



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Observation for Protoplasmic streaming that changes its morphology and transport in Physarum polycephalum [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	佐藤, 耀
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(ソフトマター科学)
Dissertation Number	甲第16532号
Issue Date	2025-06-30
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/95685
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Yo_Sato_review.pdf, 審査の要旨



学 位 論 文 審 査 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（ソフトマター科学） 氏 名 佐藤 耀

	主査	教 授	中 垣 俊 之
審査担当者	副査	教 授	居 城 邦 治
	副査	教 授	黒 川 孝 幸
	副査	准教授	西 上 幸 範
	副査	助 教	大 村 拓 也

学 位 論 文 題 名

Observation for Protoplasmic streaming that changes its
morphology and transport in *Physarum polycephalum*
(変形菌モジホコリにおける形態と輸送を変える原形質流動の観察)

博士学位論文審査等の結果について（報告）

生物体内輸送ネットワークは、動物の血管系や植物の維管束系、真菌類の菌糸系にみられる特徴的な構造物であり、生物体の維持に重要である。生物体全域にわたる物質輸送は、計測上容易ではない。本研究では、変形菌モジホコリに注目し、その特性を活かすことで、この課題に対する一つの回答を与えた。

変形菌モジホコリの変形体は、アメーボゾアに属する多核の単細胞生物であり、シート状の体内に流路ネットワークを作って、体全体を調節し維持している。変形体内の原形質流動（およそ1～2分周期の往復流動）は、1940年ごろから、主に細胞の収縮リズム（周期はおよそ1～2分）や細胞内組織の観点から研究されはじめ、2000年以降になり輸送ネットワークのモデル生物として注目されるようになった。近年では、原形質流動の局所的な計測を踏まえて、流路の分岐前後での局所的な攪拌や、ネットワークの幾何学的な形状から体全域にわたる輸送性能の推測などが行われている。

本研究では、原形質流動の体全域計測をめざして、比較的微小（直径1 mm程度）な変形体を調整し、内在する顆粒（細胞内顆粒やオルガネラなど）をParticle Tracking Velocimetry (PTV) によって追跡した。粒子追跡データを統計的に処理して、原形質流動の速度を体全域で求め、かつその時間変化も求めた。この計測データに基づいて仮想粒子の運搬シミュレーションを実施することによって、体全域にわたる物質の輸送や攪拌の特性を評価した。

その結果、体内のある場所に配置した仮想粒子が、往復原形質流動によって、ほぼ拡散的に（粒子の平均二乗距離が時間に比例して増加）することがわかった。低レイノルズ数での往復流動であるにもかかわらず、たかだか3回程度の往復流動で、変形体内のある場所に局在する物質が体全域にわたりほぼ拡散的に送達されることがわかった。一般的に低レイノルズ数流れでは、その時間反転対称性から往復流動では容易に拡散しないと思われるが、それを覆す結果として、生物学的にも物理学的にも示唆に富んだ成果である。これは体内の流れ速度パターン、すなわち流路ネットワーク形成に伴う構造化された流れ場の特性によっていることも本研究により示された。このことは、本研究が、生物全般の流路ネットワークの送達特性を検討する上での、一つの先進事例であることを示している。

その拡散機構を解明するために、流路ネットワークの幾何学形状からグラフ特性を抽出し、3分岐ノードを合流ノード（2辺の流入と1辺の流出）と分流ノード（1辺の流入と2辺の流出）とに分類し、分流ノードの配置特性に基づき、分流ノードではほぼ確率的にどちらの辺に流れるかが決まっていることを突き止めた。この確率的な分流機構は、まだはっきりとは解明されなかったが、変形体の形や

流路ネットワークの形、細胞の厚みの変化、往復流動の流量差、などの微小な変化により引き起こされるであろうことが示唆され、今後の研究の礎を与えた。

また、本研究は、流路内の流束プロファイルの統計的な計測により、原形質の興味深いレオロジー特性（ある速度で降伏して流れやすくなる性質）、並びにその降伏値がどの太さの流路でもほぼ流路壁近傍で認められたことを示した。これらの発見は、流路ネットワークが降伏ずりに関連して自己組織されている可能性を示しており、生物輸送ネットワークの一大問題であるその形成機構を解き明かす上で、特に意義深いといえる。加えて流路の太さと流量のスケーリング則（流量が太さのほぼ3乗に比例することも示した。これは、動物の血管系で知られているマレー則と同様の性質であり、流動のエネルギーと流体の体積に比例する維持コストとの総和を最小化するスケーリング則として評価されており、粘菌変形体のような単純な体制の生物においても同様の機能性が実現している発見として生理学的に意義深い。

以上の成果により、著者は、変形菌モジホコリにおける形態と輸送を変える原形質流動の研究より、生物輸送ネットワークの基礎的な輸送性能について幾多の新知見を得たものであり、生物体の輸送システムの生理学に対して貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士ソフトマター科学の学位を授与される資格あるものと認める。