

平成 30 年 6 月 19 日現在

機関番号：51303

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05223

研究課題名(和文)ダイラタント流体の二種類の異なるずり粘化メカニズムの解明

研究課題名(英文)Two distinct mechanism for the shear thickening of a dilatant fluid

研究代表者

永弘 進一郎(Nagahiro, Shin-ichiro)

仙台高等専門学校・総合工学科・准教授

研究者番号：20419154

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：ダイラタント流体は、小さな外力に対しては流体のように振る舞い、大きな外力を加えると急激に固化する。その粘稠化における流体のマクロな内部構造やメカニズムはよくわかっていない。本研究ではテイラー・クウェット型の流れについて、数値計算と実験をおこない、粘稠化時の流体内部での粘度と圧力の空間分布を初めて明らかにした。特に圧力は、変形によって引き伸ばされる方向と圧縮される方向についてそれぞれ負圧と正圧を示し、負圧が支配的であることがわかった。正圧が外力に比例するのに対して、負圧は粒径を特徴長さにとったラプラス圧を超えない。このことから、粘稠化には間隙流体の表面張力が重要な役割を担っていることがわかった。

研究成果の概要(英文)：A dense mixture of granules and liquid often shows a discontinuous shear thickening (DST) and is called a dilatant fluid. The mechanism of DST is not clear, and the distribution of pressure or viscosity under DST have never been observed. In the present research, we performed numerical simulation and experiment of Taylor-Couette flow of a dilatant fluid and elucidate the space distribution of the viscosity and pressure, i.e. the thickening regions from a fan-shape bands. These bands distinctly has positive and negative pressure, and the bands in stretching (compressing) direction had negative (positive) pressure. The pressure in the positive domains increases linearly with the external shear stress, while the negative pressure does not seem to depend on external stress, but remains below the Laplace pressure. As for the negative pressure, it should be caused by the fluid in the interstitial space that tends to expand upon deformation of the medium due to Reynolds dilatancy.

研究分野：流体物理学

キーワード：ずり粘化 ダイラタント流体 レオロジー 懸濁液

1 研究開始当初の背景

粒径が数 μm から数十 μm の粉体の濃厚な懸濁液は、ずり薄化 (shear thinning) やずり粘化 (shear thickening)、降伏応力の発生など様々な非ニュートンの性質を示す。特に、片栗粉やコーンスターチに水を加えた濃厚な懸濁液は、ダイラタント (dilatant) 流体と呼ばれ、急激なずり粘化を起こすことで知られている。

ずり粘化の機構について、最近の研究から二つの異なる説が有力視されている。

一つは、粉体のレイノルズ膨張によって発生する間隙流体の負圧を原因とする説である。懸濁液に棒などを差し込んで変形させると、粉体のかさ体積の増加が起こる。新たに発生した間隙に水が吸収されるので、懸濁液の表面は乾く。すると水の表面は、粉体粒子と同程度の曲率半径をもつので、流体内部には表面張力による負圧が発生する。この負圧によって懸濁液全体が大気圧に押し付けられ、媒質が固化するのである。

もう一つは、懸濁液内の粒子間の摩擦によるジャミングを原因とする説である。シミュレーションによる数値実験から、粉体粒子間に摩擦を導入した場合にのみ激しいずり粘化が起こることが示されている。

最近の国内外の研究動向に注目すると、ダイラタント流体においては粒子間の流体力よりも直接接触による摩擦力が支配的であるとする実験結果がおおく PRL などの有力紙に掲載されており、ずり粘化の原因は摩擦によるジャミングであるというコンセンサスが形成されつつある。一方で、ジャミングにおける粒子間の流体力の役割については議論が深まっていない。

2 研究の目的

ダイラタント流体では、2種類のメカニズムによるずり粘化が、別々あるいは混合して

同時に発生するという視点から研究を行なった。それぞれのずり粘化の性質を実験的に明らかにすることで、ダイラタント流体のレオロジーの解明を目指すのが本研究計画の目的である。

3 研究の方法

実験装置の概略を図1に示す。片栗粉と塩化セシウム (CsCl) 水溶液との混合物を用いた。CsCl 水溶液は、片栗粉の沈殿を防ぐために密度を調節してある。図2にレオメータによる測定で得られた片栗粉・CsCl 水溶液系のフローカーブを示す。この混合物を幅が4 cm のテイラー・クウェット型のセル内に満たし、内側の軸を一定のトルクで回転させた場合の流体内の圧力変化、および主軸に加わる偏心力を測定した。

一方、本研究グループが開発したずり粘化流体の数値モデルを用いて、同様の系の3次元シミュレーションを行った。この数値計算から流体内部での粘土と圧力の分布を取得し、実験との整合性を検討した。

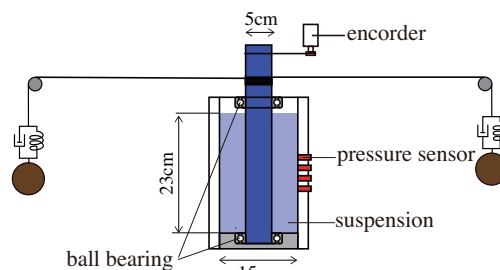


図1 実験装置概略

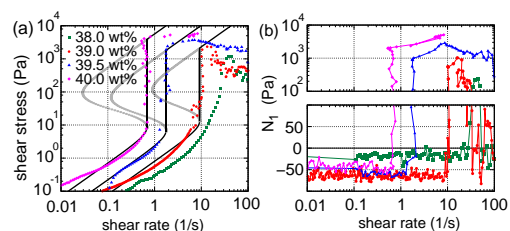


図2 片栗粉・CsCl 水溶液系のフローカーブ。(a) シアストレス、(b) 垂直応力差。

4 研究成果

実験とシミュレーションの双方から、ずり粘化を起こすダイラタント流体の内部におけるダイナミクスを明らかにした。流体全体が一様に粘化する状態は不安定であり、粘化領域は流体内で強く局在化する傾向があることがわかった。テイラー・クウェットセル内においては、扇型のバント状の粘化領域が形成され、その圧力分布は負圧が支配的であることを見出した。

■内壁圧力と偏心力 回転軸に加わる流体による偏心力の時間変化を、それぞれ90度ずつ異なる4方向についてプロットすると、位相が1/4波長づつことなる波形が得られた [図3(a)]。また内壁での圧力について、偏心力との同時測定において周期と位相が一致している。この結果から、流体内では粘化領域が1本のバンドを形成し、それがおよそ2秒程度の周期で回転していることが予想できる。さらに粘化領域の圧力は、正圧を持つ領域と負圧を持つ領域があり、負圧を伴う領域の方が常に支配的であることを見出した。

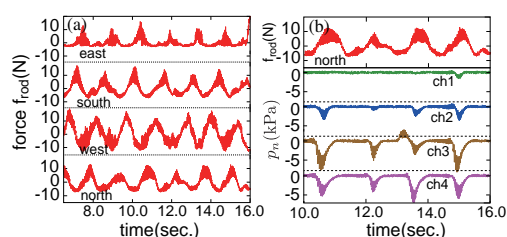


図3 (a) 回転軸の偏心力 (b) 偏心力と内壁圧力の時間変化。

■流体内の圧力・粘度分布 数値シミュレーションによって得られた、流体内の圧力分布と粘度分布は、我々の実験結果は裏付ける結果であった。図4にテイラー・クウェットセル内での粘度の分布と圧力の分布を示す。全体が静止している状態から中心軸にトルクを加えると、せん断応力が一定値を超えた時点で、

全体が一様に粘化する。しかし、せん断応力が一定値よりも大きい場合、一様な空間分布は不安定となる。時間の経過とともに粘化領域は局在化し、一本のバンドを形成する。この粘化バンドは、図4に示す通り正圧と負圧を伴い負圧がより支配的であることがわかった。

■負圧と表面張力の関係 回転軸に加えるトルクを変化させて、観測される圧力の大きさを調べると、正圧がトルクに比例して増大するのに対して、負圧の最小値は一定値で頭打ちになる結果を得た。その値は、片栗粉の平均粒径と間隙流体の表面張力から決まるラプラス圧にほぼ一致することがわかった。片栗粉の直接接触による粒子間力は、圧力センサーの感圧面に対して正圧（面を押す方向の圧力）しか及ぼし得ない。よって、実験において観測される負圧は間隙流体のみに寄与であることに注意すれば、粘化領域では、ダイラタンシーによる間隙の膨張が流体の表面張力によって抑えられていることが示唆される。

本研究によって、ダイラタント流体におけるずり粘化には、圧力の正負によって2種類に分類できることがわかった。それぞれの領域について、その粘化のメカニズムの相違やレオロジーの違いなどを明らかにしていくことが今後の重要な課題である。

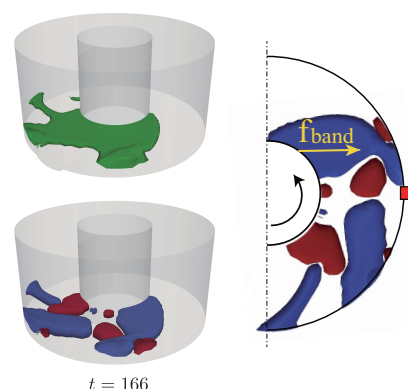


図4 セル内の粘度分布 (左上)、圧力分布 (左下・右)。赤が正圧、青が負圧の領域を表す。

5 主な発表論文等

(雑誌論文 1 件)

- ① S. Nagahiro and H. Nakanishi, "Negative pressure in shear thickening band of a dilatant fluid", Phys. Rev. E **94**, 062614 (2016) arXiv/1511.05250

(学会発表 7 件)

- ① H. Nakanishi and S. Nagahiro, "Negative pressure in shear thickening bands of a dilatant fluid." KITP Conference: Non-linear mechanics and rheology of dense suspensions: Nanoscale structure to macroscopic behavior.(2018)
- ② H. Nakanishi and S. Nagahiro, "Negative pressure in shear thickening bands of a dilatant fluid." Hungary-Japan (HAS-JSPS) Workshop on "Physics of Rheology and Fracture" Dec. 2016, Kyushu Univ.
- ③ S. Nagahiro, H. Nakanishi and N. Mitarai, "Negative pressure in shear thickening bands of a dilatant fluid." STRONGLY NONLINEAR DYNAMICS AND ACOUSTICS OF GRANULAR METAMATERIALS, July 2016, Grenoble (invited talk)
- ④ 西浦和孝、永弘進一郎"一様流中ではためくシートの負の抗力係数" 2016 年 3 月 日本物理学会春季大会、東北学院大学
- ⑤ 永弘進一郎, 中西秀, 御手洗菜美子"ダイラタント流体のずり粘化メカニズムと負圧を伴う粘化領域" 2016 年 3 月 日本物理学会春季大会、東北学院大学
- ⑥ 永弘進一郎, 中西秀, 御手洗菜美子"ずり粘化振動における負圧を伴う粘化領域" 2016 年 12 月 ソフトマター研究会、東北大学

- ⑦ 永弘進一郎, 中西秀, 御手洗菜美子"ダイラタント流体のずり粘化メカニズム-最近の進展" 2015 年 6 月 箱崎キャンパスセミナー、九州大学

6 研究組織

(1) 研究代表者

永弘 進一郎 (NAGAHIRO Shin-ichiro)
 仙台高等専門学校・総合工学科・准教授
 研究者番号：20419154

(2) 研究分担者

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