

## 粉体の特異な結晶化挙動

1. 発表者： 田中 肇（東京大学 生産技術研究所 教授）

### 2. 発表のポイント：

- ◆上下に振動させられた球形粒子の 2 次元系において、粒子間衝突の際のエネルギーの散逸が、この粒子の結晶化挙動に多大な影響を与える事を発見した。
- ◆粒子間衝突の際のエネルギー散逸の度合いが、液体・固体転移に代表される相転移現象にどのような影響を与えるかについてはこれまで深い理解がされていなかったが、モデル系を用いて、その役割の重要性を明確な形で示した。
- ◆力学的に駆動された粉体や、自ら運動する粒子系において、どのような原理に従ってさまざまなパターンが形成されるのかは十分には理解されていない。熱平衡系には存在しない非弾性衝突にともなうエネルギー散逸がこれらの粉体や自己駆動粒子系の自己組織化に重要な影響を与えることを示し、その機構を提案した点で、意義は大きい。

### 3. 発表概要：

粉体は、砂粒のように熱揺動力による運動（ブラウン運動（注1））が無視できる巨視的な粉末状粒子の集合体の総称であり、我々に身近な粉体としては、砂粒、米粒、菓の粉、錠剤などが挙げられます。これらの粒子は外からエネルギーを注入することによって初めて運動することができます。このような粉体の集団としての挙動を理解することは、統計物理学に限らず、食品科学、薬品科学、地球科学、土木工学、天体物理などさまざまな分野で基礎・応用の両面で重要であると考えられています。

原子や分子からなる熱平衡系においては、粒子間の衝突は完全弾性衝突であり、衝突に際してエネルギーの散逸はありません。一方、粉体や生物からなる粒子が衝突した際には、跳ね返り係数（注2）は1以下であり、衝突の際にエネルギーが失われ散逸されます。この衝突の際の散逸の効果は、通常の熱平衡系には存在しないため、熱平衡系を扱う際には考慮する必要がありませんでした。そのため、その重要性は古くから認識されてきたものの、それが運動する粒子集団の自己組織化にどのような影響を与えるかについては、十分な物理的理解がされてきませんでした。東京大学生産技術研究所の田中肇教授、物理工学専攻修士課程の小松侑太大学院生の研究グループは、モデル系として、上下に振動する2枚の板に2次元的に閉じ込められた球形の粒子からなる球体粒子系において、粒子数密度を増加した際に見られる液体状態から固体状態への転移現象に着目して、散逸の効果について実験的な研究を行ないました。外から振動という形で球体粒子系にエネルギーを注入することで、球体粒子系の運動状態を維持し定常状態を実現することが可能となります。この定常状態が、粒子密度の上昇に伴い液体的な無秩序な状態から、結晶的な固体状態にどのように転移するかについて、エネルギー散逸の小さなスチール球と大きなゴム球の挙動を比較することで調べました。その結果、スチール球を用いた場合には、転移の挙動は、熱平衡系の場合とほとんど同じであり、密度の上昇に伴い液体から固体に2段階で連続的に転移することが明らかとなりました。一方、ゴム球を用いた場合には、転移は連続転移ではなく、強い不連続を示す一次転移となり、密度の上昇とともに、液

体相は、液体相と固体相の共存を経て（図参照）、一様な固体相に転移することを見出しました。このことは、外からエネルギーが注入されている状態で保たれる非平衡定常状態の選択に、エネルギー散逸が決定的に重要な影響を与える可能性を示しています。また、熱平衡系における共存においては二つの相の温度は同じですが、上記のゴム球の粒子系では、液体相の実効温度は高く、固体相の実効温度は低く、温度の異なる相が共存していることが明らかとなりました。研究グループは、これらの振る舞いを説明すべく、エネルギー注入下にある非平衡系における定常状態の選択についての新しい原理を提案しました。これらの結果は、粉体の集団運動や、生物に代表される自ら動き回る粒子系の自己組織化を理解する上で重要な知見を与えるものと期待されます。

#### 4. 発表内容：

粉体とは、砂に代表される熱揺動力による運動が無視できる巨視的な大きさの粉末状粒子の集合体の総称であり、非弾性衝突や表面摩擦によりエネルギーを散逸する点に大きな特徴があります。このような粉体系は外部から振動などの形でエネルギーを注入することにより持続的な運動を誘起することが可能です。粉体粒子同士の衝突によるエネルギー散逸が比較的小さい場合には、このような駆動粉体系は非熱系であるにもかかわらず、熱平衡系とほぼ同様の挙動を示すことが知られています。

例えば、跳ね返り係数がほとんど1とみなせるステンレス球を、高さが球の直径と同程度の擬二次元的容器に閉じ込め、加振器により高さ方向に正弦的な垂直振動をさせた状態においては、熱系と同様に、ステンレス球は閉じ込められた擬二次元平面内をブラウン粒子のように拡散運動することが知られています。

今回、このような擬二次元駆動粉体系において、エネルギー散逸の大きいゴム球を粉体粒子として使用し、その相挙動、ダイナミクスに関して研究を行いました。その結果、粉体粒子の面積分率変化による液体・固体転移について、スチール球がヘキサティック相（注3）を経由する連続転移的な挙動を示すのに対し、ゴム球を用いた場合には一次転移性が強くなり、液体相と固体相が共存する領域が存在することが明らかとなりました（図参照）。これは、散逸の存在により液体・固体転移が連続転移から不連続転移に変化した事を明確に示しています。

このことは、外からエネルギーが注入されている状態で保たれる非平衡定常状態の選択に、エネルギー散逸が決定的に重要な影響を与えることを示しています。また、熱平衡系における共存においては二つの相の温度は同じですが、上記のゴム球からなる粒子系では、直接粒子の運動を観察することにより、液体相の実効温度は高く、固体相の実効温度は低く、温度の異なる相が共存することが明らかとなりました。このことは、非平衡状態における状態選択の原理が、熱平衡系のそれとは本質的に異なり、散逸の効果を明示的に取り入れる必要性を強く示唆しています。そこで、同研究グループは、これらの振る舞いを物理的に説明すべく、エネルギー注入下にある非平衡系における定常状態の選択についての新しい原理を提案しました。

一般に、粉体や生物に代表される巨視的な大きさの粒子の衝突は、非弾性衝突や摩擦によるエネルギーの散逸を伴います。従って外部からの駆動により運動する粉体や生物に代表される自ら運動する粒子の集団が自己組織化する際には、通常の熱平衡系の自己組織化の原理とは異なる新たな原理に基づきその挙動を考える必要があります。本研究は、このような非平衡状態における粒子群の自己組織化の物理的な理解に大きな貢献をするものと期待されます。

#### 5. 発表雑誌：

雑誌名：Physical Review X

論文タイトル : Roles of energy dissipation in a liquid-solid transition of out-of-equilibrium systems

著者 : Yuta Komatsu, Hajime Tanaka\*

#### 6. 注意事項 :

日本時間 8 月 29 日 (土) 午前 10 時 ( (アメリカ) 時間 : 8 月 28 日 (金) 午後 9 時)以前の公表は禁じられています。

#### 7. 問い合わせ先 : 田中研究室

Tel: 03-5452-6125

Fax:03-5452-6126

e-mail: tanaka@iis.u-tokyo.ac.jp

#### 8. 用語解説 :

(注1) ブラウン運動 : 液体のような溶媒中に浮遊するコロイドや液滴が、溶媒分子から受ける熱揺動により不規則 (ランダム) に運動する現象。

(注2) 物体の衝突において、衝突前の互いに近づく速さに対する、衝突後の互いに遠ざかる速さの比のことである (衝突の前後での相対速度の大きさの比)。

(注3) ヘキサティック相 : 6 回対称の方向秩序は持つが、並進秩序を持たない 2 次元の円盤系でみられる液体と固体の中間に存在する相。

#### 9. 添付資料 :

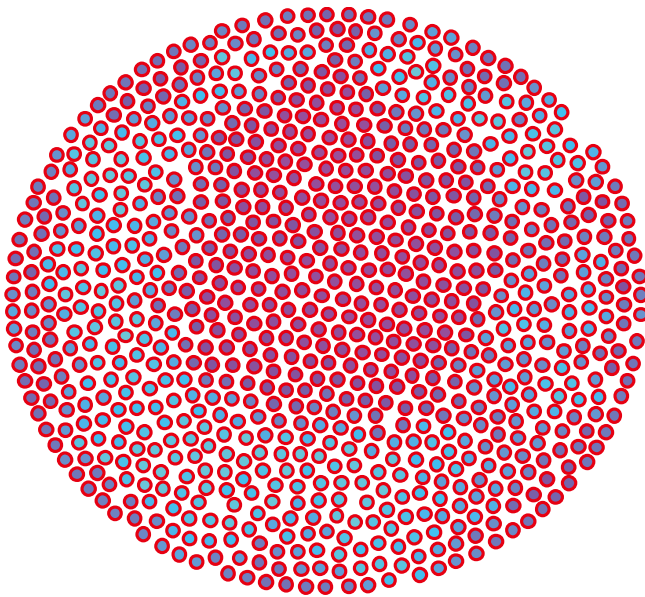


図 : ゴム球系における乱雑な構造を持つ液体相 (薄い色粒子) と 6 回対称の秩序を持つ結晶相 (濃い色の粒子) の共存状態 (面積分率=0.74、無次元化した加速度=3.0)。