

平成 23 年 3 月 15 日現在

機関番号：34428

研究種目：若手研究（スタートアップ）

研究期間：2009～2010

課題番号：21840054

研究課題名（和文） 粉体系の相転移現象に関する実験的研究

研究課題名（英文） Experimental study on granular phase transition

研究代表者

下川 倫子（Michiko Shimokawa）

摂南大学・理工学部・任期つき助教

研究者番号：80554419

研究成果の概要（和文）：

粉体に加えた外力がある臨界値を越えると粉体は動き出す。これを粉体の集団運動としてみると、静止した固体から流動化した液体に相転移が起こっているとみなすことができる。粉体の相転移現象を理解することを目指し、斜めに傾いた容器に粉体を入れ、振動加える実験を行った。この実験で粉体は重力に逆らって、斜面を登る。斜面上部に輸送される過程の中で、粉体は容器表面に様々なパターンを自発的に形成する。外力が大きくなるにつれ、表面には縞パターン、クラスターパターン、バブルパターン、無秩序パターンが出現する。また、独立に鉛直方向と水平方向に振動をかける実験から、鉛直方向だけのときよりも、水平方向の振動モードを加えたときのほうが斜面上部に粉体が輸送しやすくなることから、水平方向の振動モードは粉体を輸送する上で重要であることがわかった。さらに、高速度カメラの観察から、粉同士の衝突による相互作用が表面パターンを形成する上で重要であることもわかった。

研究成果の概要（英文）：

When the external force is exceeded with one critical level, granular starts to move. From the view of the group motion of granular, this behavior is recognized as the granular phase transition. To understand the phase transition, the vibration experiments were conducted. The glass beads, which diameter is 0.1 mm, are poured into an inclined rectangular case, and are vibrated at the right angle to the slope of the case. In this experiment, granular climbs upward on the slope. In the process of the transport upward of the slope, surface patterns formed by grains are observed on the slope. According to the increasing of external force, the surface pattern changes; stripe pattern, cluster pattern, bubble pattern. And, vibration was added from both horizontal direction and vertical direction, which leads that the horizontal vibration is important to transport the granular upward of the slope. In addition, it was found that the interaction between granules is derived from the formation of surface patterns by the observation of high speed camera.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,070,000	321,000	1,391,000
2010年度	490,000	147,000	637,000
総計	1,560,000	468,000	2,028,000

研究分野：数理物理・物性基礎

科研費の分科・細目：理工系・数物系科学・物理学・数理物理、物性基礎

キーワード：粉体、相転移、パターン形成

1. 研究開始当初の背景

粉体は多くの反応・製造過程や充填・輸送過程だけでなく、地すべり、雪崩、液状化などの自然災害の発生や成長にも本質的な役割を占め、その研究の歴史も古い。しかし、粉体は液体とも固体とも異なる複雑な挙動を示すために、基礎的・系統的な研究は十分になされていない。

粉体の面白い現象の一つとして、粉体の相転移現象 (Liu, A. I. *et. al.*, Nature, **396**, 21, 1998.)が上げられる。静止し固体のような状態の粉体の集団にある閾値を超えた外力をかけると、あたかも液体のように急に動き出す。これを粉体の液体・固体相転移現象と呼ぶ。しかし、取り扱いの難しさゆえ、粉体の相転移現象に関して統一的理解はなされていない。報告者は過去の研究で、液体のように振舞っているなだれ中の粉体が安息角になると固化してトラップドキックが発生するという粉体の相転移現象に基づいた現象論を提案した (M. Shimokawa *et. al.* Phys. Rev. E, **77**, 011305 (2008); Phys. Lett. A, **366**, 591 (2007)). 現象の本質は粉体の相転移現象であるが、この実験から粉体の相転移を特徴づける物理量の導出はできなかった。そこで、振動による粉体の輸送現象に注目し、粉体の相転移現象の理解を目指す。

振動という外力により、固体状態の粉体は液体状態に相転移を起こし、坂道を登り、上部に輸送される。外力である振動は実験者がコントロールできるため、相転移現象を観察するには非常に有効な系である。また、粉体は非平衡系での物理現象を再現する最も単純なモデルのひとつといわれている。そのため、本研究は粉体の相転移現象のみでなく、非平衡系一般における相転移現

象の理解にも繋がるのが期待される。振動による粉体の輸送は工学でも応用されており、本実験は理学だけでなく工学的にも重要な課題であるといえる。

2. 研究の目的

粉体に加えた外力がある臨界値を越えると粉体は動き出す。これを粉体の集団運動としてみると、静止した固体から流動化した液体に相転移が起こっているとみなすことができる。この相転移の前後で、粉体の運動を特徴づける物理量が変化していると考えられる。実験から粉体の相転移現象を決定する物理量を明らかにすることを旨とし、粉体の振動実験の中で観察される粉体の相転移現象に着目した。

3. 研究の方法

斜めに傾けた長方形の容器に0.1 mmのガラスビーズ(科研費にて購入)を入れ、加振機(科研費にて購入)で容器に振動を加えた。まず、容器に対して、垂直方向に振動を加えた。このとき、(1)斜面角度、(2)振幅を変化させた。次に、二台の加振機を使って、水平方向と鉛直方向に別々に振動を加え、(3)水平方向、鉛直方向に関する振動の振幅比変化を変化させた。(1) - (3)を変数として、輸送過程で見られる粉体の表面パターンの相図を描き、粉体の動的挙動を高速度カメラ(科研費にて購入)で調べた。

4. 研究成果

(1)表面パターン

粉体に十分な振動を加えることで、容器斜面の麓にある粉体は斜面を登り、斜面上部に輸送される(図1)。

振動が小さいと、粉体は斜面を登ることなく、容器の底で、まったく動かないか、微小振動している。これは、固体状態とみなすことができる。振動を大きくしていくと、固体状態にあった粉体は斜面を登り始める。これは固体状態から相転移を起こし、液体状態もしくは気体状態になったとみなすことができる。

上部に輸送される過程で、粉体を作る表面パターンが観察される(図 1)。表面パターンは、以下の4つに分けられる。

クラスターパターン

粉体が個々の集団(クラスター)を形成し、斜面上部に輸送される。

縞パターン

地面に対して平行な粉体密度の粗密によって形成される規則正しい縞構造が観察される。その縞が上部に伝播することで粉体は輸送される。

バブルパターン

上部に輸送されている粉体の間を、あたかも水の沸騰で見られる気泡が上昇する。観察される気泡は粉体密度0の領域であり、粉体集団の間に欠陥が見られる。縞構造が崩壊する過程で見られる。

無秩序領域

粉体が一様に上部に輸送される。表面パターンは見られない。

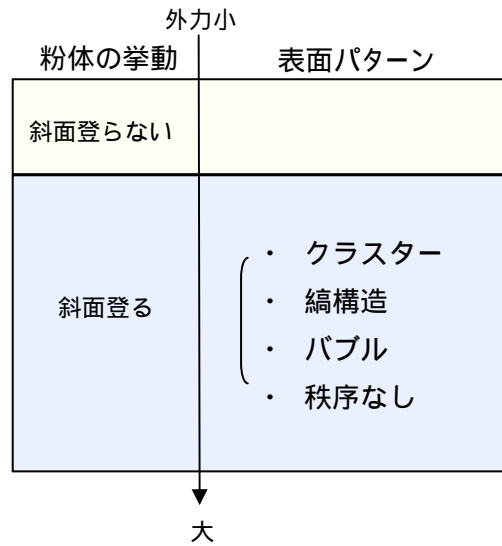


図 1

表面パターンは上記に示した4つに分けられるが、振動が加える外力を決定する物理量は斜面角度、振幅、振動の向きと複数ある。そこで、これらの物理量変化による粉体の挙動、表面パターンの変化について個々に調べた。その結果を以下に示す。

(2) 斜面角度依存性

振動数、振幅、振動の向きは固定した状態で、斜面の角度が 2° 、 5° 、 8° 、 11° で実験を行った。このとき、小さな角度では粉体が斜面上を登っている現象が観察される一方、大きな角度では斜面を登ることができない。

また、振幅を大きくすると、もっとも急な角度 11° でも斜面を登る。 11° で粉体が斜面を登る振動数、周波数に固定し、角度を変化させた。 11° では、クラスターパターンが形成されており、角度が小さい 8° では縞パターンが観察された。また、 5° ではバブルパターンが観察され、 2° では無秩序パターンが観察された。

(3) 振幅依存性

振幅を0 - 100まで変化させ、実験を行った。振幅が大きいと粉体は登るが、小さいと粉体はそこで微小振動しており、固体状態にある。

表面パターンは振幅を小さくしていくにつれ、表面パターンは

無秩序パターン

バブルパターン

クラスターパターン

縞構造

と変化した。

(4) 鉛直方向と水平方向の振幅比依存性

(2)(3)の実験で、振動は斜面に対して垂直に加えていた。(4)では鉛直方向と水平方向の両方に独立に振動をかけることができる実験装置を構成し、実験を行った。鉛直方向と水平方向の振動数、斜面角度を同値に固定し、振幅のみを変化させた。 $A = (\text{水平方向の振幅}) / (\text{鉛直方向の振幅})$ を変数として、表面パターンを調べた。

$A < 1/4$ のとき、粉体は斜面を登らず、 $A > 1/4$ で粉体は斜面を登り始める。

粉体が斜面を登る過程で観察される表面パターンについては以下のとおりである。

$A \sim 1/4$ のとき、縞パターンが観察される。 $A > 1/2$ では粉体はクラスターパターンが形成される。 $A > 2$ では無秩序パターンが観察された。

(5) まとめと今後の課題

振動実験による粉体の輸送現象を実験的に調べた。その結果、輸送現象は 斜面角度、 振幅、 振動の方向によって決定することがわかった。その際の表面パターン

が加えるエネルギーが大きくなるにつれ、
縞パターン クラスターパターン

バブルパターン 無秩序パターン

と変化することがわかった。また、鉛直方向の振動だけでなく、水平方向の振動は粉体が上方に登る上で重要な役割を果たしていることが分かった。

さらに、輸送中の粉体個々の振る舞いを高速度カメラ(科研費にて購入)にマクロレンズ(科研費にて購入)を接続し、観察した。その結果、粉同士の衝突による相互作用が縞パターンやクラスターパターンの形成にとって重要であることがわかった。

粉体は非平衡系での物理現象を再現する最も単純なモデルのひとつといわれていることから、本研究は粉体の相転移現象のみでなく、非平衡系一般における相転移現象の理解にも繋がることを期待される。

高速度カメラにより、粉体個々の振る舞いを調べ、粉体同士の相互作用が重要であることがわかった。現在、粉体同士の空間相関や速度揺らぎを調べるため、レーザーを用いた測定機材のセットアップを行っている。

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0件)

〔学会発表〕(計10件)

下川倫子, 松尾康光, 神嶋修, 羽取純子, 吉田幸彦, 池畑誠一郎, 超イオン伝導体 $\text{CsDS}_x\text{Se}_{1-x}\text{O}_4$ に関する転移温度の同位体効果, 日本物理学会, 新潟大学, 2011年3月27日

高見利也, 下川倫子, 藤崎弘士, 小林泰三, コーヒードロップレットの変形と分離のダイナミクス, 日本物理学会, 大阪府立大学, 2010年9月24日

下川倫子, レイリーテラー不安定性の条件下で観察される表面パターン, 日本物理学

会, 大阪府立大学, 2010年9月24日

Toshiya Takami, Michiko Shimokawa, Hiroshi Fujisaki, Taizo Kobayashi, Deformation and Separation Dynamics of a Coffee Droplet in Milk, Dynamics Days Asia Pacific 6, University of New South Wales, Sydney, Australia, (2010年7月).

下川倫子, レイリーテラー不安定性の中で見られる表面パターン, 「非線形・統計力学とその周辺」セミナー, 京都大学情報学研究所, 2010年2月19日

下川倫子, 牛乳の上にコーヒーが作るフラクタルパターン, 京大基研物性談話会, 京都大学基礎物理学研究所, 2009年12月2日

下川倫子, 二成分砂山に見られる新しい縞構造, 地形のダイナミクスとパターンとその境界領域, 九州大学応用力学研究所, 2009年11月25日

下川倫子, コーヒー滴がつくる消滅フラクタル, 数理研流体力学セミナー, 京都大学数理解析研究所, 2009年10月26日

下川倫子, 二成分流体の界面不安定性によるフラクタルパターン, 日本物理学会, 熊本大学, 2009年9月25日

下川倫子, 牛乳の上にコーヒーが描く新しいフラクタルパターン, 非線形力学セミナー, 大阪府立大学, 2009年6月16日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

下川 倫子 (Shimokawa Michiko)
摂南大学・理工学部・任期つき助教

研究者番号: 80554419

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし