

公益財団法人トランスコスモス財団
2025 年度 学術・科学技術等の分野への助成事業
成果報告書

研究代表者：琉球大学工学部工学科 國田樹

本報告書は、2025 年度 学術・科学技術等の分野への助成事業（トランスコスモス財団）の助成を受けて実施した研究の成果を取りまとめたものである。

本研究の遂行にあたり、当該助成による支援を受けたことに深く謝意を表する。

調査研究テーマ

「原生生物の行動解析および生物模倣マルチエージェントモデリング」

1. 研究の目的と背景

群れの外部制御は、群衆事故の防止、環境保護、災害対応など、現代社会における多様な課題の解決に資する重要な技術である。この対象には、生物やロボットのような自律的に運動する集団のみならず、海洋に流出した油や大気中の煙のように外部要因により受動的に移動する物質の集合体も含まれる。これらの群れは、個々の要素が局所的な相互作用を通じて全体として複雑な構造や流動を示すが、その内部構造を逐次的に把握しつつ全体を直接制御することは一般に困難である。そのため、個体レベルの挙動に働きかけることで群れ全体の動態を間接的に制御する手法の確立が求められている。

本研究では、海洋中での流出油からの魚群保護や人間の群衆事故防止を最終的な応用対象とし、群れの移動方向を外部から制御するアルゴリズムの構築を目的とする。特に、群れ行動を構成する基本要素を分解的に理解し、それらを統合することで制御可能な原理の抽出を目指す。

この目的の達成に向けて、本研究では「生物学的アプローチ」と「数理的アプローチ」を統合的に用いた。生物学的アプローチでは、原生生物および細胞系を対象として、外部刺激に対する行動応答、個体間相互作用、ならびに群れ構造の変化を解析し、群れ制御に有効な行動特性の抽出を行う。数理的アプローチでは、これらの特性を持つエージェントからなるマルチエージェントモデルを構築し、シミュレーションにより群れ行動を再現するための最小限の要素を特定する。さらに、外部入力が個体の状態や相互作用に与える影響を通じて、群れ全体の移動方向や構造がどのように変化するかを検証する。

これらのアプローチより、外部からの最小限の介入によって群れ全体を制御するための一般的設計指針の確立を目指す。

2. 対象生物ごとの研究成果

本研究では、群れ行動の制御原理を明らかにするために、異なる行動特性およびスケールを持つ複数の原生生物および細胞系を対象とした。

各対象は、状態遷移、個体間相互作用、運動生成メカニズム、履歴依存性など、群れ行動を構成する異なる側面を担っている。それぞれの特性を個別に解析することで、制御に有効な要素の抽出を試みた。各対象生物に対して得られた知見とそれらが群れ制御に与える示唆について述べる。

サンゴ幼生：探索行動の状態遷移モデル化

【研究内容】

サンゴの移植技術向上を目的に、幼生が固着場所を探索する際の遊泳行動を解析した。実験により取得した軌跡から速度、旋回角度、累積移動距離などの特徴量を算出し、k-means 法、HDBSCAN、隠れマルコフモデル (HMM) を用いて行動状態の分類を試みた。

【研究成果】

HMM を用いることで「直進・蛇行・旋回・停滞」という 4 つの潜在的な行動状態を、軌跡形状と対応付ける形で高精度に同定した。状態遷移確率は 97~98% と高く、各状態が一定時間持続することが示された。この成果は、幼生が環境情報に応じて行動を切り替えるメカニズムの定量化を可能にし、外部刺激によって特定の行動（例：旋回から直進）を誘発し、固着場所へ誘導する制御モデルの基盤となる。

Heterotypic Cell（異種細胞）：不均一な集団によるクラスター形成

【研究内容】

個体特性が異なるエージェントが混在する集団において、どのような創発現象が起こるかを数理モデルにより調査した。特に、異なる特性を持つ個体が混在する「ヘテロな集団」におけるクラスター形成プロセスに着目した。

【研究成果】

シミュレーションの結果、相互作用範囲が広い個体が、狭い個体を取り囲むように分布する構造が自律的に形成されることを明らかにした。また、エージェント数の増加に伴い、中心のクラスターが分裂する現象も確認された。これは、集団内に特性の異なる個体を意図的に混入させる、あるいは一部の個体の相互作用特性を外部から操作することで、群れ全体の構造や分裂・維持を制御できる可能性を示唆している。

ゾウリムシ：繊毛運動に基づく三次元遊泳の制御

【研究内容】

ゾウリムシの繊毛が生み出す局所的な力学量に基づき、その三次元遊泳を再現する数理モデルを構築した。細胞体表面を一樣な繊毛分布領域と、細胞口周辺の局所領域に分け、それぞれのトルク寄与を考慮した力学モデルを数値計算により検証した。

【研究成果】

数値シミュレーションにより、細胞口周辺の繊毛によるトルクの空間的な非対称性が、ゾウリムシ特有の螺旋遊泳を生む主要因であることを突き止めた。パラメータの調整により、螺旋の巻き方向（右巻き・左巻き）や半径、ピッチを連続的に制御可能であることを示した。これは、マイクロスケールの自律移動体において、形状や繊毛配置を設計することで軌跡をパラメトリックに制御するための工学的指針となる。

粘菌：流動駆動型ネットワークの適応と融合

【研究内容】

粘菌の管網形成を模倣した「フィザルムソルバー」を用い、大規模ネットワークにおける経路探索とネットワーク統合の手法を数値シミュレーションにより検討した。具体的には、流量不足による経路消失を防ぐ「段階的スケールダウン手法」や、独立したネットワークを連結する「融合エッジ選択手法」を提案した。

【研究成果】

低解像度から高解像度へ情報を段階的に転写することで、通常のモデルでは計算不可能な低流量条件下でも安定して有効経路を形成できることを実証した。また、局所的な流動特性に基づくエッジ選択により、大域的な最適化なしに効率的なネットワーク融合が可能であることを示した。これらの成果は、環境変化に応じて移動経路を自律的に再構成・生成する群れ制御アルゴリズムに応用可能である。

ミドリムシ：光刺激に対する生物対流の履歴依存性

【研究内容】

ミドリムシ集団が光刺激に応じて形成する「生物対流」のパターンを、情報処理資源（物理リザーバー）として活用する可能性を検討した。光の ON/OFF（矩形波）を入力とし、形成されるコロニー数や平均輝度の時系列応答を解析して、未来予測タスクにおける性能を評価した。実験データには、末松らの研究グループの論文公開データを使用した（Suematsu et al., Front. Cell Dev. Biol., 2023）。

【研究成果】

ミドリムシの対流応答は決定係数 0.831 という高い精度で入力信号を予測し、物理リザーバーとして機能することを実証した。また、集団の応答が現在の入力だけでなく過去の刺激履歴に依存する「短期記憶」を持つことを明らかにした。これは、外部刺激に対する集団の「応答の遅れ」や「履歴依存性」を考慮した、より高度で動的な制御アルゴリズムの必要性を示している。

3. 結論

本研究を通じ、原生生物および細胞系が持つ多様な行動特性（状態遷移、個体間相互作用、異質性に起因する空間構造形成、空間的非対称性による自律回転、流動による経路最適化、刺激履歴への依存性）を生物学的・数理的に解明した。これらをマルチエージェントモデルに組み込むことで、外部からの最小限の介入によって群れ全体の移動方向や構造を柔軟に制御するアルゴリズムの基盤を構築することができた。

【関連研究成果】

<論文>

- Megumi Uza, Itsuki Kunita. (2025). Flow-Driven Fusion Edge Selection for Network Integration Inspired by Physarum polycephalum. Journal of Information and Communication Engineering (JICE), **12**(2), 638–646.

<学会発表>

- Megumi Uza, Itsuki Kunita, “Mathematical Modeling and Simulation of the Morphological Change Process in Slime Molds Driven by Environmental Adaptation,” Oxford-Japan Symposium on Cell Behaviors in Simple to Complex Environments, United Kingdom, 2025/09.
- Nonoka Homma, Itsuki Kunita, “Mathematical Modeling of the Cluster Formation Process in heterotypic cell populations,” Oxford-Japan Symposium on Cell Behaviors in Simple to Complex Environments, United Kingdom, 2025/09.
- Nonoka Homma, Yuhei Mori, Masaya Morita, Itsuki Kunita, Toshiyuki Nakagaki, “Swimming Behavior of Coral Larvae Driven by Ciliary Motion,” Oxford-Japan Symposium on Cell Behaviors in Simple to Complex Environments, United Kingdom, 2025/09.

- Megumi Uza, Itsuki Kunita, “Fusion Edge Selection Method Using a Slime Mold Model,” 2025 10th International Conference on Intelligent Informatics and Biomedical Sciences (ICIIBMS), Okinawa, 2025/12.
- 森悠平, 本間野々花, 守田昌哉, 中垣俊之, 國田樹, “サンゴ幼生の遊泳行動に基づく固着過程の状態遷移モデル化と行動クラスタ解析,” システム数理と応用研究会 (MSS), オンライン, MSS2025-44, 2026/01.
- 小橋川京佑, 宇座恩, 西上幸範, 佐藤勝彦, 中垣俊之, 國田樹, “繊毛運動に基づくゾウリムシ三次元遊泳運動の再現モデルの構築,” システム数理と応用研究会 (MSS), オンライン, MSS2025-45, 2026/01.
- 越優希, 宇座恩, 國田樹, “粘菌モデルに基づく段階的スケールダウン型ネットワーク経路最適化,” 第38回自律分散システム・シンポジウム, 静岡, 1P1B-2, 2026/02.
- 澤岷侑輝, 國田樹, “生物・非生物対流現象における物理リザーバー特性の評価,” ニューロコンピューティング研究会 (NC), NC2025-114, 東京, 2026/03.