

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	須田 沙織
論文題目	Change of motion of a swimming droplet (遊泳液滴の運動の変化について)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>微生物や細胞など能動運動する物体や、非生物でありながらも化学反応や温度勾配、物質拡散などを自己形成して運動する物体を総称して自己駆動物体と呼ぶ。須田氏による本論文では、液滴で構成された自己駆動物体の運動様相の転移が研究されている。内部外部共に流体で構成された液滴は、境界界面の表面張力勾配が生み出すマランゴニ効果によって対流を生み出し液体中を泳ぐ。実験と数理モデルの両面から運動様相の変化を検討し、運動変化のカギとなるパラメータを発見すると共に、直線的運動から曲線的運動への転移のメカニズムを明らかにした。</p> <p>第 1 章では、遊泳微小液滴の基礎的な説明や先行研究の概要について説明している。この研究以前の知見として、自己駆動する遊泳液滴は直進運動を示したり湾曲性の運動や振動・回転性の運動を示したりする事は知られていたものの、その条件等は不明であった。なお、後述する第 2 章と同時期の別の研究論文で界面活性剤濃度が変わると運動の直進性が変化するという事が報告されるなど、研究分野の興味が自己遊泳運動の多様化のメカニズムに向かいつつある状況であった。</p> <p>第 2 章では、遊泳液滴の実験と数理モデルの構築が為されている。油中水滴系で液滴サイズを系統的に制御した実験を行い、半径数十マイクロメートル程度の小さい液滴では極めて良い直進性を持つのに対して、液滴サイズが大きくなると共に運動の直進性が減じ、百マイクロメートルを越えると左右にふらふらと湾曲する運動へと変化する事を示した。次に、内部対流と液滴運動の同時測定を行うことで、運動方向の変化角度と、双極子対流と四極子対流の間の角度差に強い相関が有ることを発見した。この角度差同士の強い相関が回転運動や湾曲運動の原因であるかを検討するために、実験結果の知見を取り込んだ数理モデルを新たに作成し、直進解の安定性などを解析した。その結果、双極子と四極子の角度差が運動方向変化を引き起こす事と、外部摂動に対する角度変化の応答性が液滴サイズ増大と共に縮小型から拡大型に変化する事を明らかにした。大きな液滴は大きく湾曲した運動を示す事にあたる。</p> <p>第 3 章では、先の移流拡散方程式モデルの導出の詳細を説明するとともに、第 2 章では単発の摂動だった外部入力をノイズ項に替えたシミュレーションを行い、ノイズの性質に対する運動変化を検討している。試された種類のいずれも、並進運動の運動角度相関の統計的性質は、入力されたノイズを応答性の縮小拡大をそのまま同等程度に反映する事が示された。一方で、見た目の運動には差が生じ、熱ゆらぎや濃度場の熱的ノイズを模した白色ガウスの場合にはノイズの入力そのままの場合と軌道の見た目が類似し、自己の排出物や航跡など大きな濃度ムラを想定した散発的かつゆっくりとした入力の場合には見た目の軌道の乖離が大きくなる事が示された。まとめると、小さい液滴の場合には外部入力やノイズの効果が弱められ直進性が回復し、大きい液滴の場合には外部からの摂動やノイズの性質が拡大された形で我々が目にする運動軌道に反映される事が示された。</p> <p>最後に第 4 章では、以上の研究の総括と今後の展望が議論されている。</p>			

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、自己駆動する遊泳液滴が見せる運動様相の変化のメカニズムを研究している。自ら非平衡状態を生み出す物体が運動に関して最初に破る対称性は動き出しについてである。須田氏は単独の液滴の自己駆動遊泳について実験と数理モデルから詳細な研究を行い、動き出し条件に近い小サイズ液滴での運動は直進安定であること、サイズが大きい液滴ではゆらぎ等の外部摂動に対する応答性が拡大方向に変化することで湾曲軌道が増え、曲線的運動へと変化することを明らかにした。以下に、主に学術的な成果や新規性に関する点を中心に審査結果を報告する。

第2章において、遊泳液滴の運動様相変化について実験と数理モデルの両面からアプローチしている。まず実験技術として、従来のマイクロ流体デバイスを用いた液滴生成方法では多体の相互作用を排除しきれないため、単体の自己駆動の運動様相変化の原因を調べる事が困難であった。須田氏はこの問題をキャピラリとマイクロインジェクタを用いて解決した。これを用い、液滴サイズを系統的に制御した実験を行う事で、液滴サイズが大きいほど直進性を失い、半径百マイクロメートル程度を境に湾曲した軌道を示す事を初めて明らかにした。更に、液滴の内部対流を液滴の並進運動と同時に計測する事で、自己遊泳中の内部対流の定量測定に成功した。この結果をもとに内部対流の球面調和展開項の成分毎の時間変化を解析し、運動方向の変化と最も相関が高いパラメータが、双極子対流と四極子対流の角度差である事を発見した。従来の研究では、陽に観察された四極子流れと運動方向変化を関連付ける指摘のみが為されていたが、その運動方向変化が現れていない直進条件からでも四極子流れ成分が存在し、その角度差が直進からのふらつきや湾曲運動と相関している事を実験的に示すと共に数理モデルからも裏付けた。四極子流れが陽となる転移より手前に、引っ張り型遊泳から押し出し型遊泳への転移が存在し、それに伴うゆらぎに対する直進安定性の変化が運動様相変化を招くという事である。

第3章においては、数理モデル内の運動方向に関する変数に与える摂動の種類を検討し、結果として現れる運動様相の変化を研究している。摂動やノイズが入力されている変数は、運動方向と対応している内外の誘起対流の双極子流の軸方向、液滴表面の界面活性剤濃度の主要な勾配方向に関する定常解である。内外溶液の界面活性剤分子やミセルの濃度むらは表面濃度を左右する事から、実験的には上記の要因のいずれもが候補となる。入力ノイズの種類を変えても、直進性に関する統計的性質には差が殆ど無いが、液滴の運動には差が生じる事が興味深い。液滴運動の緩和時間よりもずっと高周波成分を含む白色ガウスノイズより、同程度の時間スケールのゆっくりとしたランダムノイズの方が見た目の運動を大きく変化させるという結果が示されている。この結果からの推測として、実験で見られる湾曲運動の原因となるノイズは、熱ゆらぎなどよりも、表面からの界面活性剤の脱離についての大きなゆらぎや液滴サイズ程度の外部濃度むらなどの寄与が大きいことが提案されており、実験的な検証へ道筋を与えるものとなっている。

このように、対流と運動の精密な計測と数理モデルとの相互検証を通じて、自己駆動する遊泳液滴の運動がどの様に多様化していくかを明らかにした本研究は、独創的かつ新規的である。

以上により総合的に判断し、本論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和4年9月22日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公表可能日： _____ 年 _____ 月 _____ 日以降