

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 17 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560178

研究課題名(和文)濃度界面を有する微粒子分散系の集団的挙動と個別的挙動

研究課題名(英文)Collective and individual motions of particulate dispersion with concentration interface

研究代表者

原田 周作 (Harada, Shusaku)

北海道大学・工学(系)研究科(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) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：液体中における濃度差によって生じる微粒子の集団性を利用して、沈降速度や分散挙動を制御する技術を確立した。本研究では、液体中に不均一に分散した粒子の沈降形態は、粒子懸濁部が周囲の流体と不混和にふるまい、界面不安定が沈降挙動を支配する「液体的沈降」、および懸濁粒子が個別的に干渉沈降を行う「粒子的沈降」が沈降形態の極限として現れることを示し、その推移のメカニズムを明らかにした。本現象を能動的に利用することにより、沈降促進や分散制御など微粒子に関連する工学プロセスの技術向上が期待される。

研究成果の概要(英文)：Collective motion of fine particles in liquid can be widely seen in engineering processes such as water treatment or sediment transport. We have studied whether collective or individual settling motion of particles reveals in liquid. The results showed that the concentration interface which is an ambiguous interface between suspended particles and pure fluid plays a significant role in these extreme behaviors. In cases of small particle size with high concentration, the interfacial instability occurs at the lower concentration interface and consequently the settling velocity is much faster than that of an isolated particle. On the other hand, in case of large particles with low concentration, the concentration interface is less distinct and the suspended particles settle individually. We showed that the transition from these collective to individual motions of suspended particles can be controlled by the border resolution of concentration interface.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：混相流 微粒子分散系 沈降

### 1. 研究開始当初の背景

液体中における微粒子運動の集団性に関する研究は、これまで国内外の多くの研究者の関心を集めてきた。特に、微粒子の集団としての沈降現象と、それに伴って生じる粒子間の相対運動は、科学的にも工学的にも重要な現象である。例えば水処理プロセスにおける傾斜板沈殿池は、浮遊粒子の集団性によって生じる発生する循環流を利用して固液分離を促進させる。また漂砂などの土砂移動、生物対流、溶岩対流など、液体中における微粒子の集団的沈降に関連する現象は土木、環境、機械、地球物理などさまざまな分野で多くの研究者によって興味を持たれている。

これらの研究の中で、粒子群の沈降速度や拡散量は粒子濃度や変動速度といった局所的・等方的な平均量の関数として主に整理されてきた。しかしながら研究代表者のこれまでの研究によって、不均一な微粒子分散系では、沈降速度は粒子濃度のみでは決定されず、懸濁液の連続体としての挙動と個々の粒子運動が共存するような複雑な現象であることが示唆された。液中微粒子の集団性は、系全体の流動特性に大きく影響を及ぼすにもかかわらず、系統的にその影響について調べられていないのが現状であった。

### 2. 研究の目的

本課題では、このような液体中を運動する微粒子が有する集団性と個別性に関して、濃度界面の挙動に着目した研究を行った。濃度界面とは、液体中に懸濁した粒子が純粋な液体との間に作りだす見かけ上の界面のことを指す。例えば水と油のような不混和流体の界面とは異なりはっきりとした境界面を持たないため、界面を横切るような粒子と流体の相対運動(流体の透過や粒子の分散)が可能である。また特別大きな粒子間力が作用していない限り、界面張力は0と考えられる。逆に、塩水-淡水境界のような混和流体中の密度界面と対比させると、溶媒分子に比べて懸濁粒子が大きなサイズを持つため、熱運動による拡散は無視できるほど小さい。したがって懸濁粒子の濃度界面は、束縛もなく、積極的に追い出されもしない粒子の集団が作りだす曖昧な境界面と解釈される。流動条件によっては、このような不明瞭な界面が不混和界面のようにふるまい、巨視的な懸濁液の流動に大きく影響を与える場合がある。本研究では、液体中を運動する微粒子が有する集団性と個別性を、この濃度界面の運動に着目することにより統一的に解明することを目的とした。

### 3. 研究の方法

#### (1) 実験方法

図1に示すようなデジタルビデオカメラによる外部からの撮影が可能であるような透明アクリル製容器(以下実験装置)を作製し、防振台に設置する。実験に用いる懸濁液は、10

~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する。実験装置内部に、上下部に濃度不連続面を有するように微粒子懸濁層を粘性流体中に静置させ、濃度や流体力学的条件を変化させて粒子群を重力沈降させる。沈降時の巨視的な懸濁液の挙動をデジタルビデオカメラにより撮影し、画像解析ソフトウェアを用いて、連続体としての懸濁液の運動(界面形状の時間変化)、および個々の粒子運動(粒子相対位置、沈降速度)を調べる。

また、微粒子により形成される濃度界面の挙動と対比させるために、混和界面である密度界面で生じる界面不安定の観察実験を行う。上下に2つの電極を有する実験セル中に任意の濃度の硫酸銅溶液を封入し、赤外光を照射する。電極間に一定電流を流すことにより形成される銅イオンの密度不安定を赤外線フィルタを取り付けたビデオカメラにより撮影し、混和界面における不安定の支配波長および界面近傍の銅イオンの挙動を調べる。

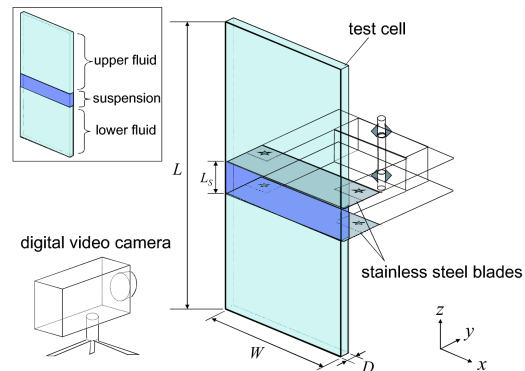


図1 微粒子沈降実験装置の概要

#### (2) 理論解析方法

粒子沈降実験に対応した線形安定性解析を行う。界面張力のない不混和界面で仕切られた2流体を仮定し、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、支配波長および時間成長率を求める。解析条件は実験に用いた粒子および流体物性から見かけ密度および粘度を求め、懸濁液を1つの連続体と仮定した解析を行う。

#### (3) 数値解析方法

巨視的な懸濁液の挙動については、Front-tracking 法による流体解析コードを改良し、実効密度、実効粘性を持つ連続体としての懸濁液の運動を計算し、実験結果との比較を通して巨視的な力学的特性についての知見を得る。また懸濁液内部の粒子の相対運動については、point force model に基づく粒子流動解析コードを用いて、粒子-流体間相互作用を考慮した有限幅微粒子層の沈降現象に関する数値解析を行う。さまざまな粒子物性、濃度などを变化させた解析を行い、粒子層の沈降速度の変化や周囲流体との相互作用について調べる。

#### 4. 研究成果

##### (1) 液中微粒子の集団性

図1で示した実験装置を用いて、さまざまな粒子および流体を用いて上下部に濃度界面が存在するような懸濁液層の沈降実験を行った。図2に示すように、懸濁粒子のサイズが大きく濃度が小さい条件では粒子は個別的な沈降挙動を示すのに対し、粒子が小さく濃度が大きい条件では、懸濁部分は集団的に上下の液体と不混和にふるまい、下部の濃度界面では界面不安定が生じる(Rayleigh-Taylor不安定)。この界面不安定の支配波長および時間成長率は、集団的挙動を示す条件では線形安定性解析で得られた不混和2流体のものと定量的に一致する。本研究では、界面不安定の支配波長  $\lambda$  と平均的な粒子間距離  $d_p/\phi^{1/3}$  ( $d_p$ : 粒子直径、 $\phi$ : 体積濃度) との比から濃度界面の解像度を表す無次元数を定義した結果、この無次元数が粒子の個別的から集団的な挙動への遷移を表すことを示した。また粒子の沈降速度はこの無次元数の-2乗に比例して変化することを明らかにした。以上の結果から、液体中における微粒子の集団的な沈降挙動のメカニズムを明らかにするとともに、懸濁条件を調整することによる沈降速度の能動的制御への応用可能性を示した。

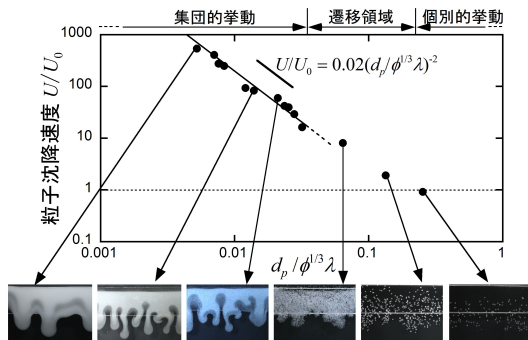


図2 種々の液体-粒子条件における粒子沈降速度。横軸は濃度界面の明瞭性を表す無次元数。

##### (2) 有限流路における微粒子の沈降挙動

さまざまな断面形状を有する垂直流路中での微粒子の沈降実験を行った。図2左の写真で示したような集団性の大きな条件で、流路の長辺と短辺の長さをさまざまに変化させて実験を行い、流路内部での粒子の沈降挙動および沈降速度を調べた。その結果、流路断面のアスペクト比が5以下での流路中央に1本のfingerが形成される領域(線形領域)、アスペクト比が5-10程度のfingerが複数に分裂する領域(遷移領域)、アスペクト比が大きく界面不安定の支配波長に相当するfingerが形成される領域(無限領域)の3つの沈降形態が現れることを示した。さらに沈降速度の測定結果を一般化し、任意の断面形状を有する垂直流路中に粒子沈降速度の予測モデルを構築した。

##### (3) 濃度界面挙動の数値解析

濃度界面近傍における粒子の集団運動のメカニズムを調べるために、2つの方法を用いて数値解析を行った。図3(a)は、懸濁液下部における濃度界面の挙動の実験結果、(b)は界面張力を0とした場合の不混和流体のFront-tracking法による数値計算結果、(c)は質点(point force)を流体中に配置し、重力と周囲流体との相互作用のみを考慮して数値計算を行った結果である。図に示されるように、実験で得られた下部濃度界面の変動は両数値計算によって良く表され、界面変動の波長も実験結果および理論解と定量的に一致する。以上の結果は、懸濁液の濃度界面は、明瞭性が大きい場合には、「界面張力のない不混和界面」と「拡散のない混和界面」の両方に解釈することができることを示唆している。数値解析結果から、濃度界面が十分な解像度を持つ場合、個々の粒子が引き起こす流れによって外部からの流体の流入が遮蔽された結果、懸濁液は周囲流体と不混和にふるまうということを示した。

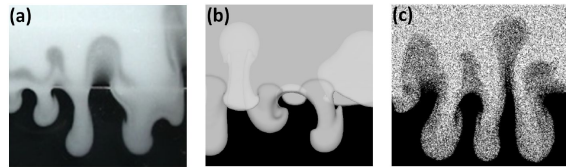
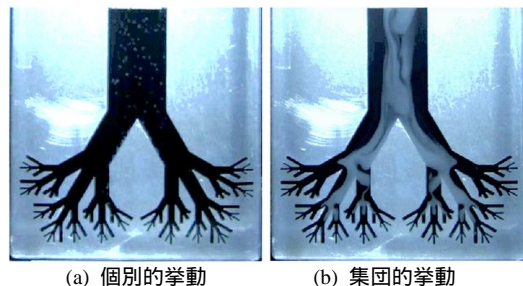


図3 準2次元容器内における微粒子の重力沈降挙動。(a) 実験結果、(b)界面張力を0とした不混和2流体の数値計算結果、(c) point force を与えたNavier-Stokes 式の数値計算結果。

##### (4) 複雑流路中の微粒子沈降挙動

岩盤亀裂や生体内流れなど自然界で多く見られるフラクタル流路中で、微粒子がどのように沈降するのかを実験的に調べた。図4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。その結果、個別的な挙動を行う条件では、粒子は流路全体に拡がって沈降するが横方向への分散は小さいのに対して、集団的な挙動を示す条件では、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。本結果より、粒子の懸濁条件を調整することにより複雑流路中の分散挙動を制御できる可能性を示した。



(a) 個別的挙動 (b) 集団的挙動

図4 複雑流路中における粒子の沈降挙動。集団的な条件では不混和流体のような体積置換挙動により粒子は分岐部で横方向に分散する。

## 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 3 件)

Otomo, R., Takahashi, K., Ishii, N. and Harada, S., Mass Transfer Caused by Gravitational Instability at Reactive Solid-Liquid Interface, *J. Visual.*, **17**-1, (2014), pp.49-57, 査読有.

DOI: 10.1007/s12650-013-0183-0

Harada, S., Kondo, M., Watanabe, K., Shiotani, T. and Sato, K., Collective Settling of Fine Particles in a Narrow Channel with Arbitrary Cross-section, *Chem. Eng. Sci.*, **93**, (2013), pp.307-312, 査読有.

DOI: 10.1016/j.ces.2013.01.054

Harada, S., Mitsui, T. and Sato, K., Particle-like and Fluid-like Settling of a Stratified Suspension, *Eur. Phys. J. E*, **35**-1, (2012), pp.1-6, 査読有.

DOI: 10.1140/epje/i2012-12001-6

[学会発表](計 6 件)

久高 文也, 城後 健二, 山本 恭史, 原田 周作, 懸濁液における濃度界面のふるまいに関するシミュレーション, 第 27 回数値流体力学シンポジウム, 2013 年 12 月 19 日, 名古屋大学, 名古屋市.

Tanikoshi, T., Otomo, R., Ishii, N. and Harada, S., Non-Invasive Measurement of Concentration Field on Mass Transfer in Porous Media, The 12th International Symposium on Fluid Control, Measurement and Visualization, pp.1-8, 2013 年 11 月 21 日, 奈良県新公会堂, 奈良市.

原田 周作, 微粒子分散系の集団的挙動と個別的挙動, 可視化情報学会全国講演会 2012, 2012 年 10 月 4 日, 姫路商工会議所, 姫路市.

Otomo, R., Ishii, N. and Harada, S., Mass Transfer caused by Gravitational Instability at Reactive Solid-Liquid Interfaces, 15th International Symposium on Flow Visualization, 2012 年 6 月 27 日, Trade Union Palace, Minsk, Belarus.

渡邊 謙介, 原田 周作, フラクタル流路における微粒子の重力拡散挙動, 資源・素材 2011, 2011 年 9 月 26 日, 大阪府立大学, 堺市.

渡邊 謙介, 原田 周作, フラクタル形状を有する複雑流路における微粒子の重力拡散挙動, 可視化情報学会全国講演会

2011, 2011 年 9 月 26 日, 富山国際会議場, 富山市.

[図書](計 1 件)

原田 周作 (分担執筆), 粉粒体の構造制御, 表面処理とプロセス設計, (2013), 技術情報協会, pp.694-702 (総 873 頁).

## 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・准教授  
研究者番号: 90330175