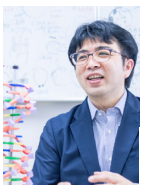


分子-デジタル融合によるArtificial Liquid Intelligenceの創製

	研究代表者	東京工業大学・情報理工学専攻 教授 瀧ノ上 正浩 (たきのうえ まさひろ)	研究者番号：20511249
	研究課題情報	課題番号：24H00070 キーワード：分子コンピューティング、DNA/RNAナノテクノロジー、人工生命・人工知能、相分離液滴、分子情報-デジタル情報変換	研究期間：2024年度～2028年度

なぜこの研究を行おうと思ったのか（研究の背景・目的）

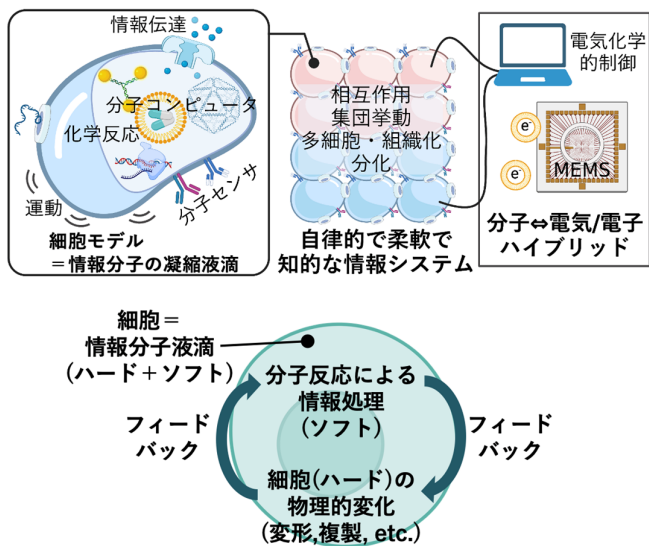
●研究の全体像

私たち生命システムは、高性能計算機（スーパーコンピュータ）などと比較すると非常に低エネルギー消費でありながら、高度な情報処理能力（知的な能力）を持っている。また、外部からの操作を必要としない自律性があり、環境変化等に対して非常に柔軟、かつ、頑健に、適応できるという特徴もある。構成要素や構築方法で比較すると、機械や電子計算機が、金属・半導体・プラスチックのようなハードな材料をトップダウン的に加工して作られているのに対し、**生命システムは、液体やそれに溶けている分子など非常にソフトな材料をボトムアップ的に自己組織化して作られている。**自己組織化（自己秩序化）とは、分子が自然に集まったり、反応したりすることを通して、細胞・組織、脳のような生体や、地球・宇宙といった、自然界の複雑なシステムを形作るという、物理学・化学の基本原則である。生命は、A・G・C・Tの4つの塩基の**文字列として情報を表現して記録している情報分子DNAに、細胞や組織の形作りや環境への応答のための、分子構造や分子反応のプログラムをコーディング（分子プログラミング）**している。すなわち、生命は、自己組織化のための高度な分子プログラムに基づいて、システムを維持し、知的な情報処理を実現している**物理的実体のある自律的な情報システム**といえる。物理的な実体と情報がカップリングしているので、自己修復、適応、自己複製といった機能も持ち、長い年月をかけて進化することもできる（図1）。

このような自律的なシステムの自己複製に関しては、情報科学者フォン・ノイマンの自己複製オートマトンの理論に始まり、物質としての生命に関する探求は、量子物理学者シュレディンガーに起源を持つが、生命システムの本質的な理解と物質科学としての実現は、それから数十年もの長い間、情報科学と物理科学における重要な未解決問題といえる。

生命システムの基本要素である細胞は、情報処理等に関わるDNAやタンパク質が超高濃度（約30%）で溶解した、高粘性凝縮液滴になっている。これらの成分はソフトで、流動性が高い材料である。すなわち、生命システムは、細胞という情報分子凝縮液滴を階層的に自己組織化させた、**液体的知性（Liquid Intelligence）**とみなすことができる（図1）。いかにして、液体に知的な情報処理を実現させることができるのか。

人工知能に関する技術は、電気/電子系のハードウェア上だけでなく、生体や分子などのウェアにまで拡張されることは必至であり、この問題の解決は、理学的な観点のみならず、工学的にも喫緊の課題である。



知的挙動、適応、進化、複製、etc.
図1 Artificial Liquid Intelligenceのイメージ図

本研究では、このような課題に挑戦するため、液体系の分子システムの概念と電気/電子系のデジタルシステムの概念を融合した**Artificial Liquid Intelligence (ALI)**の構築を目指す。**ALIの本質は、分子による実体と情報の相互フィードバック**である（図1）。応用のための技術にとどまらず、情報分子とその集合体に関する基礎的な物理学・化学に関する研究を進めるため、得られる知見は汎用的で、他の研究分野や技術にも広く影響を与えることが期待される。

●研究体制

本研究は、瀧ノ上（東京工業大学、分子コンピューティング・情報生命物理学）が、野村（東北大学、人工細胞工学）、伊野（東北大学、電気化学）、尾上（慶應義塾大学、機械工学）、佐藤（九州工業大学、分子ロボティクス）と協力して研究を進める分野横断型の研究である（図2）。

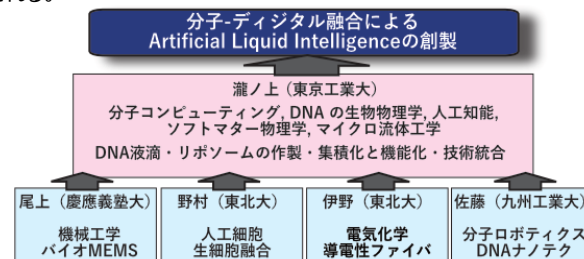


図2 研究体制

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

●目標

1. 液体的な情報処理システムを実現するため、その構成要素である情報分子・分子集合体の熱・統計力学的な性質や非平衡の動力学的な性質に関して、物理学・化学的な設計原理を理解するとともに、それらの設計手法を開拓する。
2. 分子コンピューティング技術を応用した情報処理や自己複製ができる液滴型の人工生命を作り、それを階層的に組織化する。システム間の情報伝達は電気的に実現し、既存のデジタルデバイスとも融合する。

●研究項目

1. **情報分子集合体の物理学と化学**
情報分子集合体に関するバイオソフトマター物理学・化学の研究を進めて体系化し、設計手法を構築する。液滴としては、すでに研究実績のある、X字/Y字型などの分岐型DNAナノ構造をネットワーク状に集積させたDNA液滴を利用する。人工知能技術・自動化技術を援用して設計原理を理解する（図3）。
2. **情報分子集合体による情報技術**
分子センサや分子反応を導入し、DNA液滴に情報処理をさせるための分子コンピューティング技術を開拓する（図4）。また、それを拡張し、情報処理ができる人工細胞を実現する。
3. **情報分子集合体の集積化**
分子反応・分子集合による自己組織化やマイクロ工学技術によって情報分子集合体をさらに集積し、Artificial Liquid Intelligence (ALI)を実現する。
4. **ALIと電気/電子デバイスとの融合**
電気化学的な手法を利用し、ALIと電気/電子デバイスの双方向の情報のやりとりを可能にする。
5. **ALIの応用**
ALIの応用により自律的に働く人工細胞や分子ロボットを構築し、生体を補完する知的分子情報デバイス等の革新的技術を探求する（図5）。

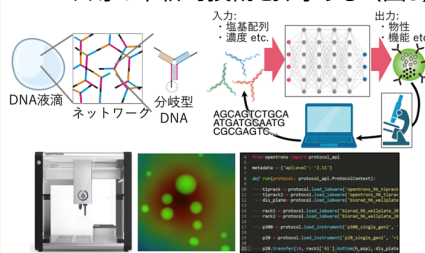


図3 情報分子集合体の物理学と化学

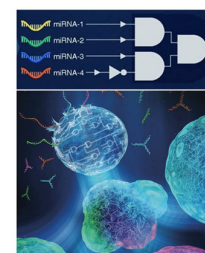


図4 DNA液滴による情報処理

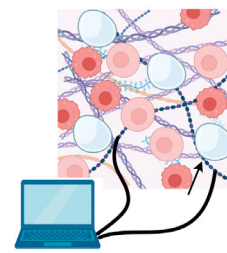


図5 分子-デジタル融合

