

京都大学	博士 (工学)	氏名	馮 超 (フウン チョオ)
論文題目	Dynamics of a model microswimmer near a liquid-liquid interface (液液界面近傍におけるモデルマイクロスイマーのダイナミクス)		
<p>バクテリアや精子など、流体中を自己推進する微生物や人工物をマイクロスイマーと呼ぶ。マイクロスイマーの運動は、栄養分の獲得や光への反応性などの生命活動の維持に深く関係しており、その挙動を理解するための系統的な研究が必用とされている。工学的には人工的なマイクロマシンやマイクロモーターの開発の指針となるものであり、例えばマイクロモーターを用いたドラッグデリバリーシステム (DDS) など、複雑な生体環境内での応用に大きな可能性を有するものである。しかしながら、マイクロスイマーに関する既存の研究は均一で単純な粘性流体中でのものがほとんどであり、不均一系における研究も固液界面や気液界面近傍のものが主であった。このような系では、マイクロスイマーの運動は液体相内に限定されるため、実際の生体内で重要となる液液界面を通過するような運動は起こり得ない。液液界面近傍におけるマイクロスイマーの挙動を正しく理解するためには、固液界面や気液界面近傍とは異なり、自由に変形しスイマーが通過可能な柔らかい界面を扱う必要があるが、それにより生じる高い計算コストがシミュレーションの実施を困難にしている。</p> <p>本研究では、ソフトマター系に対して開発された高精度で高効率の直接数値シミュレーションの手法を用いることで計算コストの問題を解決し、柔らかい液液界面近傍におけるマイクロスイマーの運動について詳細な解析を行った。マイクロスイマーの理論モデルとしては、スクイマーモデルと呼ばれる一般化された簡易数値モデルが広く用いられており、本研究でもこれを採用した。マイクロスイマーは、周囲に作り出す流れ場の特性から Pusher, Puller, Neutral の三つのスイマータイプに大別されるが、スクイマーモデルでは泳動タイプを与えるパラメータの値を調整することによりこれらのスイマーを定量的に再現できる。この学位論文では、「変形・通過可能な液液界面近傍におけるマイクロスイマーのダイナミクス」、「異なる粘度を持つ液液界面近傍におけるマイクロスイマーのダイナミクス」、「変形・通過可能な液滴表面近傍におけるマイクロスイマーのダイナミクス」の三つの成果についてまとめた。以下に、各章の概要を示す。</p> <p>学位論文の第二章では、「変形・通過可能な液液界面近傍におけるマイクロスイマーのダイナミクス」をテーマとした研究結果をまとめた。界面近傍でのマイクロスイマーのダイナミクスをシミュレーションで扱ったこれまでの研究では、そのほとんどにおいてマイクロスイマーが界面を通過するような運動は考慮していない。本章では、平らな液液界面近傍でのマイクロスイマーのダイナミクスを研究するため、自由に変形しスイマーが通過可能な界面のモデルを構築し、系統的に行った直接数値シミュレーションを行った。その結果、界面に近づいたマイクロスイマーの運動は、スイマーの界面への入射角度とスイマーの泳動タイプに依存して、界面で法線方向速度が反転する「反射」、界面に沿って運動する「スライド」、界面を通り過ぎる「通過」という 3 種類の異なるカテゴリーに分類できることを見出した。また、マイクロスイマーが界面との接近を多数回繰り返した後に、スイマーのタイプに依存して異なる定常状態に達することを示した。</p> <p>学位論文の第三章では、「異なる粘度を持つ液液界面近傍におけるマイクロスイマーのダイナミクス」をテーマとした研究結果をまとめた。本章では、異なる粘度を持つ 2 種類の液体を導入し、両者間の平らな液液界面近傍におけるマイクロスイマーのダイナミクスを解析した。その結果、第二章で検討した入射角度と泳動タイプに加え、2 つの液体の粘度比もマイクロスイマーのダイナミクスに影響を与えることがわかった。さらに、低粘度の流体中に初期配置された Puller は、反射・スライド・通過のいずれでもない、界面から少し距離を保ちながら界面に平行に移動する「ホバリング」運動を行うことを見出した。</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	馮 超 (フウン チョオ)
<p>学位論文の第四章では、「変形・通過可能な液滴表面近傍におけるマイクロスイマーのダイナミクス」をテーマとした研究結果をまとめた。本章では第二、第三章で行った研究を拡張し、曲がった界面を持つ液滴表面近傍におけるマイクロスイマーのダイナミクスを解析した。その結果、液滴表面近傍のスイマーのダイナミクスは、界面の曲率が大きい場合は平らな界面近傍での結果と一致するものの、界面の曲率が小さくなるに従ってマイクロスイマーの運動にその影響が出ることを確認した。条件により液滴でマイクロスイマーを補足することができるが、補足が起こる最小の液滴サイズは泳動タイプに依存すること、強い Puller だけが液滴表面をスライドする状況を取り得ることを見出した。さらに、液滴内外の液体の粘度比の影響についても検討した。粘度が異なる場合は、液滴内部の粘度が外部より大きい場合も小さい場合も、等しい粘度の場合に比べてマイクロスイマーの補足が起こりにくくなることがわかった。</p> <p>最後に第五章では、二章～四章の総括および、今後の展望を記している。本論文では、混相流体中のマイクロスイマーのダイナミクスの理論的な解析を可能にすべく、自由に変形しスイマーが通過可能な界面のモデルを構築し、スクワマーモデルを用いた直接数値シミュレーションを実現し、スイマーの入射角度、泳動タイプ、液体の粘度比、界面の曲率といったパラメータがマイクロスイマーの運動に与える影響を系統的に調べた。本研究で構築したマイクロスイマーと多成分流体のモデルは幅広い汎用性を持っており、今後、疎水性や親水性を持ったマイクロスイマーのダイナミクスや多数のマイクロスイマーの共同運動など、より複雑な状況に対する理解の向上にも大きな貢献が期待できる。</p>			

バクテリアや精子など、流体中を自己推進する微生物や人工物をマイクロスイマーと呼ぶ。マイクロスイマーの運動は、栄養分の獲得や光への反応性などの生命活動の維持に深く関係しており、その挙動を理解するための系統的な研究が必用とされている。本研究では、柔らかい液液界面近傍におけるマイクロスイマーの運動について直接数値シミュレーションを用いて詳細な解析を行った。以下にその概要を示す。

1. 変形・通過可能な液液界面近傍におけるマイクロスイマーのダイナミクス：平らな液液界面近傍でのマイクロスイマーのダイナミクスを研究するため、自由に變形しスイマーが通過可能な界面のモデルを構築し、系統的に直接数値シミュレーションを行った。その結果、界面に近づいたマイクロスイマーの運動は、スイマーの界面への入射角度とスイマーの泳動タイプに依存して、界面で法線方向速度が反転する「反射」、界面に沿って運動する「スライド」、界面を通り過ぎる「通過」という3種類の異なるカテゴリーに分類できることを見出した。また、マイクロスイマーが界面との接近を多数回繰り返した後に、スイマーのタイプに依存して異なる定常状態に達することを示した。
2. 異なる粘度を持つ液液界面近傍におけるマイクロスイマーのダイナミクス：異なる粘度を持つ2種類の液体を導入し、両者間の平らな液液界面近傍におけるマイクロスイマーのダイナミクスを解析した。その結果、2つの液体の粘度比がマイクロスイマーのダイナミクスに大きな影響を与えることに加え、低粘度の流体中に初期配置された Puller 型スイマーは、反射・スライド・通過のいずれでもない、界面から少し距離を保ちながら界面に平行に移動する「ホバリング」運動を行うことを見出した。
3. 変形・通過可能な液滴表面近傍におけるマイクロスイマーのダイナミクス：曲がった界面を持つ液滴表面近傍におけるマイクロスイマーのダイナミクスを解析した。その結果、液滴表面近傍のスイマーのダイナミクスは、界面の曲率が大きい場合は平らな界面近傍での結果と一致するものの、界面の曲率が小さくなるに従ってマイクロスイマーの運動にその影響が出ることを確認した。さらに、液滴内外の液体の粘度比の影響についても検討した。粘度が異なる場合、液滴内部の粘度が外部より大きい場合も小さい場合も、等しい粘度の場合に比べてマイクロスイマーの補足が起こりにくくなることがわかった。

以上の結果は、液液界面近傍におけるマイクロスイマーの運動を解析するための新しい力学モデルの構築に加えて、今後、疎水性や親水性を持ったマイクロスイマーのダイナミクスや多数のマイクロスイマーの共同運動など、より複雑な状況に対する理解の向上にも大きな貢献が期待できる。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和5年2月20日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行い、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。