

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 3 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2013

課題番号：22540384

研究課題名(和文) 流れと振動による粒状体界面の変形とメソスコピック物理の構築

研究課題名(英文) Study of surface deformation of granular material due to flow and vibration toward the development of mesoscopic physics

研究代表者

佐野 理 (SANO, Osamu)

東京農工大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：80126292

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円、(間接経費) 960,000円

研究成果の概要(和文)：粒の密な集合体(粒状体)は巨視的には連続媒質とみなせるが、媒質の境界付近は個々の粒子が識別できる微視的な世界である。本研究課題では、そうしたマクロとミクロの世界をつなぐ中間領域の物理学を構築することを目的とした。これまでに、例えば乾燥した粒状体を鉛直に加振した場合に、粒の層数(微視量)が3を超えると弾性体や流体に類似した集団運動が発生し得るが、その挙動は層厚という巨視量で特徴づけられること、領域内では固体相と流体相が時空間的に変動することなどを明らかにした。また、粒状体中の流れでは、粒の移動が流れを変え、粒のわずかな不均一分布も拡大されて土砂崩れのような巨視的な変化をもたらす可能性が示された。

研究成果の概要(英文)：Granular materials can be regarded as continua, if macroscopic properties are concerned. On the other hand, discrete properties are essential near the boundary of the materials. The purpose of the present research is to establish a new physics that bridges the gap between the macroscopic and microscopic pictures. By the experiments using a vertically vibrated dry granular material, we have elucidated that the collective motions similar to the ones observed in elastic material or fluid can be generated if the number of layer (microscopic view) exceeds 3, but that their behaviors are characterized by the layer depth (macroscopic view). Moreover, the solid-like and fluid-like domains are found to co-exist and change to each other spatiotemporally to form wave motions. In the granular material exposed to viscous flows, we have shown that quite a small inhomogeneity of particle distribution can generate macroscopic land slides via rearrangement of particles and the flow concentration.

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：粒状体 密度波 固液相転移 界面変形 空洞崩壊 浸食 渦輪衝突 メソスコピック

1. 研究開始当初の背景

粒状体は多くの反応・製造過程や充填・輸送過程だけでなく、地滑り・なだれ、液状化などの自然災害の発生や成長にも本質的な役割を占め、その研究の歴史も古い。しかし、この媒質は固体・液体の双方の性質を合わせ持ち複雑な挙動を示すために、基礎的・系統的な研究は遅れていた。近年、簡単な粒状体の実験や計算機シミュレーションなどでこれらの系の振る舞いが詳しく調べられるようになり、理学側からの基礎研究も急速に進歩している。本研究で扱う対象は、摩擦などのエネルギー散逸をともなう離散的な粒子集合体である。これに外部から流れや振動を与えると、ある条件を境として連続体的な場の挙動が顕著に見られるようになる。ただし、エネルギー散逸があるので、つねに外部から仕事を与え続けなければ流動は止まってしまうし、仮に流動の起こる条件下でも系全体が一様な流動状態になることは期待できない。また、粒状体の粒子は質点と異なり有限な体積をもつために、その排除体積効果にともなう履歴、力をかけると体積が膨張する現象(ダイラタnシー)や異種粒子集団のかき混ぜで粒子群が分離する(偏析)など、通常の連続体力学や統計力学の対象とは全く異なる挙動を示す。したがって、標準的な粒状体といえども、“マイクロなレベルでの固体境界”と“集団運動に着目したときのマクロな自由表面”の関係は自明ではない。研究開始当初はこのマイクロとマクロをつなぐ物理学はまだ黎明期にあった。本報告者は容器内で鉛直に加振した粒状体の薄層に見られる巨視的集団運動においてこの難問を解くヒントを得た。他方、粒状体に流体の流れがある場合には、流れが粒子分布の再配置を誘起し、逆に新たな粒子分布が巨視的な流れを作るという局所的相互作用と大域的な場を関連づける方策をある程度までつか

んでいた。こうした背景を踏まえ、これらをさらに発展させた理論は、マクロとミクロを結ぶメソスコピックな物理への第一歩との期待が高まっていた。

2. 研究の目的

前述したように、少数粒子の離散的な挙動から粒子集合体としての連続体的挙動への遷移過程を明らかにすることが本研究の目的である。

3. 研究の方法

高速度ビデオカメラを用いたクローズアップ観測により、粒状体を構成する個々の粒子の挙動と巨視的な変位との関係を探るのが基本的な研究方法である。これにより、個々の粒子に働いている力、変位の伝播、粒子の再配置といった局所的な描像と、それらによって引き起こされる流動化、界面変形などの大域的な描像を結びつけ、また、逆に大域的な挙動が個々の粒子に与える制約などを明らかにする。実験にあたっては、粒子の大きさや摩擦などの属性、加振条件(振動数・振幅)や圧力・流量など運動の駆動条件を系統的に変化させ、その応答を調べることで、またそれらに基づく数理モデルとその計算機シミュレーションにより、マイクロとマクロをつなぐ物理学を明らかにしようとするものである。

4. 研究成果

(1) 乾燥した粒状体を容器内で鉛直加振すると、層数が3以上では流体運動に類似した巨視的な現象であるさざ波(ripple)が観測される。しかし、層が十分厚くなると流体的な挙動を示す領域は上層部に限られる。そこで、本研究では粒子の層厚を系統的に変え、粒状体を構成する個々の粒子の軌道を詳細に追跡した。その結果、下層部は全

体として上下運動はするものの粒子間の相対的な位置は粒径程度しか変動しない固体相にあること、上層部は流体的に振るまい、さざ波の波長もこの実効的な層厚で決定されることなどを明らかにした。すなわち、十分厚い粒状体の層では、中間層は主として最下層粒子が容器底面との衝突で得た運動量を輸送する働きを担うだけであり、多層になれば連続体的な媒質とみなして巨視的な物理量である層厚で特徴づけられるとした従来の考え方に見直しを迫るものである。

(2) さざ波の波長決定のメカニズムについても新たな知見が得られた。図1は外部加振周期の1/8程度の時間にわたり各粒子の輪郭を重ね書きしたものである。図の中で

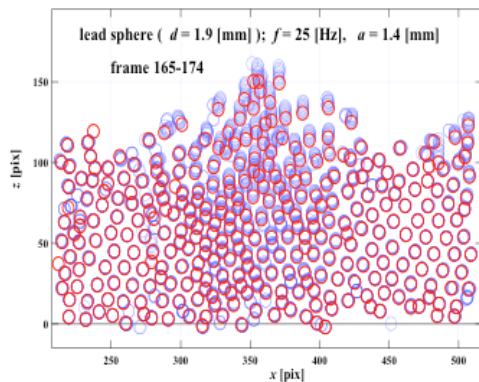


図1. 粒子の輪郭の重ね合わせ。

[原著論文⑨より一部抜粋]

太い輪郭線で描かれた円は、各粒子の初期画面での位置を示す。中抜きの円が識別できるものは粒子がこの時間にわたり相対的に静止しており、これらの占める領域が固体(弾性体)的な振舞いをするを、逆に、円が重なって見えるものはこの時間内に粒子の移動が起こっており、こうした粒子群の占める領域は流体的であることを示す。固体領域と流体領域の境界は、波の谷付近で底面に近い部分から左右両方向にやや上向きに移動し、やがて山と谷が入れ替わるような表面変位を生じる。したがって、さ

ざ波においては粒子数密度の波が進行方向を曲げながら伝播し、表面に垂直に交わる場所が波の頂部に対応している。この構造の繰り返しの空間周期が波長 λ を決定している。このように、ある程度以上の厚さをもつ粒状体の層では固体相と液体相が時間的・空間的に相変化を伴いながら共存し、粒子の圧密状態に応じて弾性波が屈折する(地震波の伝播を論じるときの「走時曲線」と類似)という実体が明らかになった。この理論では、波長は伝播速度の鉛直分布を決めるパラメタ β だけに依存し、層厚そのものには依存しないという実験結果と一致する。 β の値は粒状体の層厚 h (あるいは層数 N)だけでなく、粒子間のはね返り係数 e 、加振の振動数 f や振幅 a などにも依存する。

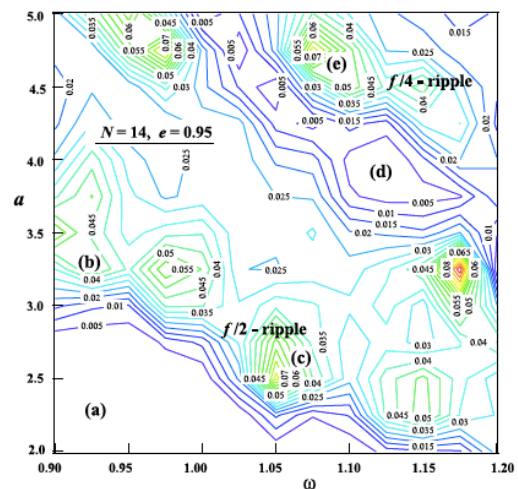


図2. β の等高線の振動数振幅依存性(層数やはね返り係数は固定)。

[原著論文①より一部抜粋]

図2は、 β の等高線の一例である($N=14$, $e=0.95$)。この極大値を与える振動数振幅に対応した波長 $\lambda = 2\pi d / \beta$ が選ばれる(d は粒径)。図2の(a)(d)で示した領域は粒子群と容器の上下運動の位相が揃うので層の膨張は起こらないが、図2の(c)(e)で示した領域では層の上部の膨張が著しい。ここでは下層部はほぼ規則的な振る舞いをするの

で膨張率もほぼ同様，したがって密度波も屈折しないが，上層部では z 依存性が高く，これを反映した β が選ばれることになる。

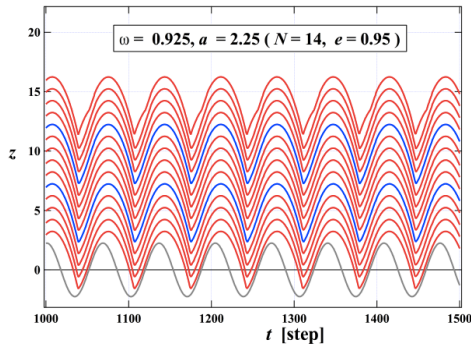


図3. 粒子群の挙動(図2の(a)に対応)。

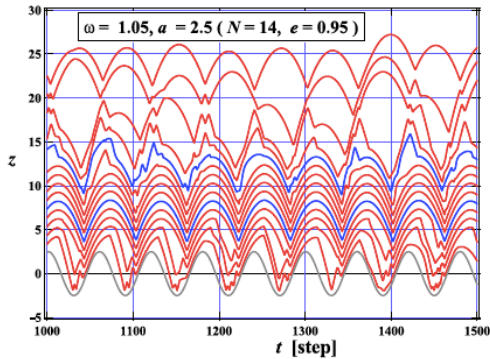


図4. 粒子群の挙動(図2の(c)に対応)。

下層部は規則的な運動で固体的挙動を，上層部の流体部分が実効的な“水深”としてさざ波の波長を決定する。

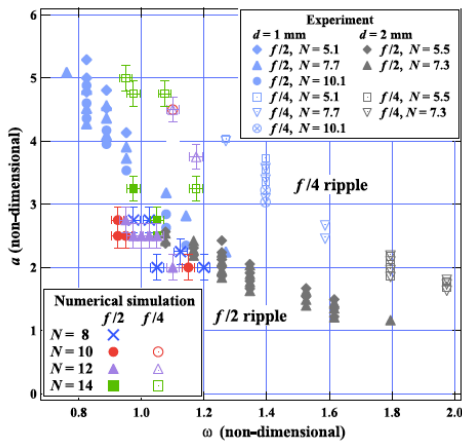


図5. さざ波の出現領域マップ。

[原著論文①より一部抜粋]

本研究で提案した理論モデルは層の厚さ(あるいは層数)に関わらず適用され，加振

の振動数や振幅に対応して出現するさざ波の領域マップ(図5)，波長の飽和などを実験誤差の範囲内で予測できる水準にまで達している。

(3) 粒状体の薄層を振動させたときに発生する波の1つに弾性的な振る舞いをする撓み波(undulation)がある。これは最下層粒子と3層より上の粒子の相互貫入に伴うダイラタンシーが誘起する座屈が原因であることを本報告者は明らかにしてきたが，さらにこれを特徴づける周期や振幅，波形などについて精密観測を行い，これらを決定するものがこれまで主張されていた加速度ではなく，振動を駆動する運動量(振動数と振幅の積)であることを示した。

(4) 流体がリング状の曲線のまわりに自転運動をしている渦領域は渦輪と呼ばれるが，この渦輪は質量，運動量，エネルギーを携えて移動するので，粒状体界面に衝突させると後者を浸食し，特徴的な衝突痕を形成する(図6参照)。この過程での渦輪の変形と界面浸食の関係を精密に観測し，衝突痕形成機構の詳細を解明した。これらは浅海底のヘドロ除去や生物環境活性化，火星古環境の推測にも応用が期待されている。



図6. 粒状体界面への渦輪の衝突による形状。等高線による表示で，ドーナツ状の凹みの中央部は凸部に，また，その外側に小さな凹みがほぼ等間隔に形成される。

[原著論文⑦より一部抜粋]

(5) 粒状体内部に流体を流したときの粒子分布の局所変動と流れの集束は、土砂崩れの発生や大域的な水脈の形成などの課題に関連して着目される固液相互作用や相転移現象の一例である(図7)。個々の粒子の動きには局所的な関係が重要であるが、それを決める応力の決定には大域的な流れの計算が必要である。これまでの知見を踏まえ、3次元の粒子配置変化を測定し、2次元との違いを比較した。

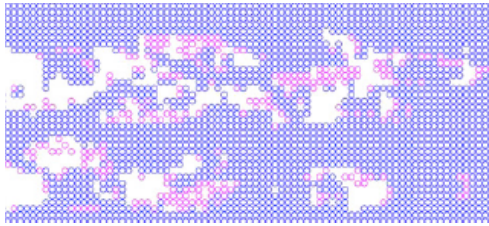


図7. 粒状体中の空洞の連結と水脈形成.

[原著論文⑩より一部抜粋]

(6) 粒状体境界面付近の粒子が流れによって運ばれ、界面が変形する特徴的なパターン(砂漣)について、その発生の精密な臨界条件を明らかにした。

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 13 件)

① Osamu Sano, Wavelength selection of ripples in a vertically vibrating dynamically thick granular layer due to density-wave refraction, *Comptes Rendus Mecanique*, 査読有, Vol. 342, 2014, 52-62
DOI:10.1016/j.crme.2013.10.006

② Kazuki Ishii, Osamu Sano, Initial Condition Dependence on the Onset and Growth of Sand Ripple Due to Steady Uni- Directional Viscous Flow, *J. Phys. Soc. Jpn.*, 査読有, Vol. 82, 2013, 114401_1-7
DOI:10.7566/JPSJ.82.114401

③ O. Sano, N. Sano, Y. Takagi, Y. Yamada, Onset of Landslides due to the Flow-Induced

Waterway Formation in Three-Dimension in a Granular Material, *Proc. 14th Asian Congress of Fluid Mech.* (Hanoi and Halong, Vietnam), 査読有, Vol. 2, 2013, 1254-1260
[ISBN: 987-604-913-146-2]

④ Junya Yoshida, Osamu Sano, Pattern formation due to a vortex ring colliding to a granular layer and its dependence on the granular properties, *Proc. 14th Asian Congress of Fluid Mech.* (Hanoi and Halong, Vietnam), 査読有, Vol. 1, 2013, 655-659
[ISBN: 987-604-913-145-5]

⑤ Osamu Sano, Wavelength Selection Mechanism of Ripples in Vertically Vibrated Thicker Granular Layer, *J. Phys. Soc. Jpn.*, 査読有, Vol. 81, 2012, 033401_1-4
DOI: 10.1143/JPSJ.81.033401

⑥ Junya Yoshida, Naoya Masuda, Boku Ito, Takayoshi Furuya, Osamu Sano, Collision of a vortex ring on granular material. Part II. Erosion of the granular layer, *Fluid Dyn. Res.*, 査読有, Vol. 44, 2012, 015502_1-18
DOI:10.1088/0169-5983/44/1/015502

⑦ Naoya Masuda, Junya Yoshida, Boku Ito, Takayoshi Furuya and Osamu Sano, Collision of a vortex ring on granular material. Part I. Interaction of the vortex ring with the granular layer, *Fluid Dyn. Res.*, 査読有, Vol. 44, 2012, 015501_1-20
DOI:10.1088/0169-5983/44/1/015501

⑧ 佐野 理, 鉛直に加振した粒状体を伝わる密度波と表面変形, 京都大学数理解析研究所講究録, 査読無, 1800巻, 2012, 171-183
<http://hdl.handle.net/2433/173018>

⑨ Osamu Sano, Density Wave as a Mechanism of the Formation of Ripples in Vertically Oscillated Thicker Granular Layer, *J. Phys. Soc. Jpn.*, 査読有, Vol. 80, 2011, 034402_1-7

DOI: 10.1143/JPSJ.80.034402

⑩ Osamu Sano, Flow-induced waterway in a heterogeneous granular material, *Computer Phys. Comm.* 査読有, Vol. 182, 2011, 1870-1874

DOI:10.1016/j.cpc.2010.12.001

⑪ 吉田隼也, 佐野 理, 渦輪の衝突による粒状体表面のパターン形成, 京都大学数理解析研究所講究録, 査読無, 1724巻, 2011, 192-199

<http://hdl.handle.net/2433/170457>

⑫ Yuki Oshiro, Osamu Sano, Onset and Growth of Sand Ripples due to a Steady Viscous Flow in an Annular Channel, *Forma*, 査読有, Vol. 25, 2010, 15-22

<http://www.scipress.org/journals/forma/pdf/2501/25010015.pdf>

⑬ Osamu Sano, Solid-fluid transition and the formation of ripples in vertically oscillated granular layers, *AIP Conf. Proc.*, 査読有, Vol. 1227, 2010, 100-114

DOI:10.1063/1.3435381

〔学会発表〕(計 31 件)

① 佐野 理, 土砂崩れ発生の力学的メカニズム — 流体による粒状体の流動化, 日本学会会議公開シンポジウム(第 1 回理論応用力学シンポジウム) ~自然災害に関する力学研究の動向と課題~, 2014.3.17, 日本学会会議, 東京

② O. Sano, N. Sano, Y. Takagi, Y. Yamada, Onset of landslides due to the development of waterways induced by a viscous flow in a granular material, The 14th Asian Congress Fluid Mech., Oct. 17, 2013, Hanoi, Vietnam

③ J. Yoshida, O. Sano, Pattern formation due to a vortex ring colliding to a granular layer and its dependence on the granular properties, The 14th Asian Congress Fluid Mech., Oct. 15, 2013, Hanoi, Vietnam

④ J. Yoshida, O. Sano, Collision of a vortex ring on the granular layer, IUTAM Symposium on Vortex Dynamics: Formation, Structure and Function, March 13, 2013, Fukuoka, Japan

⑤ J. Yoshida, O. Sano, Erosion of the granular layer due to the collision of the vortex ring, The 23rd IUTAM Congress, Aug. 23, 2012, Beijing, China

⑥ O. Sano, Wavelength Selection of Ripples in Vertically Vibrating Thicker Granular Layer due to Density Wave Refraction, The 8th European Solid Mechanics Conference, July 9, 2012, Graz, Austria

⑦ O. Sano, Bifurcation in Vertically Oscillated Granular Layer and the Characteristics of Solid-Fluid Transition, The 4th Intern. Sym. Bifurcations and Instabilities in Fluid Dynamics, July 18, 2011. Barcelona, Spain

⑧ O. Sano, Mesoscopic Physics between Particulate System and Continuum, The 55th Congress Indian Soc. Theor. Appl. Mech., Dec. 20, 2010, Hamirpur, India

⑨ O. Sano, A. Takei, T. Kanayama, M. Suzuki, Spatio-temporal variation of granular temperature in the pattern formation of vibrating granular material, The 24th IUPAP Intern. Conf. Stat. Phys., July 19, 2010, Cairns, Australia

⑩ O. Sano, Flow-Induced Waterway in a Heterogeneous Granular Material, Conf. Comp. Phys., June 23, 2010, Trondheim, Norway

〔図書〕(計 1 件)

① 佐野 理, 丸善, 偏微分方程式 (東京大学工学教程), 2013, 194 ページ (単著)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐野 理 (SANO, Osamu)

東京農工大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号: 80126292