

# 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

**Aグループ(科学史・科学哲学)**

石原 孝二	研究室 (現象学、精神医学の哲学、当事者研究)	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	701A
橋本 毅彦	研究室 (近現代における科学と技術の歴史)	14号館	303
廣野 喜幸	研究室 (命をめぐる歴史・社会・倫理・リスク・コミュニケーション)	14号館	307B
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

**Bグループ(素粒子・原子核理論)**

大川 祐司	研究室 (超弦理論の非摂動的定式化に向けて)	16号館	321A
加藤 光裕	研究室 (素粒子論・超弦理論・場の量子論)	16号館	322A
菊川 芳夫	研究室 (素粒子論・場の量子論(格子ゲージ理論))	16号館	325A

**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	430A
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
金子 邦彦	研究室 (理論生物物理、複雑系、カオス、非平衡現象)	16号館	808B
国場 敦夫	研究室 (可積分系、数理物理)	16号館	302A
清水 明	研究室 (物性基礎論・量子物理学)	16号館	223A
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**

前田 京剛	研究室 (量子凝縮の物理学:実験)	16号館	602A
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 (トポロジー・磁性・スピントロニクス)	16号館	622
深津 晋	研究室 (応用量子物理学)	16号館	507A

**●量子光学・量子エレクトロニクス**

久我 隆弘	研究室 (量子エレクトロニクス・量子光学)	16号館	223B
鳥井 寿夫	研究室 (原子物理学・レーザー冷却実験)	16号館	224A
野口 篤史	研究室 (イオン・超伝導・電子ハイブリッド量子系)	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 (生命現象とソフトマターの物理学)	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	

**D2グループ(分子科学・物質科学)****●分子分光・反応動力学**

横川 大輔	研究室 (電子状態理論・溶媒和理論)	16号館	729A
真船 文隆	研究室 (化学反応学・物理化学)	16号館	425A
長谷川 宗良	研究室 (高強度レーザー科学・分子分光科学)	16号館	509B
奥野 将成	研究室 (分子分光・構造化学)	16号館	407

羽馬 哲也	研究室 (物理科学・天文学・地球惑星科学)	アドバンスト・リサーチ・ラボラトリー	406
-------	-----------------------	--------------------	-----

**●無機物質化学**

平岡 秀一	研究室 (自己集合・新たな分子デザインと秩序形成の機構)	15号館	203A
内田 さやか	研究室 (機能性固体の化学)	16号館	501B

**●有機物質化学**

村田 滋	研究室 (有機光化学・有機反応化学)	16号館	501A
寺尾 潤	研究室 (分子建築学・機能性触媒化学)	16号館	702B
豊田 太郎	研究室 (細胞サイズの分子集合体のダイナミクス・機能創成)	16号館	604

**●兼任教員(GPESより)**

ウッドワード ジョナサン	研究室 (スピン化学・光化学・量子生物学)	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。

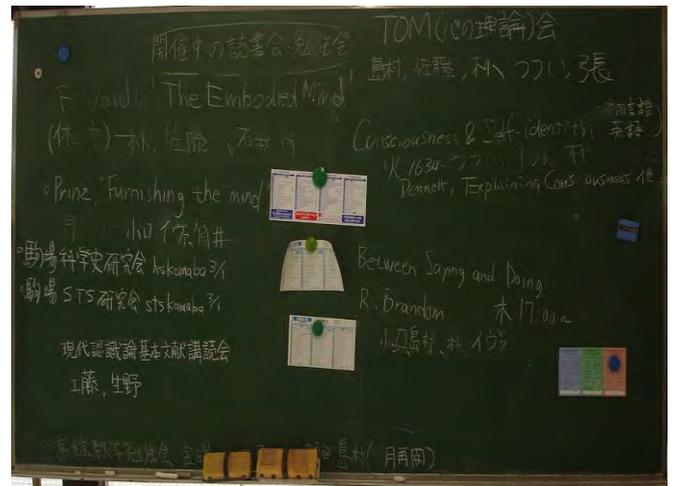
#### スタッフの概要など

本研究室の専任スタッフは7名です。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: 現在は不定期。(水は原則 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。」

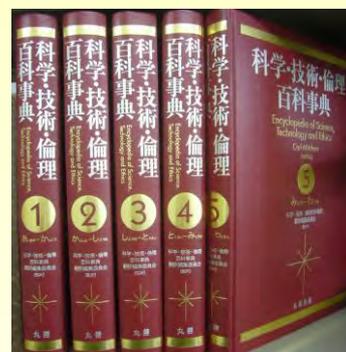
「科学史・科学哲学研究室に在籍する学生の専門分野は科学史、科学哲学、科学技術社会論などですが、各自が関心を持つテーマは様々です。自由度が高く、また関連分野について知るのにもよい環境ではないかと思えます。院での研究生活では、一人でじっくりと文献を読むことも重要ですが、議論を通して思考を深めることもとても有意義です。研究会・検討会などでの仲間との議論は、これまでの自分の研究に大きく役立ったと感じています。」

「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

## 現象学、精神医学の哲学、当事者研究



石原孝二 教授

石原孝二 教授 Kohji Ishihara, Prof.

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

大学院博士課程まで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、科学技術哲学、リスク論、脳神経倫理などの研究をへて、最近では、精神医学の哲学と歴史、当事者研究の研究、障害の哲学などを中心に研究を進めている。

### 現象学的な「心の哲学」

最近の哲学的な研究の傾向の一つに、神経科学などの自然科学的な研究の成果を踏まえながら哲学的な考察を進めていくということがある。現象学においても、神経科学や認知科学などとの交流を積極的に推し進めようとする傾向が強くなっている。現象学的方法論の特徴として「一人称的視点」がしばしば強調されるが、そうした捉え方の是非をも検討しながら、脳科学の研究の現状を踏まえた心の哲学に対して現象学の側からどのような寄与が可能なのかを探る。

### 精神医学の哲学

従来から精神病理学と現象学は密接に関係してきたが、近年精神医学の哲学に関する分析哲学系の議論も蓄積されてきている。現象学や分析哲学系の議論を踏まえ、科学哲学的な視点や歴史的な視点、科学技術社会論的な視点での考察も加えながら精神医学の哲学を展開することを試みる。

また診断基準をめぐる議論や当事者研究の動向なども踏まえながら、精神疾患概念を問い直すとともに、精神医学の成果が人々の「心」の捉え方にどのような影響を及ぼしているのか、精神医学と障害当事者や社会との関係はどのようなものであるべきなのかを検討する。

精神医学の哲学に関しては、科研費プロジェクト「精神医学の科学哲学—精神疾患概念の再検討」（2012～2015 年度）の成果として、全3巻のシリーズ「精神医学の哲学」（東京大学出版会、2016 年）を編集・出版した。2016 年度からは哲学・精神医学・臨床心理学・社会学・人類学など様々な分野の研究者が参加するプロジェクト「精神医学の社会的基盤：対話的アプローチの精神医学への影響と意義に関する学際的研究」（2016～2018 年度）を行った。精神医学における対話的アプローチ対話的アプローチの例としては、フィンランドのオープンダイアログとイタリアのトリエステモデル、英国のリカバリーカレッジを挙げることができるが、本研究ではこの3つのアプローチや関連するアプローチの現状と思想的背景の調査を行うとともに、精神医学の従来のアプローチの調査も行いながら、対話的アプローチの意義と影響を評価・検討し、精神医学の社会的基盤を問い直した。2019 年度からは引き続き科研費プロジェクト「対人援助とセラピーにおける対話実践の身体性と社会性：対話空間のオラリティ研究」（2019 年度～）を行っており、オープンダイアログの哲学的・社会的基盤の研究などを進めている。

### 「当事者研究」の研究

近年、障害をもつ当事者による研究、「当事者研究」が注目を集めている。「当事者研究」とは、北海道浦河べつるの家で2001年から始まった研究実践であり、精神障害をもつ当事者が、「自分自身で、ともに」自分たちが抱える問題について研究するものである。当事者研究は、障害に関する新たなとらえ方やコミュニケーションの新たな可能性を示すと同時に、専門知の役割についても再考を迫る。従来の当事者運動や障害学の成果を踏まえながら、当事者研究がもたらす知の性質について、哲学的検討を加えていくとともに、実践的な意義についても考えていきたい。

当事者研究はまた、現象学の考え方に通じるところがある。当事者研究を現象学的な視点から見ていくことにより、当事者研究と現象学の双方を捉え直すことを試みる。

### 障害の哲学

精神医学の哲学や当事者研究の研究を進めつつ、障害(disability)の哲学一般を展開することも試みたい。障害の捉え方は障害者運動やイギリス障害学などによって大きく転換してきたが、哲学的な議論と分析が障害の捉え方に対してどのように寄与し得るのかを探る。

### 連絡先

教授 石原孝二 14号館 707B室 03-5454-6206

[cishi08@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp](mailto:cishi08@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp)

## 最近の論文・書籍

- 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.
- 石原孝二(2020) 精神障害（精神疾患）とは何か. 榊原英輔・田所重記・東畑開人・鈴木貴之編『心の臨床を哲学する』新曜社, pp. 245-261.
- 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) 分ける. 中島隆博・石井剛編『東大駒場現代思想講義』白水社、2019年4月、pp. 108-126.
- 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(2019) 分類は何のためか：診断バイアスと相互作用. 精神科 34(3), 293-297.
- 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(2018) オープンダイアログと当事者—フィンランドの精神保健政策とオープンダイアログ—. 精神科治療学 33(3), 331-335.
- 石原孝二(2017) メンタルヘルスと精神医学における対話的アプローチ. 『心と社会』48(4): 64-68.
- 石原孝二(2017) 当事者研究の哲学的・思想的基盤. 臨床心理学. 増刊第9号「みんなの当事者研究」（熊谷晋一郎編）, 51-55.
- 石原孝二(2017) 認知症と精神障害：精神病理学と生物・心理・社会モデルの哲学. 臨床心理学 17(3), 294-297.
- 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(2015) 早発性認知症から精神分裂病、統合失調症へ：ステイグマの哲学. こころの科学 180: 107-110.
- 石原孝二(2015) 精神病理学と薬物療法. 精神医学の基盤 1: 64-71.
- 石原孝二編（2013）『当事者研究の研究』医学書院.

## 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）
- 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）
- 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）
- 躁状態についての現象学的考察—期待と不安の関係に着目して—（修士論文）
- 認知行動療法の哲学（修士論文）

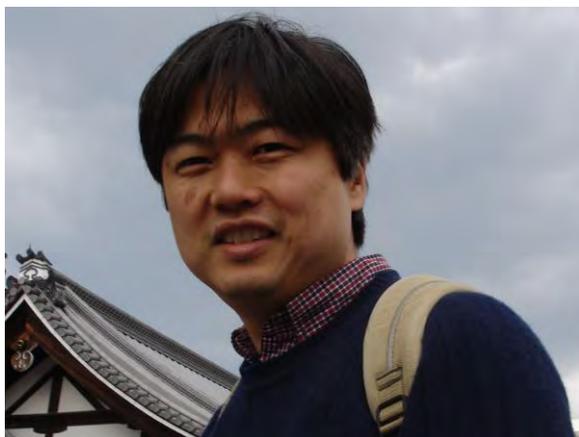
## 研究室メンバーと研究テーマ(2021年度)

博士課程学生7名（休学中を含む）、修士課程学生3名が所属しています。研究テーマは、現象学、現象学的精神病理学、精神医学の哲学、障害の哲学・政治哲学、知覚の哲学、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、作業療法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、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、新型感染症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か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。



レーウ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 5454-6694  
cotakuji@mail.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 准教授

### 鈴木貴之 准教授

Takayuki Suzuki, Assoc. 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、意識の科学的な理解をめぐる哲学的問題、人工知能の哲学や精神医学の哲学など、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的考察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り、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導入することによって、その進展に貢献することができるだろう。

### 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)の諸問題にも取り組んでいる。

### 連絡先

准教授 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)

戸田山和久・唐沢かおり編『＜概念工学＞宣言！—哲学×心理学による知のエンジニアリング』名古屋大学出版会、2019年(共著)

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

「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

「哲学における責任の問題」『法律時報』日本評論社、第90巻第1号、pp.33-38、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

「脳科学と自由意志」『科学哲学』日本科学哲学会、第42-2号、pp.13-28、2009年

「意識のハード・プロブレムと思考可能性論法」『哲学』日本科学哲学会、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

「日常心理学と科学的心理学」『科学基礎論研究』科学基礎論学会、第96号、pp.13-18、

## 学生へ一言

研究を進めるうえでの私の基本方針は、分析哲学的な理論的・概念的考察と経験諸科学の知見を参照することの両方を重視すること、そして、ある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。したがって、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いを抱いている人など、さまざまな人の参加を歓迎します。

## 研究室メンバー

2021年4月現在のメンバーは博士課程の学生6名です。大学院生の研究テーマは心の哲学や倫理学などです。

### 近現代における科学と技術の歴史



橋本毅彦教授

橋本毅彦 教授 Takehiko Hashimoto, Prof.

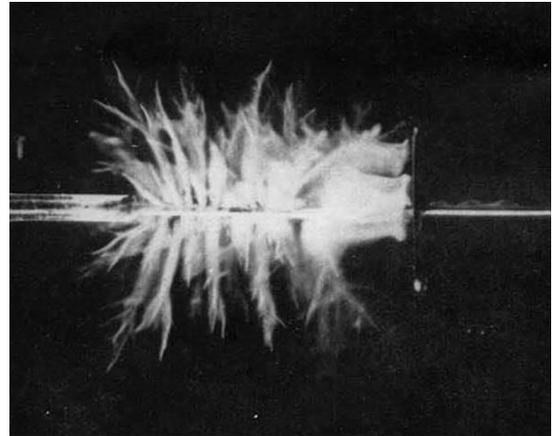
近代以降の科学と技術の発展と社会との関係を研究している。

#### 物理学の発展とその技術への応用について

19世紀以降、物理学はさまざまな技術に応用され、社会の中に多種多様な製品を生み出してきた。また技術に応用されることで、科学の研究対象も自然そのものだけでなく、人工物が生み出す現象の分析に研究関心が集まるようになってきている。その一事例として、飛行機の登場と空気力学の発展をとりあげられるが、2012年にそのテーマで本を出版した。

#### 科学・技術の発展と図像の制作と利用について

近代以降の科学においては図像が多く制作され利用されてきた。顕微鏡で観察した小さな生物の姿、望遠鏡で観察した天体の模様。さまざまな実験装置によって明らかにされた物理現象。あるいはそのような観測道具を使わずに、自然界の動植物や鉱物、地層構造、気象現象などが丹念に観察されて図像が描かれる。近年、このような科学、また技術や医学の活動における図像の制作と利用に関する歴史的研究が盛んに進められている。それらの内外の歴史研究を総括的にサーベイするとともに、いくつかのテーマに関してオリジナルな研究を進めることを計画しているところである。



(上図：雪の結晶の研究で有名な中谷宇吉郎が、それ以前に観測研究したスパークの写真。霧箱を利用している。)

#### 科学技術における安全基準制定の歴史

新しい技術が発明され、世の中に新しい製品が登場すると、その製品を安定かつ安全に作動させるために、さまざまな基準や規格が必要となる。たとえば飛行機が誕生すると、飛行機が安全に飛行するための耐航基準、強度規格等が制定されることになる。さらに飛行士の資格、飛行場の設計などについても標準化が必要とされてくる。新しい技術システムが出現し、それが安定・安全に運行するためのさまざまな基準が定められ、それらがまた技術の発展とともに改訂されていくことになる。あるいは環境問題などにおいては、環境基準が制定されるだけでなく、公害病の患者を認定する必要性が生じたが、認定制度の基礎にはさまざまな基準や規格の設定が必要とされる。他に、船舶、治水、耐震建築、防火設備、原子力発電などの事例をめぐり、基準制定の歴史的経緯に関して共同研究を進めてきたところである。技術史、医学史の研究者とともに、保険の歴史の研究者や技術者の方々にも参加してもらい研究を進め、研究成果として『安全基準はどのようにできてきたか』を出版した。

#### 連絡先

教授 橋本毅彦 14号館 303号室 5465-8840  
t-hashimoto@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

## 科学技術史の研究テーマ

科学技術の歴史の研究には多くの研究テーマが可能である。科学史の研究においても、理論の発展ばかりでなく、実験装置に焦点を当て、その開発と研究上の意義を検討するテーマもある。あるいは科学研究とそれを支える制度的基盤や思想的背景との関係を探ることもできよう。技術史においても、

製品の標準化や安全基準の設定などの経緯に着目し、そこに科学技術の論理ばかりでなく、多様な社会的要因が配慮されていることを見いだすこともできよう。科学と技術の発展とともに、それを生みだし、支えていく制度や社会の諸活動との関係にも目を向け、それら歴史的に分析していくことが本研究室でなされている研究の共通の問題関心である。

### 修士論文・博士論文の題目

中国唐代の暦法における五星論について—大衍暦の補正計算法をめぐって—  
和算書『拾機算法』の研究

### 主な著書

- 1) 『安全基準はどのようにできてきたか』(編著)(東京大学出版会、2017年)
- 2) 『図説科学史入門』(筑摩新書、2016年)
- 3) 『「ものづくり」の科学史』(講談社学術文庫、2013年)
- 4) 『飛行機の誕生と空気力学の形成—国家的研究開発体制の起源をもとめて』(東京大学出版会、2012)
- 5) 『〈科学の発想〉をたずねて—自然哲学から現代科学まで』左右社、2010年

### 主な原著論文

- 1) 「18世紀における顕微鏡観察研究をめぐって : Ratcliffと Schickore の研究を参考に」、『化学史研究』第45巻、2018年、179–193 ページ。
- 2) “The Construction of the System of Aeronautical Standards for Safe Air Navigation before World War II,” *Historia Scientiarum*, vol. 27, no. 1 (2017), 4-24.
- 3) “Translating and Annotating Edison’s Biography in Meiji Japan,” *Historia Scientiarum*, vol. 26. no. 3 (2017), 192-209.
- 4) 「科学の発展における連続性と不連続性」、柿原泰他編『村上陽一郎の科学論』(新曜社、2016年)、93-104 ページ。
- 5) “Observing Cracks, Sparks, and Snow Crystals: Torahiko Terada and His Students’ Pursuit for the ‘Physics of Form’,” *Historia Scientiarum*, 23 (2013-14): 214-240.

### 学生へ一言

科学史・技術史に関してユニークな視点からの研究、意欲的な研究を期待しています。

### 研究室のメンバー

武正泰史 (近世日本数学史)  
渡邊香里 (近代天文学史)

関山碧 (科学哲学・科学史)  
志村黛亞 (中国科学史)

## 命をめぐる歴史・社会・倫理・リスク・コミュニケーション



廣野喜幸教授

廣野喜幸 教授 Yoshiyuki Hirono, Prof.

代理母は倫理に悖るかどうか。未来世代のために自然保護すべきか、今現に生きている人の利益を優先すべきか。映像配信のコピーの利便性と著作権のかねあいはどこに求めるべきか。技術者は想定外・常識外れの使用法による事故まで想定して製品を開発しなければならないのか。そして、企業はそうした使用法による事故に対してまで責任をとらなければならないのか。クローン人間作成だけでなく、クローン関係の研究自体も法的に規制すべきか。

これらは、それぞれ生命倫理・環境倫理・情報倫理・工学倫理・ビジネス倫理・科学倫理の研究テーマの一端である。正義とはいったいいかなるものかといったテーマを考究する伝統的な倫理学に対して、具体的な諸問題に対する現実的解答を与えようとするこうした諸学問は応用倫理学・実践倫理学と呼ばれ、1970年代以降盛んになってきた。これら応用倫理学が扱うテーマは、科学技術によって生み出された場合が多々ある。つまり、応用倫理学のテーマの多くは広い意味での科学技術倫理学なのである。そこでは、科学技術の進展を社会がどうコントロールするかが重要な課題となってくる。そうした課題に応えるためには、科学技術と社会の関係を適切に解明しておかなければならない。

こうした問題意識から、私たちの研究室では、生命に関する科学・知的営みを対象に、歴史学的・哲学的・倫理的・社会学的・リスク論的・コミュニケーション論アプローチを総動員して、医学・生命科学の現状と社会の関係を明らかにし、あるいは過去の医学・生命科学のあり方を詳らかにし、現在に至るまでの歴史的経緯を究明する中で、よりよきあり方のビジョンを提起するための模索をつづけている。

### 各自の問題意識を育てる

科学とは、その名が示す通り、常に「分科しつづける学問」であり、ときにタコソボ化の弊害に陥る。そのような科学や技術のあり方を検討する知的営みが同種の罠に陥らないためにも、研究室全体としては総合的なアプローチを心掛けている。だが、院生時代にあまりに手を広げすぎると收拾がつかなくなるおそれがある。そのため、各人はそれぞれの問題意識・興味関心に応じてテーマを設定し、最も適切なアプローチの研鑽を積むことになる。それゆえ、本研究室ではさまざまなテーマについて、種々のアプローチで研究が進められている；進化学に焦点を合わせ、科学と宗教の関係を探求する者、ダーウィンの進化思想を新たな視座から捉え直す者、生命思想における数量化の権力性の解明をはかる者、フランスにおける科学思想を探求する者などなど。廣野は、(1) 博物学・自然誌の科学史・科学哲学、(2) 情報科学史・情報論、(3) 科学コミュニケーションの哲学、(4) リスクの許容基準論（特に水銀リスクの国際比較）、(5) フーコーやアガンベンが生権力論、そしてネグリ&ハート、あるいはラジャンの経済的生権力論・生一資本主義論の研究に取り組んでいる。



人体実験を告発したビーチャー教授の論文「倫理と臨床研究」。バイオエシックスが生まれる一つの契機となった。私たちの研究室も、こうした画期となる研究を目指している。

[http://hps.c.u-tokyo.ac.jp/staff/\\_data/hirono\\_yoshiyuki/index.php](http://hps.c.u-tokyo.ac.jp/staff/_data/hirono_yoshiyuki/index.php)

連絡先

教授 廣野 喜幸 14号館 307B号室

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

## 修士論文・博士論文の題目

### 修士論文

- 1) クライシス・コミュニケーションにおける規範モデルの探究 —コミュニティ活用モデルの可能性—
- 2) シモーヌ・ヴェイユの科学思想 —「類比」概念に着目して—
- 3) 新たなく人間の尊厳>概念の基礎付け ——能力主義的な人間観の克服を目指して—

### 博士論文

- 1) 湯の沢部落と日本のハンセン病政策 —自由療養地研究と医学の進展を中心として—
- 2) イブン・スィーターの中期作品における生命思想

## 主な著書

- 1) 廣野喜幸 (2013) 『サイエンティフィック・リテラシー：科学技術リスクを考える』丸善。
- 2) 藤垣裕子・廣野喜幸編著 (2008) 『科学コミュニケーション論』東京大学出版会。
- 3) 廣野喜幸・市野川容孝・林真理編著 (2002) 『生命科学の近現代史』勁草書房。

## 主な原著論文

- 1) 廣野喜幸 (2021) 「科学者の社会的責任—専門知の失敗と責任システム」、金子務・酒井邦嘉[監修]・日本科学協会[編]『科学と倫理—AI 時代に関わる探究と責任』中央公論新社、53-74 頁。
- 2) 廣野喜幸 (2020) 「生命倫理」、藤垣裕子[編]『科学技術社会論の挑戦 2——科学技術と社会』東京大学出版会、190-210 頁。
- 3) 廣野喜幸 (2019) 「人体の商品化と生権力」、『科学技術社会論研究』17:18-36 頁。
- 4) Hirono, Yoshiyuki (2015) AIDS Patients Due to Transfusion of HIV Infected, Non-heat-treated Blood Products. In: Fujigaki, Yuko (ed.) *Lessons From Fukushima: Japanese Case Studies on Science, Technology and Society*, pp. 195-218.
- 5) NAKAO Gyo (2021) The Lotus Sutra and Evolution: Hayata Bunzo's Theory of Life, *Historia Scientiarum*, 30(2):91-112.
- 6) 齊藤万丈 (2020) ダーウィンにおける変異と種の比較の問題：「エッセイ」(1844)」と『種の起源』(1859)『生物学史研究』100:31-52。
- 7) 古俣めぐみ (2017) 「日本における「脳死=人の死」規定とその根拠」、『哲学・科学史論叢書』19: 73-95。

## 学生へ一言

廣野研は "3S=Slow Science Studies" をモットーにしています。ゆっくり急いでみませんか。

## 研究室のメンバー

中尾 暁 (D3)	進化思想史。ロツツイと早田文蔵の比較思想。
齋藤 万丈 (D3)	進化思想史。ダーウィンの発生学と進化学の概念史。社会人です。
古俣 めぐみ (D3)	生理学における数量化と生権力論。
天野 美香 (D2)	移動することをめぐる思想分析。社会人です。
鶴田 想人 (D1)	フランス科学思想史、中世医学思想史。
上村 大地 (M2)	物活論の思想史。
奈須野 文槻 (M2)	医学情報システムの比較制度分析。
上嶋 大樹 (M1)	ハンセン病の歴史分析。精神科医。
太田 充胤 (M1)	予防医学論。内科医。
大森 隆暉 (M1)	エピステモロジー&ベルグソン。
宮崎 哲 (M1)	科学コミュニケーション論。

# 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、非古典論理をもちいた形而上学とその形式意味論への応用、言語諸科学において様々な仕方で用いられる意味概念についてのメタ意味論的考察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使っている。名前の使い方がわからなくて困るといったことはそうない。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近年注目を集める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、それらはいまでは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交流する研究領域である。言語学と言語哲学の共同作業の一つの雛形は、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ものである。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を端緒とする。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ベースにしているし、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。また、ヘイトスピーチやジェンダーのなど社会生活と深く関わる主題を扱う応用言語哲学とでも呼ぶべき研究も盛んになっている。

### 意味論と形而上学

意味論、特にモデル論的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な考察、すなわち、自然言語に対するモデル意味論の意味を与える際になにが基礎的な存在者としてモデルに含まれる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、ということも十分可能であろう。

### 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。それは心理学的・生物学的アプローチ（心理言語学、言語認知神経科学、生物言語学など）と数理的アプローチ（形式意味論、自然言語処理など）とに大別できるが、それぞれのアプローチにおいては、方法論的な違いがあるだけでなく、基礎概念の理解においても食い違いが見られる。こうした状況は特に意味に関する研究において顕著であり、研究分野が違えば意味概念も異なるということがしばしばある。こうした意味概念の多様性は、意味についての経験科学の全体像は見えにくくし、異分野間の共同研究の妨げとなっている。これら様々な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答えを提示するというメタ意味論的探求は、これからの言語哲学における重要な課題の一つであろう。

### 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—固有名詞の哲学—』、勁草書房

## 主な原著論文

- 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としつつ、その他の分野にも関心のアンテナをはりながら研究していきましょう。

## 研究室のメンバー

2021年4月現在で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1名、日本学術振興会特別研究員(PD)が2名です。言語哲学、心の哲学、知覚の哲学、論理学の哲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



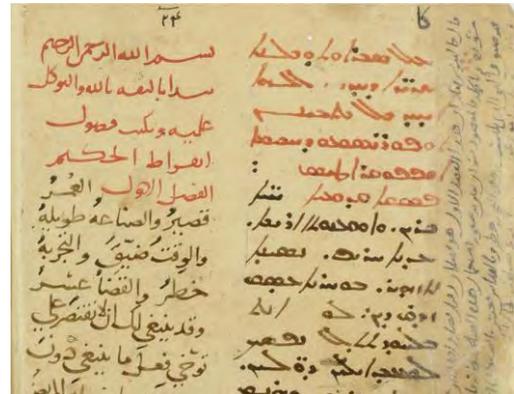
三村太郎 准教授

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, "Ghulāms (Slave Boys) and Scientific Research in the Abbasid Period: The Example of the Amājūr Family", *Historia Scientiarum* 29 (2020), 182-197.
2. 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.
3. 三村太郎「伝統と改良の狭間で—アヴィセンナ以後のギリシャの学問教授の展開」、佐藤直子編『中世における制度と知』知泉書院、2016、3-33.
4. 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.
5. Taro Mimura, "Comparing Interpretative Notes in the Syriac and Arabic Translations of the Hippocratic *Aphorisms*", *Aramaic Studies* 15 (2017), 183-199.
6. 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.
7. Taro Mimura, "A Glimpse of Non-Ptolemaic Astronomy in Early Ḥay'a Work – Planetary models in ps. Mashā'allāh's *Liber de orbe*", *Suḥayl: Journal for the History of the Exact and Natural Sciences in Islamic Civilization* 14 (2015), 89-114.
8. Taro Mimura, "The Arabic Original of (ps.) Māshā'allāh's *Liber de orbe*: its date and authorship", *The British Journal for the History of Science* 48 (2015), 321-352.

## 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

2021年4月現在での研究室のメンバーは、修士課程の学生が1名(ヨーロッパ錬金術史)です。

# Particle and Nuclear Theory

## B グループ: 素粒子・原子核理論

### 素粒子理論

素粒子論は、言うまでもなく、可能な限りの極微のスケールにおける自然界の成り立ちを探求する学問である。現存する加速器による実験で調べることができる長さのスケールは約  $10^{-18}$  cm に達しつつある。そして、このスケールまでの物理は「量子色力学」及び Weinberg-Salam の「電弱統一理論」と呼ばれるゲージ理論によって説明され得ることがほぼ確立されたと考えられている。従って、現在の素粒子論の理論的研究の大勢は、よりミクロなスケールにおける、重力をも含んだ統一理論の構築をめざしているといつてよい。この方向の有力な試みとして、「超弦理論」が盛んに研究されてきている。超弦理論が統一理論として機能するためには、まだ幾多の基本的困難を克服しなければならないことは言うまでもないが、最近の双対性、ブラックホールの解釈、AdS/CFT 対応等に関する目覚ましい進展は、近い将来大きな発展が起こることを予感させるものがある。また、超弦理論の数学的構造は統計多体系の相転移現象と密接に関係しており、その方面の研究とも表裏一体となっている。研究テーマはこうした素粒子理論研究の世界的状況を反映し、超弦理論を中心として量子宇宙論から凝縮系物理までにわたる幅の広いものとなっている

### ●メンバー

スタッフは 大川祐司、加藤光裕、菊川芳夫 (以上教授)、奥田拓也 (助教) の 4 名。大川研究室は独立した研究室運営を行っており、以下では大川研究室以外について記載する。大学院生は、2021 年度、修士課程 3 名、博士課程 6 名の計 9 名が在籍している。研究室ごとの研究指導も行っているが、大学院生は指導教員であるか否かに無関係にどのスタッフからも積極的に助言を受けたり議論をすることを奨励している。参考のために大学院生の進路について簡単にふれておこう。過去約 40 年間に於いて本研究室で大学院を終えて博士号を取得した者のうち 27 名が国内外の大学等の教授、准教授、講師、助教等 (秋田大、茨城大、ヴィットウォーターズランド大、大阪大、大阪市立大、韓国基礎科学研究所、京大、九州大、久留米高専、神戸大、静岡大、島根大、CERN、拓殖大、千葉大、筑波大、東大 2 名、東工大、東北大 3 名、豊田工業大、名古屋大、福井大、理化学研究所 2 名)、5 名が国内外のポスドクを務めて活発に研究を行なっている。その他の人も修士課程だけの修了者を含めて大多数が企業等で活躍中である。



益川敏英教授と素粒子原子核理論グループのメンバー  
2009 年 5 月 9 日の駒場での講演会の後、311 号室にて

### ●研究室の活動

学期中は、国内外の研究者を招き様々な研究テーマについての発表を聞き討論する **セミナー**、及び研究室メンバーが最新の進展を紹介する **文献紹介** が開かれる。これらに加えて、研究室メンバー自身の研究発表とそれに対する討論、共通する課題についての **グループ勉強会** 等が適宜行なわれる。大学院生は、できるだけ早い時期からセミナーや文献紹介等に参加し議論に積極的に加わるように努めることが要求される。また研究室の運営は、大学院生も役割の一部を分担して行っている。

### ●博士論文・修士論文のテーマ

- 1) Entropy of the Janus interface in superconformal field theories
- 2) de Sitter 時空の対称性および解析性を用いた宇宙論的相関関数の解析
- 3) トポロジカル場の量子論とコボルディズム不変量
- 4) 開弦の場の理論の低エネルギー極限でのゲージ不変演算子
- 5) 格子ゲージ理論におけるアノマリー流入機構の再定式化および格子カイラルゲージ理論の構成
- 6) 重力理論と双対な模型としての SYK 模型

## 原子核理論

原子の中心わずか  $10^{-15}$  m スケールの領域を占める原子核は、陽子と中性子が強い相互作用によって凝集した束縛系であり、私たちを構成する原子のほぼ全質量を担っている。原子核物理学は、原子核のスケールから陽子中性子（及びパイ中間子など強い相互作用するハドロン粒子）を構成するクォークとグルーオンのスケールに至る階層の物理現象を、強い相互作用の基礎理論である量子色力学（QCD）とその有効理論をに基づいて統一的に理解することを目指している。強い力の源となるカラー荷を持つクォークとグルーオンは、通常は、ハドロン内に閉じ込められているが、宇宙初期の高温状態あるいは中性子星芯部の超高密度状態などの物理条件では、閉じ込めから解放される。このクォーク・グルーオン自由度が顕在化した状態をクォーク・グルーオンプラズマと呼ぶ。最近では、RHIC と CERN の衝突型加速器を用いた超相対論的原子核衝突実験においてクォーク・グルーオン物質と呼ぶべき状態が実現できたとして研究者の注目を集めている。当研究室では、このような極限条件の QCD 物質を対象に研究を行っている。例えば、カラー閉じ込めとカイラル対称性の実現に関する QCD 相構造、相転移の動的振舞い、超高エネルギー反応に現れるハドロンの普遍的構造、原子核衝突事象初期を理解するための非平衡の場の理論や強いゲージ場による非摂動現象など幅広い課題が含まれる。また、有限密度 QCD の統計力学平均に現れる符号問題について基礎的な研究も対象としている。

### ●メンバー

現在のスタッフは 藤井宏次（助教）である。

駒場原子核理論研究室はこれまでに分野をリードする多くの研究者を輩出して来た。近年においても、東大理学部や KEK、国立および私立大学で教員として活躍している先輩や、北京の研究所に研究室を構える先輩もいる。最近の学位取得者の進路としては、KEK、京大基研、理研や、海外（欧米、中国、韓国など）の研究機関で、学振特別研究員や当該機関の博士研究員として研究を続ける例や、官庁・民間企業に就職する例があり、それぞれの場所で活躍中と聞いている。



奥田拓也助教（素粒子論）



藤井宏次助教（原子核理論）

### ●研究室の活動

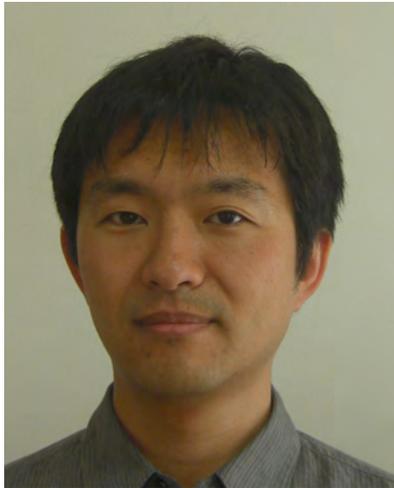
教員は独自にハドロン物理の研究を行っているが、研究テーマによっては素粒子理論研究室のメンバーと議論したり勉強会を持ったりする。また、国内外の研究者との共同研究にも積極的に参加している。例えば、クォーク・グルーオンプラズマ研究に関して Heavy Ion Café という実験家・理論家を交えた関東地区半定期セミナーに加わっている。

### ● 最近の博士論文・修士論文のテーマ

- 1) Chiral random matrix model for the QCD phase diagram
- 2) Quarkonium production in high energy pA collisions
- 3) Quark-hadron phase transition in PNJL model
- 4) Initial stage of heavy ion collisions and strong fields

<http://nt1.c.u-tokyo.ac.jp/>

## 超弦理論の非摂動的定式化に向けて



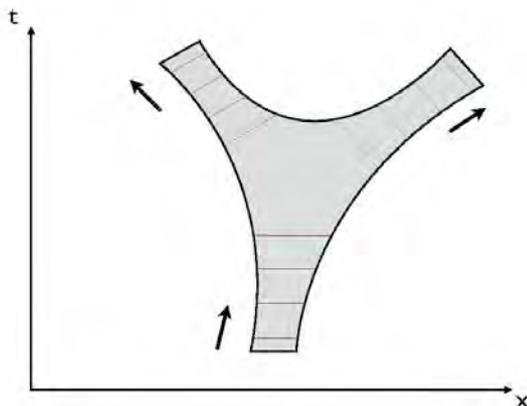
大川祐司教授

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？

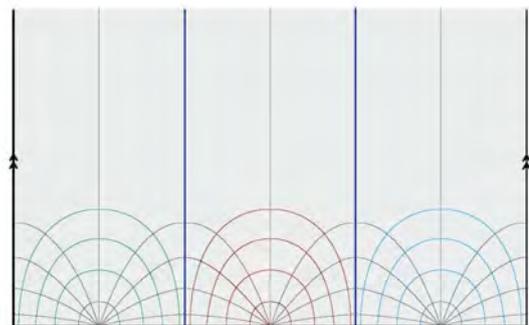
弦理論は、素励起が粒子的ではなく、1次元に広がった弦のようにふるまうと考える理論です。例えば次のファインマン図は、ひとつの弦が2つに分裂する過程を表わしています。



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。

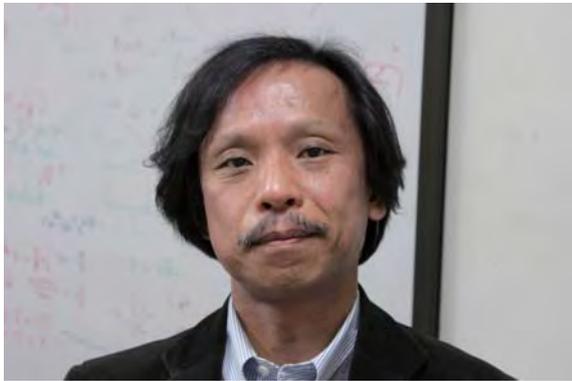
### 主な原著論文

- 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・弦理論・場の理論



加藤光裕教授

加藤光裕 教授 Mitsuhiko Kato, Prof.

### 素粒子標準模型からその先へ

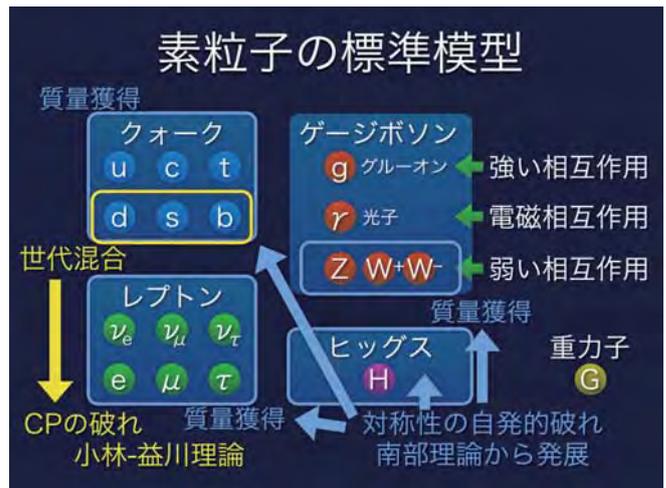
2008年のノーベル物理学賞が、素粒子論の南部陽一郎、小林誠、益川敏英の3氏に与えられたことは記憶に新しい。

現在までのところ、実験で観測される素粒子の現象は、標準模型と呼ばれる理論体系で、大部分が説明できる。その標準模型のいたるところで重要な役割を担っているのが、対称性の自発的破れという機構である。これは、南部氏の1960年頃の研究から発展したものである。

標準模型では、粒子間に力を伝えるのは、ゲージ粒子である。光の量子つまり光子は電磁気力を伝えるゲージ粒子のひとつだ。標準模型では、自然界の4つの力のうち、重力を除く3つの力、つまり、強い力、電磁気力、弱い力の3種類をそれぞれ対応するゲージ粒子を使って説明する。このうち、弱い力を伝えるZやWなどのゲージ粒子は、質量を持つ。同じゲージ粒子でも電磁気力を伝える光子や強い力を伝えるグルーオンは、質量を持たない。この違いも実は、ゲージ対称性の自発的破れという機構によって説明されるのである。このように、対称性の破れは、標準模型に欠く事のできない重要な絡繰りなのである。

標準模型の中で、まだ見つかっていない唯一の粒子はヒッグス粒子である。現在ジュネーブ郊外のCERNという研究所では、全周27kmもある円形の大型ハドロン衝突型加速器(LHC)による実験が進められているが、その目標の一つがヒッグス粒子の発見である。LHCでは、標準模型の検証以外にも、標準模型を超える新しい物理の発見も目指している。標準模型には理論的に不十分な部分もあり、それを解決するためにいくつかの可能性が提案されている。そのひとつは、超対称性である。これはボーズ-アインシュタイン統計に従うボゾンとフェルミ-ディラック統計に従うフェルミオンを入れ替える変換のもとでの対称性であり、現在見つかっている素粒子

のそれぞれに統計性が逆の「相棒粒子」の存在を预言する。また、極めてミクロなスケールでは空間の次元が3次元よりも大きいと仮定する余剰次元模型も提案されている。



### 超弦理論 - 究極の理論へ

前述の超対称性や余剰次元といった特徴を持ち、かつ標準模型を包括する統一理論の候補はいくつか提唱されているが、その中でも超弦理論は、他の点粒子描像にもとづく場の理論の模型とは決定的に違う特徴、つまり重力をも統一するという点で際立っている。そのような性質を持ち、量子論的に無矛盾な理論としては、超弦理論がほぼ唯一の候補である。超弦理論は、粒子を0次元的な点状のものではなく、1次元的な弦状のものとしてとらえる。点粒子の場合は粒子の種類ごとに違った場を導入する必要があったが、弦理論では弦の振動状態の違いであらゆる粒子の種類を表すことができ、その意味で究極の統一理論である。

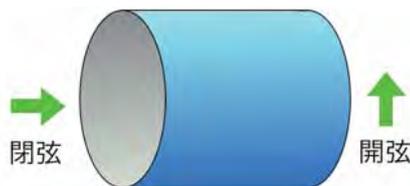
弦には輪ゴムのように端のない「閉じた弦」と、靴紐のように端を持つ「開いた弦」がある。開いた弦からはゲージ粒子が、閉じた弦からは重力子が量子力学的に極めて自然に現れるのである。しかも弦の広がりのために、点粒子の場の理論で現れたような発散がなく、重力の量子論を問題を起こすこと無く記述することに成功しているのだ。このように、超弦理論は素粒子の統一理論を与えると同時に重力の量子論をも与えてくれる、いわばオールマイティの究極の理論と期待されている。

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

### 連絡先

教授 加藤光裕 16号館322A号室  
kato@hep1.c.u-tokyo.ac.jp

弦によって記述されていることから、従来の理論では思いもよらない帰結を得ることもできる。開いた弦が時空内をぐるりと回って元の位置に戻るような図形を考えると、底面の



無い筒状の図形ができる。開いた弦の生成消滅の量子力学的過程を考えるとこのような図形による 1 ループ

散乱振幅を計算する必要がある。一方、同じ図形を底面の方から眺めると、輪になっていることから、閉じた弦が作られて時空を進んだ後消える過程とも関係していることがわかる。そこで、適当な状況を作ってやれば、ゲージ粒子の理論と重力理論あるいは弦理論自身との間に関係を付けることができると予想される。これは、AdS/CFT 対応と呼ばれる予想として詳しく調べられており、それ自体興味深いのみならず、この予想が成り立つと仮定することで様々な応用がなされ、クォーク-グルーオンプラズマの性質やハドロンのスペクトラムなどに対し興味深い結果が得られている。

## 最近の研究テーマ

研究内容は進展状況に応じて変化していくが、最近取り組んでいるテーマを二つほど挙げておこう。

### ■弦の場の理論：

従来の点粒子の理論つまり相対論的量子力学を、摂動論を超えて扱うためには場の理論という定式化が必要であった。従って、弦の理論も非摂動論的な定式化が望ましく、その最も自然なアプローチが弦の場の理論である。通常の場合の理論のように解釈すると無限種類の場を含むようなシステムであり、ゲージ対称性の取扱いなどの理論面やタキオン凝縮などの動力学的側面など研究すべき点は多い。

### ■超対称ゲージ理論の格子定式化：

超対称性を持つゲージ理論は、現象論的な側面のみならずダイナミカルな破れなど、非摂動的に解明すべき点は多い。これに対して QCD など成功してきた格子定式化が有効と考えられるが、困難があり 20 年以上にわたる難問である。これに対して新しい観点から取り組んでいる。

## 修士論文・博士論文の題目

Wilson フェルミオンを用いたカイラル凝縮の計算

Gauge Fixing of Nonpolynomial Open Superstring Field Theory

ブラックホールの熱力学と Kerr/CFT 対応

AdS 時空中の弦理論と超対称ゲージ理論における散乱振幅の隠れた対称性

## 主な著書

- 1) 物理学辞典(執筆委員、2005 年、培風館)
- 2) 現代数理科学事典(分担執筆、2009 年、丸善)

## 主な原著論文

- 1) General linear gauges and amplitudes in open string field theory, *Nucl. Phys.* **B807** (2009) 348.
- 2) Taming the Leibniz rule on the lattice, *JHEP* **0805** (2008) 057.
- 3) Level truncated tachyon potential in various gauges, *JHEP* **0701** (2007) 028.
- 4) New Covariant Gauges in String Field Theory, *Prog. Theor. Phys.* **117** (2007) 569.
- 5) Genuine Symmetry of a Staggered Fermion. *Prog. Theor. Phys.* **114** (2005) 631.

## 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。2015年にはLHCでの実験が再開されるが、その成果にさらなる期待がかかっている。

この研究室では、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SU(5)大統一模型(Georgi-Glashow 模型)は、カイラルゲージ理論の代表例になっている。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  $a$  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。さらに、この枠組みで、カイラルゲージ理論の構成が可能になりつつある。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る(Kadoh-Kikukawa, 2009)。この定式化は、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。

この定式化をさらに拡張して、標準模型や大統一模型を与えるカイラルゲージ理論を構成的に定義し、その力学的性質を明らかにすることを目的として、研究を進めている。

### ヒッグスセクターの構造と電弱相転移

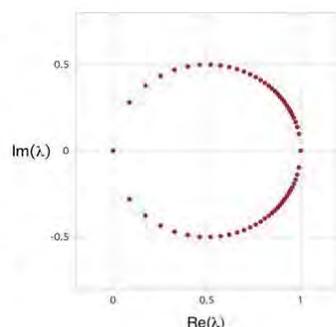
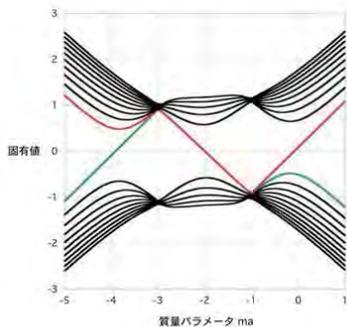
SU(2)xU(1)ゲージ対称性は、宇宙初期の高温状態では回復した状態にあると考えられ、この相転移のダイナミクスはヒッグス機構と密接に関係してくる。特に、一次相転移が起きる場合には、相転移に伴う非平衡過程によってバリオン数非対称性が生成される可能性がある(電弱バリオジェネシス)。このような視点から、電弱相転移の研究を進めている。

<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



#### 格子ゲージ理論における指数定理

図1: トポジカルチャージ  $Q=1$  をもつゲージ場 (インスタントン) を背景場とするエルミート Wilson-Dirac 演算子  $H_w$  の固有値を、質量パラメータ  $ma$  の関数としてプロットしたものの、 $-2 < ma < 0$  のとき、 $H_w$  のスペクトル非対称性  $-1/2 \text{Tr} [H_w/\sqrt{H_w^2}]$  がトポジカルチャージ  $Q$  を正しく再現している。

図2: overlap Dirac 演算子  $D := 1/2a [1 + \gamma_5 H_w/\sqrt{H_w^2}]$  の固有値  $\lambda$  の分布を示す。ゼロ固有値をもつ固有状態 (ゼロモード) が1つ現れている。

overlap Dirac 演算子は Ginsparg-Wilson 関係式  $D\gamma_5 + \gamma_5 D = 2aD\gamma_5 D$  を満たすため、ゼロモードはカイラル演算子  $\gamma_5$  の固有状態になる。そのため指数  $\text{Index}(D) = n_+ - n_-$  ( $n_{\pm}$  は  $\gamma_5$  固有値  $\pm 1$  のゼロモードの数) が定義可能になる。一方、カイラルアノマリーは、 $H_w$  のスペクトル非対称性に等しく、トポジカルチャージに等しい:  $\text{Tr} [\gamma_5(1-aD)] = -1/2 \text{Tr} [H_w/\sqrt{H_w^2}] = Q$ 。両者の間には、 $\text{Index}(D) = \text{Tr} [\gamma_5(1-aD)]$  という関係があり、Index 定理が厳密に成立している。

### 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 M2 の大学院生が 1 名所属しており、格子ゲージ理論や Higgs 機構の物理に関する研究を進めている。他に、助教、ポスドクや大学院生と共同で研究を進めている。テーマは、

- a. 超対称性の自発的破れと Goldstino 低エネルギー定理, その格子ゲージ理論への応用
- b. 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
- c. 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
- d. 符号問題をもつ場の理論の Lefschetz thimble 上での定式化, および, モンテカルロ法の開発
- e. Complex Langevin simulation の有効性の問題

### 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。超弦理論研究のメッカである駒場でも、あえて、場の理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。

# 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、数理統計、量子物理学まで、より具体的には、生命現象、ガラス、複雑系、機械学習、可積分系、磁性、超伝導など幅広いテーマをカバーする理論グループです。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)
金子 邦彦 研究室	(理論生物物理・複雑系・ カオス・非平衡現象)
国場 敦夫 研究室	(可積分系、数理物理)
清水 明 研究室	(量子物理学・物性基礎論)
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3名の助教(簗口友紀, 畠山哲央, 水野英如)がおります。

いわゆる物性理論と呼ばれる分野は非常に広く多彩な、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、基本的で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な傾向がありますが、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ています。さらに、Physical Review Letters や Nature

Physics, 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 仁科記念賞, 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。一般には、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。しかし、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、駒場周辺セミナーや複雑系生命システム研究センター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、専門分野を極めることとともに、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

- 超伝導渦糸格子における磁束フローの理論的解析
- Ginzburg-Landau モデルによる強磁性薄膜上の磁区ドメインパターンの研究
- 一般化されたアンサンブルを用いた平衡統計力学の定式化
- 行列積表現を用いた熱的量子純粋状態の構築
- 非例外型量子群に対する反射方程式の行列積解
- 固体電子系の電磁応答による電子の永久電気双極子能率探索の理論
- テンソルくりこみ群のガラス系への応用
- ジャミング転移点近傍のダイマー粒子系の振動状態
- サイズ乖離の大きい二分散ジャミング系の相転移
- 曲面上の反応拡散系における整流作用と伝播パターン
- 微生物生態系の構造と細胞内代謝系の制御の理論:物理学と経済学からのアプローチ
- 多階層進化モデルによる社会構造の生成

### 博士論文

- Modern Monte Carlo approaches to Classical spin systems: Irreversible algorithm and Massive parallelization applied to Chiral magnets
- Maximum efficiency of heat engines revisited from stochastic thermodynamics
- カイラルらせん磁性体の平衡状態とヒステリシスの理論
- 量子アニーリング:古典的計算困難性への量子統計物理の応用
- XXZ 鎖の 2-down スピンセクターにおける collapse 解と extra two-string 解の厳密な領域についての研究
- Study on emergent multiple quadrupolar phases in two-dimensional spin-1 quantum magnet など

## スタッフにより執筆された教科書

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

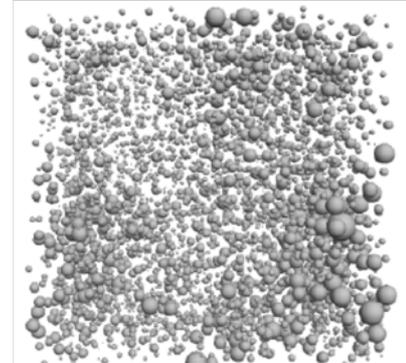


図1 ガラス転移点近傍での分子の運動の様子。球の大きさは分子運動の速さを表す。

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標に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) “Equilibrium phase diagram of a randomly pinned glass-former” Misaki Ozawa, Walter Kob, Atsushi Ikeda, Kunimasa Miyazaki, Proc. Natl. Acad. Sci. USA 112, 6914 (2015).
- 2) “Correlation of Local Order with Particle Mobility in Supercooled Liquids is Highly System Dependent” Glen M. Hocky, Daniele Coslovich, Atsushi Ikeda, David R. Reichman Phys. Rev. Lett. 113, 157801 (2014).
- 3) “Dynamic criticality at the jamming transition” Atsushi Ikeda, Ludovic Berthier, Giulio Biroli J. Chem. Phys. 138, 12A507 (2013).
- 4) “Unified study of glass and jamming rheology in soft particle systems” Atsushi Ikeda, Ludovic Berthier, Peter Sollich Phys. Rev. Lett. 109, 018301 (2012).
- 5) “Glass transition of the monodisperse gaussian core model” Atsushi Ikeda, Kunimasa Miyazaki Phys. Rev. Lett. 106, 015701 (2011).
- 6) “Mode-coupling theory as a mean-field description of the glass transition” Atsushi Ikeda, Kunimasa Miyazaki Phys. Rev. Lett. 104, 255704 (2010).

## 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、ポスドク 2 名、大学院生 6 名

## 生物物理・非線形物理



石原 秀至 准教授

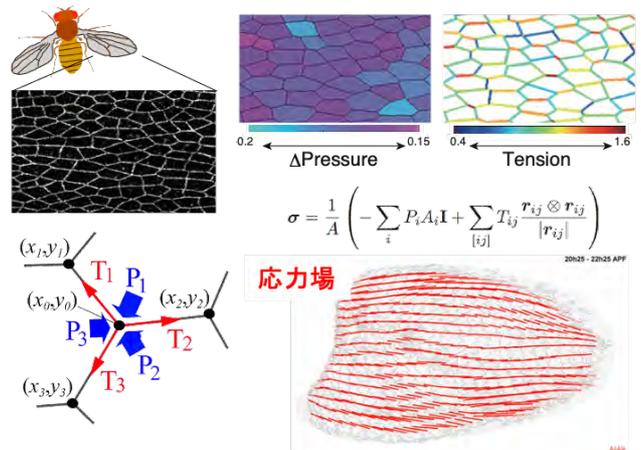
Shuji Ishihara, Assoc. Prof.

物理の言葉で、生命現象を理解できるのでしょうか？そもそも「生きている」とはどのような状態なのでしょうか？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、見えている現象から、逆に新しい物理や数理を抜き出すことも重要だと考えており、数理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、どのように構造を保ち、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、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になってきます。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、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の



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向性が細胞の整列を促すことも示した。

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。例えば個体発生に伴う大規模な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、組織物性(レオロジー)を調べるのが重要となります。細胞集団の機械的特性は、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;論文2,4)。組織の機械物性を理解するためには、力とともに変形(キネマティクス)を理解する必要がありますが、細胞増殖や細胞形態変化、細胞の相対位置の変化が複雑に絡み合った組織の複雑な変形過程を特徴付けることは容易ではありませんが、この問題に対しても幾何学的な分解に基づいた変形の定量化解析手法を開発し、その上で、力と変形の間関係を明らかにすべく、ソフトマターの理論を参照して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/数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 430A

[csishihara@g.ecc.u-tokyo.ac.jp](mailto:csishihara@g.ecc.u-tokyo.ac.jp)

## 新しい非線形・非平衡問題

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、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を見つけており(論文 7)この現象は数学者によっても詳しく調べられ

ましたが、最近になって、より統計力学的な側面から調べています。他にも、曲面上で起こる新規なパターン伝播メカニズムや、多細胞集団の示すジャミング、相分離と吸収点転移が共存するモデルなど、数理的な機構を非線形力学や非平衡力学の観点から調べています。

### 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) 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)
- 5) 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)
- 6) 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)
- 7) 澤井哲, 石原秀至, 中島昭彦「1細胞イメージングから見る細胞内シグナルの自己組織化現象」実験医学 Vol. 31 (2013年5月号)特集「生命システムを定量する!」)

### 主な原著論文

- 1) T. Namba and S. Ishihara, Cytoskeleton polarity is essential in determining orientational order in basal bodies of multi-ciliated cells. PLoS Comput Biol. 16, e1007649 (2020)
- 2) S. Ishihara, P. Marcq, and K. Sugimura. From cells to tissue: A continuum model of epithelial mechanics. Phys. Rev. E 96 022418 (2017)
- 3) A. Nakajima, S. Ishihara, D. Imoto and S. Sawai, Rectified directional sensing in long-range cell migration Nat. Comm., 5, 5367 (2014)
- 4) K. Sugimura and S. Ishihara, The mechanical anisotropy in a tissue promotes ordering in hexagonal cell packing. Development 140, 4091-4101 (2013)
- 5) D. Taniguchi, S. Ishihara, T. Oonuki, M. Honda-Kitahara, K. Kaneko and S. Sawai, Phase geom of etries 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)
- 7) S. Ishihara, M. Otsuji and A. Mochizuki, Transient and steady state of mass-conserved reaction-diffusion systems Phys. Rev. E 75 015203(R) (2007)

### 学生へ一言

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います(その点では、生物以外の対象にも興味があります)。一方で、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きました。分野に捕われず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

研究員 1 名、修士学生 2 名。他に準メンバーとして外部から二名セミナー等に参加しています。

## 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。

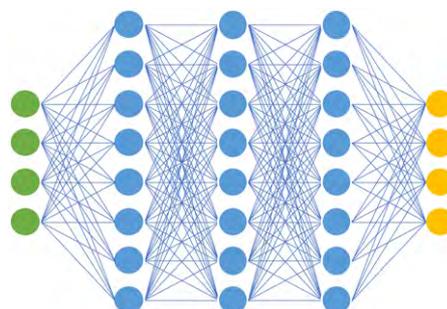


図1 深層学習で用いられる多層ニューラルネットワークの図。ノードを繋ぐ線 (エッジ) がそれぞれパラメータに対応している。

### 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。

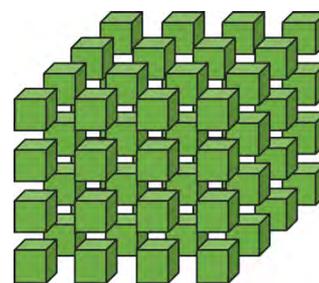


図2. テンソルデータ (三次) の例。数を三次元空間に並べた形で、ベクトルのテンソル積で定義される。

<http://www.imalab.org>

准教授 今泉允聡 16号間 203B室

imaizumi@ism.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) 接摂動による深層ニューラルネットワークの損失平滑性尺度と PAC-Bayes 解析

### 主な論文

- 1) M.Imaizumi, K.Fukumizu (2019). "Deep Neural Networks Learn Non-Smooth Functions Effectively". Artificial Intelligence and Statistics.
- 2) M.Imaizumi, T.Maehara, Y.Yoshida (2018). "Statistically Efficient Estimation for Non-Smooth Probability Densities". Artificial Intelligence and Statistics.
- 3) M.Imaizumi, K.Kato (2018). "PCA-based estimation for functional linear regression with functional responses". Journal of Multivariate Analysis.
- 4) M.Imaizumi, T.Maehara, K.Hayashi (2017) "On Tensor Train Rank Minimization: Statistical Efficiency and Scalable Algorithm". Advances in Neural Information and Processing Systems.
- 5) M.Imaizumi, K.Hayashi (2016). "Doubly Decomposing Nonparametric Tensor Regression". International Conference on Machine Learning.

### 学生へ一言

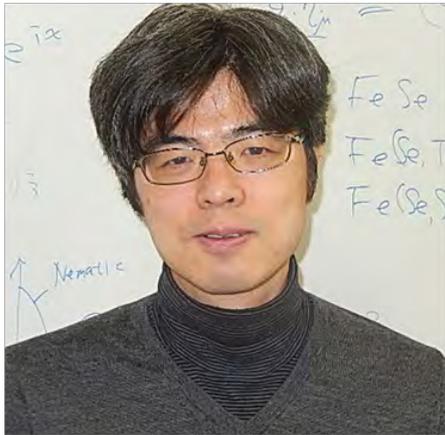
統計・機械学習分野は現在発展が著しく、研究が盛んに進められています。特に深層学習は多くの未解決問題を提供しており、謎に挑むことが好きな人が楽しめる研究領域となっています。また、データ解析技術は高い汎用性があり、自然科学をはじめとした様々な分野に活用される技術に関わることも可能です。

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、特任研究員 1 名、技術補佐員 1 名で運営しています。

## 超伝導・超流動・量子物性



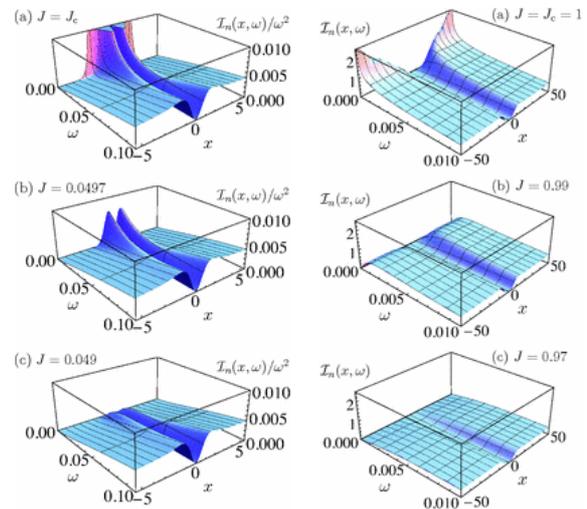
加藤雄介教授

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つた超流動安定化・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。

### 量子可積分系とエニオン

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

### 連絡先

教授 加藤雄介 16号館301B号室 5454-6738

yusuke@phys.c.u-tokyo.ac.jp

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) Study of Low-energy Excitations in Bose-Einstein Condensates and in Superfluids Separated by an Obstacle
- 3) 空間的に不均一な系の超流動流の安定性の研究
- 4) 超伝導グラフェンの渦糸状態と端状態

### 主な著書・解説

- 1) Dynamics of One-dimensional Quantum Systems: Inverse-square Interaction Models (Cambridge Univ. Press, 2009)
- 2) 超流動流安定性の新たな判定法: 物性研究 2010 年 12 月号 237-269.
- 3) 物性物理学と統計力学: 数理科学 2013 年 6 月号 21-27 .
- 4) 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.
- 5) 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.

### 主な原著論文

- 1) Impurity Scattering Rate in Vortex Core of Sign-reversing s-wave Superconductors, *Phys. Rev. B*, **82**, 174507 (2010).
- 2) Dynamical Density Fluctuations of Superfluids near the Critical Velocity, , *Phys. Rev. Lett.*, **105**, 035302 (2010).
- 3) Mean-field and stability analysis of two-dimensional flowing soft-core bosons modeling a supersolid, *Phys. Rev. B* **86** (2012) 060510 (R)
- 4) Stability Criterion for Superfluidity in the light of Density Spectral Function, *Phys. Rev. A* **88**,063612 (2013).

### 学生へ一言

2008 年の鉄ヒ素超伝導体、2004 年の固体超流動、グラフェンの発見、2000 年のマグノンのボース凝縮の実現、1995 年の冷却原子気体におけるボース凝縮の実現など、ここ数十年の量子凝縮系における進展には目覚ましいものがあります。これから数年は物性物理の理論研究者にとって、長年の難問を解決し得る好機であると思います。

### 研究室のメンバー

ポスドク 1 名、 博士課程 3 名、 修士課程 1 名

## 理論生物物理、複雑系、カオス、非平衡現象



金子邦彦教授

金子邦彦 教授 Kunihiko Kaneko, *Prof.*

畠山哲央 助教 Tetsuhiro Hatakeyama, *Assist Prof.*

### 複雑系生命科学(力学系、統計力学をベースに)

非平衡現象の理論、非線形ダイナミクス(カオスを含む)をベースにしつつ、生命現象の基礎理論の研究を主に行っています。ただし、ダイナミックな現象への関心は研究室で共有されていますが、特定の問題に研究課題が制限されているということはありません。ぼく自身の現在の主たる研究興味は、生命とは何かに答えられる物理学をつくること、そのために複雑系生命科学=分子-細胞-個体-生態系といったように、スケールの異なる階層が互いに互いを変え、そのダイナミクスの中から階層間の整合的な関係が生成崩壊していく過程を通して、柔軟かで安定した生命システムを理解することです。研究では非平衡現象論、非線形ダイナミクス(カオスを含む)、統計物理などを背景にしていますが、従来の枠におさまらない、生命システムの物理理論の構築も目指しています。また、そうした生命現象の興味深い振る舞いから数理的なアイデアを抜き出した、大自由度力学系や非平衡系での新しい普遍クラスの現象も研究しています。

### 生命現象の基礎物理

この数年、細胞内の状態のゆらぎや分布を測定する手法が

急速に進歩し、生物学実験の定量性が飛躍的にあがったため、統計力学、非線形物理をふまえた理論と生物実験がタイトに結びつくようになってきました。今までアイデア先行になりがちだった理論物理側からのアプローチが一変しつつあります。世界的にも20代、30代の若手が活躍し、当研究室のメンバーや出身者もその中に加わっています。

僕自身は、細部まで合う理論モデルをつくるというよりも、生命の基本原理を見出し、理論化していくことを目標にしています。内部自由度の大きい要素が安定して増殖していくという条件だけから、複製、代謝、遺伝、適応、進化に対する普遍的な法則を見出すこと、異なる時間-空間スケールを持つ階層間の整合性(分子と細胞の複製、細胞のダイナミクスと個体の発生、遺伝子と表現型、進化と発生)がいかに形成されるか、またそれが破れることで新しい環境への適応が可能なるか、といった研究です。例をあげると

触媒反応ネットワークの動態から複製細胞系の起源へ: 非平衡性の維持条件、複製系のゆらぎの普遍法則

適応系のダイナミクス(異なる時間スケールの干渉過程による一般的適応、酵素量律速によるホメオスタシス、記憶)

進化と生物の可塑性、安定性と表現型ゆらぎの関係

細胞社会の発達過程、細胞分化における多能性の喪失(その際の「時間の矢」を力学系から理解する)

相互作用をベースにした種分化と生態系の多様性の理論などです。

### 研究室での議論(左上が 畠山助教)



## 認知過程の理論

上に述べた考えをもとに脳の情報処理、認知過程、あるいは社会のダイナミクスにも興味はあります。(ただし、こちらは実験との関係から今すぐの成果はのぞめないかもしれませんが)。力学系の中からいかにシンボルや推論が形成されていくかを、操作つき力学系の学習過程、関数力学系、ゲーム力学系などで考えています。

## 非線形力学系 非平衡現象

もともと、非平衡現象論(確率過程)、カオス、時空カオス、大自由度カオスを、確率過程、力学系(特に Coupled Map)により研究していました。その興味は今でもありますが、むしろ、今はこれらの問題を「生命らしい」性質がいかに非平衡系、力学系に宿るか、という視点で考えています。大自由度系の集団運動、カオス的遍歴、平衡へ緩和しにくいシステム、などがその例です。

### 最近の修士論文・博士論文の題目から

- Y. Himeoka(修士): 触媒反応細胞モデルの成長効率
- E. Matsumoto(修士): 深層・再帰的ニューラルネットによる時系列高次構造抽出
- T. Kohsokabe(修士) パターン形成力学系に基づく進化-発生対応
- A. Nakajima: Theoretical study of developmental robustness: From gene network to cell community
- M. Inoue: Dynamics of Adaptive Response in Biological Systems
- T. Kurikawa: Spontaneous and Evoked Neural Dynamics Shaped by Embedding Memories
- T. Hatakeyama: Homeostasis, Plasticity, and Memory: A Consequence of Enzyme-limited Competition

### 主な著書

- 1) 生命とは何か(第2版)―複雑系生命科学へ―、東大出版会、2009年、英語版は Life: An Introduction to Complex Systems Biology, Springer 2006
- 2) 複雑系のカオス的シナリオ(朝倉書店)、1996 金子邦彦、津田一郎、英語版は Complex Systems: Chaos and Beyond, Springer 2001
- 3) 複雑系のバイオフィジックス(編集および1章)2001 共立出版
- 4) 複雑系の進化的シナリオ―生命の発展様式―(朝倉書店)、1998 金子邦彦、池上高志
- 5) Theory and Applications of Coupled Map Lattices (Wiley) 1993: 編集と1章
- 6) Collapse of Tori and Genesis of Chaos in Dissipative Systems (World Sci. Pub., 1986、博士論文を加筆) ほか

### 主な原著論文(一部です。論文は webpage に載せていますので参照してください)

- 1) "Clustering, Coding, Switching, Hierarchical Ordering, and Control in Network of Chaotic Elements", Physica D, 41 (1990) 137-172
- 2) "Zipf's law in Gene Expression" Phys. Rev. Lett., 90 (2003) 088102
- 3) "Evolution of Robustness to Noise and Mutation in Gene Expression Dynamics", PLoS One(2007) 2 e434
- 4) "A Dynamical-Systems View of Stem Cell Biology", Science 338 (2012) 215-217
- 5) "Generic temperature compensation of biological clocks by autonomous regulation of catalyst concentration", Proc. Nat. Acad. Sci. USA 109 (2012) 8109-8114
- 6) "Universal relationship in gene-expression changes for cells in steady-growth state", Phys. Rev. X 5 (2015) 011014

### 学生へ一言

新しい学問をともに作りましょう。詳しくは、webpageの「研究室志望の方へ」を参考にしてください。

### 研究室のメンバー、出身者

最近、大学院生は6~8名、助教1名、特任助教1~2名、博士研究員1~2名です。現在のメンバーは webpage をご覧ください。なお、これまで博士を取得した方は22名、東大、阪大、名大、筑波、広大、理研ほかで研究室を主宰するなど活躍中です。



応用が見出されている。

<http://webpark1739.sakura.ne.jp/atsuo/indexLP/htm>

教授 国場敦夫 16号館302A号室 03 5454 6536

email: atsuo.s.kuniba@gmail.com

## 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

- Quantum R matrices and tetrahedron equation
- 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
- Exact analysis of correlation functions of one-dimensional quantum systems
- 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, 書籍

- 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) ベーテ仮説と組合せ論 (朝倉書店 2011)
- 7) 物理と数学における厳密解 (数理科学 2012, 11月号)
- 8) 電磁気学とベクトル解析 (数理科学 2017, 5月号)

## 原著論文

- 1) A. Kuniba, and V. Pasquier, Matrix product solutions to the reflection equation from the three dimensional integrability, J. Phys. A 51 (2018) 255204 26pages.
- 2) A. Kuniba, S. Maruyama, M. Okado, Multispecies TASEP and the tetrahedron equation, J. Phys. A **49** (2016), 114001, 22 pages.
- 3) A. Kuniba and M. Okado, Tetrahedron and 3D reflection equations from quantized algebra of functions. J. Phys. A **45** (2012), 465206, 27 pages.
- 4) A. Kuniba and M. Okado, Tetrahedron equation and quantum R matrices for q-oscillator representations of  $U_q(A^{(2)}_{2n})$ ,  $U_q(C^{(1)}_n)$  and  $U_q(D^{(2)}_{n+1})$ , Commun. Math. Phys. **334**, 1219--1244 (2013).
- 5) R. Inoue, A. Kuniba, T. Takagi, Integrable structure of box-ball systems: crystal, Bethe ansatz, ultradiscretization and tropical geometry, J. Phys. A **45** (2012), 073001, 64pages.

## 研究室メンバー

博士 1名(2020年度)

## 物性基礎論・量子物理学



清水明教授

清水 明 教授 Akira Shimizu, Prof.

当研究室では、物性基礎論・量子物理学の、基礎的・原理的問題を研究している。

### 物性基礎論

物性基礎論というのは、「統計力学」という名のもとに、物理としては意味不明な、単なるモデル計算や形式論が蔓延していることを嘆いたある大家が名付けたものである。つまり、応用数学演習もどきではなく、物理的意義が明確な基礎理論を研究すべきだ、そして実はそれこそが一番難しく深淵なのだ、というのだ。それが「物性基礎論」であり、当研究室の研究内容のひとつである。

たとえば、最近我々は、統計力学の基本原則を新しく定式化し直すことに成功した。従来の統計力学では、多数のマイクロ状態を確率的に混ぜたもので熱平衡状態を表していた。しかし実はそれは、本質をはずれた無駄なことを含んでいた。そこで我々は、熱平衡状態をたった1個のマイクロ状態（量子力学的純粋状態）で表し、統計力学の対象になる物理量が、全て、その1個の量子状態から計算できてしまう、という全く新しい定式化を行い、その正しさを厳密に証明した。

その新しい定式化による諸公式は、従来の統計力学の公式とはまったく異なっている（しかし、答えは一致する）。その

ために、従来は手も足も出なかったような難しい物理系の解析が、解析できるようになりつつある。また、「熱ゆらぎ」に対する見方も根本から変わった。なにしろ、従来の定式化では、多数のマイクロ状態を確率的に混ぜることが熱ゆらぎの主因とされていたのに、我々の定式化では状態を全く混ぜていないので、量子ゆらぎしかない。その結果、熱ゆらぎは全て量子力学的ゆらぎに置き換わってしまったのだ。

これ以外にも、「マイクロ系からマクロ系へどう繋がるのか?」「マクロ量子状態は安定か?」「非平衡状態にも、個々の系の個性には依らないような強い普遍的性質があるのか?」などの根本的問題について研究し、成果を上げている。

### 量子物理学

量子物理学というのは、昔は単に「量子論を使う物理」という意味だったが、近年になって、量子論そのものの本質的な性質を、対象を限定せずに研究する分野を意味するようになった。

量子論を使う他のほとんどの分野では、まず最初に、具体的な物質（物理系）や、実験事実がある。その物質を量子論を用いて解析したり、実験事実を量子論で説明するのが、主たる目的になっている。それに対して、具体的な物質とか実験事実を一旦離れて、実験的に実現する容易さもひとまずおいておいて、「そもそも量子論は、こういう物理現象を原理的には許しているのだろうか?」ということを問う。さらに、「それは本当に、量子論以外の理論では記述できない、本質的な量子現象だろうか?」という分析へと進む。

たとえば当研究室では、曖昧だった「マクロに異なる状態の重ね合わせ」を厳密に定義し、その普遍的な性質を明らかにした。そして、量子計算機が、古典計算機よりも有意に速く計算できるときには、必ずそのような状態が現れるらしいことを突き止めた。

### 原理的・基本的な問題を考える

上に述べた物性基礎論と量子物理学は、一見すると全くちがう分野に見えるが、いたる所で繋がっていて、一方で論じていた問題が他方の問題を解く鍵になったりする。そういう関係を発見していくことも重要なテーマになっている。

このように、当研究室は、原理的・基本的な問題を研究する研究室である。研究の進め方は、具体例を研究しながら一般論を探る。研究手法は、研究テーマに応じて選ぶので、特定の手法にも、解析計算か数値計算かということにも、こだわらない。

<http://as2.c.u-tokyo.ac.jp/>

### 連絡先

教授 清水 明 16号館 223A号室

shmoz@as2.c.u-tokyo.ac.jp (^^を半角の@に変える)

## 修士論文・博士論文の題目

- 1) Formulation of statistical mechanics based on thermal pure quantum states
- 2) スクイズド平衡状態
- 3) Generation of a superposition of macroscopically distinct states at finite temperature
- 4) Molecular dynamics simulation of nonequilibrium steady states of electrical conductors
- 5) Superposition of Macroscopically Distinct States in Quantum Many-body Systems
- 6) Prototypes of minute quantum thermodynamic machines
- 7) Maximum efficiency of heat engines revisited from stochastic thermodynamics など.

## 主な著書

- 1) 熱力学の基礎 (東京大学出版会, 2007).
- 2) 新版 量子論の基礎 (サイエンス社, 2004).
- 3) Low-Dimensional Systems --- Interactions and Transport Properties (共著, Springer, 2000).
- 3) アインシュタインと21世紀の物理学(共著, 日本物理学会編, 日本評論社, 2005).
- 4) 物理学のすすめ(共著, 筑摩書房, 1997).  
など.

## 主な原著論文

- 1) Universal Property of Quantum Measurements of Equilibrium Fluctuations and Violation of Fluctuation-Dissipation Theorem. Phys. Rev. Lett. **117**, 010402 (2016).
- 2) Canonical Thermal Pure Quantum State. Phys. Rev. Lett. **111** (2013) 010401.
- 3) Thermal Pure Quantum States at Finite Temperature, Phys. Rev. Lett. **108** (2012) 240401.
- 4) General properties of response functions of nonequilibrium steady states, J. Phys. Soc. Jpn. **79** (2010) 013002.
- 5) Detection of Macroscopic Entanglement by Correlation of Local Observables, Phys. Rev. Lett. **95** (2005) 090401.
- 6) Quantum Zeno Effect by General Measurements, Physics Reports **412** (2005) 191.
- 7) Conversion of Thermal Equilibrium States into Superpositions of Macroscopically Distinct States. Phys. Rev. A **97**, 012124 (2018)
- 8) Stability of quantum states of finite macroscopic systems against classical noises, perturbations from environments, and local measurements, Phys. Rev. Lett. **89** (2002) 270403.

## 学生へ一言

当研究室を志望する学生さんは、清水研ホームページ内の、「しみずの雑記帳」

<http://as2.c.u-tokyo.ac.jp/~shmz/zakki.html>

や、「清水研を志望する方へ」

<http://as2.c.u-tokyo.ac.jp/sibousuruhitohe.html>

を一読してください。様々な情報が得られますから、少しうるさく感じるかもしれないことも書いてありますが、お役に立つと思います。

## 研究室のメンバー

2019年4月現在では、6人の大学院生が在籍している。研究室のOB, OG (大学院生とポスドク) は多方面で活躍している。アカデミックポストでは、ベルリン工科大学教授・京都大学准教授・東京医科歯科大学准教授・電気通信大学准教授・群馬大学助教・静岡大学助教、などに就いている。

## 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 (統計物理学を基盤にする) 科学の発展を目指しています。

### 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、学部での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、新規の現象が相転移としてとらえられることもあります。それに、そもそもある原子と別の原子を混ぜたときに安定な相が何であるかは現在でも正確に予言できません。数年前に硫化水素が

200Kを超える超伝導を示すことが発見されましたが、これもHとSが高圧条件で混ざったときにできる安定な結晶構造が理論的にはわかっていなかったのです。これは人類が相転移を完全に理解し切れていないことを顕著に表しています。

### 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。このとき解空間の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、計算できるようになると少しだけ世界が広がった気がします。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えます。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、現在は多くの分野で使われています。

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

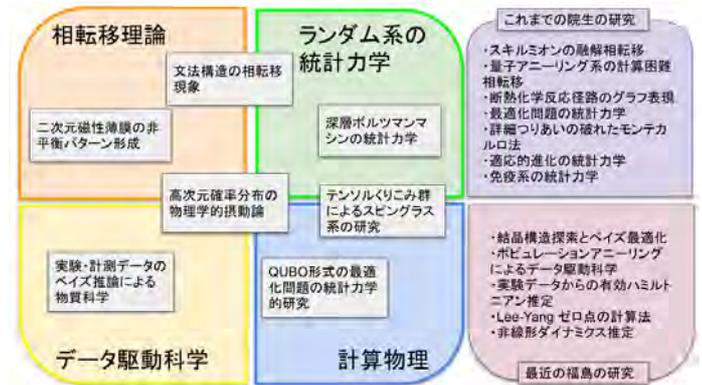
連絡先 教授 福島 孝治 16号館 221A号室

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

個人的にはベイズ統計など機械学習の方法を用いた自然科学の研究方法論に興味を持っています。実験・計測データからどのくらいのことがベイズ統計を用いて、理論的にわかる限界を明らかにしたいと考えています。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、真に理解するための道具になっているのでしょうか？我々は理解の助けになるような機械学習の方法の模索を続けていて、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「確率の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) 交換モンテカルロ法の創出と展開 東京大学教養学部報 527号 2010年2月
- 4) 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
- 5) “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

### 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

2021年4月現在では、修士課程2名、博士課程5名。

## 物性理論・強相関量子多体系



堀田 知佐 准教授

堀田 知佐 准教授 Chisa Hotta, Assoc. 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」を紡ぎ出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。

### 強相関系とは？

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特徴的な物性、いわゆるテクノロジーに役立つ性質が、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。その追込み段階で現れたのが高温超伝導、分数量子ホール効果、冷却原子など、「強相関」というキーワードなくして理解できない現象の数々です。

強相関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。元々は同じ要素（原子や電子）からなる物質ですが、物質ごとに伝導性、磁性といった個性を示します、その個性は、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、要素がマクロな集団(More)を作って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。

強相関系とは、電子同士の相互作用が極めて強くなり、「当たり前」ではない状況がとりわけ生じやすくなった系です。要素同士が互いを強く意識しあう（相関）ことによって、集団が、量子揺らぎや熱揺らぎに非常に敏感に反応する、一種触発の状態が生まれます。

強相関系における理論研究の根本的な問題は、モデルの自

由度が増えると、途端に、全く解けなくなってしまうことです。そん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出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人が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、自由度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。

### 異常量子相を求めて

強相関効果が特に強く顕れる系としてフラストレート系があります。例えば三角格子、カゴメ格子、パイロクロア格子などで、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と、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、フラストレーションがたまります。その結果、低温までマクロなエントロピーが残って熱力学第三法則が破綻します。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規量子相を発見・提案してきました。たとえば、異方的三角格子上で、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、本来分かた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などです。最近では、本研究室の大学院生が三角格子上で自発的にカゴメ化したネマティック液体相や、新機構の量子スピングラス相、反強磁性マグノンのラシュバ・ドレッセル効果を見出しました。

これらの異常量子相は、発見論的に見出されたものが多く、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。研究対象が物質であれば、金属、絶縁体（誘電体）、磁性体、あるいは  $\pi$ 電子系、 $d$ 電子系、 $f$ 電子系、遷移金属、有機結晶など何でも構いません。分野を限らず、面白いことに何でも食いついていこう、というスタンスで研究を進めています。

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

連絡先 准教授 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)

## 量子多体数値計算法の開拓

物質世界は、 $10^{23}$ 個というマクロなオーダーの電子の集合体です。モデルで言うとシステムサイズ  $N$  が無限大に相当します。ところが、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。1次元や2次元の系では量子揺らぎも強く、3次元以上でよいとされる動的平均場などの強力な手法もしばしば破綻します。我々が使っている手法には、近似的にはほぼ厳密に近い 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。しかしこれらの方法にも各々限界があり、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」新たな方法論を探ることを目標にしています。最近開発したグランドカノニカル数値解析は、「難しさ保存の法則」を破り、 $N=\infty$ における物理量をごく普通のDMRGなどの数値計算のレベルで取り出すことに成功しました。ごく普通の問題がありふれた solver で容易に解けるようになるということは、強力な solver さえ持てば、誰も解けなかったような問題が解けるようになることを意味しています。実際、グランドカノニカル法は、2次元DMRGとの組み合わせで、カゴメ格子スピン系の磁化カーブの同定や新しい量子液体相の発見を可能にしました。また、2018年現在、有限温度の比熱や磁化率などを、これまで量子モンテカルロ法しか適用できなかった系においても得られる、新たな手法展開にも成功しています。

### 修士論文の題目

- 1) リング交換相互作用が誘起するネマティック固体・液体相 (横山祐人 修士論文 2018年)
- 2) ボンドランダムネスのある三角格子上的横磁場イジングモデルの解析 (上田和正 修士論文 2018年)
- 3) 多軌道 Mott 絶縁体における幾何学的効果に由来する電気分極の理論 (田中克大 修士論文 2018年)
- 4) Magnon excitations in an inversion symmetry broken antiferromagnet (川野 雅敬 修士論文 2019年) 一高記念賞

### 一般的な解説、レビュー

- 1) 「異方的三角格子上的電荷のフラストレーション」, 堀田 知佐, 古川 信夫, 固体物理 **45**, No.5, 255 (2010).
- 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) Towards Systematic Understanding of Diversity of Electronic Properties in Low-Dimensional Molecular Solids, Hitoshi Seo, Chisa Hotta, Hidetoshi Fukuyama, Chemical Reviews **104**, 5005 (2004).

### 主な原著論文

- 1) Designing spin momentum locking in inversion-symmetry broken antiferromagnets, Masataka Kawano, Yoshinori Onose, Chisa Hotta, Communications Physics **2**, 27 (2019).
- 2) 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).
- 3) Grand canonical finite-size numerical approaches: A route to measuring bulk properties in an applied field, Chisa Hotta & Naokazu Shibata, Phys. Rev. B **86**, 041108 (2012) Editor's suggestion.
- 4) Quantum electric dipoles in spin-liquid dimer Mott insulator  $\kappa$ - $\text{ET}_2\text{Cu}_2(\text{CN})_3$ , Chisa Hotta, Phys. Rev. B **74**, 241104R (2010).
- 5) Dimensional tuning of electronic states under strong and frustrated interactions, Chisa Hotta & Frank Pollmann, Phys. Rev. Lett. **100**, 186404 (2008).

### 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、一緒に味わっていただける人を歓迎します。誰にも思いつかなかったアイデアをぜひ一緒に！

### 研究室情報

2021年度は修士3名、博士2名の構成となっています。

**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せられ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。

## 量子凝縮の物理学: 実験



前田 京剛 教授

前田京剛 教授 Atsutaka Maeda, Prof.

鍋島 冬樹 助教 Fuyuki Nabeshima, Assist. Prof.

### 量子凝縮ワールドへのいざない

トランジスタの発明・超伝導の発見など、物性物理が我々の生活にもたらしている恩恵は測り知れないものがあります。物性の主役はいうまでもなく電子ですが、20年ほど前によく高温超伝導が発見されたように、物質中の電子の振舞の奥深さは我々の予測をはるかに超えています。なかでも、マクロな数の電子が量子力学の世界を具現する量子凝縮現象はその頂点ともいえるでしょう。前田研究室では「量子凝縮ワールドを解き明かす」をキーワードに、ここ数年では、以下のテーマに中心的に取り組んできました。

### 新高温超伝導体の研究

量子凝縮のなかでも最も有名な現象が超伝導現象です。特に、「今世紀最大の発見」「物性物理学への挑戦」と言われた銅酸化物高温超伝導体も発見されてから25年以上が経過しますが、未だにその発現機構を正確に理解するには至っていません。また数年前には全く新しい高温超伝導体（鉄系超伝導体）が発見されましたが、銅酸化物超伝導体との対照的な性質が、超伝導研究者に新たなフィーバーを巻き起こしました。さらに最近では、トポロジカル超伝導体と呼ばれる、これもまた全く新しいタイプの超伝導体の存在の可否が実験的に大論争になっています。我々は、これらの新超伝導体について、(1)新超伝導体の開発 (2)発現メカニズムの解明(3)新しい現象の探索 (4) 応用への礎造り のいずれの切り口からも研究を行っています。実験研究室として、手法面では、マイクロ波・ミリ波領域の電子物性測定を主要な武器として、独自の計測手法を開発しながら研究に取り組んできました。

以下でいくつかを挙げると、(A) マイクロ波を用いた超伝導の前兆現象（超伝導ゆらぎ）の研究から、高温超伝導メカニズムに関する重大情報を世界に先駆けて提供することに成功しました（注目論文に選ばれる）。最近では、更なる高周波数化に挑み、テラヘルツ波領域の伝導度測定システムを新たに建設し（次頁上図）、上述のマイクロ波測定からの推論が正しか

ったことを自ら確認することに成功しました（次頁上図）。(B) また、鉄系超伝導体では、この物質の最も特異な部分を代表する特徴的素励起（ディラック粒子）のダイナミクスの発見にも成功しました。(C) トポロジカル超伝導体周辺で新超伝導体を発見しました。

### 超伝導薄膜・ジョセフソン接合を用いた研究

前項で触れた最近話題の新高温超伝導物質ですが、上記のような我々の得意とする手法でアタックするためには、最高級の薄膜試料が必要です。ここ2-3年ほどの研究で世界最高品質の薄膜が作製できるようになり（最多引用論文10選に選ばれる）、超伝導発現機構解明に重要な情報を与える研究を世界に先駆けて行っています。今年は、いよいよ人工超格子の作製や、ジョセフソン接合（超伝導トンネル接合）を作製し、さらなる高温超伝導化を目指します。（次頁左図）

### 物性物理学における新しい高周波計測技術(マイクロ波～ミリ波～テラヘルツ波)と高周波顕微鏡の開発

上述の様に、物理学あるは自然科学の研究では、新しい計測手法の開発と新しい科学の発見は互いに車の両輪のような関係にあります。我々の研究室では、直流からテラヘルツ領域までの電気伝導度スペクトロスコーピーが可能で、このようなグループは世界的に見ても稀で、マイクロ波からテラヘルツ波までの高周波物性計測に関して、世界でも数少ない重要拠点を形成しています。最近では、マイクロ波顕微鏡の開発にも着手しました。これにより、最近話題の多くの物質の物性理解が飛躍的に進むと期待されます。このように、物性研究の有力なツールとして高周波電気伝導に注目するだけでなく、高周波伝導の新測定技術開発・汎用化も念頭にあり、その研究の一部は、企業との共同研究にも発展しています。

### 来たれ！

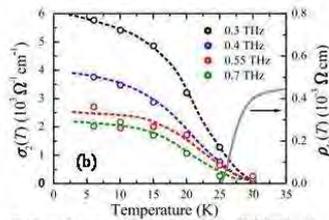
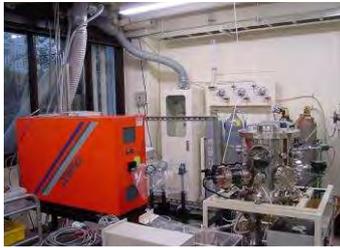
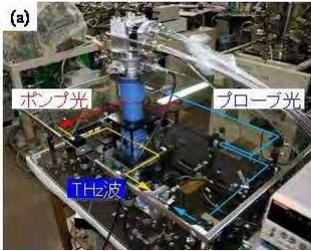
我々の研究分野では、物理の好きな人、メカいじりの好きな人はもちろん大歓迎ですが、そうでなくとも、さまざまな活躍の場が用意されています。たとえば、結晶作製に特異な才能を示す人も世界中のヒーローになれます。イッチョ、何かやってやろうという人、ぜひ覗いて見てください。物性研究の発展史を振り返ると、従来の枠組みにとらわれない広い視点の物質・物理感が必要不可欠なことは明白です。ニューエイジの意欲的な学生諸君の参加を待っています！！

<http://maeda3.c.u-tokyo.ac.jp/>

連絡先(電話番号は 03-5454-を最初に付ける)

教授 前田京剛 16号館 602A号室 TEL -6747  
cmaeda (at) mail.ecc.u-tokyo.ac.jp

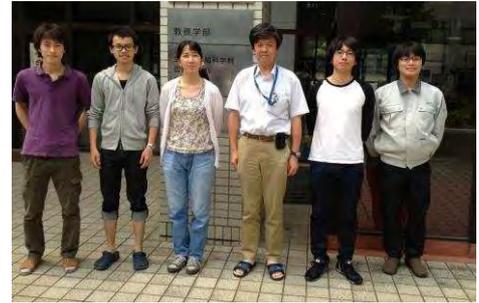
助教 鍋島冬樹 16号館 611号室 TEL -6763  
nabeshima (at) maeda1.c.u-tokyo.ac.jp



テラヘルツスペクトロスコピーを利用した高温超伝導体のダイナミックゆらぎの研究

マイクロ波と可視光の間にあるテラヘルツ領域の電磁波(0.1-1.0THz)は、最近基礎・応用両面から非常に注目されており、新しい物質の姿が次々と明らかにされつつある。(a)のような独自に構築した測定系を用いて高温超伝導体の複素電気伝導度の虚部の温度依存性を調べた結果が、(b)である。この結果は、超伝導の前兆現象(ダイナミックゆらぎ)おこり始める温度が、超伝導転移温度の高々2倍程度であることと明確に示すものである。独自の測定システムでの精密な測定により、初めてこのような物理が解き明かされていくのである。

(上) THz スペクトロメーターと超伝導ゆらぎ  
(左) PLD 法を用いた成膜システム  
(右) 研究室メンバー



## 修士論文・博士論文の題目例

マイクロ波伝導度スペクトロスコピーを用いた高温超伝導体における超伝導ゆらぎの研究

超伝導体の磁束量子のダイナミクスを用いた摩擦の物理の研究

## 主な著書

- 1) 前田・加藤：“物性物理学演習” (吉岡書店, 2006)
- 2) 内野倉・前田・寺崎：“高温超伝導体の物性” (アドバンスエレクトロニクスシリーズ, 培風館, 1995)
- 3) 内野倉・前田：“擬一次元物質の物性” (物理学最前線 28, 共立, 1991)
- 4) 前田京剛：“高周波測定” (実験物理学講座 11 輸送現象測定 第2章, 丸善, 1999)

## 最近の主な原著論文より

- 1) Nanoscale friction: kinetic friction on magnetic flux quanta and charge-density wave"; A. Maeda *et al.*; Phys. Rev. Lett. **94** (2005) 077001/1-4, also D. Nakamura *et al.*; J. Phys. Condens. Matter. **22** (2010) 445702/1-7 (**IOP select に選ばれる**).
- 2) Critical microwave-conductivity fluctuations across the phase diagram of superconducting  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  films; H. Kitano *et al.*; Phys. Rev. **B73** (2006) 092594/1-4, also K. Ohashi *et al.*; Phys. Rev. **B79** (2009)184507/1-20 (**Editors suggestion に選ばれる**).
- 3) Systematic comparison of eight substrates in the growth of  $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$  superconducting thin films; Y. Imai, T. Akiike, I. Tsukada, A. Ichinose, A. Maeda *et al.*; Appl. Phys. Express **3** (2010) 043102/1-3. (**2011年 APEX most cited 10 papers に選ばれる**)
- 4) Microwave surface-impedance measurements of the electronic state and dissipation of magnetic vortices in superconducting  $\text{LiFeAs}$  single crystals; T. Okada, Y. Imai, and A. Maeda *et al.*; Phys. Rev. **B86** (2012) 064516.
- 5) Investigation of the superconducting gap structure in  $\text{SrFe}_2(\text{As}_{0.7}\text{P}_{0.3})_2$  by magnetic penetration depth and flux flow resistivity analysis; H. Takahashi, T. Okada, Y. Imai, and A. Maeda *et al.*; Phys. Rev. **B86** (2012) 144525.
- 6) Superconductivity at 5.4 K in  $\beta\text{-Bi}_2\text{Pd}$ ; Y. Imai, F. Nabeshima, T. Yoshinaka, K. Miyatani, R. Kondo, S. Komiya, I. Tsukada, and A. Maeda.; J. Phys. Soc. Jpn. **81** (2012) 113708.

## 学生へ一言

諸君の人生に一度しかない非常に大切な若いとき！今、情熱を注いで打ち込めるものがあれば、きっと充実した人生になるでしょう。超伝導の研究はそういう魔力をもっています。

## 研究室のメンバーより一言

前田研は、最初に個人の興味に配慮された研究のきっかけとなるテーマを先生からもらった後は、ほとんど自由に研究ができる環境が整っています。自分で得た成果を国内外の学会で自ら発表し、さらに論文も執筆します。初めて学会で発表したときの感動、初めて自分の成果が学術論文として出版されたときの感動は今でも忘れられません。セミナーや輪読など、研究遂行上で必要な基礎学力をつける環境も整っています。研究室のメンバーは皆仲がよく普段は一緒に、食事したり、飲みに行ったりしますが、研究に関しては、時に厳しく、言い合う環境もあります。超伝導、物性物理に興味のある人、実験の好きな人、ぜひ前田研と一緒に研究しましょう！前田先生のブログもご参考に。

## 応用量子物理学



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)

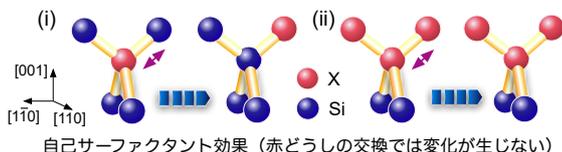
物質を対象とする物性物理学。光量子を扱う量子光学。そしてこれらを包摂する量子物理学。従来はバラバラだった学理が融合した先に「応用量子物理学」が位置します。我々は、この応用量子物理学を駆使することで空想だにされない特性の物質、物理的特性に斬り込もうとしています。ターゲットは、日常的な環境で発現する非古典的な効果や誰も実現できないデバイス機能です。「そんなことできるわけない」「おや?」「あれ?」等の反応を期待しています。時には専用の実験装置や未踏の計測技術が要求されますが、これらを実現することも自体も研究のターゲットです。

### 【 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。

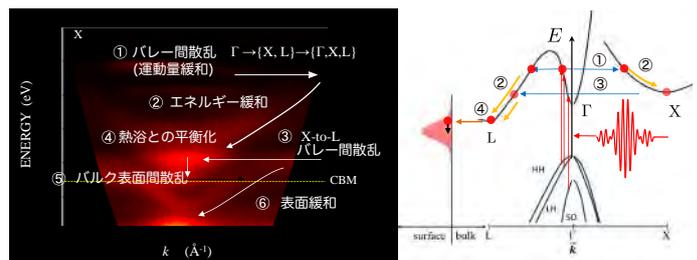
### 【 光物理からシリコンレーザーまで 】

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ニクスを握っています。

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出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。

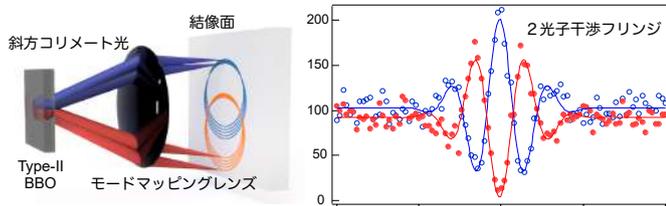


角度時間分解2光子光電子分光によるGeのバレー間散乱の観測。(大阪市大との共同研究)

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。

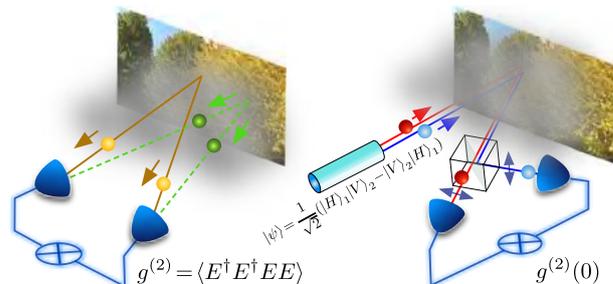
他方、電極が不要の光学物性評価は便利です。出力信号は大抵、プローブ光強度の増加関数で過大入力禁物です。ここで多光子状態が真価を発揮します。1光子の位相変化が  $N$  光子では  $N$  倍になるからです。エンタングル多光子であれば量子限界の精度での精密測定が可能になります。吸収性媒質の磁気光学等を例に、量子プロトコルが測定精度で古典プロトコルを凌駕することの検証を試みます。

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、スリットの無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。

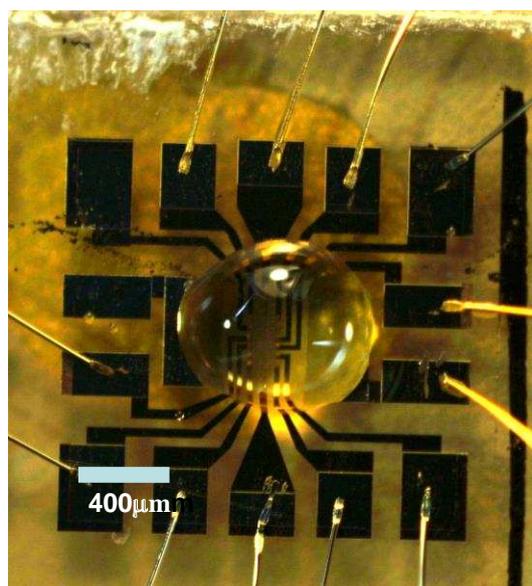
## 薄膜・界面の電子物性



上野和紀 准教授

上野 和紀 准教授 Kazunori Ueno, Assoc. Prof.

我々はシリコンなどの半導体で実用化されている電界効果トランジスタという電子デバイスを凝縮系の電子物性研究と組み合わせることで、薄膜・界面に新しい電子機能を発現させる研究に取り組んでいます。今までの凝縮系の物性研究では物質の化学組成を変化させるとともに、温度や圧力といった外場による物性制御が行われてきました。我々はトランジスタを用いることでキャリア濃度や静電場などといった新しい制御パラメータを物性研究に持ち込み、新しい材料開発や新規機能をもつデバイスの実現などを目標に研究を行っていきます。



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

### 電場誘起による新しい超伝導体の開発

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。

最近の新規超伝導体開発のスタンダードといえるのが電気を流さない絶縁性母材料に不純物を混ぜる「化学ドーピング」の手法です。銅酸化物高温超伝導体やフラーレンなどの多くの超伝導体が発見されています。しかし、この手法では化学的に「ドーピング」に適した材料でしか超伝導体を開発できないということが欠点でした。私の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  $\text{KTaO}_3$  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。現在は銅酸化物薄膜や鉄系超伝導体  $\text{FeSe}$ 、層状物質など幅広い物質系に研究を展開しています。この研究は物性研究、材料研究、電子デバイス開発という3つの分野にまたがった困難なものです。新しい超伝導体の発見にはそれだけの価値があると考え、研究を進めています。

### スピントロニクスへの電界効果デバイスの展開

電子回路の消費電力は真空管からバイポーラトランジスタ、そして現在の CMOS 型電界効果トランジスタへと世代が変わるにつれて劇的に減少し、現代の情報化社会をもたらしました。この省電力化は電界効果(コンデンサへの電荷蓄積)という電力消費のないスイッチング手法によって実現したものです。一方、現代のパソコンの省電力化で大きな問題になっているのがハードディスクです。可動部が多いこと、電磁石を用いた古典的な方法で磁気記録を行っていることの両面から電力消費が大きな問題となっています。この問題を本質的に解決する手法として、物質のスピンを電子的に制御するスピントロニクスが注目されています。

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

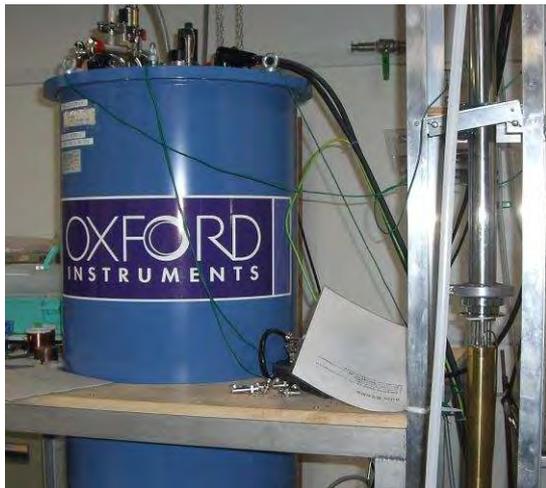
連絡先 (電話番号は 03-5454-を最初に付ける)

准教授 上野和紀 16号館 222B号室 TEL -6521

ueno (at) phys.c.u-tokyo.ac.jp

助教 片山裕美子 3号館 107号室 TEL -6559

katayama (at) phys.c.u-tokyo.ac.jp



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

たとえば金属の強磁体では原子の電子数が増えるとともに強磁性を示すキュリー温度が大きく変化することが知られています。このような物質にトランジスタを組み合わせれば、エネルギーをほとんど消費せずに磁氣的性質を変化させるこ

とができます。我々は室温強磁体  $\text{Co:TiO}_2$  に電気二重層トランジスタを用い、常磁性から強磁性へのスイッチングに成功しています。また、HDD で良く使われる Co の超薄膜でも電界効果による磁気物性の変化をとらえています。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。

### 薄膜による大面積単結晶の作製とデバイス構築

電子デバイスを用いた物性研究の基礎になるのが高品質の単結晶薄膜の作成技術です。半導体産業では数十 cm の半径のシリコン多結晶が工業的に生産され、基板として用いられています。我々はこうしたバルク単結晶をつくるのが難しい物質へも研究対象を広げるため、パルスレーザー堆積法 (PLD 法) により  $1\mu\text{m}$  以下の厚さの薄膜の形で単結晶を作製しています。この手法はターゲットの組成をそのまま薄膜へ転写することができるため、酸化物超伝導体、半導体など複雑な組成をもつ物質でも単結晶が作製可能です。薄膜新材料をトランジスタにすることで今までになかった物性を引き出します。

### 主な原著論文

- 1) "Electric field control of magnetic anisotropy in a Co/Pt bilayer deposited on a high- $\kappa$   $\text{SrTiO}_3$ ", S. Nakazawa, A. Obinata, D. Chiba, K. Ueno, Appl. Phys. Lett., 110, 062406 (2017).
- 2) "Effective thickness of two-dimensional superconductivity in a tunable triangular quantum well of  $\text{SrTiO}_3$ ", K. Ueno, T. Nojima, S. Yonezawa, M. Kawasaki, Y. Iwasa, Y. Maeno, *Phys. Rev. B* **89**, 020508 (R) (2014).
- 3) "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).
- 4) "Discovery of superconductivity in  $\text{KTaO}_3$  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).
- 5) "Electric Field Induced Superconductivity in an Insulator", K. Ueno, S. Nakamura, H. Shimotani, A. Ohtomo, N. Kimura, T. Nojima, H. Aoki, Y. Iwasa, M. Kawasaki, *Nature Materials* **7**, 855 (2008).

### 研究室のメンバー

修士課程 5 名(出身大学：東京大学、東京工業大学、早稲田大学)

### 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



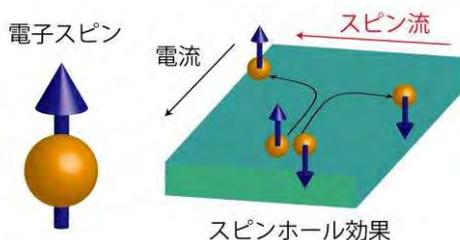
塩見雄毅 准教授

塩見 雄毅 准教授 Yuki Shiomi, Assoc. Prof.

塩見研では物質の磁気的性質（磁性）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



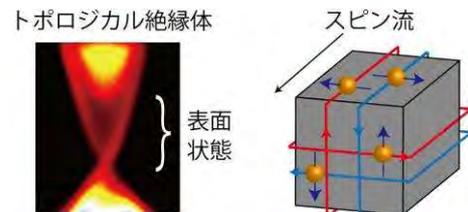
スピントロニクス効果

【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・スピントロニクスの研究

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。応用物理学的な観点も取り入れて、現在もトポロジカル物質におけるスピントロニクス基礎研究を行っています。

物性物理学におけるトポロジー概念の重要性は年々増えています。それはトポロジー概念が適用されるトピックがどんどん広がっていることから理解されます。世界的にトポロジカル物性物理が精力的に研究されるなか、我々は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。

### 磁性金属における磁気圧電効果の研究

圧電効果とは、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。身近な応用としてライターの着火石があり、圧力を加えて高電圧を発生させることでガスに着火しています。圧電効果はセンサーやアクチュエーターなどの電子機器にも利用されておりエレクトロニクスにおいて重要な物理現象ですが、主流であ

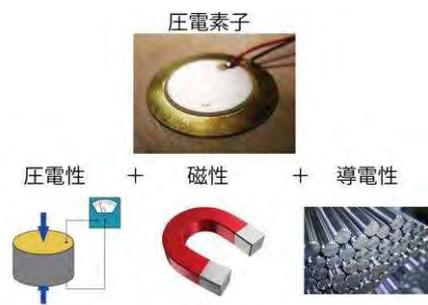
<http://yukishiomi.com/>

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

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



【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。

料開発の新しい設計指針を提示しました。

理論提案によれば導電性がよいほど圧電性能が上がると期待されるため、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効果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(新物質の合成や分野横断的試み)

塩見研は、各メンバーの興味や自主性を大切にし、幅広い研究テーマを扱いたいと考えています。例えば、新物質合成も積極的に行います。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、物性理論や異分野の研究者との議論も活発に行い、アイデア出しや共同研究を行います。さらには、分野横断的な試みも歓迎します。今までにない視点からの creative な研究活動を目指します。

### 主な原著論文

- 1) "Observation of a Magnetopiezoelectric Effect in the Antiferromagnetic Metal  $\text{EuMnBi}_2$ ", Y. Shiomi, H. Watanabe, H. Masuda, H. Takahashi, Y. Yanase, and S. Ishiwata, *Phys. Rev. Lett.* **122**, 127207 (2019).
- 2) "Spin pumping from nuclear spin waves", Y. Shiomi, J. Lustikova, S. Watanabe, D. Hirobe, S. Takahashi, and E. Saitoh, *Nature Phys.* **15** 22-26 (2019).
- 3) "Vortex rectenna powered by environmental fluctuations", J. Lustikova, Y. Shiomi, N. Yokoi, N. Kabeya, N. Kimura, K. Ienaga, S. Kaneko, S. Okuma, S. Takahashi, and E. Saitoh, *Nat. Commun.* **9**, 4922 (2018).
- 4) "Giant Piezoelectric Response in Superionic Polar Semiconductor", Y. Shiomi, T. Akiba, H. Takahashi, and S. Ishiwata, *Adv. Electron. Mater.* **4**, 1800174 (2018).
- 5) "Spin-electricity conversion induced by spin injection into topological insulators", Y. Shiomi, K. Nomura, Y. Kajiwara, K. Eto, M. Novak, Kouji Segawa, Yoichi Ando, and E. Saitoh, *Phys. Rev. Lett.* **113**, 196601 (2014).
- 6) "Paramagnetic spin pumping", Y. Shiomi and E. Saitoh, *Phys. Rev. Lett.* **113**, 266602 (2014) (Editors' suggestion).

### 研究室のメンバー

修士課程 1 名 (出身大学: 東京工業大)

### 学生へ一言

研究活動は新しいことの達成を目指すのですから、挑戦の連続です。挑戦すれば、たくさんの失敗をします。失敗したら当然つらいですが、あきらめずに試行錯誤して成功までたどり着けば、失敗は失敗でなくなります。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。

## イオン・超伝導・電子ハイブリッド量子系

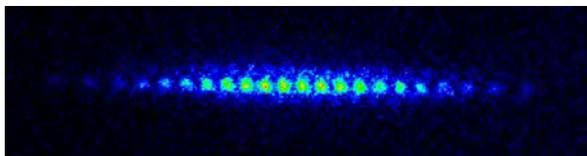


野口篤史 准教授

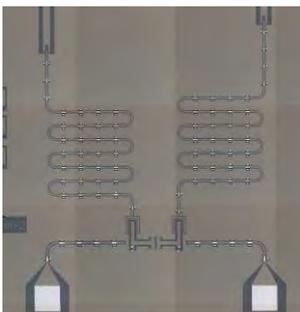
野口 篤史 准教授 Atsushi Noguchi, Assoc. Prof.

### 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

ippe-nakamura (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 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？

## 量子エレクトロニクス・量子光学



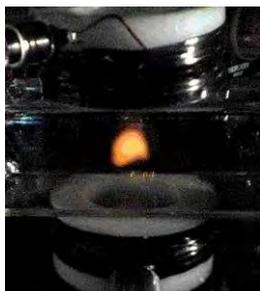
久我隆弘教授

久我隆弘 教授 Takahiro Kuga, Prof.  
竹内 誠 助教 Makoto Takeuchi, Assist. Prof.

量子エレクトロニクスは、レーザーを使って様々な量子現象を観測する研究分野です。その中でも、電磁場(光の場)を量子化して初めて説明できるような現象を研究する分野が量子光学と呼ばれています。

この分野では、コヒーレント状態、スクイーズド状態、エンタングル状態という光の様々な状態や、バンチング、アンチバンチングなどの光の性質、ポアソン光、サブポアソン光などの光子統計性など、**光そのものの本質に迫る研究**が進められています。また、周波数、偏光などを高度に制御したレーザーを使って**中性原子気体を極低温に冷却**する技術、**ドレスト原子の分光**、**電磁誘起媒質透明化**、**共振器量子電気力学的効果**、**原子気体ボース・アインシュタイン(BE)凝縮**などの、**光と原子との相互作用(電磁相互作用)の基本を解き明かす研究**も盛んに行われています。私たちの研究室でも、これらの研究を精力的に進めています(太字のものが手がけた/ているテーマです)。

たとえば**中性原子のレーザー冷却**は、レーザーの発振周波数や偏光などを高度に制御することで、気体原子をほんの数秒の間に数マイクロケルビン( $\mu\text{K}$ )といった極低温にまで冷却する技術です。写真は、**磁気光学トラップ**という手法でルビジウム(Rb)原子を $50\mu\text{K}$ 程度まで冷却した様子で、中央のオレンジ色の塊が冷却された Rb 原子集団です。

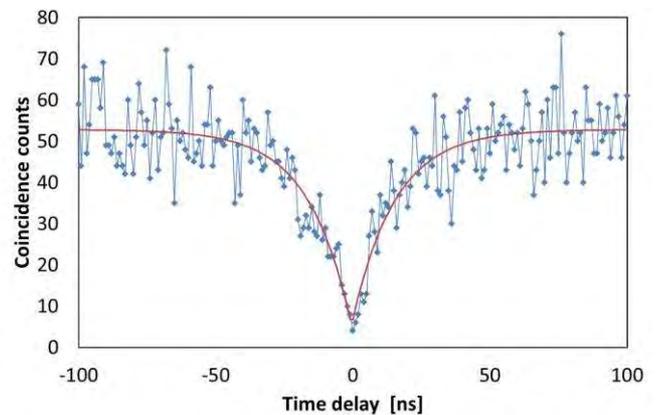


また、レーザー冷却された中性原子を磁場中に捕獲し、蒸発冷却という手法でさらに冷却すれば、**原子気体 BE 凝縮**という量子縮退した状態を作り出すことができます。当研究室

は、1998年に日本で初めて原子気体 BE 凝縮に成功しました。その後、**コヒーレント原子波増幅**、**超放射的ラマン散乱**などの研究を続けましたが、2011年に実験装置を他大学に譲渡し、BE 凝縮関係の研究は終了しました。

以上のような、世界的にも「人気のある」研究に限らず、**新しい分野を切り開くような研究**にも取り組んでいます。

たとえば、**より簡便な単一光子源開発**や**波動光学による量子状態の時間発展の可視化**です。前者では、コロイド量子ドットと呼ばれる化学的に大量に合成できる半導体ナノ粒子を用い、非常にシンプルな単一光子源を実現しました。発光の強度相関に現れる**アンチバンチング**(下図、時間遅れゼロの部分の同時計数がゼロ近くにまで落ち込むこと)が、単一光子源の



証となっています。より効率的に発光を集めることで、**量子暗号通信**や**量子演算**の実現に結びつけることができます。

いっぽう、後者は、近軸ヘルムホルツ方程式(波動光学)とシュレーディンガー方程式(量子力学)とが同型であることを利用したもので、量子状態の時間発展を光ビームの空間伝播形状変化として可視化するものです。さらに、波動光学におけるウィグナー関数を再構築することにより、通常では実行することの難しい**量子光学実験を波動光学で再現**します。

また、本学の 1、2 年生向けの**基礎物理学実験**にも深く関与しており、実験指導を担当するばかりでなく、新種目開発なども行っています。右の写真は、コンピューターをベースにした減衰振動・強制振動の実験装置です。



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

連絡先 (電話番号は 03-5454-を最初に付ける)

教授 久我隆弘 16 号館 223B 号室 TEL -6530  
kuga (at) phys.c.u-tokyo.ac.jp

助教 竹内 誠 16 号館 121 号室 TEL-6550  
takeuchi (at) phys.c.u-tokyo.ac.jp

## 修士論文・博士論文の題目

- ・ 光の空間的自由度を利用した量子光学実験の再現
- ・ 半導体ナノ粒子が放出する単一光子の強度相関とスペクトル
- ・ 光ナノファイバーを用いた分光系の開発
- ・ 単一原子観測に向けたナノファイバリング共振器の作製

## 主な著書

- 1) “測る”を究めろ！—物理学実験攻略法、(丸善 2012).
- 2) 量子光学 (朝倉書店 2003).
- 3) レーザー冷却とボーズ凝縮、岩波講座「物理の世界」(岩波書店 2002).

## 主な原著論文

- 1) A simplified 461-nm laser system using blue laser diodes and a hollow cathode lamp for laser cooling of Sr, Yosuke Shimada *et al.*, Rev. Sci Instr. **84**, 063101-1-7 (2013).
- 2) Carbon nanotube/polymer composite coated tapered fiber for four wave mixing based wavelength conversion, Bo Xu *et al.*, Optics Express, **21**, 3651-3657 (2013).
- 3) Photodetachment of Positronium Negative Ions, K. Michishio *et al.*, Phys. Rev. Lett. **106**(15), 153401 (2011).
- 4) Saturated absorption spectroscopy of acetylene molecules with an optical nanofiber, M. Takiguchi *et al.*, Optics Letters, **36**(7), 1254-1256 (2011).
- 5) Precise intensity correlation measurement for atomic resonance fluorescence from optical molasses, K. Nakayama *et al.*, Optics Express, **18**, 6604-6612 (2010).
- 6) Holographic storage of multiple coherence gratings in a Bose-Einstein condensate, Yutaka Yoshikawa *et al.*, Phys. Rev. Lett., **99**(22), 220407-1-4 (2007).
- 7) New High-Efficiency Source of Photon Pairs for Engineering Quantum Entanglement, K. Sanaka *et al.*, Phys. Rev. Lett., **86**(24), 5620 (2001).
- 8) Novel optical trap of atoms with a doughnut beam, T. Kuga *et al.*, Phys. Rev. Lett., **78**(25), 4713-4716 (1997).
- 9) Laser Excitation of the Muonium 1S-2S Transition, S. Chu *et al.*, Phys. Rev. Lett., **60**, 101-104 (1988).

## 学生へ一言

当研究室は「**一人一芸**」をモットーにして、大学院生一人に一つのテーマを割り振り、各人の創意や工夫を尊重した形で研究を進めております。もちろん、修士課程の1年生にいきなり研究テーマを与えても、最初は何をどうしてよいのかも分からないでしょうから、まずは実験的な技術や理論的な背景などの基本的な部分をみっちり教育します。そして、院生と教員との間でさまざまな意見を交わした上で、院生自身が納得し、主体的に取り組んでいけるような題材を研究テーマと定めます。

私の最大の役割は、大学院生が自由に研究を進めていく環境を整えることですので、既存の枠にとらわれない自由な発想と意欲のある人は大歓迎です。

## 原子物理学・レーザー冷却実験



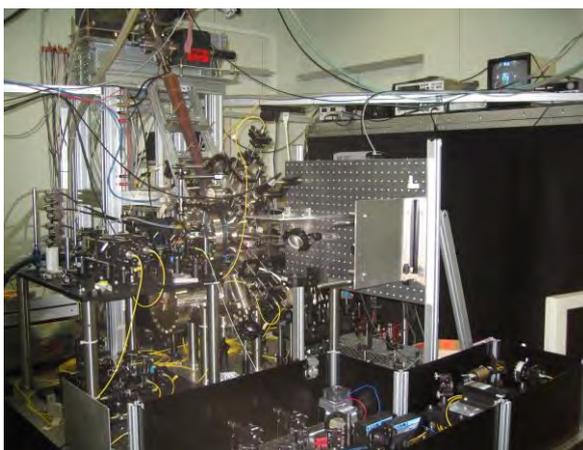
鳥井寿夫教授

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。



$T_C = 500$  nK

pure BEC

2mm

(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。

### レーザー冷却を用いた量子縮退気体の研究、極低温分子の生成および電子の電気双極子モーメント (eEDM) の探索

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。特に、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、これはスイス 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。我々は、光や磁場を用いて、これら冷却原子から人工的に冷却分子を生成することで、冷却分子を用いた 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

- ・ 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 Sr<sub>2</sub> 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
- ・ ホローカソードランプを用いた Sr<sup>+</sup> イオンの 5S<sub>1/2</sub> - 5P<sub>1/2</sub> 遷移のドップラーフリー分光
- ・ レーザー冷却のためのホローカソードランプを用いた Sr 原子の分光
- ・ モンテカルロシミュレーションによる Sr 原子の狭線幅レーザー冷却の研究

## 主な著書

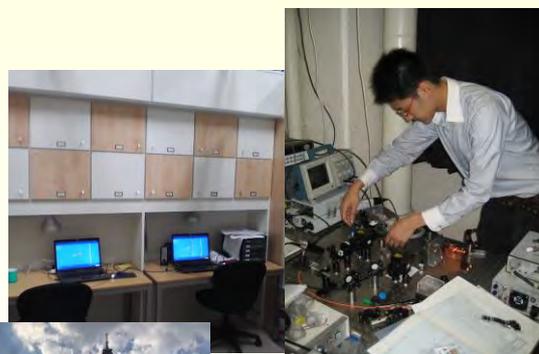
1. 青木貴稔、鳥井寿夫 他、「標準模型を超えた新物理を探索するための原子パリティ非保存効果の精密周波数測定」電気学会 電子回路研究会 ECT-18-060-1-6 (2018).
2. 鳥井寿夫「ボース・アインシュタイン凝縮」数理科学 2014 年 2 月号

## 主な原著論文

1. 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).
2. Optical-lattice-based method for precise measurements of atomic parity violation, A. Kastberg, T. Aoki, *et al.*, Phys. Rev. A **100**, 050101(R) (2019).
3. 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).
4. Parity-nonconserving interaction-induced light shifts in the 7S<sub>1/2</sub>-6D<sub>3/2</sub> transition of the ultracold <sup>210</sup>Fr atoms to probe new physics beyond the standard model, T. Aoki, Y. Torii *et al.*, Appl. Phys. B **123**, 120 (2017).
5. Photoionization loss in simultaneous magneto-optical trapping of Rb and Sr, T. Aoki, Y. Yamanaka, M. Takeuchi, Y. Torii, and Y. Sakemi, Phys. Rev. A **87**, 063426 (2013).

## 学生へ一言

レーザー冷却・ボース凝縮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で参加するだけでなく、自ら問題を見つけ、それを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

## 人間の脳機能の解明



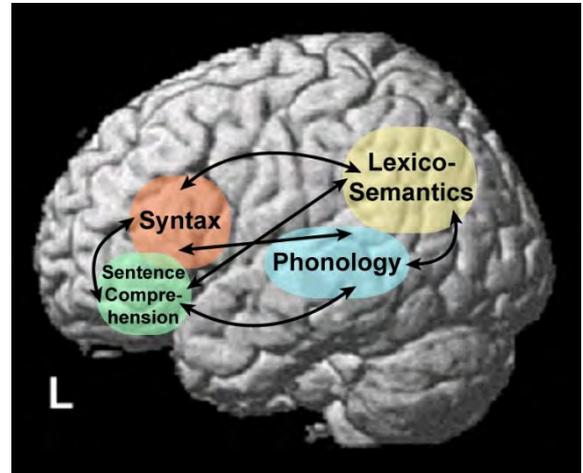
酒井邦嘉教授

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。

研究室 HP <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@sakai-lab.jp

## 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

第二言語習得における背側および腹側言語関連経路の機能解剖学

新たに言語を習得する際における多言語話者に特異的な神経基盤の解明

海外における第二言語習得によって生じる局所的な脳活動の減少

文処理における統辞関連ネットワークの再現性と可変性

### 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）

### 主な原著論文

- 1) Sakai, K. L.: Language acquisition and brain development. *Science* **310**, 815-819 (2005).
- 2) Kinno, R., Ohta, S., Muragaki, Y., Maruyama, T. & Sakai, K. L.: Differential reorganization of three syntax-related networks induced by a left frontal glioma. *Brain* **137**, 1193-1212 (2014).
- 3) Yamamoto, K. & Sakai, K. L.: Differential signatures of second language syntactic performance and age on the structural properties of the left dorsal pathway. *Front. Psychol.* **8**, 829, 1-13 (2017).
- 4) Tanaka, K., Nakamura, I., Ohta, S., Fukui, N., Zushi, M., Narita, H. & Sakai, K. L.: Merge-generability as the key concept of human language: Evidence from neuroscience. *Front. Psychol.* **10**, 2673, 1-16, (2019).

### 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、脳に刻まれた言語の規則性です。

## 生命システムの物理学



澤井哲 教授

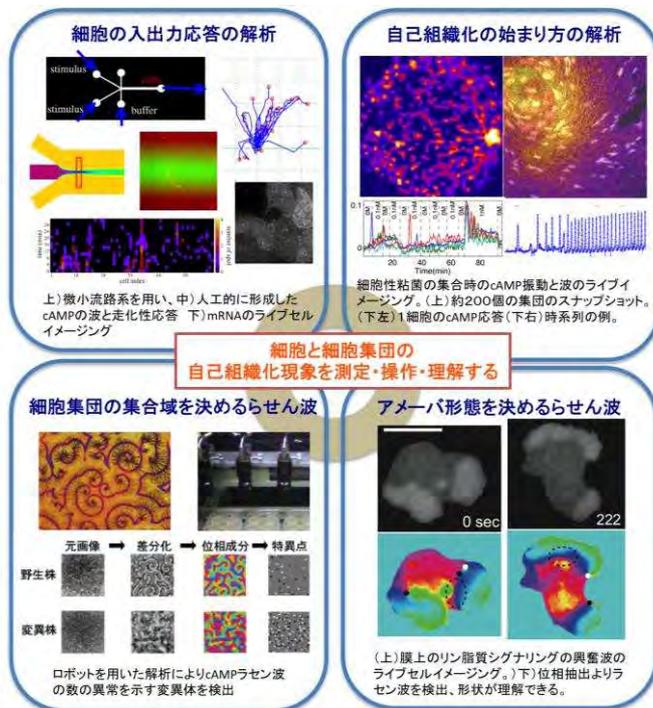
澤井哲 教授 Satoshi Sawai, Prof.

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、空間的变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討し、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、回転がいかんして利用され、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<sup>‡</sup>, S. Ishihara<sup>‡</sup>, 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. (<sup>‡</sup> 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。



## 生と死の生物物理学



若本祐一准教授

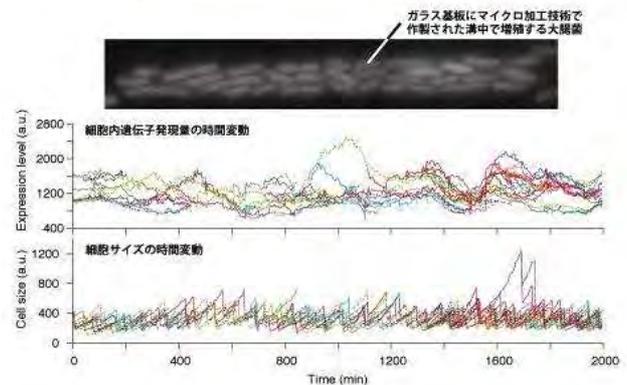
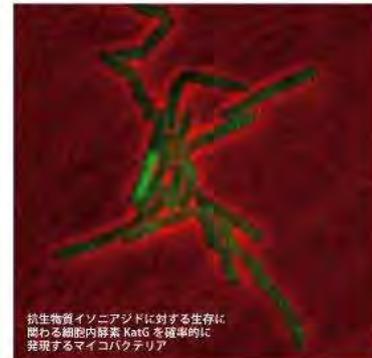
若本祐一 准教授 Yuichi Wakamoto, Assoc. Prof.

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？我々は、微細加工技術、顕微鏡観察技術、理論モデル、データ解析、分子生物学、遺伝学、進化学などの専門知識、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、好環境であま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ガン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。

### 細胞系譜の統計理論

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たとしても、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 (Selection)」が起きます。

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

### 連絡先

准教授 若本祐一 16号館 330

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

このような集団内の自然選択の発生は、内部の個体に何らかの状態差がある増殖システムでは、不可避かつ普遍的な性質です。そして自然選択は、集団全体で観察される諸量の統計的性質と、細胞が本来もっている内因的な統計的性質とのあいだに差を生じさせます。

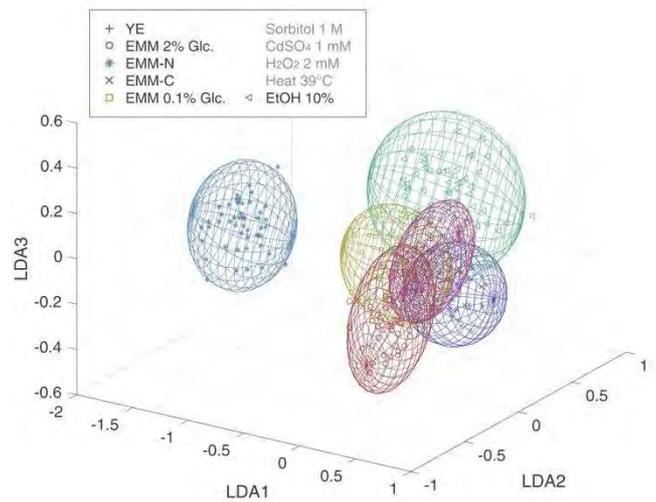
我々の研究室では最近、定常的に増殖する細胞集団内の1細胞レベルの成長ゆらぎを、おそらく世界で最も高い精度で計測し、1細胞時系列と細胞集団の統計量における、一種のエルゴード性の破れを示しました(Hashimoto, et al. PNAS 2016)。また、逆にこの「ブレ」の程度を評価することで、細胞の内因的な性質が従う統計量と、それにバイアスをかける自然選択の強度(Selection strength)を定量できる統計理論を作りました(Nozoe, et al. PLoS Genet 2017)。

### 生きた細胞内で起こるオミクス状態の変化をとらえる

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、様々な分子の量がダイナミックに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定量することは、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)。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) Linear Regression Links Transcriptomic Data and Cellular Raman Spectra. Cell Systems, 7, 104-117.E4 (2018).
- 2) Aging, mortality, and the fast growth trade-off of *Schizosaccharomyces pombe*. PLoS Biology, 15, e2001109 (2017).
- 3) Inferring fitness landscapes and selection on phenotypic states from single-cell genealogical data. PLoS Genetics, 13, e1006653 (2017).
- 4) Noise-driven growth rate gain in clonal cellular populations. PNAS, 113, 3251-3256 (2016).
- 5) Bacterial autoimmunity due to a restriction-modification system. Current Biology, 26, 1-6 (2016).
- 6) Single-cell dynamics of the chromosome replication and cell division cycles in mycobacteria. Nat. Commun. 4, 2470

### 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大学院生やポスドク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、メンバー間で教え、教えられということが日常的に起こっていて、私自身も刺激を受けています。



### 現在の研究室の構成

若本祐一 (准教授)、中岡秀憲 (助教)、博士研究員 1 名、博士課程学生 3 名、修士課程学生 1 名、学部 4 年生 1 名、技官 1 名

## 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.

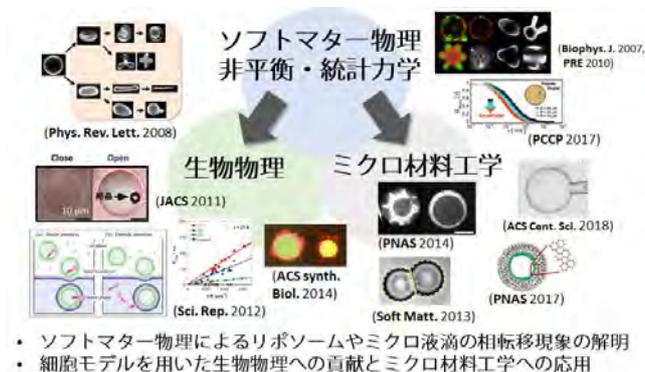
柳澤研究室では、(a) 細胞サイズ空間に閉じ込められたソフトマターの物性研究と、その知見をもとに (b) 生命現象の物理的理解や (c) 新規マイクロ材料創成を目指す研究を行っている。具体的には、人工細胞として汎用されるリン脂質膜小胞（リポソーム）やマイクロ高分子液滴、マイクロ高分子ゲルを研究対象とし、細胞サイズ（マイクロメートル）特有の物性や相転移現象の解明を目指している。本目的のために、イメージング技術や粘弾性測定技術、微細加工技術などを用いた測定と解析を行っている。またこの知見や技術を、生命現象の物理的理解へ適応したり、新規マイクロ材料の開発に役立てたりすることで、生物物理学や工学へも寄与している。

### (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、一般に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、人工細胞を用いた構成論的研究から、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周辺で変化する。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8倍まで上昇する[1]。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。こうした現象と、タンパク質の構造転移（フォールディング）、生体内の高エネルギー効率、細胞内液-液相分離といった生体機能との相関関係を、生物系の研究者らとの共同研究を介して調べている。

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、細胞内の分子拡散はアクティビティー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とが報告されている。こうした背景から、細胞質の力学的特性（粘弾性）を物理の立場から解明しようとする研究が近年活発化してきている。我々は、細胞内高分子濃度とほぼ等しい生体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（FCS）から内部の局所的な分子拡散を求めた。その結果、高濃度高分子存在下では、細胞サイズ以下で異常拡散となることを見出した[2]。この結果は、細胞の構造的特徴が細胞内の分子拡散やその活性へ強く影響することを示唆している。現在、オルガネラ等の細胞内構造や細胞間の物質輸送といった非平衡環境が、この異常拡散へ及ぼす影響を解析している。

こうした研究を介して、人工細胞と生物細胞との違いを明確化し、生命と物質との違いを物理的に理解したい。

### (b) 人工細胞による細胞や組織の形の再現・物理的記述

リポソームは、その高い生体親和性から、医薬品や化粧品など多くの日用品に汎用されるだけでなく、古くから人工細胞として汎用されてきた。例えば、高浸透圧下での脱水や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、熱力学的な平衡状態として記述できることから、物理学の研究対象としても活発に研究されてきた[5]。しかし、膜のみからなる人工細胞は、細胞がもつ細胞質や細胞骨格を持たないため、全ての細胞形状を再現することできない。また、カプセルとして応用する上でも、内包物を目的の場所へ輸送する前に崩壊してしまう等、脆弱性が指摘されてきた。

<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

こうした背景から我々は、リポソーム内部へ細胞質のモデルとして高濃度高分子溶液を添加した系や、DNA ナノテクノロジー技術を応用して細胞骨格モデルを付与した系を展開してきている[3]。現在も、人工細胞を用いて内部の力学的特性が支配する細胞の変形原理の解明を目指している。さらに、孤立した細胞だけでなく、マイクロ流路デバイス中で複数の人工細胞を互いに膜接着させることで、細胞組織の形の成り立ちを理解する試みも始めている。

### (c) 細胞模倣によるマイクロ材料創成

細胞の構造的特徴を模倣したり、上記(a, b)の研究で用いた人工細胞を活用したりすることで、新規のマイクロ材料を創成

することにも挑戦している。

細胞内には、液状の細胞質だけでなく、アクチン等からなるゲル状の細胞骨格も存在している。こうしたマイクロ空間での液体と固体（ゲル）との共存状態を模倣することにより、マイクロゲルの形を温度のみで変化させたり[4]、閉じ込めサイズのみでゲルの硬さを変化させたり[1]することができるを見出した。こうした変化は、マイクロ空間閉じ込めに伴うゲル化高分子と膜界面との相互作用（濡れ性や親和性）、ゲル化と相分離の進行速度の差といった、物理的パラメーターによって生じる。今後は、マイクロ空間でのゲル化や相転移の基礎研究と対応付けながら、ゲル化空間を介したゲルの形や力学特性の制御法を確立したい。

### 主な修士論文・博士論文題目

- 「高濃度溶液と微小体積による細胞内混雑環境の再現から異常拡散の解明に向けて」
- 「DNA ナノテクノロジーを用いた人工細胞の力学的制御」
- 「マイクロ流路デバイス中での液滴シート形成メカニズム」

### 主な解説記事

- 1) 柳澤実穂, **日本物理學會誌** 68:534-537 (2013), 「脂質膜小胞における膜内相分離と膜変形」
- 2) 柳澤実穂, 藤原慶, **生物物理学会誌** 55 (5), 246-249 (2015), 「高分子混雑効果を人工細胞系から読み解く」
- 3) 黒川知加子, 柳澤実穂, 瀧ノ上正浩, **月刊化学** 2018年1月号, 40-43 (2017), 「骨格で支えられた頑丈な人工細胞」

### 主な原著論文

- 1) 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"
- 2) C. Watanabe & M. Yanagisawa, **Phys. Chem. Chem. Phys.**, 20:8842-8847 (2018) "Cell-size confinement effect on protein diffusion in crowded poly(ethylene)glycol solution"
- 3) C. Kurokawa, et al., **PNAS**, 114:7228-7233 (2017), "DNA cytoskeleton for stabilizing artificial cells"
- 4) M. Yanagisawa, et al., **PNAS**, 111:15894-15899 (2014), "Multiple patterns of polymer gels in microspheres due to the interplay among phase separation, wetting, and gelation"
- 5) M. Yanagisawa, et al., **J. Am. Chem. Soc.**, 133:11774-11779 (2011), "Oriented Reconstitution of a Membrane Protein in a Giant Unilamellar Vesicle: Experimental Verification with the Potassium Channel KcsA"

### 学生へのメッセージ

2019年1月に発足したばかりの研究室です。これまでは、生命現象や身近なソフトマターに興味を持つ「物理学、化学、工学」を専門とするメンバーで構成され、それぞれの興味に従って研究テーマを決めてきました。物理・化学・生物の境界にある「ソフトマター物理学」や「生物物理学」は、あまり馴染みがなく、想像しづらいかもしれません。少しでも興味を持たれた方は、ぜひ気軽に研究室見学に来てください。百聞は一見に如かずです！

### 現在のラボメンバー

渡邊千穂 (特任助教), 前職の東京農工大学から外部研究学生: 酒井淳 (D3), 小柳佳介 (M2), 小堀雄大 (M2), 小林瑞輝 (M1), 春澤香苗 (M1), 富田和甫 (M1)

## 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ている。

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

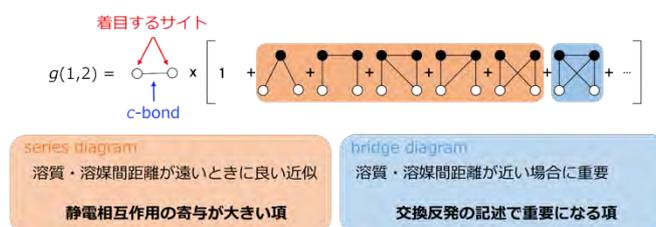


diagram をしっかり取り込んでいる一方で、交換反発の記述で重要になる bridge diagram の取り込みが弱い問題があった。我々は、新しい bridge 関数を提案することで、物理化学的により正しい理論を構築することに成功した。この手法を用いることにより、従来法よりも精確に溶媒和自由エネルギーを算出することに成功した。

## 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

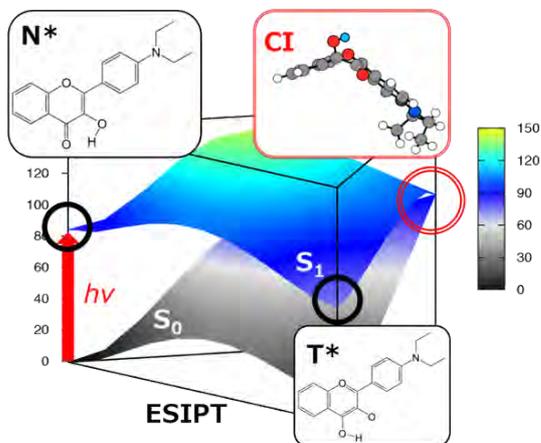


図 1. 4'-*N,N*-diethylamino-3-hydroxyflavone の  $N^*$ 体から  $T^*$ 体、円錐交差点(CI)への構造変化に伴う、基底状態( $S_0$ )、ならびに励起状態( $S_1$ )のエネルギー曲面

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.jp

## 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。



真船文隆教授

真船文隆 教授 Fumitaka Mafuné, Prof.  
(協力)宮島 謙 講師 Ken Miyajima, Lecturer

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？

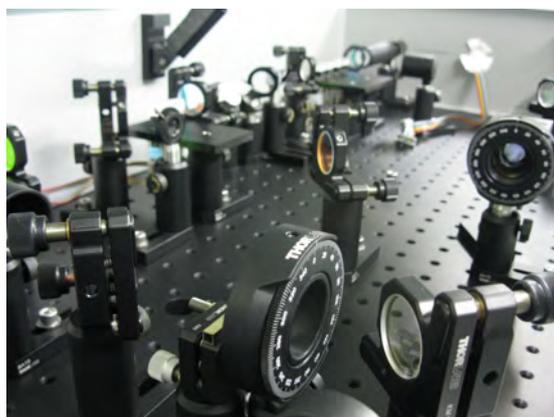
白金やロジウムなど、いわゆる高価な稀少元素を用いないで、別の元素でその働きを実現させることはできないか ———まさに 21 世紀錬金術プロジェクトが「熱く」進行中である。

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、N<sub>2</sub> や CO<sub>2</sub> 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

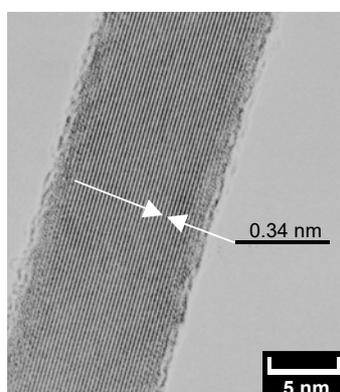
塊としては安定で反応性に乏しい貴金属でも、ナノメートルスケールに微小化することにより、それまでにはない新しい性質が発現する。さらに、これらの新しい性質は、サイズによって顕著に変化する。したがって、ある決まったサイズをもってナノスケール物質を生成し、その性質を明らかにする、さらにそのサイズを変化させて性質のサイズ依存性を調べることは化学として重要である。またその次の段階として、これら単体のナノスケール物質の構造を自由に操作し、さらに小さくするあるいは任意の形に組み上げることができれば、さらに多様性をもった物質を作ることができる。我々はパルスレーザーを用いて、ナノ粒子の温度、荷電状態を操作する

<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が(通称 FELIX)がある。この FELIX は、 $100\text{ cm}^{-1}$ 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) Electron Donation from Cu Atoms to Al Oxide Clusters Upon Mixing Revealed by Thermal Desorption Spectrometry, Mafune, Fumitaka; Zhang, Yufei; Liu, Xinan; Wang, Haohao; Kudoh, Satoshi, *J. Phys. Chem. C* **2020**, 124, 1, 659-667.
- 2) Hydrophilicity and Oxophilicity of Isolated  $\text{CaMn}_4\text{O}_5$  Cationic Cluster Modeling Inorganic Core of Oxygen-Evolving Complex, Zhang Yufei, Daigo Masuzaki, Fumitaka Mafuné, *Chem. Comm.* 55, 14327-14330, **2019**.
- 3) Effect of Atomicity on Oxidation of Cationic Copper Clusters Studied Using Thermal Desorption Spectrometry, Haohao Wan, Ken Miyajima, Satoshi KUDoh, Fumitaka Mafuné, *Phys. Chem. Chem. Phys.* **2019**, 21, 23129-23135.
- 4) Liquid Phase Pulsed Laser Ablation on Pyrite, Yuka Motohashi, Yumi Yakiyama, Fumitaka Mafuné, Hajime Okajima, Akira Sakamoto, Toshihiko Shimizu, Yuki Minami, Nobuhiko Sarukura, Hidehiro Sakurai, *Chem. Lett.* **2019**, 48, 712-714.

### 研究室のメンバー

(2020年4月現在) 教授1名、講師1名(協力)、博士研究員1名、大学院生5名

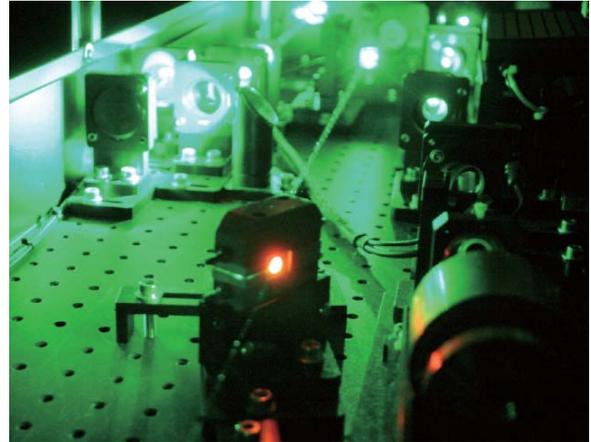
### 学生の皆様へ一言

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。

## 高強度光科学・分子科学



長谷川宗良准教授



チタンサファイア再生増幅器

長谷川宗良 准教授 Hirokazu Hasegawa, Assoc. 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操作に応用可能なもの、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もの、そして多重イオン化やクーロン爆発といった科学的に興味深い現象などである。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、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。

### 陽イオン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、レーザー強度と波長および分子のイオン化ポテンシャルに依存して、多光子イオン化もしくはトンネルイオン化（もしくはfield ionization）の2種類のメカニズムに分類できる。この2つのメカニズムを滑らかに接続して、高強度レーザー光によるイオン化メカニズムを明らかにしたい。また、短波長光による1光子イオン化との相違の有無を見だし、高強度レーザー光に特有な現象を、生成した多価イオンの内部状態計測から明らかにする。

### 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、イオン分光による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、また赤外分光による振動バンドから、多価イオンの電子・振動・回転状態分布を計測する。これらの方法は中性分子に対してなじみの手法であるが、イオンを対象とするため、サンプル濃度、

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

連絡先

准教授 長谷川宗良 16号館 509B号室 5465-7697  
chs36@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp

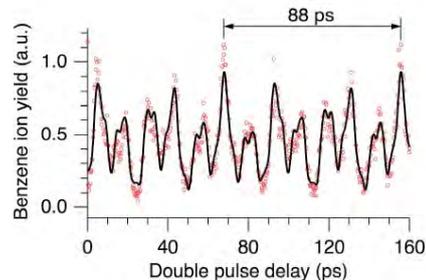
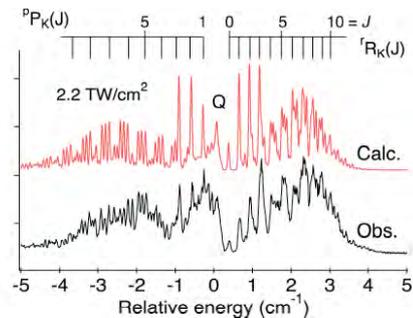
波長領域によっては適用が難しくなる。このための、新しいイオン分光法を開発する。

### 分子制御

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（右図参照）。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、分子軸の空間分布を積極的にコントロールしたい。このような空間に配列・配向した孤立分子は立体化学反応の格好のモデル系となる。これと同様に、分子の構造変形・解離過程もレーザーのパラメーターを制御することで変化させることができる。さらに、光を用いた積極的な単分子反応の制御も期待できる。レーザーのあらゆる自由度を用い、分子を自由自在に制御することを目指す。

### 目指すところ

当研究室の研究内容は、光とくに「レーザー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）を、実験的に観測し、そのメカニズムを解明したいと思っている。そして得られた知見をもとに、望みの分子制御（構造変形、配列・配向、解離反応）を行うための最適な光波形を予測・生成し、これを用いて分子制御をおこないたい。



高強度レーザー光を照射したベンゼンの励起スペクトル（上）  
ポンプ-プローブ法によるベンゼンの回転運動の追跡（下）



上図の結果から再構築した回転波動関数

### 主な原著論文

- 1) Isotope-selective ionization utilizing field-free alignment of isotopologues with a train of femtosecond laser pulses, *Phys. Rev. A*, **91**, 063416 (2015).
- 2) Quantum unidirectional rotation directly imaged with molecules, *Science Advances*, **1**, e1400185 (2015).
- 3) Spectroscopic study on deuterated benzenes. II. High-resolution laser spectroscopy and rotational structure in the  $S_1$  state, *J. Chem. Phys.*, **143**, 244303 (2015).
- 4) Unveiling the nonadiabatic rotational excitation process in a symmetric-top molecule induced by two intense laser pulse, *J. Chem. Phys.*, **134**, 224302 (2011).
- 5) Controlling the sense of molecular rotation: Classical versus quantum analysis, *Phys. Rev. A*, **83**, 023423 (2011).
- 6) Coherent rotational excitation by intense nonresonant laser fields, *Int. Rev. Phys. Chem.* **29**, 619-663 (2010).

### 学生へ一言

2010年9月にできた新しい実験研究室です。一緒にゼロから研究室を立ち上げる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、自然への理解がってきます。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。ぜひ一緒に研究しましょう。

## 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

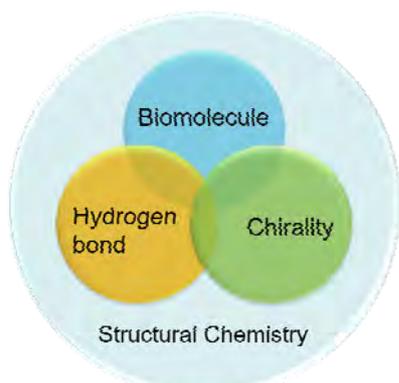


図1 研究室での研究対象

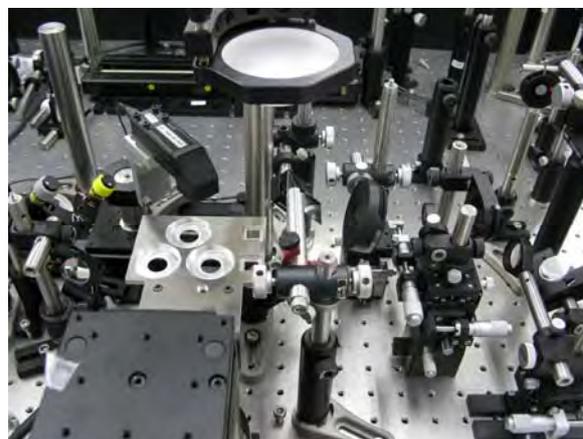


図2 キラル和周波発生の装置

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。

(1) **キラリティー**は物質の持つもっとも根源的な物性であるにもかかわらず、測定手法が限定されており、研究が進んでいないのが現状です。偶数次非線形過程に基づく二次高調波発生や和周波発生を利用すると、反転対称性の破れた系のみ信号が得られます。この性質を利用し、キララな分子系の高感度検出が可能です。現在で研究室では電子状態のキラリティーを超高感度に検出可能な、非線形分光装置の開発に取り組んでいます。

(2) **水溶液中の水和環境**はいまだに未解明な点が多く残されています。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。本研究室では、ハイパーラマン分光法の可能性にいち早く着目し、世界に先駆けて質の高いスペクトルを取得可能な装置を立ち上げ、興味深いデータを得ています。また、国内外の計算化学者と協力することによって、実験データから複雑な分子構造・ダイナミクスを抽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。

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

連絡先

准教授 奥野将成 16号館 407

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

## 生体分子の分子分光

ラマン分光やハイパーラマン分光を用いて、生体関連分子の研究を行っています。たとえば、共鳴ラマン効果を用いれば、 $\mu\text{M}$  レベルの濃度を持った分子を、顕微鏡の空間分解能(～数 100 nm) で検出可能です。また、ハイパーラマン分光による生体分子の測定はほとんど行われておらず、その基礎的な知見も全くありません。このように未開拓な生体分子への分子分光研究によって、基礎的な分光学的知見から、イメージングのような応用までを視野に入れた研究を行っています。

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 顕微ラマン分光装置

### 主な著書・総説

- 1) 「非線形分子分光法による生体関連分子の分析:生細胞のラベルフリー・イメージングと界面における生体分子の分子構造」, バイオマテリアル, 37(4) (2019).
- 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).
- 3) 「多焦点共焦点ラマン分光顕微鏡の開発と生細胞の高速振動スペクトルイメージング」, 応用物理, 80, 0975-0978 (2011).

### 主な原著論文

- 1) "Hydrogen-bonds and Molecular Orientations of Supramolecular Structure between Bartiburic Acid and Melamine Derivative at the Air/water Interface Revealed by Heterodyne-detected Vibrational Sum Frequency Generation Spectroscopy", *The Journal of Physical Chemistry Letters*, **11**, 2242 (2020).
- 2) "Molecular Orientations and Conformations of Air/Fluoroalkyl Acrylate Polymer Interface Studied by Heterodyne-detected Vibrational Sum Frequency Generation Spectroscopy", *Macromolecules*, **52**, 8705 (2019).
- 3) "Bulk-or-interface Assignment of Heterodyne-detected Chiral Vibrational Sum Frequency Generation Signal by its Polarization Dependence", *Journal of Chemical Physics*, **149**, 244703 (2018).
- 4) "Symmetric Raman Tensor Contributes to Chiral Vibrational Sum Frequency Generation from Binaphthyl Amphiphile Monolayers on Water –Study of Electronic Resonance Amplitude and Phase Profiles", *Journal of Physical Chemistry C*, **121**, 11241 (2017).
- 5) "Strong Frequency Dependence of the Vibrational Energy Relaxation in Bulk and Surface Water Reveals Picosecond Structural Heterogeneity", *Nature Communications*, **6**, 8384 (2015).

### 学生へ一言

この研究室は、2019年に立ち上がった非常に新しい研究室です。現在さまざまな装置を立ち上げ、「研究室をつかっていく」ところです。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、幅広い専門的知識を駆使して研究を進めていきます。レーザーや光学系などの物理・工学的、生体試料などの生物的、そして分子構造についての化学的な横断的な知識・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ます。また、基礎分子科学的テーマにとどまらず、研究室で開発した分光学的手法をさまざまな応用の場でも役に立てたいと強く考えています。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？

研究室紹介や公開もオンライン会議ツールで行うことも検討中です。研究室に興味をお持ちの方は、いつでも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、修士課程 1名、4年生 2名 (2020年4月現在)。



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 H<sub>2</sub> 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(H<sub>2</sub>O)、アンモニア(NH<sub>3</sub>)、メタノール(CH<sub>3</sub>OH)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、

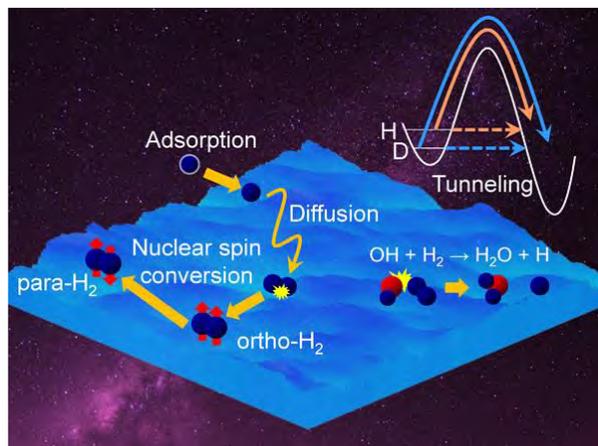


図 2 氷星間塵の表面物理化学過程。T. Hama, and N. Watanabe, Chem. Rev. 113, 8783-8839 (2013)より。この図は Chemical Reviews 誌の Front cover に採用された。

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。

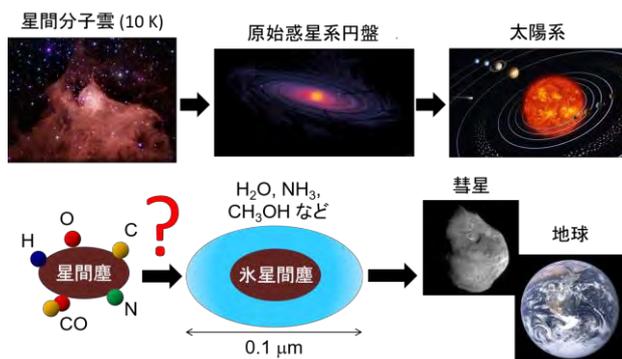


図 1 天体の進化と物質の進化。

<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、

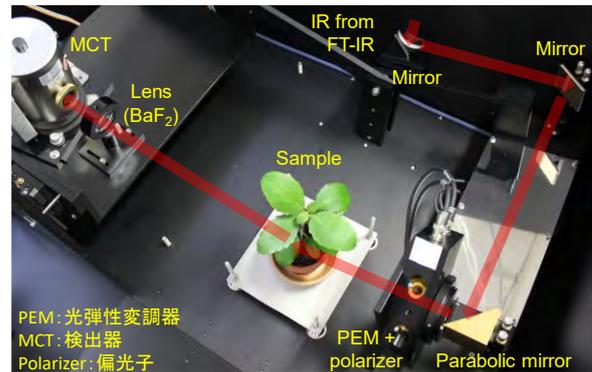


図3 偏光変調赤外反射吸収分光法によるセイロンベンケイの葉の測定の様子。

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) 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).
- 2) 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).
- 3) In Situ Nondestructive Analysis of *Kalanchoe pinnata* Leaf Surface Structure by Polarization Modulation Infrared Reflection Absorption Spectroscopy, The Journal of Physical Chemistry B 121, 11124-11131 (2017).
- 4) Fast Crystalline Ice Formation at Extremely Low Temperature through Water/Neon Matrix Sublimation, Physical Chemistry Chemical Physics 19, 17677-17684 (2017).
- 5) Statistical Ortho-to-para Ratio of Water Desorbed from Ice at 10 Kelvin, Science 351, 65-67 (2016).
- 6) 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).
- 7) Quantum Tunneling Hydrogenation of Solid Benzene and Its Control via Surface Structure, The Journal of Physical Chemistry Letters 5, 3843-3848 (2014).

### 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、卒研究生 1 名（2019 年度）

## 自己集合: 新たな分子デザインと秩序形成の機構



平岡秀一教授

平岡秀一 教授 Shuichi Hiraoka, Prof.

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、共有結合だけ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。平岡研究室では、分子自己集合に残された主に3つの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いと言われていいます。また、結合の弱さに加え、結合の方向性が乏しいことから、vdW力を共有結合のように使いこなすことはとても難しいことです。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、自発的に2 nmの立方体(ナノキューブ)が組み上がることを発見しました(図A)。驚くことにナノキューブは弱い相互作用のみで集まっているにもかかわらず、水の沸点をはるかに超

える130 °Cで分解し、vdW力は人間が考えていた程弱い結合ではなく、デザイン次第で、十分安定な構造体を作れることがわかりました。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も明らかになりました(図B)。

## 秩序形成の機構解明

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お互いをどのように認識し、最終的な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C)。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に由来します。我々は、自己集合の原系と生成系の全成分を定量することで、間接的に中間体の情報を得るといいう新しい手法(QASAP: Quantitative Analysis of Self-Assembly Process)を開発し、これまでに、20種類以上の自己集合性錯体の形成機構を解明してきました。これにより、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を明らかにしつつあります。また、機構解明に基づき、自己集合過程で生成する準安定種を主生成物として安定に生成させるなど、これまで合成できなかった新しい自己集合体を形成できることも明らかにしてきました。

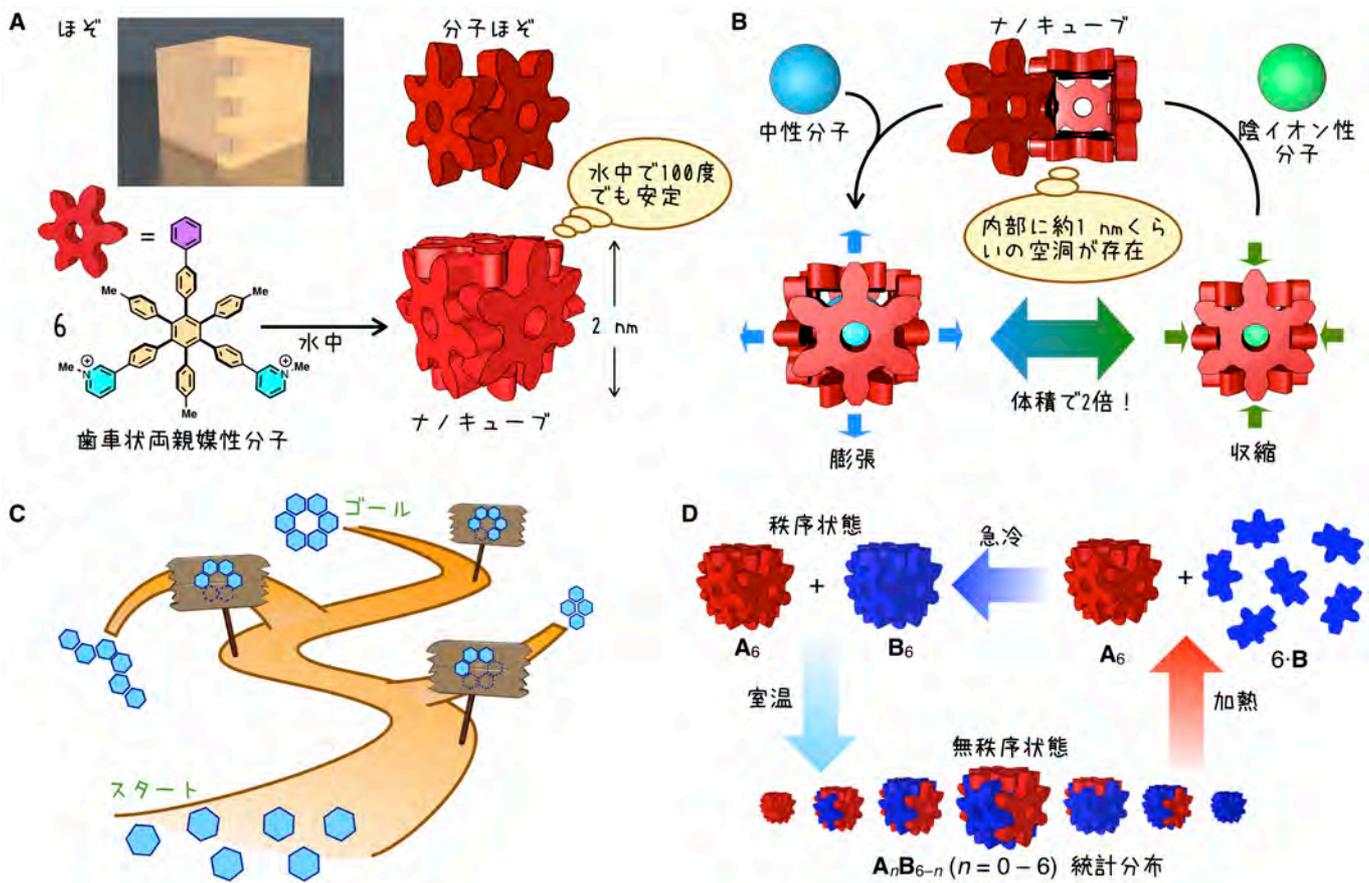
## 散逸系自己集合系の構築

本質的に分子自己集合体は化学平衡状態にあります。一方、我々生命は常にエネルギーを消費し、平衡状態から逃れようと活動しています。生命系では例えば、アクチンの重合・脱重合は化学エネルギーと共役し、片末端から重合し、反対では脱重合が起こっています。このような、より生命らしい散逸系の自己集合系を人工的に構築し、これらを組み合わせることで、化学システムとしての機構を持たせようとしています。手始めに、平衡系から離れた状態(out-of-equilibrate state)を作り、平衡系と行き来する系を構築しました(図D)。構造の似た二種類の構成要素(A, B)から自己集合体(A<sub>6</sub>, B<sub>6</sub>)を形成し、これらを混合すると、構成要素が統計分布したA<sub>n</sub>B<sub>6-n</sub>(n=0から6)が平衡状態ですが、熱エネルギーを使って秩序状態(A<sub>6</sub>, B<sub>6</sub>)と相互変換を繰り返し、さらに変換のタイミングをコントロールすることにも成功しました。

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

連絡先

教授 平岡秀一 15号館 203A号室 5465-7659  
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 Pd<sub>2</sub>L<sub>4</sub> 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 Pd<sub>6</sub>L<sub>4</sub> 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

新しい分子や化学システムのデザインや謎解きを通して、サイエンスを楽しみましょう!

## 研究室のメンバー

講師(1名), 助教(1名), D2(1名), D1(1名), M2(6名), M1(2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。

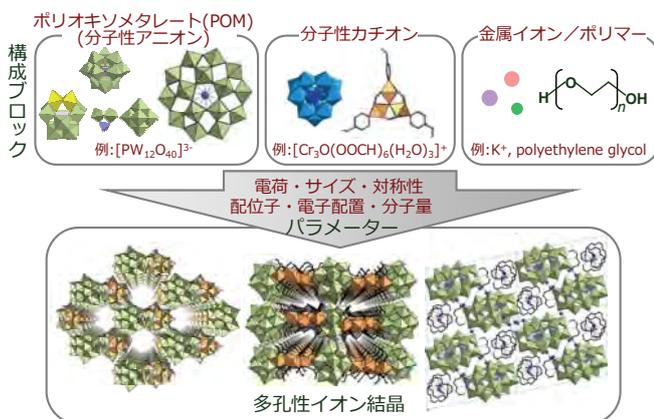


図1. 研究構想.

### 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  $[SiW_{12}O_{40}]^4$  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

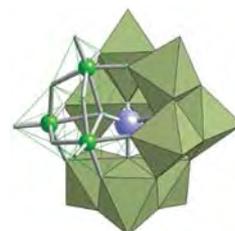


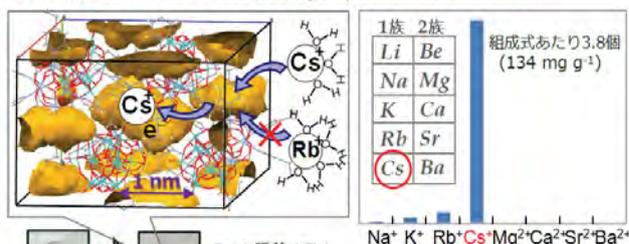
図2. ケギン型シリコングステート  $[SiW_{12}O_{40}]^4$  の分子構造. 緑色、紫色の球は、W、Siを示す.

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

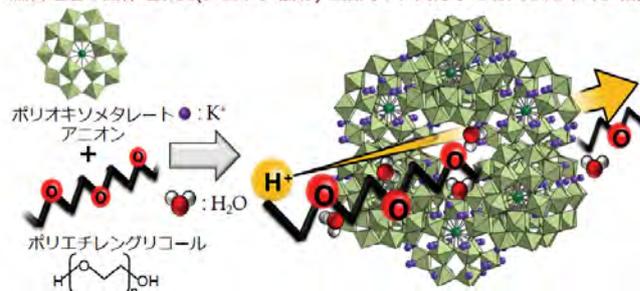


図3. 多孔性イオン結晶の機能.

<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。

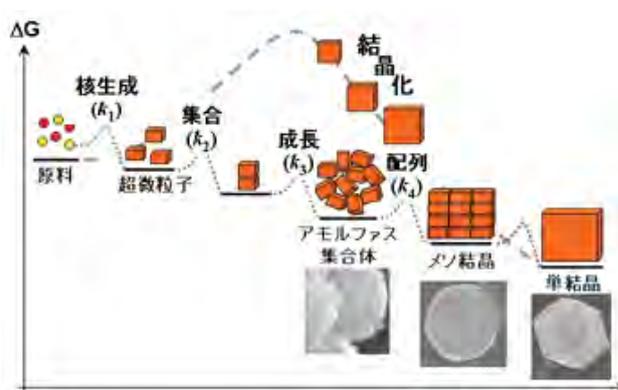


図4. 機能性固体の凝集・集積形態制御.

### 最近の論文題目

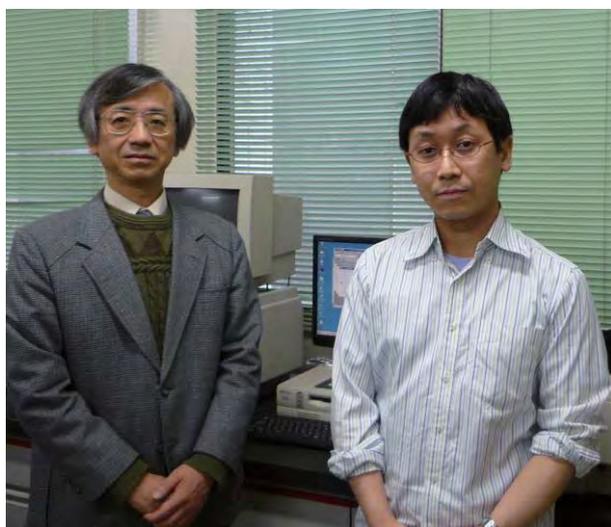
- 2016 年度(博士) “Keggin 型ポリ酸を用いた多孔性イオン結晶の創製と機能設計”
- 2016 年度(修士) “ポリマー含有 Preyssler 型ポリ酸による無加湿プロトン伝導体の創製”
- 2016 年度(修士) “レドックス型多孔性イオン結晶による銀の還元的導入”
- 2016 年度(学士) “多核水酸化アルミニウムイオンを前駆体とした超微粒子／多孔体の調製”
- 2016 年度(学士) “多孔性イオン結晶のカチオン交換とプロトン伝導機能”

### 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。



村田 滋教授と滝沢進也助教

村田 滋 教授 Shigeru Murata, *Prof.*

滝沢進也 助教 Shin-ya Takizawa, *Assist. Prof.*

緑色植物の光合成、視覚、日焼けなど私たちの身の回りには、光によって起こる化学反応がたくさんあります。一方で、光による高分子化合物の合成や超微細加工など私たちの生活を支える様々な材料や技術の分野にも光化学反応は欠かせません。光化学反応はまず、分子が光を吸収して高いエネルギーをもつ状態（励起状態）になることから始まり、多くの場合、たとえば百万分の一秒程度といったきわめて短い寿命しかない化学種（不安定中間体）の発生を含むいくつかの段階を経由して生成物に至ります。このような光化学反応の道筋を明らかにすることは、光が関わる様々な現象を化学的に理解し、さらに光を用いた新しい物質の創製や反応システムの構築のために、きわめて重要な研究です。

私たちの研究室では、有機化合物が関わる光化学反応の道筋やしくみを解明する観点から、いくつかの研究を行ってきました。最近では、緑色植物が営む光合成に強い興味をもち、化学の立場からその本質を理解してそれを再現しようとする、いわゆる「人工光合成」の研究に力を注いでいます。緑色植物は太陽光を吸収して、二酸化炭素と水から糖類を合成しています。この反応は化学的にみると、“光エネルギーを用いて自発的には起こらない酸化還元反応を進行させ、高い化学エネルギーをもつ物質を合成するエネルギー変換システム”とすることができます。私たちは、緑色植物がもつしくみを学びながら、このような反応システムを人工的に構築し、その効率を高めることを目的として研究を進めています。

具体的な研究手法として、光を吸収させるための色素（増感剤）や酸化還元反応の触媒となる有機化合物や金属錯体を

設計・合成し、様々な手段を用いてそれらの光化学的、および電気化学的性質を調べます。必要に応じて、分子軌道法に基づく理論計算を併用し、その物質の電子的な性質を理解します。さらにそれらを、脂質二分子膜などの反応場に組み込み、光水素発生や二酸化炭素光還元などのエネルギー蓄積型の光化学反応システムとして機能するかどうかを調べます。最近の成果を紹介しましょう。

### (1) ベシクルを反応場とする人工的な光-化学エネルギー変換システムの構築

光エネルギーによって酸化還元反応を進行させるためには、励起状態になった分子が電子を与えやすくなることを利用して電子移動を起こさせ、正電荷と負電荷が分離した状態（電荷分離状態）を形成させることが必須となります。この過程を効率よく進行させるために、光合成生物は膜組織を利用しています。セッケンに似た構造をもつ脂質分子を水に投入すると、多数の分子が集合化して球状の膜組織（ベシクル）を形成させることができます。私たちは、このベシクルを反応場に用いると、光によって安定な電荷分離状態を形成できることを見出しました（図1）。さらに、この反応によって膜の外側に運ばれた電子を用いて水を還元し、水素を発生させる光反応システムを構築することに成功しました。現在、反応効率を高めるための条件検討や、このシステムの二酸化炭素光還元系への応用を進めています。

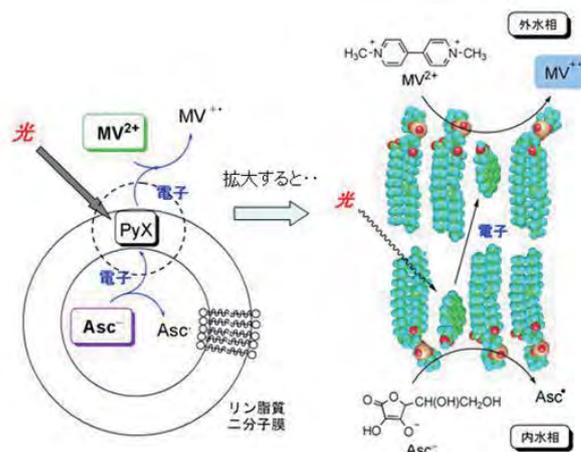


図1. 私たちが構築した光によって安定な電荷分離状態を形成させるシステムの模式図。光によって色素(PyX)が励起状態になり、内水相のアスコルビン酸(ビタミンC, Asc<sup>0</sup>)から外水相のメチルビオロゲン(MV<sup>2+</sup>)への電子移動が誘起される。

<http://maildbs.c.u-tokyo.ac.jp/~smurata/>

連絡先

教授 村田 滋 16号館 501A号室 5454-6596

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

助教 滝沢進也 16号館 502号室 5454-6599

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

## (2) 優れた光機能性をもつ新規金属錯体の開発

生体を構成する物質はほとんどが有機化合物ですが、微量に含まれる金属錯体も、生体機能に重要な役割を果たしています。自然界の光合成でも、マグネシウムや鉄、銅などの錯体が光吸収や電子移動を担う分子として働いています。このような観点から私たちは、人工光合成システムに利用できる優れた光機能性や触媒作用をもつ新しい金属錯体の開発を行っています。特に、これまで発光材料として使われていたイリジウム Ir 錯体の増感剤としての可能性に注目し、様々な Ir 錯体を合成して、その光機能性を調べています。たとえば、Ir にクマリン 6 という有機色素を結合させることにより、可視光領域にきわめて大きな吸収をもつ錯体の合成に成功しました (図 2)。太陽光を用いた光-化学エネルギー変換システムの有効な増感剤となることが期待され、研究を進めています。

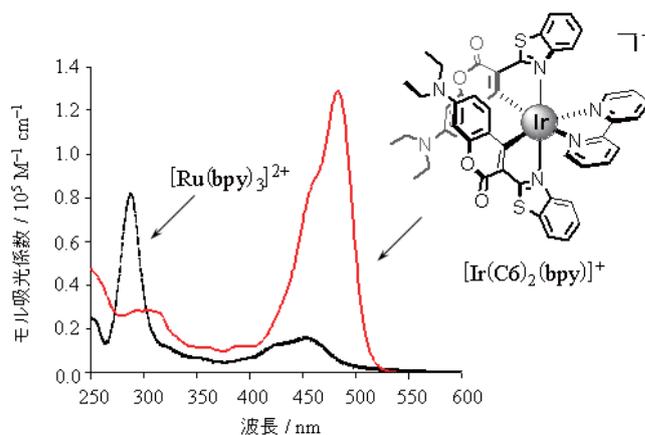


図 2. 私たちが開発した可視光領域に大きな吸収をもつイリジウム Ir 錯体の構造, およびその紫外可視吸収スペクトルにおける既存のルテニウム Ru 錯体との比較

### 修士論文・博士論文の題目

- 1) Novel Photoreactions by Use of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Mimicking Photosynthetic System (多環状芳香族炭化水素を用いる光合成をモデルとした新しい光反応系の構築)
- 2) A Study on Syntheses, Aggregation Behaviors, and Photochemical Properties of Amphiphilic Pyrene Derivatives (両親媒性ピレン誘導体の合成、集合化挙動、および光化学的性質に関する研究)
- 3) 人工光合成系の構築を目的としたベシクルを反応場とする二酸化炭素の光還元反応
- 4) イリジウム錯体を増感剤とするベシクル膜横断型の光誘起電子輸送系の構築
- 5) ベシクルを反応場とするコバルト分子触媒による光水素発生
- 6) 可視光領域に吸収をもつ新規イリジウム錯体の光化学的挙動

### 主な著書

- 1) 光化学 - 基礎と応用 (東京化学同人, 2013).
- 2) 大学生のための基礎シリーズ 3 化学入門 第2版 (下井 守先生と共著, 東京化学同人, 2013).
- 3) 基本有機化学(東京化学同人, 2012).
- 4) 基礎から学ぶ有機化合物のスペクトル解析 (小川桂一郎先生らと共著, 東京化学同人, 2008).

### 主な原著論文

- 1) Photochemical Reduction of CO<sub>2</sub> with Ascorbate in Aqueous Solution Using Vesicles as Photocatalysts N. Ikuta, S. Takizawa and S. Murata, *Photochem. Photobiol. Sci.*, **2014**, *13*, 691-702.
- 2) Cationic Iridium Complexes Coordinated with Coumarin Dyes – Sensitizers for Visible-Light-Driven Hydrogen Generation S. Takizawa, C. Pérez-Bolívar, P. Anzenbacher, Jr., and S. Murata, *Eur. J. Inorg. Chem.*, **2012**, 3975-3979.
- 3) Photooxidation of 1,5-Dihydroxynaphthalene with Iridium Complexes as Singlet Oxygen sensitizers S. Takizawa, R. Aboshi, and S. Murata, *Photochem. Photobiol. Sci.*, **2011**, *10*, 895-903.
- 4) Pyrene-sensitized Electron Transport across Vesicle Bilayers: Dependence of Transport Efficiency on Pyrene Substituents T. Mizushima, A. Yoshida, A. Harada, Y. Yoneda, T. Minatani, and S. Murata, *Org. Biomol. Chem.*, **2006**, *4*, 4336-4344.

### 学生へ一言

若いうちに様々な事物や考え方に触れ、広い視野に立ってものごとを判断できる人になって欲しいと思います。

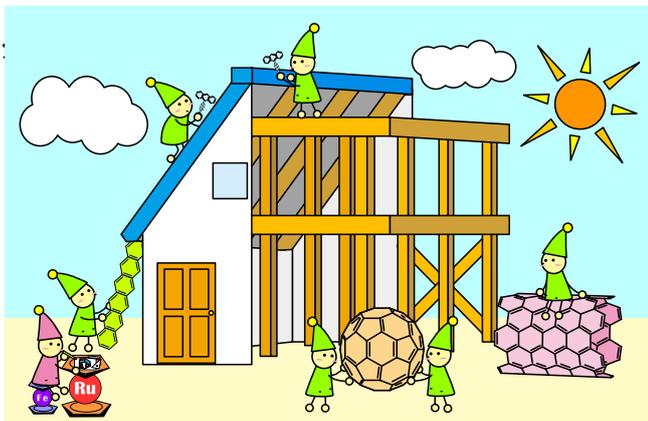
## 分子建築学・機能性触媒化学



寺尾 潤 教授

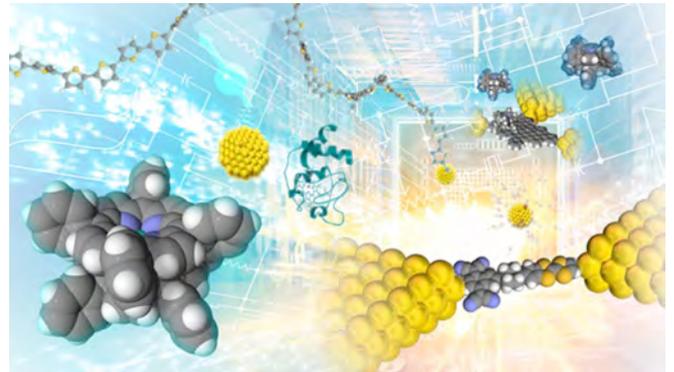
岩井智弘 講師

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。



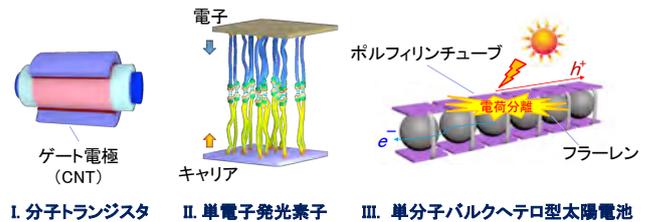
分子建築学・分子建築士

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、2020年代には微細化の限界に達すると予想されています(Mooreの法則)。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子素子を実設計・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。



分子建築学による分子エレクトロニクス/触媒の実現

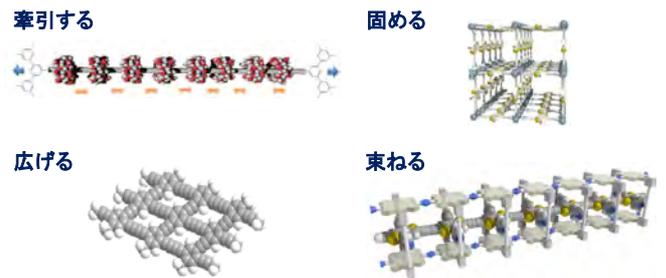
I) 従来のシリコン系デバイスにない入出力挙動を示す“有機分子ならではの化学変換”を利用したナノスケール電子素子のビルドアップ型作製法の開発



I. 分子トランジスタ II. 単電子発光素子 III. 単分子バルクヘテロ型太陽電池

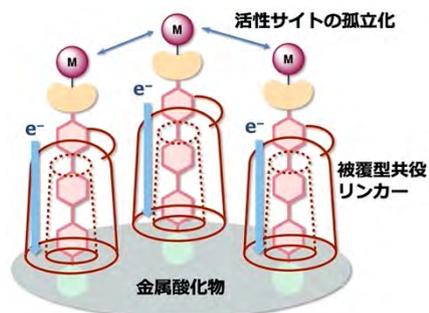
分子建築学によるナノスケール有機電子素子の創製

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



分子建築学による高分子共役鎖の熱的ゆらぎ抑制

III) 超分子相互作用を利用した有機無機ハイブリッド型触媒の開発



分子建築学による有機無機ハイブリッド型触媒の創製

<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

## 主な著書および総説

- 1) "Cross-Coupling Reaction of Alkyl Halides with Grignard Reagents Catalyzed by Ni, Pd, or Cu Complexes with a  $\pi$ -Carbon Ligand(s)", *Acc. Chem. Res.*, **41**, 1545–1554 (2008).
- 2) "Pd-catalyzed Cross-coupling Reactions of Alkyl Halides", *Chem. Soc. Rev.*, **40**, 4937-4947 (2011).
- 3) "Synthesis and Physical Properties of Three-Dimensionally Insulated Molecular Wires", *Single-Molecule Electronics -An Introduction to Synthesis, Measurement and Theory-*, Springer, 2016.

## 主な原著論文

- 1) "Design Principle for Increasing Charge Mobility of  $\pi$ -Conjugated Polymers Using Regularly Localized Molecular Orbitals", *Nature Commun.*, **4**, 1691 (2013).
- 2) "Synthesis of One-Dimensional Metal-Containing Insulated Molecular Wire with Versatile Properties Directed toward Molecular Electronics Materials", *J. Am. Chem. Soc.*, **136**, 1742–1745 (2014).
- 3) "Enhancement of Phosphorescence and Unimolecular Behavior in the Solid State by Perfect Insulation of Platinum-Acetylide Polymers", *J. Am. Chem. Soc.*, **136**, 14714–14717 (2014).
- 4) "A Typical Metal Ion-Responsive Color-Tunable Emitting Insulated  $\pi$ -Conjugated Polymer Film", *Angew. Chem. Int. Ed.*, **55**, 13427 (2016). (VIP paper, Front cover)
- 5) "Insulated Conjugated Bimetallopolymer with Sigmoidal Response by Dual Self-controlling System as a Biomimetic Material" *Nature Commun.*, **11**, 408 (2020).

## 学生へのメッセージ

幅広い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はもちろんのこと、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、湧き出る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、自らの原動力をもって広大な科学の世界を駆け巡り、若き溢れる創造力で未踏領域を走破し、日々夢中になれる刺激的な研究を共に始めませんか？ 2016年9月に駒場に発足した新しい研究室です。最新の有機合成装置・分析装置が整備され、活気あふれる自由闊達な研究環境のもとに集いし精鋭の分子建築士達（講師：1名、助教：2名、D2：3名、D1：1名、M2：4名、M1：3名、B4：2名）と共に、世界最小（ナノメートルスケール）の有機デバイスと一緒に作製しましょう！当研究室はこれまでに、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・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います！興味をお持ちの方はいつでも研究室見学に来てください。結構おもしろい研究やってまっせ！！

## 2021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力を注いでいます。

### 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

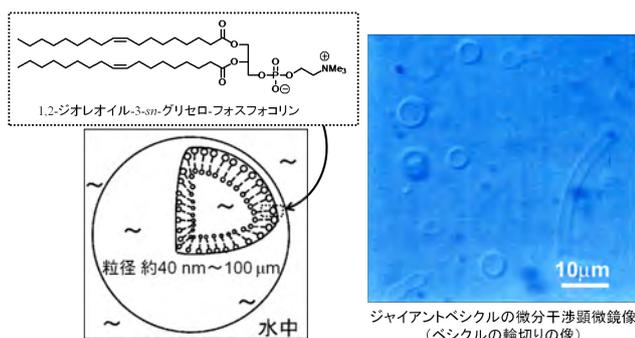


図1 ベシクル構成分子（リン脂質）とジャイアントベシクルの光学顕微鏡像。球状だけでなく、赤血球形状やチューブなども形成できる。

[http://park.itc.u-tokyo.ac.jp/toyota\\_lab/](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

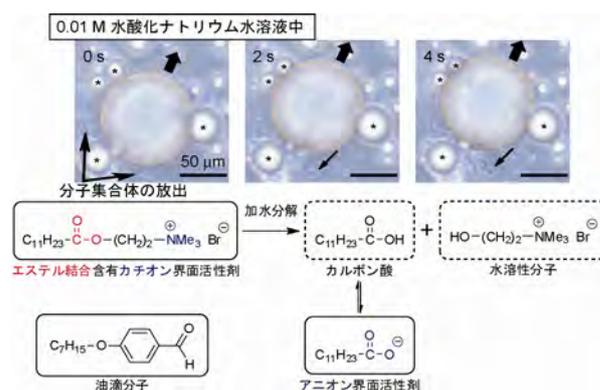


図2 反応活性な両親媒性分子の水溶液中で遊走する、粒子径 50 μm の油滴の光学顕微鏡像。

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) 分子ロボティクス概論 (CBI 学会出版, 2019) 分担執筆
- 2) Self-organized Motion: Physicochemical Design based on Nonlinear Dynamics (RSC Publishing, 2018) 分担執筆
- 3) 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
- 4) 自己組織化マテリアルのフロンティア (フロンティア出版, 2017) 分担執筆

#### 主な原著論文

- 1) Synthesis of photoresponsive cyclic poly(dimethyl siloxane)s from monodisperse linear precursors, *Reactive and Functional Polymers*, **158**, 104800 (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いて、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繁に交流しています。

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、分光化学、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

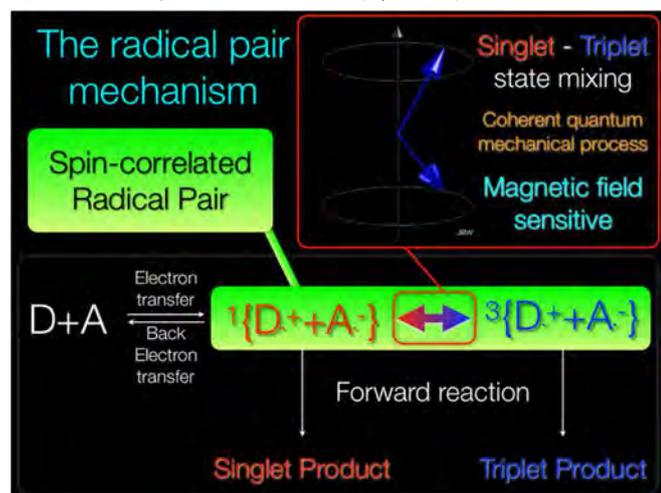


図1 ラジカルペアメカニズムの模式図

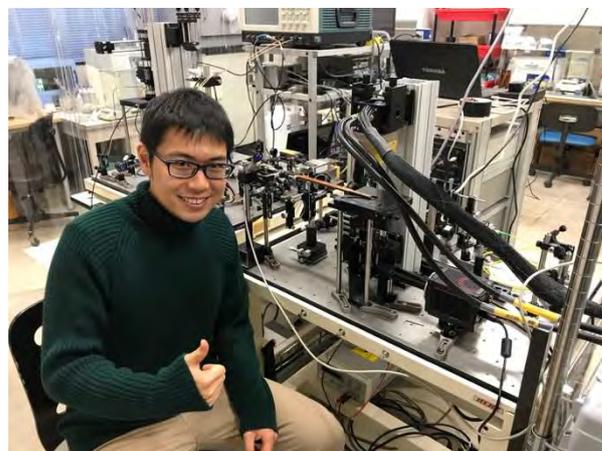


図2 新しい顕微鏡の設計

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) 'Cellular autofluorescence is magnetic field sensitive', N. Ikeya and J. R. Woodward, *PNAS*, 118 (3), e2018043118; DOI: 10.1073/pnas.2018043118 (2021)
- 2) 'Observation of the  $\Delta g$  mechanism resulting from the ultrafast spin dynamics that follow the photolysis of coenzyme B<sub>12</sub>', 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)
- 3) '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)
- 4) '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).
- 5) '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).
- 6) '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).
- 7) '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).
- 8) '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. Juvet \*M. Fujii, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 54, 15089–15093 (2015).
- 9) '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います。



### 研究室のメンバー

Tito Akindele (共同研究者), 池谷 皐 (D3), 祖母井杏耶 (M2), Xu Tao (M2), Onkar Gulati (B4)

@2021年4月

