



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_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学位論文内容の要旨

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

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)

生物における輸送ネットワークは、動物の血管系や植物の維管束系、真菌類の菌糸系をはじめ幅広い生物種にみられる特徴的な構造物であり、生物体の維持において重要な役割を担っている。にもかかわらず生物体全域にわたる輸送性能の計測や評価は容易ではないため、この課題はこれまで持ち越されてきた。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、この課題をいくつかの点で克服できた。

変形菌（または真性粘菌）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、流路ネットワークの形成過程を顕微鏡で観察した。変形体に内在する顆粒（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。それとともに、流路内の流速プロファイルから、原形質のレオロジー特性がわかった。さらに、計測したデータに基づいた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がはっきりした。

(1) 微小な変形体は、はじめ流路ネットワークを持たない状態から 3 時間ほどかけて、変形と原形質流動のパターンを変えながら、体全体にわたる流路ネットワークを構築した（流速の分布範囲は数から 100 $\mu\text{m/s}$ ）。この時、変形体の中央部分に特徴的な環状路（Central Annular Channel; CAC）が発達し、そこに局所的な樹枝状分岐ネットワークがつながった。このような CAC 構造を介して物質の輸送量は飛躍的に向上した。

(2) 流路ネットワーク全体の輸送性能を定量的に調べるために、今回計測した流れ速度場の結果を活用して、仮想粒子の移動シミュレーションを行った。このシミュレーションでは、はじめに仮想的な粒子を流路の横断面に並べ、流速データに沿って動かした。その結果、往復する移流であるにも関わらず、初期位置からの平均二乗距離 (MSD) は、時間に対してほぼ比例した（拡散定数は 100 $\mu\text{m}^2/\text{s}$ ）。これは流路ネットワークを往復することで、拡散のようなランダムな運動が実現したことを意味する。

(3) 流路ネットワーク上の往復流動による拡散機構を考察した。まず、流路ネットワークのグラフ構造を抽出したのちに、グラフのノードを分流ノードと合流ノードに分類し、さらに隣接した分流ノード間の平均距離と平均流速を評価した。このようにして流路ネットワークを粗視化したグラフを得た。このグラフ上のランダムウォーク過程を分析することによって、拡散の仕組みを明らかにした。

(4) 変形体内全域にわたる、物質の混合性を調べるためのシミュレーションを実施した。はじめに変形体全域を仮想的に 4 つの領域に分割して、それぞれの領域に同じ数の仮想粒子をラン

ダムに配置した。その後、実験データにそって粒子を動かして、4 種類の粒子の混ざり具合を定量化した。その結果、CAC が発達した領域では粒子の混合が活発でほぼ均等になった(均等に混合するまで約 5 分)。

(5) 流路内の流速プロファイルはしばしば放物線とは異なる形を示した。流路径ごとに整理した統計的な結果では、どの径でも流速プロファイルが二つの領域、すなわち流路中央部のなだらかな領域と周辺部の急速な低下領域に分かれた。二つの領域の境目のズリ速度は、どの流路径でもほぼ同じ値(2.5 /s)であったことは、原形質の特徴的なレオロジー特性を示していると思われる。F-アクチン溶液が示す特徴的なシアニング特性を仮定した流速プロファイルが、実験で得られたものと似ていることから、今後実験と理論を合わせた流れの解析が進められると思われる。

以上の結果から、流路ネットワークの構造に対応して、流れの向きと速さが体全体でどのように構造化されるかが定量的にわかった。その構造により、体全域にわたる物質の輸送や混合が著しく向上することがはっきりした。流路ネットワーク中の往復運動であるにもかかわらず、拡散的な挙動が実現する点は、物理的な観点からも興味深い。流路ネットワークの自己組織化機構については、粘菌に限らず動物の循環系においても流路壁のせん断応力が一定であることが、流路の発達調節において重要な役割を担っているという作業仮説があり、本研究で得られた流路内の流れの解析が、将来的にこの作業仮説の検証に役立つのではないと思われる。モジホコリの研究は、今後もますます生物輸送ネットワークに関する重要な知見をもたらしてくれるだろう。