

報告番号	甲	第	号
------	---	---	---

主 論 文 の 要 旨

論文題目 Swarm Chemistry モデルにおける非対称性に基づく
群れダイナミクスの進化的探索
氏 名 西川 尚希

論 文 内 容 の 要 旨

自然界には、蟻、鳥、魚などが作る「群れ」という現象が存在する。本研究は「興味深い群れはいかにして生み出されるのか」という疑問を出発点としている。研究手法としては、計算機を用いて群れ現象を創発させ、そのメカニズムや性質を調べる構成論的アプローチを取ることにした。群れ現象のモデル化は、Reynolds が 1987 年に発表したモデル Boids が先駆的研究である。同モデルは「接近」「整列」「衝突回避」の 3 つの行動ルールのみによって、鳥の群れに似た動きを作り出すことに成功した。近年、Boids を拡張した Swarm Chemistry (以下、SC) と呼ばれるモデルが Sayama により提案されている。SC の最大の特徴は、エージェントごとに異なる相互作用パラメータを持ちうることである。同モデルでは、同一のパラメータを持ったエージェント集合をタイプ、各タイプのエージェントが群れに何体ずつ存在するかを表現するものをレシピと呼ぶ。SC は従来の Boids のような均質な群れモデルでは作り出すことが難しい複雑な群れ構造を作り出すことができる可能性があるが、まだ十分に解明されているとは言えない。

本研究の目的は、群れ現象の構成論的理解のために SC の可能性を明らかにすることである。興味深い群れを発見するためには、膨大なパラメータ空間を探索する必要があり、何らかの数理最適化手法を利用するのが現実的である。しかし、興味深さといったあいまいで主観的な概念を表す目的関数をいかに定義するかが大きな課題である。本研究では、一つの切り口として、例えばエージェント間の相互作用における非対称性や群れにおけるエージェント配置の粗密など広義の「非対称性」が群れの興味深さに関連していると考え、非対称性を計量化した様々な指標を最適化することにより、パラメータ設定とそれが創発する群れパターンの関係を明確化することを試みた。

本論文は、全 8 章から構成される。まず、第 1 章では、上記のような研究背景と

目的について論じた。第2章では、前提とする基本モデルであるSCのアルゴリズムや各種パラメータの定義について記述した。第3章では、SCにおいて、与えられた目的関数を最大化するような群れのレシピを探索する枠組みを構築した。これはSCのシミュレータと進化的計算とを組み合わせたものである。第4章では、興味深さをターゲットとする前の予備実験として、客観的に解釈しやすい実世界でのタスクを想定した、シンプルな評価指標（目的関数）を用いて、枠組みの有効性を確認した。

第5章では、種々の非対称性にまつわる7つの定量化指標を定義した。具体的には、幾何学的な非対称性に基づいた指標として、タイプ別重心のずれ（FF-A）、エージェント間距離の分散（FF-B）、また、相互作用の有無に関するネットワークポロジの非対称性に基づいた指標として、エージェント間相互作用を表した有向グラフでの入出次数差（FF-C）、入出次数差の時間微分（FF-D）、入次数と出次数各々の時間微分の差（FF-E）、入出次数差の時間変動（FF-F）、さらに、系に内在する非対称性に基づいた指標として、最大リアプノフ指数（FF-G）である。

第6章では、前章で定義した非対称性指標を最大化する群れの探索を行った。大別して2つの特徴的な群れパターンの獲得に成功した。第1のパターンは、Schmickl *et al.* のモデルで示された「細胞」によく似た多層の膜構造に加え、脈動的に振幅が変化するようなダイナミクスをもつものである（FF-DおよびFF-E）。これは、入出次数差の時間微分もしくは入次数・出次数各々の微分値の和を目的関数としたことで、情報伝達の非対称性が高い状態と低い状態が1時刻おきに交互に生じるようなダイナミクスを引き出したためと考えられる。第2のパターンは、タイプごとに膜と球のような構造を作り、その構造が徐々に変化していくような群れダイナミクスをもつものである（FF-F）。これは、入出次数差の最大値と最小値との差を目的関数とした結果、各エージェントが時間発展の中で、情報伝達の非対称性が高い状態から低い状態までを広く遷移する群れを探索したためと考えられる。

第7章では、得られた結果を考察し、SCという特定のモデルに固有でない一般的な言葉による解釈を与えることを試みた。最後に第8章では、本研究で得られた知見および今後の展望についてまとめ、本論文を総括した。得られた知見は次のとおりである、

第1に、興味深い群れダイナミクスを得るには、エージェントの位置や速度という物理量の非対称性よりも、相互作用の非対称性を増加させるレシピを探索することが効果的であることがわかった。その直接的な根拠となるのが、より興味深いダイナミクスを得られたのがFF-D, E, Fであったという結果であり、これらの指標に共通することは、相互作用の非対称性に関するものだという点である。また、間接的な根拠として、7つの指標に対して得られたレシピにおいて、8種類のパラメータ中、知覚半径のばらつきが最も大きくなったという実験結果がある。指標

の定義として知覚半径のばらつきを促進することが自明ではないにもかかわらず、自律的な現象であることが注目される。相互作用の非対称性を決める主要因は知覚半径である。いわば、視野の広いエージェントと視野の狭いエージェントとが群れに共存することが、興味深いダイナミクスの発生に重要だといえる。

第2に、興味深い群れのダイナミクスを生み出すメカニズムに関して、正負のフィードバックループの観点からの解釈を提示した。Boids や SC でのエージェントのダイナミクスを位置と速度の2つの物理量を介したループととらえると、相互作用の非対称性は位置から速度を導く過程への介入とみなせる。系を秩序（安定化・固定化）へ向かわせる負のフィードバックと無秩序へ向かわせる正のフィードバックの作用は、時間経過とともに均衡に向かうが、そこに相互作用の非対称性が存在することで、その均衡が崩され、継続的な構造変化がもたらされると理解できる。

以上のように、本研究は、生命系に普遍的に見られる群れにおける興味深い構造やダイナミクスを生み出すメカニズムの理解の一助を得たこと、また、そのようなメカニズムの研究手法の一つの枠組みを提供できたことに意義があると考えられる。得られた知見の普遍性、そして、その応用可能性は今後の課題である。