

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 5 月 19 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420095

研究課題名(和文)濃度界面の微視的解釈および固液流動系の能動的制御への応用

研究課題名(英文)Microscopic interpretation of concentration interface and active control of particulate suspension system

研究代表者

原田 周作 (Harada, Shusaku)

北海道大学・工学研究院・准教授

研究者番号：80315168

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、液体中に不均一に分散した固体微粒子の重力沈降挙動について、その集団性を理解するとともに、沈降速度や分散挙動を能動的に制御するための技術を確立した。純粋な液体との間に濃度界面を有するような微粒子分散系の沈降挙動に関して、濃度界面における流体との相対運動を微視的に観察することにより、集団性の形成メカニズムについて明らかにした。さらに分岐や断面積変化を有するような複雑流路中での集団的な粒子沈降挙動について調べ、流路の幾何学的特性量から沈降速度を予測・制御可能な物理モデルを構築した。

研究成果の概要(英文)：Collective settling of fine particles in liquid have been studied numerically, theoretically and experimentally. The existence of concentration interface, which is an apparent interface between suspended particles and pure fluid, plays a significant role in the collective motion of suspended particles. We examined relative motion of particles to surrounding flow near the concentration interface microscopically and found the mechanism of collectivity of particles. We also investigated the collective settling of suspended particles in a complicated channel and develop a physical model on dispersion behavior of particle in the channel.

研究分野：流体力学

キーワード：粒子分散系

## 1. 研究開始当初の背景

液体中に懸濁した微粒子の集団性に関する研究は、さまざまな工学・自然科学分野において基礎的および応用的側面の双方から行われてきた。基礎的研究の代表例としては、粒子群の干渉沈降に関する研究があり、粒子の集団性によって沈降速度や分散特性が複雑に変化することが明らかにされてきた。また液体中の懸濁粒子群（懸濁液滴）の重力沈降挙動では、沈降過程において多様な粒子の分散挙動が観察されることから、近年でも多くの研究者の興味の対象となっている。応用的研究としては、固液分離プロセスや比重分離プロセス、自然現象では河川・海浜の土砂移動、生物対流などにおいて粒子の集団運動が大きな役割を果たすことが報告されている。

しかしながらこれらの研究では、粒子群の沈降速度や分散特性の変化は調べられているが、どのような懸濁条件で粒子の集団性が現れるかについては十分理解されていない。研究代表者はこれまでに懸濁液の濃度界面の運動に着目した粒子の集団性に関する研究を行ってきた(図 1)。このような懸濁液層の重力沈降に関する研究から、濃度界面近傍の粒子運動を詳細に調べることにより、粒子の集団性をコントロールできるのではないかと考えた。さらに、この集団性をうまくコントロールして粒子運動を予測・制御することによって、広範な工学プロセスへの応用が期待されるのではないかという着想に至った。

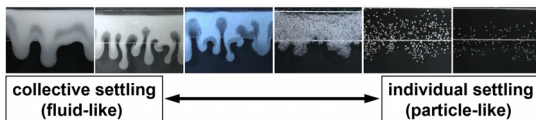


図 1 種々の液体-粒子条件における懸濁液の重力沈降挙動。濃度界面が明瞭な場合は沈降挙動が集団的になるのに対し、不明瞭な場合には個々の粒子としての沈降に近づく。

## 2. 研究の目的

本研究では、不均一な微粒子分散系の沈降現象に関する実験、理論解析および数値解析を行い、以下の目標を達成することを目的とした。

- (1) 濃度界面における粒子と流体の相対運動を詳細に調べ、界面不安定が成長する過程において懸濁粒子の集団性（濃度界面の遮蔽性）がどのように形成されるのかを解明する（濃度界面の微視的解釈）。
- (2) 構成粒子の集団性を定量化し、粒子濃度や物性条件と結び付けることによって、任意の懸濁条件における沈降速度の予測と制御を可能とする。
- (3) 既往のプロセスへの応用展開として、複雑流路内の粒子沈降現象において懸濁条件を操作することにより沈降速度や分散性が制御可能かどうか調べる。

以上の目標が達成されれば、固液分離操作や

移流集積による粒子構造化など種々の工学プロセスにおいて現象の予測と制御が可能となるだけでなく、例えば岩盤亀裂中の物質移動のような自然界における諸現象の解明にも大きく寄与することが期待される。

## 3. 研究の方法

### (1) 実験方法

透明アクリル製粒子沈降実験装置（以下、実験装置）を作製し、防振台に設置した。実験に用いる懸濁液は、 $10 \sim 1000 \mu\text{m}$  のポリスチレン粒子およびガラスビーズと、複数の粘度を有するシリコンオイルを用いて調整した。実験では、装置内部に粘性流体を満たし、濃度界面を有するように微粒子を局所的に懸濁させた。粒子および流体の物性や、懸濁条件（粒子体積濃度）をさまざまに変化させて粒子群を重力沈降させ、沈降挙動を複数のデジタルビデオカメラにより撮影し、画像解析により沈降距離と沈降速度を求めた。

実験流路は、目的に応じて 2 種類を用意した。沈降粒子の集団性の形成メカニズムを調べる目的では、数値解析と同じ幾何学条件である準 2 次元流路を用いて実験を行った。また応用展開を目的とした実験では、図 2 に示すようなフラクタル形状を有する複雑流路を用いた。

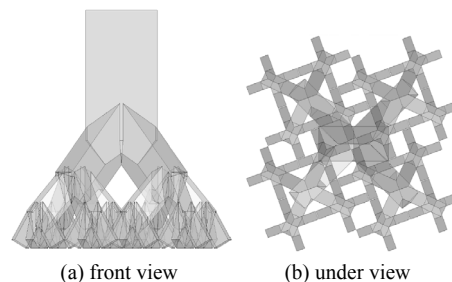


図 2 微粒子沈降実験装置（複雑流路）

### (2) 数値解析方法

本研究では微粒子の沈降挙動に関する 2 種類の数値解析を行った。懸濁液の連続体としての挙動について調べるために、front-tracking 法を用いて実効密度、実効粘性を持つ流体としての懸濁液の運動を計算し、実験結果および理論解析結果との比較を行った。また懸濁粒子の個別的な運動については、point force 型 two-way-coupling 法を用いて離散体としての粒子の沈降解析を行い、濃度界面近傍における粒子運動の詳細を調べた。数値解析結果から、懸濁部への浸透流がどの程度存在するのかを調べることにより、濃度界面の遮蔽性に関する定量的な考察を行った。

### (3) 理論解析方法

実験および数値解析と同条件における線形安定性解析を行った。懸濁液を見かけ密度および粘度を有する連続体とみなし、純粋な液体との濃度界面を界面張力のない不混和界面と仮定した。界面の上下に存在する流体運動

に関して、準 2 次元 Stokes 方程式に速度や密度の微小摂動を与えて分散関係式を導き、界面の支配波長および時間成長率を求めた。得られた結果を実験および数値解析結果と比較し、懸濁粒子が形成する濃度界面の混和性・不混和性についての考察を行った。

#### 4. 研究成果

##### (1) 粒子の集団性と濃度界面の微視的解釈

懸濁粒子の集団性がどのように形成され、拘束力のない微粒子懸濁液の濃度界面がどのような役割を果たすのかについて、実験、数値解析および理論解析によって解明を試みた。結果の一例として、図 3 にさまざまな懸濁条件で行った粒子運動解析の結果を示す。粒子体積を考慮せずに流体との力学的相互作用のみを考える point force 型の解析においても、不混和流体で形成されるような界面不安定 (Reyleigh-Taylor 不安定) が発生し、懸濁粒子は finger 状の塊を形成して沈降することがわかる。また図中の色付きの線は周囲流体の流線を表しており、粒子の集団性が大きい条件では、濃度界面を横切る流れがほとんど見られないことがわかる。以上の結果から、粒子の集団性と濃度界面の遮蔽性 (不混和性) は密接に関係しており、濃度界面の不混和性は沈降粒子のサイズに依存せず、粒子が引き起こす流れ (Stokeslet) によって形成されることが示唆された。

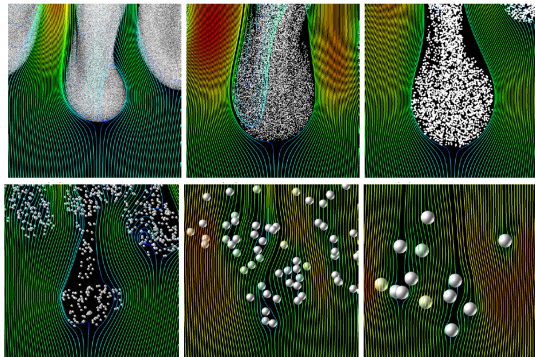


図 3 種々の懸濁条件における粒子の重力沈降挙動 (数値解析結果) 粒子の集団性が大きい場合には懸濁粒子は不混和流体のようにふるまい、濃度界面は遮蔽される。

##### (2) 集団性の定量化と沈降速度の予測

実験、数値計算および理論計算から、濃度界面で生じる界面不安定の特性量 (支配波長、時間成長率) および懸濁粒子の沈降速度を調べた。界面不安定の支配波長は、集団性の大きな懸濁条件の実験結果、不混和流体の数値解析結果、point force 型粒子沈降解析の結果いずれも流路幅の約 2.3 倍となり、これは界面張力のない不混和界面、および拡散のない混和界面の理論解析 (線形安定性解析) から求められる結果と定量的に一致した。

図 4 に、濃度界面不安定の時間成長率および粒子の沈降速度に関する実験と数値解析結果の比較を示す。図の横軸は粒子の集団性を表す無次元数である。実験および数値計算

結果は時間成長率、沈降速度ともに良い一致を示し、それらは粒子の集団性と一意的な関係にあることが示された。以上の結果から、任意の懸濁条件における粒子の集団的沈降挙動 (界面不安定の支配波長、時間成長率および沈降速度) の定量予測が可能となった。

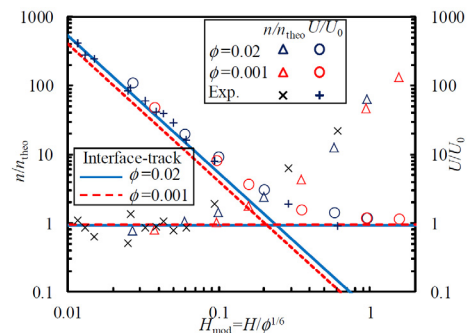


図 4 さまざまな懸濁条件における濃度界面不安定の時間成長率  $n$  および粒子沈降速度  $U$  の関係 (色付きのプロットが数値計算結果)。横軸の  $H_{\text{mod}}$  は粒子の集団性を表す無次元数である。

##### (3) 複雑流路中の懸濁粒子の重力分散挙動

岩盤亀裂や生体内流れなど自然界で多く見られる複雑流路中で、微粒子がどのように沈降するのかを実験的に調べた。図 5 のようなフラクタル性を有する準 2 次元流路により粒子沈降実験を行った結果、集団的な挙動を示す条件では、懸濁部が下部流体と不混和界面を形成しながら流下するため、体積置換効果により分岐部で横方向への分散が促進されることがわかった。さらに粒子の分散挙動 (占有率の時間変化) に関して、流路の空間スケールに依存せずフラクタル特性量のみによって決定される予測モデルを構築した。これにより、任意のフラクタル流路中における懸濁粒子の分散挙動の予測が可能となった。

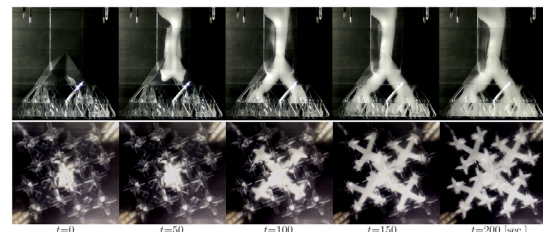


図 5 複雑流路 (フラクタル流路) 中における懸濁粒子の集団的沈降挙動。濃度界面の不混和性により下部流体との体積置換が生じた結果、横方向にも粒子が分散する。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

Yamamoto, Y., Hisataka, F. and Harada, S., Numerical Simulation of Concentration Interface in Stratified Suspension: Continuum-Particle Transition, *Int. J. Multiphase Flow*, **73** (2015), pp.71-79, 査読有。

DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2015.03.007

原田周作, 重力下における液中微粒子の集団性, *ながれ*, 34-5 (2015), pp.321-326, 査読無.

[学会発表](計 9 件)

Kurose, Y., Ishizawa, K. and Harada, S., Scale Independence of Collective Particle Settling in Fractal Channels, *The 9th International Conference on Multiphase Flow*, 2016年5月27日, Palazzo dei Congressi, Firenze, Italy.

黒瀬 雄大, 石澤佳奈実, 原田 周作, フラクタル流路中の微粒子分散挙動に関するスケール不変モデルの構築, 資源・素材 2015, 2015年9月8日, 愛媛大学, 松山市.

黒瀬 雄大, 石澤佳奈実, 原田 周作, 空間スケールに依存しないフラクタル流路中の微粒子分散モデル, 混相流シンポジウム 2015, 2015年8月5日, 高知工科大学, 香美市.

Kurose, Y., Ishizawa, K. and Harada, S., Scale-Independent Model on Gravitational Dispersion of Particulate Suspension in Fractal Channels, *ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference*, 2015年7月28日, COEX, Seoul, Korea.

Harada, S., Behavior of Concentration Interface in Particulate Suspension: Continuum-Particle Transition, *ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference*, 2015年7月27日, COEX, Seoul, Korea.

原田 周作, 微粒子分散系の集団性と個別性, 関西大学先端科学技術シンポジウム, 2015年1月23日, 関西大学, 吹田市.

石澤佳奈実, 渡邊 謙介, 原田 周作, 複雑流路における微粒子の集団的沈降挙動に関する予測と制御, 混相流シンポジウム 2014, 2014年7月29日, かでる 2-7, 札幌市.

原田 周作, 液中微粒子の集団性を利用した沈降・分散挙動の制御, 微粒子工学講演会「環境と粉体技術の接点」, 北海道粉体技術研究会, 2014年7月4日, 北海道立総合研究機構, 札幌市.

原田 周作, 重力下における微粒子分散系の集団性と個別性, 日本地球惑星科学連合 2014 年度連合大会「結晶成長における界面・ナノ現象」, 2014年5月1日, パシフィコ横浜, 横浜市.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

原田 周作 (HARADA, Shusaku)  
北海道大学・工学研究院・准教授  
研究者番号: 80315168

(2) 研究分担者

山本 恭史 (YAMAMOTO, Yasufumi)  
関西大学・システム理工学部・教授  
研究者番号: 90330175