

4-3 協奏分子システム研究センター

4-3-1 経緯と現状, 将来構想

協奏分子システム研究センターは 2013 年 4 月に発足し、分子科学研究所がこれまでに培ってきたナノサイエンスに関する研究資産を基盤に、新しい分子科学の開拓に取り組んでいる。センターのミッションは、「分子それぞれの性質が階層構造を持つ分子システムの卓越した機能発現にどう結びつくのか」という分野横断的な重要課題を解決することである。そのためには、システムの構成要素である分子自身について理解を深めるのに加え、それぞれの分子がどのようなネットワークや制御を介して混然一体となり、複雑かつ高度な機能の発現へと繋がっていくのかを理解しなければならない。

このような目的の達成に向けて、微細なナノスケールの分子科学からタンパク質や細胞のようなマクロで不均一な分子科学まで研究者を幅広く募り、「階層分子システム解析研究部門」、「機能分子システム創成研究部門」、「生体分子システム研究部門」の 3 部門体制で研究活動を展開している。現在、専任 PI が 3 名（秋山教授、山本教授、倉持准教授）、兼任 PI が 4 名（斉藤教授、青野教授、加藤教授、飯野教授）の計 7 名となっている。未踏の領域に切り込む若手研究者から、分野をリードするシニア研究者まで、異なる学問領域の研究者が集うメンバー構成となっている。

2024 年度の特筆すべき研究成果として、ラパマイシンによる FRB-FKBP 融合タンパク質のオリゴマー化に関する共同研究（秋山グループ）が科学雑誌「*FEBS Letters*」誌に掲載された。その他、階層分子システム解析研究部門からは、励起状態の分子が芳香族性を獲得する過程を直接観察した成果が「*Journal of the American Chemical Society*」誌に（倉持グループ）発表され、その学術的な新規性・重要性が高く評価されている。

専任 PI はセンターが掲げる目標に向かって、これまでの研究とは違う新しい一歩を踏み出すことが求められる。既に一部のグループ間で共同研究が進行中であるが、より多くのセンター構成員で共有できる新しい研究プロジェクトを練り上げていく必要がある。専門から少し離れた分野でのプロジェクト立案には人的交流が何よりも重要であるため、研究グループの居室を南実験棟の 3 階の 1 フロアに集中させ、一部をオープンスペースとして運用しつつ、科学的な議論や交流を活発に進めている。

その他、CIMoS セミナー、ワークショップなどを企画・実施し、それらを通じてセンターの活動や成果を国内外のコミュニティに向けて発信している。

階層分子システム解析研究部門

秋山 修志（教授）（2012年4月1日着任）

古池 美彦（助教）

堀内 滉太（助教）

尾上 靖宏（特任研究員）

NACER, Lamia（インターンシップ）

CHAWAPUN, Pornthip（インターンシップ）

近藤 貫太（大学院生）

鷺尾 みどり（技術支援員）

大原 さとみ（技術支援員）

山本 優里桂（技術支援員）

岡田 亜樹（技術支援員）

谷浦 愛子（技術支援員（派遣））

蜂須賀 円（技術支援員（派遣））

鈴木 博子（事務支援員）

A-1) 専門領域：生物物理学, 時間生物学

A-2) 研究課題：

- a) タンパク質時計が奏でる概日リズムの分子科学的解明
- b) X線溶液散乱による生体分子システムの動的構造解析

A-3) 研究活動の概略と主な成果

- a) シアノバクテリアをモデル系とした概日時計研究に取り組み、独自性の高い数々の研究（Mukaiyama *et al.* *BioRxiv* 2024; Furuike *et al.* *BioRxiv* 2024; Furuike *et al.*, *Sci. Adv.* 2022; Furuike *et al.*, *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 2022; Furuike *et al.*, *Commun. Phys.* 2022; Ito-miwa *et al.*, *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 2020; Abe *et al.*, *Science* 2015）や国際基調講演（SRBR 2022; 5th Asian Forum on Chronobiology 2021; ELSI Symposium 2020; V-WCC 2019）をとおして、「概日時計システムの周波数特性が、ごく限られた種類の構成因子にエンコードされている」という新概念を提示した（長瀬研究振興賞 2022；日本学術振興会賞 2016；文部科学大臣表彰若手科学者賞 2008；日本生物物理学会若手奨励賞 2007；2006 SAS Young Scientist Prize from IUCr）。直近では、基盤研究(S) [2017～2021年度], 基盤研究(S) [2022～2026年度], 学術変革領域(A) 計画研究 [2024～2028年度] 等のプロジェクトで代表者を務め、国内外の研究コミュニティの拡大に尽力するとともに、以下に詳述する波及効果の高い成果（5件）を輩出してきた。

一つ目は、KaiC が自律的振動子として分子進化した仮説の提唱である（Mukaiyama *et al.*, *BioRxiv* 2024）。明暗サイクルは独立栄養生物の一種であるシアノバクテリアの光合成効率に影響を与える。よって、酸素発生型光合成系が確立した太古のシアノバクテリアが自律的な概日時計を保持していたかどうかを明らかにすることは、時間生物学における重要な課題である。現生型および祖先型 KaiC の機能と構造を調べ、自律的な Kai タンパク質振動子の進化の起源を明らかにした。

二つ目は、KaiCの第一自己リン酸化過程の解明である (Furuike *et al.*, *BioRxiv* 2024)。自己キナーゼ活性を有するKaiCにおいて、T432で起こる最初のリン酸化(第一リン酸化)は、それに続いて起こるS431のリン酸化(第二リン酸化)を促進する重要なステップである。KaiCの自己リン酸化にはKaiAが必須であると考えられているが、第一リン酸化の活性化と不活性化のメカニズムは依然として不明であった。我々は、KaiA非存在下でも第一リン酸化は進行するが、その反応速度が 0.019 h^{-1} のレベルまで著しく自己抑制されていることを見いだした。構造解析やQM/MMシミュレーションを実施することにより、KaiCの自己阻害とKaiAによる自己阻害解除のメカニズムを解明した。

三つ目は、KaiCに隠されたアロステリック制御の解明である (Furuike *et al.*, *Biophys. Physicobiol.* 2024; Furuike *et al.*, *Sci. Adv.* 2022; Furuike *et al.*, *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 2022)。複雑多様なアロステリック制御は細胞機能に振動現象をもたらす非線形性の源であるため、時計タンパク質のアロステリック構造転移を解明するための努力が続けられてきた。しかし、これまでに報告されているKaiCの全構造は、リン酸化修飾の有無に依らず構造が同一であり、概日リズムを駆動するアロステリーについては理解が進んでいなかった。我々は、S431とT432のリン酸化修飾サイクルを網羅する4つの異なる状態のKaiCを結晶化し、検出された複雑多様なアロステリーを詳細に分析することで、KaiCの振動性に必須となる最小単位のアロステリーを特定した。これらの成果を複数の総説 (Furuike *et al.*, *SPring-8/SACLA Research Frontiers* 2023; 古池美彦, *日本結晶学会誌* 2023; 古池美彦, *生物物理* 2023; 古池美彦, *SPring-8/SACLA 利用者情報* 2022)として取りまとめた。複数の学協会(日本結晶学会, 日本生物物理, SPring-8ユーザー協同体)から、研究グループ所属の助教(古池美彦)に若手を対象とした賞が贈られている。

四つ目は、KaiCの温度補償性に関する成果である (Furuike *et al.*, *Commun. Phys.* 2022)。時計タンパク質は、酵素活性を生理的な温度範囲で一定に保つ温度補償能を有する。他方、酵素を構成するアミノ酸は高温でより頻繁に揺らぎ、それに伴って酵素活性が上昇する傾向が一般的にみられる。よって、温度補償能を有する概日時計タンパク質のダイナミクスが特殊な制御を受けている可能性があるが、それを実験的に証明した例は皆無である。我々は、温度補償型ATPaseであるKaiCのダイナミクスに及ぼす温度の影響を中性子準弾性散乱法で精査した。その結果、KaiCが揺らぎを利用しつつ、高温下でC1-ATPase活性が上昇しないように自律制御していることが明らかとなった。酵素が自らの活性を高めるためだけでなく、恒常性を実現する自律的手段として揺らぎを積極的に利用していることを示す独自性の高い研究成果である。

五つ目は、概日時計の絶対的な遅さの起源解明である (Furuike *et al.*, *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 2022; Simon *et al.*, *Biophys. Physicobiol.* 2022; Abe *et al.*, *Science* 2015)。概日時計は、ゆっくりとした秩序ある細胞ダイナミクスを生み出すのが、高速で動く生体高分子で構成されているため、全体としての遅さの原因は不明であった。我々は、周期を規定するC1-ATPaseの遅さが、加水分解に用いられる水分子の隔離や、高い活性化エネルギーを有するペプチド異性化に起因していることを解明した。本成果は国内外の化学誌 (*ChemistryWorld* June 2015, *現代化学* 2015)、専門家評価コメント (<http://smc-japan.org/?p=4072>)、国内の新聞記事(毎日新聞, 日本経済新聞)等で取り上げられ、学術的な新規性が世界的に高く評価されている。

- b) 生体分子システム(時計タンパク質, 抗酸化酵素, 受容体など)のX線溶液散乱を記録し、散乱データと結晶構造の比較や低分解能モデルの構築を通して、分子システムの動的構造解析を行った (Inobe *et al.*, *FEBS Lett.* 2024)。

B-4) 招待講演

秋山修志,「Past & Future of the Circadian Clock System in Cyanobacteria」, 学術動向調査の会, 熱海, 2025年3月.

秋山修志,「Past & Future of the Circadian Clock System in Cyanobacteria」, 第3回タンパク質シンポジウム, 東京大学鉄門記念講堂, 東京, 2025年1月.

秋山修志,「KaiCの反応・動態・構造から探る概日時計制御機構」, 第二回領域会議, 高槻, 2025年1月.

古池美彦, 森 俊文, 秋山修志,「Molecular Mechanism of KaiC Autophosphorylation」, 第31回時間生物学会学術大会, 富山国際会議場, 富山, 2024年11月.

秋山修志, 古池美彦, 森 俊文,「Mechanism of KaiC Autophosphorylation」, 第97回日本生化学会大会, パシフィコ横浜, 横浜, 2024年11月.

秋山修志,「KaiCの反応・動態・構造から探る概日時計制御機構」, キックオフシンポジウム・公募説明会, 東京大学, 東京, 2024年7月.

S. AKIYAMA, “Past & Future of the Circadian Clock System in Cyanobacteria,” IPR International Conference 2025, Awaji Island, Awaji (Japan), January 2025.

S. AKIYAMA, “Evolution of Cross-scale Causality in the Cyanobacterial Circadian Clock System,” SAS2024, Taipei (Taiwan), November 2024.

S. AKIYAMA, “Autonomous Disassembly of Circadian Clock System of Cyanobacteria at Dawn,” Sapporo Symposium on Biological Rhythm 2024, Sapporo (Japan), August 2024.

S. AKIYAMA, “Cross-Scale Causality in the Cyanobacterial Circadian Clock System,” International Chronobiology Summer School 2024, Nagoya (Japan), August 2024.

S. AKIYAMA, “Past & Future of the Circadian Clock System in Cyanobacteria,” SRBR 2024 Biennial Conference, San Juan (Puerto Rico), May 2024.

B-7) 学会および社会的活動

学協会役員等

日本生物物理学会理事 (2023–2025).

学会の組織委員等

名古屋大学大学院理学研究科 学会組織委員 (2025).

文部科学省, 学術振興会, 大学共同利用機関等の委員等

日本学術会議連携会員 (2020–2024).

SPring-8長期利用分科会委員 (2019–).

日本学術振興会学術システム研究センター研究員 (2023–2026).

学会誌編集委員

Biophysics and Physicobiology, Editorial Board Members (2022–2025).

B-8) 大学等での講義, 客員

琉球大学, 非常勤講師, 2025年1月–3月.

琉球大学, 客員教授(客員研究員), 2025年1月–3月.

B-10) 競争的資金

科研費基盤研究(S),「概日時計の複雑多様性の単純化」(代表:秋山修志),古池美彦(研究分担者)(2022年度-2026年度).

科研費学術変革領域研究(A),「時間タンパク質学:KaiCの反応・動態・構造から探る概日時間制御機構」,秋山修志(2024年度-2028年度).

日本学術振興会学術動向等に関する調査研究(受託研究),「生物物理学関連分野に関する学術研究動向」,秋山修志(2023年度-2024年度).

武田科学振興財団2022年度生命科学助成,「概日時計タンパク質KaiCにおける構造多型の操作と解析」,秋山修志(2022年度-2026年度).

(公財)豊秋奨学会2023年度研究費助成,「月面環境サイクルに適合した概月時計の設計」,秋山修志(2023年度-2025年度).

科研費若手研究,「時計タンパク質の絡み合ったアロステリック運動を読み解く」,古池美彦(2022年度-2024年度).

科研費学術変革領域研究(A),「時間タンパク質学領域の総括」(代表者:吉種光),秋山修志(研究分担者)(2024年度-2028年度).

科研費基盤研究(B),「Kaiシステムの自律振動過程で生じるKaiC-KaiA/KaiB結合モードの時間依存的変調」(代表者:上久保裕生),秋山修志(研究分担者)(2023年度-2025年度).

C) 研究活動の課題と展望

2017年度から取り組んできた基盤研究(S)[統合的多階層アプローチによるシアノバクテリア生物時計システムの新展開:2017~2021年度]が終了し,Kaiタンパク質時計の普遍性と多様性の解明,ATPase/リン酸化構造基盤の解明,温度補償性と揺らぎの関係性の解明,いずれにおいても当初の目標を上回る新発見があった(最終年度検証結果:A)。2023年度に開始した基盤研究(S)[概日時計の複雑多様性の単純化:2022~2026年度]については,2024年度に「A(順調に研究が進展しており,期待どおりの成果が見込まれる)」との中間評価を頂いた。2023年度に開始した基盤研究(S),そして2024年に採択された学術変革領域(A)の計画研究(代表),いずれの課題についても波及効果の大きい論文として公表できるよう,今の質を堅持しつつも更にペースを上げて研究を進める。

倉持 光 (准教授) (2020年4月1日～2025年3月31日)*)

米田 勇祐 (助教)
古賀 雅史 (特任助教)
落合 奎介 (大学院生)
神谷 美穂 (事務支援員)

A-1) 専門領域：物理化学, 超高速分光, 非線形分光, 超短パルス発生

A-2) 研究課題：

- a) 新規超高速非線形分光法の開発と応用
- b) 単一分子レベルでの新規分光法の開発と応用
- c) 先端的超高速分光による凝縮相複雑分子の電子・構造ダイナミクスの研究

A-3) 研究活動の概略と主な成果

- a) 室温・溶液中にあるタンパク質などの巨大分子における遅い構造揺らぎに伴う励起エネルギー揺らぎの観測を目的として、新たに蛍光励起相関分光法 (Fluorescence excitation correlation spectroscopy: FECS) を開発した。この手法では、広帯域の極短パルスを対にして励起光とし、二つのパルス間の遅延時間を掃引しながら、単一分子レベルで蛍光を検出し、蛍光相関分光を行う。パルス間の遅延時間の関数として得られる規格化されていない蛍光自己相関関数をフーリエ解析することで、励起エネルギー分解された自己相関関数が得られることを、典型色素溶液を対象として実証した。このデータからは、マイクロ秒～ミリ秒スケールで励起周波数が自発的にどのように変化するか、すなわち光反応などではない熱反応や平衡過程などの非同期過程によってどのように変化するかを明らかにすることが可能であり、タンパク質などの自発的な構造揺らぎに伴う励起エネルギー揺らぎの観測と解明に応用できる可能性を示している。
- b) 我々が最近開発した蛍光励起相関分光法 (FECS) は励起エネルギーの自発的な揺らぎを観測することができる強力な手法であるが、得られる情報は自己相関関数に限られている。複雑系で平衡状態にあるサブアンサンブル間のスペクトル交換を観測・解明するには、相互相関の取得が重要となる。そこで、我々は FECS をさらに発展させることで、マイクロ～ミリ秒スケールにおける異なるスペクトル間の相互相関を明らかにする 2 次元蛍光励起相関分光法 (2D-FECS) の開発を進めた。この方法は、速い励起エネルギー揺らぎやスペクトル拡散・交換を観測するために用いられるコヒーレント 2 次元電子分光法 (2D-ES) とコンセプトを共有しつつも、2D-ES では観測が困難な、電子励起状態の寿命を超える時間スケールでのダイナミクスの観測が可能な強力な手法である。典型色素溶液や量子ドットを用いた原理検証実験に成功しており、今後光応答性タンパク質などへと応用展開するべく、更なる感度向上に取り組んでいる。
- c) 電子基底状態において芳香族性を持たない分子が電子励起状態において芳香族性を発現する「励起状態芳香族性」が近年、基礎・応用の両面で注目を集めている。特に、励起状態芳香族性の発現に伴う分子構造の変化を駆動力とする光機能性分子材料の開発が盛んに行われているが、この構造変形過程が実時間観測された例はない。我々は、所外研究者と共同し、励起状態芳香族性を示す典型分子 FLAP に対しフェムト秒時間分解ラマン分光を行い、フェムト～ピコ秒の時間スケールで起こる構造ダイナミクスの観測を行った。その結果、芳香族性の発現によって、数ピ

コ秒で分子が曲がった V 字形から平面形状へと変化する構造ダイナミクスを実時間で捉えることに成功した。また、その過程において、振動モード間の共鳴 (Fermi resonance) が過渡的に起こるという興味深い現象も明らかにした。これらの結果は、励起状態芳香族性に基づく新規機能性分子材料の設計において、新たな構造学的指針を与えるものである。

B-1) 学術論文

H. WATANABE, M. IWAMURA, K. NOZAKI, T. TAKANASHI, H. KURAMOCHI and T. TAHARA, “Torsional Structural Relaxation Caused by Pt–Pt Bond Formation in the Photoexcited Dimer of Pt(II) N⁺C⁻N Complex in Solution,” *J. Phys. Chem. Lett.* **16(1)**, 406–414 (2025). DOI: 10.1021/acs.jpcclett.4c03170

K. SUGA, K. OCHIAI, Y. YONEDA, H. KURAMOCHI and S. SAITO, “An Energy-Tunable Dual Emission Mechanism of the Hybridized Local and Charge Transfer (HLCT) and the Excited State Conjugation Enhancement (ESCE),” *Chem. –Eur. J.* **31(18)**, e202404376 (2024). DOI: 10.1002/chem.202404376

D. H. KANG, M. KOGA, N. HALDAR and D. M. NEUMARK, “Dynamics of Photoexcited 5-bromouracil and 5-Bromo-2'-deoxyuridine Studied by Extreme Ultraviolet Time-Resolved Photoelectron Spectroscopy in Liquid Flat Jets,” *Chem. Sci.* **15(41)**, 17245–17255 (2024). DOI: 10.1039/D4SC03920C

Y. YONEDA and H. KURAMOCHI, “Room-Temperature Solution Fluorescence Excitation Correlation Spectroscopy,” *J. Phys. Chem. Lett.* **15(33)**, 8533–8539 (2024). DOI: 10.1021/acs.jpcclett.4c01798

M. KOGA, D. H. KANG, Z. N. HEIM, P. MEYER, B. A. ERICKSON, N. HALDAR, N. BARADARAN, M. HAVENITH and D. M. NEUMARK, “Extreme Ultraviolet Time-Resolved Photoelectron Spectroscopy of Adenine, Adenosine and Adenosine Monophosphate in a Liquid Flat Jet,” *Phys. Chem. Chem. Phys.* **26(17)**, 13106–13117 (2024). DOI: 10.1039/D4CP00856A

B-4) 招待講演

倉持 光, 「数サイクルパルスを用いた複雑分子系の超高速コヒーレント振動分光」, レーザー学会学術講演会第 45 回年次大会, 広島, 2025 年 1 月.

倉持 光, 「数サイクルパルスを用いた複雑系の超高速コヒーレント振動分光」, 京都大学理学部化学教室セミナー, 京都, 2024 年 12 月.

倉持 光, 「数サイクルパルスで観る複雑分子系の超高速化学反応ダイナミクス」, 計算・分光・情報・合成が拓く分子設計の最前線, 筑波, 2024 年 11 月.

倉持 光, 「Unraveling ultrafast chemical reaction dynamics through vibrational coherence」, 令和 6 年度化学系学協会東北大会, 秋田, 2024 年 9 月.

倉持 光, 「数サイクルパルスを用いた超高速非線形分光で観る光化学反応のダイナミクス」, 2024 年光化学討論会, 福岡, 2024 年 9 月.

倉持 光, 「有機化学者のための超高速分光・非線形分光の基礎と最先端」, 第 55 回構造有機化学若手の会夏の学校, 大阪府池田市, 2024 年 7 月.

H. KURAMOCHI, “Unraveling chemical reaction dynamics with ultrafast time-domain vibrational spectroscopy using few-cycle pulses,” Department Seminar at Yonsei University, Seoul (Korea), February 2025.

H. KURAMOCHI, “Unraveling Ultrafast Chemical Reaction Dynamics of Condensed-Phase Complex Molecular Systems through Vibrational Coherence,” G-LAMP symposium, Cheongju (Korea), February 2025.

Y. YONEDA, “Chemical dynamics in condensed phases observed by ultrafast time-domain vibrational spectroscopy,” Asian Conference on Ultrafast Phenomena 2025, Taipei (Taiwan), January 2025.

Y. YONEDA, “Exploration of excited state dynamics using time-domain vibrational spectroscopy,” Oktoberfest of Chemical Physics, Okazaki, October 2024.

H. KURAMOCHI, “Tracking non-equilibrium excited-state dynamics with ultrafast time-domain vibrational spectroscopy,” 39th Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics, Shizuoka, June 2024.

B-7) 学会および社会的活動

学協会役員等

分子科学会運営委員 (2024–2026).

学会の組織委員等

第 22 回時間分解振動分光学国際会議 運営委員 (2022–2025).

文部科学省, 学術振興会, 大学共同利用機関等の委員等

文部科学省研究振興局学術調査官 (2023–2025).

理科教育活動

講師「第 44 回数理解の翼夏季セミナー」NPO 法人数理解の翼 (2024).

B-8) 大学等での講義, 客員

理化学研究所, 客員研究員, 2022 年 5 月–2027 年 3 月.

京都大学大学院理学研究科, 非常勤講師, 「超高速分光・非線形分光の基礎から最先端まで」, 2024 年 10 月–2025 年 3 月.

B-10) 競争的資金

科学技術振興機構創発的研究支援事業 (受託研究), 「室温・溶液中における単一分子の極限時間分解分光」, 倉持光 (2021 年度–2027 年度).

科研費基盤研究 (A), 「単一分子超高速分光による動的生体光エネルギー変換機構の探究」 (代表者: 倉持 光), 米田勇祐 (研究分担者) (2024 年度–2026 年度).

科研費基盤研究 (B), 「新規多次元振動分光による反応ポテンシャル特異点の探究」, 米田勇祐 (2024 年度–2026 年度).

C) 研究活動の課題と展望

我々は先端的な超高速分光法を駆使し, 凝縮相複雑分子系の機能・構造・ダイナミクスの解明に取り組んでいる。特に, アンサンブル平均を観るバルク溶液・固体に対する先端的な超高速分光と, 室温・溶液中の単一分子レベルでの各種分光法を相補的に用いることで, 凝縮相複雑分子系の反応ダイナミクスの研究に新たな途を拓くことを目指している。最近, 我々は励起エネルギーの自発的揺らぎを観測する蛍光励起相関分光を開発したが, 今後は本手法をさらに発展させた 2 次元蛍光励起相関分光法の開発とその応用を推進する。これにより, 光合成系をはじめとする光応答性タンパク質におけるマイクロ~ミリ秒スケールでのサブアンサンブル間のスペクトル交換を可視化し,

これらタンパク質の光反応を駆動する発色団分子の電子状態が、遅い自発的構造揺らぎによってどのように制御されているのか観測・解明する。さらに、この手法をポンプ・プローブ法と融合させることで、反応ダイナミクス揺らぎの計測へと展開する。バルクな系に対する先端的な超高速分光においても、新奇光機能性分子や光合成タンパク質など、多様な系から有意な成果が得られつつあり、今後もその応用をさらに強力に推進していく。

*) 2025年4月1日大阪大学大学院基礎工学研究科教授

岡本 泰典（准教授）（2024年8月1日着任）

江藤 智子（技術支援員）

野田 彩加（事務支援員）

A-1) 専門領域：生物無機化学，生体化学，錯体化学，タンパク質工学

A-2) 研究課題：生命分子システムの設計・制御をめざした生体分子工学

- a) 光駆動型人工金属酵素の開発と応用
- b) 人工多核金属酵素の開発
- c) 構造変化と触媒機能が連動する人工酵素の開発
- d) 生物由来ベシクルのエンジニアリング基盤の形成

A-3) 研究活動の概略と主な成果

生命分子システムの設計・制御をめざした **designer biomolecule** の創出；連鎖的につながった生体内化学反応ネットワークによって細胞機能は制御されている。この生体内化学反応ネットワークを再設計して物質生産や医薬への応用をめざす研究が精力的に行われている。この生体内化学反応ネットワークに非天然化学反応を自在に統合できれば、天然の酵素反応だけではアクセスできない高付加価値化合物の生産や新たな作用機序の医薬の開発につながる。このような背景のもと、我々は非天然の物質変換能を付与した人工金属酵素を用いて生体内化学反応ネットワークに介入することをめざしている。

人工金属酵素とは、ホストとなるタンパク質の内部空間に非天然の合成金属錯体を導入する、あるいは非天然の金属中心をタンパク質のアミノ酸側鎖を用いて構築することで得られるものを指す。人工金属酵素研究では、酵素の持つ「温和な反応条件で高選択的な物質変換能」と、金属錯体の持つ「自然界に存在しない強力な化学変換能」の両方を兼ね備える触媒の開発を目指している。一方、我々は人工金属酵素の高い生体分子寛容性に注目してきた。生体分子寛容性とは、他の生体分子が存在する細胞内環境でも失活しないことを意味する。我々のグループでは、この人工金属酵素の特性を活かし、人工金属酵素による生体内化学反応ネットワークの再編成・制御をねらった次の4つのプロジェクトを並行して進めている。

- a) 光駆動型人工金属酵素の開発と応用；多くの人工金属酵素が開発されてきたが、触媒活性を外部刺激によって制御可能なものはほとんど報告されていない。我々は細胞や生体内での利用を念頭に光によって活性制御可能な人工金属酵素の開発に取り組んできた。以前に我々はタンパク質の内部空間に導入することでルテニウム錯体の光化学特性を変化させることに成功している。ここで得られる人工金属酵素は光照射によって活性化され、抗体のアミノ酸残基選択的な化学修飾反応を触媒する。現在、この光駆動型人工金属酵素の高機能化をめざし、他の金属錯体の検討を開始している。また、ホストタンパク質の変更および改変も検討しており、新たなホストタンパク質候補の探索や変異体作成に向けた基盤技術の開発に取り組んでいる。
- b) 人工多核金属酵素の開発；複数の金属イオンによって活性中心を構築する多核金属酵素は、合成化学的に困難な物質変換を低環境負荷型の反応条件で高選択的に進行させる。そのため、多核金属酵素を人工的に作り直すことで、強力な触媒開発の指針が得られる。しかし、タンパク質内部で複数の金属イオンを設計通り自在に配置することは極めて困難である。このような背景のもと、これまでに我々は独自の計算科学的設計手法を用いて、多核金属中心

の構築に挑んできた。これまでに、いくつかのタンパク質の内部で設計通りの多核金属中心が構築されていることを結晶構造解析によって確認することができた。さらに、そのうちのいくつかにおいて、興味深い特性が発現することを見出した。

- c) 構造変化と触媒機能が連動する人工酵素の開発：生命現象を制御する高次機能、例えばエネルギー変換やシグナル伝達は、複数のタンパク質や酵素で構成される「システム」によって実現されている。このようなシステムを構成するタンパク質の活性は、シグナル分子を介して連動している。そのようなシステムの構築を念頭に、本研究ではシグナル分子との結合によって誘起される構造変化と触媒活性が連動する人工酵素の開発を行っている。現在、シグナル分子との結合によって構造変化するタンパク質への触媒部位の設計に取り組んでいる。
- d) 生物由来ベシクルのエンジニアリング基盤の形成：人工金属酵素の細胞／個体内送達システムとして、我々は生物由来のベシクルに注目している。我々はベシクルに複数種類の機能性分子を搭載するための方法論を開拓している。現在までに、このベシクルの内部に任意のタンパク質を内包することに成功している。

B-3) 総説、著書

Z. LIU, Y. OKAMOTO and S. SATO, “Photocatalytic Structures for Protein Modifications,” *ChemCatChem* **16(14)**, e202301424 (2024). DOI: 10.1002/cctc.202301424

岡本泰典, 「生物学的環境における合成金属触媒による非天然化学変換」, *生体の科学*, **75(2)**, 170–175 (2024). DOI: 10.11477/mf.2425201841

B-4) 招待講演

Y. OKAMOTO, “Development of designer enzymes for concerted uses with biological molecules,” The 145th Annual Meeting of the Pharmaceutical Society of Japan, Fukuoka, March 2025.

Y. OKAMOTO, “Regulating the reactivity of a synthetic metal complex by a protein matrix for biochemical applications,” 2024 Frontier Bioorganization Forum, Taipei (Taiwan), September 2024.

Y. OKAMOTO, “Artificial enzyme for biochemical applications,” Korea-Japan Symposium on Molecular Science, Busan (Korea), June 2024.

B-7) 学会および社会的活動

学協会役員等

錯体化学会副事務局長 (2024–).

理科教育活動

パネルディスカッション司会「研究者という仕事」東北大学(小学生以上対象) (2024).

その他

生体分子の工学的研究のコミュニティ形成に向けたPodcastの収録・配信(名称: 分子デザインははじめました, URL: <https://t.co/aqYGgPTpK6>, 2024年3月31日配信開始, 2025年3月10日時点で14エピソード) (2024).

B-8) 大学での講義, 客員

東北大学国際学士コース, 全学教育科目展開科目講義「生命科学B」, 2021年4月–2024年7月.

東北大学学際科学フロンティア研究所, 非常勤講師(客員准教授), 2024年12月–2025年3月.

B-10) 競争的資金

科学技術振興機構さきかけ研究(受託研究), 「金属イオンのタンパク質内精密多点配置による機能創出」, 岡本泰典(2022年度–2025年度).

(公財)豊田理化学研究所 2024年度豊田理研スカラー研究助成金, 「多機能化バイオベンキルの開発」, 岡本泰典(2024年度).

C) 研究活動の課題と展望

上述のように我々のグループでは, 非天然の物質変換能を付与した人工金属酵素を用いて生体内化学反応ネットワークに介入することをめざしている。この目標の達成に必要なパーツとして, 上記の4つの研究を進めている。今後この4つを並行して進めていくが, 来年度は, この長期的目標に向けて興味深いデータの得られているb)人工多核金属酵素の研究に力点を置く。

小杉 貴洋（助教）（2015年6月1日着任）

鈴木 規子（技術支援員）

鈴木 博子（事務支援員）

A-1) 専門領域：生物物理学，理論化学，生体関連化学

A-2) 研究課題：

- a) 機能を持ったタンパク質をゼロから創り，その機能を理解する
- b) タンパク質複合体を改造し，その協奏的機能を理解・制御する
- c) 改造タンパク質複合体を用いて細胞機能を理解・制御する
- d) 蛍光タンパク質の設計原理の解明と新規創出

A-3) 研究活動の概略と主な成果

- a) アデノシン 3 リン酸（ATP）は生体内でのエネルギー源やシグナル伝達物質として多様な役割を果たしている。この ATP に結合し加水分解するタンパク質を創ることは，ATP 結合・加水分解の分子機構解明，さらには生体内の様々な現象の理解と制御につながる。そこで，計算機を用いて，ATP を結合および加水分解するタンパク質を創り出すことを目指し研究を行っている。これまでに，設計したタンパク質が ATP 結合および加水分解活性を持ち，結晶構造解析により設計通りの構造であることを確認した。さらに，このタンパク質の変性温度は 100 °C 以上であり，タンパク質としては異常な熱安定性をもつことも明らかにした。これらの結果をまとめ論文を投稿中である。また，更なる活性向上を目指した研究を継続中である。
- b) タンパク質複合体の協奏的な機能をアロステリックに（触媒活性部位から離れた部分から）制御する手法を考案し，タンパク質複合体である回転モータータンパク質 V_1 -ATPase の協奏的な機能である回転能を制御することに成功した。これまでに回転モーターの変異体は多数作られてきたが，回転速度を向上させたものは存在せず，天然が長い年月をかけて生み出した精密な機械である回転モーターの機能を向上することは不可能ではないかと思われていた。ここで，我々は，半世紀以上も前に提唱されたが，誰も創り出すことはできていなかったアロステリック部位を設計することで，その回転を加速することに成功した。2023 年度，その成果を論文としてまとめ，*Nature Chemistry* 誌に出版した。現在，進化の過程で機能を失った擬似酵素に注目するこの手法を用いて，他の様々なタンパク質（例えば，並進型分子モーターであるキネシン）を改造し，その協奏的機能の制御を目指した研究を行っている。また，細胞内では回転モーターのように常時決まった複合体状態で機能を発揮するタンパク質複合体だけでなく，その構成タンパク質を変えながら機能を発揮するものも多い。そこで，構成タンパク質の組み合わせを変えることで，その機能を制御する研究も行っている。これらの研究を通して，様々なタンパク質複合体の協奏的機能の理解と制御を目指している。
- c) 改造したタンパク質複合体を細胞内に戻すことで，細胞内でのタンパク質複合体の機能の理解と細胞機能の制御を目指した研究を行っている。例えば，細胞が栄養状態などの環境の変化に応答するために中心的な役割を果たしている TOR 複合体は，その構成タンパク質の組み合わせを変えながら機能を果たす。そして，特定の構成タンパク質の組み合わせの複合体を欠損させると細胞の寿命が延びることも明らかとなっている。この TOR 複合体の構成タンパク質の組み合わせを合理的に変え，細胞の寿命を制御する研究を行い，これまで同じと考えられていた二つの複

合体状態が寿命に対して異なる働きをすることを発見した。この結果は、哺乳類を含めた様々な生物の寿命を制御できる可能性を期待させるものである。2023年度、その成果をまとめ、*Journal of Cell Science* 誌に論文を出版した。さらに、既知の擬似酵素の改造だけでなく、未知の擬似酵素を探索し、それらを利用した細胞制御技術の開発も始めている。

- d) 構成的なアプローチにより蛍光タンパク質の設計原理の解明を目指した研究を進めている。また、細胞内イメージングに役立つ各種蛍光タンパク質の開発も行っている。これまでに、溶解性を上げた数種類の蛍光タンパク質の開発に成功しており、いくつかの結晶構造も得た。現在、その性能の最終評価を行いながら、論文投稿に向けて結果をまとめている。

B-2) 国際会議のプロシーディングス他

T. KOSUGI, M. TANABE and N. KOGA, “De Novo Design of ATPase Based on the Blueprint Optimized for Harboring the P-Loop Motif,” *bioRxiv* 2024.10.03.616451 (2024). DOI: 10.1101/2024.10.03.616451

B-3) 総説、著書

T. KOSUGI and N. KOGA, “Develop a Strategy to Design Artificial Allosteric Sites in Protein Complexes—Rate Acceleration of Rotary Molecular Motor—,” *Photon Factory Highlights 2023*, 24–25 (2024).

小杉貴洋, 「[ノーベル化学賞 2024] 不可能と思われていたタンパク質の構造予測とデザインの扉が開かれた」, *科学*, **94(12)**, 1101–1105 (2024).

小杉貴洋, 「David Baker 研究室を振り返って」, *化学*, **79**, 27 (2024).

小杉貴洋, 「構造解析が導いたタンパク質の改造とその理解」, *PHOTON FACTORY NEWS*, **42(1)**, 26 (2024).

B-4) 招待講演

小杉貴洋, 「タンパク質のデザインと構造予測～機械学習がノーベル賞をもたらした?～」, JST 「計測・解析基盤」× 「データ科学」研究交流会, 東京, 2025年2月.

T. KOSUGI, “Creation and control of ATPase by computational protein design,” Protein Trajectories Symposium, Tokyo, December 2024.

小杉貴洋, 「構造モデルに基づいた合理的改造により出芽酵母 TOR 複合体の機能に迫る」, 第 47 回日本分子生物学会年会シンポジウム「やっぱり大事な TOR シグナリング～複層的 TOR の包括的理解へ向けて～」, 福岡, 2024年11月.

小杉貴洋, 「タンパク質機能の合理的設計・制御とその応用」, 酵素工学研究会 第 92 回講演会, 川崎, 2024年11月.

小杉貴洋, 「タンパク質の設計・改造: 計算結果を自ら実験で検証する」, 第 97 回日本生化学会大会シンポジウム「高速分子動画: その先へ」, 横浜, 2024年11月.

小杉貴洋, 「ノーベル化学賞 2024 『タンパク質のデザインと構造予測』」, 第 14 回 CSJ 化学フェスタ 2024 「2024 ノーベル賞解説講演」, 東京, 2024年10月.

小杉貴洋, 「計算機を用いたタンパク質の設計・改造」, 第 458 回 CBI 学会講演会「創薬の多様化に対応するタンパク質構造観察技術の進化」, オンライン開催, 2024年8月.

小杉貴洋, 「蛋白質デザインにおける構造ダイナミクスについて考える」, 基礎から学ぶ最新 NMR 解析法第 9 回ワークショップ—AI を活用した NMR 解析—, 吹田, 2024年8月.

T. KOSUGI, “Understanding and controlling functions of protein complexes by computational protein design,” 2024 Frontier Symposium in Computational Chemistry, Biophysics, and Biological Sciences, Seoul (Korea), November 2024.

T. KOSUGI, “Diffraction method for current and future protein design,” Diffraction Methods in Structural Biology 2024, Berlin (Germany), July 2024.

B-6) 受賞, 表彰

小杉貴洋, 第13回自然科学研究機構若手研究者賞 (2024).

B-7) 学会および社会的活動

学協会役員等

日本生物物理学会分野別専門委員 (E-05 タンパク質設計・ドラッグデザイン) (2025).

学会の組織委員等

第13回分子モーター討論会世話人 (2024).

学会誌編集委員

生物物理学会誌編集委員 (2025–2026).

B-8) 大学での講義, 客員

九州大学先導物質化学研究所, 研究指導者, 2024年4月–2025年3月.

静岡大学, 非常勤講師, 2024年10月–2025年2月.

B-10) 競争的資金

科学技術振興機構さきがけ研究, 「タンパク質複合体を合理的に改造し, 細胞内機能を理解・制御する」, 小杉貴洋 (2020年度–2024年度).

科研費基盤研究(B), 「調節分子の違いが生み出すアロステリーの向上と拡張」, 小杉貴洋 (2024年度–2028年度).

科研費基盤研究(B), 「還元的手法と構成的手法を組合せた蛍光蛋白質の設計原理の解析と新規蛍光蛋白質開発」 (代表者: 今村博臣), 小杉貴洋 (研究分担者) (2024年度–2026年度).

自然科学研究機構 OPEN MIX LAB (OML) 公募研究プログラム (研究共創型), 「並進型分子モーターの改造: 細胞分裂の制御を目指して」, 小杉貴洋 (2024年度).

科学技術振興機構さきがけ研究, 「失われたタンパク質機能を復活・拡張する細胞制御技術の開発」, 小杉貴洋 (2024年度–2027年度).

(公財)住友財団基礎科学研究助成, 「構成的アプローチによる De Novo 設計 ATP 加水分解酵素の高活性化」, 小杉貴洋 (2024年度–2026年度).

機能分子システム創成研究部門

山本 浩史（教授）（2012年4月1日着任）

佐藤 拓朗（助教）

WU, Dongfang（特任研究員）

後藤 拓（大学院生）

竹脇 由佳（大学院生）

楠本 恵子（大学院生）

村田 了介（技術支援員）

石川 裕子（事務支援員）

A-1) 専門領域：分子物性科学

A-2) 研究課題：

- a) キラル有機超伝導体を用いたスピントロニクス
- b) キラル分子によるスピン偏極の理論構築
- c) 交代磁性体の非相対論的検出

A-3) 研究活動の概略と主な成果

- a) 有機キラル超伝導体である κ -(BEDT-TTF)₂Cu(NCS)₂ 塩の薄膜単結晶を用いたスピントロニクスデバイスを作製し、その電気的磁気的特性を測定した。その結果、超伝導転移点付近で交流による励起を行うと、磁場と平行に印可した電流において非相反現象が見出された。これは超伝導結晶のキラルな空間群に基づくスピン流生成が原因であると考えられるが、その大きさを見積もると、理論的な予想値よりもはるかに高いスピン偏極が生じていることが示唆された。また、電流を印加する方向によって臨界電流が異なる超伝導ダイオード効果も観測することに成功した。
(BEDT-TTF = Bis(ethylenedithio)tetrathiafulvalene)
- b) CISS (Chirality-Induced Spin Selectivity) 効果はキラル分子に対してトンネル電流を流すと、分子を通過してきた電子のスピンが電流と平行あるいは反平行に偏極する現象であり、近年新たな有機スピントロニクス的手段として注目されつつある。我々は、CISS 効果の根本的なメカニズムを解明するために、キラル物質の量子論的理解に取り組んだ。その結果、電子の量子状態を多極子展開することにより、キラリティの秩序変数を表現することが可能となり、分子のキラリティを量子力学的に表現するためにはスピンの本質的な役割を果たすことを明らかにした。この事実は、キラル分子が巨大なスピン偏極を生み出す CISS 効果と、根本的なところでつながっている可能性がある。
- c) 強磁性体・反強磁性体に続く第三の磁性体として注目されている、交替磁性体のスピン流検出に取り組んだ。理論計算により、 κ -(BEDT-TTF)₂Cu[N(CN)₂]Cl 塩は交替磁性体であり、電場誘起スピン流を生成することが予想されているが、その検証はまだ為されていない。その原因のひとつは、系が絶縁体であるために効率的な輸送現象計測が困難であることであると想定される。そこで我々は外場制御により、より伝導性の高い状況を実現し、その条件でのスピン流生成を試みた。その結果、スピン流を起源とすると思われる特殊なホール効果の検出に成功した。

B-1) 学術論文

H. M. YAMAMOTO, “Rolling Carbon on a Rock: Graphene,” *Nat. Mater.* **24**, 330–331 (2025). DOI: 10.1038/s41563-025-02151-8

H. KUSUNOSE, J. KISHINE and H. M. YAMAMOTO, “Emergence of Chirality from Electron Spins, Physical Fields, and Material-Field Composites,” *Appl. Phys. Lett.* **124(26)**, 260501 (2024). DOI: 10.1063/5.0214919

A. INDA, R. OIWA, S. HAYAMI, H. M. YAMAMOTO and H. KUSUNOSE, “Quantification of Chirality Based on Electric Toroidal Monopole,” *J. Chem. Phys.* **160(18)**, 184117 (2024). DOI: 10.1063/5.0204254

B-4) 招待講演

山本浩史, 「CISS 研究の現状と固体科学への展開」, 日本物理学会年次大会シンポジウム「キラリティがもたらす新現象の開拓と制御～CISS 効果を中心に～」, オンライン開催, 2025年3月.

山本浩史, 「CISS 効果の固体デバイスへの展開」, 電気学会日本磁気学会共催「光と CISS と磁性錯体」研究会, 東京, 2025年1月.

山本浩史, 「カイラリティと電子状態」, CREST トポロジ領域合同セミナー, 京都, 2024年11月.

山本浩史, 「Spin-polarization control by chiral materials」, 物性研究所短期研究会「新物質開発・システム創成研究の最前線：分子・クラスターがもたらす物性と機能」, 柏, 2024年10月.

山本浩史, 「キラリティとスピントロニクス」, 東京大学工学部物理工学科教室談話会, 東京, 2024年5月.

H. M. YAMAMOTO, “Chiral molecules and helical electrons,” Solvay Workshop on Chirality, Spin and Reactivity, Brussel (Belgium), November 2024.

H. M. YAMAMOTO, “Chirality-Induces Spin Selectivity in Various Materials,” Thailand-Japan Symposium in Chemistry 2024, Chiang Mai University, Chiangmai (Thailand), November 2024.

H. M. YAMAMOTO, “Chiral Spintronics with Molecular Materials,” ISCOM2024, Anchorage (U.S.A.), September 2024.

H. M. YAMAMOTO, “Chiral phonon-mediated circular photo galvanic effect,” Electron Spin in Chiral Matter — Sigtuna CISS meeting 2024, Sigtuna (Sweden), July 2024.

H. M. YAMAMOTO, “Chiral Atoms and Helical Electrons,” META2024, Toyama (Japan), July 2024.

H. M. YAMAMOTO, “Novel spintronics devices based on chiral materials,” Workshop on physics and electronics of 2D doped materials, Tateshina (Japan), June 2024.

H. M. YAMAMOTO, “Chirality-Induced Spin Selectivity and Multipoles,” OIST-JST-AIMR Joint International Symposium: Interaction Between Various Chiral Fields and Chiral Materials, Okinawa (Japan), June 2024.

H. M. YAMAMOTO, “Chirality-based spintronic devices with molecular materials,” ICSM2024, Dresden (Germany), June 2024.

H. M. YAMAMOTO, “Emergent Chiral Spintronics based on Molecular Materials,” CEMS Topical Meeting on Emergent Phenomena in Topological Quantum Materials, Wako (Japan), May 2024.

B-5) 特許出願

特開 2024-158274, 「配向体製造装置」, 平等拓範, 佐藤庸一, 青山正樹, 吉田久史, 木村幸代, 山本浩史, 伊東正篤, 井上龍夫, 長谷川順(自然科学研究機構), 2023年.

WO2024225471(A1), 「配向体製造装置」, 平等拓範, 佐藤庸一, 青山正樹, 吉田久史, 木村幸代, 山本浩史, 伊東正篤, 井上龍夫, 長谷川順(自然科学研究機構), 2024年.

B-7) 学会および社会的活動

学協会役員等

分子科学会幹事(2020–2024), 総務委員長(2022–2024).

学会の組織委員等

分子科学会運営委員(2018–2024).

ISCOM2025組織委員会組織委員長(2025).

文部科学省, 学術振興会, 大学共同利用機関等の委員等

日本学術振興会 世界トップレベル研究拠点プログラム委員会拠点作業部会委員(2023–2028).

日本学術会議事務局連携会員(2023–2027).

東京大学物性研究所協議会委員(2024–2026).

理科教育活動

「科学三昧 in あいち 2024」指導助言(2024). (佐藤 拓朗)

その他

凝縮系科学賞審査委員(2019–).

森野基金推薦委員(2021–).

ELASTO-Q-MAT (Deutsche Forschungsgemeinschaft), Scientific Advisory Board (2022–).

Asian Young Scientist Fellowship (physical science), Selection Committee member (2022–).

Chirality at the nanoscale, International Advisory Board (2023–).

B-8) 大学等での講義, 客員

理化学研究所, 客員主管研究員, 2023年4月–2026年3月.

東京大学大学院工学系研究科, 教授, 2024年4月–2026年3月.

理化学研究所, 客員研究員, 2022年10月–2025年3月. (佐藤拓朗)

B-10) 競争的資金

科研費基盤研究(A), 「キラル伝導体を用いた巨大スピン偏極デバイスの開発」, 山本浩史(2023年度–2026年度).

科学技術振興機構さきがけ研究(受託研究), 「キラルな分子性物質を舞台にした強相関スピントロニクスの開拓」, 佐藤拓朗(2023年度–2024年度).

日本学術振興会研究拠点形成事業(A. 先端拠点形成型), 「量子創発分子層エレクトロニクス」山本浩史(2024年度–2028年度).

科学技術振興機構創発的研究支援事業(基金)(受託研究)、「創発的研究推進のための研究環境整備」, 山本浩史(2024年度-2025年度).

科研費基盤研究(B)、「キラル超伝導デバイス設計による巨大スピン偏極流の自在制御」, 佐藤拓朗(2024年度-2026年度).

科研費基盤研究(B)、「カイラリティが誘導するフォノン・スピン・フォトン交差結合の理論」(代表: 岸根順一郎), 山本浩史(研究分担者)(2021年度-2024年度).

科研費基盤研究(A)、「カイラル物質が誘導する非局所スピン偏極の解明と基礎学理の構築」(代表者: 戸川欣彦), 山本浩史(研究分担者)(2023年度-2026年度).

B-11) 産学連携

共同研究, (株)アステム, 「アイ・ドラゴン4の機能を広範囲に警報周知するシステムへと機能を拡張する可能性に関する共同研究2」, 山本浩史(2024年度).

C) 研究活動の課題と展望

キラリティによるスピン流生成は, 近年益々注目されるようになってきている。どちらかと言うと化学分野で注目されているCISSのみならず, 物性物理分野でも空間反転対称性を失った物質構造に基づく新たな物性発現が盛んになされており, 両者の共通点と相違点を検討しながら実験を進めていく必要があると考えられる。さらに空間反転対称性の破れのみならず, 時間反転対称性の破れについても, 様々なスピン物性の源となることが明らかになってきた。その文脈において, 交替磁性体の物理も今後より発展していくことが期待できる。このようにキラル物質特有の性質, あるいは交替磁性体特有の性質を用いて, 様々な外場によるスピン流の生成・制御に取り組んでいきたい。