

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 29 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23654134

研究課題名(和文)粘弾性衝突の動的可視化と波動伝播

研究課題名(英文)Dynamic visualization and wave propagation by viscoelastic impact

研究代表者

桂木 洋光(Katsuragi, Hiroaki)

名古屋大学・環境学研究科・准教授

研究者番号：30346853

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円、(間接経費) 810,000円

研究成果の概要(和文)：寒天ゲルや粉体などのソフトマター材料のレオロジー特性を明らかにすべく、高速および低速の衝突実験を行った。寒天ゲルについては、鉄球を高速で衝突させ、その応答から粘弾性特性を推定する手法を開発した。開発した手法には様々な限界もあるが、画像解析により粘弾性特性を推定する技術を確立した。また、粉体については、鉄球の低速衝突実験を行い、その際に粒子のスリップや再配置により放出されるAE(Acoustic emission)イベントを計測した。得られたデータより、粉体のスリップや再配置イベントの統計がべき分布に従うことが分かり、その特性は地震等の天然現象と比較された。

研究成果の概要(英文)：High-speed and low-speed impact experiments were performed to study the rheological properties of various soft matters such as agar gel and granular matter. For agar gel, a steel ball was dropped to it. We developed a way to estimate the viscoelastic properties from the image analysis of the agar gel response to the impact. While the developed method has several limitations in it, we can estimate the rheological properties by using the developed method. For granular matter, we carried out the low-speed impact (penetration) experiments. During the penetration, AE (Acoustic emission) signals were measured. By the AE method, the individual slip or rearrangement of grains network can be detected. We found that the AE events distribution obeys power law. The power law exponent was compared with the Earthquake distribution.

研究分野：数理物理・物性基礎

科研費の分科・細目：非平衡・非線形物理学

キーワード：粘弾性体 衝突 画像解析 動力学 波動伝播

1. 研究開始当初の背景

衝突による変形・破壊・凝集・跳ね返りなどの素過程は、地球惑星科学や土木・防災工学、安全設計工学などの諸分野において極めて重要であり、我々の日常生活においても、陶器の落下による破損やおもちゃのスーパーボールのバウンドなど、比較的身近に観察することが出来る。しかし、衝突現象が瞬時に起こるため、従来その直接観測はそれほど容易ではなかった。このような背景の中で我々はこれまで衝突や爆発による破壊の結果（破片のサイズ分布則）からその物理過程を類推する研究を行ってきたが[1]、これらの研究には限界があった。

近年の高速度カメラの性能向上は目覚ましく、衝突現象の高精度・高時間分解能での直接観測も可能となってきている。そこで我々は近年高速度カメラを用いて粉体と固体弾の衝突[2]および粉体と水滴との衝突現象[3]について実験的研究を実施してきた。これらは主にインパクト（弾丸）の挙動（動き）や変形に注目したものであり、ターゲットの変形や応力状態に主眼を置いた研究はこれまであまり十分に行われてこなかった。以上の背景を鑑み本研究では、高分子ゲルや粉体などの粘複雑なレオロジー特性を持つ物質をターゲット物質として用い衝突実験を行い、ターゲットの内部ひずみ、応力の状態を可視化して計測し、ソフトマター衝突物理の解明に取り組むこととした。また、ターゲット内での波動伝播の様子についても定量化を行い、衝突抵抗力、ターゲットの変形、波動伝播を組み合わせて総合的にソフトマターの衝突特性に迫ることを目標にする。このような、ソフトマター・ターゲットの衝突による力学的特徴付けは、これまであまり行われてこなかった研究トピックである。

【参考文献】

- [1] H. Katsuragi, D. Sugino, H. Honjo, *Phys. Rev. E*, **68**, 046105 (2003); H. Katsuragi, S. Ihara, H. Honjo, *Phys. Rev. Lett.*, **95**, 095503 (2005).
 [2] H. Katsuragi and D. J. Durian, *Nature Phys.*, **3**, 420 (2007); E. L. Nelson, H. Katsuragi, P. Mayer, and D. J. Durian, *Phys. Rev. Lett.*, **101**, 068001 (2008).
 [3] H. Katsuragi, *Phys. Rev. Lett.*, **104**, 218001 (2010).

2. 研究の目的

高分子ゲルや粉体などの複雑なレオロジー特性を持つターゲット物質に固体弾を衝突させた際の衝突状態を高速度カメラにより撮影し、ひずみや応力状態等を可能な限り可視化する。得られた画像データの解析より、ターゲットの粘弾性特性を計測する新たな手法の開発を行う。

また、ターゲット物質に低速で固体弾を押し

込んだ場合に発生する波動についても計測し、その波動の伝播則特性についても定量的に明らかにする。得られた実験結果から複雑なレオロジー特性を示す物質中の波動伝播の特徴や減衰の様子等を明らかにする。

これらの基礎的な衝突実験（もしくは低速押し込み実験）による衝突素過程の物理解明は基礎物理のみならず様々な応用フィールドでも重要となる。例えば本研究により粘弾性体の衝突応答則を系統的に明らかにすることは、粘弾性体の力学特性を知る新たな試験計測方法を確立することともみなせ、本実験は材料試験法の技術開発としての意義も深い。

最後に、粉体層の容器壁への繰り返し衝突により誘起される粉体対流現象の特徴付けにも取り組み、その基礎物理特性を明らかにする。これは当初の研究計画にはなかった項目であるが、研究を進める上でその重要性に気付き付加的に実施したトピックである。

以上の研究により、ゲルや粉体といった複雑なレオロジー特性を示す材料の衝突物理を総合的に明らかにする。

3. 研究の方法

上記の研究目的を遂行するために、(1)寒天ゲル材料へ固体弾の衝突実験、(2)粉体層への固体球の低速押し込みによるアコースティック・エミッション計測、および(3)粉体振動層で発生する粉体対流の特徴付けの三種類の実験を行った。それぞれの具体的説明を以下に示す。

(1) 寒天ゲル材料への固体弾の衝突実験

容器内に濃度を調整した寒天ゲルサンプル（重量濃度 0.7 - 1.0 wt%）を作成し、高さ h (=78 - 698 mm) から鉄球（直径 6.35 or 12.7 mm）を自由落下衝突させた（図1）。衝突の様子を高速度カメラで撮影（21,000 fps）し、取得した鉄球の運動学的データからターゲット材料である寒天ゲルの粘弾性特性を計測する手法を開発した。具体的には、固体球の重心運動からその時間に関する1階および2階微分を求め、ニュートンの運動方程式に従うことを仮定して、それらのデータの関連性から粘性と弾性の寄与を見積もる手法を画像解析に立脚して確立した。

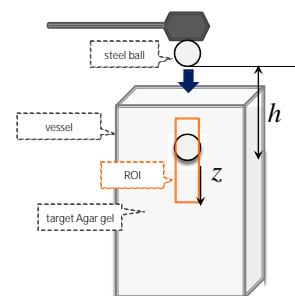


図1：寒天ゲルへの固体弾衝突実験系概念図

(2) 粉体層への固体球の低速押し込みによるアコースティック・エミッション計測
 粉体層内での波動伝播特性を見るために、特に低速衝突に注目してアコースティック・エミッション計測を行った(図2)。固体球を粉体層に低速で押し込みそのときにかかる抵抗力と粉体層内の構成粒子ネットワークの内部再配置(もしくは滑り)により放射されるアコースティック・エミッション信号を同時計測した。ただし、両者の相関はそれほど強くなく、本研究ではアコースティック・エミッションのイベント統計を主に議論し、粉体層内部での変形の様式とイベント統計とを関連づけた。

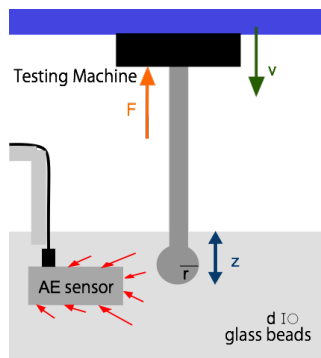


図2：粉体層への固体球の低速押し込みとそれに伴うアコースティック・エミッション計測の実験系概念図

(3) 粉体振動層による粉体対流実験

複雑なレオロジーを持つ物質の固体壁への繰り返し衝突により生成される現象として、特に粉体振動層における対流現象について実験研究を行った。具体的には、シンプルな円筒容器にガラスビーズを積層させ容器全体を振動させることにより粉体対流を発生させた。発生させた対流の速度の振動数や周波数、容器サイズ等の様々なパラメータ依存性を系統的に計測し、そのスケーリング解析を行った。

4. 研究成果

前述の通り、本研究では大きく三種類の実験研究を行った。それぞれの実験において得られた成果を以下に概説する。

(1) 寒天ゲル材料への固体弾の衝突実験

寒天ゲルサンプルへの固体球の衝突陥入の様子を高速度カメラで撮影した連続写真を図3に示す。衝突によりボールが減速されている様子が見て取れるが、この画像データより、固体球の位置を精度良く見積もる手法を画像解析で確立し(画像から分かるように球のイメージが分裂等しているために位置推定は必ずしも簡単ではない)、固体球の運動学的データを取得した。取得した運動学データ(固体球の位置、速度、加速度データ)

より、衝突抵抗力の粘性成分および弾性成分を分離する手法を用いて、それらの粘弾性特性値の具体的な値を算出した[4]。

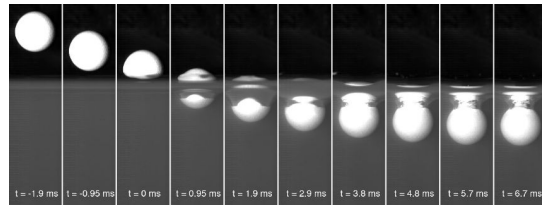


図3：直径 6.35 mm の鉄球を高さ 600 mm から濃度 0.7 wt%の寒天ゲルへ自由落下衝突させた場合の連続写真[4]。

得られた粘性や弾性の値は、先行研究によって他の方法で求められていたそれらの物性値と概ね整合的な結果を示しており、本研究で開発した粘弾性特性の計測手法には一定の妥当性があると考えられる。しかし一方で、データのばらつきは大きく、本計測法を再現性の高い高精度データ解析手法にすることは難しかった。ただし、比較的容易な手法により粘弾性特性を計測する手法を開発した点はその意義が大きく、今後は計測や推定法の精度向上などが課題となる。

(2) 粉体層への固体球の低速押し込みによるアコースティック・エミッション計測

ガラスビーズを円筒容器に入れて、アコースティック・エミッション・センサーをその粉体層内に埋め込み(図2)、そこにステンレス鋼球をゆっくりと押し込んで反力とアコースティック・エミッション信号を同時計測した。実際に計測したアコースティック・エミッション信号を図4に示す。アコースティック・エミッションは多数のバースト信号の集合として構成されており、そのイベント・サイズも様々なものがあることが図4より分かる。このアコースティック・エミッション信号を一定の基準により個別のイベントに分解し、そのサイズ頻度分布を計測した。

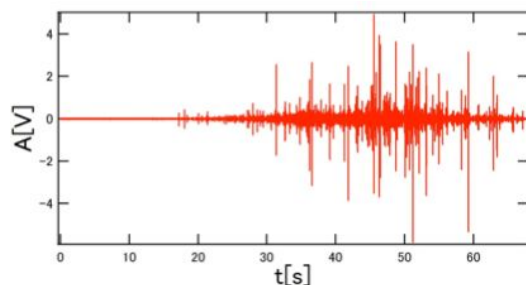


図4：アコースティック・エミッション信号の計測例[5]。

得られたサイズ頻度分布を図5に示す。図5は両対数プロットで表示されており、図中で直線的に見える分布はべき分布型を意味している。アコースティック・エミッションのイベントのサイズ頻度分布がべき分布型

になることは、これまでに様々な材料の破壊試験等で既に明らかにされてきている。その知見によれば、べき分布の指数（両対数プロットでのデータの直線部分の傾き）が大きい場合は材料の変形がより塑性的であり、逆にべき分布の指数が小さい場合は脆性的であることが示唆されている。一方、我々の得た実験結果（図5）からは、べき分布の指数が粉体層を構成するガラスビーズの粒径 d に依存することが分かった。具体的には、 d が 2, 0.8 mm と比較的大きな場合はべき分布の指数が小さく、 d が 0.4 mm の場合は指数が大きくなった。このことは、比較的大きな粒子により構成される粉体層は脆性的で、小さな粒子により構成される粉体層は塑性的な変形の傾向を示すことを意味する。この結果は、大粒子のネットワークがより大きなイベントを起こしやすいという定性的な理解とも整合的である。

イベントのサイズ頻度分布がべき分布型になる自然現象としては地震活動がある。本実験で得られたデータが微視的な地震の模擬に相当するかどうかを確かめるためには、まずそのべき分布の指数の値を定量的に議論する必要がある。図5で示されたイベントのサイズ頻度のべき分布はアコースティック・エミッション信号の振幅をそのままイベント・サイズとして統計解析をおこなっているため、その指数を直接地震イベントのべき指数と比較することは出来ない。そこで、地震活動のべき分布（グーテンベルグ・リヒター則）と比較するために、イベントのエネルギーに関する頻度のべき分布の形式に焼き直して比較を行った。その結果、大粒子による脆性的変形のべき指数が、実際の地震の分布で見られる標準的べき指数に近いことが分かった。

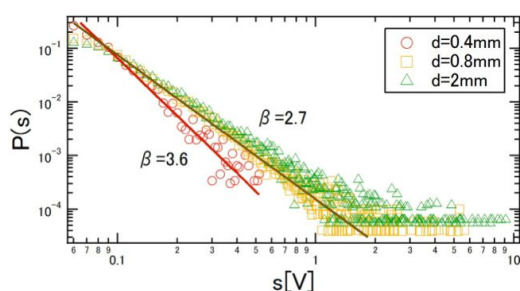


図5：アコースティック・エミッション・イベントのサイズ頻度統計の例[5]。 d はガラスビーズの粒径。両対数プロットで直線であることはサイズ頻度分布がべき分布型であることを示唆している。ただし、この図の中ではイベントのサイズとしては個々のイベント信号の最大振幅を用いている。

更に、アコースティック・エミッション・イベントのサイズ頻度分布のみではなく、連続するイベント間の時間間隔についても解析を行った。しかし、これについては明確で統一的な分布形状は見られず、地震活動との

直接的比較も現時点では困難であった。イベント間隔の定量的解析と物理的意味の解釈は今後の課題である。

(3) 粉体振動層による粉体対流実験

本研究の最後のトピックとして、粉体振動層における対流速度的スケージングも行った。これは特殊なレオロジー特性を持つ粉体に振動を加え繰り返し衝突を起こすことにより、バルクとして生成する対流現象の可視化とその定量的解析を行ったものである。

また、本実験は、粉体対流の基礎物理的特徴付けのみならず、惑星科学的意義も持っている。探査機ハヤブサにより詳細が調べられた小惑星イトカワは表面が砂礫（粉体）で覆われており、更にその表面ではサイズ分級が進んでいることが明らかとなった。このような固体小天体上の特異な地形を調べるためには、例えば天体衝突により誘起される地震動（と振動エネルギーの拡散的伝播）により発生する粉体対流などの現象の寄与を正しく見積もる必要がある。そこで我々は、様々な実験条件下で粉体対流の特徴的速度を計測し、そのスケージング関係を求めた。また、対流速度的を定量的に計測するためには、PIV(Particle Imaging Velocimetry)法を用いており、粉体層の繰り返し衝突による全体流動の動的可視化を実現している。

実験により得られたスケージングは、文献[6]としてまとめており、その惑星科学的意義も含め今後も研究を継続して行う予定としている。

以上の実験と解析の結果から、高分子ゲルや粉体などの特殊なレオロジー特性を持つ材料の衝突や変形、繰り返し衝突などにより誘起される様々な現象の基礎物理的性質（の一面）を明らかにした。ただし、本研究で様々なソフトマター物質の衝突応答則が完全に解明されたわけではなく、実験手法の高精度化等を含めて今後の課題も本研究の実施を通して多く見つかった。

【参考文献】

- [4] K. Ara and H. Katsuragi, *J. Appl. Phys.*, **113**, 2013, 63512:1-10.
- [5] K. Matsuyama and H. Katsuragi, *Nonlin. Processes Geophys.*, **21**, 2014, 1-8.
- [6] T. M. Yamada and H. Katsuragi, *Planet. Space Sci.*, 2014, in press. (arXiv:1404.0136)

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)

T. M. Yamada and H. Katsuragi, Scaling of convective velocity in a vertically vibrated granular bed, *Planet. Space Sci.*, 査読有, 2014, in press. (arXiv:1404.0136)

K. Matsuyama and H. Katsuragi, Power law statistics of force and acoustic emission from a slowly penetrated granular bed, *Nonlin. Processes Geophys.*, 査読有, Vol. **21**, 2014, 1-8.

DOI:10.5194/npg-21-1-2014

K. Ara and H. Katsuragi, Viscoelastic characterization of low-velocity impact of a solid ball on an agar gel, *J. Appl. Phys.*, 査読有, Vol. **113**, 2013, 63512:1-10.

DOI:10.1063/1.4790872

[学会発表](計15件[内10件記載])

松山和広, 桂木洋光, 固体塊の粉体への低速押し込みに伴うアコースティックエミッションイベントの統計則, 日本物理学会第69回年次大会. (2014/3/28). 東海大学

桂木洋光, 粘性流体への固体弾衝突によるフィンギング不安定性とクレーター構造, 日本惑星科学会2013年秋季講演会. (2013/11/21). 石垣市

荒耕大, 桂木洋光, 固体弾と観点ゲルの衝突粘弾性, 日本物理学会2013年秋季大会. (2013/9/26). 徳島大学

Tomoya Yamada and Hiroaki Katsuragi, Scaling and structure of the convective velocity in a vertically vibrated granular bed, *Physics of glassy and granular materials*. (2013/7/18). Kyoto University

Hiroaki Katsuragi, Acoustic emission and slow drag of a penetrated granular bed, *Complex Dynamics in Granular Systems*. (2013/6/11). KITPC, Beijing

山田智哉, 桂木洋光, 粉体層の鉛直振動における対流構造の粒子径状依存性, 日本地球惑星科学連合2013年大会. (2013/5/22). 幕張メッセ

桂木洋光, 固体・流体・粉体の衝突によるクラウンパターン形成, 日本物理学会第68回年次大会. (2013/3/29). 広島大

Kazuhiro Matsuyama and Hiroaki Katsuragi, Acoustic emission from a plunged granular bed, *Workshop on the Open Problems of the Glass Transission and Related Topics*. (2012/12/17). Kyushu University

桂木洋光, 固体球の流体衝突による界面不安定性, 第74回形の科学シンポジウム. (2012/11/16). 東京農工大学

Kodai Ara and Hiroaki Katsuragi, Viscoelastic characterization of solid ball impact to agar gel. *Soft matter physics and solid earth sciences: unifying concepts*. (2012/6/6). Tokyo University

[図書](計0件)

[産業財産権]

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

桂木 洋光 (KATSURAGI HIROAKI)

名古屋大学・大学院環境学研究科・准教授
研究者番号: 30346853

(2)研究分担者

本庄 春雄 (HONJO HARUO)

九州大学・大学院総合理工学研究院・教授
研究者番号: 00181545

(3)連携研究者

なし