

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 27 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26800201

研究課題名(和文)粉粒体での相分離と対流のクロストーク：散逸粒子系の非平衡物理

研究課題名(英文)Cross-talk between phase separation and global convection of granular materials

## 研究代表者

稲垣 紫緒 (Inagaki, Shio)

九州大学・理学研究院・准教授

研究者番号：20452261

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：複数の種類の粒子からなる粉粒体は、混ぜようとすればするほど、水と油が分離するように、同じ種類の粒子同士が集まって分離しやすいことが知られている。本研究では、水平に置いた円筒容器の内部に2種類の粒子を入れて、回転させたときに観察される粒子の相分離現象について実験を行い、新たな分離の時空間ダイナミクスをいくつか見出した。この結果について、現象論的モデルを提案し、分子動力学法を用いた数値計算も行った。

研究成果の概要(英文)：It is well known that granular materials which is composed of several species tend to segregate when they are under mechanical agitation, such as shaking, flowing, and tapping as if phase separation occurs in oil/water mixture. In this project, we experimentally studied segregation dynamics of granular materials in a rotating cylinder. We found several new spatio-temporal dynamics of segregation and proposed a phenomenological model. Numerical simulations were also carried out to investigate internal granular flow of granular media in a rotating cylinder.

研究分野：粉粒体物理

キーワード：非平衡・非線形物理 非平衡散逸系 粉粒体物理学

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 粉粒体とは巨視的な大きさを持った粒子の集団である。一般に粒子の直径が  $100\mu\text{m}$  より大きい粒子からなり、熱揺らぎの影響は無視できる程度に十分大きい。その為、複数の種類の粉体を混ぜた時に、従来の熱揺らぎによる拡散では、均一な混合は不可能である。むしろ、混ぜようとすればするほど、相分離現象のように同じ種類の粒子同士が集まって分離しやすい性質がある。それは、粒子同士の衝突が非弾性的で、粒子表面での摩擦的相互作用など、系全体が散逸的であることに大きく起因する。工学的には、複数の材料を均一に混合するのは非常に重要な問題であるが、これまでは個々の場合について、経験と試行錯誤によって粉粒体の制御技術を向上してきたと言える。

(2) 粉粒体が物理の対象として注目されるようになって 20 年あまり経つ[1,2]。粉粒体の分離現象は最も盛んに研究された粉体物理の問題の一つであり、その典型的な系の一つが、回転する円筒容器内の分離現象である。大きさや形が異なる 2 種類の粒子を同じ割合で円筒容器の 50% の体積に充填し、水平に置いた円筒容器を回転させた場合、軸方向に縞々模様(バンド)が形成されることがよく知られている [3]。バンドは、時間とともに結合する単調な緩和現象となることが分かっている。我々のこれまでの研究で、同様の一重円筒容器に、ほぼ完全に粒子を充填し、円筒容器を回転させると、 $1\text{mm}/\text{min}$  程度と非常にゆっくりと、しかし一週間以上もの間定期的に縞々模様(バンド)を生成し、進行波のように流れ続ける相分離ダイナミクスが起こることを見出した[4]。

## 2. 研究の目的

(1) 大きさや形の異なる複数の種類の粉粒体を容器に入れ、機械的刺激によって擾乱を与えた際に誘起される分離現象(segregation)の時空間ダイナミクスについて実験・理論・数値計算によって総合的に研究を行う。定常的機械刺激のもとで、粒子のサイズが  $0.1\mu\text{m} \sim 1\text{cm}$  の間で変化すると、どのように相分離ダイナミクスが変わるのかを系統的に調べる。そのことにより、 $k\text{BT}$  の熱揺らぎのもとでの相転移や相分離現象との共通点と相違点を明確することが本研究の中心的な課題である。

(2) 粉粒体の分離現象は、動的安息角が重要な決定的なパラメータとして経験的に知られている。動的安息角とは、重力下で流動化した粉粒体が水平面となす角度を指す。流れにくい粒子ほど斜面流は急な角度をなし、流れやすい粒子ほど水平に近い斜面流を形成することから、動的安息角は「流動しやすさ」を表す一つの指標と考えられている。動的安息角がどう決まるのか、その物理的な起源は明らかでない。動的安息角の物理的な起源を明らかにすることで、分離現象の本質的なメ

カニズムの解明を目指す。

## 3. 研究の方法

(1) 水平に置いた円筒容器に大きさや形の異なる 2 種類の粒子を封入して回転させると、粒子が分離して、円筒容器の軸方向に縞模様を形成する。この縞模様の分離パターンの時空間ダイナミクスについて研究を行う。1 重円筒の場合については、50%程度 の充填率の場合にはこれまで数多くの実験がなされており、ほぼ完全に充填した高充填の場合には[4]で稲垣が行っている。本研究では、2 重円筒(図 1)を用いた実験を行った。充填率や回転速度を系統的に変え、バンド形成の時空間ダイナミクスがどのように変わるか調べる。また、円筒容器を開閉式にし、サイズ分離した状態で容器を開けて粉体媒質の内部の分離の様子を直接観察できるようにする。

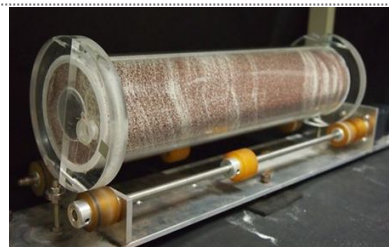


図 1：二重円筒容器の実験設定  
二重円筒の実験設定。粒子赤：ガーネットサンド(直径約  $0.4\text{mm}$ )、粒子白：珪砂(直径約  $0.2\text{mm}$ )。円筒は外半径  $4\text{cm}$ 、内半径  $2\text{cm}$ 、長さ  $30\text{cm}$ 。

(2) 動的安息角について、一重円筒容器を用いて、粒子の大きさや比重を系統的に変えて測定を行う。また動的安息角が円筒容器の回転速度にどのように依存するかについても実験的に調べる。サイズ分離する粒子の組み合わせとしない組み合わせで、動的安息角がどのような関係にあるか、これまでの経験則を検証する。

(3) 離散要素法を用いた数値計算によって、円筒容器内の粒子の流れ場や軸方向の拡散について調べる。内部の粒子の流れを理解することによって、円筒容器表面で観察される粒子の分離パターンの時空間ダイナミクスを、定量的に評価可能な物理量を用いたモデル方程式で記述することを目指す。

## 4. 研究成果

### (1) 二重円筒容器における分離パターンの時空間ダイナミクス(発表論文)

二重円筒容器に、ガーネットサンド(直径約  $0.4\text{mm}$ )と珪砂(直径約  $0.2\text{mm}$ )を体積比  $1:1$  で封入し、充填率を系統的に変えて実験を行った。充填率は、容器に占める粉体層の体積比のことで、粉体層の体積には粒子間の空隙を含む。円筒容器の回転速度を  $27\text{rpm}$  で回転させると、図 2 に示すような時空間パターンが観察された。

充填率  $0.932$  の場合、図 2(a)に示すように、

粒子のサイズ分離によってできた縞々が円筒容器中央部分から湧き出し、円筒容器の両端に向かって流れていくのが観察された。

充填率 0.977 の場合には、小さい方の粒子で形成された白い縞々が左右に往復する運動が観察された。粒子同士が非弾性衝突によって常にエネルギーを散逸する粉粒体において、このように振動現象が現れることは極めてまれであり、非常に興味深い時空間ダイナミクスを新たに観察することに成功した。

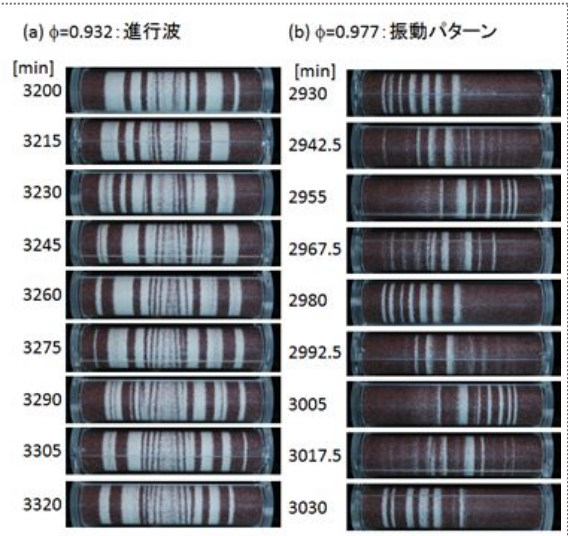


図 2: 二重円筒容器にガーネットサンドと珪砂を封入し、27rpm で回転させたときの分離パターンの時間発展

(2) 一重円筒容器を用いて、充填率 30% 程度の部分充填の場合の実験を長時間行ったところ、これまでの研究では見られない新規の時空間パターンを発見した。従来の研究では、充填率が 50% 以下の部分充填の場合、軸方向に現れる縞模様の本数は時間とともに単調に減少することが知られていた。しかし、我々の実験で、十分長時間観察すると、円筒容器の両端から縞模様が湧き出したり、定常的なバンドを形成するような、新たな時空間パターンが観察された。内部構造を見ると、高充填率の時のような 3 次元的な分離構造はとらず、動径方向にはほぼ一様な構造になっていることがわかった。どのように単調緩和から別のダイナミクスへ移行するのか、内部構造から判断するのは難しいため、今後より詳細な実験を行って、このメカニズムを明らかにする必要がある。

(3) これまで、小さい粒子の安息角が大きい粒子の安息角より大きいときに、粒子が分離しやすい、と経験的に言われていた。我々が二組の粒子について、動的安息角の回転速度依存性を調べたところ、図 3 に示す結果が得られた。ガーネットサンドと珪砂の場合、単独で動的安息角を測定すると図 3 上図のような結果になった。我々が測定した回転速度の範囲内では、ガーネットサンドと珪砂にはほ

とんど差が見られない結果となった。しかし、図 2 で示されているように、ガーネットサンドと珪砂の組み合わせは非常にサイズ分離を起こしやすいことが我々の実験で明らかになっている。一方、ポピーシードとバジルシードの場合では、我々が測定した回転速度の範囲内では、常にポピーシードの動的安息角の方がバジルシードのそれより大きくなっている(図 3 下)。従来の経験則に照らし合わせれば、いずれの回転速度でもバンドが出来るはずである。しかし、実際ポピーシードとバジルシードを混合した円筒容器を回転速度を変えて回転させると、10rpm より低い回転速度でサイズ分離の縞々を形成しないことが分かった。このことから、「小さい粒子の安息角が大きい粒子の安息角より大きいときに、粒子が分離しやすい」という従来の経験則は必ずしも成り立たないことが分かった。

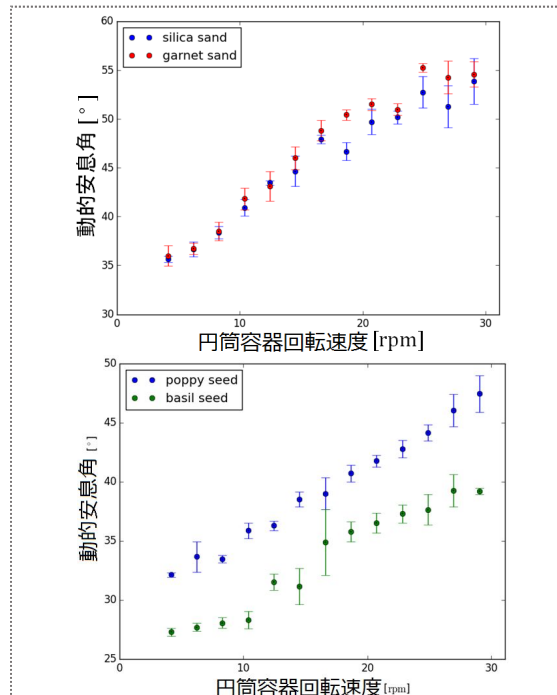


図 3: 動的安息角の回転速度依存性 (上図) ガーネットサンドと珪砂の動的安息角 (下図)ポピーシード(直径約 0.85mm 球形)とバジルシード(長径約 1.95mm, 短径約 0.95mm の楕円形)の動的安息角(未発表)

(4) 動的安息角がどのような物理量によって決まるのかを系統的に調べるために、球状粒子であるガラスビーズを用いて、動的安息角の測定を行った。円筒容器に 1 種類の大きさのガラスビーズを充填率 50% で封入し、水平に置いて回転させ、側面から写真を撮って、動的安息角の測定を行った(図 4)。回転速度が小さい場合には、小さい粒子ほど動的安息角が大きい傾向があるが、回転速度が大きくなってくるとこの傾向は成り立たないことが分かる。今後は、比重の異なる粒子を用いて同様の測定を行い、より詳細な研究を進める予定である。

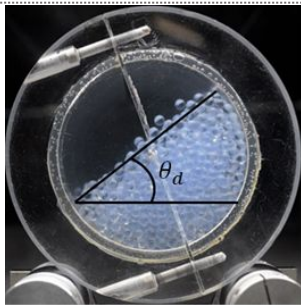


図 4 : ガラスビーズを用いた動的安息角を測定する実験設定

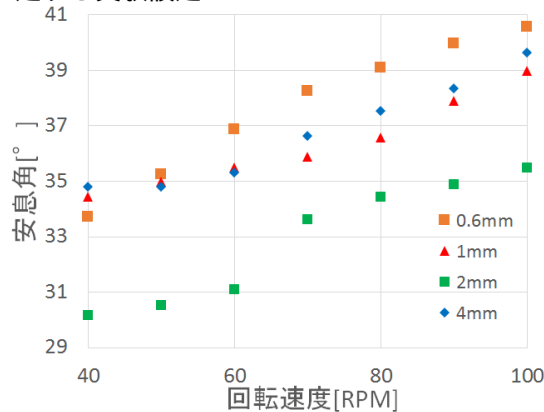


図 5 : ガラスビーズの動的安息角の回転速度依存性 (未発表)

(5) 3次元の分子動力学法シミュレーションを用いて、動的安息角の回転速度依存性を調べた。実験で動的安息角を測定する場合、同じ表面物性で比重を変えるのは難しい。数値計算によって、パラメータを系統的にふることで、動的安息角がどのようなパラメータに依存するかを明らかにする。粒径 1 cm の単分散の球形粒子を直径 19cm、長さ 10 cm の円筒容器にいれ、回転速度を 0 から 40rpm まで変えて数値計算を行った(図 6)。その結果、図 7 に示すように、動的安息角は回転速度に対してほぼ線形に増えることが分かった。先行研究[5]によって、動的安息角の回転速度依存性が調べられているが、回転速度が 0~200rpm の 50rpm 刻みで調べられている。粉粒体の回転円筒容器の実験で一般的には 20~40rpm 程度の回転速度を用いられることが多いため、その範囲に絞って詳細な実験を行った。3次元的な流れ場や、円筒容器の軸方向の拡散など、今後より詳細な解析を行っていく予定である。

<引用文献>

[1] Jaeger et al. *Rev. Mod. Phys.* **68** (1996) 1259  
 [2] Duran, 粉粒体の物理、吉岡書店  
 [3] Vidar et al. *Phys. Rev. E* **56** (1997) 6981  
 [4] Inagaki et al., *Phys. Rev. Lett.* **105** (2010) 118001.  
 [5] R.Y. Yang et al., *Powder Technology* **188** (2008) 170.

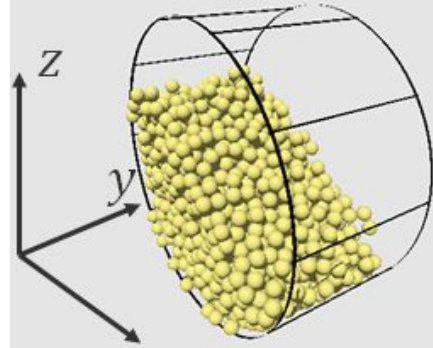


図 6 : 3次元分子動力学法による動的安息角を測定する数値計算のセットアップ

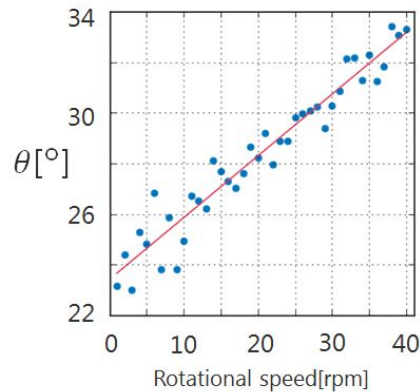


図 7 : 動的安息角の回転速度依存性(数値計算) 摩擦係数は 0.4。(未発表)

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)

Yoshitsugu Kubo, Shio Inagaki\*, Masatoshi Ichikawa\*, and Kenichi Yoshikawa, Mode bifurcation of a bouncing dumbbell with chirality, *Physical Review E* **91** (2015) 052905.

DOI:10.1103/PhysRevE.91.052905

(\* : 責任著者)

Shio Inagaki, Hiroyuki Ebata, and Kenichi Yoshikawa, Steadily oscillating axial bands of binary granules in a nearly filled coaxial cylinder, *Physical Review E* **91** (2015) 010201(R).

DOI:10.1103/PhysRevE.91.010201

[学会発表](計 16 件)

【口頭発表】

大石隼道, 稲垣紫緒, 回転ドラムにおける粉粒体の回転速度に依存した相分離ダイナミクス日本物理学会, 第 72 回年次大会, 大阪大学(豊中キャンパス), 2017 年 3 月 17 日.

大石隼道, 稲垣紫緒, 回転ドラムにおける粉粒体の分離現象の回転速度依存性第 122 回 日本物理学会九州支部例会, 福岡大学, 2016 年 12 月 10 日.

徳田真之介, 稲垣紫緒, 粉粒体の動的安息

角に関する数値計算第 122 回日本物理学会九州支部例会, 福岡大学, 2016 年 12 月 10 日.

Shio Inagaki, Masamichi Ooishi, Hiroyuki Ebata, and Kenichi Yoshikawa, Segregation dynamics in a rotating cylinder depending on a rotational speed, Hungary-Japan Workshop on Physics of Rheology and Fracture, Kyushu University, Fukuoka, 2016 年 12 月 5 日.

大石隼道, 稲垣紫緒, 回転円筒容器による粉粒体の分離現象と動的安息角の関係, 西日本非線形研究会 2016, 九州大学伊都キャンパス, 2016 年 6 月 25 日.

稲垣紫緒, 江端宏之, 粉粒体の相分離現象, 第 121 回日本物理学会九州支部例会, 九州工業大学, 2015 年 12 月 5 日.

江端宏之, 稲垣紫緒, 粉粒体の偏析による自己複製パターン, 第 121 回日本物理学会九州支部例会, 九州工業大学, 2015 年 12 月 5 日.

大石隼道, 稲垣紫緒, 回転円筒容器を用いた粉粒体の偏析現象, 第 121 回日本物理学会九州支部例会, 九州工業大学, 2015 年 12 月 5 日.

稲垣紫緒, 江端宏之, 吉川研一, 回転二重円筒における粉体相分離現象の内部構造について, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 東海大学, 2015 年 9 月 17 日.

#### 【ポスター発表】

稲垣紫緒, 徳田真之介, 回転円筒容器内での動的安息角に関する 3 次元系の数値計算, 日本物理学会第 72 回年次大会, 大阪大学(豊中キャンパス) 2017 年 3 月 20 日.

大石隼道, 稲垣紫緒, 回転ドラムを用いた粉粒体の分離現象, 第 6 回ソフトマター研究会, 北海道大学, 2016 年 10 月 25 日.

大石隼道, 稲垣紫緒, 回転ドラムによる粉粒体の分離現象と動的安息角の関係, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 金沢大学, 2016 年 9 月 16 日.

大石隼道, 稲垣紫緒, 木村康之, On the condition for the formation of segregating bands in a rotating drum 新学術領域第 3 回領域研究会, 九州大学伊都キャンパス, 2016 年 6 月 18 日.

稲垣紫緒, The universal property of the radial distribution function of the many particle systems, 新学術領域第 3 回領域研究会, 九州大学伊都キャンパス, 2016 年 6 月 18 日.

久保善嗣, 稲垣紫緒, 市川正敏, 吉川研一, Mode bifurcation of a chiral asymmetric dumbbell on a vertical vibrated plate, 新学術領域第 3 回領域研究会, 九州大学伊都キャンパス, 2016 年 6 月 18 日.

江端宏之, 稲垣紫緒, Self-Replicating Band of Granular Segregation, 新学術領域第 3 回領域研究会, 九州大学伊都キャンパス, 2016 年 6 月 18 日.

〔図書〕(計 1 件)

稲垣紫緒, 久保善嗣, 材料表面の親水・親油の評価と制御設計(共著, 第 5 章 8 節, 287 ~ 296 ページ(書籍総ページ数 600 ページ)), 株式会社テクノシステム, 2016 年 7 月 27 日.

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

○取得状況(計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等  
<http://granules.kyushu-u.ac.jp/~inagaki/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

稲垣 紫緒 (INAGAKI, Shio)

九州大学・大学院理学研究院・准教授

研究者番号: 20452261

(2) 研究分担者

( )

研究者番号:

(3) 連携研究者

( )

研究者番号:

(4) 研究協力者

( )