pattern propagation driven by Surface curvature. *Phys. Rev. Lett.* 128 224101 (2022)
- 3) S. Ishihara, P. Marcq, and K. Sugimura. From cells to tissue: A continuum model of epithelial mechanics. *Phys. Rev. E* 96 022418 (2017)
- 4) A. Nakajima, S. Ishihara, D. Imoto and S. Sawai, Rectified directional sensing in long-range cell migration *Nat. Comm.*, 5, 5367 (2014)
- 5) D. Taniguchi, S. Ishihara, T. Oonuki, M. Honda-Kitahara, K. Kaneko and S. Sawai, Phase geometries of two-dimensional excitable waves govern self-organized morphodynamics amoeboid cells. *Proc. Nat. Acad. Sci. U.S.A.* 110, 5016-5021 (2013)
- 6) S. Ishihara and K. Sugimura, Bayesian inference of force dynamics during morphogenesis. *Journal of Theoretical Biology* 313, 201-211 (2012)

学生へ一言

現代の生物学は総合科学であり、共同研究や多様な分野(生物, 医学, 工学, 情報, etc.)の人との交流の中で、思ってもみなかった発想や手法を知ること面白みを感じています。一方で、石原自身は非線形力学や統計力学が教える「現象横断的な理解」すなわち、多様な現象を一貫した視点で捉えることが重要だと考えており、具体的な生命現象/自然現象を考える際にも、系に内在する対称性や物理的制約を考えることが、しばしば普遍的な理解につながります。このような視点から、分野に捕われずに広い視野でサイエンスを楽しみ、新しい分野を切り開きたい学生を歓迎します。

研究室のメンバー

助教1名、研究員2名、博士学生1名、修士学生1名。

数理統計・機械学習



今泉 允聡 准教授

Masaaki Imaizumi, Assoc. Prof.

私たちの研究室では、統計学および関連する数理科学を用いて、深層学習や無限次元データなどの現代的なデータ科学技術を解析し、その原理を記述する理論体系の構築を目指しています。統計科学や深層学習は近年の発展著しく、多様な新技術が開発されていますが、その仕組みはブラックボックスであることも少なくありません。我々の研究は、それらの原理を整理・理解し、より効率的なデータ科学の発展を目標としています。2020年4月より東大での活動を始めた、新しい研究室です。

深層学習の原理に挑む理論の試み

近年、人工知能 (AI) が大いに発展し、基礎研究から実社会の至る所で、AI による変革が起こっています。この革新を可能にしたのは、**深層学習**と呼ばれる情報処理技術の発明です。深層学習によるデータ予測精度は既存技術を大きく上回り、その性能に基づく信頼性が、自動運転や医療診断と言った新しい技術を可能にしています。

しかし、なぜ深層学習がここまで高い性能を発揮できるのかは、未だ多くの謎が残されています。実際に用いられる深層学習は、数千万個のパラメータを持つ大規模な数理モデル (多層ニューラルネットワーク) を用います。しかし、深層学習が登場する前の統計・機械学習の理論は、このような大規模モデルはデータの不確実性に対して脆弱で性能は悪化するとされ、中・小規模の数理モデルを使うことが正当化されてきました。このように、深層学習は既存の理論と矛盾する方法で、高い性能を達成しているのです。

本研究室では、この深層学習の原理を記述する新しい理論体系の構築を行っています。成果の例としては、データが特異性と呼ばれる性質を持つとき深層学習のみ性能を劣化させないことや、損失関数の極限の性質が深層学習の不安定性の解消を説明できることを数学的に示しています。しかし深層学習に関わる謎は未だ多く、研究課題はまだまだ尽きません。

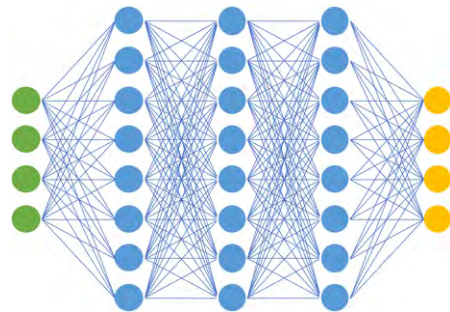


図1 深層学習で用いられる多層ニューラルネットワークの図。ノードを繋ぐ線 (エッジ) がそれぞれパラメータに対応している。

現代的複雑データのための統計解析

複雑データと呼ばれる新しい形式のデータ解析手法の研究開発を行っています。古典的な統計解析は、データがベクトル (ユークリッド空間の要素) であることを前提に開発されてきました。しかしビッグデータ時代では、データの収集・保存のための情報技術が飛躍的に進化した結果、ベクトルでは表現しきれないデータが多く登場するようになりました。例えば、センサーから得られる生物の行動ログは無限次元の関数データとみなされ、複数のセンサーから得られた脳波は立体行列状のテンソルデータとして取り扱われ、どちらも通常のベクトルとして扱うと解析上の不都合が発生します。

これらのデータを扱うには、まずデータの構造を適切に捉える数学的概念を整理した上で、理論的に自然な手法を開発する方法があります。本研究室では、テンソルの線形構造や関数の確率過程としての構造を用いて、高精度・低コストで複雑データを解析する手法を開発しています。

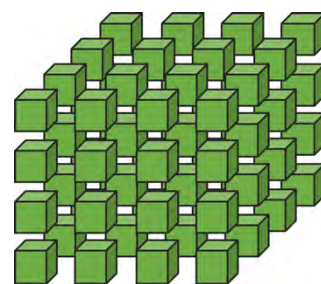


図2. テンソルデータ (三次) の例。数を三次元空間に並べた形で、ベクトルのテンソル積で定義される。

<http://www.imalab.org>

准教授 今泉允聡 16号間 610B室

imaizumi@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

高次元ガウス近似の統計的応用

高次元ガウス近似とは、数理統計分野で近年開発された、高次元・無限次元ベクトルに関する統計量の近似方法です。通常、統計的推論（検定や p 値を計算して統計分析の結果の信頼性を評価すること）は極限分布を用いることが多いですが、この分布を得ることが困難な場合は推論そのものが出来ない場合があります。しかし、高次元ガウス近似を用いると、極限分布を用いることなく統計量の不確実性を計算する

ことができ、結果的に従来よりもかなり広い状態で推論を行うことが可能になります。

本研究室では、この高次元ガウス近似の利点を用いて、これまで実現が難しかった統計的検定・推論手法の開発を行っています。例えば、特殊な距離関数の元での適合度検定や、規準関数最大化（最小化）で定義される推論法の開発を進めています。

近年の学生研究テーマ

- 1) 固有次元に適応的な深層学習の汎化誤差解析
- 2) 非漸近推論によるワッサースタイン距離に基づく多変量適合度検定
- 3) 準ポテンシャルを用いた確率的勾配効果法の非定常下の脱出効率性解析
- 4) 過剰パラメータやニューラルネットワークモデルによる統計的因果推論の解析

主な論文

- 1) M.Imaizumi, K.Fukumizu, (2022), "Advantage of Deep Neural Networks for Estimating Functions with Singularity on Hypersurface". Journal of Machine Learning Research.
- 2) M.Imaizumi, H.Ota, T.Hamaguchi (2022), "Hypothesis Test and Confidence Analysis with Wasserstein Distance on General Dimension", Neural Computation.
- 3) A.Sannai, M.Imaizumi, M.Kawano, (2021), "Improved Generalization Bounds of Group Invariant / Equivariant Deep Networks via Quotient Feature Spaces", PMLR: Uncertainty on Artificial Intelligence 2021.
- 4) M.Imaizumi, K.Fukumizu (2019). "Deep Neural Networks Learn Non-Smooth Functions Effectively". Artificial Intelligence and Statistics.
- 5) M.Imaizumi, K.Kato (2018). "PCA-based estimation for functional linear regression with functional responses". Journal of Multivariate Analysis.
- 6) M.Imaizumi, T.Maehara, K.Hayashi (2017) "On Tensor Train Rank Minimization: Statistical Efficiency and Scalable Algorithm". Advances in Neural Information and Processing Systems.
- 7) M.Imaizumi, K.Hayashi (2016). "Doubly Decomposing Nonparametric Tensor Regression". International Conference on Machine Learning.

学生へ一言

統計・機械学習分野は現在発展が著しく、研究が盛んに進められています。特に深層学習は多くの未解決問題を提供しており、謎に挑むことが好きな人が楽しめる研究領域となっています。また、データ解析技術は高い汎用性があり、自然科学をはじめとした様々な分野に活用される技術に関わることも可能です。

本研究室では、現象を観察・整理し、理解することを好む学生さんを歓迎しています。

研究室のメンバー

准教授 1 名、特任助教 1 名、技術補佐員 1 名、学生 7 名(+外部 3 名)で運営しています。

超伝導・超流動・量子物性



加藤雄介 教授 Yusuke Kato, Prof.

ボース・アインシュタイン凝縮体の超流動、超流動固体、さまざまなクーパー対形成をもたらす異方的超伝導と量子渦の内部構造、一次元量子可積分系に現れる分数電荷粒子の性質などを対象に量子多体系の物性について理論研究を行っている。

超伝導における量子渦

1986年の銅酸化物超伝導体の発見以来、超伝導現象に対する認識は大きく変わりつつある。2008年に発見された鉄ヒ素化合物超伝導体の例に見られるように、新たな高温超伝導物質の発見は今でも重要なテーマであるが、一方で低温（場合によっては高圧下）では多くの物質が超伝導状態に相転移することが実験的にわかりつつある。つまり超伝導状態は多くの物質の基底状態であり、物質の普遍的な性質であると捉えられるようになってきた。その観点から超伝導状態の対称性に注目し、物質の詳細によらない普遍的な側面に対する統計力学的研究が近年盛んに行われている。特に超伝導体に生じるトポロジカルな欠陥である量子渦は、超伝導体における対称性の破れ方を反映した内部構造を持つ。その構造は実験的（走査型トンネル顕微鏡・トンネル分光）によっても詳細に解明される一方、量子ホール系、トポロジカル絶縁体、グラフェン（単層グラファイト）、クォーク物質におけるカラー超伝導体の物理と深く関係していることがわかっている。我々のグループは超伝導体の量子渦構造について、この十年間、解析的に、また数値的にさまざまな手法を用いて理論的に研究しており、今後も量子渦を通して超伝導体における普遍的な性質の発見を目指す。

ボース・アインシュタイン凝縮体における超流動と固体超流動

超伝導と類似した現象にボース系における超流動がある。1938年ヘリウム4で発見された量子現象であり、長い歴史を持つ研究分野である。多くの優れた研究がある一方、ヘリウム4は相互作用の強い系であるために理論的には研究困難な分野であった。状況が一変させたのが1995年のアルカリ原子気体におけるボース・アインシュタイン凝縮の実現である。この系は相互作用の強さを制御できる特長を持ち、理想ボース気体から相互作用の強いボース流体までを実現することが可能である。これに触発され、ボース系の理論的研究も低温物理学者、電子物性研究者、非線形物理研究者などの参入により爆発的な勢いで進展した。その結果、超流動状態についてかつてはLandau, Feynman, Andersonといった一部の理論家しか垣間見ることのできなかった超流動安定化・不安定化機構についての理解が進みつつある。この基礎的問題についてわれわれはさまざまな超流動の崩壊機構の統一的記述を目指して現在研究している。

またヘリウム4において2004年に「発見」（いまだに論争が続いている）された固体超流動（固体としての固さと、粘性ゼロの超流動性を持ち合わせる相）についての理論的研究も行っている。

<http://park.itc.u-tokyo.ac.jp/kato-yusuke-連絡先>

教授 加藤雄介 16号館301B号室
yusuke@phys.c.u-tokyo.ac.jp

量子可積分系とエニオン

Calogero と Moser そして Sutherland によって見出された可積分系の量子模型は、一次元強相関電子系、スピン系の理解に多大な知見を与えてきた。とくに数理的な性質のよさだけでなく、量子多体系におけるくりこみの効果、素励起の統

計性、磁性体におけるスピノン、素励起の性質とグリーン関数の関係などについて、非摂動論的結果に基づき、物理的知見を与えてきた意義は大きい。われわれはこの模型について内部自由度の効果が分数電荷素励起（エニオン）に与える影響をグリーン関数の厳密解に基づき研究している。

修士論文・博士論文の題目

- 1) 鉄系超伝導体の超伝導対称性に関する理論的研究
- 2) Functional Renormalization Group Study on Kitaev Quantum Spin Liquid
- 3) 時間反転対称かつ空間反転対称な系におけるトンネルスピンの流
- 4) 超伝導グラフェンの渦糸状態と端状態

主な著書・解説

Dynamics of One-dimensional Quantum Systems: Inverse-square Interaction Models (共著: Cambridge Univ. Press, 2009)
物性物理学と統計力学: 数理科学 2013 年 6 月号 21-27 .
超伝導量子渦のダイナミクス: 固体物理 2013 年 9 月号 pp21-26, 2014 年 2 月号 13-23 .
超伝導のマクロな見方とミクロな見方: 数理科学 2014 年 4 月号 32-37.
超流動とボーズ・アインシュタイン凝縮 物性研究・電子版 2015 年 11 月号 Vol.4, No.4 044202(第 60 回物性若手夏の学校: 講義ノート)
フーリエ・ラプラス解析 (共著: 丸善, 2017)

主な原著論文

Dynamical Density Fluctuations of Superfluids near the Critical Velocity, *Phys. Rev. Lett.*, **105**, 035302 (2010).
Mean-field and stability analysis of two-dimensional flowing soft-core bosons modeling a supersolid, *Phys. Rev. B* **86** (2012) 060510 (R)
Nature of driving force on an isolated moving vortex in dirty superconductors. *J. Phys. Soc. Jpn.* **85** 033703/1-5 (2016)
Intrinsic hysteresis due to the surface barrier for chiral solitons in monoaxial chiral helimagnets, *Phys. Rev. B* **97**, .214413/1-8 (2018) (Editors' suggestion)
Order and disorder in the magnetization of the chiral crystal CrNb₃S₆” *Phys. Rev. B* **99**, 224429/1-11 (2019) (Editors' suggestion)

学生へ一言

高圧下ながらも摂氏-23°の超伝導体が 2019 年に発見され、室温超伝導の実現可能性が射程距離に入る今、物性物理学の分野はさらに発展しつつあると改めて感じます。この分野の日本の強みは国内に優秀な実験グループが多数あり、実験データに触発されるテーマに魅力的なものが多数あることです。物性分野に加えて、統計物理学や数理物理、数理科学、データ科学の優秀者研究者も集まっている東京大学駒場キャンパスは学際的刺激に溢れており、物質科学の理論的研究を志す皆さんにとっても好環境であると思います。

研究室のメンバー

博士課程 1 名、修士課程 4 名

修士論文・博士論文の題目

- 丁-庵原-三木代数に付随する可積分波動方程式
- Algebraic approach to three dimensional integrability
- On Fermionic forms of 1-dimensional configuration sum
- Analytic Bethe ansatz and functional relations in solvable lattice models
- Soliton cellular automata associated with crystal base of affine Lie algebra
- One-dimensional exclusion process and integrability
- Tropical 幾何による超離散 QRT 系の定性的分類
- Spectral analysis of multi-species asymmetric simple exclusion process
- 量子化された Yang-Baxter 方程式と q-Weyl 代数に付随する解に関する研究
- 共形場理論の量子保存量とシュレーディンガー方程式

一般向け解説記事

- 1) C.N.ヤンとヤン・バクスター方程式 (数学セミナー, 日本評論社 1999, 11月号)
- 2) 箱玉系と三つの R (数理科学 2003, 9月号)
- 3) ベーテ仮説とヤング図形 (数理科学 2007, 1月号)
- 4) ラプラス・ルンゲ・レンツベクトル (数理科学 2007年, 7月号)
- 5) 力学 てこの原理からハミルトンの原理まで (数理科学 2009年, 12月号)
- 6) 物理と数学における厳密解 (数理科学 2012, 11月号)
- 7) 電磁気学とベクトル解析 (数理科学 2017, 5月号)

原著論文, 著書

- 1) A. Kuniba, T.Nakanishi, J. Suzuki, T-systems and Y-systems in integrable systems, J. Phys. A 44 (2011) 103001 146pages.
- 2) R. Inoue, A. Kuniba, Y. Terashima, Tetrahedron equation and quantum cluster algebras, J. Phys. A 51 (2024) 085202 33pages.
- 2) A. Kuniba, S. Watanabe, M. Okado, Integrable structure in multispecies zero range process, SIGMA 13 (2017), 044, 29 pages.
- 3) A. Kuniba, Quantum Groups in Three-Dimensional Integrability, (Springer 2022) xi+331 pages
- 4) A. Kuniba and M. Okado, Tetrahedron equation and quantum R matrices for q-oscillator representations of $U_q(A_{2n}^{(2)})$, $U_q(C_n^{(1)})$ and $U_q(D_{n+1}^{(2)})$, Commun. Math. Phys. **334**, 1219--1244 (2013).
- 5) A. Kuniba, S.Matsuike, A.Yoneyama, New solutions to the tetrahedron equation associated with quantized six-vertex models, Commun. Math. Phys. (2023) 10.1007.
- 6) 国場敦夫 ベーテ仮説と組合せ論 (朝倉書店 2011) viii+210 頁
- 7) A. Kuniba, G. Misguich, V. Pasquier, Current fluctuations, Drude weights and large deviations in a box-ball system, J. Phys. A 55 (2022) 244006 36pages

統計力学



白石直人准教授

私たちの身近なマクロな物体は、ミクロな分子が集まって出来ています。ミクロな分子の振る舞いは量子力学で決まっています。一方、マクロな物体は、熱力学などの観察事実に基づく現象論的な理論で記述可能です。ミクロな理論とマクロな理論、それぞれはともによく確立された理論ですが、両者がいかにしてつなぎ合わされるのか、というのは極めて難しい問題として残されています。

本研究室では、このような理論物理、特に統計力学の基礎的な問題の研究を行っています。「基礎的な問題」というのは簡単・初歩的という意味ではなく、「ある物理現象を説明する上でどの性質が本質的なのか」「物理の理論同士はどういう関係になっているのか」といった、物理理論の構造を明らかにし、世界をより明晰に理解していこうとする、そういった問題設定のことを指しています。

研究では数理的なアプローチを中心として用いています。特定の手法にこだわることはなく、使える数学的道具は幅広く用いていくスタンスです。情報理論や計算論などの情報科学の知見を利用した融合的な手法もしばしば用いています。

ゆらぐ系の熱力学

ブラウン運動が見られるような、熱ゆらぎが無視できない小さなスケールの世界を考えましょう。我々生物の体の中では、そうした激しい熱ゆらぎの中でさまざまな機能を果たすタンパクが働いています。化学ポテンシャルを消費して仕事を行う、ミクロな熱機関のようなものも存在しており、その効率は非常に高いことが実験で報告されています。しかし、激しい熱ゆらぎの中の熱機関は、通常のマクロな熱機関とは状況が大きく異なります。このような激しい熱ゆらぎのある世界における、熱力学的な性質を記述するのが「ゆらぐ系の熱力学」という分野です。ゆらぐ系の熱力学の枠組を用いると、既存の熱力学では扱えなかったさまざまなゆらぎについての普遍的な性質を議論したり、新しい熱力学の関係式を導

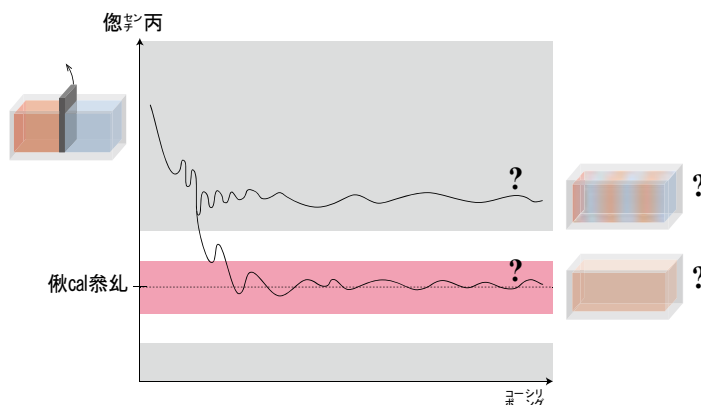


図1 孤立量子系の熱平衡化の問題状況。

いたりできます。

この分野の一つの有名な結果が「ゆらぎの定理」です。ゆらぐ系においては、熱力学第二法則に反するような過程がごくまれに生じます。このような稀なゆらぎの出現確率が、実はエントロピーが増えるごく普通の過程の出現確率と密接に結びついていることを明らかにするのがゆらぎの定理です。ゆらぎの定理からは、第二法則や揺動散逸定理などの既知の関係式を再導出することができ、さらに高次ゆらぎについての新たな関係式も与えてくれます。これ以外にも、マクスウェルの悪魔などの測定やフィードバックといった情報処理を行う系における熱力学の関係式を与える情報熱力学の理論も、ゆらぐ系の熱力学の枠組の上に構築されています。私自身の関わった研究としては、ゆらぐ系の熱力学の手法を利用することで、熱機関の効率とパワーの普遍的なトレードオフ不等式が導出できるという結果もあります。

孤立量子系の熱平衡化

マクロな系の初期状態を非平衡状態にとり、その系を外部環境から孤立させて放置すると、系は唯一の平衡状態に緩和します。これは熱平衡化と呼ばれている現象で、経験的にもよく知られています。量子多体系のハミルトニアンに従ってユニタリ時間発展する純粋状態の場合であっても、ほとんどすべての量子多体系は熱平衡化することが数値実験などによって確認されています。しかし、すべての量子多体系が熱平衡化するわけではなく、可積分系などの一部の量子多体系は熱平衡化しないことも知られています。どのような系は熱平衡化するのか、熱平衡化する系はなぜ熱平衡化するのか、こうしたマクロな性質をミクロな量子力学だけから明らかにしようというのが、孤立量子系の熱平衡化の研究分野の中心的な問題です。

<https://sites.google.com/site/naotoshiraiophys/home-jp>

連絡先

准教授 白石直人 16号館 429B

shiraishi[at]phys.c.u-tokyo.ac.jp

マクロな系はほとんどの場合に熱平衡化するので、系のミクロな詳細よりも「膨大な数の構成要素が集まっている」というマクロ性の方が重要だろうと考えられます。この分野のこれまでの研究では、かなり自然な条件さえ満たされていれば量子多体系において緩和（物理量がある値に落ち着いて変化しなくなる）は生じることや、多くの熱平衡化する系では「すべてのエネルギー固有状態は、それ単独で熱平衡状態とマクロには見分けがつかない状態である」という「固有状態熱化仮説」が数値的には成り立っていること、などが発見されてきました。私自身の関わった研究では、固有状態熱化仮説はすべての熱平衡化する系で成り立つわけではないこと、熱平衡化の有無の判定は最も一般的な形では（理論計算機科

学）決定不能命題であり一般的な判定法は存在しないこと、などを示しています。

ここでは二つの研究分野について説明しましたが、私自身はこれら以外の研究分野にも幅広く関心を持っています。例えば、量子情報理論の観点からミクロな量子系の状態の変換可能性の特徴づけとしての熱力学第二法則を導出する研究や、ガラスや組合せ最適化問題の計算複雑性において見られる複雑なフラストレーション構造を、ランダムネスによってではなく手で構成的に作ることでそのフラストレーション構造を理解しようという研究などを行っています。また、これまでやっていた研究領域にこだわることなく、さらに研究分野を広げていきたいとも考えています

解説記事

- 1) 白石直人、齊藤圭司、田崎晴明「熱機関の効率と仕事率についての普遍的なトレードオフ関係」日本物理学会誌 第 72 巻 第 12 号 p862 (2017)
- 2) 白石直人「ゆらぐ系の熱力学から熱機関の法則へ：パワーと効率の普遍的関係（第 63 回物性若手夏の学校 集中ゼミ）」物性研究 電子版 Vol. 7 No. 2, 072213 (2018 年 11 月号)

主な原著論文

- 1) Naoto Shiraishi and Keiji Matsumoto, "Undecidability in quantum thermalization", Nat. Comm. 12, 5084 (2021)
- 2) Naoto Shiraishi and Takahiro Sagawa, "Quantum thermodynamics of correlated-catalytic state conversion at small-scale" Phys. Rev. Lett. 126, 150502 (2021)
- 3) Naoto Shiraishi, "Proof of the absence of local conserved quantities in the XYZ chain with a magnetic field". Europhys. Lett. 128 17002 (2019)
- 4) Naoto Shiraishi and Takashi Mori, "Systematic Construction of Counterexamples to Eigenstate Thermalization Hypothesis", Phys. Rev. Lett. 119, 030601 (2017)
- 5) Naoto Shiraishi, Keiji Saito, and Hal Tasaki, "Universal Trade-Off Relation between Power and Efficiency for Heat Engines", Phys. Rev. Lett. 117, 190601 (2016).

学生へ一言

当研究室は 2022 年に発足した新しい研究室です。研究室の枠組やシステムもまだ固まっておらず柔軟に対応できるので、院生の方の声も聞きながら、新しい研究室の在り方を作っていきたいです。

自由なアイデアで積極的に研究していく皆さんと、まだ見たことのない新しい物理の地平を切り開いていくようなワクワクした探求に、是非一緒に取り組んでいけたらいいと思っています。

研究室のメンバー

准教授 1 名、博士課程院生 3 名（清水研からの継続）で運営しています。

量子情報理論

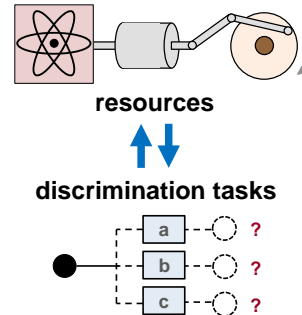


図1 量子リソースと量子チャネル判別問題

高木 隆司 准教授 Ryuji Takagi, Assoc. Prof.

量子力学効果が支配的な系では、古典的な常識とは外れた様々な現象が起きます。この様な「不思議現象」を利用して情報処理を効率的にできないだろうかというアイデアが、量子計算を初めとする量子情報処理と言われるものです。これは量子力学が情報処理に影響を与える例ですが、一方で、情報理論のアイデアやツールを用いることで、量子力学を特に操作的な観点からよりよく理解しようという試みをすることもできます。当研究室では、上記双方向のアプローチを組み合わせることで、量子系を特徴づける本質的な量を定量的に抜き出して理解し、量子情報処理の性能の解析や、量子多体系などの物理系における量子的性質の振る舞いの理解につなげることを目標としています。

統一的な量子リソースの操作論的特徴付け

あらゆる物理的状況には、許される操作に制約があります。例えば熱力学の系において、等温環境下で自由エネルギーを無制限に生成する操作は熱力学第二法則により禁じられます。一方で、量子情報理論において根本的な量である量子エンタングルメントは、局所的量子操作及び古典通信しか許されない制約のもとでは生成することはできません。この様に、それぞれの物理的状況の裏には、許される操作のみを用いて生成できない「貴重なリソース量」が潜んでおり、それらは系を特徴づけるのに本質的な働きをします。

情報理論の枠組みを用いることでそれらリソース量を定量化し、与えられた制約のもとで原理的に許されるリソースの変換性を系統的に扱う枠組みはリソース理論と呼ばれます。例えば、この枠組みのもとで自由エネルギーとエンタングルメント量とともに「相対エントロピー」と呼ばれる情報尺度で記述することができ、さらにこれらは共に可能な状態変換を司る本質的な量であることを見ることができます。この様に、熱力学と量子情報という一見かけ離れたものに見える二つの間に、操作論的な対応関係を見出すことができます。

当研究室は、特に量子的性質を記述する量子リソース理論を発展させ、様々な量子的特徴量とそれらの操作的タスクにおける役割を定量的に明らかにする研究に取り組んでいます。特に、量子リソースの統一的な理解を目指し、様々な量子リソースを統一的に記述する「一般量子リソース理論」を発展させてきました。例えば、「与えられた操作によって生成することができない量子状態（＝リソース状態）は必ず何らかの操作的タスクにおいて有用か」という根本的な問題は、限られた特別な設定でしか解かれていませんでしたが、凸最適化理論を量子リソース理論と組み合わせることで、(ほぼ)全ての状況設定において、全てのリソース状態は、量子チャネル判別問題という量子情報理論における標準的なタスクにおいて有用となることを示すことに成功しました。面白いことに、この一般性は量子力学にとどまらず、量子論を特殊例として含む一般確率論にまで拡張できることがわかり、量子基礎論にも示唆を与えるものとなりました。この他にも、量子計算や量子通信などを題材に、量子情報処理の背後にある量子的特性は何か、またそれと量子情報処理の性能は定量的にどう繋がっているのかといった問いに答えるべく研究を行っています。

量子情報処理の究極的性能の探究

量子情報科学と聞くと、量子情報処理によって何ができるかという問題を想像することが多いと思いますが、それと同様に重要でかつ興味深いのは、何が出来ないのかを明らかにすることです。「出来ない」には色々な意味があり得ますが、

<https://ryujitakagi.wordpress.com>

連絡先

准教授 高木隆司 16号館 327A

ryuji.takagi@phys.c.u-tokyo.ac.jp

特に「量子力学の原理から、どんなに頑張ってもここからは出来ない」という領域を明確にしていくことに興味を持っています。この問題には、具体的な量子プロトコルやアルゴリズムを考えていくやり方とは根本的に異なる、情報理論的アプローチが必要となります。我々は、注目する量子情報処理タスクのリソースとなっている特徴量を定量的に解析することにより、量子情報処理の性能に理論限界を与える研究を行っています。例えば、近年の実験技術の進歩により、100量子ビット程度の量子コンピュータが実現され始めており、それらが何か有用なタスクを遂行できるのかが一つの大きな問題となっています。しかしこのサイズの量子コンピュータには、誤り耐性量子計算に必要な量子誤り訂正符号を実装することができないので、代わりにノイズを軽減する量子誤り抑制と呼ばれるテクニックが必要となります。従来の量子誤り抑制の研究は、具体的な誤り抑制法を提案し、その性能を1つ1つ評価することに終始していましたが、我々は逆にどんな誤り抑制法を用いても、計算サイズに対し指数的な時間がかかることを原理的に避けることができないことを証明しました。この他にも、量子通信の通信容量の上限や、誤り耐性量子計算に必要な量子ビットコストなどを明らかにしてきました。

量子物理学への情報理論的アプローチ

量子系における特徴量を定量的に理解するための情報理論的なアプローチにも取り組んでいます。特に様々な量子ダイナミクスのコントロールが実験的に可能となるにつれ、量子操作との関係性における系の振る舞いの理解が重要となってきましたが、量子情報理論はこの設定に相性が良いと感じています。具体的には、量子光学系における非ガウシアン性などの量子性の操作論的な定量化、量子熱力学の状態変換則および第二法則の拡張、保存量を持つ系における量子コヒーレンスと対称性といった問題に取り組んでいます。今後さらに取り組みたいトピックとして、量子多体系における観測により誘起されるエンタングルメント相転移、対称性を持つ系におけるランダム量子ダイナミクスと量子的特徴量の振る舞いなどがあります。

主な原著論文

- 1) R. Takagi, H. Tajima, and M. Gu, "Universal Sampling Lower Bounds for Quantum Error Mitigation", *Physical Review Letters* 131, 210602 (2023)
- 2) R. Takagi, S. Endo, S. Minagawa, and M. Gu, "Fundamental limits of quantum error mitigation", *npj Quantum Information* 8, 114 (2022)
- 3) R. Takagi and N. Shiraishi, "Correlation in Catalysts Enables Arbitrary Manipulation of Quantum Coherence", *Physical Review Letters* 128, 24050 (2022)
- 4) R. Takagi, "Optimal resource cost for error mitigation", *Physical Review Research* 3, 033178 (2021)
- 5) B. Regula and R. Takagi, "Fundamental limitations on distillation of quantum channel resources", *Nature Communications* 12, 4411 (2021)
- 6) R. Takagi, K. Wang, and M. Hayashi, "Application of the Resource Theory of Channels to Communication Scenarios", *Physical Review Letters* 124, 120502 (2020)
- 7) R. Takagi, and B. Regula, "General Resource Theories in Quantum Mechanics and Beyond: Operational Characterization via Discrimination Tasks", *Physical Review X* 9, 031053 (2019)
- 8) Z.-W. Liu, K. Bu, and R. Takagi, "One-Shot Operational Quantum Resource Theory", *Physical Review Letters* 123, 020401 (2019), Editors' Suggestion
- 9) R. Takagi, B. Regula, K. Bu, Z.-W. Liu, and G. Adesso, "Operational Advantage of Quantum Resources in Subchannel Discrimination", *Physical Review Letters* 122, 140402 (2019), Editors' Suggestion
- 10) R. Takagi, and Q. Zhuang, "Convex resource theory of non-Gaussianity", *Physical Review A*, 97, 062337 (2018)

学生へ一言

研究テーマや運営方針は、学生さんと相談の上柔軟に調整したいと思います。食欲に新しいトピックにも挑戦していきたいと考えているので、(広義)量子情報理論に興味があり、同じく食欲な学生さんに志望していただけると嬉しいです！

研究室のメンバー

准教授1名、修士課程2名、博士課程1名、博士研究員1名で運営しています。

統計物理学・物性理論



福島孝治 教授

福島孝治 教授 Koji Hukushima

この研究室では、相転移のようなマクロな系に顕著に現れる協力現象に興味をもって研究しています。特定の研究テーマに限定することなく、各人が個別の研究を進めてお互いに切磋琢磨する場でありたいと考えています。それぞれの研究テーマは脈絡のない寄せ集めではなく、平衡統計力学的な思想が共通項として根底にあります。新しい学問領域や境界領域を multi-discipline と呼ぶことがありますが、それとは異なり既存の分類ではタグ付けできないような un-discipline な (統計力学を基盤にする) 科学の発展を、別の言い方をすれば何をやっているかわからない研究室を目指しています。

相転移の統計力学

「20世紀の科学の大発見の一つは原子分子の発見である」とは理論物理学者のファインマンの言葉です。この原子分子が非常にたくさん集まった結果として、我々の日常生活で多くの豊かな物質世界を目にするわけです。そのとき、原子分子を小数個集めただけではわからないような「量が質を変えてしまう現象」の典型例が相転移現象であり、ミクロからマクロな世界の性質を議論する統計力学は相転移現象の記述する一つの枠組みです。ミクロなモデルは同じなのに、全く異なるマクロな状態方程式が出てくることは、学部で統計力学の講義で相転移現象として勉強することではありますが、単純に驚いたと思います。

これまでに相転移理論は大きく発展して、特に二次転移は分類学としても成功を収めました。依然としてわからないことも多いです。ガラス転移のように現象の理解そのものが整理しきれない問題もあるし、スピングラスのように相の理解が確定していない問題もあります。また、機械学習の推定の問題で成功と失敗を相転移としてとらえられることもあります。学部で熱力学的エントロピーを学びましたが、なかなかその実態は理解できず、統計力学を学んでわかったつ

もりになったかもしれませんが、それでも本当にわかったのかどうかは私には自信がもてないです。適当に与えられたモデルで相転移するかどうかとか、どのタイプの相転移なのかはすぐには答えられないです。だから面白いと感じることがあるのかもしれませんが。

ランダム系の統計力学

現実の系では欠陥等の何らかの意味で均一な系を乱すランダムさが存在します。少々のランダムさではほとんど何の変化も示さないこともあります。一方でランダムさが本質的な役割を果たして、均一系とはかなり異なる性質を示すことがあります。それを理解するためにはランダムさを物理の問題として扱う必要があります。この理論的な扱いはランダム系の統計力学として、スピングラスと呼ばれるランダムな磁性体の研究の中で大きく発展しました。相転移としても興味深い内容を持つ一方で、この数理的な構造が多くの問題と形式的な類似性をもつことも分かってきています。例えば、あるクラスの最適化問題はランダム系の統計力学の問題と等価であることがわかり、ランダム磁性体が相転移をするように、最適化問題も外部変数を変えたときに相転移を示します。このとき解空間に劇的な構造変化が起こり、問題を解くときの難しさと関係していると考えられています。また、ベイズ統計との類似から情報理論との関連も大きく進展しました。我々の研究室では、ランダム系の解析手法の一つであるレプリカ法を用いて、スピングラス理論の発展から最適化問題などの関連する多体問題の統計力学的研究を続けています。

計算物理手法の開発

多体系の非摂動的手法の一つとして、モンテカルロ法や分子動力学法等の計算物理の方法があります。ここでは、ただ単に既存の方法を応用するだけでなく、新しい考えを取り入れた計算手法の開発やその応用方法も重要なテーマと考えています。これまで計算できなかったことが、できるようになると少しだけ世界が広がった感じがします。おそらく新しい実験測定技術を開発することと精神的には共通する感覚かと思います。ランダム系の問題は一般に複雑な準安定状態構造を持ち、非常にゆっくりとした緩和現象を示しますが、それは非常に長い計算時間を必要とし、やっかいな問題です。平衡状態だけに注目をすれば、すばやく平衡状態に緩和する仮想的な動力学を導入してもよいはず。実際にそれが可能なモンテカルロ法を開発して、多くの分野で使われています。

<http://hukushimalab.c.u-tokyo.ac.jp/>

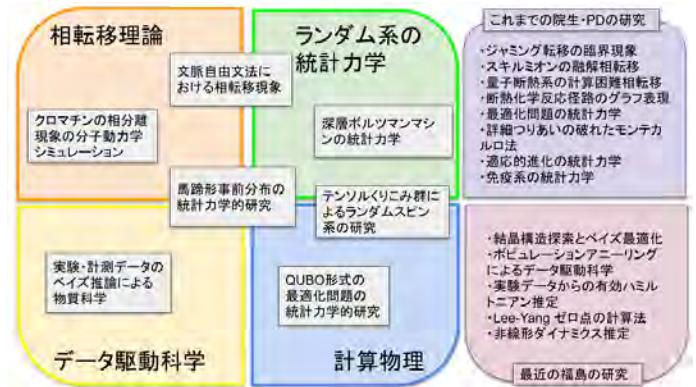
連絡先 教授 福島 孝治 16号館 221A 号室

k-hukushima@ecc.u-tokyo.ac.jp

(^^を半角の@に変えてください)

データ駆動科学の方法論

昨今、機械学習や深層学習を自然科学に応用する研究が流行ってきていますが、真に自然現象を理解するためには何か欠けている気がしています。たとえば、信頼度の評価がわかりにくく、簡便に言えば推定の結果をどのくらい信じてよいのかがよくわかっていません。学生実験のときにうるさいくらい誤差棒の引き方を注意されたのに、機械学習とかAIではそこが注意されないのはおかしいと思いませんか？信頼されるAIとか理解されるAIを望んでいるわけではなくて、誤差棒の描ける機械学習を実際の実験を見ながら考えていきたいです。それを実験計画と絡めて、データ科学から一歩進んだ新しい科学的方法論としてのデータ駆動科学を熟成したいと考えています。



修士論文・博士論文の題目

- 1) スピングラス模型における1段階レプリカ対称性の破れを伴う解の熱力学的構成
- 2) Modern Monte Carlo approaches to classical spin systems: irreversible algorithm and massive parallelization applied to chiral magnets.
- 3) 最適化問題に対する近似アルゴリズムの典型性能に関する統計力学的解析 など
 - 1) 中島哲也君による2009年提出の修士論文で、その内容が評価され一高記念賞を受賞
 - 2) 西川宜彦君による2018年提出の博士論文で、広域科学専攻博士論文特別賞を受賞。

一般的な解説

- 1) サイコロふって積分する方法—モンテカルロ法— 数理科学別冊「確率的情報処理と統計力学」2006年9月
- 2) スケーリング理論とは何か—有限系から無限系を見る方法— 日本神経回路学会誌 14、305、2007年
- 3) スパースモデリングの深化と高次元データ駆動科学、システム/制御/情報 2017年4月
- 4) “More is …”-たくさんあることの物理、 東京大学駒場スタイル、東京大学出版会 2019年6月
- 5) ランダム系に現れる秩序と相転移 ~ レプリカ法による普遍性の見え方と見方 ~、数理科学2021年11月号

主な原著論文

- 1) Solid-liquid transition of skyrmions in a two-dimensional chiral magnet, Phys. Rev. B99, 064435 2019
- 2) Bayesian optimization for computationally extensive probability distributions, PloS one 13, e0193785, 2018.
- 3) Typical approximation performance for maximum coverage problem, Phys. Rev. E 97, 022138, 2018.
- 4) An Exact Algorithm Exhibiting RS-RSB/Easy-Hard Correspondence for the Maximum Independent Set Problem, J. Phys. Soc. Jpn 86, 073001, 2017.
- 5) Bayesian inversion analysis of nonlinear dynamics in surface heterogeneous reactions, Phys. Rev. E 94, 033305, 2016.
- 6) Phase transitions and ordering structures of a model of chiral helimagnet in three dimensions, Phys. Rev. B 94, 064428, 2016. など、詳細はWEBを見てください。

学生へ一言

私はこの研究室を研究者育成場とは考えていません。必ずしも将来に研究者を目指す人だけの集団とは考えていないという意味です。しかし、ここに在籍する数年の間は科学を研究することをできる限り優先してほしいと思います。研究のことで頭の中をいっぱいにして、仲間ととことん議論し、一喜一憂を繰り返して、そして研究を楽しんでほしいと考えています。この丘を越えてみないと、その先の景色は見えないのです。きっと見たことのない風景が待っています。そのとき脳の状態方程式が変わるのです、きっと。

研究室のメンバー

2023年4月現在では、修士課程2名、博士課程6名。

物性理論・強相関量子多体系



堀田 知佐 教授

堀田 知佐 教授 Chisa HOTTA, Prof.

本研究室では、物質の中で無数の電子が繰り出す多彩な量子多体現象を解明し、更にその先に未知の物性を開拓することを目標に据えた理論研究を行っています。実験研究を注視しながらマイクロな有効モデルを構築し、それを解析的あるいは数値的に解いて得られた手がかりをもとに、物質内で展開される「ストーリー」を紡ぎだすというスタイルをとっています。こうした理論は有効理論と呼ばれ、問題が難解で厳密に解けない場合にも、重要な部分だけうまく取り出して物事の本質をとらえる方法論です。

量子多体系・強相関とは？

物性物理学の20世紀は、半導体、超伝導、磁性、誘電性、などといった、今では当たり前となりつつある基本物性が、どのような仕組みであられるかを理解することに邁進した時代でした。そのハイライトが、高温超伝導、分数量子ホール効果、冷却原子などの「強相関」現象です。

強相関とは、一般に電子間の相互作用が強い系を指します。これに量子性が加わって、電子の集団が簡単には想像できないような振る舞いをする系を量子多体系と呼びます。量子多体系の本質を端的に表すやや言い古された言葉として P. W. Anderson の「More is Different」があります。“物質の多様な個性は、物をどんどん小さな要素に分解しても永久にわからない、電子がマクロな集団(More)として振る舞う際に初めてあっと驚くような性質(Different)が現れる”、という物性物理学の醍醐味を表した言葉です。

量子多体理論研究の長年の問題は、モデルの自由度がすこし増えただけで途端に、全く解けなくなってしまうことです。そのような中でどのような工夫をして自由度を減らし、物質中で起こる現象の本質をえぐりだすような有効モデルを作り上げることができるかが、我々理論屋の一つの腕の見せ所です。もう一つの見せ所は、こうして限りなく単純化したモデ

ルから思いもよらない新現象を見出せるかどうかです。

John Von Neumannがかつて”With four parameters I can fit an elephant, and with five I can make him wiggle his trunk”と言ったという逸話が残っていますが、実際、パラメタを増やせば新しいものを作ることはより容易になります。敢えて自由度を削ぎ落とし、そこに在る真実を見出すことが大事だと考えています。

量子多体系の諸問題

量子揺らぎは低次元かつ相互作用が拮抗するような場合に顕著になります。本研究室では、**量子多体性が本質となるような物質(固体)の問題、量子統計の問題、乱れの問題**について興味をもって研究をしています。

たとえば、フラストレートした格子構造～三角格子、カゴメ格子、パイロクロア格子では、格子点上の軌道にある電子やスピン間の相互作用が幾何学的にマイクロに競合することによって、局所的にエネルギーを最低にする(=満足する)ことができなくなり、系のエネルギーがマクロに縮退して、巨大なエントロピーが生まれます。このような状態はしばしば量子揺らぎに敏感に反応して、非自明な量子相をもたらす種となります。我々はこのフラストレート系を中心に、これまでいくつかの新しい量子相を発見・提案してきました。たとえば、三角格子上で、単一自由度だった電荷が、強い相互作用によってピンボール液体相という固体(ピン)と液体(ボール)に分離する相、本来分かつことのできない素電荷 e が、相互作用によって分数化($e/2+e/2$)する相、強相関絶縁体の代表であるモット絶縁体で、電荷が自己組織的に量子力学的電気ダイポールを作り出す相、カゴメ格子系で、 Z_3 スピン液体という、ランダウの相転移の枠組みを超えた新しいトポロジカル秩序相、スピンや電子が無限小の乱れによってグラス化する量子グラス相などです。

また近年物性で盛んに研究されているスピン軌道相互作用の量子多体効果についても最近面白い現象をいくつか見出しています～たとえば、反強磁性体のエネルギーバンドのスピンテクスチャ、スピンが回転しながら格子を伝搬し、量子干渉効果を起こすことで現れる完全フラットバンドやカイラル対称性、スピン軌道相互作用による多彩な磁気状態を示すモット絶縁相などです。

これらの量子相や量子現象は発見論的に見出されたものや実験研究からのリクエストが切欠で見いだされたものも多く、こうすれば見つかる、という処方箋はありませんが、案外

<http://park.itc.u-tokyo.ac.jp/HOTTALAB/index.html>

連絡先 教授 堀田 知佐 16号館 301A号室

chisa^^^phys.c.u-tokyo.ac.jp

(^^^を半角の@に変えてください)

ろいろなところに小さな手掛かりが眠っているものです。研究対象は、金属、絶縁体（誘電体）、磁性体、あるいは π 電子系、d 電子系、f 電子系、遷移金属、有機結晶などの物質系、統計力学基礎論としての量子多体論～純粋状態や混合状態とエンタングルメント、乱れの問題一般です。物性理論の研究室としてはおそらく日本随一といってよいくらい幅広い対象を扱っています。ある種の美学や興味を共有しながら、メンバーが自分の好きなことを自由にそれぞれの個性で追求して研究成果を出していこう！という研究室です。

量子多体数値計算法、エンタングルメント

量子多体系のモデルでは、ヒルベルト空間次元が、 N に対して指数関数的に増大するために 高々 $N \sim 50$ 程度の小さな有限系しか数値的には厳密に解くことができません。我々が使っている手法には、近似的にほぼ厳密に近い unbiased な数値解を得る密度行列繰り込み群(DMRG)や量子モンテカルロ法などがあります。しかし、とある手法で難しい問題は、

他の手法でも別の意味で同程度難しい問題となる、いわゆる「難しさ保存の法則」が往々にして我々を悩ませます。我々は、面白いと思ったテーマを、世界で数人しかできないような難しい solver を用いずとも、一定の努力さえ払えば、アイデア次第で「解ける」新たな方法論を模索してきました。グランドカノニカル数値解析(2012)、sin 二乗変形平均場理論(2021)、密度行列埋め込み群の解析法(2018)、TPQ-MPS(2020)、Cluster-overlap を使った 1 次元と 2 次元の厳密解の構成法(2024)など複数の手法を開発しています。

2000年代からの研究で量子多体の波動関数を精度良く求めるうえでエンタングルメント（系の状態の量子もつれ）を制御することが非常に大事だということが明らかになってきました。最近では、有限温度や 2 次元の量子状態、量子多体ダイナミクスを理解するための研究にも取り組んでいます。

修士論文の題目

- 1) SU(2) gauge field and band structures in strongly spin-orbit coupled electronic systems (中井宏紀 2022 年) 一高記念賞
- 2) Dimensional reduction in a quantum spin system on a 1/7-depleted triangular lattice (幕田 涼 2021 年)
- 3) Magnon excitations in an inversion symmetry broken antiferromagnet (川野 雅敬 2019 年) 一高記念賞
- 4) 行列積状態を用いた熱的純粋量子状態の構築 (岩木敦司 2020 年) 論文特別賞受賞

一般的な解説、レビュー

- 1) 「反強磁性絶縁体のマグノン励起にみられるスピントクスチャと異常熱ホール効果」, 川野, 堀田, 固体物理 **55**, No.3 (2020).
- 2) 「フラストレートした量子多体系」堀田 知佐, 物性研究 Vol. 6 No. 4 (2017 年 11 月号)
- 3) Theories on Frustrated Electrons in Two-Dimensional Organic Solids, Chisa Hotta, Crystals **2**, 1155 (2012)
- 4) 研究室の窓「ヒトと物理のなす量子多体系」 数理科学 2023 年 4 月号

主な原著論文

- 1) Perfect flat band and chiral-charge ordering out of strong spin-orbit interaction, Hiroki Nakai and Chisa Hotta, Nature Communications **13**, 579 (2022),
 - 2) Designing spin momentum locking in inversion-symmetry broken antiferromagnets, Masataka Kawano, Yoshinori Onose, Chisa Hotta, Communications Physics **2**, 27 (2019).
 - 3) Controlling frustrated liquids and solids with an applied field in a kagome Heisenberg antiferromagnet, Satoshi Nishimoto, Naokazu Shibata & Chisa Hotta, Nature Communications **4**, 2287 (2013).
 - 4) Sine-square deformed mean-field theory, M. Kawano & Chisa Hotta, Phys. Rev. Res. **4**, L012033 (2021)
 - 5) Quantum electric dipoles in spin-liquid dimer Mott insulator κ -ET₂Cu₂(CN)₃, Chisa Hotta, Phys. Rev. B **74**, 241104R (2010).
- 最近の論文については WEB をご参照ください

学生へ一言

多くの場合、研究とは華々しいものではなく、山を一步一步登っていくような地道な努力の積み重ねです。日々、手を動かして出てきた、一見無駄にも見える膨大な情報の中に、初めて見えてくるものがあります。それが見えた瞬間の喜びは格別です。力が徐々についていくに従い、自分の選択できる範囲、つまり自由の大きさが広がります。物理は日々進化していきますので、自分の興味の窓を広く開けておくことも大切です。手間を惜しまず、自由の大きさが変わっていく感覚、興味が広がっていく感覚を、一緒に味わっていける人を歓迎します。新しい物理をぜひ一緒に創り出しましょう。

研究室情報

詳細については 逐次更新をしておりますので WEB をご覧ください。
<https://park.itc.u-tokyo.ac.jp/HOTTALAB/>

D1

グループ

物性物理学・一般物理学

粒子線物理学

凝縮系物理学

量子光学・量子エレクトロニクス

生物物理学・脳科学

D2

グループ

分子科学・物質科学

理論化学・理論分子科学

分子分光学・反応動力学

物性化学

無機物質化学

有機物質化学

変わりものの原子の物理



梅林のハイキングにて

松田恭幸 教授 Yasuyuki Matsuda, Prof.
黒田直史 助教 Naofumi Kuroda, Assist Prof.

ふつうの原子は陽子と中性子からなる原子核とそれに束縛された電子からなりますが、私たちは加速器を用いて生成される粒子（反陽子、種々の中間子、ミュオンなど）を含む変わりものの原子（エキゾチックな原子と呼ばれることがあります）を用いて物理や化学に新しい分野を開拓することを目標に掲げ、理化学研究所、広島大学、東京理科大学、高エネルギー加速器研究機構、CERN（スイス）、GSI（ドイツ）、ISIS（イギリス）、TRIUMF（カナダ）など、国内外の大学・研究機関と協力しながら研究をすすめています。

新しいアイデアや意欲を持った方々を歓迎します。

反水素原子を用いた対称性の破れの探索

反水素原子（反陽子と陽電子からなる原子）の精密分光を用いた、自然界における CPT 対称性の検証実験をすすめています。宇宙の生成の謎という大きなテーマに、（反）水素原子という小さなプローブで挑んでいます。

実験はスイスジュネーブ郊外にある CERN（ヨーロッパ原子核研究機構）の反陽子減速器(AD)で行っています。AD には 3つの国際共同実験がありますが、私たち MUSASHI グループはそのうちのひとつである ASACUSA 共同実験の主要メンバーとして参加し、これまでに反陽子と陽電子の蓄積について実績を積み上げてきました。特に反陽子の強度は他の国際共同実験を大きく上回り、我々のグループの大きな強みとなっています。2009 年度には反陽子と陽電子をカスプトラップの中で同時に閉じ込めて混合することに成功し、2010 年には冷えた反水素をカスプトラップ内で合成することに成功しました。この成果は反水素をビームとして引き出し、精密分光実験を

行うための重要なステップとして、英国物理学会 (IoP) の Physics World から Breakthrough of the Year の第 1 位に選ばれるなど、国内外から高く評価されました。現在、合成した反水素を実際に引き出してマイクロ波を用いた精密分光実験を行うために、RF キャビティや収束用 6 重極磁石をビームラインに設置すると同時に、陽電子の蓄積効率や反水素の合計効率の向上のための装置の改良を進めています。

また、反水素を用いて物質と反物質に働く重力が同じかどうかを確かめようという実験についても、検討を進めています。

超低速反陽子による反陽子原子生成過程の研究

反陽子を数 eV の単色直流ビームとして取り出すことができるのは世界でも私たち MUSASHI グループだけです。このビームを用いて、プロトニウム ($\bar{p}p$) や反陽子ヘリウム原子 ($\bar{p}e\text{-He}^{++}$) などの反陽子原子の生成に関わる衝突ダイナミクスを研究しています。通常の原子衝突とは異なり、質量と電荷符号がさまざまに組み合わさった過程を研究することで、より一般的な衝突ダイナミクスの理解にむけた新しい情報を提供できるものと考えています。



MUSASHI は総合文化研究科の松田研究室、理化学研究所、広島大学、東京理科大学などで構成されるグループで、ASACUSA 国際共同実験の中核グループとして活躍しています

<http://radphys4.c.u-tokyo.ac.jp>

連絡先

教授 松田 恭幸 16 号館 222A 号室
matsuday (at) phys.c.u-tokyo.ac.jp

助教 黒田 直史 16 号館 102 号室
kuroda (at) radphys4.c.u-tokyo.ac.jp

反陽子の磁気モーメントの精密測定

ペニングトラップと呼ばれる荷電粒子トラップの中に1つだけ閉じ込めた反陽子の運動を精密に測定することによって反陽子の磁気モーメントを精密に測定する実験を、理化学研究所やドイツのマインツ大学らと共同で行っています。2017年には10億分の1に迫る精度での測定に成功し、世界記録を更新しました。この結果はマインツ大学のグループによる陽子の磁気モーメントの精密測定の結果と合わせて、ハドロン系でもっとも精度の高いCPT対称性の検証実験となっています。現在は、さらにこの精度を上げるべく、トラップされた反陽子の新たな冷却方法を開発しています。また、同じ測定装置を用いて、反陽子の荷電質量比や反陽子の寿命の直接測定も行われ、どちらもこれまでの世界記録を大きく更新しています。

ミュオニウム原子の超微細構造の分光実験

量子力学の授業で習う通り、水素原子のエネルギー準位の測定と理論計算は量子力学と場の量子論の発展に大きな役割を果たしてきました。現在、水素原子のエネルギー構造は非常に高い精度で測定されていますが、原子核である陽子の大きさとその内部構造が分からないために厳密な計算が難しく、実験値との比較は難しい状態です。

ミュオニウム原子（ミュオンと電子からなる原子）は正電荷をもったミュオンが陽子の代わりになっている水素状原子です。ミュオンは電子と同じく大きさと内部構造をもたないため、理論計算が比較的容易です。そこで、私たちはこのミュオニウム原子のエネルギー構造を精密に測定し理論値と比較することでQEDの精密検証や、新粒子の探索等を行おうと考えています。

東海村に日本原子力研究機構と高エネルギー加速器研究機構が共同で建設したJ-PARCは世界最高強度のミュオンビー

ムを作ることができます。このビームを用いてミュオニウムを大量に生成し、その超微細構造の精密分光を行う計画を高エネルギー加速器研究機構とともにすすめています。2011年度から装置の設計・製作を行ってきましたが、2017年度にはゼロ磁場中での分光実験を行い、統計量としては世界記録を更新できる分のデータ収集を行いました。現在はこのデータの解析を行うとともに、磁場中での分光実験に向けた準備を進めています。また、同じ測定装置を用いて負ミュオンが電子を置き換えたミュオニック原子の分光なども検討しています。

大量に作られたミュオニウム原子から質の高い低エネルギーミュオンビームを作り、ミュオンの異常磁気能率を精密に測定する実験の計画も進めています。

ミュオニウム原子を用いた化学反応の研究

ミュオニウム原子（ミュオンと電子からなる原子）は水素原子の軽い同位体と考えることができます。同位体とは質量が異なる「同じ」元素のことですが、その質量の違いによって化学反応の様子はわずかながら異なります。水素原子のおよそ1/7の重さしかもたないミュオニウムは、こうした同位体効果を研究するすぐれたプローブで、特に、ゼロ点振動やトンネル効果が重要となる化学反応の研究でその威力を発揮します。

現在、理化学研究所、TRIUMF研究所と共同で、パルスミュオンビームの特徴を生かして、レーザーによって励起された水素分子とミュオニウム原子との化学反応速度の計測を目指し、イギリスオックスフォード近郊にある理研RALミュオン施設で実験準備をすすめています。

主な原著論文

- 1) A parts-per-billion measurement of the antiproton magnetic moment, *Nature*, **550**, 371 (2017)
- 2) Sixford improved single particle measurement of the magnetic moment of the antiproton, *Nature Communications*, **8**, 14084 (2017)
- 3) New precise measurement of muonium hyperfine structure interval at J-PARC, *Hyperfine Interactions*, **238**, 14(2017)
- 4) Direct detection of antihydrogen atoms using a BGO crystal, *Nucl. Instrum. Meth. A*, **840**, 153 (2016)
- 5) A source of antihydrogen for in-flight hyperfine spectroscopy, *Nature Communications*, **5**, 3089 (2014)

学生へ一言

私たちの研究室は国内外のさまざまな研究機関と協力しながら、加速器を用いて作られる粒子を使って基礎物理から応用まで幅広く研究をすすめています。自然界の法則を新しいプローブを使って探求しようという意欲を持った方、海外の研究所で最先端の実験をしたい！という方、新しい研究室と一緒に作っていこう、という方を歓迎します。お気軽にご連絡ください。

応用量子物理学



深津研究室
応用量子物理学
16号館 506A, 506B, (507A)
http://park.itc.u-tokyo.ac.jp/fkatz

深津 晋 教授 Susumu Fukatsu, Prof.
安武裕輔 講師 Yuhsuke Yasutake, Lecturer
広域システム科学系
助教 Assist. Prof., (近日着任予定)

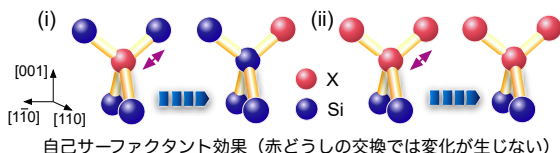
物質を対象とする物性物理学。光量子を扱う量子光学。そしてこれらを包摂する量子物理学。従来はバラバラだった学理が融合した先に「応用量子物理学」が位置します。我々は、この応用量子物理学を駆使することで空想だにされない特性の物質、物理的特性に斬り込もうとしています。ターゲットは、日常的な環境で発現する非古典的な効果や誰も実現できないデバイス機能です。「そんなことできるわけない」「おや?」「あれ?」等の反応を期待しています。時には専用の実験装置や未踏の計測技術が要求されますが、これらを実現することも自体も研究のターゲットです。

【半導体薄膜の結晶成長—不安定な世界は宝の山】

物質の性質を理解し、制御することが物性物理の目的です。しかし、自然が用意した物質だけを調べる研究は過去の話。今や物理屋でも物質を「自炊」するのが現在の時代です。

物質の性能はほぼ設計で決まります。「量子現象や非古典効果」の舞台である物質は実はデザイン勝負なのです。非従来型の性質の多くは「自然に安定に存在しない相」で発生します。これをいかに克服し制御するかが問題です。

近年、原子層物質に注目が集まっています。相対論的電子や幾何学位相に加えてスピン分極の光制御も興味深い。我々は、多彩な物性が期待される原子層物質の「3次元ヘテロ構造」の実現を試みています。このためには「不安定性の解決」に加えて「薄膜=2次元」の固定観念の打破が必要です。スピン軌道結合が強く、サーファクタント効果によって3次元エピ成長を支援する物質の発見が要です。



一方、ワイドギャップ半導体は物質科学の新境地です。絶縁体に属するこれら物質では、pドーピングの困難や紫外発光の大気吸収など通常半導体の常識が通用しません。我々は、未開拓の光量子物理と新奇デバイスの創製を目指し、準安定相を自在に制御できる手法の確立に挑みます。

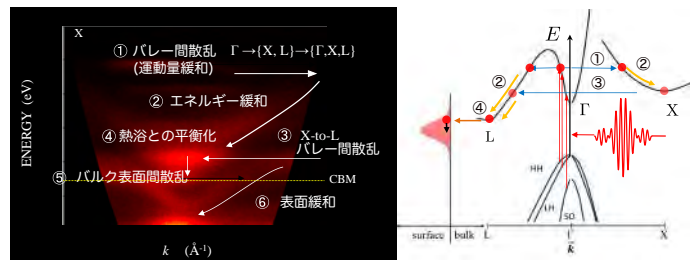
【光物理からシリコンレーザーまで】

工エレクトロニクス全能のシリコンも光ではイマイチです。とくにLEDのように光を発生することが大の苦手です。注入型のシリコンレーザーは有史以来の人類の夢であり、今流行りのシリコンフォトリソグラフィの鍵を握っています。

現段階で想定される実行可能なシナリオはふたつです。ひとつは結晶の操作、もうひとつは光と電子の相互作用からのアプローチです。前者は、前述の「不安定な結晶の相」による方法です。シリコン近縁のゲルマニウム混晶は、高歪下か準安定の六方晶でレーザー発振に有利なバンド構造に変化します。これらを実験で検証することを試みます。またワイドギャップ障壁の量子構造も選択肢の一つです。

相互作用制御は同族ゲルマニウムの発振が試金石です。そのままスピンLED・レーザーに直結する点も魅力です。電子ラマン散乱とバンド端再結合を競合させる戦略によって自然放光増幅やレーザー発振の実現に挑みます。

これらの過程を支配するのが電子のバレー間散乱です。バレー間散乱はバレー毎に異なるスピン分極率などの効果もたしますが、超高速現象のため詳細は未解明でした。我々は、スピン敏感ポンプ・プローブ蛍光法や共同研究の2光子光電子分光を利用して全貌解明と制御に挑みます。

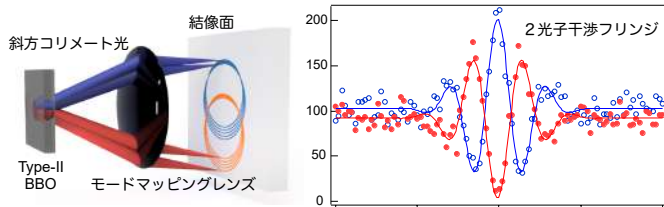


角度時間分解2光子光電子分光によるGeのバレー間散乱の観測。(大阪市大との共同研究)

これに代表されるように光物理の理解の深化は、デバイス機能の開拓とその高度化を促すことから、これまでに積極的に新物質の光物理に斬り込んできました。最近の例は、太陽電池開発にインパクトがある有機無機ペロブスカイトの光誘起構造相転移、化合物半導体量子構造での蛍光アップコンバージョン、近赤外発光に特化した有機分子です。

【量子物理からポータブル非古典光源まで】

量子エンタングルメントは、非古典性の現れの象徴です。離れた2粒子間の強い相関は、奇妙で好奇心を刺激します。単一光子やスクイズド光の特異性は、通信・情報処理で威力を発揮しますが、従来、研究室レベルに留まりました。我々の野心は、これらをフィールドへ持ち出すことです。



LEDポンピングによる周波数離調した偏光エンタングル光子対発生

エンタングルメント純度へのコヒーレンスの影響を調べ、レーザー限定の非古典光発生をLEDで実現させました。今後は、デコヒーレンス耐性をもつ光子や太陽光でエンタングル光子対を作る無電源ポータブル光子源に挑みます。

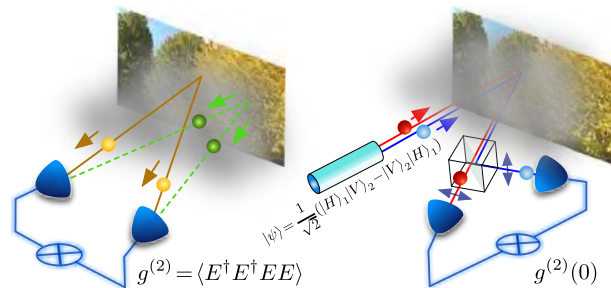
他方、電極が不要の光学物性評価は便利です。出力信号は大抵、プローブ光強度の増加関数で過大入力禁物です。ここで多光子状態が真価を発揮します。1光子の位相変化がN光子ではN倍になるからです。エンタングル多光子であれば量子限界の精度での精密測定が可能になります。吸収性媒質の磁気光学等を例に、量子プロトコルが測定精度で古典プロトコルを凌駕することの検証を試みます。

弱測定は、認知度が浅いながらも量子力学にもとづく新機軸の計測原理です。その本質の理解することで時間・周波数ドメインで超微小信号の非破壊検出を試みます。

【 推定からゴーストプロトコルによる物性計測まで 】

物理計測は、つねに決定論的で測定事実に基づいています。

「推定」はこの制約を取り除き、測定を高速化させます。我々は、スパースモデリングの方法を駆使して、装置固有の「周波数帯域を無制限に拡大可能」なことを示しました。「推定」を駆使して物性計測のさらなる高度化に挑みます。



2光子干渉とエンタングル光子対を利用した擾乱耐性イメージング

ところで「物体を見ない撮像」、「スリットなしの光回折」は違和感が満載ですが、ゴーストイメージング(通称 GI)はこれらを可能にする奇妙ながら合理的な光学技術です。まず、光束が2経路に分かれます。光路1にはスリットと全検出型の検出器1があり、他の光路には2次元カメラ。2光子に予め一定の相関を持たせると、スリットのない光路の側にスリットの像や回折フリンジを呼び起こせます。実体がないゆえゴーストイメージング、ゴースト回折です。時間ドメインの差動イメージングやゴースト回折を実証済みであり、ゴースト・プロトコルの進化を模索します。

実は、非古典的な2粒子相関とも密接に関係しています。一見すると無相関な概念どうしを融合させることで、新たな物性計測への道が拓けます。我々は、ワイドギャップ半導体の紫外分光を、非線形光学も何も使わずに可視光だけでかつ「非局所的」に行えることの検証に挑んでいます。これにより真空紫外域の研究を一気に加速できます。

一方、物性計測はつねにノイズや信号の劣化に悩まされます。我々は、非局所的な相関を巧みに利用することで擾乱に耐性をもつ信号・情報伝送の実現を目指しています。

修士論文・博士論文の題目

- ・有機無機ハライドペロブスカイトの光誘起総転移 (超低密度の光励起で構造総転移が誘起できることの検証)
- ・Ultra-Thin-Body Ge の量子閉じ込め効果 (酸化物障壁 Ge 量子井戸の分光学的研究)
- ・一軸及び二軸性応力を印加したゲルマニウムにおける電子ラマン遷移の研究 (バンド端に電子ラマン遷移の共鳴)
- ・ゲルマニウムにおける光スピン制御 (フォノンフィルタによるパレー依存のスピンスピン生成)
- ・重金属を含む物質の光学的評価に関する研究 (NOON 状態エンタングル光子対を用いた位相変化の量子増幅)
- ・圧縮センシングによる帯域制限の緩和と信号の時間波形再生 (装置固有の周波数帯域拡張技術)
- ・ゴーストイメージング・ゴースト回折の時間ドメインへの拡張 (時間ドメインでゴースト・プロトコル)
- ・低コヒーレンス光励起によるパラメトリック下方変換を使った非古典光生成の試み (LED ポンプの単一光子源)
- ・散逸・擾乱のある環境下での通信・計測への応用に関する研究 (デコヒーレンス耐性光の2光子量子トモグラフィ)

最近の原著論文

- 1) "Synthesis of a Black Dye with Absorption Capabilities Across the Visible-to-Near-Infrared Region: A MO-Mixing Approach via Heterometal Coordination of Expanded Porphyrinoid", Wang, Yue, *et al.*, *J. Amer. Chem. Soc.* **142**, 6807 (2020). (可視一近赤外の広域超光吸収分子の発見)
- 2) "Heralded single-photon source fueled by light-emitting diode", D. Nishii, Y. O-oka, Y. Okawa and S. Fuaktsu, *Appl. Phys. Lett.* **115**, 211106 (2019). (LED ポンプの単一光子源)
- 3) "Differential ghost imaging in time domain" Y. O-oka and S. Fukatsu, *ibid.* **111**, 061106 (2017). (時間ドメイン差動 GI)

研究室のメンバー

博士課程 1 名、修士課程 2 名

学生諸君へ一言

"なにかすごいことをやりたい"と思うのなら"普通のことがちゃんとできること"を目指してください。スーパープレーよりも"ごく当たり前のことが普通にできること"の方が、実はずっと大切なことです。また"すごいことをやらなければ"と思った途端に研究が楽しくなくなります。自然体で楽観的であれ。

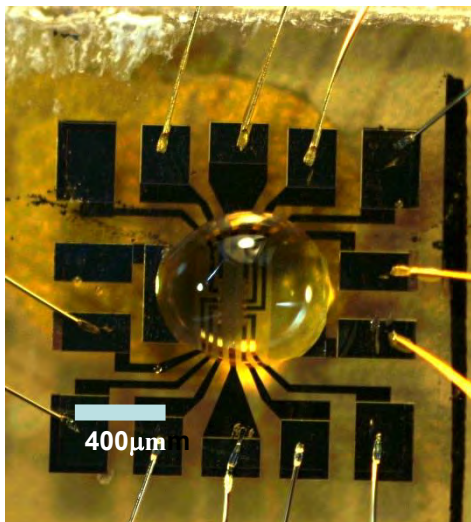
薄膜・界面の電子物性



上野和紀 准教授

上野 和紀 准教授 Kazunori Ueno, Assoc. Prof.

新しい物質や物性を見つけるために、今までは新しい化学組成を持つ物質を探す「化学の」手法が主に使われてきました。上野研究室ではこれにかわる「物理の」手法による新物質、新規現象を見つけることを目的に研究を行っています。たとえば、化学の手法では透明な酸化アルミニウムの単結晶に微量のクロムを加えると赤いルビーに、チタンを加えると青いサファイアに変わります。我々が気軽に（常温・常圧で）作ることができる高温超伝導体は、電気を流さない絶縁体の母物質の化学組成をわずかに変化させることで生み出されました。酸化物に代表されるイオン結合性の物質は熱平衡状態で化学組成に対応する結晶構造を持つので、化学組成を制御すれば新物質が作れるから「化学的」な新物質合成なわけです。それに対して、上野研では「次元性」と「キャリア濃度（フェルミエネルギー）」を制御するという「物理的」な方法で新物



電気二重層トランジスタ素子。中央部に水滴のように見える電解液と酸化物薄膜の界面に電場誘起超伝導が起きる

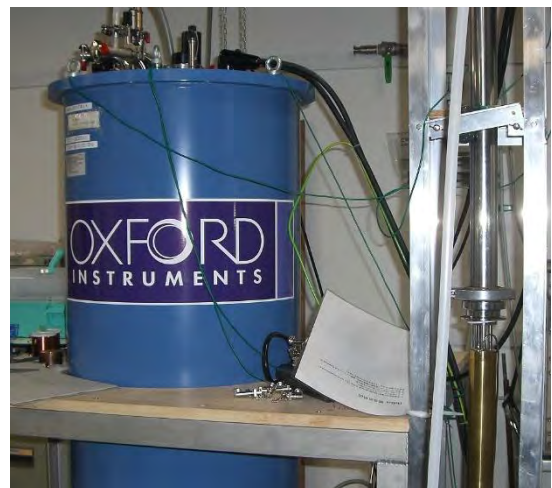
質・新物性の実現と、その応用（デバイス化）に挑みます。

電場誘起による新しい超伝導体・磁性体の開発

超伝導体は極低温でエネルギーの消費なしに電気を流せる材料であり、環境・エネルギー問題を解決する切り札として期待されています。我々は新しいトランジスタ素子である電気二重層トランジスタを用いることで絶縁体への超伝導の電場誘起に初めて成功し、さらにこの手法を応用することで新しい超伝導体を発見してきました。現在、さらに新しい超伝導体を発見すべく研究を進めています。

電場誘起キャリアドーピングの手法では物質の化学的な性質によらずキャリアを作り出すことができます。実際、我々の発見した超伝導体 KTaO_3 は従来の化学的な手法では超伝導にならない材料でした。さらに、 KTaO_3 ではデバイスをつくる結晶の「面方位」を変えることで超伝導になる温度が大きく向上することが発見されました。これも、「化学的な手法」ではあり得ないことあり、より高い特性をもつ超伝導体の実現を目指して研究を進めています。

超伝導と同様に電荷密度や界面の作成によって大きく物性を変えるのが強磁性体や反強磁性体などのスピントロニクス材料です。たとえば、銅は導線によく使われる常磁性体ですが、原子の電荷数を一つ減らせば強磁性のニッケルになります。我々は同様に強磁性体のパラジウムや白金に電界効果トランジスタを組み合わせることで、従来は常磁性だと考えられてきた物質に強磁性を創り出せることを発見してきました。今後、こうした研究を応用し、スピンを制御するデバイスを作りたいと考えています。



ヘリウム3 冷凍機。0.3 K の極低温と 8T の高磁場により超伝導や磁性の評価を行う

二次元での新しい現象・物質開発

物質の表面だけを電気が流れる状態にする（界面伝導）、あるいは導電性の物質そのものを原子数層の厚みにすると、電子は三次元ではなく二次元の面内だけを動けるようになります。すると、元の三次元の物質からバンド構造が変化し、超伝導や強いスピン軌道相互作用、絶縁体転移など様々な現象を起こすことができます。

我々が取り組んでいる二次元物質をつくる一つの手法が薄膜作成です。単結晶基板の上に一定の条件下で物質を堆積すると、三次元の物質と同じ高品質の単結晶を、結晶格子1層単位で自由な厚さに作成することができます。さらに、薄膜作成では化学的に、熱力学的には存在できないはずの物質を作ることができます。すなわち、薄膜では下地の単結晶基板と同じ構造の物質を作ろうという「界面エネルギー」を得するために、バルク単結晶としては熱力学的に存在しえない不安定な物質をつくることができます。

最近の研究を例にすれば、ニオブやタンタルは酸化物としては5価が安定なため、4価の安定な物質を作ることができません。それに対して極薄膜では SrTaO₃ という物質が安定に存在することを発見し、強いスピン軌道相互作用をも新物質として報告しました。私は応用化学科の出身なので、化学のセンスと物理の手法を組み合わせた研究の一つの特色として

ています。上野研は実験物理の D1 グループに所属していますが、化学のバックグラウンドをもつ学生が物理の分野に来る

ことで、より広がりのある、新しい研究ができると考えています。

二次元物質としてもう一つ取り組んでいるのが層状物質です。炭素（グラファイト）を原子1層スケールで剥離した物質をグラフェンと呼び、非常に高い移動度を持つとともに超伝導を示すなど非常に面白い物性を持ちます。炭素を同じ14族元素のゲルマニウムで置き換え、水素を添加して安定化したものがゲルマナン(GeH)です。上野研では電気二重層トランジスタを用いてゲルマナンが p 型、n 型の両側トランジスタとして良好なスイッチング動作を示すことを初めて報告し、半導体デバイスとして重要な物性パラメータである移動度が低温で非常に高くなることを見出しました。現在はグラフェンで報告された超伝導や量子ホール効果を目指して、極低温での研究に取り組んでいます。電気二重層トランジスタを用いた研究は層状物質と相性がよく、ゲルマナンだけでなく様々な二次元物質に組み合わせることができます。最近は二次元の強磁性体やトポロジカル絶縁体など様々な面白い物質が報告されており、今までになかった物性を引き出しさせるのではないかと考え研究を進めています

主な原著論文

- 1) "Large Rashba parameter for 4d strongly correlated perovskite oxide SrNbO₃ ultrathin films" Hikaru Okuma, Yumiko Katayama, and Kazunori Ueno, *Phys. Rev. Mater.* 8, 015001 (2024)
- 2) "Ambipolar transistor action of germanane electric double layer transistor" Y. Katayama, R. Yamauchi, Y. Yasutake, S. Fukatsu, and K. Ueno, *Appl. Phys. Lett.*, 115, 122101 (2019).
- 3) "Electric field control of magnetic anisotropy in a Co/Pt bilayer deposited on a high-κ SrTiO₃", S. Nakazawa, A. Obinata, D. Chiba, K. Ueno, *Appl. Phys. Lett.*, 110, 062406 (2017).
- 4) "Effective thickness of two-dimensional superconductivity in a tunable triangular quantum well of SrTiO₃", K. Ueno, T. Nojima, S. Yonezawa, M. Kawasaki, Y. Iwasa, Y. Maeno, *Phys. Rev. B* 89, 020508 (R) (2014).
- 5) "Electrically-induced ferromagnetism at room temperature in cobalt-doped titanium dioxide", Y. Yamada, K. Ueno, T. Fukumura, H. T. Yuan, H. Shimotani, Y. Iwasa, L. Gu, S. Tsukimoto, Y. Ikuhara, M. Kawasaki, *Science* 332, 1065 (2011).
- 6) "Discovery of superconductivity in KTaO₃ by electrostatic carrier doping", K. Ueno, S. Nakamura, H. Shimotani, H. T. Yuan, N. Kimura, T. Nojima, H. Aoki, Y. Iwasa, M. Kawasaki, *Nature Nanotechnology* 6, 408 (2011).

学生へ一言

上野研は世界にない新しい物質を作る、新しい現象を発見したいという若い力を求めています。綺麗な薄膜が作れた！という小さな喜びから、超伝導でゼロ抵抗が見えた！という大きな喜びまで、日々の研究は楽しみに満ちています。ひとつひとつ手を動かして実験し、研究の楽しさを積み重ねることが大きな発見につながります。

いままでの学生たちも半導体や超伝導を全く知らない状態から勉強し、実験を重ね、学会発表をしていくことで、卒業するときには一人前の研究ができるようになっていきます。物理学だけでなく材料化学や電子工学など広いバックグラウンドから意欲のある方を歓迎します。

トポロジー・磁性・スピントロニクス



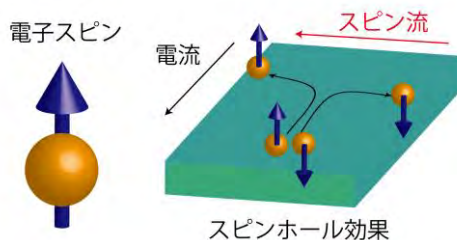
塩見雄毅 准教授

塩見 雄毅 准教授 Yuki Shiomi, Assoc. Prof.

塩見研では物質の磁氣的性質(磁性)・トポロジーに注目して、磁性体における物性物理学の実験研究を行っています。物質試料の合成から物性計測、数値計算による結果の解析まで一貫した研究を行うことで、世界で誰も見たことのない新現象の開拓に挑んでいます。永久磁石を代表例とする物質の磁性は、物性物理学において最も歴史の長い分野の一つであるに加えて、スピントロニクスとして応用物理学上も重要な分野です。新しい物理現象の開拓が実用にまでつながるような優れた研究成果を生み出すことを大きな目標にしています。



磁石



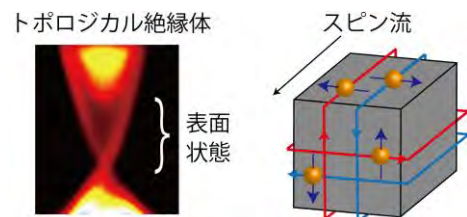
スピントロニクス効果

【磁石(磁性体)の応用と基礎】(上図)磁石の応用の例。(下図)電子スピンとスピントロニクス効果。電流により磁気の流れである「スピントロニクス」が生成される。

トポロジカル・スピントロニクスおよび 2D スピントロニクス

トポロジーは、もともと数学の一分野ですが、最近では物質科学の分野でも重要な概念であることが指摘されています。最も代表的な例が、トポロジカル絶縁体を始めとするトポロジカル物質です。トポロジカル物質においては、電子のスピン自由度と電荷自由度が強く結合しており、超高効率なスピントロニクス素子が実現可能であると言われています。スピントロニクスは固体中の電子が持つ電荷とスピンの両方の自由度を工学的に応用する分野であり、次世代エレクトロニクスの基盤技術として期待されています。我々は、トポロジカル物質のスピントロニクス応用に関して先駆的な成果をあげており、世界的にも評価されています。最近では遷移金属ダイカルコゲナイドのような層状構造をもつ 2 次元物質におけるトポロジカル現象にも着目し、輸送現象や光学応答の観点からスピントロニクス基礎研究を行っています。

物性物理学において、トポロジカル物質や 2 次元物質の積層によるファンデルワールスヘテロ接合超格子は世界的に盛んに研究されています。その中で我々は 2 次元物質において電子系のみならずスピン波(マグノン)におけるトポロジカル現象の開拓も世界に先駆けて達成しています。このように塩見研では幅広い視点から、トポロジカル・スピントロニクスおよび 2D スピントロニクスの研究を行っています。



【トポロジカル絶縁体】トポロジカル絶縁体の表面はスピントロニクスが流れており、スピントロニクス応用が期待される。

スピントロニクスと隣接分野の分野横断的研究

塩見研は、スピントロニクスと隣接分野との境界領域での研究も積極的に行っています。例えば最近では、CDなどで用いられている相変化記録技術との融合や、クリーンエネルギーである水素を用いたスピントロニクス機能変調を達成しています。

別の例としては、磁性を用いた新しい圧電効果である磁気圧電効果を発見した成果があります。そもそも圧電効果とは、

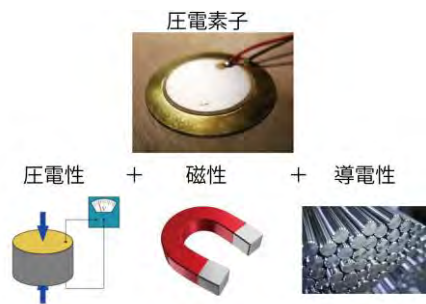
<https://yukishiomi.com/>

連絡先(電話番号は 03-5454-を最初に付ける)
准教授 塩見雄毅 16号館 622号室 TEL -6742

yukishiomi (at) g.ecc.u-tokyo.ac.jp

特定の種類の物質材料に圧力を加えて歪みを生じさせることで、電圧が発生する現象をいいます。圧電効果は電子機器にも広く利用されている重要な物理現象ですが、主流である圧電効果材料は有害な鉛を含んでおり、環境負荷の低減のために鉛フリーの圧電効果材料開発が熱望されています。

我々は、これまでの圧電効果研究で見逃されていた磁性金属に注目し、物理的に新しい圧電応答である磁気圧電効果を世界で初めて観測しました。物質材料が金属である場合には、圧電効果により生じた電気分極は、動き回る多量の電子により通常は打ち消されてしまいます。そのため金属材料は圧電効果を発現しないと考えられてきました。我々は物質の磁性を利用することでこの常識を打ち破り、鉛フリー圧電効果材料開発の新しい設計指針を提示しました。



【磁気圧電効果】磁気圧電効果を使うことで、圧電性・磁性・導電性を併せ持った複合機能材料が生まれる。

磁気圧電効果を用いれば、従来は圧電特性との共存が難しかった導電性と磁性を合わせ持った複合機能材料の開発が可能となり、スピントロニクス応用も期待されます。基礎物理学的にも、磁気圧電効果はトポロジーや奇パリティ多極子など最新の物性物理学における重要キーワードとも関連することが指摘されており、今後の研究発展に期待がもたれます。

その他(新物質の合成、接合試料の合成、数値計算解析)

塩見研では、学生の興味に応じて研究テーマを選択できます。例えば、主な実験手法として試料合成を行うか、物性計測を行うかの選択が可能です。試料合成においては、バルク物質試料、薄膜試料、ナノワイヤ試料などの新しい物質試料の合成を行い、磁気物性の研究やスピントロニクス応用を目指します。また、ファンデルワールスヘテロ接合などの手法により、超伝導体などのエキゾチック物質と磁性体を接合した複合磁性体物質の開発も行っています。物性計測においては、磁気輸送現象測定、圧電効果測定、スピン流計測、磁気光学イメージング測定などが現在進行しているテーマです。

物性理論研究室との合同ミーティングや異分野の理論研究者との議論も活発に行っています。塩見研でも、計算用パソコンを用意し、バンド計算やマイクロマグネティクス計算による数値計算に基づく実験結果の解析も行っています。

塩見研は、各メンバーの興味や自主性を大切に、幅広い研究テーマを扱いたいと考えています。学生からの分野横断的な creative なアイデアも歓迎します。

主な原著論文

- 1) "Giant Magnetochiral Anisotropy in Weyl-semimetal WTe_2 Induced by Diverging Berry Curvature", T. Yokouchi, Y. Ikeda, T. Morimoto, and Y. Shiomi, *Phys. Rev. Lett.* **130**, 136301 (2023). Editors' suggestion
- 2) "Trapping and manipulating skyrmions in two-dimensional films by surface acoustic waves", Y. Miyazaki, T. Yokouchi, and Y. Shiomi, *Sci. Rep.* **13**, 1922 (2023).
- 3) "Quantum oscillations from Fermi arc surface states in Cd_3As_2 submicron wires", Y. Miyazaki, T. Yokouchi, K. Shibata, Y. Chen, H. Arisawa, T. Mizoguchi, E. Saitoh, and Y. Shiomi, *Phys. Rev. Research* **4**, L022002 (2022).
- 4) "Phase-change control of anomalous Hall effect in ferromagnetic $MnBi$ thin films", S. Zhang, Y. Miyazaki, T. Yokouchi and Y. Shiomi, *Appl. Phys. Lett.* **121**, 262402 (2022)
- 5) "Enhancement of Current-Induced Out-of-Plane Spin Polarization by Heavy-Metal-Impurity Doping in Fe Thin Films", T. Yokouchi and Y. Shiomi, *Phys. Rev. Applied* **16**, 054001 (2021)
- 6) "Reconfigurable single-material Peltier device consisting of magnetic-phase junctions", K. Nakagawa, T. Yokouchi, and Y. Shiomi, *Sci. Rep.* **11**, 24216 (2021).

研究室のメンバー

修士課程 6 名, 博士課程 3 名 (出身大学: 東京工業大、東京大、東京理科大、早稲田大など)

学生へ一言

挑戦の連続である研究活動にまい進し、それがうまくいったときの喜びを一緒に味わいませんか。

原子物理学・レーザー冷却・量子センシング実験



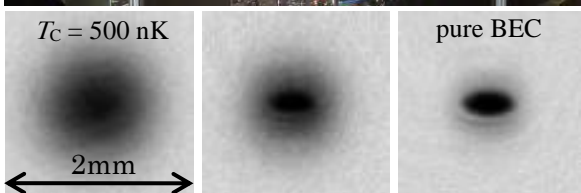
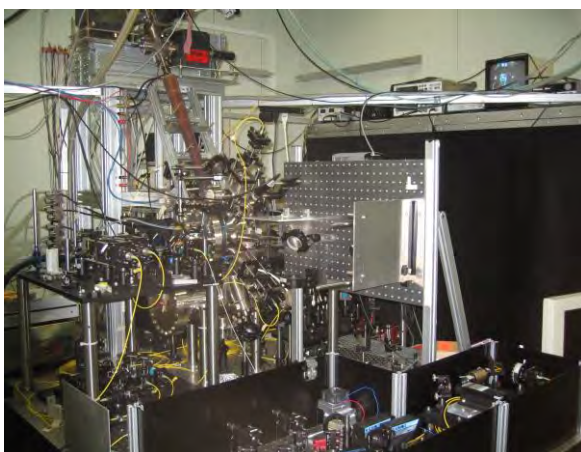
鳥井寿夫教授

青木貴稔助教

鳥井 寿夫 教授 Yoshio Torii, Prof.

青木 貴稔 助教 Takatoshi Aoki, Assist. Prof.

レーザーを用いて気体原子を冷却または捕獲する「レーザー冷却」という研究分野は、1980年代後半から飛躍的に発展し、1995年にはマクロな数の原子が量子力学的に許される最低エネルギー状態を占めるボース・アインシュタイン凝縮 (BEC) が実現されました。BECは原子間相互作用が制御できる理想的な量子凝縮系として多くの研究者の興味を引き続け、原子物理学、凝縮系物理学、素粒子物理学、量子光学、量子技術などを取り込む大きなサブフィールドを形成しています。以下に本研究室が現在取り組んでいるテーマを紹介します。



(上) Rb 原子ボース・アインシュタイン凝縮体生成装置。凝縮した原子数では世界最高 ($\sim 10^7$ 個) を誇る。(下) 原子気体の BEC 相転移を表す吸収画像。左図が熱的原子集団、右図が純粋なボース凝縮体。このように、我々はボース凝縮体の波動関数を直接観測することができる。

原子のレーザー冷却を用いた極低温分子の生成、および電子の電気双極子モーメント(EDM)の量子センシング

電子は、電荷 $-e$ を持ちますが、電気双極子モーメント (EDM) も持っているかもしれないと考えられています。レーザー冷却した原子・分子を用いると、電子 EDM を超高感度に測定でき、スイス CERN の世界最高エネルギーの加速器 LHC を遥かに上回る高エネルギーの新粒子の探索に相当します。我々は世界最高の性能を誇るルビジウム原子の BEC 生成装置を保有し、リチウム原子およびストロンチウム原子も同時にレーザー冷却できる装置を開発しました。これら冷却原子から人工的に冷却分子を生成し、量子センシングを用いた EDM 探索を目指しています。

冷却原子の量子センシングによるダークマター探索

現在の物理学では、宇宙は、我々の銀河・太陽系などの物質 (5%) よりも、ダークエネルギー (68 %) やダークマター (27%) など未知のものが支配的であることが知られています。そして、その正体を探る研究が世界中で活発に行われています。このうち、ダークマター (暗黒物質) は、光では直接観測できません。しかし、原子内の「弱い力」によるパリティ破れの影響を「光」で検出することで、ダークマターを探索することができます。我々は、光技術と弱い力を組み合わせて、量子エンタングル状態の原子でダークマターの測定感度を高める全く新しいアイデアを提案しました。光技術と弱い力を組み合わせた量子センシングは、新しい分野を開拓します。

リドベルグ原子の量子エンタングルメント状態を用いた量子センシング

近年、原子の超精密周波数分光の発展により、原子時計・原子干渉計・基礎物理の探索など活発に研究されており、原子を用いた外場などの精密計測は、「量子センシング」と呼ばれています。特に、量子エンタングル状態を用いた量子センシングの測定感度は、標準量子限界 (Standard Quantum Limit, SQL) を突破します。我々はリドベルグ原子のシュレーディンガーの猫状態を用いた、SQL を超える超高感度な電場の量子センシングを研究しています。シュレーディンガーの猫状態は、巨視的な量子重ね合わせ状態であり、これによるセンシング技術の高感度化は、ホットなトピックとなっています。

<http://atom.c.u-tokyo.ac.jp>

連絡先(電話番号は 03-5454-を最初に付ける)

教授 鳥井 寿夫 16号館 224A号室 TEL -6757
ytorii (at) phys.c.u-tokyo.ac.jp

助教 青木 貴稔 16号館 B07号室 TEL -6525
aoki (at) phys.c.u-tokyo.ac.jp

修士論文・博士論文の題目

- ・ 量子センシングを用いたダークマター探索のための Cs 原子の磁気光学トラップ
- ・ 可搬型ストロンチウムレーザー冷却装置の開発
- ・ 準安定 Sr 原子のレーザー冷却に向けた周波数安定化法の開発
- ・ 電場の量子センシングに向けた Sr リドベルグ原子源の開発
- ・ 狭線幅光会合による極低温 Sr₂ 分子の生成
- ・ 干渉フィルターを用いた外部共振器型半導体レーザーの長期安定化

主な著書

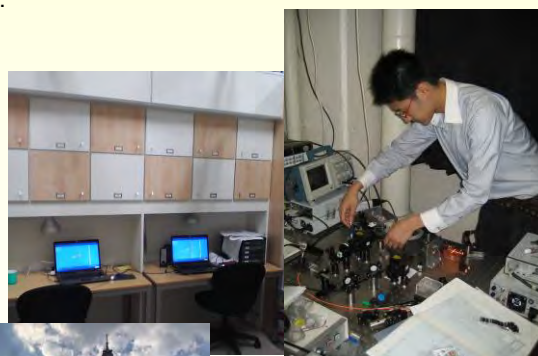
1. 青木貴稔 他、「量子エンタングル Fr 原子を用いた電子 EDM の量子センシング」 電気学会 電子回路研究会 ECT-22-043-1-6 (2022).
2. 鳥井寿夫「ボース・アインシュタイン凝縮」数理科学 2014 年 2 月号

主な原著論文

1. Birefringent atomic-vapor laser lock in a hollow cathode lamp, T. Sato, Y. Hayakawa, N. Okamoto, Y. Shimomura, T. Aoki, and Y. Torii, J. Opt. Soc. Am. B **39**, 155 (2022).
2. Quantum sensing of the electron electric dipole moment using ultracold entangled Fr atoms, T. Aoki *et al.*, Quantum Sci. and Technol. **6**, 044008 (2021).
3. Relativistic coupled-cluster study of diatomic metal-alkali-metal molecules for electron electric dipole moment searches, A. Sunaga *et al.*, J. Phys. B **53**, 015102 (2020).
4. Optical-lattice-based method for precise measurements of atomic parity violation, A. Kastberg, T. Aoki, *et al.*, Phys. Rev. A **100**, 050101(R) (2019).
5. Doppler-free spectroscopy of metastable Sr atoms using a hollow cathode lamp, Y. Hayakawa, T. Sato, C. Watanabe, T. Aoki, and Y. Torii, Appl. Opt. **57**, 1450 (2018).

学生へ一言

レーザー冷却・量子センシング実験は、レーザー技術、量子エレクトロニクス、超高真空技術、電子回路、プログラミングなど様々な実験技術の結集した装置の上に成り立っています。この分野で研究を進めるうちに、これらの実験技術が自然と身につくでしょう。大学院は研究者としての第一歩を踏み出す場所です。単に講義やセミナーに受身に参加するだけでなく、自ら問題を見つけ、解決する能力も身につけてください。スタッフや学生とのディスカッションも大いに役に立つでしょう。また海外の国際会議発表や海外で研究など、学生の海外派遣も奨励しています。実験が好きで、光と原子の織り成す量子力学の世界を体感したい意欲ある学生を待っています。

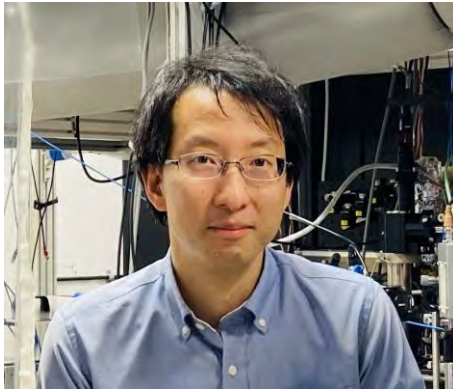


学生の海外派遣



研究室小景

原子・分子・光物理学・量子エレクトロニクス

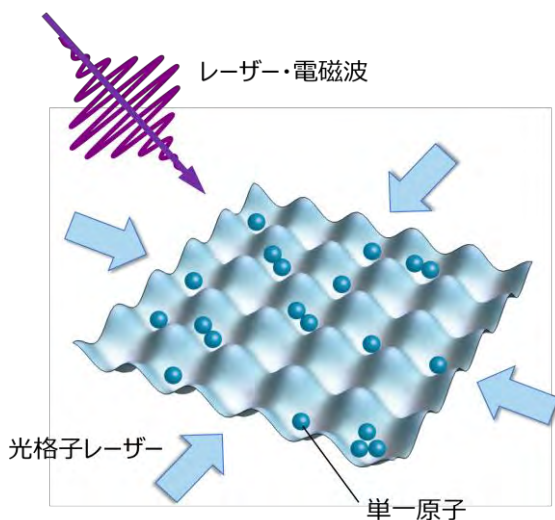


素川 靖司 准教授 Seiji Sugawa, Assoc. Prof.

量子力学的な性質を生かした量子材料の理解や量子デバイスの極限的なデザインは「21 世紀最大の挑戦」の一つです。材料、エネルギー分野でのイノベーションを実現するだけでなく、新たな価値を社会や産業において創造することが期待されています。しかしながら、一般には、多数の量子力学的な粒子が相互作用し合う多体問題であり、ヒルベルト空間が粒子数に対して指数関数的に増大するため、“古典”コンピュータでデザインしたり、予測したりすることは非常に難しいことが知られています。

量子シミュレーション

この問題にいち早く気づいたのが、リチャード・P・ファインマンです。彼は1982年に量子シミュレーションという考え方を提唱しました。量子シミュレーションとは、制御性の良い量子系を用いて、ターゲットとする別の量子系を実験的にシミュレートすることを言います。私たちは通常、自然現象（物理系）をモデル化し、振る舞いを比較することで法則や知見を得ていますが、一般的には物理モデルから多体系の振



光格子中に捕捉された極低温原子集団。レーザーや電磁波（マイクロ波）を用いて量子制御する。

る舞いを精度良く予測することは容易ではありません。例えば、メカニズムが未だ明らかになっていない銅酸化物高温超伝導体は、強相関係で重要なフェルミ・ハバード模型で記述できると考えられていますが、このハバード模型はスーパーコンピュータの性能をもってもしても数値的に解くことは難しいことが知られています。さらに、実際の材料では不純物・格子欠陥等の影響を受けるため、メカニズムの本質に辿り着くことを困難にしています。クリーンで高い制御性を有する、量子力学の原理で動く装置（量子多体系）を作り、多様なパラメータを精緻に制御することで実験的に「解く」ことができれば、未解明・未知の量子現象のメカニズムに対して知見を得ることができるはずです。

冷却原子気体

近年、上記の量子シミュレータなど、量子テクノロジーに有用なプラットフォームがいくつも現れ、ハードウェアの開発競争が起きています。私たちは、その中のひとつである冷却原子と呼ばれる、レーザー冷却によって生成された超高真空中の極低温・中性原子気体を用いて研究をしています。マイクロ・ケルビンからナノ・ケルビン ($10^{-9}\sim 10^{-6}$ K) の冷却原子気体は、(1)クリーンかつ孤立量子系と見なせ、(2)秒オーダーにも及ぶ長いコヒーレンス時間と(3)非常に高い量子制御性を有しています。運動自由度や原子の内部状態を巧みに生かし、量子系をエンジニアリングすることで、多様かつ極限的な量子現象を探索可能である、という特徴があります。

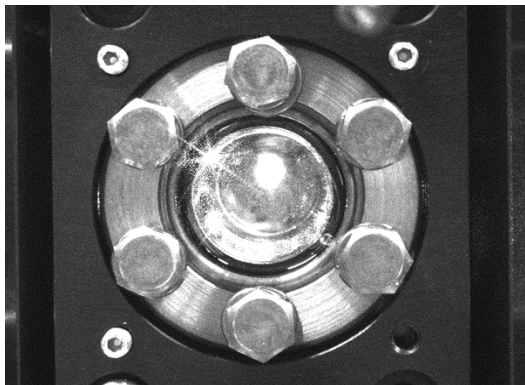
量子制御技術

冷却原子を扱う上で欠かせないのが、超高真空中の原子をトラップ（捕捉）する技術です。そもそもトラップしなければ、真空槽の中に原子を留めておくことができないからです。特に、量子シミュレーションでは、光格子 (optical lattice) や光ピンセット (optical tweezer) と呼ばれる原子を捕捉し、配列する手法が非常に重要です。どちらも光双極子力によって光強度の極大点（もしくは極小点）に原子を捕獲します。光格子は対向するレーザーによって形成された定在波による周期ポテンシャルで、固体中の電子のように原子を周期結晶構造中に捕捉できます。一方で、光ピンセットは対物レンズによって強く集光させたレーザー光のスポットに原子を捕獲する手法で、スポット（集光点）の数や位置を制御することで、任意の配列を作ったり、動的に個別原子を動かしたりできます。さらに、2次元の原子配列は、顕微技術によって、単一原子レベルでイメージングすることができます。

連絡先

准教授 素川靖司 16号館 121号室（実験室）

seijisugawa (at) g.ecc.u-tokyo.ac.jp



磁気光学トラップによって、超高真空チャンパーの中に浮かぶ、マイクロケルビン温度の冷却原子気体。

原子の内部状態を周波数安定化されたレーザー光源やマイクロ波などの電磁波を駆使して、コヒーレントに制御することも重要な基盤技術です。内部状態をスピン状態 (\uparrow , \downarrow) や量子ビットの $|0\rangle$, $|1\rangle$ 状態にマッピングすることで、単一原子を擬スピンや量子ビットとして用いることができます。冷

却原子は、量子（波）としての性質を保持したまま、運動状態や電子状態をそれぞれ高い精度でコヒーレントに制御することができる点に面白さがあります。

量子多体现象・量子ダイナミクスの探求

2原子の間には、原子種や電子状態によって、ファンデルワールス相互作用、磁気双極子相互作用が働き、これに起因する多体现象が起きます。私たちは、多数の冷却原子集団が織りなす量子現象・量子ダイナミクスを、極限的に量子制御された冷却原子気体を用いた量子シミュレータを開発することで、実験的に探求することを目指しています。これまで、強相関電子系で重要なハバード模型や量子スピン系を実装して、新奇量子相を実現したり、多体スピン・ダイナミクスを探求したりしてきました。さらに、このアプローチを幅広い未知・未解明の量子現象に拡張しようと研究を進めています。

レビュー論文

Florian Schäfer, Takeshi Fukuhara, Seiji Sugawa, Yosuke Takasu, and Yoshiro Takahashi, "Tools for quantum simulation with ultracold atoms in optical lattices", **Nature Review Physics**, **2**, 411-425 (2020).

主な原著論文

(東京大学着任前の研究成果)

- 1) V. Bharti*, S. Sugawa*, M. Mizoguchi*, M. Kunimi, Y. Zhang, S. de Léséleuc, T. Tomita, T. Franz, M. Weidemüller, K. Ohmori, "Ultrafast many-body dynamics in an ultracold Rydberg-excited atomic Mott insulator", arXiv:2201.09590 (2022).
- 2) Yeelai Chew, Takafumi Tomita, Tirumalasetty Panduranga Mahesh, Seiji Sugawa, Sylvain de Léséleuc, and Kenji Ohmori, "Ultrafast energy exchange between two single Rydberg atoms on the nanosecond timescale", **Nature Photonics**, **16**, 724-729 (2022).
- 3) Seiji Sugawa, Francisco Salces-Carcoba, Yuchen Yue, Andika Putra, I. B. Spielman, "Wilson loop and Wilczek-Zee phase from a non-Abelian gauge field", **npj Quantum Information** **7**, 144 (2021).
- 4) Seiji Sugawa, Francisco Salces-Carcoba, Abigail R. Perry, Yuchen Yue, I. B. Spielman, "Second Chern number of a quantum-simulated non-Abelian Yang monopole", **Science** **360**, 1429-1434 (2018).
- 5) S. Sugawa, K. Inaba, S. Taie, R. Yamazaki, M. Yamashita, Y. Takahashi, "Interaction and filling induced quantum phases of dual Mott insulators of bosons and fermions", **Nature Physics** **7**, pp. 642-648 (2011).

学生へ一言

2023年4月に発足した新しい研究室です。実験にはレーザー、真空技術、電気回路、マイクロ波、プログラミング、広くは量子技術などの幅広い知識と技術が要求されますが、必要な知識は研究室に入ってから、教員や先輩に教わりながら、研究を進めることができます。始めは、知的好奇心と研究を楽しむ心、それから、熱意があれば十分です。これまでの専門知識や経験は問いません。量子科学技術、量子現象に興味にある方、光学実験に興味がある方、実験装置の立ち上げに興味のある方、少しでも研究内容に興味を持ったなら、ぜひ研究室の門をたたいてください。意欲ある若い皆さんの加入を待っています。是非、ここ東大駒場で世界初の研究に挑戦しましょう。

イオン・超伝導・電子ハイブリッド量子系

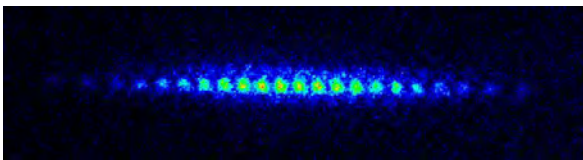


野口篤史 准教授

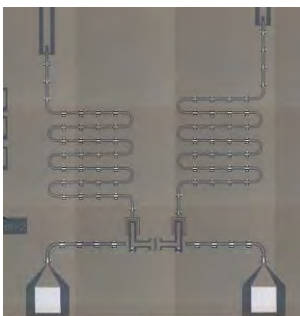
野口 篤史 准教授 Atsushi Noguchi, Assoc. Prof.

量子エレクトロニクス・量子情報処理

原子や電子などのマイクロな対象の運動を記述するには、量子力学が用いられます。量子力学では、量子重ね合わせ状態やトンネル効果・量子もつれ状態など、我々の直感からすると一見不思議な現象が予言されます。これらの現象はマイクロな対象には観測されていますし、また近年では制御すらされるようになってきました。こういった究極的な制御技術を用い、情報処理やセンサーなどとして活用しようというのが量子エレクトロニクスと呼ばれる研究です。量子エレクトロニクスにおける究極的な目標は量子コンピュータの実現です。自由度の大きい系では、ノイズなどの影響でデコヒーレンスによって量子的な振る舞いが消えてしまいます。それゆえ、私たちの生活には量子現象は目で見える形では起きておりません。



真空中に捕獲されたレーザー冷却イオン。この写真では 22 個の原子が捕獲されている。



超伝導量子回路。微細加工技術により、シリコン基板上に形成された 2 次元の電気回路。中央下の構造が量子ビットになっている。

完全に制御された、多自由度な量子系、それが量子コンピュータです。1981 年に、Richard Feynman にその概念を提案されて以来、40 年近い理論・実験的研究が続けられており、近年にはクラウドベースの量子計算サービスが始められつつあります。しかしながら、マクロスコピックな系を量子系として扱うには、外部からの擾乱を完全に除去しなければなりません。外部からの擾乱によるエラーを、観測とフィードバックによって訂正する技術を量子誤り訂正と呼びます。しかし、こうした制御自身にもエラーが含まれているため、十分に高い精度での制御、またそれら素子の集積化が行われなければ、真に意味のある量子コンピュータは実現しません。

超伝導量子回路

近年の量子コンピュータに関する理論的な研究の進展により、量子誤り訂正に必要な精度の要求は少しずつ緩和されています。また、量子系の制御技術の向上により、2008 年にはレーザー冷却されたトラップイオン系を用いて、2014 年には超伝導量子回路を用いることで、それぞれ誤り訂正閾値を超えるような高精度制御が報告されました。とくに超伝導量子回路は、微細加工技術によって集積化が可能な系として、2014 年以降、世界中で爆発的に研究されるようになりました。

しかしながら、現実的なデバイスとして動かすには、閾値よりもずっとずっと高精度である必要があり、また実際に集積化を行うにも、配線やクロストークなど、技術的な課題が無数にあります。私たちの研究室でも、こうした課題に立ち向かうため、新しい超伝導量子回路の開発を行っています。特に、超伝導非線形非対称誘導素子 (Superconducting nonlinear asymmetric inductive element) という超伝導素子を使用した新しいタイプの量子ビットの開発を行っています。従来の量子回路に比べて、配線の数が少なく、また高速な制御ができる量子ビットです。その反面、まだ十分に長いコヒーレンス時間が実現しておらず、現在その性能向上に取り組んでいます。ニオブとアルミニウムという 2 種類の超伝導体からなる超伝導回路は、理化学研究所のクリーンルームにある東大先端研の中村研究室の設備を利用して作製しています。

<http://www.sqei.c.u-tokyo.ac.jp>

連絡先 (電話番号は 03-5452-を最初に付ける)

准教授 野口篤史 10号館 403号室 TEL -6118

u-atsushi (at) g.ecc.u-tokyo.ac.jp

特任助教 長田有登 10号館 403号室 TEL -6118

alto (at) g.ecc.u-tokyo.ac.jp

特任助教 中村一平 10号館 403号室 TEL -6118

ippeinakamura (at) g.ecc.u-tokyo.ac.jp

超伝導イオントラップ・超伝導電子トラップ

真空中に浮いたレーザー冷却されたイオンからなる量子系は、外界からの影響が小さいために、これまで人類が制御した量子系として、最も高い精度を誇っています。さらなる高精度化を目指すため、近年ではマイクロ波を使ってイオンを制御する技術が研究されるようになりました。しかしながら、その制御には高強度のマイクロ波が必要になるため、消費電力の大きさや、加熱、また制御の速度が問題になります。当研究室では、これらの問題を解決するために、イオンの制御に超伝導マイクロ波回路を用いる研究を行っています。超伝導回路は高いQ値を持ち、少ない強度で巨大な磁場を発生させることができます。ゲートの制御速度を上げる方法として、イオントラップの高周波化を考えることもできます。超伝導回路を使うことで、イオントラップに用いる電場を高周波化し、それによってイオンの振動周波数を上げることにより、量子ゲートも高速化することができます。

さらに劇的な制御の高速化を狙うために、より荷電/質量比の大きい荷電粒子を用いることを考えることができます。

当研究室では、イオンよりも荷電/質量比が高い粒子として電子に着目しています。Paul trap によって真空中に捕獲された電子は、非常に高速に駆動するイオントラップ系としてみなすこともでき、高性能な量子状態制御を実現するプラットフォームになる可能性があります。振動する電子は電気双極子を持つために、超伝導量子ビットとも相互作用することができ、新しいハイブリッド量子系になります。また、イオントラップ実験などから見積もられた値を外挿して電子に適用することで、相互作用とデコヒーレンスの比として、イオントラップや超伝導量子回路を含めてこれまで実現されてきた量子系のなかで最も高い性能を見積もることができます。また、イオンと電子は互いにクーロン力で相互作用していますので、この捕獲された電子系をインターフェイスにすることで、イオントラップ系と超伝導回路を互いに結びつけたハイブリッド量子系が実現できかもしれません。さらに、電子とイオンが同時に捕まった系は、配列する原子で電子が伝導する固体中を人工的に再現した系であると考えられます。こういった実験系の実現を目指し研究をしています。

主な原著論文

- 1) “Qubit-assisted transduction for a detection of surface acoustic waves near the quantum limit”
Atsushi Noguchi, Rekishu Yamazaki, Yutaka Tabuchi, Yasunobu Nakamura
Physical review letters **119**, 180505 (2017)
- 2) “Hong-Ou-Mandel interference of two phonons in trapped ions”
K. Toyoda, R. Hiji, A. Noguchi, S. Urabe, *Nature*, **527**, 74 (2015).
- 3) “Coherent coupling between a ferromagnetic magnon and a superconducting qubit”
Y. Tabuchi, S. Ishino, A. Noguchi, T. Ishikawa, R. Yamazaki, K. Usami, Y. Nakamura, *Science* **349**, 405 (2015).
- 4) “Aharonov-Bohm effect in the tunnelling of a quantum rotor in a a linear Paul trap”
A. Noguchi, K. Toyoda, S. Urabe, *Nature Communications* **5**, 3868 (2014).
- 5) “Generation of Dicke States with Phonon-Mediated Multi-level Stimulated Raman Adiabatic Passage”
A. Noguchi, K. Toyoda, S. Urabe, *Physical Review Letters* **109**, 260502 (2012).

研究テーマ例

- 極低温での低エネルギー電子検出
- 電子トラップ
- 超伝導イオントラップ
- 超伝導量子回路を用いた量子制御実験

学生へ一言

重ね合わせ状態・トンネル現象・エンタングルメントなど、量子系は、私たちの直感とは異なる不思議なふるまいをします。現代エレクトロニクスではLSIの集積化が進み、近年の数nmというサイズの配線は、もはや数十個の原子の幅しかありません。そういった領域まで進んだとき、さらなる技術の発展には量子力学の利用が不可欠となります。私たちは、量子力学の不思議な現象を積極的に利用した量子技術の発展を目指しています。誤り訂正された量子計算機の実現など、本当に役に立つ量子技術は未来のものかもしれません。しかし、それに向かうまでの究極的な技術開発は、量子系の制御だけではなく、さまざまな応用に用いられるでしょう。見えない量子の世界を、見てみたくはないですか？

生命システムの物理学



澤井哲 教授

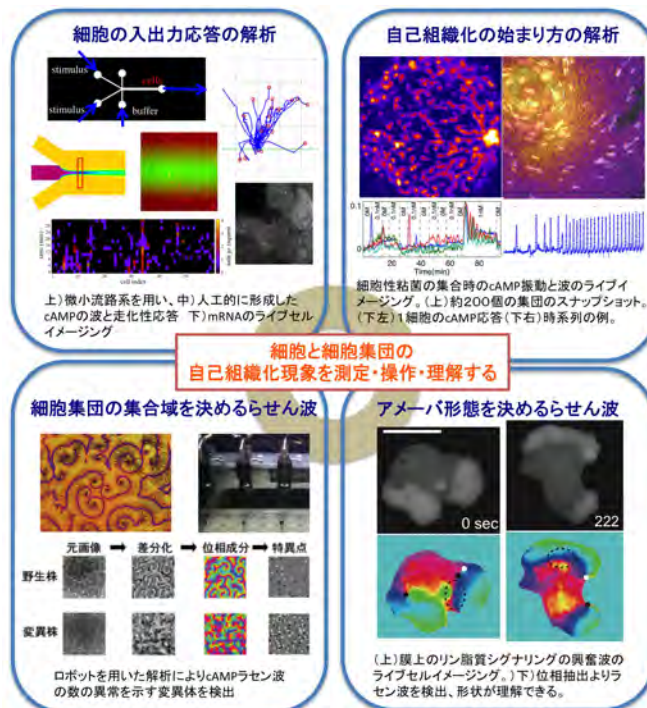
澤井哲 教授 Satoshi Sawai, Prof.

島田奈央 助教 Nao Shimada, Assist. Prof.

当研究室では真核細胞における複雑で動的な性質に着目し、非平衡系の物理学と非線形動力学の視点から細胞の生き生きとした状態と巧みさの理解を目指している。細胞間シグナリング、細胞運動、細胞分化を、力学系理論に根ざした計測と解析を行い、そのための分子遺伝学的手法、可視化技術、測定系の開発を進めている。具体的には、細胞性粘菌や動物の培養細胞系を題材に、自己組織化ダイナミクスに注目し、その定量的測定と構成的操作を行っている。また、解析のために必要な微細加工基盤、微小流路系などのマイクロデバイス開発、光遺伝学的手法の応用も行っている。

細胞集団の自己組織化の定量的・構成的理解と操作

真核細胞の集団では、走化性と細胞間シグナリングとが巧みに組み合わせられ、細胞組織が形成される。その典型例である細胞性粘菌では、細胞外サイクリック AMP (cAMP) の振動と波が自己組織的に形成され、細胞はこれを頼りに動く向きを決定し、集合する。我々は、cAMP の波生成の過程の根幹を担う 1 細胞レベルの cAMP リレー応答を、cAMP センサー蛍光タンパクを用いて定量的に解析している。これまでに、入力と出力間の関係を明らかにしており、細胞集団にみられる振動の起源が、細胞密度に依存した転移現象として捉えられることが明らかになってきている。応答の周波数特性の詳細と、一定刺激に対する適応現象についての理解を深めることで、位相の空間的なパターンの起源、さらには cAMP 振動の力学的知覚 (メカノセンシング) 依存性についても調べている。



自発的運動、走化性運動の定量的・構成的理解と操作

アメーバ状細胞の運動形態は粘菌細胞だけでなく、ヒトの好中球 (白血球) やガン細胞などにも広くみられ、その分子的機構の多くも進化的に保存している。自発的変形では、アクチンの高密度フィラメントの形成が自己組織的に生成と消滅を繰り返す、進行波として細胞膜の裏打ちを伝播する。この波が細胞先端に到達すると、細胞膜が押し出される。波の形状や、出現機構、摂動に対する変化などの動的性質の定量的測定、解析、数理的モデル解析を行っている。細胞骨格系の時空間ダイナミクスと細胞の複雑な形状の関係を定量的な解析と構成的な操作を通して、アメーバ状細胞の運動の基本的な性質と原理の解明に挑戦している。

また細胞は誘引性物質の濃度の時間的、空間的変化を検知することで動く方向を決めている。微小流路内の層流形成によって空間的、時間的に誘引物質の濃度を高精度に制御する技術によって、人工的に形成した動的勾配について、様々な時定数と、時間変化、空間変化の符合の組み合わせを検出し、細胞性粘菌が、誘引物質 cAMP の濃度が経時的に増加す

<http://sawailab.c.u-tokyo.ac.jp/>

連絡先
教授 澤井哲

cssawai (at) mail.ecc.u-tokyo.ac.jp

る場合のみ、移動するための信号を細胞内に伝達することを明らかにした。また、細胞先端形成を担う Ras の活性化を、レーザー共焦点蛍光顕微鏡測定から定量化と、理論モデルと比較、解析から、局所的活性化と大域的抑制化で構成されるフィードフォワード型の反応ネットワークが測定される振る舞いのほとんどを無矛盾に説明できることを示している。こうした性質の普遍性を免疫系細胞などでも検証している。

細胞の集団的運動、分化のダイナミクス

細胞集団における3次元形態の新生においては、細胞間接触によって誘導される細胞の一方方向的な運動、さらにそこから出現する集団的な回転運動が知られているが、走化性などの他の要因とあわせて接触依存性がどのような変形や運動をも

たらしているのか、回転がいかにして利用され、3次元形態につながるのか多くが未解明である。そうした現象の溯源的な例として、細胞性粘菌の集合塊上端の頂端構造の形態形成に注目している。マイクロ流体デバイスによって走化性誘引物質の濃度勾配を制御し、細胞間接触と走化性によって誘起される運動の連動を調べ、さらに光シート照射型顕微鏡によって、隔離した細胞間の接触運動や、組織中の細胞運動の3次元イメージング解析をおこなっている。細胞の運動規則を表現した数理モデルと実験の相互検証を通じて、元々バラバラであった細胞から3次元の形ができる原理の理解を進め、動物発生における接触依存的な細胞運動や回転運動をも視野に入れた一般的な定式化を通じて、基礎的で溯源的な性質が浮かび上がらせたい

修士論文・博士論文の題目

- 「アメーバ状細胞の自発的運動を駆動するイノシトールリン脂質自己組織化波の定量的解析とモデル推定」
- 「粘菌細胞における適応的サイクリック AMP シグナリングの生細胞解析」

主な著書

- 1) 澤井哲 et al 「興奮系の自己組織化現象からみる細胞動態」実験医学 31(8) 1217-1223 羊土社 2013年4月号.
- 2) 澤井哲 「微生物の集団的な振る舞い」『理論生物学 - 生命科学の新しい潮流』(望月敦史・編) 共立出版 2011年
- 3) 澤井哲 「パターン形成リズムのデザイン」細胞工学 30(12), 1262-1267 秀潤社 2011年
- 4) 澤井哲 「粘菌の cAMP 振動と波」細胞工学 26(7), 759-765, 秀潤社 2007年

主な原著論文

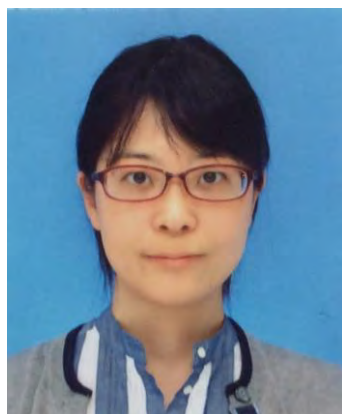
- 1) T. Fujimori, A. Nakajima, N. Shimada and S. Sawai (2019) Tissue self-organization based on collective cell migration by contact activation of locomotion and chemotaxis, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 116, 4291-4296.
- 2) K. Kamino, Y. Kondo, A. Nakajima et al S. Sawai (2017) Fold-change detection and scale invariance of cell-cell signaling in social amoeba, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 114, E4149-E4157.
- 3) A. Nakajima, S. Ishihara, D. Imoto and S. Sawai (2014) Rectified directional sensing in long-range cell migration. *Nature Commun.* 5, 5367.
- 4) D. Taniguchi[‡], S. Ishihara[‡], T. Oonuki, M. Honda-Kitahara, K. Kaneko and S. Sawai (2013) Phase geometries of two-dimensional excitable waves govern self-organized morphodynamics of amoeboid cells. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 110, 5016-5021. ([‡] Equal contribution)
- 5) T. Gregor, K. Fujimoto, N. Masaki and S. Sawai (2010) The onset of collective behavior in social amoebae, *Science* 328, 1021-1025.
- 6) S. Sawai, P. T. Thomason and E. C. Cox (2005) An autoregulatory circuit for long-range self-organization in Dictyostelium cell populations, *Nature* 433, 323-326.

学生へ一言

一緒に細胞の不思議に挑戦しましょう。物理と数理としての興味と生物としての興味が密接に交差する研究室です。



生命現象とソフトマターの物理学



柳澤実穂 准教授

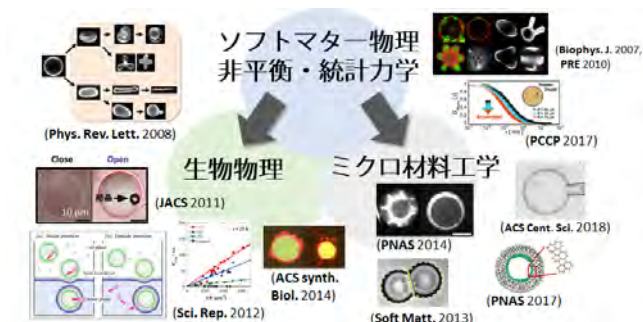
柳澤実穂 准教授 Miho Yanagisawa, Assoc. Prof.

柳澤研究室では、生体高分子などの柔らかな物質（ソフトマター）が細胞スケールのマイクロ空間でみせる相転移現象やその集団挙動の解明 (a) と、それを生命現象の理解 (b) やマイクロ材料工学へ応用 (c) する研究を行っている。具体的には、人工細胞としても汎用されているリン脂質膜小胞（リボソーム）やマイクロ液滴を用いて、マイクロ空間が生体高分子の示す分子拡散や構造相転移、相分離などへ及ぼす影響の解明を目指している。またこの知見を、生命現象の物理的理解や、人工細胞を薬物送達システム用カプセルとして役立つ研究も並行して行っている。本目的のために、顕微鏡をベースとするイメージング技術や粘弾性測定技術、微細加工技術などの開発も行っている。専門分野であるソフトマター物理や生物物理は、生物・物理・化学の境界領域にあるため、前提知識や技術は強く求めず、研究室に入ってから学ぶことを通常としている。また、研究テーマも多様であり、個人の興味に応じて設定するように努めている。

(a) 細胞サイズに閉じ込められた高分子の拡散・相転移

生物の最小単位である細胞は、1~100 マイクロメートルの大きさを持つ。「なぜ細胞サイズは、ミリでもナノでもなく、この長さスケールなのだろうか？マイクロサイズであることが生命維持において重要なのだろうか？」我々は、人工細胞を用いたボトムアップ的研究から、この問いへ挑戦している。

生体高分子を小さな空間に閉じ込めると、その振る舞いはちょうど細胞サイズで変化することを報告してきている。例えばコラーゲンを熱変性させたゼラチン（ゼリー食品の主成分）を人工細胞中で固体化（ゲル化）させると、バルク系とは異なるナノ構造が出現し、ゲルの硬さは通常のゲルの約 10



- ソフトマター物理によるリボソームやマイクロ液滴の相転移現象の解明
- 細胞モデルを用いた生物物理への貢献とマイクロ材料工学への応用

倍まで上昇する[2]。また人工細胞中では、タンパク質発現が加速したり、高分子間の相分離が誘発されたりもする。こうした様々な現象は全て、空間を覆う膜界面の効果が膜近傍のみならず、空間全体に及ぶことで生じている可能性が高い。今後は、この仮説の検証を軸に現象解明を目指す。

また細胞中では、タンパク質などの生体高分子が互いに反応・拡散することで生命活動を営んでいることから、分子の拡散速度は、元気を表す度合と強く相関すると予想できる。実際に、エネルギー枯渇や pH 変化により、細胞を一時的に飢餓状態とすると、細胞内の分子拡散は低下する。こうした背景から、細胞内の分子拡散と生体機能とを相関付ける研究が近年活発化してきている。我々は、細胞内の高分子濃度とほぼ等しい高分子溶液を人工細胞へ閉じ込め、内部での蛍光揺らぎ解析からミリ秒スケールでの分子拡散を評価した。その結果、高濃度高分子存在下では、拡散速度が細胞サイズ以下で遅くなることを見出した[1]。この結果は、細胞のもつマイクロ空間が分子拡散や細胞内活性へ強く影響することを示唆している。今後は、上記の熱平衡状態だけでなく、エネルギー消費や物質輸送を伴う非平衡環境で見られる細胞サイズの影響についても、研究を行う予定である。

(b) 人工細胞による細胞や組織の形の再現・物理的記述

細胞や細胞組織は、機能に適した形を持っている。こうした形態制御の基本原則を明らかにすべく、シンプルな人工細胞を用いた研究が進展してきた。例えば、高浸透圧下での脱水や異なる脂質間の相分離に伴い、赤血球やチューブ状といった実際の細胞にも良く似た形へ変形する。その多くは、熱力学的な熱平衡状態として記述できる[5]。しかし、膜のみからなる人工細胞は、実際の細胞のもつ細胞骨格持たないため、全ての細胞形状を再現することはできない。

<https://sites.google.com/g.ecc.u-tokyo.ac.jp/yanagisawa-lab/>

准教授 柳澤実穂 (10号館 403A)
myanagisawa (at) g.ecc.u-tokyo.ac.jp

こうした背景から、人工細胞へ細胞内濃度に匹敵するタンパク質溶液を内包した系や、DNA ナノテクノロジー技術を活用して細胞骨格モデルを付与した系を構築してきている[3]。これらの系では、細胞質あるいは細胞骨格の粘弾性が細胞形態を決定するという点で生細胞と対応しており、構造緩和に似た様々な細胞形態の記述を目指している。さらに、マイクロ流路デバイスを用いることで複数のリポソームを膜接着させて、細胞組織のような構造を形成することにも成功している。これより、細胞間の物質輸送や[5]、濃度勾配に応じて自発運動する人工細胞など、生物のような非平衡環境を再現することも可能である。このように、全ての要素が既知である人工細胞を用いた生命機能の再現と記述から、複雑な生命現象に潜む基本的原理を明らかにしたい。

(c) 細胞模倣によるマイクロ材料創成

上記(a, b)の研究で用いた人工細胞は、生体親和性が高いため、医薬品や化粧品の材料としても活用されてきている。例えば、新型コロナ用 mRNA ワクチンではリポソーム型カプセルが用いられている。脆弱性克服のために、膜表面は高分子で覆われているが、稀にそれが免疫反応を引き起こす問題がある。我々が研究している DNA 骨格によるリポソームの力学的補強は、内側にのみ膜を補強する DNA が存在するため、この問題を克服できる。

さらに、(a, b)の知見をもとに、マイクロ液滴が集団として見せるジャミング転移などに関する実験とシミュレーションの研究も行っており、今後もマイクロとマクロの両面から研究を進展させる予定である。

主な修士論文・博士論文題目

- 「細胞サイズ液滴への閉じ込めに伴う溶液環境の変化が分子拡散に与える影響とそのメカニズムの解明」
- 「多分散粒子による高密度充填」
- 「DNA ナノテクノロジーを用いた人工細胞の力学制御」

主な解説記事

- 1) 柳澤実穂, 現代化学, 2023 年 1 号, 「分子より大きく、目では見えないくらい小さな, 細胞サイズの空間効果」
- 2) 柳澤実穂, 物性夏の学校テキスト, 2022 年 8 月, 「細胞を擬 2 次元膜で包まれたマイクロ 3 次元液滴として理解する」
- 3) 富田一甫, 渡邊千穂, 柳澤実穂, 実験医学 2021 年 39 号, 羊土社「細胞サイズ空間での相分離から細胞内相分離へ」

主な原著論文

- 1) D. Shimamoto and M. Yanagisawa, **Phys. Rev. Research**, 5, L012014 (2023), "Common packing patterns for jammed particles of different power size distributions"
- 2) C. Watanabe, et al., **ACS Materials Letters**, 4, 1742 (2022) "Competitive membrane wetting of polymer blends in artificial cells initiates phase separation and promotes fractionation"
- 3) M. Yanagisawa, et al., **Langmuir**, 38, 11811 (2022), "Cell-size space regulates behaviors of confined polymers: From Nano- and Micromaterials Science to Biology"
- 4) Y. Sakai, et al., **ACS Cent. Sci.**, 4:477-483 (2018) "Increasing Elasticity through Changes in the Secondary Structure of Gelatin by Gelation in a Microsized Lipid Space"
- 5) C. Kurokawa, et al., **PNAS**, 114:7228-7233 (2017), "DNA cytoskeleton for stabilizing artificial cells"

学生へのメッセージ

生物や細胞を物理の視点から理解することに興味がある人、身の周りのソフトマターと呼ばれる物質・物質集合体（タンパク質、ゲル、液滴、粉粒体、膜）の物理的性質や相転移現象、またそれを用いた応用に興味がある人は特に大歓迎です。物理学会と生物物理学会をメインに多様な学会に参加しています。研究室見学の前に、メールで先に連絡を頂けると確実です。

現在のラボメンバー

作田浩輝（特任助教）、本田玄（助教）、柳沢直也（特任助教）、Anusuya Pal（学振 PD）、嶋本大祐（D2, 学振 DC1）、加茂あかり（理学系 M2）、斎藤駿一（理学系 M2, FoPM プログラム生）、増田和俊（M1）、古澤由香（秘書）計 12 名。

生と死の生物物理学



若本祐一教授

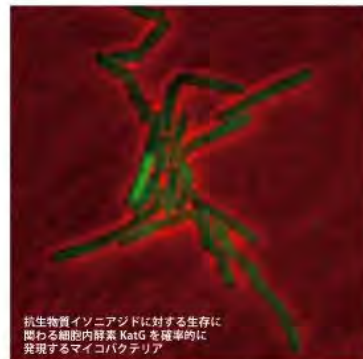
若本祐一 教授 Yuichi Wakamoto, Prof.

生物は栄養飢餓やストレス物質、放射線への曝露など、生命の維持が脅かされるような環境においても、しぶとく適応し生きつづけるという、驚くべき柔軟性とレジリエンスを備えています。そもそも、生物はなぜ適応できるのでしょうか？例えば生体内の化学反応を微分方程式で単純に書き出しても、ほとんどの場合、実際の生物に観察されるような様々な環境変動や内的・外的な摂動に対する恒常性は実現しません。しかし、現に我々の目の前の細胞は恒常性を示している。ここにはまだ我々が理解していない適応と恒常性維持の原理が眠っているはず。我々は、微細加工技術、顕微観察技術、統計物理、機械学習、高次元データ解析、分子生物学、遺伝学、進化学などの分野横断的な専門知識、技術をフル活用しながら、生と死のはざままで起こる、細胞の状態変化、ふるまい、生存競争（自然選択）、共生関係の進化などの背景原理の解明を目指した研究をおこなっています。

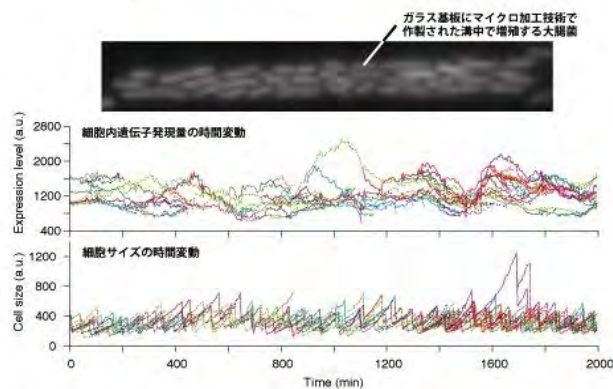
パーシスタンス現象と細胞の表現型適応原理

細菌などのクローン集団を、抗生物質などの致死的なストレスにさらすと、大多数の細胞がすみやかに殺される一方で、一部の細胞がなぜか長い期間生き残る「パーシスタンス」という現象が一般的に観察されます。この現象では生き残る細胞と死ぬ細胞のあいだに遺伝情報の差がないことが分かっています。遺伝的に均質な細胞集団内になぜこのような生存能の差が生じるのでしょうか？

ひとつの結果として、ある細菌のパーシスタンス現象では、活性酸素の除去に関わる酵素の発現が確率的に起こることで、細胞の生死運命に差を生じさせていることを我々



抗生物質イソニアジドに対する生存に際する細胞内酵素 KatG を発現的に実現するマイコバクテリア



は明らかにしました(Wakamoto, et al. Science 2013)。細胞内の遺伝子発現には一般的にゆらぎがあります。このような遺伝子発現のゆらぎは、パーシスタンス現象の普遍性と深く関係しているのではないかと我々は考えています。

また、パーシスタンス現象は、抗ガン剤を投与されたガン細胞集団でも起こることが分かってきています。このことは、ガン細胞が、抗ガン剤などの薬剤に対して耐性を獲得してしまうことと関係していると考えています。実際我々の研究でも、白血球系ガン細胞集団の中に、分裂頻度がことなる細胞系列が現れ、好環境であり分裂しない細胞系列は、抗ガン剤投与下で長期間生き残りつづけることを見出しています。本来致死的な薬剤に対して細菌やがん細胞が耐性を獲得するメカニズムについて、遺伝子発現の揺らぎや、表現型多様性との関係を軸に調べています。

細胞の表現型揺らぎと進化

細胞集団内の個々の細胞は、たとえ同じ遺伝情報をもっていても、遺伝子発現状態をはじめとする何らかの状態に差があります。そしてこのような状態差は、ときに細胞の成長速度や死にやすさに影響を与え、その個体が残せる子孫細胞数に差が生じます。その結果、集団内で「自然選択

<http://park.itc.u-tokyo.ac.jp/wakamoto-lab/>

連絡先

教授 若本祐一 16号館 330

cwaka (at) mail.ecc.u-tokyo.ac.jp

(Selection)」が起きます。

我々の研究室では1細胞レベルの様々な表現型形質のダイナミクスを精密に計測できる独自の1細胞観察技術を持っており、これを駆使して、細胞表現型揺らぎの適応・進化における役割を明らかにする研究を進めています。

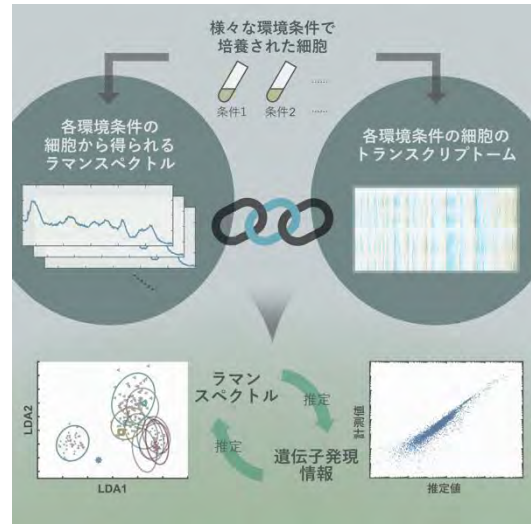
例えば細胞の増殖能の揺らぎが、細胞集団の増殖を加速させることを明らかにするとともに(Hashimoto, et al. PNAS 2016)、昆虫に共生できるように進化した大腸菌システム(Koga, et al. Nat Microbiol 2022)を用いて、進化過程で細胞の増殖揺らぎがどのように変化するか探索しています。さらに、実験で取得できる細胞の系譜情報から任意の表現型の適応度地形と選択強度を定量する統計理論・解析フレームワークも構築しています(Nozoe, et al. PLoS Genet 2017, Yamauchi, et al. eLife 2022)。

生きた細胞内のグローバルな発現状態の動態をとらえる

細胞を過酷な環境におくと、内部の遺伝子発現はグローバルに変化します。つまり、細胞の適応は、一部の特定分子の機能のみで実現されるわけではなく、細胞内の多数の分子の量がリモデリングされることで実現すると考えられます。

ごく少数の遺伝子の発現量変化は蛍光タンパク質などを用いることで生きた細胞内でも定量できます。しかし、多数の遺伝子の発現量の時間変動を生細胞内で同時に定量することは難しく、1細胞内での大規模な発現変動を捉えることはまだ実現していません。

我々は最近、細胞ラマンスペクトルから、細胞内の網羅的



な遺伝子発現情報であるトランスクリプトームやプロテオーム情報を、細胞を破壊することなく取得できることを明らかにしました(Kobayashi-Kirschvink, et al. Cell Systems 2018; Kamei, et al, bioRxiv)。我々は現在この手法を拡張することで、生きた細胞内の網羅的分子情報の時間変化を測定する「ライブセル・オミクス技術」の開発に取り組んでいます。これを用いることで、適応過程で起こる高次元空間内での細胞状態の変遷をとらえ、そこにかかる拘束や法則を明らかにしたいと考えています。

その他にも、各ラボメンバーが独自の研究テーマを進めています。興味のある方はぜひ研究室にお越しください。

主な原著論文

- 1) A unified framework for measuring selection on cellular lineages and traits. eLife, 11, e72299 (2022)
- 2) Single mutation makes *Escherichia coli* an insect mutualist. Nat Microbiol, 7, 1141-1150 (2022)
- 3) Linear Regression Links Transcriptomic Data and Cellular Raman Spectra. Cell Systems, 7, 104-117.E4 (2018).
- 4) Aging, mortality, and the fast growth trade-off of *Schizosaccharomyces pombe*. PLoS Biology, 15, e2001109 (2017).
- 5) Noise-driven growth rate gain in clonal cellular populations. PNAS, 113, 3251-3256 (2016).
- 6) Dynamic persistence of antibiotic-stressed mycobacteria. Science 339: 91-95 (2013).

学生へ一言

我々の研究室は、物理や生物、工学などいろいろなバックグラウンドを持ったメンバーで構成されています。メンバーごとに得意なことは違いますが、お互いに教え、教えられということが日常的に起こっています。最終的にラボを卒業する際には、各自が自分の名刺代わりになる独自性の高い研究成果を持てるよう



現在の研究室の構成

若本祐一(教授)、野添 嵩(助教)、梅谷 実樹(特任助教)、博士研究員4名、修士課程学生2名、学部4年生2名、研究補助1名

人間の脳機能の解明



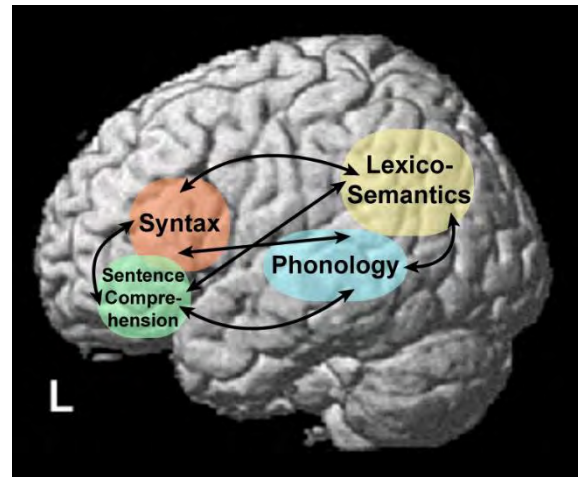
酒井邦嘉教授

酒井邦嘉 教授 Kuniyoshi L. Sakai, Prof.

脳研究は、遺伝子レベルから言語などの高次脳機能に至るまで、急速に発展してきた。こうした脳科学の進展において、医学（生理学・生化学・薬理学・解剖学などの基礎医学から脳外科・神経内科・精神科などの臨床医学まで）や理工学（物理学・化学・生物学・情報科学など）はもちろんのこと、心理学・哲学・言語学などの文系の分野にまでその境界領域が広がりつつある。研究室では「システム・ニューロサイエンス (Systems Neuroscience)」と呼ばれる脳科学の分野で、言語脳科学を中心とした最先端の研究を行っている。言語は、脳における最も高次の情報処理システムである。われわれが母語を用いて発話したり、他者の発話を理解したりするときには、「普遍文法」に基づく言語情報処理を、無意識のレベルでおこなっていると考えられる。普遍文法の計算原理が、実際に脳のどのようなシステムによって実現されているか、という究極の問題を解き明かしていきたい。

人間を対象とする脳機能の解析

核磁気共鳴現象に基づく MRI（磁気共鳴映像法）や、SQUID（超伝導干渉計）を用いた MEG（脳磁図）などの先端的物理計測技術を用いて、脳機能の計測と解析を進めている。顕微鏡の発明が細胞生物学を生みだし、遺伝子工学の技術が分子生物学の発展をもたらしたように、無侵襲的に脳機能を計測する技術こそが、言語脳科学の発展の鍵である。fMRI（functional MRI）は、現在もっとも有力な脳機能イメージングの技術の1つであり、繰り返し計測を行って再現性を確認できる。



人間の脳の「言語地図」 Science 310, 815-819 (2005).

言語機能を中心とした高次脳機能メカニズムの解明

自然言語の文法性や普遍性・生得性といった高次脳機能を明らかにするための研究を進めている。実際の研究では、普遍文法の機能分化と機能局在を明らかにするための研究パラダイムを開発した上で、上記の手法を駆使して言語の脳機能イメージングを行う。将来的にはさらに神経回路網モデルの物理・工学的手法を融合させて、脳における言語情報処理の基本原則を明らかにしていきたいと考えている。

本研究室の最近の研究では、fMRIやMEGなどの手法を用いて、文法処理の時に普遍的に働く中枢（文法中枢、Grammar Center）が左脳の前頭葉にあることを突き止めた（上図のSyntax）。この「文法中枢」は、言語中枢の一つであるブローカ野の一部であり、文法中枢が「再帰的計算」（ある計算の結果に対して同じ計算を繰り返すこと）の座であることを証明すべく、実験的な検証を進めている。また、読解に必要とされる中枢が文法中枢のすぐ下側にあることが、日本語だけでなく日本語や英語でも確かめられている。一方、別の言語中枢であるウェルニッケ野は、側頭葉にある音韻の中枢と、頭頂葉にある語彙の中枢に分けられる。言語に関するこれら4つの基本要素を処理する部位を大脳皮質の上に示したのが「言語地図」である。

<https://www.sakai-lab.jp/>

連絡先（電話番号は 03-5454-を最初に付ける）

教授 酒井 邦嘉 16号館 711号室 TEL -6261

kuni (at) sakai-lab.jp

助教 梅島 奎立 16号館 701号室 TEL -4927

言語脳科学—文理融合の試金石

20世紀の物理学が理論物理学と実験物理学の両方の進歩に支えられて発展したように、21世紀の言語脳科学は理論言語学と実験脳科学を両輪として、文系と理系の融合領域である「人間科学」をさらに開拓していくものと期待される。人間科学にとって、文系と理系の垣根は百害あつ

て一利なしであり、既存の学問分野を単に寄せ集めただけでは新しい発見は期待できない。人間だけに備わった言語能力のメカニズムを解明することで、人間の心の深奥にある精緻な構造や創造性の謎に迫ることができ、そこに新たな自然法則が次々と見だされていくことだろう。こうした努力の積み重ねが、真の文理融合の突破口になるに違いない。

修士論文・博士論文の題目

新たな言語の獲得における多言語話者の統辞関連領域で増進した脳活動
音楽経験に関係した音楽的エラー依存の脳活動
マンガを用いた色認知に対する脳活動
カカオポリフェノールが言語などの脳機能に及ぼす影響

主な著書

- 1) 言語の脳科学—脳はどのようにことばを生みだすか (中公新書, 2002)
- 2) 科学者という仕事—創造性はどのように生まれるか (中公新書, 2006)
- 3) 科学という考え方—アインシュタインの宇宙 (中公新書, 2016)
- 4) チョムスキーと言語脳科学 (インターナショナル新書, 2019)
- 5) 脳とAI—言語と思考へのアプローチ (中公選書, 2022)

主な原著論文

- 1) Sakai, K. L.: Language acquisition and brain development. *Science* **310**, 815-819 (2005).
- 2) Umejima, K., Ibaraki, T., Yamazaki, T. & Sakai, K. L.: Paper notebooks vs. mobile devices: Brain activation differences during memory retrieval. *Front. Behav. Neurosci.* **15**, 634158 (2021).
- 3) Sakai, K. L., Oshiba, Y., Horisawa, R., Miyamae, T. & Hayano, R.: Music-experience-related and musical-error-dependent activations in the brain. *Cereb. Cortex* **32**, 4229-4242 (2022).
- 4) Umejima, K., Flynn, S. & Sakai, K. L.: Enhanced activations in the dorsal inferior frontal gyrus specifying the who, when, and what for successful building of sentence structures in a new language. *Sci. Rep.* **14**, 54 (2024).

学生へ一言

科学者になるためには、他の人がやらないようなことをやるのが好きで、苦勞にめげずに努力できるねばり強さが重要です。研究はうまくいかない時のほうが多いのですから。ニュートンの晩年の言葉と似ていますが、科学研究は砂浜で小石や美しい貝を探すようなものでしょう。砂浜を見渡しているだけでは、なかなか貝は見つかりません。思案ばかりしていないで、まずは手を動かしてみなければ。たとえ砂を掘る方法が優れていても、掘る場所が当たらなかつたら失敗です。砂を掘りたくて掘っているわけではないのに、まわりの人にはなかなか理解してもらえません。しかし、誰も見たことがないくらい美しい貝は、必ずどこかに埋もれているはずで、私が今探し求めている貝は、脳に刻まれた言語や音楽の規則性です。

言語脳科学—文理融合の試金石

20世紀の物理学が理論物理学と実験物理学の両方の進歩に支えられて発展したように、21世紀の言語脳科学は理論言語学と実験脳科学を両輪として、文系と理系の融合領域である「人間科学」をさらに開拓していくものと期待される。人間科学にとって、文系と理系の垣根は百害あつ

て一利なしであり、既存の学問分野を単に寄せ集めただけでは新しい発見は期待できない。人間だけに備わった言語能力のメカニズムを解明することで、人間の心の深奥にある精緻な構造や創造性の謎に迫ることができ、そこに新たな自然法則が次々と見だされていくことだろう。こうした努力の積み重ねが、真の文理融合の突破口になるに違いない。

修士論文・博士論文の題目

新たな言語の獲得における多言語話者の統辞関連領域で増進した脳活動
音楽経験に関係した音楽的エラー依存の脳活動
第二言語でのリスニング・リーディング課題解答時の脳活動の分析
マンガを用いた色認知に対する脳活動

主な著書

- 1) 言語の脳科学—脳はどのようにことばを生みだすか（中公新書，2002）
- 2) 科学者という仕事—創造性はどのように生まれるか（中公新書，2006）
- 3) 科学という考え方—アインシュタインの宇宙（中公新書，2016）
- 4) チョムスキーと言語脳科学（インターナショナル新書，2019）
- 5) 脳とAI—言語と思考へのアプローチ（中公選書，2022）

主な原著論文

- 1) Sakai, K. L.: Language acquisition and brain development. *Science* **310**, 815-819 (2005).
- 2) Umejima, K., Ibaraki, T., Yamazaki, T. & Sakai, K. L.: Paper notebooks vs. mobile devices: Brain activation differences during memory retrieval. *Front. Behav. Neurosci.* **15**, 634158 (2021).
- 3) Umejima, K., Flynn, S. & Sakai, K. L.: Enhanced activations in syntax-related regions for multilinguals while acquiring a new language. *Sci. Rep.* **11**, 7296 (2021).
- 4) Sakai, K. L., Oshiba, Y., Horisawa, R., Miyamae, T. & Hayano, R.: Music-experience-related and musical-error-dependent activations in the brain. *Cereb. Cortex*. DOI: 10.1093/cercor/bhab478 (2021).

学生へ一言

科学者になるためには、他の人がやらないようなことをやるのが好きで、苦勞にめげずに努力できるねばり強さが重要です。研究はうまくいかない時のほうが多いのですから。ニュートンの晩年の言葉と似ていますが、科学研究は砂浜で小石や美しい貝を探すようなものでしょう。砂浜を見渡しているだけでは、なかなか貝は見つかりません。思案ばかりしていないで、まずは手を動かしてみなければ。たとえ砂を掘る方法が優れていても、掘る場所が当たらなかつたら失敗です。砂を掘りたくて掘っているわけではないのに、まわりの人にはなかなか理解してもらえません。しかし、誰も見たことがないくらい美しい貝は、必ずどこかに埋もれているはずで、私が今探し求めている貝は、脳に刻まれた言語や音楽の規則性です。

分子分光学・構造化学



奥野将成 准教授 Masanari Okuno, Assoc. Prof.

溶液や生体といった凝縮相中や、溶液やポリマーなどのソフトな表面・界面における分子構造・分子のダイナミクスには、未解明な点が多く残されています。当研究室では、これら凝縮相や界面を研究対象とし、分子分光法を核とした研究を行っています。「分子の指紋」と呼ばれるように、分子構造を鋭敏に反映する振動スペクトルを通して、分子を理解することを目指します。既存の分子分光法のみならず、新規な手法を開発することで、従来得られなかった分子科学的知見を得ることを、研究の軸としています。

先端的非線形分光法による溶液の構造化学

溶液中や界面における分子の構造・ダイナミクスについての知見は、化学反応を理解するために必要不可欠です。分子振動分光法は、溶液中の分子構造情報を得ることのできる強力な手法です。赤外吸収分光法やラマン分光法は、振動スペクトルを通し分子構造を明らかにするため、さまざまな場で広く利用されています。一方、近年レーザー技術の発展に伴い、ピコ秒～フェムト秒 (10^{-12} ～ 10^{-15} 秒) の時間幅を持った、高い尖頭出力を有するパルスレーザーの利用が広がっています。これらのレーザー光源を用いることで、非線形光学現象を容易に起こすことができます。当研究室では、さまざまな

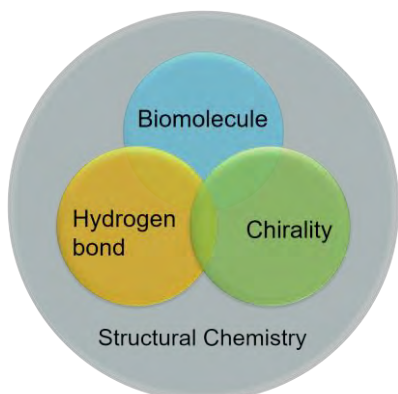


図1 研究室での研究対象



図2 自作のハイパーラマン分光装置

非線形光学現象を利用した新奇な非線形分光法を開発・応用することで、従来の分光法では得られなかった分子構造・ダイナミクスに関する情報を得ることを目指します。対象とするのは、水溶液中での水素結合の構造・超高速ダイナミクス、溶液や界面における分子や超分子構造が発現するキラリティー、溶液中の生体分子の構造などです。

溶液中の水素結合の結合・ダイナミクス

水溶液中の水と環境は、これまでに赤外・ラマン分光法を含めたさまざまな分光法による研究が多数行われていますが、いまだに未解明な点が多く残されています。当研究室では、これらの既存の振動分光法に加えて、ハイパーラマン分光法という非線形分光法を利用することで、これまで得ることのできなかった溶液中の分子構造・ダイナミクスの情報を得ることを目指しています。二光子を吸収し、一光子を散乱するハイパーラマン分光は高次のラマン分光であり、これまで得られなかった分子の対称性や分子の集団運動の情報が期待できます。信号が極々微弱なため、研究がほとんど行われてきませんでした。レーザー技術の発展により、水溶液からの信号検出が可能となっています。当研究室では、このハイパーラマン分光法の可能性にいち早く着目し、高効率な分光装置を構築することでさまざまな系への応用を可能にし、これまで得られなかった分子科学的知見を得ることに成功しています。特に純粋な水や、塩の水と環境についての研究を強力に推進しています。

<http://park.itc.u-tokyo.ac.jp/molsp/>

連絡先

准教授 奥野将成 16号館 402A

cmokuno@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

新規非線形コヒーレント振動分光の創出

非線形光学過程に基づくコヒーレント振動分光は、強度の大きな信号光を得る手法として近年物理化学のみならず、分析手法として生物・医薬分野でも不可欠な手法となっています。当研究室では、これまでに開発されたコヒーレント振動分光法を利用するだけでなく、**新たなコヒーレント振動分光を創出**することを目指しています。これらの先端的非線形分光法により、これまでアプローチできなかった分子や分子集合体の構造情報を明らかにします。

以上のように、線形・非線形光学過程に基づいた先端的な分光法を自ら開発し、それを複雑な分子系へと応用することで、これまで観測できなかった現象や分子構造を「見る」ことが、研究室のテーマです。

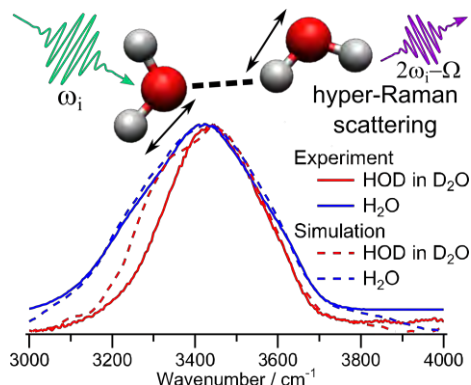


図3 H₂Oおよび重水で希釈したHODのハイパーラマン分光&ハイパーラマンスペクトル

主な著書・総説

- 1) 「ヘテロダイン検出キラル振動和周波発生とその応用」, *Molecular Science*, **14**, A0111 (2020).
- 2) 「ヘテロダイン検出キラル振動和周波発生分光法とそのバルクおよび界面試料への応用」, *分光研究*, **67**, 1-10 (2018).

主な原著論文

- 1) "Is Unified Understanding of Vibrational Coupling of Water Possible? Hyper-Raman Measurement and Machine Learning Spectra", *The Journal of Physical Chemistry Letters*, **14**, 3063-3068 (2023).
- 2) "Hyper-Raman Study of Hydrated Excess Protons in Water: Measurement of Concentrated HCl Solution", *Journal of Raman Spectroscopy*, **53**, 1679-1685 (2022).
- 3) "Hyper-Raman spectroscopy of benzene and pyridine revisited", *Journal of Chemical Physics*, **157**, 054505 (2022).
- 4) "Hyper-Raman Spectroscopic Investigation of Amide Bands of N-Methylacetamide in Liquid/Solution Phase", *Journal of Physical Chemistry Letters*, **12**, 4780-4785 (2021).
- 5) "Polarized-Hyper-Raman Study of Cyclohexane-h₁₂ and -d₁₂ in the Liquid Phase", *Chemistry Letters*, **50**, 1512-1515 (2021).
- 6) "Hyper-Raman Spectroscopy of Alcohols Excited at 532 nm: Methanol, Ethanol, 1-Propanol, and 2-Propanol", *Journal of Raman Spectroscopy*, **52**, 849-856 (2021).
- 7) "Vibrational Couplings and Energy Transfer Pathways of Water's Bending Mode", *Nature Communications*, **11**, 5977

学生へ一言

この研究室は、2019年に立ち上がった新しい研究室です。分子分光学は基礎物理化学に分類されますが、本研究室では装置開発からその応用まで一貫して行うため、さまざまな専門的知識を駆使して研究を進めています。レーザーや光学系などの物理・工学的、そしてもちろん分子構造についての化学に関する横断的な知識・技術および理解を獲得しながら、世界最先端の分子分光学を行っていきたくと考えています。また、研究室で行うメインのテーマだけにとどまらず、さまざまな場で研究室で開発した分光学的手法を役に立てたいと考えています。そのため、さまざまな事柄・分野に興味を持ち、国内外の研究機関や企業との共同研究などにも意欲がある学生を歓迎します。世界で最も先端的な装置を駆使して、これまで未解明であった事象の解明・発見に挑戦してみませんか？

研究室に興味をお持ちの方は、ご連絡をお待ちしています！

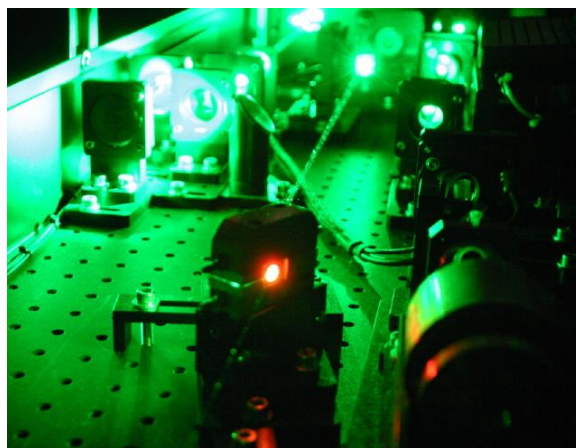
研究室のメンバー

准教授 1名、助教 1名、大学院生 3名（博士課程1名、修士課程2名）、卒研生 1名（2023年4月現在）。

高強度光科学・分子科学



長谷川宗良教授



チタンサファイア再生増幅器

長谷川宗良 教授 Hirokazu Hasegawa, *Prof.*

深堀信一 助教 Shinichi Fukahori, *Assist. Prof.*

高強度レーザー光と気相分子の相互作用についての研究を行っている。分子内電場に匹敵する光電場を持ち、光の相互作用を摂動として扱うことができない高強度レーザー光と分子が相互作用することによって、多彩な現象が起こる。例えば、分子配列・配向、分子構造変形といった分子の運動が誘起される現象や、高次高調波発生、アト秒パルス発生といった物質計測にとって新しい光源となりうる現象、そして多重イオン化やクーロン爆発といった複雑な過程を経て起こる現象などがある。当研究室ではフェムト秒レーザーや超高分解能レーザーを用いて、高強度レーザー光によって引き起こされる現象を、物理化学および分子科学の視点から明らかにすることを目標としている。以下に研究テーマの例を示す。

分子と高強度レーザー光の相互作用

高強度レーザー光と分子が相互作用すると、分子配列・分子構造変形・多重イオン化が誘起され、最終的にクーロン爆発し運動エネルギーを持った多価原子・分子イオンに解離する。初期状態である中性孤立分子が、終状態である解離イオンへ至る過程はどうなっているのだろうか？分子配列、構造変形、多重イオン化が独立して起きているのか、それともそれぞれが複雑に相関しながら現象が起きているのか。特定の価数のイオンが重要な役割をはたしているのか。初期状態として内部状態を指定した多価イオンを用意し、高強度レーザー光と相互作用させることによって、これらの疑問に答えてゆく。

イオン化メカニズムの解明

高強度レーザー光によるイオン化は、光電場によるトンネルイオン化によって引き起こされ、分子から複数の電子が放出された結果、多価陽イオンが生成し解離が進行することが知られている。分子から一つの電子がイオン化する場合、分子中で最もエネルギーの高い分子軌道 (HOMO) からのイオン化が支配的となるが、複数の電子が放出される際にどの分子軌道から電子が放出されるかは自明ではない。トンネルイオン化によるイオン化確率が、分子の向きと光の偏光方向の相対配置に依存し、この相対配置の依存性がイオン化する電子の占めている分子軌道の空間的な形状を反映することを利用して、高強度光によるイオン化の際にどの分子軌道から電子が放出されたか明らかにすることができる。そして多重イオン化のメカニズムや、イオン化に伴う分子の解離過程を明らかにすることを旨とする。

イオン分光

高強度レーザー光によって生成した多価イオンの内部状態分布は、イオン化過程を反映している。このため、イオン化メカニズムの解明には、生成したイオンの状態分布計測が必要不可欠となる。蛍光測定によるレーザー誘起蛍光スペクトル、分散蛍光スペクトル、そして共鳴多光子イオン化法による励起スペクトルによって観測した振電バンドなどから、多価イオンの電子・振動・回転状態分布を計測する。これらの

<http://hase.c.u-tokyo.ac.jp>

連絡先

教授 長谷川宗良 16号館 509B号室 5465-7697

chs36@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp

方法は中性分子に対してはなじみの手法であるが、イオンを対象とするため、適用が難しくなる。特に高感度な共鳴多光子イオン化法をイオンの分光に適用するための、高強度光を利用した新しいイオン分光法を開発する。

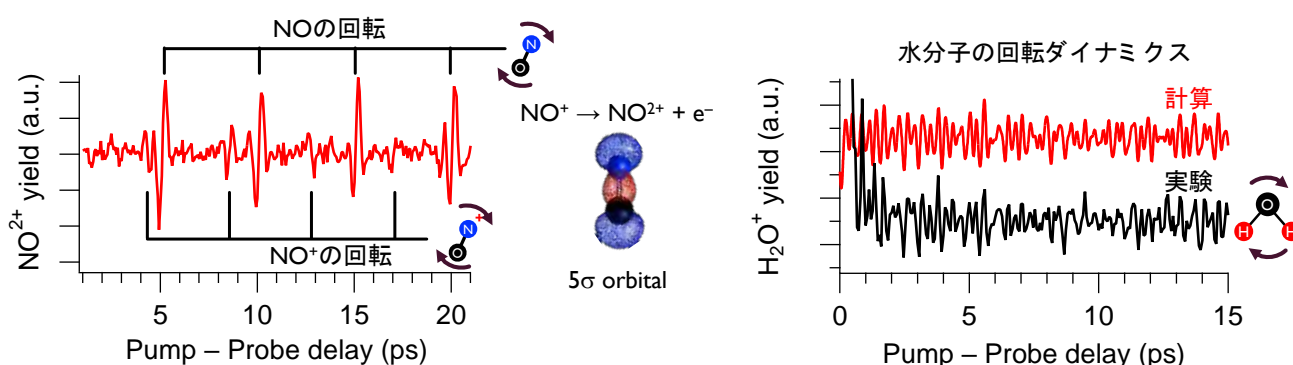
ティーの発現や磁化の発生といった新奇な現象も予言されており興味深い対象となっている。高強度光を用いて回転高励起状態を作る新しい方法を開発し、エネルギー準位構造や物性を高分解分光の手法を用いて明らかにする。

分子制御・回転高励起状態の生成

普段はランダムな方向を向いている気相分子に、レーザー光を照射する事によって、分子軸を空間に配列・配向させることができる。配列・配向をしている分子は、量子力学的には複数の回転準位のコヒーレントな重ね合わせ状態、すなわち回転波束となっている。レーザーのパルス幅、位相、強度、波長、偏光を調節することによって、この分子のコヒーレンスを制御し、分子回転を積極的にコントロールできる。これを利用して回転エネルギーの大きな回転高励起状態の生成を行う。回転高励起状態は、複雑なエネルギー準位構造を持ち、また分子回転に伴う遠心力による分子構造の変化からキラリ

目指すところ

当研究室の研究内容は、「光と分子の相互作用」についてであり、光の存在によって分子の性質が大きく変化する現象を対象としている。光照射後の分子の動力学も研究対象であるが、光の中で分子がどうなっているか（エネルギー準位、分子構造の変化、イオン化）を、実験的に観測し、そのメカニズムを解明したい。ピコ秒・フェムト秒・アト秒といった短い光パルスの中で、いったい分子に何が起きているのか追い求めたい。



(左) 高強度光によって誘起された NO, NO⁺の回転運動の実時間計測結果 高強度光による NO⁺から NO²⁺の生成は 5σ軌道からのイオン化であることを明らかにした (右) 高強度光によって誘起された H₂O 分子の複雑な回転運動

主な原著論文

- 1) Identification of strong field ionization of H₂O via electron emission from lower-lying molecular orbitals using rotational wave packet dynamics, S. Fukahori, I. Kikuchi and H. Hasegawa, *Chem. Phys. Lett*, **833**, 140912 (2023).
- 2) Rotational wave packet of NO⁺ created upon strong-field ionization of NO, S. Fukahori and H. Hasegawa, *J. Phys. B*, **56**, 205601 (2023).
- 3) Rotational dynamics of the asymmetric-top H₂O molecule induced by an intense laser field, I. Kikuchi, S. Fukahori and H. Hasegawa, *Phys. Rev. A*, **108**, 013101 (2023).
- 4) Single and sequential double ionization of NO radical in intense laser fields, S. Fukahori, A. Iwasaki, K. Yamanouchi and H. Hasegawa, *J. Chem. Phys.*, **156**, 094307 (2022).
- 5) Rotational dynamics and transitions between Λ-type doubling of NO induced by an intense two-color laser field, K. Nakamura, S. Fukahori and H. Hasegawa, *Phys. Rev. A*, **155**, 174308 (2021).
- 6) Rotational dynamics of O₂ in the electronic ground X³Σ_g⁻ state induced by an intense femtosecond laser field, K. Sonoda, S. Fukahori and H. Hasegawa, *Phys. Rev. A*, **103**, 033118 (2021).

学生へ一言

光と分子の相互作用の理解を深めたい方、フェムト秒・ピコ秒といった非常に早い分子ダイナミクスに興味のある方、新しい観測装置を作ってみたい方、やる気のある方を歓迎します。研究は、結果は華やかですが、そこへ至る道は地味で試行錯誤・失敗の繰り返しです。しかし、それに勝る発見、感動、自然への理解がついてきます。本研究室では、既存の分野にとらわれず、光と物質の相互作用の理解を目指します。光と分子に魅せられた人はたくさんいるはず。ぜひ一緒に研究し新しい発見をしましょう。説明や見学は随時行っていますので、興味がある方はコンタクトしてください。



真船文隆教授

真船文隆 教授 Fumitaka Mafuné, Prof.

永田利明 講師 Toshiaki Nagata, Lecturer

山口雅人 助教 Masato Yamaguchi, Assist. Prof.

真船研究室では、原子が数個～1000 個程度集合したクラスター・ナノ物質の構造、反応性や物性を実験により調べています。そのためにレーザー蒸発法、イオン化法、質量分析法、単一液滴法など分子科学に立脚した方法を用い、原子・分子レベルでこれらの挙動を明らかにすることを目指しています。

元素代替を目指す一貴金属に頼らない高活性な触媒はあるのか？

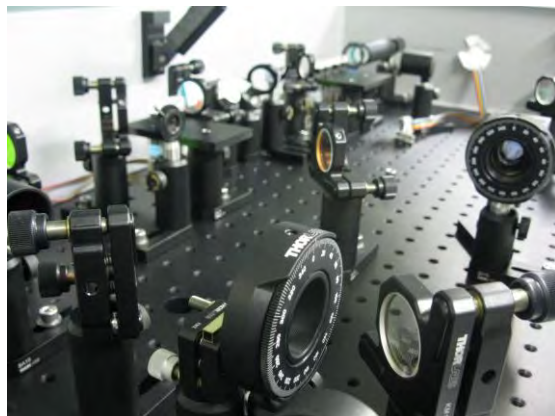
白金やロジウムなど、いわゆる高価な稀少元素を用いないで、別の元素でその働きを実現させることはできないか ———まさに 21 世紀錬金術プロジェクトが「熱く」進行中である。

では、どうやって？その答えは誰も分かっていない。ただ、単一の別の元素では無理だろうから、複数の元素を組み合わせるしかない。では、どの元素とどの元素をどれくらいの割合で組み合わせればいいのか？ 単に 2 種類の元素からなる物質でも 5000 種類ほどあり、また 3 種類の元素からなる物質では、16 万種類もある。1 日 1 種類調べても 430 年かかるほど多種であるので、一つ一つ調べていくわけにはいかない。そこで我々は、どのように元素を組み合わせていくべきなのか、その指標となるガイドラインを作り、それに従って物質

を開発する方法で、新しい物質の開発を進めている。

我々が現在目指しているのは、NO や CO など燃焼によって排出される分子を効率的に酸化・還元し、N₂ や CO₂ のようなより安全な分子に変換させるための触媒である。企業とも共同研究しながら、全く新しい物質の開発を進めている。

具体的には、パルスレーザーによる気相合成の技術を用いて、複数の元素からなるナノ物質を同時に多種類用意する。これらの性質を調べ、ある元素と別の元素を混合した際に発現する性質を系統的に調べる。このような知見を積み重ねることで、物質を構成する際の構成原理を求める。構成原理が明らかになれば、その原理に従いながら、新しい物質を開発することが可能となる。



赤外 OPOL レーザー

化学を超えたナノ物質のレーザー合成・操作

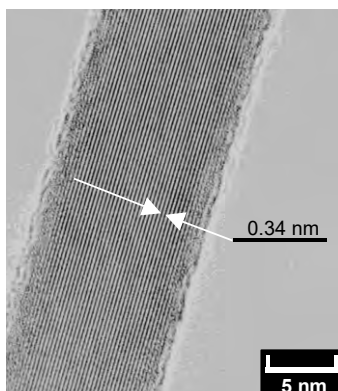
塊としては安定で反応性に乏しい貴金属でも、ナノメートルスケールに微小化することにより、それまでにはない新しい性質が発現する。さらに、これらの新しい性質は、サイズによって顕著に変化する。したがって、ある決まったサイズをもってナノスケール物質を生成し、その性質を明らかにする、さらにそのサイズを変化させて性質のサイズ依存性を調べることは化学として重要である。またその次の段階として、これら単体のナノスケール物質の構造を自由に操作し、さらに小さくするあるいは任意の形に組み上げることができれば、さらに多様性をもった物質を作ることができる。我々はパルスレーザーを用いて、ナノ粒子の温度、荷電状態を操作する

<http://park.itc.u-tokyo.ac.jp/Mafunelab/>

連絡先

教授 真船文隆 16 号館 425A 号室 5454-6597
mafune@cluster.c.u-tokyo.ac.jp

ことで、ナノスケール物質の構造や形状を制御し、これらの物理的、化学的特性がどのように変化するかを調べている。



マンガン酸化物ナノワイヤーの電子顕微鏡写真

クラスターのかたちと動きを原子レベルで明らかにする

原子や分子が数個～数百個程度集合した物質をクラスターという。そのかたちや動きを知ることは、クラスターとは何かを明らかにする上で極めて基礎的で本質的なことである。オランダ・ネイメーヘンのラドバウド大学に、赤外自由電子レーザー(通称FELIX)がある。このFELIXは、 100 cm^{-1} 以上の赤外領域の高強度の光を連続して出力できる施設であり、世界からこの光を求めて研究者が集まってくる。

あらかじめアルゴン原子をマーカーとして付けたクラスターに光を照射する。クラスターの振動と光の周波数が一致すると、クラスターは光を吸収する。光を吸収すると、そのエネルギーは熱に変換されるので、マーカーのアルゴン原子がクラスターから脱離する。したがって、この脱離の有無をモニターすれば、そもそもクラスターが光を吸収したかがわかり、クラスターの振動スペクトルを観測することができる。振動スペクトルは、いわゆる指紋と同じで、クラスターがどのような構造をしているのかを決めることができる。



FELIXの実験室の様子

主な著書

- 1) 量子化学、真船文隆著、化学同人
- 2) 物理化学、真船文隆・渡辺正共著、化学同人
- 3) 反応速度論、真船文隆・廣川淳共著、裳華房
- 4) Progress in Experimental and Theoretical Studies of Clusters, eds. by T. Kondow and F. Mafuné, World Scientific, Singapore.

最近の原著論文

- 1) Water Storage Capacity of Closed-Shell Silicon Oxyhydroxide Cluster Cations in the Gas Phase, Toshiaki Nagata, Ken Miyajima, Fumitaka Mafuné, *Bull. Chem. Soc. Jpn.* **2024**, 97, uoae020.
- 2) Hydrogen Storage Mechanism by Gas-Phase Vanadium Cluster Cations Revealed by Thermal Desorption Spectrometry, Yangkun Wu, Ken Miyajima, Satoshi Kudoh, Toshiaki Nagata, Fumitaka Mafuné, *J. Phys. Chem. A* **2023**, 127, 8821–8827.
- 3) Hydrogen Storage Capacity of Single-Nb-Atom Doped Al Clusters in the Gas Phase Revealed by Thermal Desorption Spectrometry, Yufei Zhang, Fumitaka Mafuné, *J. Phys. Chem. Lett.* **2023**, 14, 5734–5739.
- 4) Reduction of Nitric Oxide Adsorbed on Iridium Cluster Cations at High Temperatures, Keitaro Tatsukawa, Toshiaki Nagata, Masato Yamaguchi, Ken Miyajima, Fumitaka Mafuné, *Chem. Phys. Lett.* **2023**, 815, 140368.

研究室のメンバー

(2024年4月現在) 教授1名、講師1名、助教1名、博士研究員1名、大学院生5名

学生の皆様へ一言

化学系の研究室ですが、物理の側から化学を観測しています。皆さんがそれぞれ自分の研究テーマについて、楽しみながら研究できるとよいと思います。頑張ってください。

電子状態理論・溶媒和理論



横川大輔 准教授

横川大輔 准教授 Daisuke Yokogawa, Assoc. Prof.

本研究室では、溶液内で起きている化学現象の解明を目指し、“そこそこ” 精確に計算できる理論的手法の開発、ならびにそれを用いた応用研究を進めている。理論構築においては、常に物理化学的に正しいかどうかを意識しながら、量子化学・統計力学・解析力学などを駆使して式を導出するアプローチをとっている。応用研究では、実験だけでは明らかにすることが困難な、電子移動、寿命の短い中間体、遷移状態の構造などを求めながら、現象の解明を目指した研究を行なっている。

そこそこな精度？

そもそも“そこそこ” 精確とは、どの程度の精確さを意味するのだろうか。これは感覚的な表現であり科学的には不適切ではあるが、我々は「実験事実が再現」できる程度の精確さと考えている。“そこそこ” の精度を目指すの是一見すると、簡単そうに思うかもしれない。しかし実際は非常に困難な目標である。そもそも、“そこそこ” 精確に計算を行うためには、正確な値をある程度知っておく必要があり、出鱈目なアプローチで到達することはできない極めて難しい課題であると考える。

この課題克服のため我々が重要視しているのは、求めたい物理化学量に必要な情報量はどの程度かを見極めることである。これを見極めることができれば、それ以外の情報については近似を行うことで、良い意味で手を抜くことができる。これにより、計算誤差は含まれるが、“そこそこ” 精確な理論を構築できると考えている。

なぜ新規手法、アプローチを提案？

様々な理論家の活躍により、量子化学計算・統計力学的手法を行うことができるプログラムが開発されている。それらを用いれば、新規手法を自ら開発しなくても計算を行うことができる。また、それらに付属するマニュアルを読めば、ど

のように計算を進めていけば良いかも知ることができる。このように、化学計算を行う敷居は年々低くなっており、実験の研究室でも計算を利用しているところはたくさんある。

それでは、新しい手法やアプローチは必要ないのであるか？我々の研究室ではそうではないと考えている。例えば、これまで誰も登ったことがない山への登頂を目指したとする。もしかすると、これまで使っていた道具が全く使えないかもしれない。もしくは、これまで参考になってきた地図も役に立たない可能性もある。そういったときに自ら装備(新規手法)、地図(アプローチ)を開発、提案できなければ、どんなに素晴らしい山であっても登ることすらできないのではないだろうか。我々は、自らの力で挑戦できる術と技術を身につけることを目指している。

具体的な例(溶媒和自由エネルギー)

溶媒和自由エネルギーは、分子が溶媒に溶けるか溶けないかを決定する重要な物理量である。この物理量を理論的に予言することができれば、新規に分子を設計する際の重要な知見になることは間違いない。

我々の研究室では、統計力学的手法を用いた新規手法でこの問題に取り組んでいる。そこでは、「物理化学的に正しい理論は正しい結果を与えるはずだ」という信念のもと、クラスター展開に基づいて従来の式の再構築を行なっている。以下に示したのは、粒子1、2をある距離に見つける確率に対応するもので、これを直接相関関数 c を用いて展開したものである。従来法では、静電相互作用の寄与が大きな series

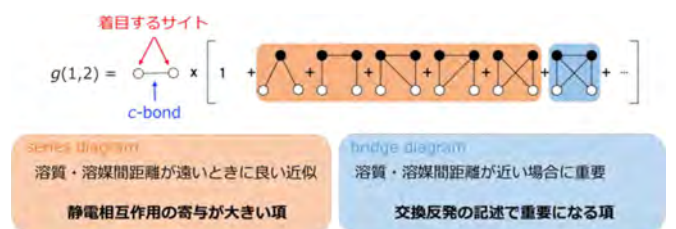


diagram をしっかり取り込んでいる一方で、交換反発の記述で重要になる bridge diagram の取り込みが弱い問題があった。我々は、新しい bridge 関数を提案することで、物理化学的により正しい理論を構築することに成功した。この手法を用いることにより、従来法よりも精確に溶媒和自由エネルギーを算出することに成功した。

最近興味を持っている応用研究

近年、分子を用いた生体イメージングが盛んに行われている。光を吸収・発光する蛍光分子を適切に設計すると、生体内部の化学環境や状態を外から知ることができる。では、どのように設計すれば良いのであろうか。残念ながら、現在取

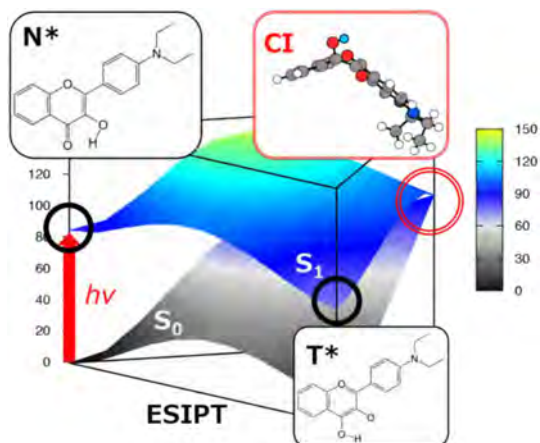


図1. 4'-*N,N*-diethylamino-3-hydroxyflavone の N*体から T*体、円錐交差点(CI)への構造変化に伴う、基底状態(S₀)、ならびに励起状態(S₁)のエネルギー曲面

られているアプローチは、偶然見つかった分子の性質を改変しながら進めているのがほとんどである。それは我々が、用いられている蛍光分子がなぜ光るのか、なぜ光らないのかを十分理解できていないためだと考える。これらのメカニズム

を十分に理解できれば、蛍光分子を自由自在に設計することも可能になる。

我々は、蛍光分子の蛍光・発光メカニズムを原子・電子レベルで明らかにするために、分子が励起された状態について量子化学・統計力学を駆使した解析を進めている。例えば、図1に示した分子(4'-*N,N*-diethylamino-3-hydroxyflavone)では、励起状態で分子内の水素原子が移動することが知られている(ESIP)。我々はこの構造変化以外に、励起状態で大きく分子が折れ曲がった構造を確認した。この構造変化により、励起された分子は蛍光を放出しないで基底状態に遷移することが示唆された。このようなエネルギー失活メカニズムを明らかにすることで、生体内でも明るく光る蛍光分子の設計や、生体内の環境に応じて応答が変化する蛍光分子などの設計も可能になると信じている。

連絡先

准教授 横川大輔 16号館 729A号室 5454-6784
c-d.yokogawa@mail.ecc.u-tokyo.ac

主な原著論文

- 1) D. Yokogawa, H. Sato, and S. Sakaki, "New generation of the reference interaction site model self-consistent field method: Introduction of spatial electron density distribution to the solvation theory", *J. Chem. Phys.*, **126**, 244504 (2007).
- 2) K. Suda and D. Yokogawa, "Theoretical study on non-radiative decay of dimethylaminobenzonitrile through triplet state in gas phase, non-polar, and polar solutions", *J. Phys. Chem. B*, **121**, 2164-2170 (2017).
- 3) D. Yokogawa, "Toward accurate solvation free energy calculation with reference interaction site model self-consistent field: Introduction of a new bridge function", *J. Chem. Theory Comput.*, **14**, 3272-3278 (2018).
- 4) D. Yokogawa, "Coupled cluster theory combined with reference interaction site model self-consistent field explicitly including spatial electron density distribution", *J. Chem. Theory Comput.*, **14**, 2661-2666 (2018).
- 5) D. Yokogawa, "New generation of the reference interaction site model self-consistent field method: Introduction of constrained spatial electron density distribution (cSED)", *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, **91**, 1540-1545 (2018).
- 6) D. Yokogawa "Isotropic site-site dispersion potential constructed using quantum chemical calculations and a geminal auxiliary basis set", *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, **92**, 748-753 (2019)

学生へ一言

私たちの研究室では、化学現象を原子・電子レベルで明らかにするために、理論を用いた研究を進めています。理論と聞くと「自分には無理」と思う人はたくさんいると思います。しかし誰でも最初は素人です。化学の授業を聞いて、現象そのものよりも“なぜ”に興味があった人、そしてその“なぜ”を自分独自のアプローチで解明したいと思う人大歓迎です。



羽馬 哲也 准教授

Tetsuya Hama, Associate Professor

宇宙の塵、地球のエアロゾル、海洋表面、植物の葉、ヒトの皮膚といった、「これまでの物理化学者・表面科学者が研究対象として扱ってこなかった系」でどのようなことがおきていて、それが宇宙の物質進化、地球の物質循環にどのような影響を与えているのかを実験的に研究しています。

最近の研究の具体例は以下の通りです。

(1) 宇宙における物質進化：氷星間塵の表面化学

星間空間には原子 (H, C, N, O など) や分子 (おもに H₂ など)、イオンのガスに加え「星間塵」と呼ばれるアモルファス (非晶質) 鉱物や炭素質物質でできた微粒子が存在する。これらが高密度に存在する領域のことを「星間分子雲」と呼び、恒星や惑星系の誕生の場となる (図 1)。

星間分子雲の温度はおよそ 10 K と非常に低い。しかし観測研究から、星間塵の表面は水(H₂O)、アンモニア(NH₃)、メタノール(CH₃OH)などで構成されたアモルファス氷で覆われていること明らかになっている。この「氷星間塵」こそが太陽系を含む惑星系の材料物質であり「極低温の星間分子雲で氷星間塵はどのようにして形成されるのか？」を知ることは、

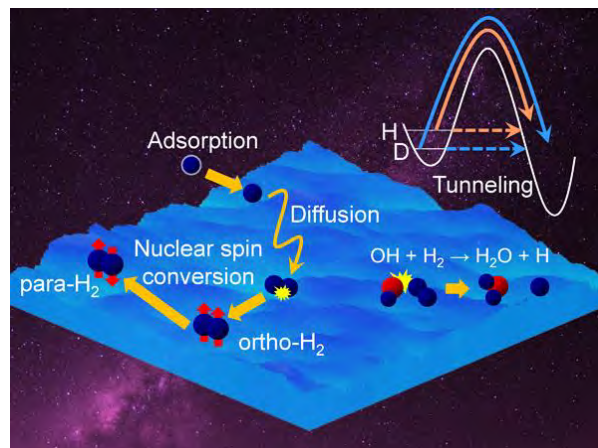


図 2 氷星間塵の表面物理化学過程。T. Hama, and N. Watanabe, Chem. Rev. 113, 8783-8839 (2013)より。この図は Chemical Reviews 誌の Front cover に採用された。

宇宙の物質進化と惑星系形成を理解するために本質的に重要である。しかしこれまでは観測や理論計算による研究が主流であり、星間塵の表面物理化学過程を実験的に調べる研究はほとんどなかった。

そこで「氷星間塵」が宇宙でどのように形成されるのかを理解するために、超高真空・極低温実験装置を開発し、「共鳴多光子イオン化法による原子・分子の状態選択的検出」や「赤外分光法による表面反応のその場追跡」をおこなうことで、極低温の氷星間塵ならではの表面物理化学過程(吸着、拡散、化学反応、核スピン転換など)を明らかにしてきた (図 2)。

とくに、最も存在量の多い元素である水素と、氷星間塵の主成分である水に着目し、「アモルファス表面と水素の量子的な性質 (量子トンネル効果・核スピン効果) が、極低温な星間分子雲での氷星間塵の生成 (物質進化) に決定的な役割を果たす」ことを示した。

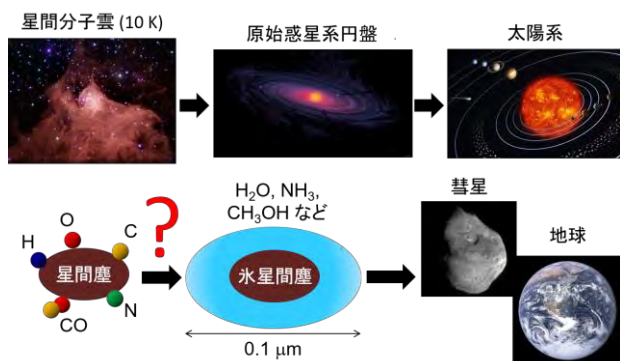


図 1 天体の進化と物質の進化。

<http://www.hamalab.c.u-tokyo.ac.jp/>

連絡先

准教授 羽馬 哲也

アドバンス・リサーチ・ラボラトリー 406号室

Tel: 5465-8917

hamatetsuya@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

(2) 地球の物質循環の理解に向けた実験手法の開発

今後の地球の気候変動を予測するためには植物や海洋表面、エアロゾルといった複雑な物質の表面化学を理解することが必須となる。たとえば植物の葉の表面物理化学過程を理解するためには、大気圧下で試料を「生きたまま」分析することが必要不可欠である。しかし従来の方法（ガスクロマトグラフィー質量分析や電子顕微鏡など）は破壊分析であるため、生体試料の表面反応をその場追跡することができなかった。

そこで偏光変調赤外反射吸収分光法を用いた実験装置の開発を行い（図3）、植物の葉のクチクラ（葉の表面を覆う有機薄膜）の赤外スペクトルを生きたまま測定することに成功し、

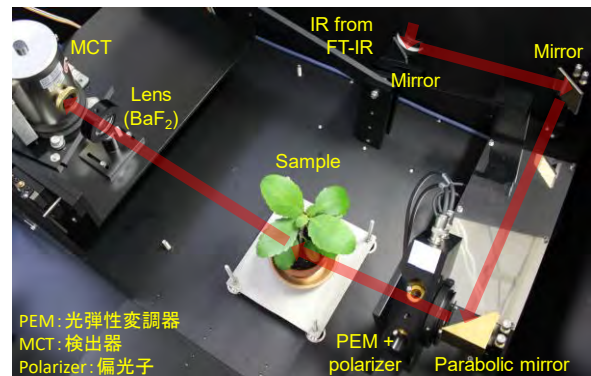


図3 偏光変調赤外反射吸収分光法によるセイロンベンケイの葉の測定の様子。

葉の表面でおきる化学反応のその場分析が可能であることがわかった。

主な著書および総説

- 1) 「星間空間における化学進化」系外惑星の事典, 2016, 126-127, 朝倉書店. 分担執筆
- 2) T. Hama, and N. Watanabe, "Surface Processes on Interstellar Amorphous Solid Water: Adsorption, Diffusion, Tunneling Reactions, and Nuclear-Spin Conversion" Chemical Reviews 113, 8783-8839 (2013).

主な原著論文

- 1) Absolute Absorption Cross Section and Orientation of Dangling OH Bonds in Water Ice, The Astrophysical Journal Letters, 923, L3 (8pp) (2021).
- 2) Quantitative Anisotropic Analysis of Molecular Orientation in Amorphous N₂O at 6 K by Infrared Multiple-Angle Incidence Resolution Spectrometry, The Journal of Physical Chemistry Letters, 11, 7857-7866 (2020).
- 3) Probing the Molecular Structure and Orientation of the Leaf Surface of *Brassica oleracea* L. by Polarization Modulation-Infrared Reflection-Absorption Spectroscopy, Plant and Cell Physiology 60, 1567-1580 (2019).
- 4) The Ortho-to-para Ratio of Water Molecules Desorbed from Ice Made from Para-water Monomers at 11 K, The Astrophysical Journal Letters 857, L13 (6pp) (2018).
- 5) Fast Crystalline Ice Formation at Extremely Low Temperature through Water/Neon Matrix Sublimation, Physical Chemistry Chemical Physics 19, 17677-17684 (2017).
- 6) Statistical Ortho-to-para Ratio of Water Desorbed from Ice at 10 Kelvin, Science 351, 65-67 (2016).
- 7) Quantum Tunneling Observed without Its Characteristic Large Kinetic Isotope Effects, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 112, 7438-7443 (2015).

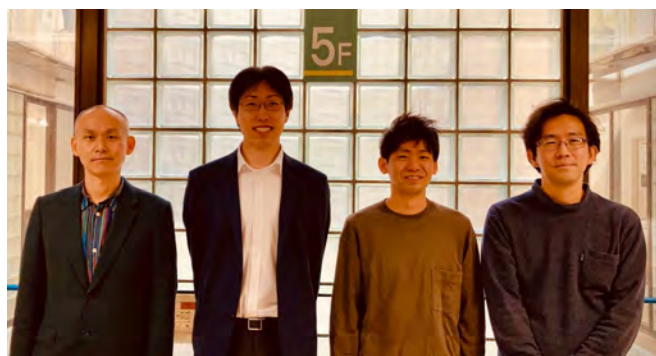
学生へ一言

研究はスポーツや絵画、工作と似ていて、自分でやってみないとその面白さはわかりません。ある疑問にたいして自分なりの回答を考える、そのために実験や計算をおこない、えられた結果の意味を正しく解釈するために勉強する。この面白さは残念ながら文章では伝えることができません。学生のみなさんはこの冊子を読むだけで満足せずに、もし興味がわいた研究室があれば、ぜひ足を運んでみてください。きっと新しい発見があるはずです。

研究室のメンバー

准教授 1 名、特任助教 1 名、修士課程学生 4 名、卒研生 4 名（そのうち外部研修生 1 名）（2022 年度）

分子自己集合：原理解明・新物質の開発・機能創成



平岡秀一教授・堀内新之介講師・阿部司助教・高橋聡助教

分子自己集合は構成要素となる分子が自発的に秩序立った構造を形成する現象で、自然界ではDNAの二重らせんの形成やタンパク質の折りたたみや集合化、細胞膜を形成する脂質二重膜などがあり、生命機能を支える現象です。また、人工的にも分子自己集合を利用して、非可逆な化学結合では作ることが困難な物質が開発されています。このように分子自己集合は、生命系から人工系まで物質科学を支える現象として広く利用されていますが、わからないことや未だ実現できないことも沢山あります。平岡・堀内研究室では、分子自己集合に残された未解決問題の解明に取り組んでいます。

分子ほぞ：van der Waals 力を使いこなす

van der Waals (vdW) 力はあらゆる原子や分子に普遍的に働く引力的相互作用で、化学結合の中で最も弱く方向性も乏しいため、共有結合のように使いこなすことが困難です。vdW力は距離の6乗に反比例するため、原子や分子が接近した時だけ、有効な引力となります。これは、分子を密に噛み合わせると無視できない程大きな引力となり、分子自己集合に利用できる可能性を示しています。この考え方は、マクロな世界では、「ほぞ」と呼ばれる木材に切り込みを入れて組み合わせることで糊や釘を使うことなく、家具などを作る伝統工芸法と似ています。分子の世界でも「ほぞ」をデザインすれば、自発的に分子が噛み合っ秩序構造を作るという考えが、「分子ほぞ」です。実際に、歯車の形をした分子をデザイン・合成し、これを水に溶かすと、疎水効果により2nmの立方体(ナノキューブ)が自発的に組み上がることを発見しました(図A)。ナノキューブのように、分子が噛み合っ作られる分子カプセルは珍しく、カプセルに分子を取り込むと相手分子の大きさや形、電荷を認識し、自分自身の大きさを体積として2倍以上も変化させる特性や、それに応答して発光強度を変化させる分子センサーとして機能することがわかりました。

分子自己集合の機構解明

分子自己集合という現象が沢山知られているにも関わらず、各ビルディングブロックがどうやって秩序構造へ至るのか？という形成機構に関する理解は殆ど進んでいませんでした

(図B)。機構解明を阻む大きな問題は自己集合の過程で一過的に生成する中間体を観測できないことです。我々は、自己集合の原系と生成系の全成分を定量し、間接的に中間体の情報を得る新手法(QASAP: Quantitative Analysis of Self-Assembly Process)と数理モデルを使った解析手法(NASAP: Numerical Analysis of Self-Assembly Process)を開発しました。これまで、20種類以上の自己集合性錯体の形成機構を解明し、ビルディングブロックや最終生成物の構造、また自己集合の条件と秩序形成の機構に関する関係性など、分子自己集合機構の支配原理の解明に取り組んでいます。

速度論支配の分子自己集合

多くの分子自己集合体は熱力学支配で進行し、化学平衡状態に到達します。一方、分子自己集合を速度論でコントロールできると、熱力学支配では不可能なことを達成できます。熱力学支配では最も安定な集合体が優先し、全ての生成物の生成比はボルツマン分布しますが、速度論支配では、最も安定な集合体をボルツマン分布以上に生成することも、準安定種を主生成物にすることもできます(図C)。速度論支配を巧みに利用するには適切な経路選択の方法が必要で、我々は経路選択のための一般手法の開発を行っています。熱力学支配では困難な自己集合に多種類の構成要素からなる多成分自己集合があります。最近、多成分自己集合性錯体を形成する一般手法を開発し、その可能性を探索しています。

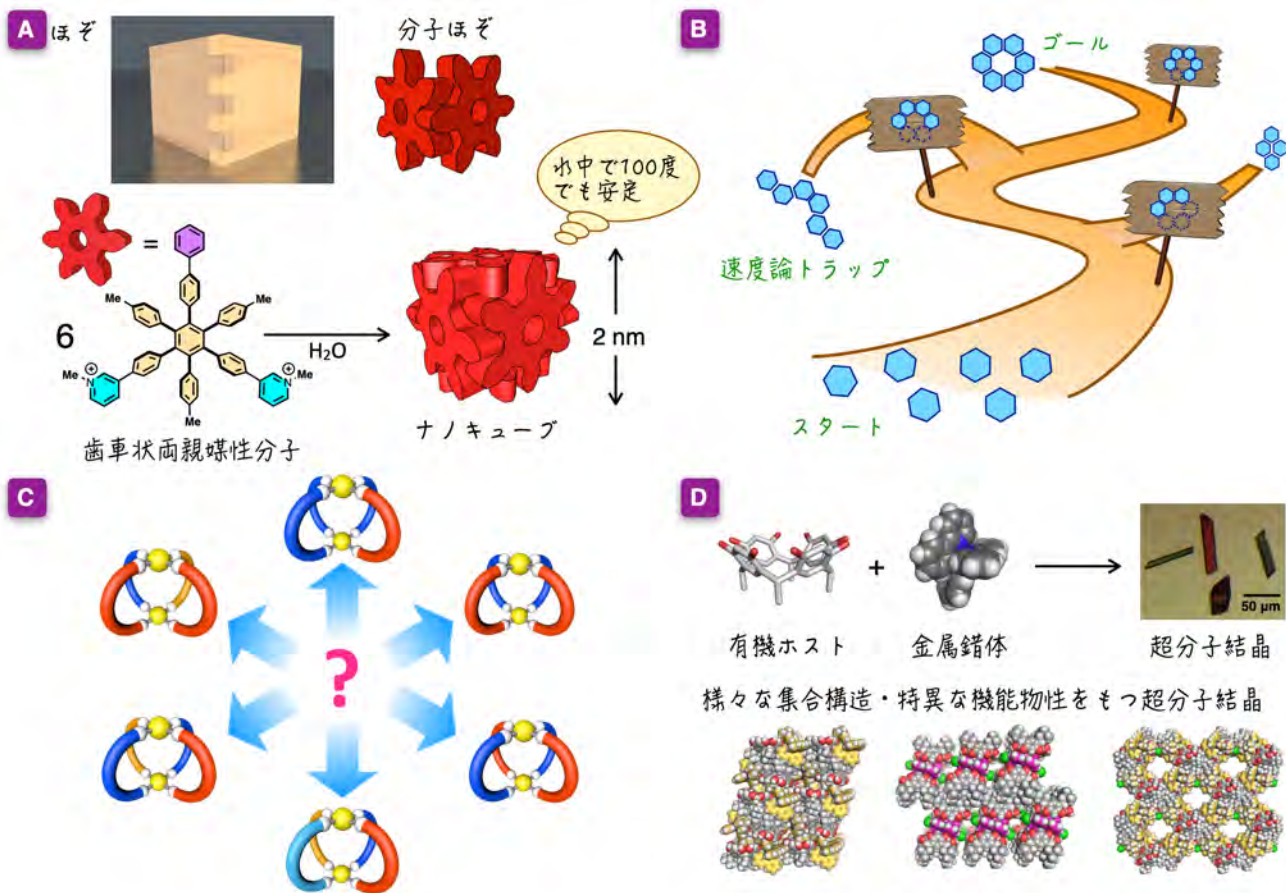
分子間相互作用に基づく超分子結晶の創出

溶液中の分子自己集合だけでなく、結晶化による固体状態の分子自己集合に関する研究も行なっています。一般的な合成化学では不純物を取り除くために行われる結晶化(再結晶)ですが、構成要素をうまくデザインすると分子間相互作用によってそれらが複合体となった超分子結晶を得ることが出来ます。例えば、有機ホストとして知られるカリックス[4]アレーンと金属錯体を混ぜ合わせ結晶化すると、それらが分子間相互作用で組み合っ超分子結晶が得られることを見出しています(図D)。用いる構成要素の形状や性質を変えると、金属有機構造体(Metal Organic Frameworks: MOF)や共有結合性有機構造体(Covalent Organic Frameworks: COF)のような、細孔を持つ超分子結晶も得ることが出来ます。このようにして得られる超分子結晶は、構成要素となる分子の性質を掛けた機能と特異な集合構造がシナジーすることで、構成分子単独の状態では得られない特異な性質が発現する可能性があります。そのため現在、新しい構成分子の組み合わせを探索し、その特異な集合構造や新奇な機能物性を明らかにしています。

<http://hiraoka.c.u-tokyo.ac.jp/>

連絡先

教授 平岡秀一 16号館525B号室 5454-6595
hiraoka-s@g.ecc.u-tokyo.ac.jp



主な著書

- 1) 溶液における分子認識と自己集合の原理: 分子間相互作用 (サイエンス社, 2017)

最近の主な原著論文

- 1) *Navigated Self-assembly of a Pd₂L₄ Cage by Modulation of an Energy Landscape under Kinetic Control* T. Tateishi, S. Takahashi, A. Okazawa, V. Martí-Centelles, J. Wang, T. Kojima, P. L. Lusby*, H. Sato, and S. Hiraoka*, **J. Am. Chem. Soc.** 141, 19669 – 19676 (2019).
- 2) *Bifurcation of Self-assembly Pathways to Sheet or Cage Controlled by Kinetic Template Effect*. L. H. Foianesi-Takeshige, S. Takahashi, T. Tateishi, R. Sekine, A. Okazawa, W. Zhu, T. Kojima, K. Harano, E. Nakamura, H. Sato, and S. Hiraoka*, **Commun. Chem.** 2, 128 (2019).
- 3) *Supramolecular Fluorescence Sensor for Liquefied Petroleum Gas*. Y.-Y. Zhan, J. Liao, M. Kajita, T. Kojima, S. Takahashi, T. Takaya, K. Iwata, and S. Hiraoka*, **Commun. Chem.** 2, 107 (2019).
- 4) *Polarizability and Isotope Effects on Dispersion Interactions in Water*. Y.-Y. Zhan, Q.-C. Jiang, K. Ishii, T. Koide, T. Kojima, S. Takahashi, M. Tachikawa, S. Uchiyama, and S. Hiraoka*, **Commun. Chem.** 2, 141, (2019).
- 5) *Temperature-Controlled Repeatable Scrambling and Induced-fit Self-Sorting of Building Blocks Between Cubic Assemblies*. Y.-Y. Zhan, T. Kojima, K. Ishii, S. Takahashi, Y. Haketa, H. Maeda, S. Uchiyama, and S. Hiraoka*, **Nature Commun.** 10, 1440 (2019).
- 6) *Self-assembly Process of a Quadruply Interlocked Palladium Cage*. T. Tateishi, Y. Yasutake, T. Kojima, S. Takahashi, and S. Hiraoka*, **Commun. Chem.** 2, 25 (2019).
- 7) *Self-assembly Processes of Octahedron-shaped Pd₆L₄ Cages*. S. Komine, S. Takahashi, T. Kojima, H. Sato, and S. Hiraoka*, **J. Am. Chem. Soc.** 141, 3178 – 3186 (2019).
- 8) *Induced-fit Expansion and Contraction of a Self-assembled Nanocube Finely Responding to Neutral and Anionic Guests*. Y.-Y. Zhan, T. Kojima, T. Nakamura, T. Takahashi, S. Takahashi, Y. Haketa, Y. Shoji, H. Maeda, T. Fukushima, and S. Hiraoka*, **Nature Commun.** 9, 4530 (2018).

学生へ一言

分子の集合現象の解明や新しい集合体の開発を通して、サイエンスを楽しみましょう！

研究室のメンバー

教授(1名), 講師(1名), 助教(2名), D1(2名), M2(2名), M1(2名), B4(1名), 秘書(1名)

機能性固体材料の創製



内田 さやか 准教授

内田 さやか 准教授 Sayaka Uchida, Assoc. Prof.

現在の高度な文明社会は、様々な固体材料（電気、磁気、光、吸着、触媒など）によって支えられています。しかし、多くの固体材料は、高価な原料や大量のエネルギーを消費して合成されており、その合成手法には大きな変革が必要とされています。図1に示すように、当研究室では、構成ブロックとなる分子性イオン（ポリオキシメタレートアニオンなど）を設計したのちにこれらを集積化して結晶性固体を合成するという、ナノ～マイクロメートルに至る階層的な機能性材料の創製を目指しています。以下に最近の研究成果を紹介します。

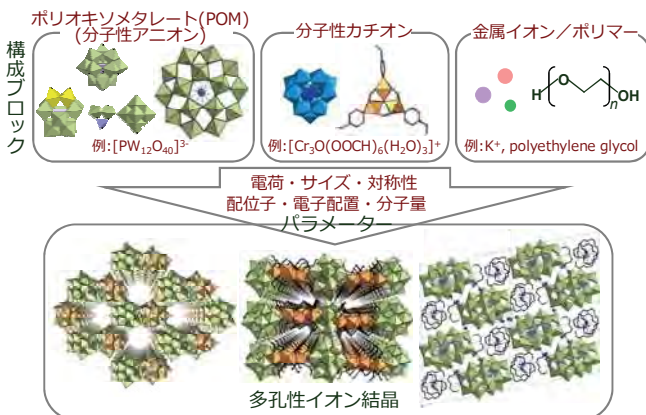


図1. 研究構想.

ポリオキシメタレートとは

ポリオキシメタレートは、ナノサイズのアニオン性の無機金属酸化物クラスターです。例えば、ケイ酸イオンとタングステン酸イオンを酸性水溶液中で反応させると縮合反応がおこ

り、ケギン型シリコングステート $[\text{SiW}_{12}\text{O}_{40}]^{4-}$ が生成します (図2)。ポリオキシメタレートの特徴として、①サイズ、構造、電荷を精密に設計できる、②構成元素の一部を異種元素で置換でき

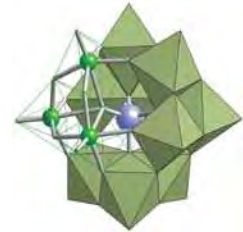


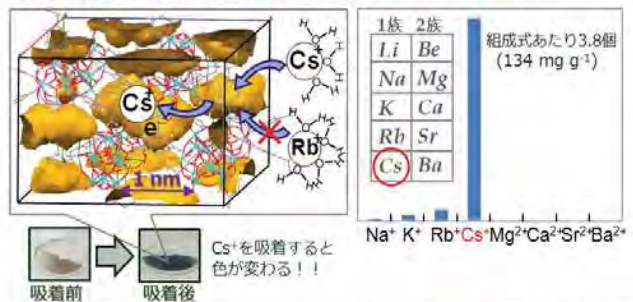
図2. ケギン型シリコングステート $[\text{SiW}_{12}\text{O}_{40}]^{4-}$ の分子構造. 緑色、紫色の球は、W、Si を示す.

る、③多電子酸化還元反応が進行する、ことが挙げられ、触媒、磁性や電子材料として活発に研究されています。

多孔性イオン結晶の機能

各種溶媒中でポリオキシメタレートを、分子性カチオン、金属イオンやポリマーと集積化すると、イオン結晶が得られます。イオン結晶の中に細孔や空隙が構築できれば (=多孔性イオン結晶)、そこが、分子やイオンの吸着・輸送・変換場となりえます。例えば、水中からセシウムイオンを細孔内に選択的に吸着し、放射性セシウム除去のモデル化合物となりうるイオン結晶、細孔内に導入したポリマーを伝わってプロトンが伝導する固体電解質材料が得られています (図3)。

イオン結晶で水中のセシウムイオン(Cs+)を高選択的に吸着除去



燃料電池の固体電解質(プロトン伝導)を指向し、高分子を導入したイオン結晶

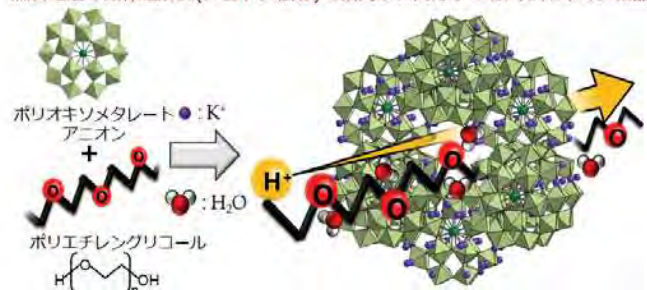


図3. 多孔性イオン結晶の機能.

<http://park.itc.u-tokyo.ac.jp/suchida/>
 連絡先
 准教授 内田 さやか 16号館 501B号室
 csayaka@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp

なぜ、多孔性材料のモチーフとしてイオン結晶に着目していると思いますか？①イオン結晶の細孔内に働く電場が極性分子の吸着・活性化に有利であること、②構成ブロックに付与した機能を集積・結晶化後も活用できること、③ポリオキソメタレートアニオンの特性を活かした酸化還元活性な多孔体を構築できること、など、既存の多孔性材料にはない特長を見出しつつあるからです。

凝集・集積形態制御

上述の多孔性イオン結晶は単結晶(熱力学的安定相)ですが、図4に示す素反応の制御により、単結晶のみならず、超微粒子、アモルファス集合体やメソ結晶など、様々な形態の材料を合理的に設計することも目指しています。

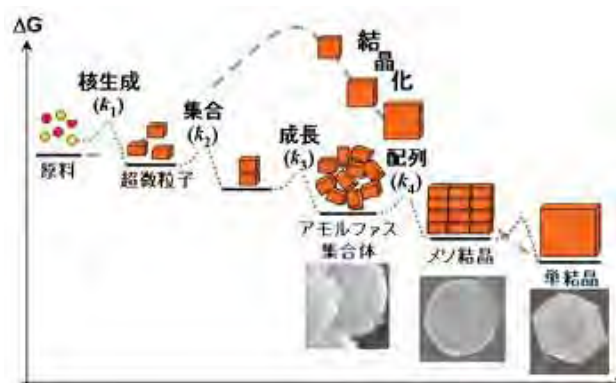


図4. 機能性固体の凝集・集積形態制御.

最近の論文題目

- 2016 年度(博士) “Keggin 型ポリ酸を用いた多孔性イオン結晶の創製と機能設計”
- 2016 年度(修士) “ポリマー含有 Preyssler 型ポリ酸による無加湿プロトン伝導体の創製”
- 2016 年度(修士) “レドックス型多孔性イオン結晶による銀の還元的導入”
- 2016 年度(学士) “多核水酸化アルミニウムイオンを前駆体とした超微粒子／多孔体の調製”
- 2016 年度(学士) “多孔性イオン結晶のカチオン交換とプロトン伝導機能”

最近の原著論文(研究を進めた学生に下線)

- 1) Yuki Kinoshita et al., “Highly pH-Dependent Facile-Preparation of Amorphous High Surface Area Aluminum Hydroxide-Bicarbonates with $[Al_{13}O_4(OH)_{24}(H_2O)_{12}]^{7+}$ ”, *Chem. Lett.*, in press (2018).
- 2) Kazuma Niinomi, Satoru Miyazawa et al., “High Proton Conduction in Crystalline Composites Based on Preyssler-type Polyoxometalates and Polymers under Non-humidified or Humidified Conditions”, *Inorg. Chem.*, **56**, 15187 (2017).
- 3) Reina Hosono et al., “Proton Conduction in Alkali Metal Ion-Exchanged Porous Ionic Crystals”, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **19**, 29077 (2017). (研究成果が裏表紙として選定・掲載されました！)
- 4) Ryosuke Kawahara et al., “Synergetic Effect in Heterogeneous Acid Catalysis by a Porous Ionic Crystal Based on Al(III)-Salphen and Polyoxometalate”, *Dalton Trans.*, **46**, 3105 (2017).
- 5) Saori Seino et al., “Reduction-Induced Highly Selective Uptake of Cs^+ by an Ionic Crystal based on Silicododecamolybdates”, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **55**, 3987 (2016).
- 6) Kosuke Mizuno, Takuto Mura et al., “Control of Polymorphisms and Functions in All-Inorganic Ionic Crystals Based on Polyaluminum Hydroxide and Polyoxometalates”, *Cryst. Growth Des.*, **16**, 4968 (2016).

学生の皆さんへ

当研究室では、無機化学・錯体化学・物理化学を基盤とし、“分子やイオンの貯蔵・分離・変換場となる固体材料”の創製を行っています。皆さんの手で、物質合成～構造解析～機能開拓まで一貫して行い、研究成果は、国内外の学会で積極的に発表してもらいます。研究は、様々な手法を取り入れ、多角的な視点で進めることが大事なので、学内外の研究室との交流・共同研究も盛んです。研究の進め方に関し、皆さんの自主性を重んじていますが、修士課程修了までに、研究成果を必ず学術雑誌に投稿できるように進めるのがルールです。2018 年度学生メンバーは、M2 2 名、M1 2 名、B4 (外研) 2 名 (この他に、留学生や共同研究先の学生が出入り) です。なお、博士課程への進学を視野に入れる方は、本人の努力が第一ですが、日本学術振興会 特別研究員に採用されるよう、最大限バックアップします。

有機無機ハイブリッド界面・超分子化学・電子物理工学



桐谷 乃輔 准教授 Daisuke Kiriya, Assoc. Prof.

分子化学とデバイス工学

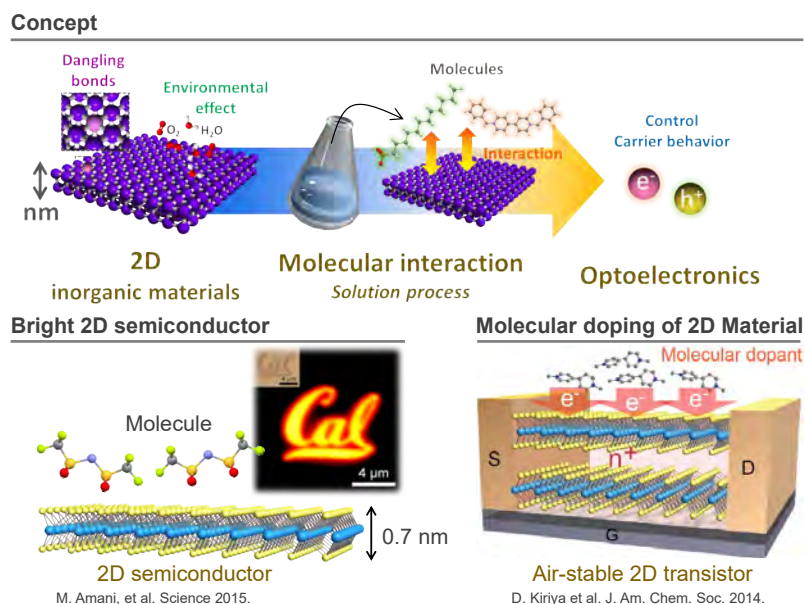
こんにちは。当研究室では、分子化学を基盤として、工学的な（機械工学、電子工学や量子工学）見方や仕組みを融合した学際研究を進めています。分子化学は、nm スケールやさらに小さな ($\text{\AA} = 0.1 \text{ nm}$) スケールの現象を緻密に操ることに長けています。また、それを拡張した分子の集積体では、その集まり方（形態）に多自由度が生まれます。分子スケールの現象を機械加工技術によって、細部まで再現することは難しく、化学分野のなせる精緻な技です。この分子特有の nm スケールの組み上げ機構に加えて、工学的な仕組みを融合すれば、新たな科学（物質や物性）や一風変わった工学（電子デバイス）が生み出せるのではないかと考え、研究を進めています。

まずは、基盤となる分子化学として、分子の集まる性質に注目をしています。分子同士が相互作用をする性質です。化学を学んだ方には馴染みある「超分子化学」と呼ばれる学問分野です。生体内や自然環境は分子で溢れ、nm スケールの分子は常に周囲の分子と相互作用をしています。従って、分子間相互作用を記述する超分子化学は、自然界におけるバイブルです。たとえば、細胞膜を構成している分子間相互作用やタンパク質のフォールディングなど、超分子化学を介することで生命化学現象への理解が進んでいます。ここで大事なことは、部品である分子は、特有の方向感覚をもって相互作用をしているということです。つまり、nm スケールという小さな領域で、「認識能」を持っています。

超分子化学における nm スケールの認識能は、工学技術としても魅力的です。無機物質（例えばシリコンなど）の表面は、

原子がビッチと $\text{\AA} (= 0.1 \text{ nm})$ 領域で詰まっていますが、僅かな違い（原子の欠損：欠陥）が面内に存在しています。この欠陥を見つけて、不活性化したい。実は、分子の相互作用を上手く使う方法が、最近示されています。たとえば、2次元の無機半導体結晶において、ある種の分子は欠陥を認識し、その結果、半導体特有の発光強度を数百倍にも増強することがわかっています（下図）。この2次元結晶は、わずか 0.7 nm の厚みで、透明です。この分子融合技術は、透明ディスプレイや透明な太陽光発電素子への展開が期待されています。

超分子集積体の構築機構として、電子移動が知られていません。電子の出し手（ドナー）と受け手（アクセプター）の分子種を適切に選ぶことで、意図した集積構造を組み上げられます。この機構は化学分野において、広く用いられています。この機構を拡張すると、分子と無機デバイス（無機物質）の異なる物質界面においても、電子移動相互作用を構築できそうです。これまでに、電子デバイスの心臓部を成す無機トランジスタに対して、分子を相互作用させて、動作の検証実験を行なっています。たとえば、無機物質として2次元半導体を選び、特殊な分子を相互作用させた結果、半導体結晶内部の電子濃度を極端に変化できることがわかっています（下図）。分子の触れた部分は、半導体特性から金属的な性質へと大きな変化を示し、これは理学的にも、デバイス工学の観点でも、



（上）分子（有機）と2次元(2D)無機物質の融合のイラスト。（下左）分子と2D半導体の接合による超高発光特性化(Calの字に加工している)。（下右）分子接合をした2D半導体トランジスタの模式図。電子濃度を大きく変化することが可能。

<https://www.transmat.c.u-tokyo.ac.jp>

連絡先

桐谷 乃輔 16号館 501A室 03-5454-6596
kiriya@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

興味深い現象です。さらに電子濃度の上昇量（電子注入量）を極端なレベルへと到達させると、無機物質は相を変化し、超伝導相などの量子相の発現が期待されており、物理・デバイス両側面において、興味深い対象です。加えて、分子は液体として用いることもできるので、印刷などの工学技術と相性が良いのも特徴です。将来の電子物性や電子工学を拓く上で、分子の利用は、大きな可能性を秘めていると言えます。

電子デバイスに自発性を与える。

超分子化学は、生命の根源的な現象を司る学問分野です。それを電子デバイスへと融合すると、生き物の部品を搭載した電子デバイスになる（はずだ）と考えています。生体は複雑な化学システムですので、完全なコピーをデバイス上へ機能化することは、現時点では難しいと思われます。ただし、類似の機能を持った化学部品や熱力学的な仕組みを電子デバイス上へ組み込むことは、おそらく可能なはずで、私たち

は、電子デバイスに自発的な変化や動作を組み込むことを意図して、研究を進めています。最近、細胞の非平衡な状態変化を真似られる感触を得ています。例えば、2次元半導体結晶を自己屈曲させたり、自己積層させたり、「動き」は実現できそうです。他には、電子デバイスの主要部品であるP型やN型の半導体の接合構造（PN接合）を、「自発的に無数に形成」できる可能性も示唆されています。今後は、細胞内におけるフィードバック機構や、より高度な機能である複製や進化など、「分子が絡む究極の機能」を物質や電子デバイスで発現することを目標に据えています。さまざまな学問分野（化学、物理、生物、電子工学、情報学など）を跨いで、自由に発想し、専門家とのディスカッションを重ねることで、目標へと少しでも近づきたいと考えています。まだスタートラインに立ったところなので、ご興味をお持ちの方はぜひお声がけください。

主な解説

- 1) 桐谷乃輔, 藤村紀文, “原子層半導体と分子性化合物の融合機能化”, 材料, vol.70, No.10, pp.721–726 (2021).
- 2) 木村大輔, 桐谷乃輔, “酸処理による単層二硫化モリブデンにおけるフォトルミネッセンス増強に関する研究”, 硫酸と工業, vol.74, no.5, pp.1–7 (2021).
- 3) 一宮永ら, “2次元半導体上における電子ドナー性分子の流動と表面状態の相関”, 化学とマイクロ・ナノシステム学会誌, vol.18, no.1, pp.46–47 (2019).

主な原著論文

- 1) K. Matsuyama, *et al.*, "Metallic transport in monolayer and multilayer molybdenum disulfides by molecular surface-charge transfer doping", **ACS Appl. Mater. Interfaces**, 14, 8163-8170 (2022).
- 2) Y. Yamada, *et al.*, "Ultralarge Photoluminescence Enhancement of Monolayer Molybdenum Disulfide by Spontaneous Superacid Nanolayer Formation" **ACS Appl. Mater. Interfaces**, 13, 25280-25289 (2021).
- 3) H. Ichimiya, *et al.*, "Electronic Structure Mosaicity of Monolayer Transition Metal Dichalcogenides by Spontaneous Pattern Formation of Donor Molecules", **ACS Appl. Mater. Interfaces**, 11, 15922-15926 (2019).
- 4) W. Gao, *et al.*, "Flexible Electronics Toward Wearable Sensing", **Acc. Chem. Res.**, 52, 523-533. (2019).
- 5) H. Ichimiya, *et al.*, "Tuning Transition-Metal Dichalcogenide Field-Effect-Transistor by Spontaneous Pattern Formation of an Ultrathin Molecular Dopant Film", **ACS NANO**, 12, 10123-10129 (2018).
- 6) M. Amani, *et al.*, "Near-Unity Photoluminescence Quantum Yield in MoS₂", **Science**, 350, 1065-1068 (2015).

学生へ向けて

研究は、自由に発想をしたアイデアを自然に対して検証する、一種の思考ゲームだと思います。実験研究では、先輩後輩や仲間と共に、課題を一つずつ攻略してゆきます。私たちの研究では、化学や電子工学など、複数の学問分野を利用して、多方面から攻略法を探ります。桐谷は錯体化学や超分子化学の分野で学位を取得しておりますが、2012年からの10年間は電気電子系の研究分野で研究を進めました。2022年度に一緒に研究を進める学生さんは、電子工学がバックグラウンドです。このような学際研究の醍醐味は、人との繋がりや分野を超越した発見であると考えています。個人では手に負えない課題に直面する事もありますが、専門家とディスカッションを行い、新たな繋がりを見つけながら進めています。最近では、電子デバイスに自発性を持たせる、という答えのない課題にも取り組んでおります。もし皆さんの興味に合うようでしたら、ぜひお問い合わせください。

触媒化学・バイオマス変換・プラスチック分解



小林広和 准教授

Hirokazu Kobayashi, Associate Professor

持続可能な循環型社会の実現に向けて、触媒化学を基盤とした基礎から応用までの研究を行っています。

具体的には、バイオマスや廃プラスチックを化学変換できる触媒の開発に取り組んでいます。また、豊富に存在するものの反応性に乏しいアルカンを有効活用するための部分酸化触媒の創出を目指しています。

限られた資源を効率的に利用し、使い捨てせずに持続的に循環できる次世代化学を作ります。

バイオマスの利用

バイオマスを適切に利用すれば、最終的に燃やして二酸化炭素として排出したとしても、光合成により再びバイオマスに戻るため、再生可能資源と言えます。バイオマスの中でも特に量が多いのが木質であり、その主成分はセルロースです。

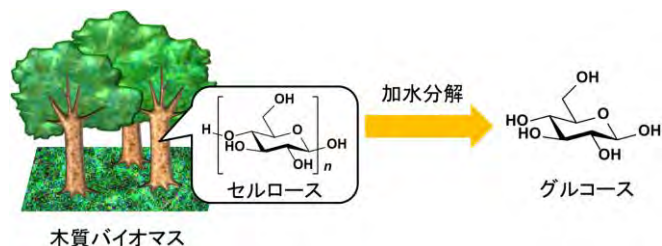


図1 セルロースの構造と加水分解によるグルコース合成。

セルロースは、グルコース（ブドウ糖）が多数つながったポリマーであり、加水分解すればグルコースが得られます（図1）。この糖は、発酵やさらなる人工的な化学変換により、エタノール・乳酸・5-ヒドロキシメチルフフルールなど重要な化学品に転換できます。このような化学変換が効率的にできれば、世の中にはセルロース由来の化学製品が多数出回っているはずなのですが、実際には見かけません。それは、各

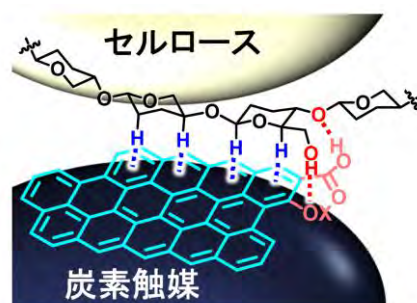


図2 炭素触媒によるセルロースの加水分解。炭素表面にセルロースが吸着し、弱酸がグリコシド結合をプロトン化する。

化学変換過程、とりわけセルロースの加水分解が非常に難しいためです。

当研究室の主宰者である小林らは、この固体の基質を固体触媒によって分解するというアプローチを取り、カルボキシ基やフェノール性水酸基などの弱い酸点を持つ炭素がセルロースを加水分解できることを見出しました。特に、その炭素とセルロースと一緒にボールミル処理することによって、物理的な接触をきちんと形成させておくと、劇的に反応が加速でき、高収率でグルコースを得ることに成功しています。反応機構の解明にも取り組み、炭素の多環芳香族がセルロースを吸着すること、吸着されたセルロースが炭素上の弱酸点で加水分解されることを明らかにしました（図2）。

また、キチンの変換にも取り組んでいます。キチンとは、カニやエビなどの甲殻類の殻に多量に含まれる成分であり、その化学構造はセルロースとよく似ていますが、アセトアミド基、つまり、窒素を含んでいるところに特徴があります。我々は、キチンが有機窒素化合物の原料になるのではないかと考え、その選択的な分解方法や誘導体合成に取り組んでいます。

プラスチックの分解

世界では使用済みプラスチックの79%が投棄されている現状があります。プラスチックを回収するにはコストがかかり、燃やして熱にしても、熱という低品位のエネルギーは価値が低いことも一因です。

このように投棄されたプラスチックの一部は海へと流れつき、劣化して非常に細かい破片であるマイクロプラスチック

<https://webpark2294.sakura.ne.jp/>

連絡先

小林広和 KOL M202 室 TEL: 03-5452-6616
kobayashi-hi@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

になります。プラスチックの多くは極めて長期間にわたり分解しないので海洋に蓄積し、生物に取り込まれ、様々な問題を引き起こすことが懸念されています。

そこで、我々は廃プラスチックを触媒によって選択的に分解して、価値のある物質を合成したいと考えています。廃プラスチックに価値が生まれれば、投棄される量も減り、環境負荷が減らせる可能性があります。これまでに、ゼオライトに担持した金属触媒により、ポリプロピレンを選択的に分解できる可能性を見出しています。

アルカンは、石油や天然ガスの主成分ですが、反応性に極めて乏しく、化学原料として利用するためには、エネルギー多消費型のプロセスが必要とされています。アルカンの C-H 結合に一つだけ酸素原子を挿入して C-OH (アルコール) にすれば、様々な化学品原料になります(図 3)が、これは見た目の単純さとは裏腹に夢の高難度反応とされています。もしこのような反応を効率的に行えるようになれば、二酸化炭素排出削減に大きく貢献することができます。この実現のためには触媒の開発が鍵を握っています。

アルカンの選択酸化

主な著書と総説

- 1) H. Kobayashi, T. Sagawa, A. Fukuoka, "Catalytic conversion of chitin as a nitrogen-containing biomass", *Chem. Commun.*, 59, 6301-6313 (2023). (Pioneering Investigators 2023 special issue)
- 2) H. Kobayashi, A. Fukuoka, "Development of Solid Catalyst–Solid Substrate Reactions for Efficient Utilization of Biomass", *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, 91, 29-41 (2018).

主な原著論文

- 1) H. Kobayashi, Y. Suzuki, T. Sagawa, M. Saito, A. Fukuoka, "Selective Synthesis of Oligosaccharides by Mechanochemical Hydrolysis of Chitin over a Carbon-Based Catalyst", *Angew. Chem. Int. Ed.*, 62, e202214229 (2023).
- 2) H. Kobayashi, Y. Suzuki, T. Sagawa, K. Kuroki, J. Hasegawa, A. Fukuoka, "Impact of tensile and compressive forces on the hydrolysis of cellulose and chitin", *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 23, 15908-15916 (2021).
- 3) L. Li, N.H.M.D. Dostagir, A. Shrotri, A. Fukuoka, H. Kobayashi, "Partial Oxidation of Methane to Syngas via Formate Intermediate Found for a Ruthenium–Rhenium Bimetallic Catalyst", *ACS Catal.*, 11, 3782-3789 (2021).
- 4) Y. Hou, S. Nagamatsu, K. Asakura, A. Fukuoka, H. Kobayashi, "Trace mono-atomically dispersed rhodium on zeolite-supported cobalt catalyst for the efficient methane oxidation", *Commun. Chem.*, 1, 41 (2018).
- 5) H. Kobayashi, M. Yabushita, T. Komanoya, K. Hara, I. Fujita, A. Fukuoka, "High-yielding one-pot synthesis of glucose from cellulose using simple activated carbons and trace hydrochloric acid", *ACS Catal.*, 3, 581-587 (2013).

学生へ一言

触媒は、物質生産・エネルギー生産・環境保全など幅広い分野で無くてはならない物質です。触媒や持続可能な社会の実現に向けた資源有効利用に興味がある方は、ぜひ一緒に研究しましょう。

触媒の研究では、無機化学・有機化学・物理化学・計算化学・分析化学など幅広い知識が役立てられます。また一方で、これまでの知や常識にとらわれないユニークな発想によって優れた触媒系が生まれることも多くあります。そのため、興味はあるけれど触媒のことは勉強したことないから不安だ、という方も、研究室に入ってからトライアル&エラーを繰り返していけば、きっと活躍できます。

研究室のメンバー

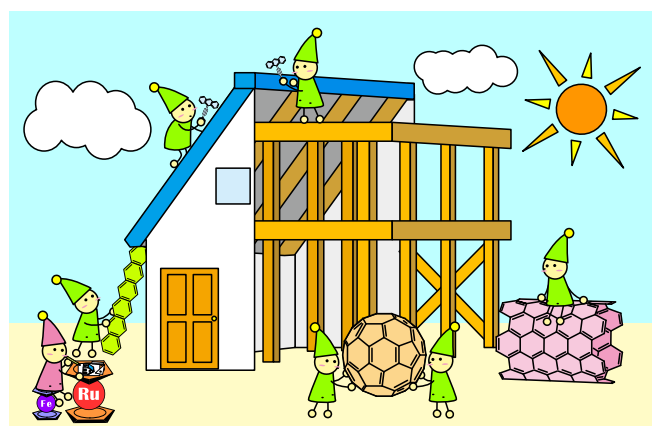
准教授 1 名、学術専門職員 1 名、修士課程 2 名 (2022 年 1 月発足、2024 年 4 月現在)。

分子建築学・機能性触媒化学



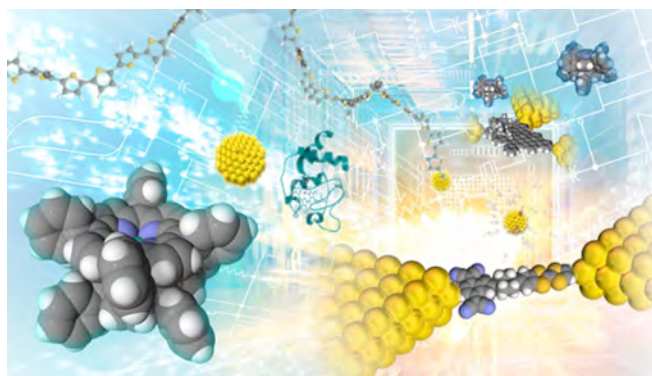
寺尾 潤 教授 Jun Terao, Prof.
 岩井 智弘 講師 Tomohiro Iwai, Lecturer
 正井 宏 助教 Hiroshi Masai, Assist. Prof.
 滝沢 進也 助教 Shinya Takizawa, Assist. Prof.
 増井 洋一 助教 Yoichi Masui, Assist. Prof.

Molecular Architectonics (分子建築学) は、有機分子をあたかも柱や壁、屋根にみたくて建築物のように組み立てる技術を創出する学問で有り、当研究室学生は Molecular Architect (分子建築士) として、Molecular design (分子設計) と Molecular synthesis (分子合成) に参画し、個々の機能性分子をどの位置に、どのように組み合わせるかを緻密に設計し、世界最小の有機建造物・電子素子・触媒の自在な創成を目指します。



分子建築学・分子建築士

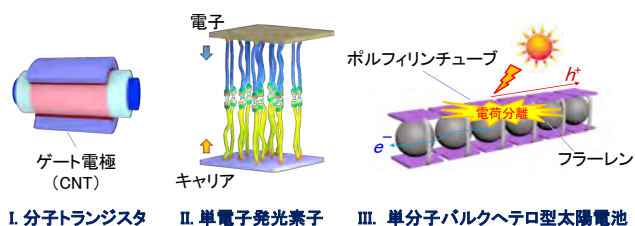
現代の豊かな生活を支えるシリコン半導体を基盤とした電子素子は高集積化による性能向上を続けていますが (Moore の法則), 2020 年代には微細化の限界に達すると予想されています。この現況を踏まえ、Åスケールの機能性分子を基本素子とする分子エレクトロニクスに関する研究が注目されていますが、その実現には、シリコンを中心とした無機物を凌駕する物性を示す分



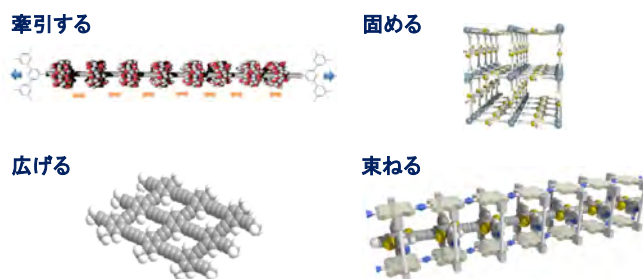
分子建築学による分子エレクトロニクス/触媒の実現

子素子を設計・合成し、これらを集積化するプロセス技術の開発が不可欠です。そこで、寺尾・岩井研究室では有機化学・超分子化学を軸に応用物理・界面化学・理論化学分野と融合させ、斬新な分子建築学手法により極微小機能性分子デバイスの作製を目指します。

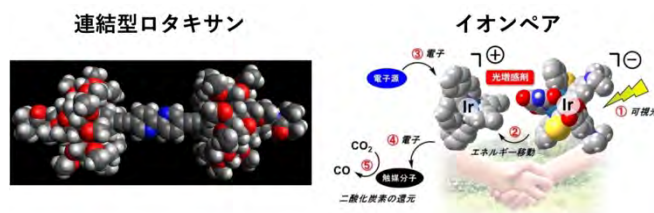
I) 従来のシリコン系デバイスにない入出力挙動を示す“有機分子ならではの化学変換”を利用したナノスケール電子素子のビルドアップ型作製法の開発



II) 共役高分子鎖の牽引・固定化・拡張・集積化による高電荷輸送能を発現する超分子型高分子材料の開発



III) 超分子相互作用を利用した高機能触媒の開発：有機合成化学・人工光合成技術への貢献



<http://park.its.u-tokyo.ac.jp/terao/>

連絡先

教授 寺尾潤 16号館702B号室 TEL: 03-5454-6748

E-mail: cterao@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

講師 岩井智弘 16号館703号室 TEL: 03-5454-6766

E-mail: ciwai@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

主な著書および総説

- 1) "Synthesis and Physical Properties of Three-Dimensionally Insulated Molecular Wires", *Single-Molecule Electronics -An Introduction to Synthesis, Measurement and Theory-*, Springer, 2016.
- 2) "Precision Synthesis of Linear Oligorotaxanes and Polyrotaxanes Achieving Well-Defined Positions and Numbers of Cyclic Components on the Axle", *Chem. Comm.*, **58**, 1644–1660 (2022).

主な原著論文

- 1) "Insulated Conjugated Bimetallopolymer with Sigmoidal Response by Dual Self-controlling System as a Biomimetic Material" *Nature Commun.*, **11**, 408 (2020).
- 2) "Transient Photodegradability of Photostable Gel Induced by Simultaneous Treatment with Acid and UV Light for Phototuning of Optically Functional Materials" *Adv. Funct. Mater.*, **32**, 2205855 (2022).
- 3) "Efficient Electrocatalytic H₂O₂ Evolution Utilizing Electron-conducting Molecular Wires Spatially Separated by Rotaxane Encapsulation" *Appl. Catal. B.* **327**, 122373 (2023).
- 4) "Multistate Structural Switching of [3]Catenanes with Cyclic Porphyrin Dimers by Complexation with Amine Ligands" *Angew. Chem. Int. Ed.*, **62**, e202217002 (2023).
- 5) "Ion Pairing of Cationic and Anionic Ir(III) Photosensitizers for Photocatalytic CO₂ Reduction at Lipid-Membrane Surfaces" *J. Am. Chem. Soc.*, **145**, 15049 (2023).

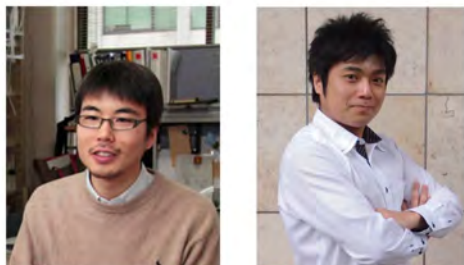
学生へのメッセージ

専門分野の異なる5名のスタッフと幅広い有機化学分野の基礎知識と研究を支える専門力の獲得による複眼的な思考能力を共に鍛え上げましょう！実験を通じた自然との対話から知的好奇心の刺激を受け、豊かな想像力を涵養し、科学の本質を捉えられる超一流の研究者を目指しましょう！その実現のため、自らの原動力で広大な科学の世界を駆け巡り、若き溢れる創造力を開花させ日々夢中になれる刺激的な研究を始めませんか？昨年の研究室拡張工事により最新の分析機器が整備され、さらに研究環境が整いました。活気あふれ自由闊達な雰囲気の研究室に集いし分子建築士達（教員：5名、D3：1名、D2：2名、D1：1名、M2：5名、M1：3名、B4：2名）と共に、超高性能の超分子材料・有機電子素子・分子触媒を共に作製しましょう！当研究室は、本学以外に京都大学・千葉大学・お茶の水女子大学・信州大学・横浜国立大学・早稲田大学・東京理科大学・中央大学・創価大学・日本大学などからも学生を多数受け入れております！興味をお持ちの方はいつでも研究室見学に来て下さい。結構おもしろい研究やってまっせ！！

2023年度メンバー



細胞サイズの分子集合体のダイナミクス・機能創成



(左) 豊田 太郎, Taro Toyota, Ph.D.

(右) 本多 智, Satoshi Honda, Ph.D.

当研究室は、有機化学をベースに、生命科学や物質科学の課題の解決に挑戦する研究室です。有機分子をマイクロメートルサイズやそれ以上まで集合化し、その分子の化学反応をトリガーとして有機分子集合体のダイナミクスを誘導することで、**階層化した時間発展システム**や、**階層化した機能をもつ物質**をつくりあげることに取り組んでいます。

ジャイアントベシクルの形態変化

例えば、細胞は外部環境応答や内部状態の変化から形態を変え、またその形態変化から内部状態を変え、外部と自己の境界を維持しています。このような複雑なダイナミクスの本質を理解するには、細胞内部や膜の成分全てについて、一つ一つの分子のはたらきをつぶさに調査するだけでなく、それら分子を最小限の種類にだけ絞って再構成した有機分子集合体を構築し、その作動原理を解明する構成的研究が重要です。当研究室では、膜の主成分であるリン脂質など両親媒性分子（油にも水にも溶解する分子）のみを用いて、細胞と同程度の大きさをもつ袋状人工細胞膜（これをジャイアントベシクルといいます）を構築し（図1）、「ジャイアントベシクルそ

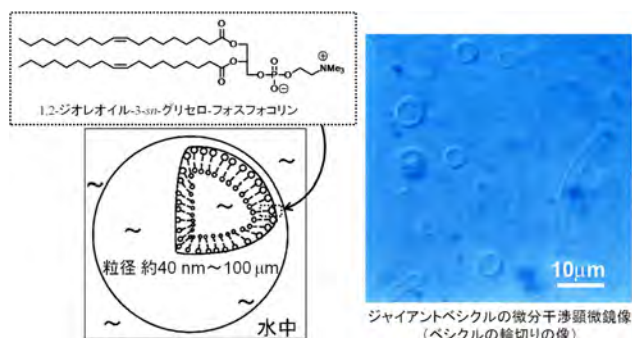


図1 ベシクル構成分子（リン脂質）とジャイアントベシクルの光学顕微鏡像。球状だけでなく、赤血球形状やチューブなども形成できる。

http://park.itc.u-tokyo.ac.jp/toyota_lab/

連絡先

准教授 豊田太郎 16号館 604室 5465-7634

cttoyota@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp

助教 本多 智 16号館 603室 5465-7634

c-honda@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp

のものの形態変化がジャイアントベシクルを構成する膜や内部の分子のいかなる状態変化によって作動されるのか」という課題について探究しています。これまで、構成分子の化学反応によってある時刻にだけ発生するジャイアントベシクル、外部から構成分子前駆体を取り込み内部で分子変換することで増殖するジャイアントベシクルが見出されました。現在、**高分子をジャイアントベシクルの内部に閉じ込めた人工細胞**を構築し、人工細胞の内部や構成分子の状態変化と人工細胞そのものの形態変化、また人工細胞集団の動きといったダイナミックな相互作用について、光学顕微鏡、細胞流れ分析装置（フローサイトメーター）、マイクロ流体デバイスを用いて研究しています。

油滴の遊走現象

水中のマイクロメートルサイズの油滴に、両親媒性分子である界面活性剤（例えば洗剤）を加えると、油滴は界面活性剤の乳化作用によってたちまち水に溶解します。しかし、化学反応する界面活性剤や油滴分子を用いると、界面活性剤添加時に油滴は溶解せずに、化学反応の進行に伴って水中を遊走するという現象が最近見つかりました（図2）。興味深いこ

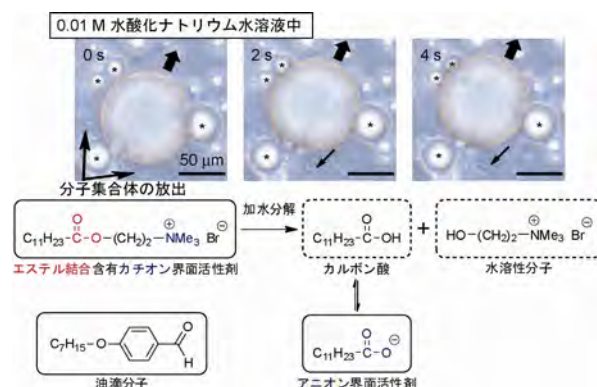


図2 反応活性な両親媒性分子の水溶液中で遊走する、粒子径50 μmの油滴の光学顕微鏡像。

とにその油滴の内部では対流が誘起されており、その内部対流の合一や離散が油滴そのものの運動方向と連動していることが判明しましたが、そのメカニズムはまだ解明されていません。そこで当研究室では、新規の両親媒性分子や油分子の設計・合成と、それら分子がみせる油滴の遊走現象の計測を両輪として、**両親媒性分子や油分子の化学反応、油滴内部の対流、油滴の遊走、油滴の群れの動きというダイナミクスの階層をつなげて**理解することを目指しています。また、この現象を利用してマイクロリアクターの開発を同時に進めています。

高分子のデザインから生体高分子の機能多様性考える

生命らしさの特徴の一つとして、環境からの影響を時間軸に沿って内部へ溜め込み、内部状態の変化や書き換えにより、

自身の環境応答を変化させる機能が挙げられます。この機能は主にタンパク質のはたらきで実現されています。一方で、高分子は、**主鎖や側鎖の分子構造、分子量、形状によって、刺激への応答も機能も制御**することができます。そこで、有機分子・高分子の分子集合体が、マイクロメートルサイズ（細胞サイズ）からセンチメートルサイズ（細胞集団サイズ）であるときの物性の柔軟性や可塑性に着目し、研究を展開しています。

以上のように、細胞サイズの空間構造でみられる**生命の“柔らかさ”や“しなやかさ”**を、**有機分子・高分子が集合化して初めてあらわれる動的システム**としてとらえ、これを人工的にモデル構築し作動原理を解明することで、生命科学や物質科学の発展に貢献したいと私たちは考えています

主な著書

- 1) Topological Polymer Chemistry (Springer Nature, 2022) 分担執筆: 本多
- 2) 分子ロボティクス概論 (CBI 学会出版, 2019) 分担執筆: 豊田, 本多
- 3) Self-organized Motion: Physicochemical Design based on Nonlinear Dynamics (RSC Publishing, 2018) 分担執筆: 豊田
- 4) 環状高分子の合成と機能発現 (シーエムシー出版, 2018) 分担執筆: 本多

主な原著論文

- 1) Photocleavable Regenerative Network Materials with Exceptional and Repeatable Viscoelastic Manipulability, *Advanced Science*, **8**, 2101143 (2021).
- 2) Hydrodynamic accumulation of small molecules and ions into cell-sized liposomes against a concentration gradient, *Communications Chemistry*, **3**, 32 (2020).
- 3) DNA Length-dependent Division of a Giant Vesicle-based Model Protocell, *Scientific Reports*, **9**, 6916 (2019)
- 4) Photo-triggered solvent-free metamorphosis of polymeric materials, *Nature Communications*, **8**, 502 (2017).

学生へ一言

当研究室では、研究テーマの多くが国内外の研究者との共同研究で進められています。研究活動は、将来的に社会の“元氣”の源となる成果を生み出すものです。よって、研究をやっている人どうし（先生も学生も）が密に連携し励まし合って、その中で各人がオンリーワンを目指すことが重要だ、というのが研究室主宰者（豊田）のモットーです。その工夫の一つとして、豊田を含めたメンバーには固有の机がありません（カフェラウンジスタイル）。まずは自分のバックグラウンドとなる基礎を研究室内でじっくり学び、異なるバックグラウンドの人たちとのディスカッションを通じて自分の研究テーマをより深め、研究活動を安全に継続して楽しんで欲しいと願っています。“責任ある自主性”をベースに、アットホームで明るい研究室づくりに努め、また、学内外の他の研究室とも日頃から頻りに交流しています。

化学の中でも有機化学や高分子化学が好きだという方、また、物性化学やソフトマター、生物物理学、生命起源などの研究に興味のある方は是非一度、当研究室をたずねてください。



ウッドワード・ジョナサン教授

抱えている生き物は、ウミガメ。ウミガメも、地磁気の方向を感じて移動することが知られています。

ウッドワード研究室は、電子スピン状態が化学反応に及ぼす影響に関心を持っています。特に、スピン相関ラジカル対とよばれる電子スピン選択的な反応性をもつ反応中間体を、光化学、分光学、化学反応速度論、磁気共鳴など広範囲の物理化学的視点から研究を行っています。スピン相関ラジカル対は、2つのラジカルで形成されるため、生体内に数多く存在するラジカルもスピン相関ラジカル対を形成します。さらに、電子スピン状態は外部磁場と相互作用して変化するため、スピン相関ラジカル対の反応性は磁場の影響を受けます。それ故、生命現象を量子力学で理

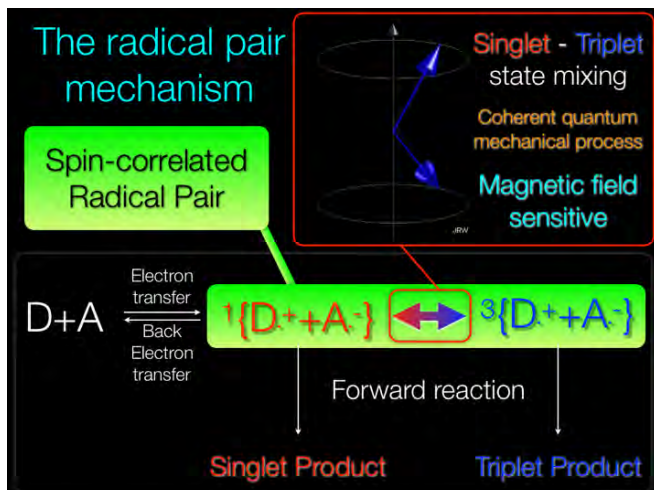


図1 ラジカルペアメカニズムの模式図

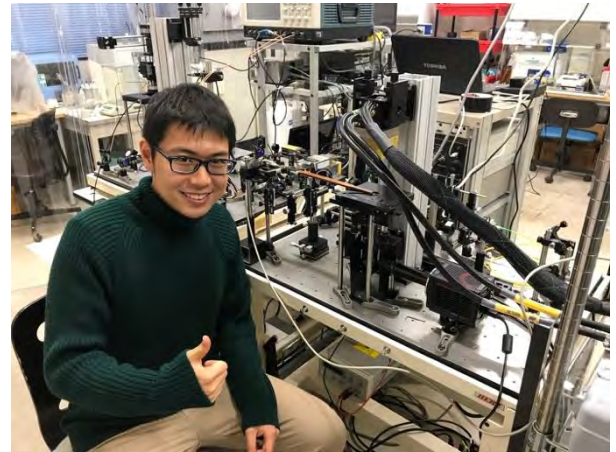


図2 新しい顕微鏡の設計

解する量子生物学の代名詞である、動物の磁気受容メカニズムの有力な仮説となっています。私たちはスピン相関ラジカル対化学の理論および実験のあらゆる側面に興味を持っています。私たちの研究室では、化学的および生物学的な系でスピン相関ラジカル対を研究するための新しい実験ツールの設計に携わっています。

スピン相関ラジカル対

2つの自由ラジカルが遭遇するとき、それらは活性化せずに反応すると考えるのが一般的です。しかし、実際には、パウリの原理により、2つのラジカルの全スピン状態が一重項である場合、ラジカルは反応することができます(たとえば、再結合または電子移動(図1参照))。典型的には、このラジカル対の組換え反応は予想よりも4倍遅く起こります。しかしながら、一重項と三重項スピン状態との間の混合は、非常に弱い磁場にさえも敏感なコヒーレント量子力学的プロセスである。これは、ラジカル対反応の速度および収率が、磁場を印加することによって、あるいはより高度な方法で、例えば高周波パルスを使用して電子スピンを操作することによって制御され得ることを意味します。

連絡先 <http://opes.c.u-tokyo.ac.jp/spinchem/>
教授 J. R. Woodward 駒場国際教育研究棟 201B
woodward@global.c.u-tokyo.ac.jp

動物の磁気受容

現在、行動生物学の研究により、渡り鳥、カメ、蝶など多くの動物が地磁気の方向を感じて移動していることが知られている。しかし、なぜ地磁気程の弱い磁場を感じる事が出来るのか、そのメカニズムは未だ謎のままです。スピン相関ラジカル対の磁気感受性は、動物の磁気感受の役割を担うものとして最も可能性が高いと考えられています。スピン相関ラジカル対を形成し、動物の磁気感受センサーとして働くタン

パク質として、動植物の概日リズムに関係しているクリプトクロムが最有力候補分子となっています。さらに、最近の研究では、人間もまた地球の磁場を感知することができるかもしれないという証拠が示唆されています。

ウッドワード研究室では、細胞内でマイクロから1分子レベルでスピン相関ラジカル対の磁場感受性を研究するための新しい顕微分光法を開発し、古くから議論されている動物の磁気受容メカニズムの解明に取り組んで

主な原著論文

- 1) 'Triplet Born Radical Pairs and the Low Field Effect', J. R. Woodward, *Appl. Magn. Reson.* 54, 47–58 (2023).
- 2) 'Cellular autofluorescence is magnetic field sensitive', N. Ikeya and J. R. Woodward, *PNAS*, 118 (3), e2018043118; DOI: 10.1073/pnas.2018043118 (2021).
- 3) 'Observation of the Δg mechanism resulting from the ultrafast spin dynamics that follow the photolysis of coenzyme B₁₂', J. A. Hughes, S. J. O. Hardman, N.S.S. Scrutton, D. M. Graham, J. R. Woodward and A.R. Jones, *J. Chem. Phys.* 151, 201102; DOI: 10.1063/1.5127258 (2019).
- 4) 'Photochemical Spin Dynamics of the Vitamin B12 Derivative, Methylcobalamin', V. Lukinović, J. R. Woodward, T. C. Marrafa, M. Shanmugam, D. J. Heyes, S. J. O. Hardman, N. S. Scrutton, S. Hay, A. J. Fielding, and A. R. Jones. *J. Phys. Chem. B*, DOI: 10.1021/acs.jpcc.9b01969 (2019).
- 5) 'Single-molecule spectroscopy of radical pairs, a theoretical treatment and experimental considerations' N. Ikeya, E. A. Nasibulov, K. L. Ivanov, K. Maeda, J. R. Woodward, *Mol. Phys.* DOI: 10.1080/00268976.2018.1559954 (2018).
- 6) 'Photoinduced flavin-tryptophan electron transfer across vesicle membranes generates magnetic field sensitive radical pairs', L. M. Antill, S. Takizawa, S. Murata & J. R. Woodward *Mol. Phys.* DOI: 10.1080/00268976.2018.1524525 (2018).
- 7) 'Flavin Adenine Dinucleotide Photochemistry Is Magnetic Field Sensitive at Physiological pH', L. M. Antill and J. R. Woodward, *J. Phys. Chem. Lett.* 9, 2691–2696 (2018).
- 8) 'Time-resolved optical absorption microspectroscopy of magnetic field sensitive flavin photochemistry', L. M. Antill, J. P. Beardmore and J. R. Woodward, *Rev. Sci. Instrum.*, 89(2), 023707 (2018).
- 9) 'Electron-Proton Decoupling in Excited State Hydrogen Atom Transfer in the Gas Phase', M. Miyazaki, R. Ohara, S. Ishiuchi, K. Daigoku, K. Hashimoto, J. R. Woodward, C. Dedonder, C. Jouviet *M. Fujii, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 54, 15089–15093 (2015).
- 10) 'Optical Absorption and Magnetic Field Effect Based Imaging of Transient Radicals', J. P. Beardmore, L. M. Antill J. R. Woodward, *Angew. Chem. Int. Ed.* 54, 8494–8497 (2015).

学生へ一言

ウッドワード研究室は、国内外の学生を歓迎しています。研究室では、主に英語で会話を行います。私たちの研究室に参加するために英会話が得意である必要はありません。初めは、日本語と英語を混ぜて会話をする事もします。研究室のメンバーと議論や日常会話をしてうちに、卒業する頃には英語での会話に自信を持つてると思っています。

研究室のメンバー

Noboru Ikeya (特別研究員), Tito Akindele (共同研究者), Ujjwala Thakar (M2), Shogo Ono (M1), Yan Tang (B4)
@2024年4月

