

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 24 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26610113

研究課題名(和文)車輪駆動により粉体層内に誘起される応力鎖構造とテラメカニクス基礎物理

研究課題名(英文)Stress chain structure in the loaded granular bed and the fundamental physics of terramechanics

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) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：光弾性円盤により構成される二次元粉体層にタッピング等の擾乱を加えることにより、粉体層内部の構造(特に応力鎖構造)がどのように変化するかについて実験的研究を行った。車輪駆動による外力を当初は想定していたが、粉体層における内部応力の状態は積層の初期状態やその後の締め固めの程度により大きく変化することが実験を進めていく中で明らかとなり、まずは最も単純なタッピングによる状態変化に研究の焦点を当てることとした。特に、単分散(結晶構造)と二分散(ランダム構造)の二種類の粉体層の構造の違いが、タッピングによる応力鎖構造の変化にどのような影響を及ぼすかについて系統的实验により明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The internal-stress (stress-chain) structure within a two-dimensional granular bed consisting of photoelastic disks was experimentally studied. Although the study of granular bed sheared by a wheel loading had been initially planned, the granular bed subjected to the vertical tapping was actually investigated in this study. Since the behavior of sheared granular bed would be affected by the preparation protocol and history, the internal-stress structure in the tapped granular system, which relates to the history dependence, has to be firstly revealed in order to understand the physical behaviors of loaded granular bed. Therefore, we focussed on the stress-chain structure in the tapped granular bed. Particularly, the difference between monodisperse and bidisperse systems was systematically studied in terms of the stress-chain structure.

研究分野：粉体物理学

キーワード：粉体 光弾性 応力鎖

1. 研究開始当初の背景

砂上を移動・走行する際、足場を取られて思うように前進できなくなるという事態は頻繁に発生する。これは砂地が流動変形を容易に起こすことに起因しているが、一方で砂層は完全に流動化して流体のように振る舞うわけでもない。この流体的性質と固体的性質を併せ持つ砂地（粉体）の力学的特性を明らかにすることは近年のソフトマター物理、粉体物理の大きな目標の一つである。

砂上での移動が困難である主要因の一つは、砂（粉体）内部での応力伝達様式の特異性にあると考えられる。申請者はこれまで、粉体層内での圧力伝達の非線形性を準静的な固体球押し込みにより実験的に調べてきた (H. Katsuragi, *Phys. Rev. E* **85**, 021301 (2012); *Chem. Eng. Sci.* **76**, 165 (2012))。この先行研究では、圧力伝達様式を壁面の圧力計測で特徴付けていたが、粉体層内部での本質的に複雑な応力分布については測定されてこなかった。粉体層内部での複雑な応力分布の様子を解明することは、粉体層上での効率的移動の実現のための基礎的な知見をもたらすものと期待され、基礎・応用の両面からみて重要な課題であると言える。

特に粉体層上を車輪で効率良く走行する技術が確立されれば、様々な物資の多様な環境下での輸送等において大きな利点をもたらすと期待される。粉体層上の効率的移動等の技術は古くからテラメカニクスとして研究が続けられてきているが、粉体物理分野とテラメカニクス分野との交流等はこれまで乏しく、それぞれの研究分野はほぼ独立に発展をしてきた。

2. 研究の目的

以上のような背景を受け、本研究では「粉体層内の応力分布が外力の印加等によりどのように変化するか」という問題に焦点を当てて研究を行うこととした。粉体層内部の応力分布の可視化のために、特に光弾性技術を用いることとした。砂上の車輪走行を応用展開先として当初想定したため、それに即した幾何学的設定での応力状態の解明を研究開始前は目標としていたが、研究遂行の途中で、よりシンプルな設定である振動やタッピングの印加による粉体層の締め固め現象の基礎的解明がその前段階として必要であることが分かった。更にこの問題が粉体物理の基礎としても極めて重要な問題であることが研究を進めていく中で徐々に明らかとなったため、(実験系構築後の) 実際の研究実施の後半では、(車輪駆動よりもむしろ) タッピング下での粉体挙動に注目した。

3. 研究の方法

実験技術としては、上述のように光弾性技術を用いた。光弾性とは等方透明弾性体に応

力を加えることにより生じる複屈折現象を光の干渉を通して見ることにより、印加応力を可視化・定量化する技術である。これまでも光弾性材料を円盤状に加工し、それを用いて作成した2次元粉体層で内部応力分布を可視化する研究は国際的にいくつかの研究グループで行われてきた。

本研究では、その中の一つのグループを率いる沖縄科学技術大学院大学のバンディ・マヘッシュ准教授と共同で光弾性効果を用いた粉体実験を行うこととした。光弾性円盤群により構成された粉体層内部の可視化された応力分布の例を図1に示す。図1より粉体層の内部応力が鎖状構造（応力鎖）となっていることが分かる。

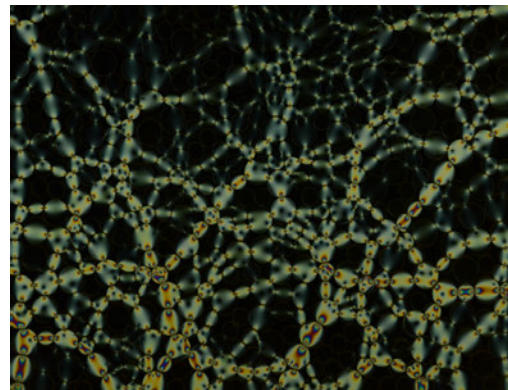


図1：光弾性粒子による粉体層内部応力（応力鎖構造）の可視化例。

前述のように、本研究では当初車輪による粉体層へのトルク印加を考えていたが、より基本的な外力条件である鉛直振動もしくはタッピング印加条件下での応力鎖構造に注目することとした。粉体層に振動やタッピングを加えることにより締め固め現象が起こることは粉体物理や土木工学などの分野で古くから良く知られている。そのため、粉体タッピング系は、計測系を確立し、キャリブレーションおよびテストを行うモデルケースとしても理想的であると考えられる。そこで本研究では、粉体タッピング系を最初に取り組むモデル系として採用した。

最初に、単一粒子もしくは一次元的に積層させた光弾性粉体層を用いて応力（粒子間接触力）計測のキャリブレーションを行った。さらに二分散粒子系（大小二種類のサイズの粒子の混合系）によりランダムに積層された粉体層での内部応力の分布を算出し、先行研究の結果との比較を通して、実験技術確立の確認作業を行った。また、粒子の幾何学的配置と応力鎖構造の両方の情報を取得するために、図2にあるように明視野および暗視野の画像を同一状態でそれぞれ取得して画像解析を行った。明視野画像は粒子位置と充填率の算出に、暗視野画像は粒子間接触力の算出にそれぞれ用いた。

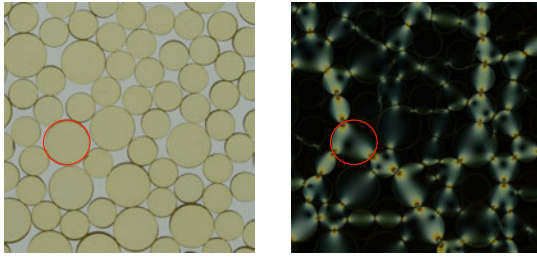


図2：明視野（左）および暗視野（右）による光弾性円盤の可視化．赤丸は算出された粒子位置の一例．

続いて、系にタッピング振動を加え、系の締め固めの様子を粒子の充填率、平均接触点数（配位数）等を元に特徴付け、応力鎖の構造と関連づける試みを行った．その際、二分散系によるランダム配置のみでなく、単分散系（単一の粒子サイズにより構成される系）による秩序（結晶）配置についても同様の実験を比較のために行った．

本研究では特に、応力鎖構造を画像解析することにより、配向秩序の状態を特徴付ける物理量を新たに定義し、それによる粉体層の状態変化の特徴付けの可能性について検討を行った．具体的には、応力鎖構造の配向秩序を特徴付ける量として以下で定義される配向秩序変数 S を用いた．

$$S = \left(\frac{2}{L} \sum_i l_i \cos^2 \theta_i \right) - 1$$

ここで、 L 、 l_i 、 θ_i はそれぞれ応力鎖の全長、 i 番目の応力鎖分枝の長さ、その応力鎖分枝が鉛直方向となす角である． S を計算する基本ユニットとなる応力鎖構造の分枝への分割は（図1のような）光弾性暗視野生データ画像の二値化、細線化の後に交差点もしくは端点を基準として行った．ここで定義された配向秩序変数は、応力鎖分枝が全て鉛直方向を向いていれば $S = 1$ 、全て水平方向を向いていれば $S = -1$ 、構造がランダムもしくは全ての応力鎖分枝が $\theta = \pi/4$ に配向している場合に $S = 0$ となる量である．すなわち、この配向秩序変数は、応力鎖分枝の配向がどの方向にどの程度揃っているのかを表す指標として用いることが出来るということになる．

これらの量（充填率、配位数、配向秩序変数）が、結晶構造もしくはランダム構造を持った二次元粉体層においてどのような値を取り、更にそれらがタッピングによってどのように変化するかを本研究では実験的に計測し、その物理的意味について議論した．

4. 研究成果

(1) 実験系構築とテスト実験

まずは、実験系の立ち上げおよびキャリブレーション、画像解析手法の詳細等の技術的

な部分を確立するのにおよそ1年の時間をかけた．その技術開発の要点を中心として、先行研究と本研究での応力鎖構造の特徴付け法の比較等をまとめたものを論文 (N. Iikawa, M. M. Bandi, and H. Katsuragi, *J. Phys. Soc. Jpn.* **84**, 094401 (2015)) として発表した．

解析の結果、粒子間接触力の分布や応力鎖分枝の鎖長の分布は指数関数の形を示すことが分かった．この傾向は応力鎖構造に関する先行研究の結果と整合的であり、本研究で立ち上げた実験系の妥当性を示していると言える．更に、この系に手動でタッピングを加えることにより粒子間接触力の値は徐々に増加するが、一方で応力鎖の鎖長はほぼ変化しないことが明らかになった．これはタッピングによる締め固めが主に既存応力鎖の強化により実現されており、新たな応力鎖構造の出現（増加）が（統計的に）あまり起こらないことを意味している．定量的には、充填率と総粒子間接触力が比例関係を持つことが実験的に明らかになった（図3）．

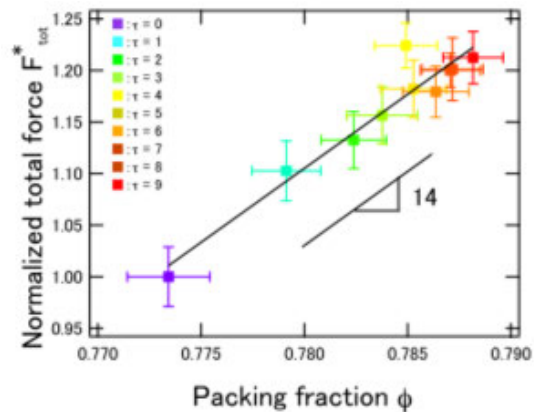


図3：手動タッピング実験による規格化された総粒子間接触力 F^* と充填率 ϕ の比例関係 (Iikawa et al. 2015)． τ はタッピング回数を表す．

(2) 単分散・二分散系での応力鎖構造

研究期間の後半では、それまでに確立した計測手法を用いて、粉体粒子ネットワークの幾何学的構造（結晶構造もしくはランダム構造）と応力鎖配向秩序の関係について系統的实验により調べた．この結果について成果をまとめたものも論文として出版した (N. Iikawa, M. M. Bandi, and H. Katsuragi, *Phys. Rev. Lett.* **116**, 128001 (2016))．得られたデータの例を図4に示す．図4の上段には明視野による粒子配置の直接画像、下段には対応する暗視野画像による応力鎖構造画像が示されている．図4上段の左および中央では、単分散条件の下での秩序だった結晶構造を確認することができ、同右では二分散性による無秩序構造を見て取ることができる．ここで注目すべきは、下段の応力鎖構造の画像では、格子状に配置された結晶構造の場合ですら応力鎖の顕著な乱れを直接観察することが出来ることである．このことは、応力鎖構

造が粒子配置の直接観察に比べて極めて感度高く構造不均一性を検出することが出来る量であることを示唆している。

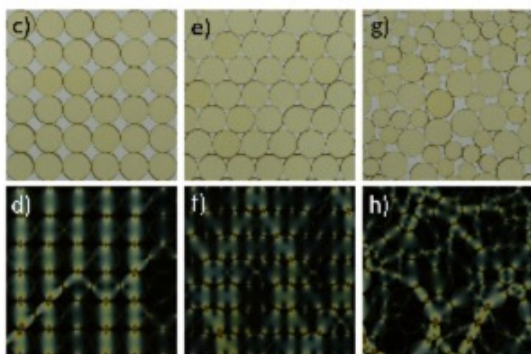


図4: 光弾性円盤による2次元粉体の結晶構造(正方格子(左), 三角格子(中央)), ランダム構造(右)の明視野による粒子配置イメージ(上段)と, 暗視野による応力鎖構造イメージ(下段)(Iikawa et al., 2016).

続いて, この性質を用いて, 実験では二分散系の粒子数比を系統的に変化させ, どの程度の粒子混合比で十分に結晶化を妨げられるのかについて実験的にアプローチした. この問題は, 多くの粉体物理実験および数値計算が二分散性により(半経験的に)結晶化を妨げていることを定量的に(応力鎖構造に基づいて)評価するものとなり, 粉体物理の基礎として重要な課題の一つであると言える. 実験および解析から得られた結果から, およそ大小の粒子の占有面積比が9:1(もしくは1:9)となれば, 粒子配置構造および応力鎖構造は十分ランダムな構造となることが確認された.

(3) タッピングによる二分散系の応力鎖構造の変化

最後に, これらの秩序的もしくは無秩序的に配置された各初期配置にタッピングを電磁式振動発生装置により加え, その粉体層の内部構造の変化を確認した. その結果, 粒子の配置を特徴付ける充填率や平均配位数などの指標は, ランダム配置状態において, タッピング印加によってもほとんど変化しないにもかかわらず, 応力鎖構造(配向秩序変数)はタッピングにより顕著に変化することが分かった. このことは, 粉体層内の粒子配置のランダムな準安定状態が更に緩和する様子が(粒子配置の幾何学的情報からは検出できないが)応力鎖構造の配向秩序により敏感に検出できることを示している.

(4) 研究成果のまとめ

以上の結果より, 粉体層内部の応力鎖構造(とくに配向秩序)は, 粉体層内部の状態を特徴付ける非常に感度の高いプローブとなり得ることが示唆される. これは, 今後の粉体層の力学特性研究における光弾性効果の有効性を示すものであり, 技術的な意義も高

い.

特に粉体粒子配置の準安定状態からの緩和ダイナミクスは, 一般の非平衡系物理の研究のプロトタイプとしても重要となる可能性を秘めており, 今後ますますの研究が必要と考えている.

本研究は, 当初は車輪による粉体層へのトルク・ローディングを想定していたが, 残念ながら研究実施期間内にそのようなセットアップでの実験を行うことは出来なかった. しかし, 一方でより基本的なタッピングによる粉体層の締め固めについて当初想定を遙かに超える成果を得ることが出来た. これは, 新たな実験技術を用いる際に注意深くキャリブレーション等の準備を行うことにより明らかになった成果である. すなわち, 本研究の方向性は当初目的からは直接的には少しずれてしまったが, 方向性の修正とその後の研究実施により, 粉体物理のより基礎的で重要な問題に対する成果を本研究の実施により得られたと考えている. 加えて, それらの結果を論文等で十分発表することも出来た.

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2件)

- ① N. Iikawa, M. M. Bandi, and H. Katsuragi, Structural evolution of a granular pack under manual tapping, *J. Phys. Soc. Jpn.* **84**, 094401 (2015), <http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.84.094401>, 査読有
- ② N. Iikawa, M. M. Bandi, and H. Katsuragi, Sensitivity of Granular Force Chain Orientation to Disorder-induced Metastable Relaxation, *Phys. Rev. Lett.* **116**, 128001 (2016), <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.128001>, 査読有

[学会発表] (計7件)

- ① H. Katsuragi, How nature constructs various structures by sandy materials, ASim2014, The 2nd Asia Conference on International Building Performance Simulation Association, Nagoya University, Nagoya (Japan), 2014/11/28~11/29 (invited plenary)
- ② 桂木洋光, 粉体ソフトマター物性による惑星地形研究, 第4回ソフトマター研究会, 名古屋大学(愛知県名古屋市), 2015/1/6~2016/1/7 (招待講演)
- ③ 飯川直樹, バンディ・マヘッシュ, 桂木洋光, 可視化した応力鎖の解析による粉

- 体層における締固め現象の理解, 日本地球惑星科学連合 2015 年大会, 幕張メッセ (千葉県千葉市), 2015/5/24~2015/5/28
- ④ N. Iikawa, M. M. Bandi, and H. Katsuragi, Analysis of stress chain structure strengthened by vertical tapping, Engineering Mechanics Institute Conference 2015, Stanford University (Stanford, USA), 2015/6/16~2015/6/19
- ⑤ 飯川直樹, バンディ・マヘッシュ, 桂木洋光, 鉛直タッピングによる粉体層中の応力鎖構造の変化, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 関西大学 (大阪府吹田市), 2015/9/16~2015/9/19
- ⑥ N. Iikawa, M. M. Bandi, and H. Katsuragi, Scaling of convective velocity and force chain rearrangement in two-dimensional intermittently vibrated granular bed, Avalanches, plasticity, and nonlinear response in nonequilibrium solids, YITP Kyoto University (Kyoto, Japan), 2016/3/7~2016/3/9
- ⑦ 飯川直樹, バンディ・マヘッシュ, 桂木洋光, 断続振動下における粉体対流速度のスケーリング, 日本物理学会第 71 回年次大会, 東北学院大学 (宮城県仙台市), 2016/3/19~2016/3/22

[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

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

バンディ マヘッシュ (BANDI MAHESH)

沖縄科学技術大学院大学・准教授

飯川 直樹 (IIKAWA NAOKI)

名古屋大学・環境学研究科・大学院生