

氏名	かわぐち みさ 川口 美沙
学位(専攻分野)	博士 (工学)
学位記番号	博甲第 1045 号
学位授与の日付	令和 4 年 3 月 25 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科・専攻	工芸科学研究科 設計工学専攻
学位論文題目	<b>Microscopic evaluation and estimation of effective viscosity of pressure-driven suspension flow</b> (圧力駆動される懸濁液流れの微視的実効粘度評価および粘度推定)
審査委員	(主査)教授 森西晃嗣 教授 西田秀利 教授 村田 滋 准教授 北川石英

### 論文内容の要旨

液体中に個体粒子を含む懸濁液は自然界にも工業生産の過程にも多く見られ、その流動特性を知ることは重要である。懸濁液の巨視的な流動性を示す粘度は、元の溶媒の粘度と懸濁液に含まれる粒子の濃度、粒径や形状、および、粒子の分布状態などに大きく依存するため、流動により粒子の分布状態が変化する懸濁液の粘度をあらかじめ予測することは困難である。本論文では、流路を流れる懸濁液の巨視的な粘度を微視的な粒子の状態から予測することを、実験と数値シミュレーションの両方から試みている。

実験では、報告例が少ない円形断面のマイクロチャネル内を流動する懸濁粒子の顕微鏡観察と画像計測を試み、懸濁粒子が形成する微細構造の解析、および、懸濁粒子の速度分布をべき乗則流体の速度分布と比較することにより、懸濁液の実効粘度を推定する手法を提案し、その有効性を確認している。

数値シミュレーションでは、最初に、懸濁液中の個々の粒子の挙動を追跡するのに有望な手法である仮想流束法と埋め込み境界法について、信頼性と計算効率の観点から比較検討を行い、仮想流束法の優位性を確認している。

次に、流路を流れる流体中の粒子は、流路内の特定の平衡位置に沿って流れる傾向があり、これにより懸濁液の粘度が変化することに着目し、平衡位置が異なる円形粒子と楕円形粒子のそれについて、流下する際の粘度の時間・空間変動を追跡し、楕円形粒子のアスペクトレシオ（縦横比）やコンファイメント（流路幅に対する主軸長さの比）などの定義の違いによるこれまでの報告の矛盾点を解消するとともに、楕円形粒子の非定常な回転運動に伴う粘度の時間変化よりも、空間位置による変動が大きいことを示している。

さらに、流路を流下する单一粒子の影響で流路壁面に働くせん断応力が波のように変化することに着目し、波の重ね合わせにより個々の粒子の状態から巨視的な粘度を推定する方法を提案し、重ね合わせでは表現できない流体力学的相互作用を粒子の回転運動と関連付けて評価することを試みている。

最後に、取り扱える粒子数の制限から現状ではマイクロスケールの流路を流れる希薄な懸濁液に

しか適用できないが、本研究で得られた知見から将来的には懸濁液の流動制御も期待できると展望している。

## 論文審査の結果の要旨

液体中に個体粒子を含む懸濁液は自然界にも工業生産の過程にも多く見られ、その流動特性を知ることは重要であり、特に流動による粒子の分布状態の変化と共に変化する懸濁液の粘度をあらかじめ予測できれば、工学的に有用であると共に学術的にも有意義である。本論文は、微視的な粒子の状態から巨視的な懸濁液の粘度を予測することを実験と数値シミュレーションの両面から試みたものである。

報告例が少ない円形断面のマイクロチャネル内を流動する懸濁粒子の画像計測を試み、得られた懸濁粒子の速度分布から懸濁液の実効粘度を非接触で推定できることを実験で示したことは、実用上の意義がある。

次に、懸濁液中の粒子の挙動を追跡するのに有望な手法である仮想流束法と埋め込み境界法について、信頼性と計算効率の観点から詳細な比較検討を行い、仮想流束法の優位性を確認したことは、計算流体力学の分野における新たな知見として評価できる。また、流下する粒子の影響で壁面せん断応力が波のように変化することに着目し、波の重ね合わせにより個々の粒子の状態から巨視的な粘度を推定し、流体力学的相互作用は粒子の回転運動と関連付けて評価する試みは学術上の発展が期待できる。

さらに、流路を流下する粒子の平衡位置により懸濁液の粘度が変化することに着目し、円形粒子や楕円形粒子の平衡位置と粘度に対して得られた知見は、懸濁液の流動制御への応用が期待でき、有意義である。

本論文は、査読制度を有する下記に示す4編の学術論文と1編の参考論文を基に構成されている。

- 1) M. Kawaguchi, T. Fukui, K. Morinishi, Contribution of Particle–Wall Distance and Rotational Motion of a Single Confined Elliptical Particle to the Effective Viscosity in Pressure-Driven Plane Poiseuille Flows, *Applied Sciences*, 11, Article No. 6727 (2021), 1-18.
- 2) M. Kawaguchi, T. Fukui, K. Funamoto, M. Tanaka, M. Tanaka, S. Murata, S. Miyauchi, T. Hayase, Viscosity Estimation of a Suspension with Rigid Spheres in Circular Microchannels using Particle Tracking Velocimetry, *Micromachines*, 10, Article No. 675 (2019), 1-13.
- 3) M. Kawaguchi, T. Fukui, K. Funamoto, S. Miyauchi, T. Hayase, Experimental Study on the Effects of Radial Dispersion of Spherical Particles on the Suspension Rheology, Conference proceedings of ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2019, Article No. 5322 (2019), 1-6.
- 4) M. Kawaguchi, T. Fukui, K. Kuroyanagi, S. Murata, Y. Kaneko, Numerical Study on the Inspiratory Airflow in a Pulmonary Airway using Geometrical Segment Models, Conference proceedings of 31st International Symposium on Transport Phenomena, Article No. 151 (2020), 1-8.

(参考論文)

- 1) M. Kawaguchi, T. Fukui, K. Morinishi, Comparative study between virtual flux method and immersed boundary method coupled with regularized lattice Boltzmann method for suspension flow simulations. (has been submitted to Computers & Fluids)