

分子ロボット・エクスプローラーズ：実空間を探索する分子ロボットの越境型基礎研究

	研究代表者	東北大学・大学院工学研究科・准教授 野村 慎一郎（のむら しんいちろう） 研究者番号：50372446
	研究課題情報	課題番号：26A402 研究期間：2026年度～2030年度 キーワード：分子ロボティクス、Self-X機能、実空間動作、DBTL サイクル、知能物質工学

なぜこの研究を行おうと思ったのか（研究の背景・目的）

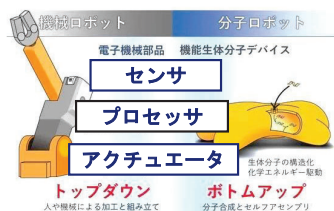
●研究の全体像

分子ロボットとは、分子を部品として組み立てた、髪の毛の太さの100分の1ほどの極めて小さな人工の機械であり、それを作り運用する技術・学問が分子ロボティクスである。「センサ（感じる）」「プロセス（考える）」「アクチュエータ（動く）」を分子で実現することで、環境のなかで自律的にタスクを遂行する（図1）。我が国の研究者たちが2009年に提唱したこの新しい人工システムは、医療・環境・エネルギーなどへの応用が期待され、新学術領域研究「分子ロボティクス」（2012～2017）、学術変革領域研究（A）「分子サイバネティクス」（2020～2025）と続く20年来の研究蓄積によって、世界をリードして発展してきた（図2）。しかしこれまでの分子ロボットは、試験管の中など理想的な実験条件下での動作実証にとどまり、生体内や自然環境のように温度・酸性度・塩濃度などが絶え間なく変動する「実空間」では機能できなかった。本領域は、分子ロボティクスを概念実証段階から脱却させて、実空間で活躍する次世代分子ロボットを創出する越境型基礎研究である。

●Self-X機能を備えた「分子ロボット・エクスプローラーズ（分子ロボEX）」の創出
実空間で自律的に働き続ける分子ロボットを実現する鍵は、**自分で直す・自分で応じる・自分で止まる、すなわちSelf-X 機能（自己修復・自己適応・自己停止）**である（図3）。本領域では、Self-X 機能を備えた分子ロボットを設計・構築するための学理を打ち立てる。自己修復は損傷した部品を分子レベルで再生する仕組み、自己適応は環境変化を感知してみずから振る舞いを変える仕組み、自己停止は異常が発生した場合や役目を終えたあとに安全に分解・無毒化する仕組みであり、いずれも生体に学びつつ人工的に設計する。

これらが一体となって働くことで、変動する実空間でも止まらず、暴走せず、必要な期間だけ動き続ける分子ロボットが初めて可能になる。これは、生命システムが何十億年もかけて獲得してきた「環境のなかで生き延びる仕組み」を、分子ロボットの設計原理として工学的に取り込む試みでもある。化学・物理・生物・工学・情報学の研究者が分野を超えて集結し、「動かしながらか洗練させる」進化的な研究プロセスへと根本的に転換することで、概念実証段階を突破し、実空間で活躍する多様な分子ロボット群＝「分子ロボット・エクスプローラーズ」を創出する。

分子ロボットとは？



分子デバイス群を統合した「物質を智能化したシステム」

図1. 分子ロボットの概念図

2009年～日本発ロードマップ

細胞型 → 多細胞型
試験管内での概念実証を達成

図2. 分子ロボティクスの進展

分子ロボットが実空間で活躍するには？

実空間動作の鍵 Self-X

Self-Assembly (自己集合), Self-Organization (自己組織化)

環境変化に対して臨機応変に対応し、
安全性を確保しながら持続的な動作を行う

図3. 実空間探索に必要な分子ロボットのSelf-X機能

この研究によって何をどこまで明らかにしようとしているのか

●定量的な性能目標：実空間で「1週間動作」

2030年度までに、生体環境（哺乳類細胞のなか）と極限環境（100℃・100気圧、深海熱水噴出孔に相当する条件）の両方で、分子ロボットを**1週間連続して動作させる**ことを目指す。これは現在の概念実証の数千倍に当たる長時間動作で、生体内での診断・治療や薬物送達、宇宙・深海・土壌などの過酷環境での探査・浄化など、これまで不可能だった応用に直結する。

●研究プロセスの変革：DBTL サイクルを従来比1/10に短縮

5つの計画班・3つの研究支援拠点・AI解析の連携により分子ロボットの設計(Design)・構築(Build)・試験(Test)・改良(Learn)からなる開発サイクルを、**従来比10倍以上に高速化**することを目指す。研究室ごとに分散していた個別研究を、異分野融合チームによる体系的な研究へと根本的に転換する。

●5つの計画研究が分担する越境研究（図4）

A01「生体環境での検証」（代表：大野博久・京都大学）：核酸・タンパク質・脂質などを駆使し、細胞内や体内で働く分子ロボットを設計する。

B01「極限環境での検証」（代表：佐藤浩平・関西学院大学）：化学修飾分子や人工核酸により、100℃・100気圧・乾燥・海水中といった過酷環境に耐える分子ロボットを構築する。

C01「素材・検証用デバイス開発」（代表：濱田省吾・東京科学大学）：人工核酸（XNA）やDNAナノ構造、人工代謝系などの新規分子材料を開発するとともに、自動実験のための「分子ロボットテストフィールド」を整備する。

D01「基盤モデル・設計論」（代表：川又生吹・京都大学）：粗視化分子動力学から分散システム理論まで、スケールを縦断する数理モデルで頑健な分子ロボットの設計指針を導く。

E01「実験自動化・データ統合・AI 解析」（代表：西羽美・東北大学）：説明可能な AI（XAI）と生成 AI を活用し、新規機能タンパク質部品の de novo（完全新規）設計と実験自動化によりDBTLサイクルを加速する。

●3つの研究支援拠点が領域全体を支える

データ統合拠点：成功・失敗を問わず全班の実験データを統一フォーマットで集約し、AI 解析用データベースとして領域内に共有する。

ペプチド合成拠点：機能性ペプチドを設計・合成して領域内に供給し、実験材料の標準化を進める。

人工核酸合成拠点：天然分子では実現できない頑健性・機能性をもつ人工核酸を合成・供給する。

これらの拠点により、各研究者が独自技術の統合に集中できる環境を整え、領域全体での分子ロボット開発を加速する。

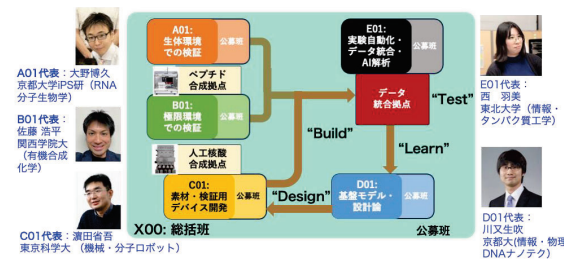


図4. DBTL サイクルを高速で回す5班＋3拠点体制

●目指す学術変革と社会への波及

本領域は、化学・物理・生物・工学・情報学を融合し、分子による情報処理・意思決定・適応行動を設計する新しい学問領域、「知能物質工学」を打ち立てる。医療（細胞内薬物送達・診断・再生医療）、環境（土壌改良・環境浄化）、極限環境探査（宇宙・深海）など、これまで実現困難だった分野への応用に道を拓く。健全な社会受容を目指し、人文・社会科学的な検討を進める。



図5. 本領域の位置づけ