

令和 2 年 6 月 7 日現在

機関番号：34416

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03176

研究課題名(和文) Segre-Silberberg効果の多様性

研究課題名(英文) Experimental and numerical studies on the Segre-Silberberg effect

研究代表者

関 眞佐子 (Sugihara-Seki, Masako)

関西大学・システム理工学部・教授

研究者番号：80150225

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：Segre-Silberberg効果は、流路内層流に浮遊する粒子が慣性に起因する揚力を受けることにより、流路下流の断面内で特定の位置に集中して流れる現象である。本研究は、流体力学に基づき、流路内流れに浮遊する粒子の挙動と下流断面における粒子の分布を様々な条件において実験および数値シミュレーションにより解析した。得られた結果から、流路断面内における粒子の集中位置と集中パターンを詳細に調べ、粒子集中現象の決定因子を探索するとともに機序を検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

流路内層流に浮遊する粒子が慣性に起因する揚力を受け、粒子の大きさや物性等に応じて流路下流の断面内で特定の位置に集中する現象は Segre-Silberberg効果と呼ばれ、粒子の分離・精製への応用が期待されている。本研究は、様々な条件における流路断面内の粒子の集中位置と集中パターンを詳しく調べた研究であり、流速、流路断面形状、粒子の大きさや物性、媒質の物性に依存した粒子集中現象が明らかとなり、浮遊粒子の分別や分離へ応用するための基礎データが示された。

研究成果の概要(英文)：The inertial migration and focusing of particles suspended in a pressure-driven flow through straight tubes with various cross-sections and various sizes was investigated experimentally and numerically in a wide range of Reynolds numbers. In experiments, direct observations of the particle distribution in downstream cross-sections indicated the presence of several types of the particle focusing position in the tube cross-section and several regimes of the Reynolds number for the particle focusing pattern, depending on the size ratio of the particle diameter to the tube width, rheological properties of the particle and the suspending medium as well as the cross-sectional shape of the tube. The numerical simulation using the immersed boundary method accounted for the particle focusing patterns observed experimentally, and provided the explanation for the transition between the particle focusing patterns, based on the lateral force exerted on the particle.

研究分野：流体力学

キーワード：Segre-Silberberg効果 混相流 管内流れ 慣性 平衡位置 揚力

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

円管内層流に浮遊する粒子が下流断面において円管半径の約 0.6 倍の円環に集まる現象は 50 年以上前に Segre & Silberberg により初めて報告された⁽¹⁾。この現象は流れ中の粒子に慣性に起因する揚力が働くために生じ Segre-Silberberg 効果と呼ばれている。Segre-Silberberg 効果は、最近になり矩形断面をもつマイクロ流体デバイス内流れにおいて注目されるようになった。これは、矩形管流路では円管と異なって浮遊粒子が下流断面内の数点に集中することが明らかとなり、浮遊粒子の分離・分別に応用できるからである。医療・食品・環境など多岐にわたる分野において微粒子や細胞を選別・分離する技術は不可欠となっており、小型で簡便、安価なマイクロ流体デバイスはその手法として極めて有望である。しかし、Segre-Silberberg 効果に関する流体力学的な研究は緒についたばかりであり、粒子集中現象を支配するパラメータや、粒子集中の過程、流路断面内の集中位置やその種類などについて不明な点が多い。

2. 研究の目的

本研究は、流体力学に基づき、流路内層流に浮遊する粒子の挙動を様々な条件において実験および数値解析によって調べ、流路下流断面内における粒子分布を求める。各条件における流路断面での粒子の集中位置と集中パターンを詳細に調べ、それらの種類と粒子集中現象を決定する因子を探索するとともに、粒子集中現象の機序を明らかにする。

3. 研究の方法

流路内層流に浮遊する粒子の挙動と流路断面における粒子分布を実験と数値解析により解析した。

(1) 実験

浮遊粒子は、様々な径のポリスチレン製球形粒子、非球形粒子として球形粒子を 2 個接着した雪だるま形状の粒子、変形粒子としてヒト赤血球を用いた。媒質は、浮遊粒子が剛体粒子の場合は比重を合わせたグリセリン水溶液と高分子 Polyvinylpyrrolidone (PVP) の水溶液を、赤血球の場合はリン酸緩衝生理食塩水(PBS)および PBS にアルブミンとデキストラン 40 を加えた模擬血漿を用いた。グリセリン水溶液と PBS はニュートン流体であり、PVP 水溶液と模擬血漿は粘弾性流体である。流路は、矩形断面をもつ直管および円管を用いた。流路上流と下流間の水位差あるいはシリンジポンプによって流路内に流れを駆動し、様々なレイノルズ数、ワイゼンベルグ数の条件で希薄な粒子サスペンションを流した。流路出口付近の断面を下流正面に設置した高精細高速度カメラで撮影し、流路断面における粒子位置を計測した。多数の画像を解析することにより、流路断面の粒子分布を得た。確率密度関数を計算して、粒子分布のピーク位置を算出した⁽²⁾。

(2) 数値解析

円管および矩形管流路内の層流中に 1 個の粒子が浮遊している場合の流れ場を部分段階法と埋め込み境界法⁽³⁾を用いて数値解析を行った。流路の上流と下流の間には周期境界条件を課した。流路断面内の任意の位置から粒子が放たれた場合の粒子の運動を求める計算と、断面内で特定の位置に粒子を固定した場合の粒子に作用する揚力の計算を行った⁽⁴⁾。前者の計算では、粒子の軌道を追跡して粒子が平衡位置に漸近する過程を調べるとともに、平衡位置の探索を行った。後者の計算では、粒子は主流方向の並進運動と回転運動は自由に行うものと仮定して揚力を求めた。粒子が流路断面の様々な位置にある場合の揚力分布から、粒子に作用する揚力が 0 となる平衡位置を算出した。また、平衡位置の安定性についても調べた。媒質がニュートン流体の場合の解析とともに、媒質が粘弾性流体の場合に対応して FENE-P モデルに基づく解析を行った。

4. 研究成果

(1) 円管内流れ

Segre & Silberberg は、円管内に球形粒子が浮遊したサスペンションを流すと、粒子は慣性の影響によって流れと垂直方向にも移動し、下流断面で Segre-Silberberg 環(SS 環)と呼ばれる一つの円環に集まることを見出した⁽¹⁾。SS 環の動径位置はレイノルズ数($Re = \rho UD/\eta$, ρ : 密度, U : 平均流速, D : 管径, η : 粘性率)に依存して変化するだけでなく、比較的大きなレイノルズ数(Re 数)の場合には、SS 環の内側に粒子が集まる別の環(内側環)が現れることが実験により示された⁽⁵⁾。一方、粒子径 d と管径 D の比 d/D (サイズ比)が小さい極限に対する漸近展開理論では SS 環の動径位置のみが粒子の平衡位置となるため、内側環が平衡位置であるかについて議論が続けられてきた⁽⁶⁾。本研究では、様々な Re 数の場合に流れの上流から下流にわたるいくつかの断面において粒子分布を計測することで、粒子分布の推移を調べ、内側環が平衡位置であるか否かを検討した⁽⁷⁾。

ポリスチレン製球形粒子 ($d = 60 \sim 80 \mu\text{m}$, $\rho = 1.05 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$) を、粒子と同密度に調整したグリセリン水溶液($\eta = 1.7 \sim 2.0 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$)に希薄に混入させて作動流体とした。ガラス円管 (直径 $D = 600 \mu\text{m}$, 長さ $L = 25 \sim 600 \text{ mm}$) を水槽内に水平に設置し、シリンジポンプの陽圧で一定流量で流した。円管出口付近の断面を出口正面から超長作動距離対物レンズを取り付けた高速度カメラで撮影した(1000~8000fps)。得られた断面像を画像処理ソフト ImageJ を用いて解析し、各粒子の中心位置を求め、粒子の断面内分布を得た。この粒子分布より、SS 環および内側環の動径位置 r_s , r_i を求めた。

サイズ比が $d/D = 0.1$ で 3 種の管長 L の場合に実験で得られた粒子分布の例を図 1 に示す。図

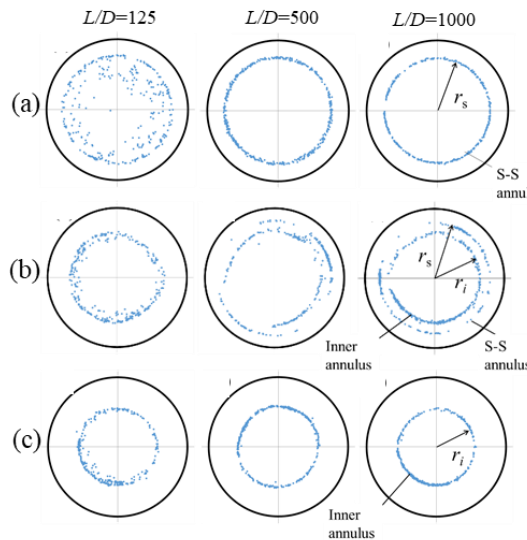


図 1 円管内流れ中の球形粒子の分布($d/D = 0.1$, (a) $Re=300$, (b) $Re=760$, (c) $Re=1000$)

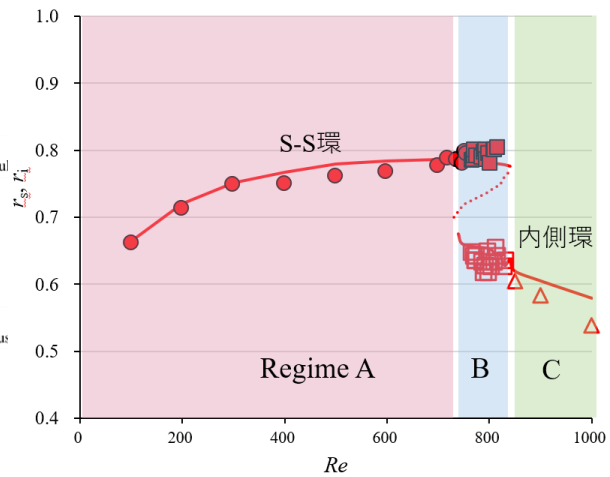


図 2 SS 環と内側環の動径位置. \circ : SS 環, \square : SS 環と内側環, \triangle : 内側環. 曲線は数値解析結果.

1(a)の低 Re 数の場合には、上流断面($L/D=125$)で既かなりの割合の粒子が SS 環に集まり、下流では全ての粒子が SS 環に集中している。粒子が集中した動径位置 r_s は L/D によらずほぼ一定であることは、これが平衡位置であることを示している。 Re 数が増加した図 1(b)の場合には、上流で内側環に一旦粒子が集まり、下流に進むと SS 環も現れ、それ以降 SS 環と内側環が共存した分布を示す。最下流の断面においても SS 環、内側環の両方が見られた。さらに高い Re 数(図 1(c))では、上流で内側環に集まった粒子が下流でも内側環のみに集まり、最下流においても SS 環は見られなかった。他の Re 数の場合の結果も考慮すると、粒子集中パターンは Re 数によって図 1 の最下流で見られた 3 通りのパターン(SS 環のみ、SS 環と内側環、内側環のみ)に分類されることが示された。

図 2 にサイズ比 $d/D=0.1$ の場合に、SS 環と内側環の動径位置 r_s , r_i の Re 数による変化を描いた。図 2 の実線は対応する数値シミュレーションの結果を示す。粒子集中パターンによって Re 数は 3 つの領域(Regime A, B, C)に分かれ、Regime A では、安定な平衡位置は SS 環の動径位置のみであった。Regime B では、平衡位置は 3 つ存在し、そのうち最も内側と外側の平衡位置がそれぞれ内側環 r_i と SS 環 r_s に対応する。 r_i と r_s の間には不安定な平衡位置があり、その動径位置は図 2 の破線で示している。Regime C では、SS 環に相当する平衡位置がなくなり、内側環のみが平衡位置となる。Regime A, B, C の間の遷移が起こる 2 つの臨界レイノルズ数はサイズ比 d/D が小さいほど大きくなり、逆に d/D が大きくなると減少するとともに、2 つの臨界 Re 数の間隔が狭くなることが分かった。

(2) 矩形管内流れ

前節でみたように、流路の断面形状が円形の場合、流路入口からランダムに流入した粒子は下流断面で円環状に集中する。これに対し、矩形管流路の場合、断面形状の軸対称性が失われることから、下流での粒子集中位置は複数の集中点となる。特に正方形断面をもつ流路でサイズ比 d/D (d : 粒子径, D : 流路幅) が 0.1 程度の場合、 Re 数が約 100 以下では、流路断面各辺の中央付近の 4 点に粒子の平衡位置が存在していることが推測されていた⁽⁸⁾。本研究では、この平衡位置の存在を実験と数値解析により確認し、この平衡点を「面心平衡点」と名付けた。本研究の実験では、ポリスチレン製粒子を中立浮遊させたグリセリン水溶液を、シリンジポンプにより正方形管流路に一定流量で流し、下流出口付近を通過する粒子像を撮影した。これを画像解析することによって、各粒子の中心位置を求め粒子の断面内分布を得た。

様々なサイズ比や Re 数の場合を調べた結果、正方形断面には 4 つのタイプの平衡点が存在することが分かった(図 3)。それらは、断面の中心および面心平衡点に加えて、対角線上にある「対角平衡点」、面心平衡点と対角平衡点をむすぶヘテロクリニック軌道上に存在する「中間平衡点」である。ニュートン流体中に剛体粒子が浮遊する場合には、断面中心は常に不安定な平衡点であった。他の 3 種の平衡点は、サイズ比 d/D や Re 数によって安定性が変化し、それらの組み合わせにより、流路下流断面においていくつかの粒子集中パターンが存在することが分かった^(9,10)。

サイズ比 $d/D = 0.125$ の場合に実験で得られた 4 種類の粒子集中パターンを図 4 に示す。いずれも 300 個以上の粒子に対する計測結果で、計測断面を通過した粒子の中心位置をプロットしたものである。 Re 数領域は Regime 1~4 の 4 つに分かれ、最も低い Re 数領域である Regime 1 では、先行研究で報告されているように、面心平衡点のみが安定な平衡点であった。Regime 2 では、中間平衡点が見れ、流路下流の断面では面心平衡点の 4 点と中間平衡点の 8 点の計 12 点に粒子集中が見られた。次の Regime 3 では対角平衡点が見れ、面心平衡点、中間平衡点、対角平衡点の計 16 点に粒子集中が観察された。最も大きな Re 数領域である Regime 4 では中間平衡点

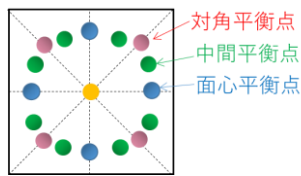


図3 正方形管断面の平衡位置

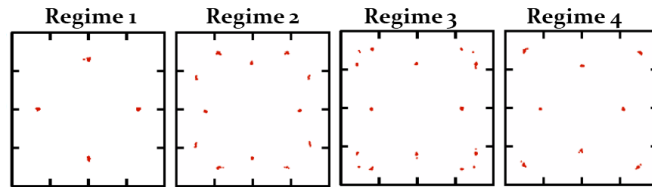


図4 正方形管内流れ中の粒子集中パターン($d/D = 0.125$)

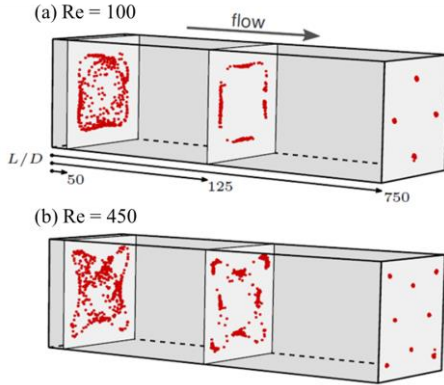


図5 正方形管内流れ中の粒子分布の推移

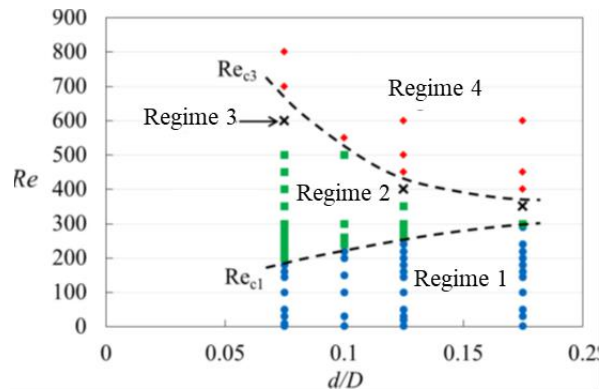


図6 粒子集中パターンのサイズ比依存性

が消え、粒子は面心平衡点と対角平衡点に集まった。

浮遊粒子が粒子集中点へ移動する過程の例として、図5に、流路入口からの距離 L が流路幅 D の50倍、125倍、750倍の3つの断面の実験結果を、Regime 1と4に対して描いた。いずれの場合も、入口に近い断面において既に円管におけるSS環に相当するリングが形成されているのが分かる。正方形管で見られるこのリングを、pSS環(pseudo Segre-Silberberg ring)と名付けた。

入口に近い断面では、pSS環の内側に粒子が散らばって存在しているものの、pSS環の外側にはほとんど粒子が存在していない。粒子は流路入口では断面全体にわたってランダムに流入すると考えられることから、このことは、流路壁付近の粒子には流路壁から遠ざかる向きに強い斥力が作用していることを示している。また低Re数では、pSS環は流路壁とほぼ平行であるのに対し、Re数が高くなると、次第に花卉の縁のような形に変形することも見て取れる。これは、Re数の増加に伴う平衡位置の移動により説明される。流路下流の $L/D = 125$ の断面では、ほとんど全ての粒子がpSS環に沿って存在しており、しかもその分布はpSS環に沿って様ではない。つまり、pSS環には粒子密度の濃淡が生じており、平衡点付近に多くの粒子が集まっていることが分かる。最下流である $L/D = 750$ の断面では、粒子は平衡点に集中している。

粒子分布の主流方向の推移から、粒子の集中現象は2段階の粒子移動で成り立つことが示された。即ち、第1段階は流路入口のランダムな分布からpSS環への粒子移動であり、第2段階はpSS環に沿った平衡点への粒子移動である。第1段階は素早く進むのに対し、第2段階はゆっくり進むことも興味深い。これは揚力の大きさに関係した現象であり、対応する数値シミュレーションによっても確認することができる。また、実験を行ったパラメータの範囲で、平衡点の安定性を数値解析により調べたところ、媒質がニュートン流体の場合、面心平衡点と対角平衡点は常に存在し、前者はRe数によらず安定であるが、後者は低Re数では不安定であり、Regime 2とRegime 3の境界となる臨界Re数を超えると安定となることが示された。

様々なサイズ比で実験を行ったところ、 $0.075 \leq d/D \leq 0.20$ の範囲で、粒子集中パターンは上で述べた $d/D = 0.125$ の場合と同じであった。ただし、各領域間の臨界Re数はサイズ比に依存して変化する。サイズ比による粒子集中パターンの変化を図6に示した。図6は粒子集中パターンがサイズ比に大きく依存することを示している。さらにこの図よりもサイズ比の大きな領域では、対角平衡点のみに粒子集中が起こるといった、図4では見られなかった新たな粒子集中パターンが現れるだけでなく、粒子集中パターン間の遷移もサイズ比に依存して変化することが分かった。これらの変化は数値シミュレーションによっても確認された。

(3) 粘弾性流体と変形粒子

媒質の物性の影響を調べるために、様々な濃度のPVP水溶液を用い、その中に球形粒子を浮遊させ粒子分布を計測した。先行研究では比較的高濃度のPVP水溶液を用いた実験が多く実施されている。その場合、浮遊粒子は流路断面の中心に集まることが報告されている⁽¹¹⁾。本研究の実験においても、図7(c)で示すように、PVP4%水溶液を媒質として用いた場合には、低Re数で粒子は流路断面の中心に集まることが確認された。粘弾性流体中では法線応力差に起因する揚力が生じ、その揚力は速度勾配の小さい領域に向かうことが知られている。流路内流れでは断面中央の速度勾配が0であるから、浮遊粒子には断面中央に向かう揚力が働くこととなって、実験

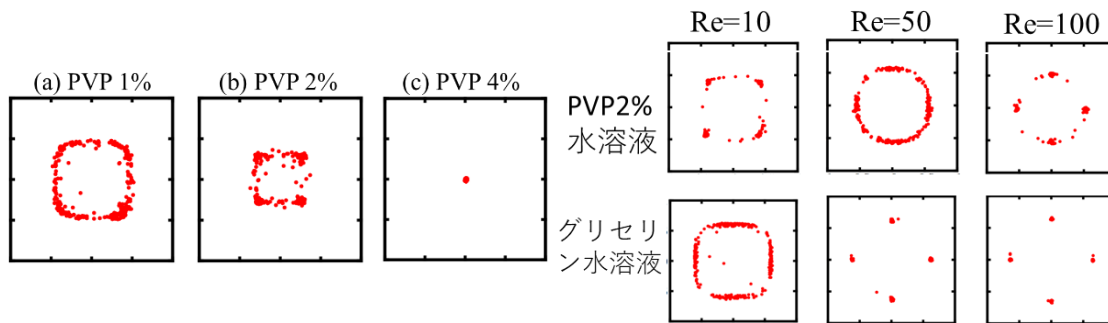


図 7 PVP 水溶液中の粒子分布($Re=1, d/D=0.25$) 図 8 PVP2%水溶液中の粒子分布($d/D=0.15$)

結果に符合する。一方、慣性に起因する揚力として、中立浮遊粒子にはたらく速度勾配や粒子回転による揚力は、速度勾配の空間分布から生じる揚力に比べて小さいことが分かっており、その向きは断面中央から流路壁に向かう向きである。従って、SS 環や pSS 環の動径位置は、この慣性に起因する流路壁向きの揚力と壁効果が釣り合った位置として理解される。正方形管流路の場合、揚力の方位角成分が生じることにより平衡位置は点となる。粘弾性流体中では、低 Re 数の場合粘弾性に起因する揚力が卓越し、 Re 数が大きくなると慣性に起因する揚力が次第に増加すると考えられる。

図 8 は PVP2%水溶液を媒質とした場合の正方形管内流れにおける実験結果を示す。下段には比較のため、媒質がニュートン流体の場合の粒子分布を示した。ニュートン流体の場合、この Re 数範囲では面心平衡点が粒子集中位置であるのに対し、PVP2%水溶液の場合、 $Re=10$ では対角平衡点に粒子集中が見られた。これは粘弾性によって、浮遊粒子には対角線に向かう揚力が作用し、対角平衡点が安定になったためと考えられる。また、 $Re=100$ では、慣性の影響が大きくなり、ニュートン流体と同様、面心平衡点への粒子集中が見られた。その位置はニュートン流体中に比べ、断面中心に近い。 $Re=50$ の場合、粒子は pSS 環のほぼ全周に分布しているが、確率密度関数を計算すると、面心平衡点と対角平衡点の位置に粒子分布のピークが見られることから、この両者が安定な平衡位置であることが推察される。FENE-P モデルに基づく数値解析によってもこの 3 種の粒子集中パターンが得られ、その間の遷移は粘弾性と慣性に起因する揚力の分布から説明することができる。

粘弾性をもつ媒質としてデキストラン 40 水溶液を用い、これを模擬血漿としてヒト赤血球を浮遊させた場合の赤血球分布の計測も行った。管幅 $50\mu\text{m}$ の正方形管流路を用いた実験では、 Re 数が低い場合赤血球は断面中央に集まったのに対し⁽¹²⁾、 Re 数が約 0.5 以上では対角平衡点への集中が見られた。同様の Re 数領域で、剛体粒子(球形粒子、雪だるま状粒子)の場合には流路断面に広く分布する結果が得られたことから、赤血球のもつ変形性により集中位置が変化しただけでなく、集中現象が促進された可能性が示唆された。

本研究では、円管内流れにおいて内側環が平衡位置となる Re 数領域の存在を示し、正方形管内流れにおいてサイズ比や Re 数に応じた粒子集中パターンとその間の遷移を初めて明らかにした。同じ媒質、同じ浮遊粒子を用いた場合でも Re 数により粒子集中パターンが変化すること、粒子集中位置はサイズ比に依存して変化することを示した。さらに、粘弾性をもつ媒質を用いた場合や浮遊粒子が変形性を持つ場合には、粒子集中位置だけでなく、粒子集中の過程も異なることが分かった。これらをうまく組み合わせることで、大きさや物性の異なる浮遊粒子や細胞を流路断面の異なる位置に集中させることができ、分別や分離に利用できる可能性が示された。媒質の粘弾性や浮遊粒子の変形性の影響の詳細については、今後さらに研究を進める予定である。

<引用文献>

- (1) Segre, G & Silberberg, A, Nature 189, 209-210, 1961.
- (2) Miura, K, Itano, T & Sugihara-Seki, M, J Fluid Mech 749, 320-330, 2014.
- (3) Kajishima, T, Takiguchi, S, Hamasaki, H & Miyake, Y, JSME J B 44, 526-535, 2001.
- (4) Nakagawa, N, Yabu, T, Otomo, R, Kase, A, Makion, M, Itano, T & Sugihara-Seki, M, J Fluid Mech 779, 776-793, 2015.
- (5) Matas, J-P, Morris, JF & Guallelli, E, J Fluid Mech 515, 171-195, 2004.
- (6) Morita, Y, Itano, T & Sugihara-Seki, M, J Fluid Mech 813, 750-767, 2017.
- (7) Nakayama, S, Yamashita, H, Yabu, T, Itano, T & Sugihara-Seki, M, J Fluid Mech 871, 952-969, 2019.
- (8) Di Carlo, D, Irimia, D, Tompkins, RG & Toner, M, Proc Natl Acad Sci 104, 18892, 2007.
- (9) Shichi, H, Yamashita, H, Seki, J, Itano, T & Sugihara-Seki, M, Phys Rev Fluids 2, 044201, 2017.
- (10) Yamashita, H, Itano, T & Sugihara-Seki, M, Phys Rev Fluids 4, 124307, 2019.
- (11) Seo, KW, Kan, YJ & Lee, SJ, Physics of Fluids 26, 06331, 2014.
- (12) Sasaki, T, Seki, J, Itano, T & Sugihara-Seki, M, Biorheology 54, 153-165, 2018.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Takahiro Sasaki, Junji Seki, Tomoaki Itano and Masako Sugihara-Seki	4. 巻 54
2. 論文標題 Cross-sectional distributions of normal and abnormal red blood cells in capillary tubes determined by a new technique	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Biorheology	6. 最初と最後の頁 153-165
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3233/BIR-18166	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Masako Sugihara-Seki and Hiroshi Yamashita	4. 巻 -
2. 論文標題 Experimental and numerical study on the inertial focusing of spherical particles suspended in square channel flows	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of Conference on Modelling Fluid Flow (CMFF'18)	6. 最初と最後の頁 108
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 オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Tomoaki Itano, Keito Konno, Taishi Inagaki and Masako Sugihara-Seki	4. 巻 3
2. 論文標題 Estimating timescale of unstirred layer formation in osmotically driven flow	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Physics Communications	6. 最初と最後の頁 15007
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/2399-6528/aafc09	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 Saki Nakayama, Hiroshi Yamashita, Takuya Yabu, Tomoaki Itano and Masako Sugihara-Seki	4. 巻 871
2. 論文標題 Three regimes of inertial focusing for spherical particles suspended in circular tube flows	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 952- 969
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1017/jfm.2019.325	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hiroyuki Shichi, Hiroshi Yamashita, Junji Seki, Tomoaki Itano and Masako Sugihara-Seki	4. 巻 2
2. 論文標題 Inertial migration regimes of spherical particles suspended in square tube flows.	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review Fluids	6. 最初と最後の頁 44201
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevFluids.2.044201	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hiroshi Yamashita, Tomoaki Itano, Masako Sugihara-Seki	4. 巻 4
2. 論文標題 Bifurcation phenomena on the inertial focusing of a neutrally buoyant spherical particle suspended in square duct flows	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Fluids	6. 最初と最後の頁 124307
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevFluids.4.124307	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計35件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 11件)

1. 発表者名 瀧ノ内希陸、小野澤天紀、関淳二、板野智昭、関眞佐子
2. 発表標題 マイクロチャネル内血液流れ中の血小板模擬粒子の分布
3. 学会等名 第41回日本バイオレオロジー年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小野澤天紀、瀧ノ内希陸、福本翼、関淳二、板野智昭、関眞佐子
2. 発表標題 硬化及び軟化赤血球サスペンション流れ中の血小板模擬粒子の流路内分布
3. 学会等名 第41回日本バイオレオロジー年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masako Sugihara-Seki, Nozomi Takinouchi, Tenki Onozawa, Junji Seki
2. 発表標題 Fluid dynamical study of preferential distributions of blood cell components in microchannel flows
3. 学会等名 Joint Meeting of ESCHM-ISB-ISCH (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中山紗季、山下博士、板野智昭、関眞佐子
2. 発表標題 サブミリ円管内層流に浮遊する球形粒子の断面分布
3. 学会等名 混相流シンポジウム2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山下博士、宗圓龍星、横山直人、板野智昭、関眞佐子
2. 発表標題 正方形ダクト内希薄サスペンション流れにおける球形粒子の慣性集中現象
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masako Sugihara-Seki and Hiroshi Yamashita
2. 発表標題 Experimental and numerical study on the inertial focusing of spherical particles suspended in square channel flows
3. 学会等名 Conference on Modelling Fluid Flow (CMFF'18) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 住田聡之、後藤隆志、関淳二、板野智昭、関眞佐子
2. 発表標題 微小管内を流れる赤血球の断面内分布
3. 学会等名 第66回レオロジー討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山下博士、宗圓龍星、横山直人、板野智昭、関眞佐子
2. 発表標題 正方形ダクト内層流に浮遊する球形粒子の断面内集中現象
3. 学会等名 第66回レオロジー討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Saki Nakayama, Hiroshi Yamashita, Tomoaki Itano, Masako Sugihara-Seki
2. 発表標題 Inertial focusing of spherical particles suspended in laminar circular tube flows
3. 学会等名 71st Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Nozomi Takinouchi, Tenki Onozawa, Junji Seki, Tomoaki Itano, Masako Sugihara-Seki
2. 発表標題 Margination of platelet-sized particles in normal and hardened red blood cell suspension flows
3. 学会等名 71st Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroshi Yamashita, Ryusei Soen, Naoto Yokoyama, Tomoaki Itano, Masako Sugihara-Seki
2. 発表標題 Inertial focusing phenomena of neutrally buoyant particles suspended dilutely in square duct flows
3. 学会等名 71st Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 横山直人、山下博士、板野智昭、関眞佐子
2. 発表標題 矩形管内非ニュートン流体中の慣性粒子の軌道
3. 学会等名 第23回関西大学先端科学技術シンポジウム講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山下博士、横山直人、板野智昭、関眞佐子
2. 発表標題 正方形ダクト内サスペンション流れ中の粒子集中パターンの変化
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 瀧ノ内希陸, 佐々木崇洋, 関淳二, 板野智昭, 関眞佐子
2. 発表標題 赤血球サスペンションの微小流路流れにおける血小板模擬粒子の断面内分布
3. 学会等名 第40回日本バイオレオロジー学会年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 佐々木崇洋, 関淳二, 板野智昭, 関眞佐子
2. 発表標題 赤血球軸集中現象の顕微計測-変形性の影響
3. 学会等名 第40回日本バイオレオロジー学会年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山下博士, 板野智昭, 関眞佐子
2. 発表標題 矩形ダクト内流れにおける単一球形粒子の断面内集中現象
3. 学会等名 日本混相流学会混相流シンポジウム2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中山紗希, 山下博士, 板野智昭, 関淳二, 関眞佐子
2. 発表標題 微小円管内層流に浮遊する球形粒子分布の計測
3. 学会等名 日本流体力学会年会2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 佐々木崇洋, 関淳二, 板野智昭, 関眞佐子
2. 発表標題 赤血球の軸集中現象に及ぼす変形性の影響
3. 学会等名 日本流体力学会年会2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 関真佐子
2. 発表標題 血液流れ中の血小板のマージネーション
3. 学会等名 「生物機械システム研究会」第47回研究会（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yamashita, H., Itano, T., Sugihara-Seki, M.
2. 発表標題 Focusing Regimes in Laminar Suspension Flows through Square Ducts
3. 学会等名 14th International Conference on Flow Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yamashita, H., Itano, T., Sugihara-Seki, M.
2. 発表標題 Inertial Particle Focusing Regimes in Suspension Flows through Square Ducts
3. 学会等名 70th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Sasaki, T., Seki, J., Itano, T., Sugihara-Seki, M.
2. 発表標題 Microscopic Measurements of Axial Accumulation of Red Blood Cells in Capillary Flows -Effects of Deformability-
3. 学会等名 70th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 瀧ノ内希陸, 佐々木崇洋, 関淳二, 板野智昭, 関眞佐子
2. 発表標題 マイクロチャネル内血液流れ中の血小板模擬粒子の分布
3. 学会等名 日本機械学会第30回バイオエンジニアリング講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小野澤天紀, 瀧ノ内希陸, 佐々木崇洋, 関淳二, 板野智昭, 関眞佐子
2. 発表標題 硬化赤血球サスペンション流れにおける血小板模擬粒子の断面内分布
3. 学会等名 日本機械学会第30回バイオエンジニアリング講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 牧野真人, 関眞佐子
2. 発表標題 流路内の球状粒子集中現象の数値解析
3. 学会等名 第22回関西大学先端科学技術シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中川湧斗, 久保あいり, 中山紗希, 山下博士, 板野智昭, 関眞佐子
2. 発表標題 界面活性剤水溶液の正方形管内流れにおける浮遊粒子の分布
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小野澤天紀, 板野智昭, 関眞佐子
2. 発表標題 Y字型分岐流路における血小板模擬粒子の断面内分布の進展
3. 学会等名 日本バイオレオロジー学会第42回年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三木祐太, 山下博士, 板野智昭, 関眞佐子
2. 発表標題 粘弾性流体の正方形管内層流に浮遊する球形粒子の管断面内分布
3. 学会等名 混相流シンポジウム2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山下博士, 板野智昭, 関眞佐子
2. 発表標題 粒子サスペンションの円管内層流で見られるSegre-Silberberg 効果
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 関眞佐子, 小野澤天紀
2. 発表標題 赤血球サスペンション流れに浮遊する血小板模擬粒子のマージネーション
3. 学会等名 日本流体力学会年会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masako Sugihara-Seki
2. 発表標題 Lateral migration of particles and blood cells suspended in tube flows
3. 学会等名 Mathematical Methods in Biofluid Mechanics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tenki Onozawa, Toma Kawauchi, Junji Seki, Tomoaki Itano, Masako Sugihara-Seki
2. 発表標題 Development of margination of platelet-sized particles suspended in red cell suspension flows through Y-shaped bifurcating microchannels
3. 学会等名 72nd Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Haruki Nakayama, Tomoya Nakajima, Tomoaki Itano, Masako Sugihara-Seki
2. 発表標題 Aerodynamic characteristics and flight behavior of the turbo-jav in the javelic throw
3. 学会等名 72nd Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小野澤天紀、瀧ノ内希陸、仲尾信彦、安達泰治、関 眞佐子
2. 発表標題 正常赤血球および硬化赤血球の原子間力顕微鏡による膜弾性計測
3. 学会等名 第24回関西大学先端科学技術シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田中沙織, 板野智昭, 関眞佐子
2. 発表標題 微小矩形管内流れ中の赤血球の断面内分布
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

関西大学学術リポジトリ https://kuir.jm.kansai-u.ac.jp/dspace/ 関西大学学術情報システム http://gakujo.kansai-u.ac.jp/search/index.jsp

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
研究協力者	牧野 真人 (Makino Masato)		
研究協力者	山下 博士 (Yamashita Hiroshi)		
研究協力者	志知 寛之 (Shichi Hiroyuki)		

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	藪 拓也 (Yabu Takuya)		
研究協力者	今西 貴宏 (Imanishi Takahiro)		
研究協力者	佐々木 崇洋 (Sasaki Takahiro)		
研究協力者	中山 紗希 (Nakayama Saki)		
連携研究者	板野 智昭 (Itano Tomoaki) (30335187)	関西大学・システム理工学部・教授 (34416)	
連携研究者	横山 直人 (Yokoyama Naoto) (80512730)	東京電機大学・工学部・准教授 (32657)	