

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：15201

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2016

課題番号：25800220

研究課題名(和文) ジャミング転移の包括的理論

研究課題名(英文) Theory of jamming transition

研究代表者

大槻 道夫 (Michio, Otsuki)

島根大学・総合理工学研究科・講師

研究者番号：30456751

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：粉体、コロイド分散系、泡などの高密度粒子系で普遍的に観測されるジャミング転移の理解を目指し、その弾性的な応答、第一原理的な理論、関連した多様な現象の各論的な研究を推し進めた。特に弾性的な応答に関しては、粉体内部の微視的な構造を元に、その振る舞いを理解するスケーリング則を発見した。また、関連現象として、降伏応力を伴うジャミング転移点近傍のレオロジーと同じカテゴリーの挙動をする弾性体の静止摩擦力に関連して、その振る舞いを連続体モデルから解析する手法を開発し、その結果を実験的に確認した。

研究成果の概要(英文)：Jamming is observed in dense particle assemblies, such as granular materials, colloidal suspensions, foams. To understand the rheological behavior of materials near the transition point, we investigate the various systems related with the jamming transition. For elastic behaviors of jammed materials, we have found critical scaling laws describing the shear modulus near the transition point. We also proposed a theory on the friction law of elastomer, which predict the decrease of the friction coefficient with increasing pressure. The theory is confirmed by experiments.

研究分野：非平衡物理学

キーワード：ジャミング転移 摩擦 粉体 レオロジー

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、粉と液体を混ぜたペースト、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。

ジャミング転移は土砂崩れや、パイプで発生する目詰まり等に関連する現象であり、工業的な分野で取り扱われていた。しかし、転移点近傍での応力、緩和時間などの臨界的な振る舞いが発見されて以来、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、活発な研究が行われるようになってきている。実際、国際研究会、日本物理学会のシンポジウムや statphys2013 のサテライトでも主題として扱われている(申請者も招待講演者として参加)。また、応募者のジャミング転移の研究も評価され、日本物理学会の第7回若手奨励賞の受賞が決まっている(研究略歴参照)。海外でも Gordon conference や Aspen での滞在型研究会でもジャミングが主題となっており、Nature, PRL などの雑誌でも研究成果が常に掲載されている。

申請者は、降伏応力よりも大きな応力を加えた粉体の流動状態に着目し、その応力と剪断速度の間に表れる臨界的な性質を理論的に決定することに成功した。特に、臨界指数が粒子間相互作用を特徴づける指数に応じて大きく変化すること、粒子間の摩擦の大きさに応じて、連続転移から不連続転移に変化することを発見した。これは転移の性質が系の詳細に強く依存することを意味しており、通常の臨界現象で観測される臨界的な性質とは大きく異なる、ジャミング転移固有の性質である。こうした系の詳細による臨界性の変化は、最近の粉体の実験でも確認されている。

また、こうした粉体系の流動に関する特性を取り扱う一般的な枠組みとして、ガラス転移の理論で用いられているモード結合理論の粉体系への適用や、平衡系の線形応答理論の非平衡系への一般化も行い、非平衡系特有の現象であるジャミングの理論面での発展へ向けて進歩を重ねていた。

2. 研究の目的

ジャミング転移の理論的研究は、申請者の研究も含めて、ある種の理想的状況の臨界的性質に着目して発展してきたが、微視的な基礎付けという面でも、関連した多様な現象の解釈という面でも未だに不十分である。そこで、これまでの成果を基盤として、複数の観点から研究を押し進め、ジャミング転移一般の包括的理解を目指した。

3. 研究の方法

(1) ジャミング転移点近傍の物質の弾性的応答

ジャミング転移を起こす物質は流体、固体的な特性を併せ持つが、従来の研究では大きな変形を加えて発生させた流動状態を中心に調べられてきた。しかし、加えた変形が微小な場合、ジャミング転移点近傍の物質は固体として振る舞う。この弾性的な性質にも臨界的な性質が発生する上に、土砂崩れなどの現実的な関連問題では、こうした性質の理解が必要なのだが、それは流体的性質に比べて未だに貧弱である。そこで、流動状態に関して行った理論的研究の成果を、微小変形の弾性的応答に拡張することで、その臨界的性質の理論的理解を進める。

(2) ジャミング転移の第一原理的理論の構築

われわれは流動状態にある粉体のジャミング転移の臨界的性質を取り出すことに成功したが、臨界スケーリングの成立などの現象論的な仮定を用いており、理解は完全なものとは言えない。そこで、まずは流動状態の粉体に対象を絞り、粒子の運動を記述する微視的な方程式から、ジャミング転移の臨界性を記述する理論の構築を目指す。

(3) ジャミング転移に関連した多様な現象の解明

ジャミング転移には様々な関連現象が存在する。例えば、弾性体のブロックを基盤の上に乗せて荷重を加えて横方向にずらすように力を加える。力が小さい場合は、弾性体は動かないが、力がある最大静止摩擦力というしきい値を超えると急に有限の速度で動き出す。こうした静止摩擦の発生はジャミング転移に伴う降伏応力の発生と深く結びついており、その背後にあるメカニズムも類似した側面がある。こうしたジャミング転移の関連現象に関して、これまでの知見を適用することで相互の発展的な理解を目指す。

4. 研究成果

上記の3つの課題に対して、以下のような研究成果を得た。

(1) ジャミング転移点近傍の物質の弾性的応答

まず、摩擦のない粉体に対して周期的な剪断を加えることで、その剛性率 G を測定した。従来の研究では、剪断歪みが無限小で、歪みに対して応力が線形に応答する領域だけに限定して研究が進められてきた。しかし、ジャミング点移転近傍では、ごくわずかな歪みによって系全体の粒子間ネットワークは大規模な崩壊を見せる、こうしたネットワークの構造変化に対して、剛性率がどのように変化するかはこれまで知見がなかった。そこで、この研究では周期的な剪断の振幅を無限小から有限の大きさまで系統的に変化させることで、そうした構造変化由来の非線形等まで含めた臨界スケーリング則を発見するこ

とに成功した(図1)。この研究以後、非線形応答の研究は分野内で一つの潮流を作るようになっている。

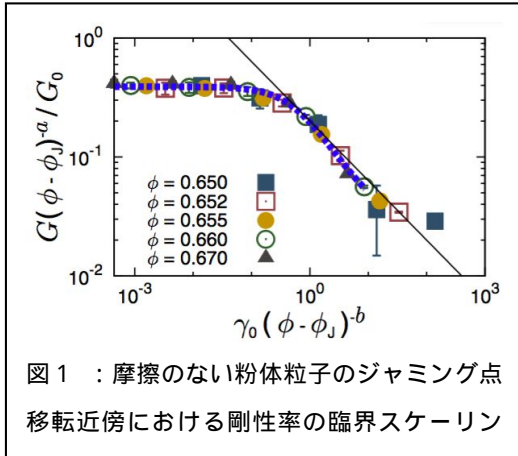


図1：摩擦のない粉体粒子のジャミング点移転近傍における剛性率の臨界スケーリング

ただし、実際の粉体においては粒子間摩擦を完全に取り除くことは不可能である。そうした摩擦粒子のレオロジーに関しては、現在に至ってもごく限られた情報しか得られていない。そこで、上記で研究した系の構成粒子をわずかな摩擦を持つ粉体粒子に変更し、同様の有限歪みにおける剛性率の解析を行った。その結果、従来は摩擦が十分小さい場合は連続的に変化すると思われていたジャミング点移転近傍における剛性率の変化が、不連続に発生することを発見した。これは、特に加えた剪断歪みが無限小の場合に発見される事項であるが、歪みの大きさに摩擦係数で決まる臨界値が存在し、その値を超えた歪みを加えると、不連続転移から連続転移へと前金的に移行することを発見した(図2)。さらに、そうした連続転移から不連続転移への変化を記述する臨界スケーリング則を発見した(図3)。

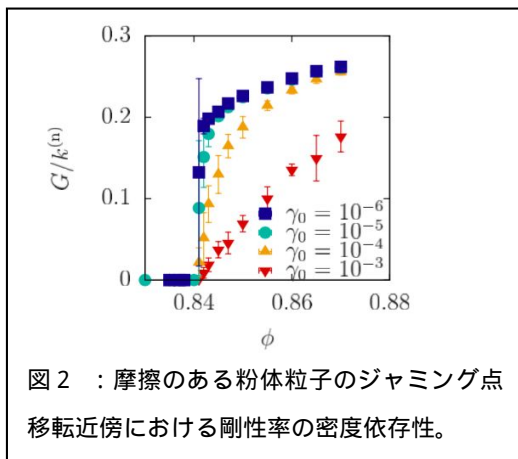


図2：摩擦のある粉体粒子のジャミング点移転近傍における剛性率の密度依存性。

(2) ジャミング転移の第一原理的理論の構築

一般の平衡状態に近い系においては、線形応答理論、あるいは非線形応答まで含んだ揺らぎと輸送係数を結びつける揺らぎの定理など、様々な理論的に正しい公式が存在し、それらを基礎として輸送係数を第一原理的に

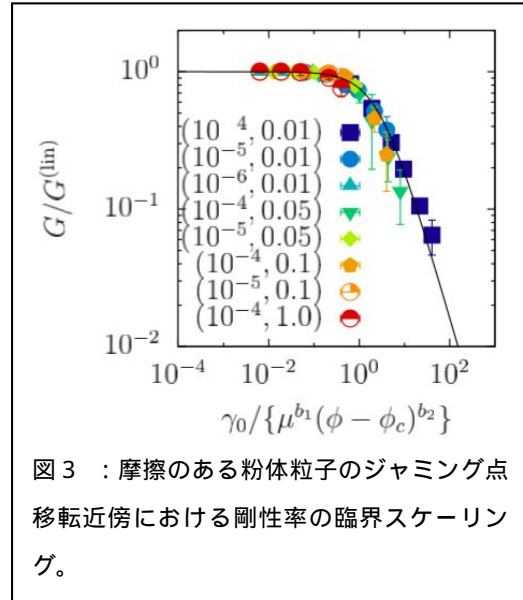


図3：摩擦のある粉体粒子のジャミング点移転近傍における剛性率の臨界スケーリング。

計算する試みがなされている。その典型的な例が、ジャミング転移に類似した現象として認識されているガラス転移のモード結合理論である。そうした系と比べて、粒子間の接触時におけるエネルギーの散逸が無視できない粉体系では、上記の基礎となる揺らぎの定理などをそのまま適用することは不可能である。そうした状況を踏まえて、ジャミング転移の第一原理的解析への足がかりとして、平衡近傍系の揺らぎの定理の粉体系への拡張を試みた。平衡近傍系のモデルにおいては、系の時間的に順方向の経路とその逆方向の経路の確率の比をとることで、揺らぎの定理を形式的に導くことができた。しかし、粉体系の場合には、粒子間散逸に起因した非エルミートの時間発展によって、逆方向の経路が任意には存在できないという問題が

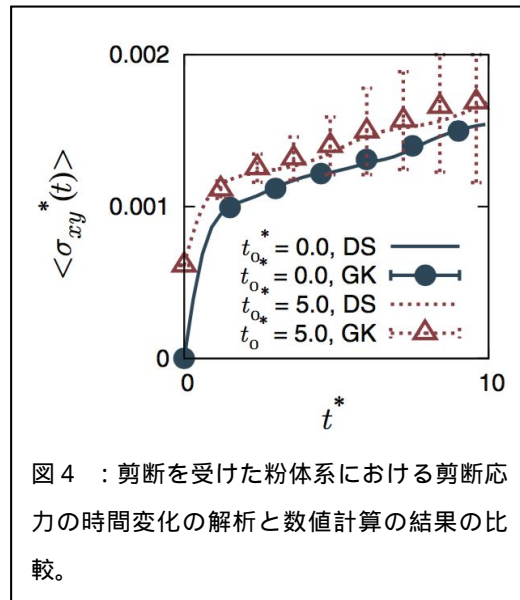


図4：剪断を受けた粉体系における剪断応力の時間変化の解析と数値計算の結果の比較。

発生する。そこで、我々は逆方向を許容するような仮想的なダイナミクスを仮定することで、形式的にはあるが対応する揺らぎの

定理と非線形応答理論を導出することに成功した。実際、この理論を分子動力学シミュレーションに適用して応力の時間発展を求めると、理論から第一原理的に求めた結果とシミュレーションの結果が完璧に一致する結果を得ることに成功した(図4)。

(3) ジャミング転移に関連した多様な現象の解明

ジャミング転移の関連現象として、弾性体の静止摩擦に関する理論解析と実験の比較を行った。従来の静止摩擦の理論においては、伝統的なアモントン則の帰結として、摩擦係数が弾性体の大きさや加えられた圧力に依存しないという結果が導かれる。ところが、近年の我々の研究によって、摩擦係数は圧力や系の大きさの減少関数となるという解析的な予言が得られた。この結果はシミュレーションによって確認されてはいるが、実験では傍証的な結果しかなかったため、その成否の実験による確認を行った。その結果、理論からの予言と一致した摩擦係数のべき的な現象が観測された(図5)。

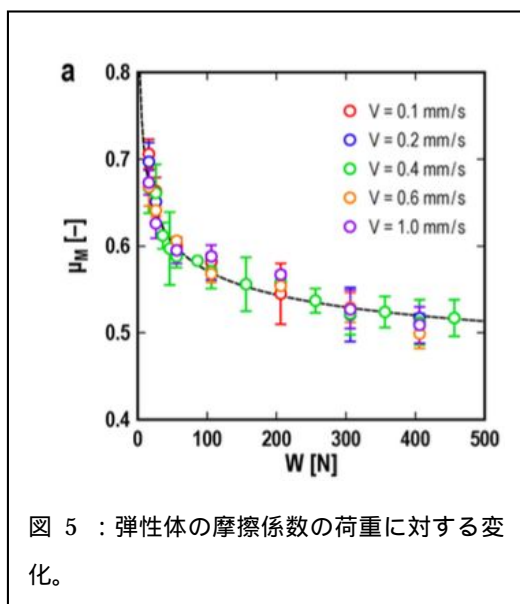


図5：弾性体の摩擦係数の荷重に対する変化。

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4件)

- (1) H. Hayakawa and M. Otsuki, Nonequilibrium identities and response theory for dissipative particles, Phys. Rev. E, 査読あり, 88, 2013, 32117-1 ~ 32117-9, DOI:10.1103/PhysRevE.88.032117
- (2) Y. Katano, K. Nakano, M. Otsuki, and H. Matsukawa, Scientific reports, 査読あり, 4, 2014, 6324, DOI:10.1038/srep06324
- (3) M. Otsuki and H. Hayakawa, Avalanche

contribution to shear modulus of granular materials, Phys. Rev. E, 査読あり, 90, 2014

- (4) M. Otsuki and H. Hayakawa, Discontinuous change of shear modulus for frictional jammed granular materials, Phys. Rev. E に掲載決定, 査読あり、

[学会発表](計21件)

- (1) M. Otsuki, Nonlinear viscoelastic properties of granular materials near jamming transitikno, physics of granular flows (招待講演), 2013年7月26日, 京都大学
- (2) M. Otsuki, Constitutive relations of jammed frictionless granular materials under oscillatory shear, Powders and grains, 2013年7月6日, Novotel Sydney brighton beach hotel
- (3) M. Otsuki, complex shear modulus of granular materials near jamming, physics in glassy and granular materials, 2013年8月18日, 京都大学
- (4) 大槻道夫, 高密度粉体の複素弾性率, 日本物理学会, 2013年9月26日, 徳島大学
- (5) 大槻道夫, stress avalancheによる泉南粉体の剛性率の異常性, 日本物理学会, 2014年3月28日, 東海大学
- (6) 大槻道夫, 高密度粉体のジャミング転移, 乱流研究のフロンティア(招待講演), 2014年7月23日, 京都大学
- (7) 大槻道夫, 粉体のジャミング転移の臨界的性質, 非線形数理モデルの諸相, 連続, 離散, 超離散, その先(招待講演), 2014年8月6日, 九州大学
- (8) M. Otsuki, Analytical calculation of macroscopic friction coefficient based on local precursor slip, Friction and Interface dynamics as nano and mesoscales (招待講演), 2014年10月27日, Tel Aviv University
- (9) M. Otsuki, Yield stress fluids from a viewpoint of statistical physics, Rheovolc 2014 (招待講演), 2014年12月1日, Shammonix
- (10) M. Otsuki, Workshop Rheovolc 2015 (招待講演), 2015年6月10日, 函館渚亭
- (11) M. Otsuki, H. Hayakawa, Nonlinear shear modulus of jammed granular materials: contribution of avalanches, ESMC 2015, 2015年7月6日, Carlos III Univ.
- (12) 金本孝太, 大槻道夫, 高密度剪断粉体系における乱流の臨界スケーリング, 鳥取非線形研究会 2015, 2015年12

- 月15日、鳥取大学
- (13) 稲田和久、大槻道夫、非球形粉体のジャミング転移、鳥取非線形研究会2015、2015年12月15日、鳥取大学
 - (14) M. Otsuki, H. Hayakawa, Avalanche contribution to shear modulus of granular materials near jamming, 国際雪・雪崩シンポジウム in ニセコ(招待講演) 2015年12月9日、ニセコ甘露の森
 - (15) 大槻道夫、早川尚男、3次元摩擦粒子のジャミング転移、日本物理学会、2016年3月19日、東北学院大学
 - (16) M. Otsuki, H. Hayakawa, Shear modulus of jammed frictional grains, ICR2016, 2016年8月10日、京都テルサ
 - (17) M. Otsuki, H. Hayakawa, Nonlinear shear modulus of jammed granular materials: effect of friction, Packing: across length scale, 2016年8月29日, Regal shanghai east asia hotel
 - (18) 大槻道夫、早川尚男、摩擦粒子の剛性率の連続・不連続転移、日本物理学会、2016年9月15日、金沢大学
 - (19) 大槻道夫、粉体の剛性率：粒子間摩擦と雪崩の影響、生命動体とその数理(招待講演) 2017年2月20日、松江エクセルホテル東急
 - (20) M. Otsuki, H. Hayakawa, Shear modulus of jammed matter: effect of avalanches and friction, Non-Gaussian fluctuation and rheology in jammed matter, 2017年3月10日、京都大学
 - (21) 大槻道夫、早川尚男、摩擦のある粉体粒子系における剛性率：なだれの影響、日本物理学会、2017年3月17日、大阪大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大槻道夫 (OTSUKI MICHIO)

島根大学・総合理工学研究科・講師

研究者番号：30456751