

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 18 日現在

機関番号：32601
 研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2010～2011
 課題番号：22740260
 研究課題名（和文） ジャミング転移の理論的研究

研究課題名（英文） Theory for the jamming transition

研究代表者

大槻 道夫（OTSUKI MICHIO）
 青山学院大学・理工学部・助教
 研究者番号：30456751

研究成果の概要（和文）：粉、砂などの粉体は、低密度状態では流体的に振る舞う一方、高密度状態では固体的に振る舞う。この流体的、固体的な振る舞いの変化はジャミング転移と呼ばれる。粉体のジャミング転移の研究は、これまで粉体粒子間の摩擦を無視した理想的な状況についての解析が主に行われていた。しかし、実際の粉体ではそうした摩擦を無視できない。本研究課題では、そうした実際の一般的な状況でのジャミング転移が、どのような特性を持つのかを理論的に調べた。

研究成果の概要（英文）：Athermal disorderd materials such as granular materials behave like liquids when the density is small, while they behave like amorphous solids when the density exceeds a critical value. This transition for the rigidity is called jamming transition. The jamming transition was studied for ideal conditions. In this study, we investigate the jamming transition for general situations.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	700,000	210,000	910,000
2011 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,200,000	360,000	1,560,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・数理物理・物性基礎

キーワード：ジャミング、粉体

1. 研究開始当初の背景

粉、砂などの粉体は、低密度状態では流体的に振る舞う一方、高密度状態では固体的に振る舞う。例えば、粉体に弱い力（応力 S ）を加えると、低密度状態では剪断速度 $\dot{\gamma}$ で特徴づけられる流れが発生する一方、高密度状態では加えた力がある閾値（降伏応力）を超えるまでは全く流れない。この流体的⇔固体的な振る舞いの変化はジャミング転移と呼ばれる。ジャミング転移は粉体に限らず、コロ

イド分散系、泡、超伝導ボルテックスなどの高密度な物質一般で観測される。

様々な物質で発生するジャミング転移は、転移点近傍で応力、緩和時間などの物理量に臨界的に振る舞うため、ある種の臨界現象として考えられている。ただし、それは非平衡系で発生する非熱力学的な臨界現象であり、その発生機構や特性に関する完全な知見は得られていない。そのため、ジャミング転移は統計物理学の新たなフロンティアとして、

近年になって活発な研究が行われるようになってきている。実際、近年の日本物理学会のシンポジウム、基礎物理学研究所での滞在型国際研究会の主題の一つとしてジャミングが扱われている。海外でも American Physical Society の meeting でジャミング転移に関して2つのセッションが開かれ、Physical Review Letters などの雑誌でもジャミングの研究結果が常に掲載されている。

粒子間に接線方向の摩擦力が働かない、シンプルな粉体のモデル(frictionless 粉体モデル)において、通常の臨界現象で観測されるような臨界スケーリングが成立することが発見された。研究代表者は、現象論的な考察に基づき、このスケーリングに表れる全ての臨界指数とそれらの間のスケーリング則の導出に成功した。実際、粉体のシミュレーションで得られる、様々な密度での剪断応力 S と剪断速度 γ の関係が、その臨界指数を用いたスケーリングプロットによって記述される。また、得られた臨界指数は、系の次元に依存しない一方、粒子間相互作用の詳細に依存する。このような臨界指数の性質は、従来の臨界現象のものとは大きく異なる、ジャミング転移の大きな特徴となっている。これらの現象論からの予言は大規模シミュレーションによって検証されている。

2. 研究の目的

これまでの研究では、理想的な設定である frictionless 粉体モデルに対して現象論を用いることで、ジャミング転移に潜んでいた臨界スケーリングなどの美しい性質を明らかにしている。この理論的成果を基盤として、現象論の他の系への拡張や、より現実的な系におけるジャミング転移の影響の調査により、ジャミング転移一般の包括的な理解を目指す。

3. 研究の方法

ジャミング転移一般の包括的な理解のために、以下の3つの課題について理論的研究を行った。

(1) 粒子間摩擦のジャミング転移への影響

frictionless 粉体では粒子間の接線方向に摩擦力が働かない理想的な状況を想定していた。しかし、現実の粉体では、そうした粒子間摩擦の影響は無視できない。そこで、粒子間の接線方向の摩擦を取り入れた粉体のモデル (frictional 粉体モデル) のシミュレーションを行い、理想的な状況である frictionless 粉体で得られた理論的成果が、どのような影響を受けるのかを調べた。

(2) ジャミング転移とガラス転移の関係

ジャミング転移は、物質を構成する粒子に熱揺らぎが影響を及ぼさない非熱的な系で観測される現象である。だが、剛性と降伏応力の発生という点では、低温状態の高分子などで見られるガラス転移と類似している。先行研究では、熱的な系でのガラス転移点と、非熱的な系でのジャミング転移点が一致するという予想がなされていたが、その詳細は分かっていなかった。そこで、これらの二つの転移を両方示す系のシミュレーションを行い、これらの関係を調べてみた。

(3) マクロな現象への影響

ジャミング転移による降伏応力の発生はある種の静止摩擦の発生として捉えられる。こうした静止摩擦が、マクロな物体の運動にどのような影響を表すのかを、静止摩擦をもたぬ摩擦界面をもった弾性体の解析によって調べた。

4. 研究成果

上記の3つの課題に関して、以下のような研究成果を得た。

(1) 粒子間摩擦のジャミング転移への影響

粒子間摩擦のジャミング転移への影響を、シミュレーションを用いて調べ、摩擦の影響でジャミング転移点近傍の粉体の物性に顕著な履歴依存性が発生することが分かった。例えば、図1のように応力と剪断速度の関係をプロットすると、剪断速度を上げるときと下げるときで、その応力が大きく変化する。また、摩擦の影響で図2に示したように、frictionless 粉体の場合は一つであった転移点が、複数に分裂することが分かった。

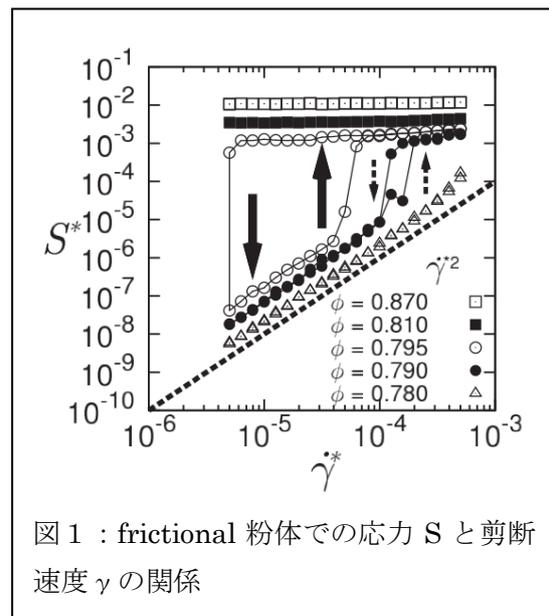
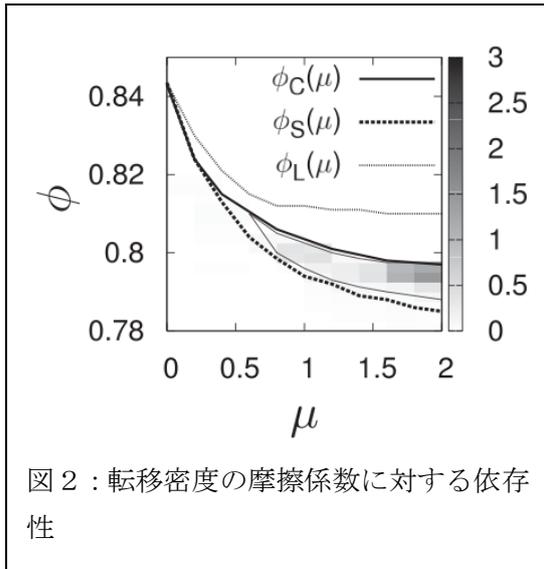
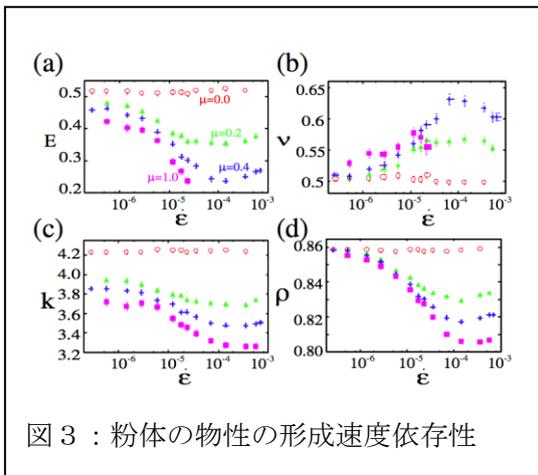


図1 : frictional 粉体での応力 S と剪断速度 γ の関係

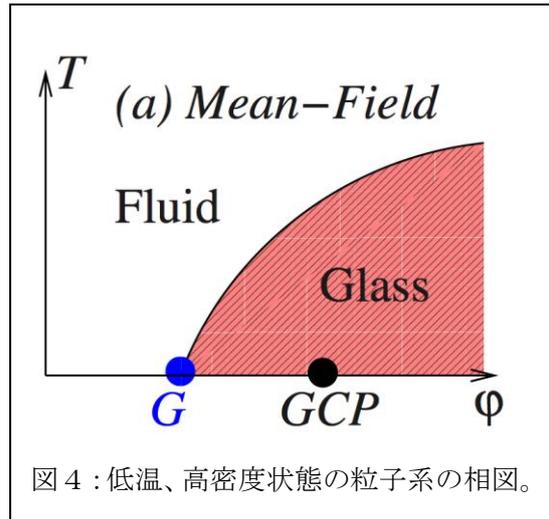


さらに、こうした frictional 粉体の物性が、その形成過程に依存して大きく変化することも発見した。実際、図 3 のように、粉体の弾性定数などの量に、粉体の形成速度依存性が現れる。

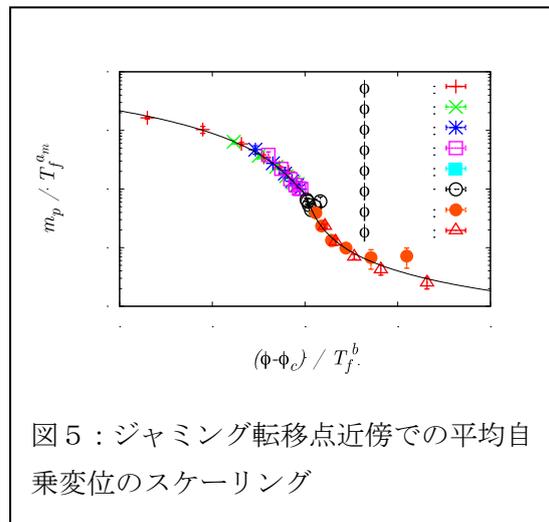


(2) ジャミング転移とガラス転移の関係

最近の研究で、ジャミング転移は物質の剛性の発生に関する転移で、ガラス転移は物質のダイナミクス（緩和時間の発散）に関する転移であり、それらの転移点異なることが報告されていた。例えば、低温高密度の粒子系相図は図 4 のように表され、ガラス転移点である G 点とジャミング転移点である GCP 点が異なる位置にある。

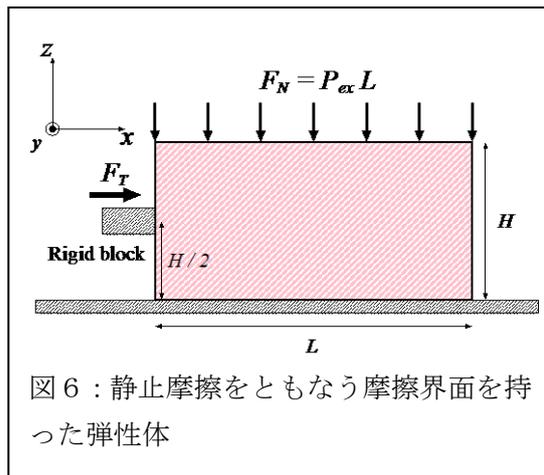


しかし、ジャミング転移点にも何らかのダイナミクスの特異性があるはずである。そこで、粒子の動く範囲を表す、平均自乗変位をしらべ、その値がジャミング転移点近傍で 0 になることをスケーリングによって示した（図 5）。このことは、ガラス転移が粒子の緩和時間に関する転移である一方、ジャミング転移が粒子の移動範囲に関する転移であることをあらわしている。また、そのスケーリングに現れる臨界指数を、frictionless 粉体の理論をさらに拡張することで決定した。

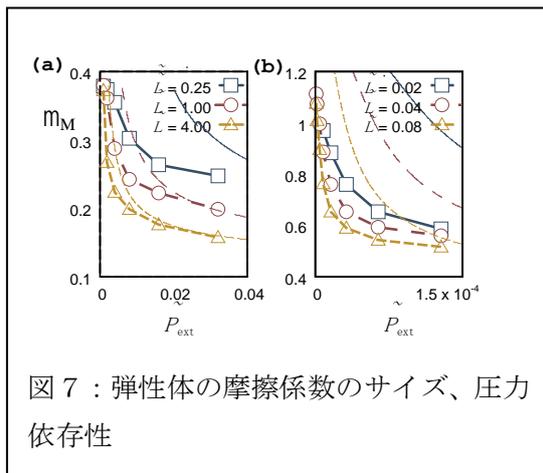


(3) マクロな現象への影響

図 6 に示したような静止摩擦をともなう摩擦界面をもった弾性体の解析によって調べた。特に、その摩擦面の安定性を調べ、界面の摩擦の影響で、図 7 に示したように、物体のマクロな静止摩擦係数が弾性体のサイズや圧力で大きく変化することを解析的に示した。



これらの一連の研究によって、これまで理想的な状況だけで調べられていたジャミング転移が、実際の系においてどのような影響を表すのかを知ることができた。ジャミング転移は日常的、工学的な状況でも見られる現象であり、一連の研究成果によって、ジャミング転移点近傍の物質のコントロールへの道筋が開かれると期待される。



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)

- (1) M. Otsuki and H. Hayakawa, Critical scaling near jamming transition for frictional particles, Phys. Rev. E, 査読あり, 842, 2011, 051301-1 ~ 051301-9, DOI:10.1103/PhysRevE.83.051301
- (2) S. Inagaki, M. Otsuki, and S-i. Sasa, Protocol dependence of mechanical properties in granular systems, Euro. Phys.

J. E, 査読あり, 34, 2011, 124-1 ~ 124-6, DOI: 10.1140/epje/i2011-11124-6

- (3) M. Otsuki and H. Hayakawa, Rheology of sheared granular particles near jamming transition, Prog. Theor. Phys. Supple. に掲載決定, 査読あり, <http://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~ptpwww/link-supplement.html>

[学会発表] (計9件)

- (1) 大槻道夫, 摩擦、破壊、地震, 日本物理学会 第67回年次大会 (招待講演), 2012年3月25日, 関西学院大学
- (2) 大槻道夫, 松川宏, 弾性体の滑り摩擦 -ミクロな滑りとマクロな摩擦-, 第31回表面科学学術講演会 (招待講演), 2011年12月15日, タワーホール船堀
- (3) M. Otsuki and H. Hayakawa, Critical behavior near jamming transition at finite temperature, French-Japanese meeting on Jamming, Glasses and Phase transitions, 2011年12月9日, Institute Henri Poincare in Paris
- (4) M. Otsuki, Critical scaling for the jamming transition of granular materials, Nonequilibrium Dynamics in Astrophysics and Material Science, 2011年11月2日, 京都大学
- (5) M. Otsuki and H. Matsukawa, Propagation of rupture fronts at the interface between sheared-elastomers, International Tribology Conference Hiroshima 2011, 2011年11月1日, 広島国際会議場
- (6) 大槻道夫, 早川尚男, 有限温度系のジャミング転移 臨界スケーリングと転移点の初期温度依存性, 日本物理学会 2011年秋季大会, 2011年9月24日, 富山大学
- (7) 大槻道夫, 松川宏, ミクロな滑りとマクロな摩擦, 日本物理学会 2011年秋季大会, 2011年9月23日, 富山大学
- (8) Michio Otsuki, Jamming transition for sheared frictional granular materials, Recent Progress in Dissipative Particles, 2010年11月24日, 京都大学
- (9) 大槻道夫, 早川久男, 粉体レオロジーの履歴依存性と臨界スケーリング, 日本物理学会, 2010年9月23日, 大阪府立大学

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
大槻 道夫 (OTSUKI MICHIO)
青山学院大学・理工学部・助教
研究者番号: 30456751