

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）、併任PIが4名（斉藤教授、加藤教授、飯野教授、岡本准教授）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。

2025年度の特筆すべき研究成果として、シアノバクテリア概日時計システムの進化に関する共同研究（秋山グループ）が科学雑誌「*Nature Communications*」誌に掲載された。その他、機能分子システム創成研究部門からは、キラル有機超伝導体における頑健なスピン運動量結合に関する研究成果が「*Physical Review Research*」誌に（山本グループ）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）
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）
杉坂 かな恵（技術支援員）
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.* *Nature Commun.* 2025; Furuike *et al.* *PNAS Nexus* 2025; 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.*, *Nature Commun.* 2025）。約 31 億年前，約 26 億年前，約 22 億年前，約 13 億年前，約 1 億年前の時計タンパク質を復元し，それぞれが体内時計の特徴であるリズム反応を示すかどうかを検証した。その結果，約 22 億年前の時計タンパク質が，歴史上で時を刻み始めた最初の体内時計であったことを解明した。本成果は，テレビ報道（知り TIME：2025 年 6 月 5 日），新聞報道（読売新聞：2025 年 6 月 2 日），オンラインニュース（20 件以上）等で取り上げられ，広く一般社会の注目を集めることとなった。
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.*, *PNAS Nexus* 2025）。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。本成果は、オンラインニュース（約10件）等で取り上げられた。

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 ユーザー協団体）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-1) 学術論文

C. YAMAGUCHI, R. A. KANALY, E. NISHIZAKI, K. YAMASHITA, K. TAKATSUKI, Y. FURUIKE, M. FANG, S. AKIYAMA, S. AOKI, M. TSUKAMOTO, Y. NAKAHIRA, S. GOLDEN and S. KUTSUNA, “Effects of the Signaling Molecule Cyclic-di-GMP on Cyanobacterial Circadian Rhythm in *Synechococcus elongatus* PCC 7942,” *J. Bacteriol.* e00574-25 (2026). DOI: 10.1128/jb.00574-25

K. ITO-MIWA, Y. ONOUE, T. KONDO and K. TERAUCHI, “Effect of pH on the Cyanobacterial Circadian Oscillator In Vitro,” *Commun. Biol.* **8**(1), 828 (2025). DOI: 10.1038/s42003-025-08273-8

A. MUKAIYAMA, Y. FURUIKE, K. ITO-MIWA, Y. ONOUE, K. HORIUCHI, K. KONDO, E. YAMASHITA and S. AKIYAMA, “Evolutionary Origins of Self-Sustained Kai Protein Circadian Oscillators in Cyanobacteria,” *Nat. Commun.* **16**(1), 4541 (2025). DOI: 10.1038/s41467-025-59908-7

Y. FURUIKE, Y. ONOUE, S. SAITO, T. MORI and S. AKIYAMA, “The Priming Phosphorylation of KaiC Is Activated by the Release of Its Autokinase Autoinhibition,” *PNAS Nexus* **4**(5), pgaf136 (2025). DOI: 10.1093/pnasnexus/pgaf136

B-3) 総説, 著書

S. AKIYAMA and Y. FURUIKE, “Autonomous Disassembly of Circadian Clock System of Cyanobacteria at Dawn,” in *Circadian Clocks in 2024*, 89–97 (2025).

B-4) 招待講演

秋山修志, 「最古の体内時計が日の出を知らせた約 22 億年前のある日」, 自然科学研究機構シンポジウム「元素から紐解く宇宙と生命のものがたり」, 岡崎市 (ハイブリッド開催), 2026 年 3 月.

秋山修志, 「分子科学研究所の X 線溶液散乱装置とその利用事例の紹介」, 第 3 回 ARIM マテリアル循環－量子・電子制御領域合同計測セミナー, オンライン開催, 2026 年 3 月.

古池美彦, 「古代地球における時計タンパク質 KaiC の構造の進化」, 学術変革領域(A) 「時間タンパク質学」領域会議, 福井, 2026 年 1 月.

古池美彦, 「Structural Evolution of Clock Protein KaiC on Ancient Earth」, 日本生物物理学会 シンポジウム「ノルウェー・日本二国間シンポジウム」, 奈良, 2025 年 9 月.

古池美彦, 「古代 KaiC の構造に刻まれた 概日リズムの起源」, 日本蛋白質科学会年会 シンポジウム「時間タンパク質学: 時を生み出すタンパク質分子とその実体」, 姫路, 2025 年 6 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」, 学術変革領域(A) 「時間タンパク質学」第三回領域会議, 東京, 2025 年 4 月.

Y. FURUIKE, “Crystallizing Clock Protein KaiC with Planetary Rhythm Across Billions of Years,” 国立成功大学生物化学及分子生物学研究所セミナー, Tainan (Taiwan), November 2025.

S. AKIYAMA, “One day about 2.2 billion years ago, cyanobacteria anticipated the timing of the next sunrise,” 20th Asian Chemical Congress, Bangkok (Thailand), June 2025.

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 (2023–2026).

文部科学省, 学術振興会, 大学共同利用機関等の委員等

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, 客員教授(客員研究員), 2025年7月–2026年3月.

総合研究大学院大学先端学術院, 「基礎生体分子科学」, 2025年11月. (古池美彦)

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」(代表者: 秋山修志), 古池美彦(研究分担者) (2022年度–2026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–2025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).

武田科学振興財団 2022年度生命科学研究助成, 「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).

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).

C) 研究活動の課題と展望

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（教授（兼任*））（2025 年 4 月 1 日～2026 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）

*大阪大学大学院基礎工学研究科

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) 新規極短パルス光源の開発
- 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) コヒーレント多次元分光法は，凝縮系における超高速ダイナミクスを解明するための強力な手法である。なかでも二次元電子分光法は，不均一広がりを有する系のダイナミクスや，複数の発色団を含む分子系におけるエネルギー移動過程を詳細に追跡できるため，線形分光法や従来の過渡吸収分光法では得ることのできない相関情報を与える。一方で，従来の測定装置では観測可能な周波数帯域が限られており，広い周波数領域にわたる分子応答間の相関を，高い時間分解能で測定することは容易ではなかった。そこで我々は，音響光学素子に基づく高速パルス整形器を導入し，超広帯域コヒーレント多次元分光の基盤となるパルス整形技術の開発に取り組んだ。遅延時間掃引，位相反転，回転座標系における遅延時間掃引など，多次元分光の実現に不可欠な波形整形・位相変調技術の開発と実装を進め，これにより，広帯域かつ高時間分解能で分子の電子・振動応答の相関を計測するための実験基盤を構築した。
- b) 凝縮相における単純分子系の励起状態ダイナミクスや，DNA・タンパク質の紫外光応答を解明するうえで，紫外極短パルス光は重要なツールである。しかし，分散補償の困難から，空気中での発生はこれまで十分に開拓されてこなかった。本研究では，アクロマティック第二高調波発生によって発生させた紫外広帯域パルスを，Two-Dimensional Spectral Shearing Interferometry (2DSI) による群遅延評価を指標としてフーリエ限界まで圧縮する新規光学系を開発した。光線追跡シミュレーションに基づき，広帯域紫外パルスに含まれる大きな高次分散をプリズム対，および可変形鏡をフーリエ面に配置した 4-f パルス整形器を用いて補償し，スペクトル全域にわたって群遅延をほぼゼロに制御することに成功した。これにより，深紫外および近紫外領域において，フーリエ限界に迫る時間幅 ~ 3 fs の極短パルス光発生を実現し，凝縮相における高時間分解能紫外分光計測への足がかりを得た。
- c) 極短パルスを用いた時間分解分光では，電子基底状態および励起状態に誘起された核波束運動を観測することが可能であり，両状態のダイナミクスに関する有益な知見が得られる。最近我々は，光合成アンテナ複合体 Lhcp を対象として，サブ 10 fs の時間分解能を有する過渡吸収分光測定を行った。その結果，クロロフィルを選択的に励起した条件においても，カロテノイドの振動コヒーレンスが観測され，クロロフィルとカルボニルカロテノイドの間に弱い励起子の混成が存在することを示唆する知見が得られた。これらの結果は，カロテノイドが単なる補助色素ではなく，

集団的な励起状態の形成に寄与することを示しており、天然および人工の集光アンテナ系におけるコヒーレンスの解釈に新たな視点を与えるものである。

B-1) 学術論文

- Y. YONEDA, M. KOSUGI, J. MINAGAWA and H. KURAMOCHI**, “Upper-State-Assisted Uphill Energy Transfer in a Far-Red Light-Harvesting Antenna from an Antarctic Alga,” *J. Chem. Phys.* **164**(8), 085101 (2026). DOI: 10.1063/5.0310823
- L. LIU, H. KURAMOCHI, M. IWAMURA, K. NOZAKI and T. TAHARA**, “Localization of the Au–Au Bond Strength in the Triplet Excited State of the $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$ Oligomers Revealed by Ultrafast Time-Domain Raman Spectroscopy,” *Chem. Sci.* **17**(5), 2676–2684 (2026). DOI: 10.1039/D5SC05664K
- R. MATSUOKA, Y. YONEDA, H. KURAMOCHI, T. MIURA, T. IKOMA, M. SAIGO, T. EHARA, K. MIYATA, K. ONDA and T. KUSAMOTO**, “Spectroscopic Characterization of the Charge-Separated Zwitterionic State Responsible for the Excimer-Like Emission of a Luminescent Diradical,” *J. Am. Chem. Soc.* **148**(1), 1086–1095 (2026). DOI: 10.1021/jacs.5c17112
- K. HIRAMATSU, H. KURAMOCHI, S. TAKEUCHI and T. TAHARA**, “Time-Domain Raman Optical Activity Spectroscopy,” *Optica* **12**(12), 1981–1987 (2025). DOI: 10.1364/OPTICA.575503
- M. KOGA, D. H. KANG, Z. N. HEIM, N. HALDAR and D. M. NEUMARK**, “Extreme Ultraviolet Time-Resolved Photoelectron Spectrometer with an Ultrathin Liquid Flat Jet,” *Rev. Sci. Instrum.* **96**(7), 073002 (2025). DOI: 10.1063/5.0272226
- T. EHARA, Y. YONEDA, T. YOSHIDA, T. OGAWA, Y. KONISHI, T. ONO, A. MURANAKA, H. KURAMOCHI, K. MIYATA and K. ONDA**, “Dynamic Excited-State Localization Induced by Jahn-Teller Distortion Observed by Coherent Vibrational Spectroscopy,” *J. Am. Chem. Soc.* **147**(30), 26446–26455 (2025). DOI: 10.1021/jacs.5c06020
- S. TAHARA, R. KURIHARA, K. KOJIMA, H. KURAMOCHI, S. TAKEUCHI, Y. SUDO and T. TAHARA**, “Ultrafast Protein Dynamics Prior to Retinal Photoisomerization in Microbial Rhodopsins,” *J. Phys. Chem. Lett.* **16**(23), 5732–5738 (2025). DOI: 10.1021/acs.jpclett.5c00623
- Y. YONEDA, T. KONISHI, K. SUGA, S. SAITO and H. KURAMOCHI**, “Excited-State Aromatization Drives Nonequilibrium Planarization Dynamics,” *J. Am. Chem. Soc.* **147**(14), 12051–12060 (2025). DOI: 10.1021/jacs.4c18623

B-3) 総説, 著書

米田勇祐, 「フェムト秒二次元分光による光化学反応の分析」, *ぶんせき*, **7**, 187 (2025).

B-4) 招待講演

- 倉持 光, 「先端的超高速・非線形分光で迫る凝縮相分子ダイナミクス」, 第46回光化学若手の会, 札幌, 2025年6月.
- Y. YONEDA and H. KURAMOCHI**, “Unraveling Ultrafast Chemical Reaction Dynamics of Condensed-Phase Complex Molecules through Vibrational Coherence,” The 22nd International Conference on Time-Resolved Vibrational Spectroscopy (TRVS2025), Shiga (Japan), May 2025.
- H. KURAMOCHI**, “Visualizing excitonic and primary structural dynamics in photoactive proteins by ultrafast coherent vibrational spectroscopy,” Telluride meeting “Protein dynamics,” Telluride (USA), July 2025.

H. KURAMOCHI, “Mapping ultrafast chemical reaction dynamics in complex molecular systems via vibrational coherence,” Kobe Seminar on Quantum Biology and Technology, Kobe (Japan), October 2025.

Y. YONEDA and H. KURAMOCHI, “Unraveling ultrafast chemical reaction dynamics of condensed-phase complex molecules using few-cycle pulses,” The International Chemical Congress of Pacific Basin Societies 2025 (Pacifichem 2025), “Ultrafast Chemical Dynamics,” Honolulu, Hawaii (USA), December 2025.

Y. YONEDA and H. KURAMOCHI, “Mapping ultrafast chemical reaction dynamics through vibrational coherence,” Pacifichem 2025, “Recent Advances in Coherent Multidimensional Spectroscopy,” Honolulu, Hawaii (USA), December 2025.

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).

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.

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な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).

科研費学術変革領域研究(A) (公募班), 「新規超高速多次元分光による光応答性タンパク質の不均一性と反応初期過程の統合的理解」, 倉持 光 (2025 年度–2026 年度).

科研費基盤研究(S), 「新奇分子研究が切り拓くロドプシン科学のフロンティア」 (代表者: 井上圭一), 倉持 光 (研究分担者) (2025 年度–2029 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, 凝縮相における複雑分子系の機能・構造・ダイナミクスの解明に取り組んでいる。特に分子研においては, 極短パルス光を用いた独自の超高速コヒーレント振動分光の材料系への応用を進めるとともに, その多次元振動分光への発展や, 新規方法論開発を支える極短パルス光源の開発に取り組んできた。さらに, 従来のアンサンブル測定では捉えられない自発的揺らぎが, 巨大生体分子の電子状態, 構造, 反応ダイナミクスにどのような影響を及ぼすかを明らかにするため, 単一分子計測に基づく新しい蛍光相関分光法の開発も進めてきた。これらの研究はなお端緒にあるものの, 今後はその応用をさらに展開し, 凝縮相ダイナミクス研究に新たな研究潮流を切り拓きたい。

岡本 泰典（准教授）（2024 年 8 月 1 日着任）

岡本 早紀（技術支援員）

江藤 智子（技術支援員）

川口 律子（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) 生体内での自律構築に向けた人工多核金属酵素の開発
- c) 細胞外膜小胞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：連鎖的に結びついた生体内の化学反応ネットワークを通じて，細胞機能は制御されている。この生体内における化学反応ネットワークを再設計し，物質生産や医薬分野への応用を目指す研究が精力的に展開されている。生体内の化学反応ネットワークへ非天然の化学反応を自在に組み込むことができれば，天然の酵素反応のみではアクセスが困難な高付加価値化合物の生産，さらには新たな作用機序に基づく医薬の開発へとつながる。こうした背景を踏まえ，我々は非天然の物質変換能を備えた人工金属酵素を活用し，生体内の化学反応ネットワークへの介入をめざしている。

人工金属酵素は，①ホストとなるタンパク質が有する内部空間へ非天然の合成金属錯体を導入する方法，あるいは②非天然の金属中心をタンパク質のアミノ酸側鎖によって構築する方法で得ることができる。人工金属酵素研究においては，酵素が有する「温和な反応条件下での高選択的な物質変換能」と，金属錯体の持つ「自然界には存在しない強力な化学変換能」の双方を有する触媒が開発がされてきた。加えて，我々は人工金属酵素が示す「生体分子寛容性」にも注目してきた。生体分子寛容性とは，他の生体分子（タンパク質や酵素など）が共存する環境下においても，人工金属酵素の非天然機能が失活しないことを指す。この特性を活かし，我々のグループでは人工金属酵素を通じた生体内化学反応ネットワークの再編成と制御に取り組んでいる。この目標の実現へ向け，以下の3つのプロジェクトを並行して推進している。

- a) 光駆動型人工金属酵素の開発と応用；これまでに数多くの人工金属酵素が開発されてきたものの，外部刺激を介して触媒活性の制御が可能なものはほとんど報告されていない。我々は細胞内や生体内での活用を視野に入れ，光を用いた活性制御が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へルテニウム錯体を導入することで，その光化学特性を変化させることに成功した。ここで得られた人工金属酵素は光照射によって活性化し，抗体におけるアミノ酸残基選択的な化学修飾反応を触媒する能力を持つ。現在は，金属錯体の選定ならびにホストタンパク質の改変の両面から，この光駆動型人工金属酵素のさらなる高機能化を進めている。さまざまな条件検討の結果，これまでに利用してきたホストタンパク質の大腸菌による発現系の構築が難しいことが判明した。そこで来年度は，*in vitro* 翻訳系の利用など他のタンパク質発現系を検討し，ホストタンパク質への変異導入をねらう。また，計算機科学的手法と併用し，新しいホストタンパク質候補の探索を行っていく。
- b) 人工多核金属酵素の開発；複数の金属イオンから活性中心を構築する多核金属酵素は，合成化学的に難度の高い物

質変換を低環境負荷型の条件下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再構築することにより、強力な触媒開発に資する設計指針を得ることが可能となる。しかしながら、タンパク質の内部で複数の金属イオンを設計通りに配置することは極めて困難である。こうした背景のもと、我々は独自に開発した計算科学的設計手法を駆使して、多核金属中心の構築に取り組んでいる。

- c) 細胞外膜小胞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への展開を念頭に、我々は生物の産生するベシクルのエンジニアリング基盤の確立に取り組んでいる。具体的には、このベシクル内部に複数種類の機能性生体分子を導入するための手法の開発に取り組んでいる。現在までに、ベシクル内外に2つの異なるタンパク質を同時に導入可能であることを示している。

以下では、特に進捗の見られた「b) 人工多核金属酵素の開発」についての成果を記載する。

生体内の化学反応ネットワークへの介入という長期目標の達成に向け、生体内の情報伝達を担っているサイトカインの人工酵素化の研究を進めている。具体的には、サイトカインの一種であるマクロファージ遊走阻止因子（MIF）の内部空間に非天然の多核金属中心を設計した。構築する多核金属中心としては、合成配位子での構築事例のある亜鉛三核錯体をターゲット構造として選定した。まず、独自に立案した計算プログラムを用いた幾何学的な配置探索により、三核亜鉛中心を構築可能な部位の候補を網羅的に割り出した。次に、密度汎関数理論（DFT）計算により、最適な部位を絞り込んだ。得られた設計を基に、実際に MIF 変異体を作製し、亜鉛イオンと混合したところ、X線結晶構造解析により、設計通りに三核亜鉛中心が形成されていることが確認された。設計構造と結晶構造の RMSD は 0.8 Å 以下であり、我々の設計手法の精度の高さを示すことができた。MIF は元来加水分解活性を示さないが、この三核亜鉛中心が形成された MIF、すなわち人工多核亜鉛酵素は外来性功能として高い加水分解活性を発現した。この活性は既報の人工酵素と比較してもトップクラスの値であった。

B-1) 学術論文

A. UENO, F. TAKIDA, T. KITA, T. ISHII, T. HIMIYAMA, T. MABUCHI and Y. OKAMOTO, “A Cytokine-Based Designer Enzyme with an Abiological Multinuclear Metal Center Exhibits Intrinsic and Extrinsic Catalysis,” *Nat. Commun.* **16(1)**, 6781 (2025). DOI: 10.1038/s41467-025-61909-5

B-4) 招待講演

岡本泰典, 「タンパク質で金属錯体を合成する。タンパク質で金属錯体の機能を操る」, 錯体化学若手の会九州・沖縄支部勉強会, 福岡, 2025 年 12 月.

Y. OKAMOTO, “Rational Design of a Synthetic Trinuclear Zinc Center in a Protein Scaffold: Combining Non-native Catalysis with Native Protein Activity,” 21st International Conference on Biological Inorganic Chemistry, Long Beach, California (USA), August 2025.

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–), 広報・ホームページ委員 (2025–).

金属の関与する生体関連反応シンポジウム評議委員 (2025–).

理科教育活動

30周年記念式典挨拶「岐阜サマー・サイエンス・スクール」中津川市教育委員会 (2025).

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: 分子デザインはじめました, URL: <https://t.co/aqYGgPTpK6>, 2024年3月31日配信開始, 2026年3月現在で23エピソード) (2025).

B-8) 大学での講義, 客員

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), 2025年4月–2026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).

科研費基盤研究(B), 「光駆動型タンパク質化学修飾酵素の創成」, 岡本泰典 (2025年度–2028年度).

C) 研究活動の課題と展望

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個別の研究課題として上記の3つの研究を進めている。

今後の展望として, この3つのプロジェクトを並行して進めていくが, その中でも, 長期目標の達成に向けて中核となる人工多核金属酵素の研究に力点を置く。元来有していない新しい機能をMIFに付与することについては上述のように成功している。これを受け, 次なる課題としては①MIF元来の機能が維持されているかの検証, ②変異導入による触媒機能の向上, ③多核金属中心のレパートリーの拡張が挙げられる。来年度は主に①と②に注力して研究を進める。

小杉 貴洋（助教）（2015 年 6 月 1 日～2026 年 2 月 28 日）＊）

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。我々は，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に成功した。さらに，その酵素の変性温度は 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，2025 年度に *Protein Science* 誌に論文を出版した。現在は，更なる活性向上を目指しつつ，酵素活性に重要な要素は何か明らかにする研究を続けている。
- 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。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 複合体の構成タンパク質の組み合わせを合理的に変え，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。現在は，V-ATPase や TOR 複合体を合理的に改造することで，理解するだけでなく，細胞の制御を目指す研究を行っている。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) 構造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-1) 学術論文

T. KOSUGI, M. TANABE and N. KOGA, “De Novo Design of ATPase Based on a Blueprint Optimized for Harboring the P-Loop Motif,” *Protein Sci.* **34(6)**, e70132 (2025). DOI: 10.1002/pro.70132

B-3) 総説、著書

小杉貴洋,「タンパク質複合体の合理的改造」, *生体の科学*, **76(2)**, 131–135 (2025).

B-4) 招待講演

小杉貴洋,「計算科学による機能的人工蛋白質の設計」, 日本化学会第 106 春季年会, 船橋, 2026 年 3 月.

小杉貴洋,「タンパク質デザインによる機能の設計とその応用」, 発酵と代謝研究会第 2 回勉強会「次世代型の新規タンパク質設計と培養制御」, 東京, 2025 年 12 月.

小杉貴洋,「創ることと理解することと〜どのように生体分子を設計し何を指すのか?〜」, 分子研研究会「2050 年の生体分子科学を語る」, 岡崎, 2025 年 10 月.

小杉貴洋,「データと計算でタンパク質をデザインする」, 未来工学セミナー, 相模原, 2025 年 6 月.

小杉貴洋,「タンパク質デザインの現状と未来について考える」, 未来物質開拓セミナー, 相模原, 2025 年 6 月.

小杉貴洋,「計算によりタンパク質をデザインする?」, 第 478 回生物科学セミナー, 岡山, 2025 年 5 月.

T. KOSUGI, “Toward Rational Control of Concerted Protein Functions through Computational Protein Design,” The 12th Asian Biophysics Association (ABA) Symposium, Hong Kong (China), January 2026.

T. KOSUGI, “Control of protein complexes through computational protein design methods,” The International Chemical Congress of Pacific Basin Societies 2025 (Pacifichem 2025), “Polypeptide Folding and Assembly for the Materials Design and Therapeutic Applications,” Honolulu (USA), December 2025.

T. KOSUGI, “Toward rational control of cellular functions through customization of concerted protein functions,” SMART Symposium: 2025 Frontier in Computational Chemistry, Biophysics, and Biological Sciences, Shenzhen (China), October 2025.

T. KOSUGI, “Nature-inspired Computational Design Strategy for Rational Control of Protein Complexes,” 第27回iCeMS国際シンポジウム「Self-Assembly Science for Unlocking Life’s Secrets」, Kyoto, October 2025.

T. KOSUGI, “Protein Design: From Structure to Function—Unlocking Future Applications,” Tsukuba Conference 2025, Tsukuba, October 2025.

T. KOSUGI, “Control of concerted functions exerted by protein complexes using computational protein design,” Korea-Japan International Symposium on Protein Science, Himeji (Japan), June 2025.

T. KOSUGI, “Computational Protein Structure Prediction and Design,” UK-Japan FoS, London (UK), June 2025.

T. KOSUGI, “Control of concerted protein functions using computational protein design,” Protein Science and Engineering in the New Era, Taipei (Taiwan), April 2025.

T. KOSUGI, “Toward controlling energy conversion and signaling proteins using computational protein design,” IPR Seminar 2025 (International), Functions, structures and dynamics of energy conversion and signaling proteins—The latest research and future works from early and mid-career scientists—, Suita (Japan), April 2025.

B-6) 受賞, 表彰

小杉貴洋, 第 26 回酵素応用シンポジウム研究奨励賞 (2025).

小杉貴洋, 分子科学研究奨励森野基金 (2025).

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) (2025–2026).

学会の組織委員等

第 63 回日本生物物理学会年会ミニシンポジウム「タンパク質デザインへの誘い」オーガナイザー (2025).

文部科学省, 学術振興会, 大学共同利用機関等の委員等

科学技術振興機構研究開発領域に関する情報提供 (2025).

学会誌編集委員

生物物理学会誌編集委員 (2025–2026).

日本蛋白質科学会 蛋白質科学会アーカイブ編集委員 (2025–).

B-8) 大学での講義, 客員

近畿大学薬学研究科, 非常勤講師, 「大学院特別講義」, 2025 年 5 月.

総合研究大学院大学先端学術院, 「構造生体分子科学」, 2025 年 12 月.

B-10) 競争的資金

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).

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–2025 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).

(公財) 旭硝子財団化学・生命分野研究奨励, 「タンパク質デザインと細胞生物学の融合による細胞内タンパク質機能の理解」, 小杉貴洋 (2025 年度–2026 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).

*) 2026 年 3 月 1 日金沢大学医薬保健研究域准教授

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）

鍋井 庸次（助教）

WU, Dongfang（特任研究員）

戸川 欣彦（特別訪問教授）

岸根 順一郎（特別訪問教授）

佐藤 琢哉（特別訪問教授）

加藤 雄介（特別訪問教授）

PERNADI, Niza Lian（インターンシップ）

後藤 拓（大学院生）

竹脇 由佳（大学院生）

楠本 恵子（大学院生）

原多 己暢（特別共同利用研究員）

鈴木 ひかり（特別共同利用研究員）

村田 了介（技術支援員）

石川 裕子（事務支援員）

深田 亮平（特命専門員（ERATO））

坂本 昌代（事務支援員（ERATO））

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、その電氣的磁氣的特性を測定した。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

B. CHEN, K. HASHIMOTO, M. KIMATA, T. SASAKI, S. SEKI, H. M. YAMAMOTO and M. SUDA, “Manipulating Quantum Criticality in Light-Induced 2D Superconductivity,” *Commun. Mater.* **7**(1), 32 (2026). DOI: 10.1038/s43246-025-01014-8

Y. NABEI, C. YANG, H. SUN, H. JONES, T. MAI, T. WANG, R. BODIN, B. PANDEY, Z. WANG, Y. XIONG, A. H. COMSTOCK, B. EWING, J. BINGEN, R. SUN, D. SMIRNOV, W. ZHANG, A. HOFFMANN, R. RAO, M. HU, Z. V. VARDENY, B. YAN, X. LI, J. ZHOU, J. LIU and D. SUN, “Orbital Seebeck Effect Induced by Chiral Phonons,” *Nat. Phys.* **22**, 245–251 (2026). DOI: 10.1038/s41567-025-03134-x

S. MIWA, T. YAMAMOTO, T. NAGATA, S. SAKAMOTO, K. KIMURA, M. SHIGA, W. GAO, H. M. YAMAMOTO, K. INOUE, T. TAKENOBUE, T. NOZAKI and T. OHTO, “Spin Polarization Driven by Molecular Vibrations Leads to Enantioselectivity in Chiral Molecules,” *Sci. Adv.* **11**(44), eadv5220 (2025). DOI: 10.1126/sciadv.adv5220

R. SUN, Y. NABEI, A. MCCONNELL, X. ZHANG, A. COMSTOCK, H. JONES, R. GYAWALI, Y. XIONG, Z. WANG, J. LIU, W. ZHANG and D. SUN, “Determination of Orbital Relaxation in Ti/Ni Heterostructure via Orbital Pumping,” *J. Appl. Phys.* **138**(12), 123905 (2025). DOI: 10.1063/5.0292745

Z. XU, S. SAIEV, P. QIAN, Y. NABEI, Z. WANG, J. M. RINEHART, A. M. ÖSTERHOLM, A. L. JONES, J. H. LEE, C. HWANG, S. WANG, R. SUN, D. SHIN, S. JEON, K. E. ELANGOVA, J. VURA-WEIS, V. COROPCEANU, J. RODRÍGUEZ-LÓPEZ, J. R. REYNOLDS, D. SUN, J. L. BRÉDAS and Y. DIAO, “Supramolecular Chirality Largely Modulates Chemical Doping of Conjugated Polymers,” *Nat. Commun.* **16**(1), 8381 (2025). DOI: 10.1038/s41467-025-62915-3

R. GHANBARI, K. P. HARIKRISHNAN, K. PATEL, H. ZHOU, T. ZHOU, R. LIU, L. WU, A. KHANDELWAL, K. J. CRUST, S. HAZRA, J. CARROLL, C. J. G. MEYERS, J. WANG, S. PROSANDEEV, H. QIAO, Y. H. KIM, Y. NABEI, M. CHI, D. SUN, N. BALKE, M. HOLT, V. GOPALAN, J. E. SPANIER, D. A. MULLER, L. BELLAICHE, H. Y. HWANG and R. XU, “Strain-Induced Lead-Free Morphotropic Phase Boundary,” *Nat. Commun.* **16**(1), 7766 (2025). DOI: 10.1038/s41467-025-63041-w

F. POP, N. MROWEH, P. AUBAN-SENZIER, G. L. J. A. RIKKEN, D. HIROBE, H. M. YAMAMOTO, A. FRĄCKOWIAK, I. OLEJNICZAK, S. PILLET, E. E. BENDEIF, P. ALEMANY, E. CANADELL and N. AVARVARI, “Chiral Metallic DM-EDT-TTF Radical Cation Salts: Anion Size-Dependent Structural and Electronic Transitions, Charge Ordering, and Chirality-Induced Spin Selectivity,” *J. Am. Chem. Soc.* **147**(31), 27749–27767 (2025). DOI: 10.1021/jacs.5c06549

Y. DAIGO, Y. KAWASUGI, H. M. YAMAMOTO, R. KATO and N. TAJIMA, “Off-Diagonal Thermoelectric Effect and Its Gate Tuning in Molecular Conductor κ -(BEDT-TTF)₂Cu[N(CN)₂]Cl,” *Appl. Phys. Lett.* **126**(26), 261901 (2025). DOI: 10.1063/5.0278441

T. SATO, H. GOTO and H. M. YAMAMOTO, “Sturdy Spin-Momentum Locking in a Chiral Organic Superconductor,” *Phys. Rev. Res.* **7**(2), 023056 (2025). DOI: 10.1103/PhysRevResearch.7.023056

B-3) 総説, 著書

H. M. YAMAMOTO, “Spin-Induced Chiral Selectivity and Its Possible Application to Asymmetric Synthesis,” *Yuki Gosei Kagaku Kyokaishi/Journal of Synthetic Organic Chemistry*, **83**(11), 1035–1040 (2025). DOI: 10.5059/yukigoseikyokaishi.83.1035

B-4) 招待講演

佐藤拓朗, 「キラリティが駆動する有機強相関スピン物性」, 山田研究会「量子液晶概念を基盤とした新奇物性科学の若手学際研究」, 仙台, 2025年11月.

山本浩史, 「CISS 効果と時間反転対称性」, 第3回ATFコンファレンス, 沼津, 2025年11月.

佐藤拓朗, 「構造キラリティと強相関量子物性」, X-TREME 新興の学際的課題に向けた探究, 九州大学, 福岡, 2025年10月.

山本浩史, 「Chirality and electron spin」, CEMS Colloquium, 理化学研究所, 和光, 2025年9月.

佐藤拓朗, 「CISS 効果と非線形応答」, キラル若手の会, 静岡大学, 静岡, 2025年9月.

佐藤拓朗, 「キラルな有機強相関超伝導における巨大スピン軌道結合」, 第14回酸化物研究の新機軸に向けた学際討論会, 大阪大学, 吹田, 2025年9月.

山本浩史, 「CISS 効果の現状と固体CISS 効果から分かること」, 近畿大学応用化学科セミナー, 大阪, 2025年7月.

H. M. YAMAMOTO, “Materials’ chirality and electrons’ spins,” Symposium on Molecular Chirality 2025, Nagoya, May 2025.

H. M. YAMAMOTO, “Chirality, Electron Spin, and CISS,” The 2nd International Conference on Nano Energy and Technology (ICNEAT-2026), Shantou (China), March 2026.

H. M. YAMAMOTO, “Spin polarization created by chirality,” International Workshop on Spins and Molecules, Sicily (Italy), January 2026.

T. SATO, “Giant nonreciprocal superconductivity induced by chirality,” The International Chemical Congress of Pacific Basin Societies (Pacifichem 2025), Honolulu, Hawaii (USA), December 2025.

H. M. YAMAMOTO, “Chirality Induced Spin Selectivity in Chiral Conductors,” VISTEC Seminar, Rayon (Thailand), December 2025.

H. M. YAMAMOTO, “Dynamical Chirality, Electron Spin, and CISS,” Core-to-core Bordeaux, Bordeaux (France), November 2025.

H. M. YAMAMOTO, “Chirality-Induced Spin Selectivity in chiral solids,” PIERS 2025 (Photonics and Electromagnetics Research Symposium), Chiba, November 2025.

H. M. YAMAMOTO, “Spin Selectivity and Non-reciprocal Conductivity in Chiral Superconductors,” The 9th Thailand International Nanotechnology Conference (NanoThailand 2025), Bangkok (Thailand), November 2025.

T. SATO, “Chirality: A platform for nontrivial spin-momentum locking in superconductors,” International Symposium on Crystalline Organic Metals, Superconductors and Magnets (ISCOM 2025), Toyohashi (Japan), September 2025.

H. M. YAMAMOTO, “Molecular chirality, electron spin, and CISS,” Tornado online, online, September 2025.

H. M. YAMAMOTO, “True and False Chirality and CISS Effect,” Symposion on chiral molecules and organic radicals, Bucharest (Romania), July 2025.

H. M. YAMAMOTO, “Chiral Molecules and Solids for Spintronics,” 20th Asian Chemical Congress (20ACC), Bangkok (Thailand), June 2025.

T. SATO, “Gigantic nonreciprocal superconductivity induced by chirality,” EMERALD core-to-core workshop, Tianjin University, Tianjin (China), April 2025.

B-5) 特許出願

登録

ZL202080036002.X, “Chirality Detection Device, Chirality Detection Method, Separation Device, Separation Method, and Chiral Substance Device,” Y. TOGAWA, H. SHISHIDO and H. M. YAMAMOTO (University Public Corporation Osaka, National Institute of Natural Sciences), 2020 年. (登録日 2025 年 4 月 25 日)

特許第 7720582 号, 「スピン偏極電流を生成する導電性構造体, それを用いた電極及び方法」, 須田理行, 山本浩史 (自然科学研究機構), 2021 年. (登録日 2025 年 7 月 31 日)

B-6) 受賞, 表彰

Y. NABEI, Springer Nature Poster Prize at 16th International Symposium on Crystalline Organic Metals, Superconductors and Magnets (2025).

B-7) 学会および社会的活動

学協会役員等

日本物理学会代議員 (2025–2027).

学会の組織委員等

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

出前授業「超伝導に関する講演と実験紹介」岡崎北高等学校 (2025). (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–).

International Symposium on Crystalline Organic Metals, Superconductors and Magnets (ISCOM), 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–2028 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).

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).

科学技術振興機構 ERATO 研究, 「山本量子キラル変換プロジェクト」, 山本浩史 (2025 年度–2030 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–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(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).

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。