

公益財団法人矢崎科学技術振興記念財団
理事長 殿

研究助成期間終了にあたり、下記の通り成果を報告します。

2026 年 9 月 1 日

氏名 村上 裕哉
所属 静岡大学 工学部
職位 講師

1. 申請研究の題目

AI による流体内部多体運動解析を活用したソフトセンサーの開発

2. 研究の目的

化学製品や医薬品などの製造では、原料を装置内に連続的に流しながら反応や分離を行う「フロープロセス」の利用が広がっている。このようなプロセスを安全かつ安定して運転するためには、流れている液体の流量、粘度、密度などを連続的に把握することが重要である。しかし、特に数 mm 以下の細い流路を利用するマイクロフロープロセスでは、測定装置を取り付ける空間が限られており、複数の情報を同時に測定しようとすると高価で複雑な装置が必要となる。

そこで本研究では、流路内に小さな粒子を閉じ込め、その動きをカメラで撮影するだけで、流量・粘度・密度を同時に推定する新しい測定方法の開発を目指した。液体の中を動く粒子には、流れによって運ばれる力だけでなく、液体から受ける抵抗、重力、浮力などが作用する。このため、粒子の動き方には流量だけでなく粘度や密度に関する情報も含まれている。本研究では、この複雑な粒子運動を AI に学習させることで、直接測定することが難しい流体の状態を間接的に求める「ソフトセンサー」の実現を目指した。

3. 研究の内容

研究では、内部に直径約 0.5 mm の粒子を 30 個封入した小型流路を作製した。粒子が流路外へ流出しない構造とすることで、液体に新たな物質を混入させることなく、同じ粒子を繰り返し測定に利用できる。また、粒子が活発に動き続けることが測定に重要であると考え、形状の異なる 3 種類の流路を作製して比較した。

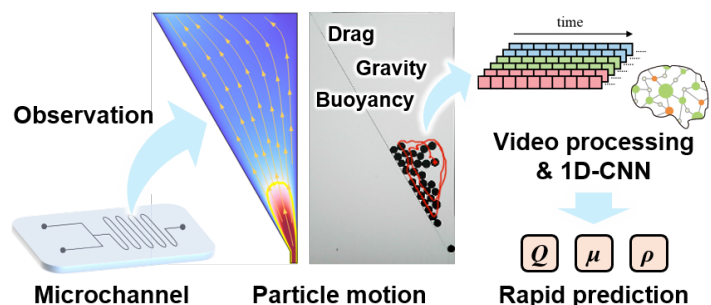


図 1 研究概要^[業績1]

水とエタノールをさまざまな割合で混合することで、粘度と密度の異なる液体を用意し、流量についても幅広く変化させながら実験を行った。流路内の粒子の様子を一般的なカメラで毎秒 30 枚撮影し、画像処理によって各粒子の位置、速度、加速度を求めた。合計 163 種類の条件について動画を取得し、これらを AI の学習データとして利用した。

AI には、時間とともに変化するデータの特徴を見つけることが得意な「1 次元畳み込みニューラルネットワーク」を利用した。さらに、長い動画の中で特に重要な時間帯を AI 自身が選択

する仕組みと、30 個の粒子の相互関係を考慮する仕組みを組み合わせた。これにより、多数の粒子が複雑に動く様子から、流量・粘度・密度を一度に推定できるモデルを構築した。

また、単に AI による推定精度を評価するだけではなく、「どのような粒子運動であれば測定に適しているのか」についても検討した。動画の中で実際に動いている粒子の割合を「活動粒子率」として定量化し、流路形状や液体の性質との関係を解析した。さらに、流体力学に基づくシミュレーションも併用し、粒子が浮上・沈降する性質と流れの強さとの関係から、測定に適した条件を整理した。

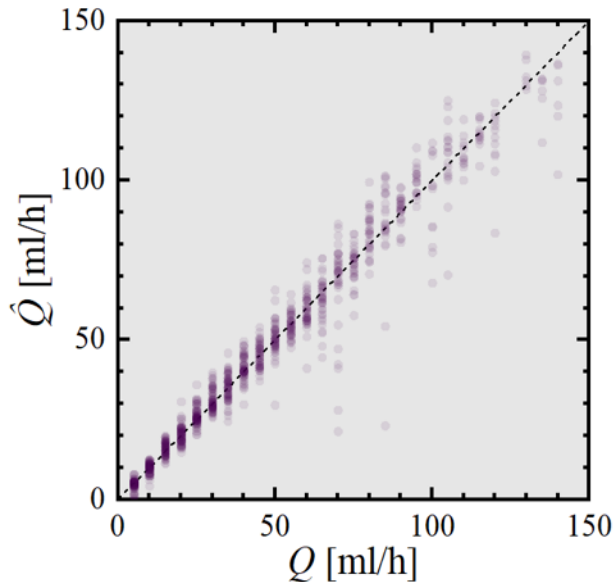


図 2 提案モデルによる流量の推算^{〔業績1〕}

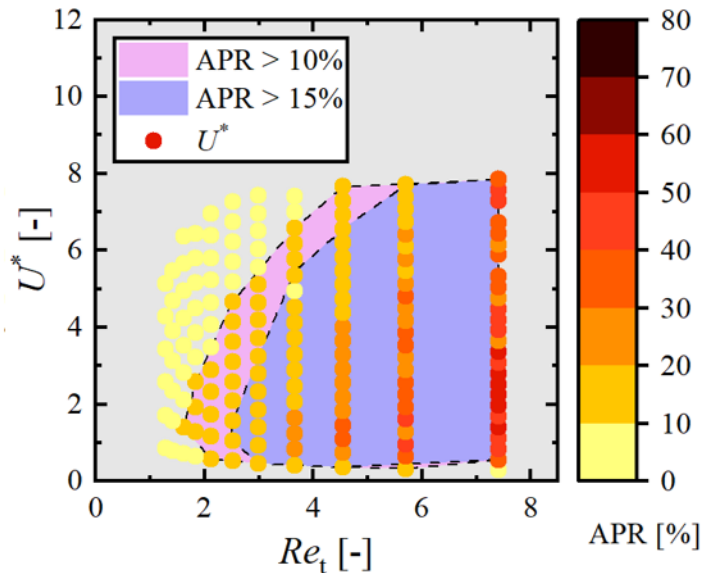


図 3 測定に適した領域の検討^{〔業績1〕}

4. 研究の成果と結論、今後の課題

開発したソフトセンサーにより、粒子の運動だけから流量・粘度・密度を同時に推定できることを実験的に示した。特に重要な成果として、推定精度は粒子がどれだけ活発に動いているかによって大きく変化することを明らかにした。動いている粒子が非常に少ない場合には精度が低下する一方、十分な数の粒子が継続的に動いている条件では安定した推定が可能となった。この結果から、粒子の活動量を測定結果の信頼性を判断する指標として利用できることが分かった。

また、観察時間を長くするほど精度は向上したが、およそ 10 秒で改善がほぼ飽和し、数秒程度の短時間観察でも流体情報を推定できることが確認された。最も良好な流路形状では、10 秒の観察における平均相対誤差が、流量 8.83%、粘度 3.22%、密度 0.60%となった。申請時に掲げた精度 5% 以内という目標に対して、粘度と密度では目標水準に到達した一方、流量についてはさらなる精度向上が課題として残った。

実用面についても、60 秒間の動画を最大でも約 6 秒で解析でき、撮影より速い速度でデータを処理できることを確認した。また、高価な専用センサーや高速カメラを必要とせず、市販の低価格カメラと粒子を用いて構築できることから、低コストな測定方式としての可能性も示された。

今後は、水—エタノール系以外の液体でも同様に測定できることを確認するとともに、粘度と密度をより独立に変化させた条件で検証を進める必要がある。また、粒子の大きさや材質、流路形状をさらに最適化することで、流量の推定精度向上と測定可能範囲の拡大を目指す。これらを通じて、多様なフロープロセスに適用できる実用的なソフトセンサーへ発展させる。

5. 成果の価値

5-1. 学術的価値

従来、流体中の粒子は、流れの速さを観察するための目印として利用されることが一般的であった。本研究ではこれとは異なり、粒子自身が流体から受ける抵抗や浮力、さらに粒子同士の相互作用まで含めた複雑な動きそのものを「情報」として利用した。流量、粘度、密度が変化すると粒子運動も変化するが、その関係を理論式から逆算することは非常に複雑である。本研究では AI を利用することで、この複雑な関係を直接学習し、複数の流体情報を同時に推定できることを示した。

さらに、AI による推定結果を示すだけでなく、粒子の活動量と推定精度との関係や、粒子の沈降速度と流路内の流れとの関係を流体力学的に解析した。この結果、どのような条件で AI による測定が可能になるのかを物理的に説明することができた。複雑な多体運動を単に計算する対象とするのではなく、そこに含まれる情報をセンシングに利用するという新しい考え方を提示した点に、本研究の学術的価値がある。

5-2. 社会的価値

フロープロセスでは、製品品質の維持や異常の早期発見のため、流量や流体物性を連続的に監視する必要がある。しかし、小型の流路に複数の高精度センサーを設置するには大きなコストが必要となる。本研究で開発した方法では、流路内に封入した粒子を低価格なカメラで撮影するという比較的単純な構成から、流量・粘度・密度という 3 種類の情報を同時に取得できる。

本手法は、個々の物性を最高精度で測定する専用分析装置を置き換えることを目的としたものではない。一方で、製造工程が正常に運転されているかを連続的に監視したり、異常を早期に検知したりする用途では、安価な装置で複数の情報を同時に得られることが大きな利点となる。将来的には、多数の小型流路を並列に使用する製造プロセスにも測定点を低コストで増設できる可能性がある。フロープロセスの品質管理、安全性向上、設備コスト低減を通じて、化学・医薬品をはじめとする製造工程の高度化に貢献することが期待される。

6. 研究成果

[研究論文]

1. Kosuke Nihei, Ryoto Ibuki, Yuya Murakami, “A particle dynamics-based soft sensor for simultaneous estimation of flow rate, viscosity, and density in microfluidic channels,” *Sensors and Actuators B: Chemical*, **467**, 140405, 2026.

[国際会議発表]

2. Kosuke Nihei, Yuya Murakami, “Monitoring of Flow Rate, Viscosity, and Density in Microchannel by AI-based Fluid Soft Sensor,” The Society of Chemical Engineers, Japan, The 7th International Symposium on Innovative Materials and Processes in Energy Systems, Oct. 29th 2025.
3. Ryoto Ibuki, Yuya Murakami, “Development of a Soft Sensor for Fluid Systems Operable Under Harsh Conditions,” The Asian Society of Supercritical Fluids, 4. The International Conference on Supercritical Fluids (14th Supergreen 2026), Aug. 4th 2026.

以上