

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月 1日現在

機関番号：17102  
 研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2009～2011  
 課題番号：21540418  
 研究課題名（和文） ダイラタント流体のレオロジー

研究課題名（英文） Rheology of Dilatant Fluid

## 研究代表者

中西 秀（KANISHI HIIZU）  
 九州大学・理学研究院・教授  
 研究者番号：90155771

研究成果の概要（和文）：濃厚なコロイドや粉体と流体の混合物は、激しいずり粘化を示し、それが、よく知られた片栗粉と水の混合物の奇妙な振る舞いの原因になっている。本研究では、このような激しいずり粘化を示す流体のレオロジーを記述する現象論的方程式を構築した。得られた方程式を解析することにより、定常ずり流が不安定化して振動流を生じる領域があることを理論的に示した。更に、実験によりそのような振動流が実際の系で起こることを示した。

研究成果の概要（英文）：Dense colloids or mixtures of granule-fluid often show a severe shear thickening, which is a cause of well-known strange behaviors shown by a starch-water mixture. We have constructed a phenomenological model of fluid dynamics for such a shear-thickening fluid. By analyzing the model equations, we have shown theoretically that the steady shear flow can be unstable to become an oscillatory flow, and demonstrated experimentally that such a oscillatory flow actually occurs.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・生物物理，化学物理

キーワード：ダイラタント流体、レオロジー、ずり粘化振動

## 1. 研究開始当初の背景

濃厚な粉体-流体混合物は、粘性係数が3ケタ以上増加する非常に激しいずり粘化を示すことがよく知られている。それが引き起こす特異な振る舞いは、片栗粉水を使って簡単にデモンストレーションでき、手軽な一般向け科学実験として盛んに行われている。外力による変形が引き起こす急激な粘化に伴うこの媒質の振る舞いが、レイノルズのダイラ

ンシーの原理による粉体の振る舞いによく似ていることから、このような急激なずり粘化を示す媒質をダイラタント流体と呼ぶことがあるが、ずり粘化とレイノルズのダイラタンシーとの関係はそれほど明確には理解されていない。

歴史的には、濃厚コロイドの示すずり粘化は秩序・無秩序転移 (Order Disorder Transition) として説明されてきた。即ち、低

ずり領域では粒子がずり流により層状に配列していたものが、高ずり領域では流体の乱流的流れにより層構造が乱されて媒質の見かけの粘度が大きくなるというのである。しかし、X線の小角散乱実験などの結果、ずり粘化転移の前後で粒子の配列構造に特段の変化が見い出されず、現在では実際のずれ粘化の原因と考えられていない。

それに代わって、分散粒子の間の流体力学的な相互作用の結果、粒子が大きなクラスターをなし、それが媒質の実効粘度を大きくしているという説が現れた。粘性流体中では2つの粒子が近づくと潤滑力により相対速度が遅くなるため、粒子のクラスターが成長するのではないかというわけだ。計算機シミュレーションでそのような構造が観察され、X線散乱実験でもクラスターの存在を示唆するような結果が得られている。更に最近では、ガラス転移との類推でジャミングという観点からも議論されている。

半現象論的な理論としては、ガラス転移で成功をおさめたモード結合理論(MCT)にずり流の影響を簡易的(Schematic)に取り込んだSMCTや、媒質の変形を応力に依存した実効温度で記述したSoft Glassy Rheologyなどがあるが、いずれもミクロな理論とマクロなレオロジーの中間的な取扱いで、粘化現象がマクロな流体力学的ダイナミクスに与える影響については取り扱っていない。

このような意味で、これまでの研究はミクロあるいはセミミクロな観点からのものが多く、マクロなレベルでの流体力学的な振る舞いは、十分調べられてこなかった。

## 2. 研究の目的

ダイラタント流体、即ち、粉体-流体混合系には、i) ストレスに対して粘性係数の変化が数ケタにも及ぶ粘化が瞬時に起こる ii) ストレスを除いた時の緩和過程は粘化過程のように瞬時に起こらないが、1秒程度で速やかに起こる、iii) 粘化した状態ではほとんど弾性変形せず剛体のように振る舞う、iv) 粘性係数はずり速度の変化に対して履歴効果を示す、v) 転移ストレス付近で不規則な揺らぎを生じる、などの特徴がある。本研究では、これらの特徴から微視的機構を考察し、その特異な振る舞いを巨視的なレベルで記述することを目的とする。特に、激しいずり粘化流体が引き起こす流体の巨視的振る舞い、即ち、レオロジーを理解したい。

## 3. 研究の方法

現象論的モデル構築と、理論的解析、および、数値的シミュレーションによる。ダイラタント流体の微視的機構についての一般的考察のもとに、もっとも単純な現象論的流体力学モデルを構成して、モデルの振る舞いを

解析的および数値的に調べた。更に、モデルによって見出されたずり粘化振動現象が実在することを確認するために、研究協力者に実験の提案をし、実際にその実験をしてもらった。

## 4. 研究成果

媒質の内部状態を表す現象論的な場の変数を導入し、粘度がそれに依存すると仮定して流体力学を構成した。内部変数は、簡単化のためにスカラー量とした。重要な仮定は、内部変数の表現する量は、例えば粒子の接触数のように、保存量ではないところである。そのためその変化は、拡散過程ではなく、局所的に変化できると想定している。更に、内部変数の定常値は局所ストレスの関数として与えられるとし、ストレスが時間変化する場合には、各瞬間のストレスに依存する値に、媒質の歪速度に比例する速さで緩和するとした。熱揺らぎが支配的な場合には粒子配置の緩和は温度に依存する定数となるであろうが、歪速度に比例した緩和は熱揺らぎが無視できる粒子の場合に特徴的なものと考えられる。どんなに急激な変形に対しても媒質が追従して瞬間的に粘化するというダイラタント流体の際立った特徴は、このような緩和機構からくるものと考えられる。

このモデルに対して、いくつかのパラメータについて応力・ずり速度曲線を求めた。その結果、不安定ブランチを含むS字型の非線形な応力ずり速度曲線が得られた。これによりダイラタント流体の不連続な粘化転移および粘度の履歴を表現できる。

さらに、単純ずり流、重力斜面流、ポアズイユ流において1次元及び2次元の数値シミュレーションを行い、一様定常流が不安定化し振動流や不均一な流れが生じるパラメータ領域を示した。

特に、ずり粘化流体には一般的にずり流が不安定化して振動流が生じる領域があることを示し、この振動をずり粘化振動と呼ぶことにした。ずり粘化振動は、一様定常ずり流が不安定ブランチに対応する場合に生じ、i) 定常ずり流の不安定化による粘化、ii) それによる減速のための慣性ストレスによる更なる粘化と減速、iii) 低ずり流からの粘化状態の緩やかな緩和、iv) 不安定ブランチ付近のずり流の回復、というサイクルで振動する。見かけ上はいわゆるスティック・スリップ運動に似ているが、振動の起こる物理的状況は大きく異なる。

また、2次元シミュレーションでは、あるパラメータ領域で、シアストレスの主軸方向に媒質が粘化した、異方性のある不均一状態が得られた。これは粉体のシミュレーションでよくみられる粉体粒子による異方的な応力

鎖に対応する。今のモデルは連続体モデルで、しかも内部状態がスカラー変数によってあらわされているのにもかかわらず、このような違法的な構造が自然に現れるところが興味深い。

この研究により明らかになったずり粘化振動は、その一般的な機構にもかかわらず、これまでの文献に実験的な報告がなかった。そこで、具体的実験の提案を行い、研究協力者に依頼して、実験をしてもらった。その結果、理論的に予測した領域近くに30 Hz程度の明瞭な振動を見出し、モデルの振る舞いとよく対応することを示した。

#### 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5件)

1. Hiizu Nakanishi, Shin-ichiro Nagahiro and Namiko Mitarai, Phys. Rev. E 85, 011401 (2012) [11 pages]. “Fluid dynamics of dilatant fluids” 査読あり.
2. Namiko Mitarai, and Hiizu Nakanishi, Eur. Phys. J. Special Topics 204 (2012) 5-17. “Granular flow: Dry and wet” 査読あり
3. Hiizu Nakanishi and Namiko Mitarai, J. Phys. Soc. Jpn. 80 (2011) 033801 [4 pages]. “Shear Thickening Oscillation in a Dilatant Fluid” 査読あり
4. Namiko Mitarai and Hiizu Nakanishi, AIP Conf. Proc. -- May 5, 2010 -- Volume 1227, pp. 214-220, IUTAM-ISIMM SYMPOSIUM ON MATHEMATICAL MODELING AND PHYSICAL INSTANCES OF GRANULAR FLOWS. “Simple Interaction Model for Partially Wet Granular Materials” 査読あり
5. Namiko Mitarai and Hiizu Nakanishi, Europhys. Lett. 88 (2009) 64001 (6 pages). “Simple model for wet granular materials with liquid clusters” 査読あり

[学会発表] (計12件)

1. 国際研究集会 “Phase Transition Dynamics in Soft Matter : Bridging Microscale and Mesoscale” ,

2012/2/20-22, at: Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, Hiizu Nakanishi, “Fluid dynamics of dilatant fluids “

2. 日本物理学会秋の分科会、於：富山大学 2011年9月21日～24日、永弘進一郎、中西秀、御手洗菜美子、 “ダイラタント流体モデルの2次元シミュレーション“
3. Hiizu Nakanishi, 8th Liquid Matter Conference, Wien, Austria, Sept. 6-10, 2011. “Rheology of dilatant fluid”
4. 第一回ソフトマター研究会, 2011/8/3-5、於：キャンパスプラザ京都、永弘進一郎、中西秀、御手洗菜美子、 “ダイラタント流体の数値シミュレーション” (ポスター)
5. 中西秀、応用力学研究所研究集会「地形のダイナミクスとパターンとその境界領域」、2010年11月30日-12月1日、九州大学応用力学研究所、「ダイラタント流体の流体力学モデルと振動不安定性」(依頼講演)
6. 基研研究会「散逸粒子研究の最前線—粉体のミクロな振舞いからマクロな振舞いまで—」2010/11/24 - 2010/11/26、京都大学基礎物理学研究所、Namiko Mitarai, and Hiizu Nakanishi “Effect of noise on jamming transition of granular media” (Oral)
7. 基研研究会「散逸粒子研究の最前線—粉体のミクロな振舞いからマクロな振舞いまで—」2010/11/24 - 2010/11/26、京都大学基礎物理学研究所、Hiizu Nakanishi, Namiko Mitarai, and Shinichiro Nagahiro “Fluid dynamics and jamming in a dilatant fluid” (Oral)
8. 基研研究会「散逸粒子研究の最前線—粉体のミクロな振舞いからマクロな振舞いまで—」2010/11/24 - 2010/11/26、京都大学基礎物理学研究所、Shin-ichiro Nagahiro, Hiizu Nakanishi, and Namiko Mitarai, “Numerical simulation of a dilatant fluid” (Poster)
9. 日本物理学会秋の分科会、於：大阪府立大学中百舌鳥キャンパス、2010年9月23日～26日、中西秀、御手洗菜美子、永弘進一郎、「ダイラタント流体の連続

体モデル」

10. 日本物理学会秋の分科会、於：大阪府立  
大学中百舌鳥キャンパス、2010年9月  
23日～26日、永弘進一郎、中西秀、御  
手洗菜美子、「ダイラタント流体の粒子  
法シミュレーション」
11. Hiizu Nakanishi and Namiko Mitarai,  
StatPhysHK, 13-16 July, 2010 at Hong  
Kong Baptist University, Hong Kong,  
China, “A continuum model for  
dilatant fluid” (Poster)
12. Namiko Mitarai and Hiizu Nakanishi,  
Conference on computational  
physics(CCP2010), 23-26, June, 2010,  
at Trondheim, Norway, “Effect of  
thermal fluctuation on jamming  
transition of granular media”  
(Poster)

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

〔その他〕

ホームページ:

ダイラタント流体、ダイラタンシー

<http://www.stat.phys.kyushu-u.ac.jp/~nakanishi/Physics/Dilatancy/>

監修:

理科教育ニュース, 775号付録、2010年1月  
18日発行、少年写真新聞社、

「かたくり粉水の不思議な振る舞い」

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中西 秀 (Nakanishi Hiizu)

九州大学・理学研究院・教授

研究者番号: 90155771