



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Study on Inference of Direct/Indirect Interactions Between Agents from Their Time Series in Complex Biological Systems
Author(s)	Mohiuddin, Md.
Description	この博士論文の全文は利用可能日以降に公開されます。
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(総合化学)
Dissertation Number	甲第16632号
Issue Date	2025-09-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k16632
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/98242
Type	doctoral thesis
File Information	Md_Mohiuddin_review.pdf, 審査の要旨 https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/



学 位 論 文 審 査 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（総合化学） 氏名 MOHIUDDIN Md

審査担当者	主査	教授	武次 徹也
	副査	教授	小松崎 民樹
	副査	教授	渡慶次 学
	副査	教授	高橋 啓介

学 位 論 文 題 名

Study on Inference of Direct/Indirect Interactions Between Agents from Their Time Series
in Complex Biological Systems
(複雑生物系における時系列データからエージェント間の直接/間接相互作用を推測する研究)

細胞、活性コロイドなど多様な要素（本論文ではエージェントと呼ぶ）はしばしば集団的挙動を示すことが知られている。これらのエージェントがいかにして相互作用し、集団的なパターンを形成するかという基礎的メカニズムについては、理論、実験の両側面から研究されている。集団パターンの本質的性質の一つは、エージェント間の相互作用により、一つのエージェントの行動が他のエージェントの行動や状態に影響を与える点にある。これらの相互作用は、個体間の行動を誘起し、外部からの明示的な制御が存在しない状況でも、秩序構造を生み出す要因となる。しかしながら、エージェント間の相互作用は局所的であり、無限遠方のエージェント同士が相互作用を行うことは不可能である。このため、「多数のエージェントが局所的な相互作用しか持たないにもかかわらず、いかにして集団的パターンが創発されるのか？」という問いが生じる。その相互作用は直接的、および第三者を介した間接的なものに大別され、最終的に、これら直接・間接相互作用により系全体の複雑な秩序構造が形成される。このような背景から、個体間の相互作用の性質－それが直接的か間接的か－を明らかにすることは、集団行動の理解にとって極めて重要である。

本研究では、「一对のエージェント同士の観測時系列データのみが与えられたとき、それらの相互作用が直接的か、あるいは第三者を介した間接的なものかをどのように判別できるか？」という問題に対し、情報理論における移動エントロピー概念に基づいて明らかにしたものである。直接相互作用をしている一对のあいだでは、時間遅れ τ が増加するに伴って両者の因果関係の「量」が単調減少し、間接相互作用では、第三者を介して影響が伝搬するので単調減少性が担保される必要がないという作業仮説を立てて、直接・間接相互作用が既知の数種の数理モデルシミュレーションで、その作業仮説が正しいことを明らかにした。さらに、相互作用の様相が未知である細胞性粘菌の集団挙動の動画から背後の相互作用域を同定する研究にも展開している。

移動エントロピーの原著論文 (Schreiber, T. Phys. Rev. Lett. 85,461(2000)) は 3000 回以上引用されている因果推論における金字塔的論文であるが、移動エントロピーの最大値が時間遅れの関数である欠点がある。本論文では、最大値が時間遅れに依存しない改良型移動エントロピーを用いることで、初めて直接・間接相互作用を高い精度で識別できることを初めて明らかにした。以下に、この論文の概要を示す。

本論文は以下の 6 章で構成される。

第 1 章「序論」では研究背景と既存研究のギャップ、本研究の目的および本論文の構成を述べている。特に間接相互作用を論じている既存手法では第三者の組み合わせの数だけ評価する量が指数関数的に増大することを論じている。

第 2 章「情報理論的指標の概観」では Shannon エントロピーから移動エントロピーおよび改良型移動エントロピーに至る情報理論的指標を数式と共に解説し、それらの上限値の時間遅れ依存性を議論している。

第 3 章「改良型 Vicsek モデルへの応用」では、アクティブマターの集団運動を記述することで知られている、直接・間接相互作用が既知である複数の改良型 Vicsek モデルを用いた時系列データへ応用し、本手法の有効性をあきらかにしている。

第4章「ランジュバン動力学モデルへの応用」では、直接・間接相互作用が既知である、原子間相互作用を模したランジュバン動力学モデルを用いた時系列データへ応用し、相互作用にかかわる典型的な時間スケール単位の推定法を考案しつつ本手法の有効性をあきらかにしている。

第5章「細胞性粘菌における相互作用領域の推定」では、相互作用の様式が未知の蛍光画像の動画データを解析し、細胞間相互作用の空間的特性を明らかにしている。

第6章「総括」では本研究の成果を総括し、今後の展望を述べている。

これを要するに、「1組の細胞個体の軌跡データから、その細胞間の相互作用が直接的なものか、見えない第三者を介したものかを判別できるか？」の問いを情報理論に基づいて明らかにしたものである。各細胞個体の過去の軌跡から直接的な相互作用と隠れた仲介を介した間接的な相互作用を区別することは困難であり、既存手法では組み合わせ爆発の問題があったが、最大値が時間遅れに依存しない改良型移動エントロピーに基づき、隠れた仲介の存在を検出するデータ駆動型数理手法を開発した。直接／間接相互作用が既知である数理モデルに基づくシミュレーション結果に対して、その有用性を示すとともに、真値が不明な細胞性粘菌の相互作用域をデータ駆動的に同定することにも成功している。

よって著者は、北海道大学博士（総合化学）の学位を授与される資格あるものと認める。