

令和 5 年 6 月 21 日現在

機関番号：14303

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04266

研究課題名（和文）赤血球に学ぶ懸濁液のレオロジーコントロールとレオロジー同定法

研究課題名（英文）Suspension Rheology Control and Rheology Assessment System Learned from Red Blood Cells

研究代表者

福井 智宏（Fukui, Tomohiro）

京都工芸繊維大学・機械工学系・准教授

研究者番号：00451542

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：狭い流路を流れる懸濁液のレオロジーを考察する際には、アインシュタインの粘度式が示すような粒子濃度のみならず、懸濁粒子の半径方向位置の影響を十分に加味する必要がある。本研究では、圧力駆動に伴う懸濁液流れ解析を行い、粒子密度分布の時間変動を調べた結果、微視的な懸濁粒子が流下するに伴い巨視的な速度プロファイルが変化すること、また、これにより、懸濁粒子の力学的平衡位置と懸濁液の溶媒層厚さが変化することが分かった。このように、微視的な懸濁粒子の挙動が、巨視的な懸濁液レオロジーを変化させるメカニズムの重要因子の一つを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究結果により、次のような学術的・社会的意義が示された。まず、粒子慣性力と力学的平衡位置の関係の体系的な理解が一層深まることにより、懸濁液のレオロジーコントロールが可能であることが期待された。次に、アインシュタインの粘度式を適用することができない力学環境においても、新しく提案した粘度推定式により、様々な分散状態における瞬時速度場のスナップショットから、懸濁液の実効粘度評価が可能であることが期待された。

研究成果の概要（英文）：In a narrow channel, the apparent relative viscosity of a suspension with finite-size particles is strongly dependent on its microscopic particle arrangement. In this study, we focus on the inertia and concentration of particles in a narrow channel and consider their effects on the microscopic particle arrangement and macroscopic suspension rheology. The results demonstrated that the velocity profiles for the particle suspension were changed by the Reynolds number and particle concentration because of the interactions between particles according to the power-law index. These changes affected the particle equilibrium positions in the channel, and the subsequent changes in solvent layer thickness caused changes in the macroscopic apparent viscosity. The behavior of microscopic particles played important roles in determining macroscopic rheology.

研究分野：流体工学

キーワード：レオロジー 懸濁液 混相流 非ニュートン流体

1. 研究開始当初の背景

微小循環系における血液の見かけ上の粘度（実効粘度）は、その力学的環境（ひずみ速度）や幾何学的環境（血管径）に合わせて、実に10倍近くも変化する。これは主に、赤血球と血漿との力学的相互作用に伴う、赤血球の凝集、変形、配向、軸集中などに起因する。特に、細い血管を流れる血液ほど、その実質的な粘度が下がる（1/2～1/4倍程度）という逆説的な効果は、ファーレウス・リンドクヴィスト効果として知られている。このように、赤血球（固体）と血漿（液体）のような固液混相流のレオロジーは、液体中での固体の振る舞いにより決定される。

懸濁液のレオロジー評価指標としては、実効粘度や法線応力差（非ニュートン性の強さ）、ベキ乗則指数（ひずみ速度依存性の強さ）等が挙げられる。従来の多くの研究では、一様せん断流中に単一の懸濁粒子を配し、粒子膜に作用する応力テンソルから実効粘度や法線応力差を評価してきた。しかしながら、懸濁液の管内流れでは、巨視的な流れ場と微視的な懸濁粒子の挙動が、双方向的な相互作用により決定されるため、従来の研究から得られた知見（『一様せん断流れ』）を、そのまま『管内流れ』に適用することができない。

2. 研究の目的

懸濁液のレオロジー解析では、粒子の大きさや流路内位置に基づく幾何学的な微細構造（アインシュタインの粘度式の線形項）のみならず、粒子-粒子間ならびに粒子-流体間に働く相互作用力の強さに関連する力学的な微細構造（高次の非線形項）も考慮に入れる必要がある。そこで本研究では、懸濁液のレオロジーコントロールならびに、微細構造解析に基づく新たなレオロジー同定法の提案を目的とした。

3. 研究の方法

圧力駆動による、懸濁粒子の流路内流れ解析を行った。図1に概略図を示す。流体側の支配方程式は正規化格子ボルツマン法であり、粒子の表現ならびに粒子-流体間相互作用力の結合には仮想流束法を用いた。いずれも、当研究グループが開発した解析手法である。これにより、懸濁粒子の並進運動と回転運動を、それぞれニュートンの運動方程式と剛体の回転運動方程式により記述し、三次精度アダムス-バッシュフォース法により解いた。

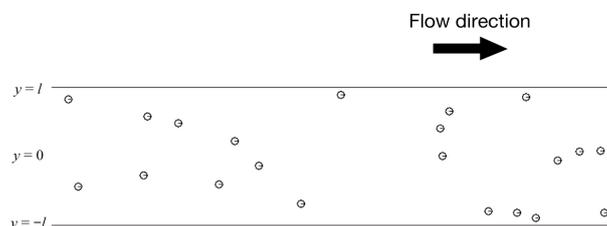


図1 懸濁液流れ解析の概略図

計算条件は、粒子濃度 $\phi = 1.02 \sim 4.07$ 、巨視的な流れにより定義されるレイノルズ数 $Re = 2 \sim 256$ 、コンファインメント C （流路幅に対する粒子の大きさ）を $1/80 \sim 1/20$ とした。また、懸濁粒子の幾何学的配列により形成される微細構造の時間変化を調べるために、懸濁液の巨視的レオロジーを加味した周期境界条件を付与し、無次元時間 $T = 100$ （粒子の平均流下距離が流路幅の100倍に相当）まで計算を行った。この際、懸濁粒子の流路内初期配置はランダムとし、この初期位置依存性を排除するために、計20～40回のアンサンブル平均をとった。

4. 研究成果

図2に、解析結果の代表例（濃度 $\phi = 1.02\%$ 、コンファインメント $C = 1/20$ ）を示す。左から順に、レイノルズ数 $Re = 4, 16, 256$ の場合であり、上図に速度分布図ならびに懸濁粒子が流下する様子（無次元時間 $T = 100$ ）を示し、下図は懸濁粒子の密度分布の経時変化である。低レイノルズ数条件（ $Re = 4$ ）では、懸濁粒子に作用する慣性力が弱いので、懸濁粒子は流線に従って流下し、流路内での密度分布も一定である。このような場合、アインシュタインの粘度式の適用により、懸濁液の実効粘度の評価は可能である。一方で、中・高レイノルズ数条件（ $Re = 16, 256$ ）では、粒子慣性力が有意に働き、時間の経過と共にマイグレーション（流路幅方向に移動）が起こる。レイノルズ数 $Re = 16$ の時、流路幅の約50%の位置に力学的平衡位置（粒子慣性力と壁反力が釣り合う位置）が出現し、80%以上の懸濁粒子がその力学的平衡位置に集約した（図中のラベル部）。また、レイノルズ数 $Re = 256$ の時、この力学的平衡位置は流路中心側へとシフトし、軸集中現象が確認された。このように、懸濁粒子が力学的平衡位置へとマイグレーションすると、流路内での粒子密度が非一様となるため、アインシュタインの粘度式の適用範囲から外れる。

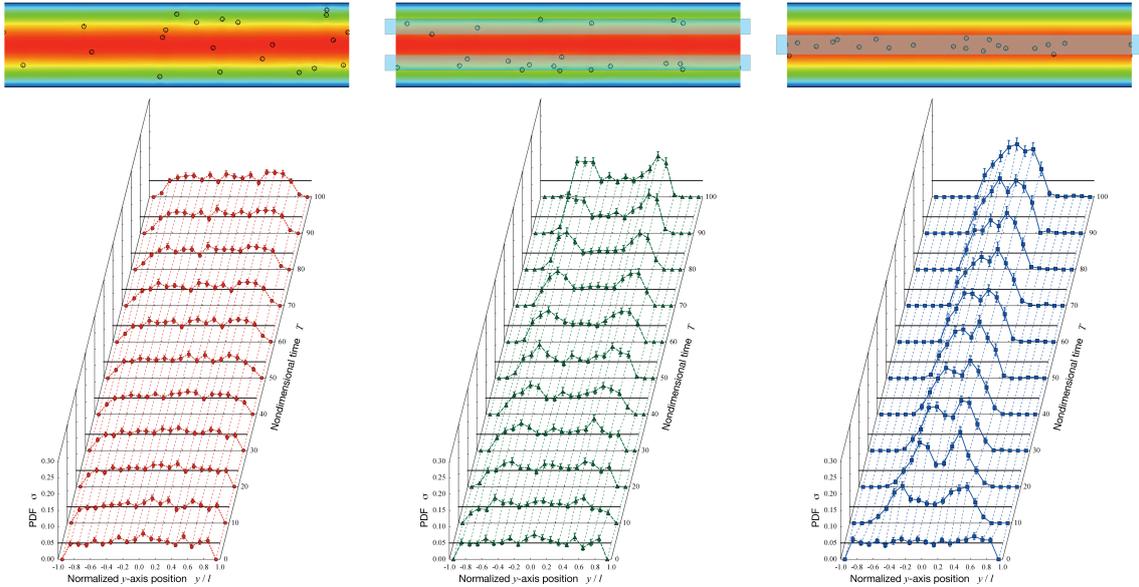


図2 懸濁粒子の流下挙動と密度分布の経時変化

このように様々な懸濁粒子の分散状態における，懸濁液の実効粘度解析結果を図3に示す．これにより，レイノルズ数 Re の増大に伴う相対粘度の低下，すなわち，粒子懸濁液のチクソトロピックな非ニュートン性を，微視的な懸濁粒子の挙動と関連付けて考察することに成功した．今後，粒子慣性力と力学的平衡位置の体系的な理解が一層深まれば，懸濁液のレオロジーコントロールが可能であることが期待された．

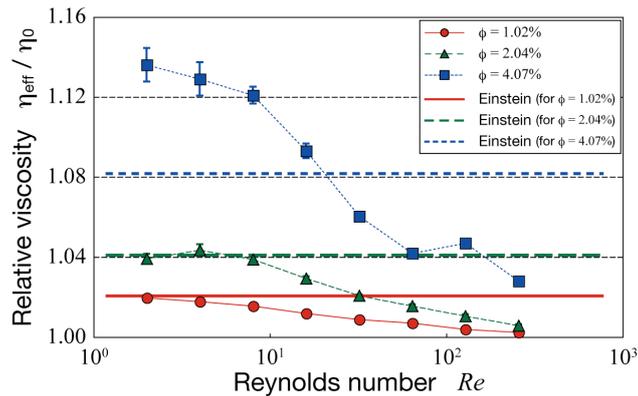


図3 懸濁液の相対粘度とレイノルズ数 Re の関係

懸濁粒子の分散状態に制限されない新たなレオロジー同定法として、『個々の懸濁粒子の実効粘度の寄与 η_k の重ね合わせが，システム全体の実効粘度 η_{eff} を達成する』と仮定し，式(1)を提案した．

$$\eta_{\text{eff}} = \eta_0 \left[1 + \sum_k^{N_p} \{ \eta_k(C, y) - 1 \} \right] \quad (1)$$

ここで， η_0 は溶媒の粘度， N_p は懸濁粒子数， C はコンファインメント， y は流路幅方向である．ただし，式(1)を適用するためには， $\eta_k(C, y)$ を数値解析にて事前に求めておく必要がある．図4に，本提案式の適用結果を示す．左から順に，コンファインメント $C = 0.04, 0.08, 0.16$ による解析結果である．低コンファインメント条件 ($C = 0.04$ ，懸濁粒子が流路幅に対して十分に小さい) では，懸濁粒子の濃度や分散状態に大きな影響を受けることなく，本提案式を精度良く適用できることが示された．一方で，中・高コンファインメント条件 ($C = 0.08, 0.16$) では，壁面近傍の懸濁粒子の粘性効果の非線形性が強くなり，レオロジーの推定誤差が大きくなった．これにより，低コンファインメント条件 (懸濁粒子が流路幅に対して十分に小さい) では，本提案式を適用することが十分に可能であり，例えば，様々な分散状態における瞬時速度場のスナップショットから，懸濁液の実効粘度評価が可能であることが期待された．

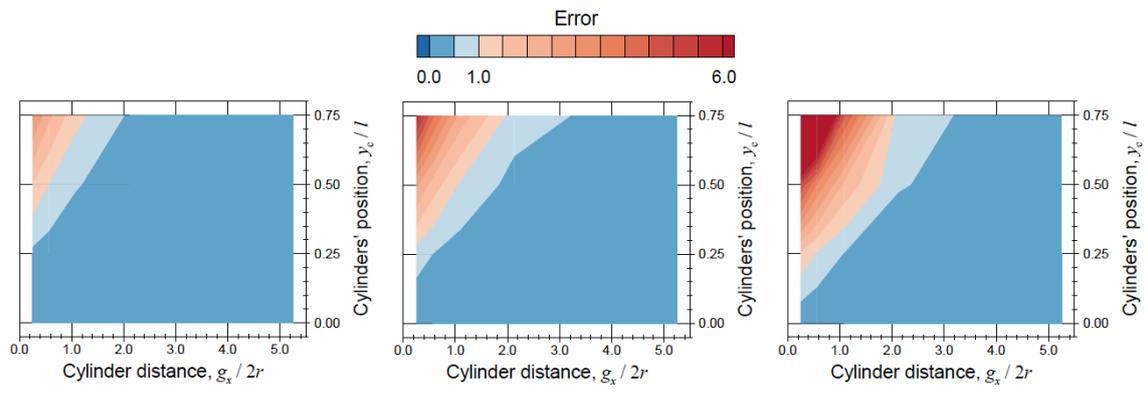


図4 新たな粘度推定式による懸濁液レオロジーの推定誤差

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Daiki Nakasue and Tomohiro Fukui	4. 巻 -
2. 論文標題 Numerical Simulation on the Effects of the Viscosity Contrast of a Soft Particle at the Transition between Tank-treading and Tumbling Motions	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Science and Technology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Ryo Naito and Tomohiro Fukui	4. 巻 8(2)
2. 論文標題 Numerical Study of the Effects of Asymmetric Velocity Profiles on Migration of Neutral Buoyant Particle	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Fluids	6. 最初と最後の頁 1-17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/fluids8020069	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Tomohiro Fukui and Misa Kawaguchi	4. 巻 33
2. 論文標題 Numerical Study of Microscopic Particle Arrangement of Suspension Flow in a Narrow Channel for the Estimation of Macroscopic Rheological Properties	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Advanced Powder Technology	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.appt.2022.103855	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Misa Kawaguchi, Tomohiro Fukui, and Koji Morinishi	4. 巻 246
2. 論文標題 Comparative Study of the Virtual Flux Method and Immersed Boundary Method Coupled with Regularized Lattice Boltzmann Method for Suspension Flow Simulations	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Computers & Fluids	6. 最初と最後の頁 1-17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.compfluid.2022.105615	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Naoki Okamura, Tomohiro Fukui, Misa Kawaguchi, and Koji Morinishi	4. 巻 16(3)
2. 論文標題 Influence of Each Cylinder's Contribution on the Total Effective Viscosity of a Two-dimensional Suspension by a Two-way Coupling Scheme	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Science and Technology	6. 最初と最後の頁 1-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/jfst.2021jfst0020	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Miho Tanaka, Tomohiro Fukui, Misa Kawaguchi, and Koji Morinishi	4. 巻 16(3)
2. 論文標題 Numerical Simulation on the Effects of Power-law Fluidic Properties on the Suspension Rheology	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Science and Technology	6. 最初と最後の頁 1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/jfst.2021jfst0022	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Misa Kawaguchi, Tomohiro Fukui, and Koji Morinishi	4. 巻 11(5)
2. 論文標題 Contribution of Particle-wall Distance and Rotational Motion of a Single Confined Elliptical Particle to the Effective Viscosity in Pressure-driven Plane Poiseuille Flows	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 1-18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/app11156727	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Tomohiro Fukui, Misa Kawaguchi, and Koji Morinishi
2. 発表標題 Particle Suspension Flow Simulations in a Narrow Channel by Parallel Computing
3. 学会等名 33rd International Conference on Parallel Computational Fluid Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tomohiro Fukui, Misa Kawaguchi, and Koji Morinishi
2. 発表標題 A Consideration on Microstructure of Particle Suspension to Estimate its intrinsic Viscosity
3. 学会等名 11th International Conference on Advances in Fluid Dynamics with emphasis on Multiphase and Complex Flow (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomohiro Fukui, Misa Kawaguchi, and Koji Morinishi
2. 発表標題 Numerical Study on Microstructure of a Dilute Suspension to Assess its Thixotropic Behavior by a Two-way Coupling Scheme
3. 学会等名 13th International Conference on Advances in Fluid Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tomohiro Fukui, Misa Kawaguchi, and Koji Morinishi
2. 発表標題 Pressure-driven Suspension Flow Simulation to Assess the Temporal Changes in its Microstructure
3. 学会等名 31st International Symposium on Transport Phenomena (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------