

二国間交流事業 共同研究報告書

令和5年4月17日

独立行政法人日本学術振興会理事長 殿

[日本側代表者所属機関・部局]

東京大学・大学院情報学環

[職・氏名]

教授・大島 まり

[課題番号]

JPJSBP 120197409

1. 事業名 相手国: 中国 (振興会対応機関: NSFC) との共同研究

2. 研究課題名

(和文) 複合マイクロ流体回路の流れ特性とメカニズムの解明

(英文) Flow Characteristics and Mechanism in the Complex Microfluidic Circuit

3. 共同研究実施期間 平成31年4月1日 ~ 令和5年3月31日 (4年0ヶ月)

【延長前】 平成31年4月1日 ~ 令和3年12月31日 (2年9ヶ月)

4. 相手国側代表者(所属機関名・職名・氏名【全て英文】)

Tianjin University・Professor・Li Feng-Chen

5. 委託費総額(返還額を除く)

本事業により執行した委託費総額		4,181,250 円
内訳	1年度目執行経費	1,402,500 円
	2年度目執行経費	1,425,000 円
	3年度目執行経費	1,353,750 円

6. 共同研究実施期間を通じた参加者数(代表者を含む)

日本側参加者等	3名
相手国側参加者等	5名

* 参加者リスト(様式 B1(1))に表示される合計数を転記してください(途中で不参加となった方も含め、全ての期間で参加した通算の参加者数となります)。

7. 派遣・受入実績

	派遣		受入
	相手国	第三国	
1年度目	2	0	0 (0)
2年度目	0	0	0 (0)
3年度目	0	0	0 (0)

* 派遣・受入実績(様式 B1(3))に表示される合計数を転記してください。

派遣: 委託費を使用した日本側参加者等の相手国及び相手国以外への渡航実績(延べ人数)。

受入: 相手国側参加者等の来日実績(延べ人数)。カッコ内は委託費で滞在費等を負担した内数。

8. 研究交流の概要・成果等

(1)研究交流概要(全期間を通じた研究交流の目的・実施状況)

本研究は、マイクロ流路に界面活性剤溶液に代表される粘弾性流体を流すことにより生じる、スイッチング現象などの特徴的な流れ現象を計測および数値解析によって解明し、それらを結合して複雑な機能を有するマイクロ流体回路を設計することを目的とした。全期間を通じて対象とするチャネル形状を T 字ジャンクションから流路内円柱へと発展させ、これら単純な流路形状においても、稼働部品を設けることなく規則的な周期振動特性を得られることが判明した(Yuan et al., Micromachines, 2021 など)。本成果は今後の発展的デバイス開発に向けての基礎データとなり、他分野との連携も見据えて応用例の創出を試みる。

一方、二国間の研究交流に対しては、新型コロナウイルスによる相手国側の外国人に対する渡航制限が続いたことや中国国内の移動制限解除後に感染が拡大したことにより、人的交流に用いる旅費の費目を変更して計測装置に接続可能な Web カメラを購入し、遠隔で実験手技を習得や実験画像をリアルタイムでの共有など新たな試みを実施した。その結果、基礎的な技術の共有や議論を推進することはできたが、マイクロ流体の操作や光学的計測装置の調整方法など手先の微妙な感覚を要する技術に関しては十分に伝えることができないなど課題も残った。

また、マルチフィジックス解析ソフトウェア COMSOL を導入し、マイクロ流動現象だけでなく高分子流動と波動光学を連成したシミュレーションを目指した。本解析は先方の粘弾性シミュレーション結果および計測結果と比較検証に活用され、粘弾性モデルの評価などに役立った。一方、波動光学シミュレーションを 3 次元で行うには非常に多くの計算リソースを要することから解析領域が限定され、デジタルホログラフィ計測との相関確認も限定的な成果にとどまった。

人的交流としての成果は大きく、オンライン中心ではあったものの、時差もほぼ無いことからむしろ距離を気にせず活発な議論を行うことができた。特に若手同士の交流においては先方の研究スピードの速さに大きな刺激を受け、とりわけ未知の物理現象を対象とした課題であるマイクロ粘弾性流動に関しては、スピード感と詳細のバランスを取る重要性を学ぶことができた。

(2)学術的価値(本研究交流により得られた新たな知見や概念の展開等、学術的成果)

本研究では、微小な流体装置における振動流の多くの応用について言及されているが、これまでに報告されてきたマイクロ流体振動子の実現方法は、通常、流れのレイノルズ数が少なくとも1のオーダーであることを必要とする衝撃ジェット効果やコアンダ効果に基づくものが一般的であった。また、高分子膜をマイクロ流体内に設置することで振動流を実現する方法があるが、製造プロセスが比較的複雑であり、長時間の使用後に膜が柔らかくなり、設計条件からの偏差を引き起こすことがある。そこで、本研究では、マイクロ粘弾性流体の特性を活用することで、マイクロ流体振動子としての応用を目指した。また、先方が数値解析をメインに担当する事に対し、当方は共焦点マイクロ PIV (Particle Image Velocimetry: 粒子画像流速測定法) およびデジタルホログラフィック顕微鏡(DHM)を用いてマイクロ流れ場の可視化計測を行い、数値解析のバリデーションおよび、流れ場と粘弾性流動現象の相関を得ることを目指した。

解析結果から、Weissenberg 数と粘度比が一定の範囲内であれば、標準的な T 字型チャネルとその改良されたチャネルにおいて Oldroyd-B モデルの粘弾性流体の定常振動特性を得ることができることがわかった。これらのチャネルは、極めて低いレイノルズ数でのパッシブなマイクロ流体振動子として利用でき、流路形状のシンプルさ、可動部品の不要性、出口を 2 ポート設けることができるなどの利点を見出した。また、流路形状の発展形として、非定常な粘弾性流動を誘発に多用される流路内に設置された柱状構造物を用い、それをジャンクション流路に組み合わせるという画期的な解析も行った。その結果、ジャンクション中央に円柱を設置することで流れ

の滞留点を固定する効果が現れ、流れの不安定性を安定化する効果があることが示された。また、円柱のサイズによって決定される流路の狭窄率にも依存し、流線の曲率とコーナーに向かって高い変形速度に関連する可能性が高いことが示された。これらの研究により、ジャンクションを用いたマイクロ流体振動子の制御方法として滞留点と流動構造を合わせて考慮することにより、よりスイッチングの精度を高めることができる可能性を示した。

当方で行った可視化計測においては、共焦点マイクロPIVを用いた2次元の多断層計測によって、詳細な速度分布を得ることができた。しかしながら、高 Re 条件時の非定常スイッチングではランダムな変動が高速で生じるため、3次元流動構造の把握が困難であった。そこで、DHMを用いた3次元計測を行うことにより、瞬時の流動構造変化に対しても3次元流動構造を把握することが可能となった。ただし今後の課題として、DHMの光学特性上、作動流体に分散させるトレーサ粒子の個数密度に上限があるため、データ密度の点から改善が望まれる。

(3)相手国との交流(両国の研究者が協力して学术交流することによって得られた成果)

本国際共同研究によって同じアジア圏においても異なる文化を持つ国の研究者が協力することで、それぞれの社会基盤や問題点に対しての相互理解や国際協力についてビジョンを共有することができた。現状では本研究の対象であるマイクロ流体振動子の応用例が世界的にも発見されておらず、基礎物理の理解にとどまっているが、双方の学术交流、特に初年度に行った交流集会において医療デバイスや生命科学チップ、エネルギーデバイスへの応用可能性を議論することができた。

(4)社会的貢献(社会の基盤となる文化の継承と発展、社会生活の質の改善、現代的諸問題の克服と解決に資する等の社会的貢献はどのようにあったか)

複合マイクロ流体回路の流れ特性やメカニズムを解明することで、今後の医療や環境問題などの現代的諸問題に対する解決策の開発に貢献することができる。例えば、医療分野においては、動力を用いないスイッチングを可能とする複合マイクロ流体回路を利用することで、微小なバイオセンサーの開発や、精密な医療機器の製造が可能となり、医療の精度や治療効果を向上させ、オンサイトでの診断を可能にする。また、環境分野においては、微細な流体制御技術を活用することで、燃料電池や環境浄化技術などの開発が考えられ、地球環境保護に貢献することができる。マイクロ流体回路自体が手のひらサイズの化学実験、診断、エネルギーデバイスであることにより、大規模な工業生産のリスクを負うことなく、各国の文化や社会生活上の問題点に柔軟に対応できると考える。

(5)若手研究者養成への貢献(若手研究者養成への取組、成果)

本国際共同研究の若手研究者養成において、多くの成果が挙げられる。まず、オンライン中心ではあったものの研究者同士の相互交流が活発に行われ、異なる文化や研究スタイル、スピード感到に触れることができたことで、若手研究者はグローバルな視野を養うことができた。また、本研究に必要な高度な実験計測技術を共有・活用することで、独自の研究テーマを設定する能力を向上させることができた。さらに、研究成果を国際的な学会および学術誌で発表することで、国際的な研究者ネットワークを形成することができ、研究者としてのキャリアアップにつながった。また、共同研究の中で得られた成果と課題は、今後若手研究者が独自の研究に活かすことができ、研究成果をより高度なレベルで発展させることができると考える。このように、本研究は、若手研究者の養成やスキルアップに大きな貢献を果たし、若手研究者の研究者としての成長を支援することができた。

(6)将来発展可能性(本事業を実施したことにより、今後どのような発展の可能性が認められるか)

本事業の今後も発展の可能性は十分に高く、例えば、現在はあくまでも流れ特性やメカニズムの解明に留ま

っていますが、その研究成果を応用することで、複合マイクロ流体回路を用いた実用的な装置やシステムの開発が期待できる。具体的には、医療分野や環境問題、エネルギー問題など、様々な分野で応用が可能である。また、画像計測手法であることの利点を活かして人工知能や機械学習などの技術と組み合わせることで、より高度な予測や最適化が可能となると考える。今後はさらに異なる分野(化学、生物学、エネルギー工学、材料工学など)との研究者との共同研究を進めることで、複合マイクロ流体回路研究のさらなる発展が期待できる。特に化学と材料工学については、新たな粘弾性物質の開発やマイクロ流体回路の製造技術の改善が可能となり、より高機能かつ低コストでの機器開発が期待でき、その後のバイオチップや燃料電池開発といった応用分野への足がかりとすることができる。このように、複合マイクロ流体回路の研究は今後も多岐にわたる分野での応用が期待できる。

(7)その他(上記(2)～(6)以外に得られた成果があれば記載してください)

例:大学間協定の締結、他事業への展開、受賞など

特になし。