

飯野 亮太（教授）（2014 年 6 月 1 日着任）

原島 崇徳（助教）

大友 章裕（特別訪問研究員）

BOUISSETE, Tom（インターンシップ）

MEKSERIWATTANA, Wid（インターンシップ）

山本 真由子（技術支援員）

山地 つぐみ（技術支援員）

野村 潤子（事務支援員）

A-1) 専門領域：生物物理学，分子モーター，1 分子計測，タンパク質工学，DNA ナノテクノロジー

A-2) 研究課題：

- a) 人工 DNA 金ナノ粒子モーターの運動機構の解明，高性能化，高機能化
- b) 回転イオンポンプ V-ATPase の可逆的エネルギー変換の実証とイオン選択性の改変
- c) リニア分子モーターキネシンの全原子分子動力学シミュレーションによる機構解明
- d) 高速 AFM の時間分解能の向上と回転分子モーター F₁-ATPase への適用
- e) 2つのキチン結合ドメインを持つリニア分子モーター海洋細菌キチナーゼの 1 分子計測
- f) 金属錯体形成駆動の DNA ナノチューブの成長・崩壊ダイナミクスの解析
- g) 生細胞内 Na⁺ 濃度計測プローブの開発と網羅的 1 細菌計測

A-3) 研究活動の概略と主な成果

- a) DNA 修飾金ナノ粒子，RNA 修飾ガラス基板，RNA 分解酵素で構成される人工分子モーター，DNA 金ナノ粒子モーターの幾何学的速度論シミュレーションを開発して運動速度，運動距離，運動一方向性の粒径依存性を網羅的に調べ，運動速度が粒径の大きさに依存しない機構，運動距離，運動一方向性に依存する機構を解明し，性能のさらなる改善に必要な因子を特定した（Harashima T. *et al.*, *bioRxiv* 2026）。さらに，金ナノロッドの利用によるモーター本体への形状異方性の導入や，DNA ナノテクノロジーを利用した一次元 RNA 修飾 DNA ナノチューブレールの構築に成功し，DNA 金ナノ粒子モーターの完全な一方向性運動を達成することに成功した（Harashima T. *et al.*, Unpublished）。
- b) 回転型イオンポンプ V-ATPase (V₀V₁) は，ATP 加水分解反応を触媒する V₁ とイオン輸送を担う V₀ の 2つの回転分子モーターの複合体である。村田和義博士（ExCELLS 特任教授）との共同研究により，V₀ の回転子のイオン結合部位を改変してイオン選択性を Na⁺ から水素イオン (H⁺) に変えることに成功し，イオン選択性の構造的基盤を解明した（Otomo A. *et al.*, Unpublished）。また，本変異体を活用し，V₀ の固定子の 2つのイオン透過チャネルの Na⁺ 親和性に非対称性が存在することを特定し，電気化学ポテンシャルに抗う能動輸送の構造的基盤を解明した（Otomo A. *et al.*, Unpublished）。さらに野生型では，ATP アナログの AMPPNP を結合した全体構造の分解能の改善に成功し，V₁ のヌクレオチド結合構造および V₀ の準安定中間構造を明らかにした（Lee Y. E. *et al.*, Unpublished）。
- c) 鄭誠虎博士（熊本大学教授）との共同研究により，スーパーコンピュータ富岳を用いた二量体リニア分子モーターキネシンの全原子分子動力学シミュレーションに取り組み，微小管から解離した後足が微小管に結合した前足の右側を追い越すことを原子レベルで初めて明らかにした（Chong S. H. and Iino R., *Biophys. J.* 2026）。

- d) 安藤敏夫博士（金沢大学特任教授）との共同研究により，高速原子間力顕微鏡（高速 AFM）装置の改善で 1 分子計測の時間分解能を 10 倍向上することに成功し，回転分子モーター F₁-ATPase に適用して中間構造の同定と寿命の計測に成功した（Fukuda S. *et al.*, *bioRxiv* 2025）。
- e) 中村彰彦博士（静岡大学教授）との共同研究により，2つのキチン結合ドメインを持つリニア分子モーターである海洋細菌由来キチナーゼの生化学計測と 1 分子計測を行い，低濃度キチンに対する親和性と分解効率が向上していることを明らかにし，栄養源が希薄な海洋における細菌の生存戦略の一端を解明した（Tanimoto H. *et al.*, *bioRxiv* 2026）。
- f) 竹澤悠典博士（芝浦工業大学教授）との共同研究により，DNA タイルの末端に C-C ミスマッチを導入して Ag⁺ との錯形成で形成する DNA ナノチューブを設計した。全反射蛍光顕微鏡を用いた単一ナノチューブ観察により，チューブの形成（重合と連結）と崩壊（脱重合と破断）のダイナミクスを明らかにした（Harashima T. *et al.*, Unpublished）。
- g) 蓑島維文博士（大阪大学准教授）との共同研究により，細胞内に共有結合で固定・保持される蛍光性 Na⁺ 指示薬を開発および個々の大腸菌内の Na⁺ 濃度のハイスループット計測に成功し，大腸菌内 Na⁺ 濃度の分布と恒常性を明らかにした（Otomo A., Minoshima M. *et al.*, Unpublished）。

B-1) 学術論文

T. MATSUZAKI, T. SAEKI, F. YAMAZAKI, N. KOYAMA, T. OKUBO, D. HOMBE, Y. OGURA, Y. HASHINO, R. TATSUMI-KOGA, N. KOGA, R. IINO and A. NAKAMURA, “Development and Production of Moderate-Thermophilic PET Hydrolase for PET Bottle and Fiber Recycling,” *ACS Sustainable Chem. Eng.* **13**(27), 10404–10417 (2025). DOI: 10.1021/acssuschemeng.5c01602

A. OTOMO, L. G. HUI ZHU, Y. OKUNI, M. YAMAMOTO and R. IINO, “ATP Synthesis of *Enterococcus hirae* V-ATPase Driven by Sodium Motive Force,” *J. Biol. Chem.* **301**(4), 108422 (2025). DOI: 10.1016/j.jbc.2025.108422

B-4) 招待講演

飯野亮太, 「生体・人工分子モーターの性能解析と性能向上」, 理研「一分子の科学」研究発表会, 和光, 2026 年 2 月.

飯野亮太, 「自律的に働く分子機械の性能を考える」, ASMat キャンプ 2025, 熱海, 2025 年 12 月.

T. HARASHIMA, “Geometry engineering of DNA artificial molecular motor for perfect unidirectionality,” The 63rd Annual Meeting of the Biophysical Society of Japan, Nara, 2025 年 9 月.

T. HARASHIMA, “Rational engineering for high-performance DNA artificial molecular motor,” The 25th Annual Meeting of the Protein Science Society of Japan, Himeji, 2025 年 6 月.

R. IINO, “Energy conversion mechanism of an ATP-driven rotary ion pump *Enterococcus hirae* V-ATPase,” International Workshop on Bacterial Flagella and BioMachineries, Taoyuan (Taiwan), March 2026.

R. IINO, “Rational engineering of high performance artificial molecular motors,” East Asian Single Molecule Biophysics Symposium 2025 (EASMB2025), Singapore (Singapore), November 2025.

R. IINO, “Single-molecule imaging and engineering of molecular motors,” Colloquium at Institute of Atomic and Molecular Sciences (IAMS), Academia Sinica, Taipei (Taiwan), October 2025.

R. IINO, “Rational Engineering of High Performance Artificial Molecular Motors,” Telluride Workshop on Protein Dynamics, Telluride (USA), July 2025.

R. IINO and T. HARASHIMA, “Rational engineering of high performance artificial molecular motors,” 20th Asian Chemical Congress (20ACC), Bangkok (Thailand), June 2025.

B-5) 特許出願

登録

特許第 7732636 号, 「タンパク質, ポリヌクレオチド, 組換えベクター, 形質転換体, ポリエチレンテレフタレート分解用組成物, 及びリサイクル品の製造方法」, 中村彰彦, 飯野亮太 (静岡大学, 自然科学研究機構), 2021 年. (登録日 2025 年 8 月 25 日)

B-6) 受賞, 表彰

原島崇徳, 第 20 回わかしゃち奨励賞基礎科学研究部門優秀賞 (2026).

B-7) 学会および社会的活動

学協会役員等

アメリカ生物物理学学会評議員 (2025–2028).

日本生物物理学学会副会長, 理事 (2025–2027).

文部科学省, 学術振興会, 大学共同利用機関等の委員等

東京大学物性研究所外来研究員等委員会委員 (2024–2026).

学会誌編集委員

米国生物物理学学会誌 *Biophysical Journal*, Editorial Board Member (2020–2025).

日本生物物理学学会誌 *Biophysics and Physicobiology*, Editorial Board Member (2024–2025).

理科教育活動

岡崎市小中学校理科作品展「未来の科学者賞」選考委員 (2024–2025).

出前授業「自然科学研究機構による授業」愛知県立岡崎北高等学校理数探究基礎講師 (2025). (原島崇徳)

その他

森野基金運営委員会委員 (2024–2026).

B-8) 大学等での講義, 客員

総合研究大学院大学先端学術院, 講義「構造生体分子科学」, 2025 年 4 月 – .

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

B-10) 競争的資金

科研費基盤研究(B), 「ナトリウムイオン輸送性回転イオンポンプ V-ATPase のエネルギー変換機構の解明」, 飯野亮太 (2024 年度–2026 年度).

科研費若手研究, 「生体分子モーターに匹敵する速度で駆動する二輪駆動型 DNA モーターカーの開発」, 原島崇徳 (2023 年度–2025 年度).

科研費学術変革領域研究(A),「メゾヒエラルキー人工分子モーター「DNA 水車」の設計と運動の可視化」, 原島崇徳 (2024年度-2025年度).

科学技術振興機構 ACT-X 研究,「生命と情報」研究領域,「多価DNA 人工分子モーターの合理的性能向上」, 原島崇徳 (2024年度-2026年度).

(公財)立松財団A1. 特別研究助成,「世界最速の人工分子モノレールの設計と可視化」, 原島崇徳 (2025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(若手支援型),「DNA 人工分子モーターの一次元レール開発」, 原島崇徳 (2025年度).

C) 研究活動の課題と展望

ナノサイズの分子モーターは、人間が作ったマクロなモーターと比べてはるかに小さく、ブラウン運動や構造変化の活用等、異なる作動原理で動く。今後も引き続き、天然の生体分子モーターの1分子計測や構造解析でその作動原理を調べるだけでなく、天然に存在しない人工分子モーターを積極的につくることでその設計原理を理解する。また、現在、機械工学やロボット工学の専門家との共同研究を推進中であり、ナノサイズの分子機械とマクロな機械に共通する原理や相違点を明らかにする。これらの取り組みで、天然の生体分子モーターを凌駕する性能や機能を持つ人工分子モーターの創製、および、ナノ～マクロのスケールを飛び越えた分子モーターシステムの創製に繋げる。例えば、ヘテロな塩基配列を有するDNA 金ナノ粒子モーターを二量体化して外部からのDNA 添加で運動速度や運動方向の制御を可能にし、人工分子モーターの動きの変化に基づく高感度センシングを可能にする。また、天然分子では困難な分岐型、網目型DNA ナノチューブレールネットワークを構築し、分子モーターの経路選択に基づく論理回路計算を可能にする。