

機関番号： 12601
 研究種目： 若手研究 (B)
 研究期間： 2009年～2010年
 課題番号： 21740286
 研究課題名 (和文) ジャミング・ガラス転移における協同運動と非線形レオロジーの解析
 研究課題名 (英文) Nonlinear rheology and the cooperative motion of particles at jamming/glass transitions
 研究代表者
 波多野 恭弘 (Takahiro Hatano)
 東京大学・地震研究所・特任助教
 研究者番号： 20360414

研究成果の概要 (和文)：

ジャミング転移は粉体の流動・固化を記述する相転移的概念である。ランダムな構造が凍結され剛性が発現するという意味でガラス転移との関係が示唆されているが、そもそも動的性質を含めた現象論自体よく分かっていない。そこで本研究では高密度粉体の大規模な粒子シミュレーションによって、ジャミング転移の動的側面、とくに粒子の協同運動の発達と緩和時間の増大について定量化を行い、さまざまな物理量の指数発散を同定した。

研究成果の概要 (英文)：

Jamming transition is a rigidity transition of athermal particles, which closely resembles critical phenomena. However, there is no spontaneous symmetry-breaking and the random structure is frozen upon the transition. In this sense, it is believed that jamming transition is closely related glass transitions, although the quantitative correspondence is not clear so far. We perform a numerical simulation to clarify the nature of growing correlation in the particle motion at jamming transition. We identify power-law divergences of the correlation length and time and estimate the critical exponent.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,800,000	840,000	3,640,000

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： 粉体・レオロジー・ジャミング転移・動的不均一・ガラス転移

1. 研究開始当初の背景

「粉体」とは、直径が数十マイクロメートル程度より大きく、熱揺らぎがその重心運動に影響を及ぼさないようなマクロ粒子多体系を指す。具体的には砂や米粒などを想起されればよい。砂時計や精米機を例に挙げるまでも

なく、これら粒子の集合体は流体として流れることができる。その一方、我々は砂浜の上に安定して立つことができるし、砂山は一定の傾斜角以下では流れ出さない。つまり粉体は固体的に振舞うことも出来る。では、粉体の固化・流動化を相転移として記述すること

が出来るのだろうか？結晶化・融解のような熱力学的相転移と比較してどのような点が同じ/異なるのだろうか？この素朴な問いは、統計物理的重要性のみならず固体地球科学上の重要性も兼ね備えている。たとえば地滑りや土石流などはまさに「粉体の流動」であり、その災害予測は「粉体がいつ流れ始めどのように停止するか」という問題に帰着される。このような現実の問題にも粉体の流動・固化を記述する基礎法則、とくにレオロジー（せん断率とせん断応力の関係）が必要とされているのである。

この問題に対する突破口が開かれたのはごく近年のことである。無重力下でランダムに配置されたマクロ粒子系を考えよう。重心運動に熱揺らぎは効かないので温度は常にゼロであり、密度が唯一の変数である。この系において、常に同じ閾値密度で剛性が出現する、すなわち固化することが発見された(O'Hern et al. Phys Rev. E 2003)。この固・液転移に似た現象は現在「ジャミング転移」と呼ばれている。通常の熱力学的相転移とジャミング転移の本質的違いは対称性の破れを伴わない（固・液どちらの相でも粒子配置はランダム）という点である。したがって固・液転移よりはむしろランダムな構造の凍結であるガラス転移との密接な関係が示唆される。ガラス転移とは過冷却液体の構造緩和時間（あるいは粘性率）が低温側で劇的に増大し測定不可能になる現象である。その増大の背後に何らかの相転移が存在するか？という問いは統計物理における重大な難問であるが、ジャミング転移はその回答を与える可能性がある。しかし、ジャミング転移が具体的にどのような相転移であるのか、オーダーパラメータの正しい設定も含めてまだ分かっていない。現時点で分かっている重要な事実は、

空間相関長と緩和時間が転移点で発散するらしいということであり(Lechenault et al., Europhys. Lett. 2008; Hatano, arXiv0804.0477)、ジャミング転移点は臨界点であることが信じられている。ただし臨界現象において重要な量である臨界指数の評価は、本申請者による予備的研究を含めて世界的に見てもまだ端緒についたばかりであり、系統的かつ定量的な評価が待たれている。

他方、ジャミング転移と通常の臨界現象には重要な違いがある。臨界揺らぎは静的な量には一切現れず、純粋に動的な量（たとえばある一定時間内の粒子の移動距離）にのみ現れるという点である。重要なことに、この純粋に動的な臨界揺らぎは過冷却液体においても全く同じものが観察されている。この事実はガラス転移とジャミング転移の密接な関係を更に疑いの無いものとしているが、両者の定量的な比較はこれまでほとんど無い。動的臨界指数がガラス転移とジャミング転移で一致するという結果が本申請者によって得られているのみであり(Hatano, arXiv0807.3678)、他の臨界指数に関しても今後更なる定量的比較が急がれる。他方、これらの動的臨界揺らぎの背後には協動的な粒子運動があるはずであるが、その運動論的機構についてもほとんど何も分かっていないのが現状である。

外部から流動をかけた粉体系においても、ジャミング転移は「降伏応力の出現」という形でレオロジーに本質的影響を及ぼす(Hatano et al., J. Phys. Soc. Jpn. 2007)。とくに、臨界現象に特有のスケールング則が成り立ち、ジャミング転移点近傍において粉体レオロジーは実質的に一変数で記述されることが本申請者の研究により明らかとなっている(Hatano, arXiv0803.2296)。

このことは、臨界点近傍においては発散する相関長が系の唯一の長さスケールとなって物理量を支配していることを意味する。とくに臨界点直上ではせん断応力 S が相関長 ξ について非自明なスケーリング $S \propto \xi^\alpha$ (指数 α は約 2.6) を示すことが発見されている (Hatano, arXiv0804.0477)。しかし、具体的にどのような協同運動がこのような非整数次元依存性を生み出すのか、その物理的機構はまだ解明できていない。

2. 研究の目的

以上の事実をふまえ、本研究ではガラス転移まで含めたより広い文脈におけるジャミング臨界点の影響を解明する。そのために、密度・温度・せん断応力を状態変数とする三変数の状態空間を考え、粉体と有限温度の粒子系を同等に扱う。粉体系は絶対零度平面上に表され、ジャミング臨界点はこの平面上のある密度に位置している。せん断応力の軸方向に動くことはレオロジーを調べることを意味し、ガラス転移は $T > 0$ から $T = 0$ へ向けて降りてくる経路として表される。このように三変数の状態空間を設定することにより、粉体とガラスの動力学をジャミング転移の観点から統一的に調べることが可能になる。とくに、各変数に対する相関長と緩和時間の発散、ならびに動的臨界揺らぎを示す協同運動機構について、分子動力学シミュレーションにより系統的な調査を行う。より具体的には以下の項目を目標とする。

- ・各種の臨界指数を数値的に評価し、ジャミング臨界点の素性 (あるいはユニバーサリティクラス) を明らかにする。
- ・動的な臨界揺らぎの起源である粒子の協同的再配置を運動論的視点から解明する。

3. 研究の方法

斥力相互作用だけを持つシンプルな粒子モデルを用いて、粉体と過冷却液体を同時に扱い、それぞれにおける動的な臨界揺らぎの特性をジャミング転移の観点から統一的に調査する。とくに臨界指数、動的臨界揺らぎの運動論的機構、および応力などの平均的な測定量に及ぼす影響に焦点を当てる。具体的な課題は以下2点にまとめられる。

課題1 「臨界指数の評価」 分子動力学シミュレーションにより各種の臨界指数を数値的に評価し、ガラス転移への影響まで含めたジャミング臨界点の正体を明らかにする。変数は、温度、密度、せん断率である。それぞれ三つの変数に対して、相関距離と緩和時間がどのように増大するか、系統的な解析を行う。

課題2 「協同運動の機構解明」 ジャミング転移における動的な臨界揺らぎの起源である、粒子の協同的再配置の運動論的機構を解明する。予備的な3次元シミュレーションでは、大変位を示す粒子が大小多数のクラスターを形成し臨界揺らぎの様相を呈することが確認されている。これらクラスター内部で実際どのような運動形式が卓越しているのかについて詳細な解析を行い、協同運動の機構について分子運動論的な知見を得る必要がある。そのために以下2つの手法を用いる。

A. 三次元可視化による直接観察: 大型ディスプレイに粒子運動を可視化して解析する。

B. レオロジーにおける有限サイズ効果の解析: 系のサイズが相関距離より小さくなると、粒子の協同的再配置がうまくいかなくなり、レオロジーが定性的に変化することが予備的なシミュレーションにより明ら

かになっている。具体的には、応力の時間揺らぎが非常に大きくなり、「応力蓄積→解放」という間欠的なサイクルを示すようになる。この有限サイズ効果は粒子の協同運動の有無が本質であるため、小さい系の運動論と大きい系の運動論を比較して解析することにより、協同運動の運動論的特徴を浮き彫りにすることができると思う。

4. 研究成果

まず我々は流体的相における応力緩和過程のシミュレーションを行った。流体的相においては系に特徴的な緩和時間が存在し、物理量の時間発展に関して単一の緩和時間によるスケーリングが成り立つことを発見した。その緩和時間は粒子密度に対してべき的な発散を示す。我々は大規模かつ系統的なシミュレーションにより、緩和時間の発散を記述する指数を評価した。この指数は高密度サスペンションの粘性率増大に関係するためとくに重要な指数であるが、これまで系統的な方法で調べられていなかった。実際ここで得られた指数の値をもとに、レオロジーデータを系統的に整理することが可能になる。さらに我々は3次元系の緩和時間のみならず、2次元系の緩和過程も調べることにより、その緩和時間の発散指数を同定した。その結果は3次元で約3.3、2次元で約2.2であり、有意な次元依存性が存在することも示した。

次に、緩和過程における粒子の協同運動を定量化した。相関関数を定義し、緩和過程における粒子運動の相関を定量化した。その結果、相関距離は転移点にむけて発散し、その発散を記述する指数が従来2次元系について知られていた値と同じであることを発見した。この次元に依存しない相関長の発散指数は従来の臨界現象と一線を画

すものであり、ジャミング転移の特異性を示すものである。しかしこの次元依存性を理解することは未だ出来ておらず、将来の課題として残っている。

これらの結果から、ジャミング転移の動的臨界指数を同定することができる。結果は、3次元で約4.5、2次元で約3.2であり、次元依存性を持っている。ここでとくにガラス転移との関係が強調される。というのは、3次元での動的臨界指数はモデル過冷却液体のシミュレーション結果とほとんど同じなのである。ただし過冷却液体の緩和時間は温度履歴などの詳細や、低温にいくにつれ指数があがるように見えるなどの不確定要素があり、この臨界指数の見かけの一致に関しては今後のさらなる大規模シミュレーションを待つ必要がある。

また、平成20年度に本研究自身によって確かめられた定常状態レオロジーを支配する臨界現象的スケーリング則のより系統的なシミュレーションを行い、スケーリング指数をより高精度に求めた。これらの指数に関する結果はあくまで数値的な評価にすぎないが、来るべき3次元粒子系の理論を試すためのデータベースとして役立つことが期待される。

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4件)

1. Takahiro Hatano, “Constitutive law of dense granular matter”, J. Phys. Conf. Ser. vol. 258, 012006 (2010).

2. Takahiro Hatano, “Critical scaling of granular rheology”, Prog. Theor. Phys. Suppl. 184, 143 (2010).

3. Takahiro Hatano, “Critical slip distance in granular layers”, *Geophys. Res. Lett.* 36, L18304 (2009).

4. Takahiro Hatano, “Growing length and time scales in a suspension of athermal particles”, *Phys. Rev. E* 79, 050301(R) (2009).

[学会発表] (計 34 件)

1. Takahiro Hatano, Granular rheology and Cooperative motion of grains, *Frontiers in Nonequilibrium Physics: Fundamental Theory, Glassy & Granular Materials, and Computational Physics* (京都市、2009 年 7 月 24 日、招待講演)

2. Takahiro Hatano, Granular friction and microearthquakes, World Tribology Congress 2009 (京都市、2009 年 9 月 11 日、招待講演)

3. 波多野恭弘「粉体レオロジーと動的不均一性」(古典および量子ダイナミクス・非平衡統計力学に関するワークショップ、東京都文京区、2010 年 2 月 13 日、招待講演)

4. 波多野恭弘「粉体物理・砂礫流動」第二回微小重力地質学研究会(2010 年 3 月 25 日、相模原市、招待講演)

5. Takahiro Hatano, Granular friction: constitutive law and slip weakening mechanism, European Geoscience Union General Assembly 2009 (ウィーン、オーストリア、2009 年 4 月 24 日)

6. 波多野恭弘「粉体の摩擦法則：離散要素シミュレーションによる高速領域における臨界すべり量」日本地球惑星科学連合大会 (千葉市、2009 年 5 月 18 日)

7. 波多野恭弘「断層レオロジーと地震のスケーリング」日本流体力学会年会 (東京都

文京区、2009 年 9 月 3 日)

8. 桑野修、安藤亮介、波多野恭弘「粉体層の動摩擦に関する実験：摩擦係数の速度依存性を中心に」日本物理学会秋季大会 (熊本市、2009 年 9 月 25 日)

9. 波多野恭弘「フラクタル粒子系のジャミング：応力鎖と剛性」日本物理学会秋季大会 (熊本市、2009 年 9 月 26 日)

10. 波多野恭弘「粉体層における臨界すべり長のスケーリング」日本地震学会秋季大会 (京都市、10 月 23 日)

11. 波多野恭弘「粉体せん断流における速度揺らぎの空間構造とレオロジー」九州大学応用力学研究所共同利用研究会(春日市、2009 年 11 月 13 日)

12. 波多野恭弘「粉体の摩擦法則と地震破壊のダイナミクス」愛知教育大学シンポジウム・摩擦の科学 (名古屋市、2009 年 12 月 4 日)

13. Takahiro Hatano, “Scaling of the critical slip distance in granular layers”, AGU Fall Meeting (サンフランシスコ、アメリカ合衆国、2009 年 12 月 17 日)

14. 波多野恭弘 「粉体の静止構造に埋まった空間構造」日本物理学会年次大会 (岡山市、2010 年 3 月 22 日)

15. Takahiro Hatano 「On some time scales in athermal particulate systems」*Dynamics of Glass and Jamming Transitions* (プサン市、韓国、2010 年 9 月 8 日、招待講演)

16. Takahiro Hatano 「Frictional properties of fractal granular matter」*International Conference on Science of Friction 2010* (志摩市、2010 年 9 月 17 日、招待講演)

17. Takahiro Hatano 「Some statistical properties of granular avalanche」*Recent Progress in Physics of Dissipative Particles* (京都市、2010 年 11 月 24 日、招待講演)

18. Takahiro Hatano, *12th symposium on Continuum Models and Discrete Systems* (コルカタ、インド、2011年2月21-25日、招待講演)
19. Takahiro Hatano, 「A simple model for fractalization of fault gouge」, European Geoscience Union General Assembly 2010 (ウィーン、オーストリア、2010年5月3日)
20. 波多野恭弘 「ガウジのフラクタル化に関する簡単な理論」 地球惑星科学連合大会 (千葉市、2010年5月25日)
21. Takahiro Hatano 「Seismicity in athermal particulate systems under shear」 Deformation, flow, and rupture of soft matter, (リヨン、フランス、2010年7月9日)
22. Takahiro Hatano 「Avalanche statistics in slowly sheared granular matter」 Physics of Fracture and Related Problems (東京文京区、2010年7月23日)
23. Takahiro Hatano 「Cooperativity in dense granular flow: structure and rheology」 Pacific Rim Conference on Rheology (札幌市、2010年8月5日)
24. Takahiro Hatano 「Cooperative motion in sheared granular matter」 ISSP international workshop on soft matter physics: structural rheology (柏市、2010年8月11日)
25. Takahiro Hatano 「A constitutive law for granular friction」 The 18th European Conference on Fracture (ドレスデン、ドイツ、2010年8月30日)
26. Takahiro Hatano 「Comminution of granular matter: scaling and rheology」 2nd Debrecen Workshop on Statistical Physics of Fracture and other Complex Systems (デブレツェン、ハンガリー、2010年9月13日)
27. 波多野恭弘 「摩擦による粉砕に関する簡単な理論」 日本物理学会 2010年秋季

- 大会 (堺市、2010年9月24日)
28. 波多野恭弘 「せん断変形を受ける非弾性粒子系におけるクラックリングノイズ」日本物理学会 2010年秋季大会 (堺市、2010年9月24日)
29. Takahiro Hatano 「Constitutive law of granular matter: numerical and physical experiments」 the 7th ACES international workshop (小樽市、2010年10月7日)
30. T. Hatano, C. Narteau, P. Shebalin 「the b and c values are decreasing functions of shear stress: a model study」 日本地震学会 (広島市、2010年10月27日)
31. T. Hatano, C. Narteau, P. Shebalin 「Avalanche statistics of athermal particulate systems under shear」 in Precursors of Tribological Instabilities and Earthquakes Prediction (ベルリン、ドイツ、2010年11月2日)
32. 波多野恭弘 「マクロ粒子系の流れにおける動的不均一性のダイナミクス」 非平衡系の物理 (京都市、11月18-20日)
33. Takahiro Hatano, “Derivation of Rate-State Friction Law”, in Physics of Fracture and Related Problems II, (東京都文京区, 18 Jan. 2012)
34. 桑野修、波多野恭弘、「岩石の高速摩擦特性に関する実験」 日本物理学会第66回年次大会 (新潟市、3月27日)

[その他]
ホームページ等
<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/hatano/jamming.html>

6. 研究組織
(1) 研究代表者
波多野恭弘 (Takahiro Hatano)

研究者番号: 20360414