

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 2 日現在

機関番号：51303

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760145

研究課題名(和文)並進平板上に垂下する液膜・液糸のダイナミクス

研究課題名(英文)Dynamics of viscous threads or sheets onto moving surface

研究代表者

永弘 進一郎(NAGAIRO, Shin-ichiro)

仙台高等専門学校・機械システム工学科・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、(間接経費) 1,080,000円

研究成果の概要(和文)：並進平板上にシート状あるいは糸状の粘性流体を垂らすと、条件によって様々な振動パターンが発生することが知られている。我々はとくに樹脂フィルムの製造過程で問題となっている平板の並進速度が高速である場合の液膜挙動の不安定化と振動の発生メカニズムを探るために実験と理論の両面から研究を行った。液膜を構成する流体がニュートン流体である場合、平板の速度が十分に大きければ液膜の挙動は安定であることが解った。そこで我々は流体の非ニュートンの性質が不安定化の原因であると予想し、実際にずり粘化の性質を持つ流体が一定応力下で自発的に振動することを理論的に予想した。この振動は実験的にも存在することを確かめた。

研究成果の概要(英文)：A viscous thread or sheets falling onto a horizontally moving surface shows various oscillating patterns. In the present study, we investigate the instability of viscous sheets focusing on the spontaneous oscillation on the rapidly moving drum that affects the manufacturing of polymer sheets. We found that, if the fluid is Newtonian, viscous sheets are always stable when the speed of moving surface is sufficiently large, and expected that non-Newtonian nature of fluid should be taken into account. We propose fluid dynamics model of shear thickening and thinning fluid and theoretically predict a spontaneous oscillation of shear thickening fluid under constant stress. Using the density-matched starch-water mixture we also observed the oscillation experimentally.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学 流体工学

キーワード：粘性流体 不安定化 大変形する界面

1. 研究開始当初の背景

流れは、系を特徴づけるレイノルズ数がある値を超えたときに不安定化し乱流状態へ転移する。いっぽう低レイノルズ数領域では、強い粘性が波長の短いモードを抑える為に、複雑な現象は生じにくい。しかし、流体の表面が拘束されておらず、自由に変形できる表面を持つ場合には、低レイノルズ数領域での不安定化現象が存在しうる。本研究課題がテーマとする流体の平板上への垂下はその一例である。粘性が十分に大きくなると、定常的な流れが不安定化し平板の近くで座屈が生じる。これによって糸状（あるいは膜状）の流体が振動し、折り畳まれる。

このような流体の座屈不安定化の問題は、半世紀ほど前から多くの実験的・理論的な研究がなされて来た。我々は本研究課題とは独立して液糸のダイナミクスを記述する微分方程式モデルをすでに提案していた。そのモデルを並進平板上での液糸・液膜へ拡張しその不安定化の要因を探るべく研究を開始した。

2. 研究の目的

本研究課題では、水平方向に並進する平板上に垂下する液糸・液膜のダイナミクスの解明を目的とする。並進速度が比較的遅い場合には、座屈による様々な振動モードが生じることが知られているが、並進速度が十分に早い場合は、流体平板に引き延ばされて座屈は起こらないと考えられている。しかし、これに反する結果が、樹脂フィルムの製造工程において知られている。樹脂フィルムの製造では、シート状に射出された液状の酢酸セルロース樹脂が回転するドラム上に垂下して冷却・固化し、フィルムとして巻き取られる。巻き取り速度が早い場合液膜が振動し、膜厚などに影響することが問題となっている。このような振動は、ニュートン流体を考える限り説明することが出来ない。我々は振動の原因が流体の非ニュートン的な性質——ずり粘化(Shear Thickening)あるいはずり薄化(Shear Thinning)——にあるだろうと予想し研究を行う。

3. 研究の方法

前節にて触れた目的のもと、非ニュートン流体のダイナミクスを記述する流体力学モ

デルについて説明する。

非ニュートン流体の流体力学モデルでは、流れの内部状態を表す現象論的なスカラーのパラメータ場 ϕ ($0 \leq \phi \leq 1$) を導入する。非ニュートン流体の粘性は $\eta(\phi)$ の形で、 ϕ に依存する関数とする。この関数形について、 $\eta(0)$ が一定値をもち、 ϕ の増加とともに粘性が増加する関数をとれば粘化、減少する関数をとれば薄化である。 ϕ の定常値を ϕ^* とし、 ϕ^* の値は流体に加わっている局所的な応力 S について

$$\phi = \phi_m \frac{(S/S_0)^2}{1+(S/S_0)^2}$$

とする。ここで、 ϕ_m は ϕ の最大値、 S_0 は単位応力である。 ϕ は緩和時間 τ で ϕ^* へ緩和するものとし、

$$\frac{D\phi}{Dt} = -\frac{1}{\tau}(\phi - \phi^*)$$

D/Dt は物質微分を表す。流体のダイナミクスは、Navie-Stokes 方程式を解くが、粘性係数が現象論パラメータ ϕ と結合している。

以下では、非ニュートン流体としてずり粘化流体を考える。ずり粘化流体の典型的な例は、コーンスターチや細かなガラスビーズのペーストである。ずり粘化は急激に起こり、ゆっくりと緩和する。その性質を表す為に、緩和時間 τ は局所的なせん断率の逆数に比例すると仮定する。図1に、上下壁に一定の応力 $Se=1.1$ を与えた場合の単純ずり流れ(流れ方向の速度は一様で、流れに垂直な方向のみ物理量の変化がある条件下)の平均せん断率の時間変化を示す。流れの幅がある閾値を超えると、自発的な振動が表れることがわかった。急激な粘化によるせん断率の低下と緩やかな緩和による上昇からなる、のこぎり型の波形が表れる。

流体の内部状態に空間的な非一様性が存在する場合、一様な粘化状態は不安定化し、局在化した粘化領域が現れる。図2にテイラー・クウェット流れにおける粘化領域の時間発展を示す。内側の回転軸に一定のトルクを加え、外側の壁は静止している。粘化領域は回転軸から外側へ向かって伸び、外壁に達すると流れは急速に減速する。その後、外力によって粘化領域が引き延ばされて回転速度

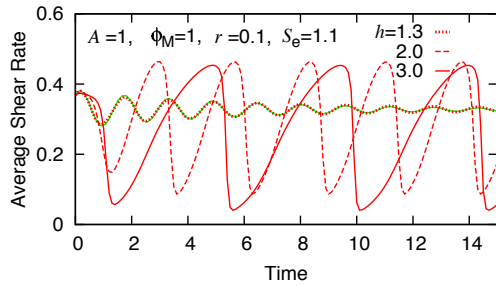


図1 一様な単純ずり流れにおける平均せん断率の時間変化。

が増加し、また新しく粘化領域が中心から成長する。この繰り返しのよって自励的な振動が起こる。

4. 研究成果

モデルによるシミュレーションから、単純な境界条件を与えた流れについても自発的な振動が起こる可能性があることが予想された。つぎに、この自励振動が実際に存在することを確かめる為に我々は実験を行った。

実験手法

実験装置の概略を図3に示す。流体は二重円筒内に充填し、内側の軸を一定のトルクで回転させる。そのために、回転軸にワイヤーを巻き付け、ダンパーバネを介した重りで荷重を加える単純な方法を用いる。流れの幅 h は $1\text{ cm} \sim 5\text{ cm}$ であり、回転軸にロータリーエンコーダを取り付け角速度の計測を行う。回転軸はシールドベアリングで二点指示し、流体は大気圧へ解放されている。回転軸の直径は 5 cm である。

流体は片栗粉（ホクレン）と水のペーストを用いる。片栗粉は直径が $20 \sim 40\ \mu\text{m}$ 程度の非球形の粉体である。水の中では沈殿するため比重を調整した塩化セシウム水溶液を用いる。 50°C で数日間乾燥させ常温に冷やした片栗粉に対して、塩化セシウムの濃度は $55 \sim 58\text{wt}\%$ である。片栗粉ペーストの濃度は $41\text{wt}\%$ と $42.5\text{wt}\%$ である。混合後、真空容器に入れて 99% の真空状態に 10 分以上放置する。これによってペースト内に含まれる空気を取り除いた。また、ペーストは長時間放置すると粒子が膨潤するため、実験毎に新しく用意する必要がある。

実験結果

図4に回転軸の角速度を時間の関数とし

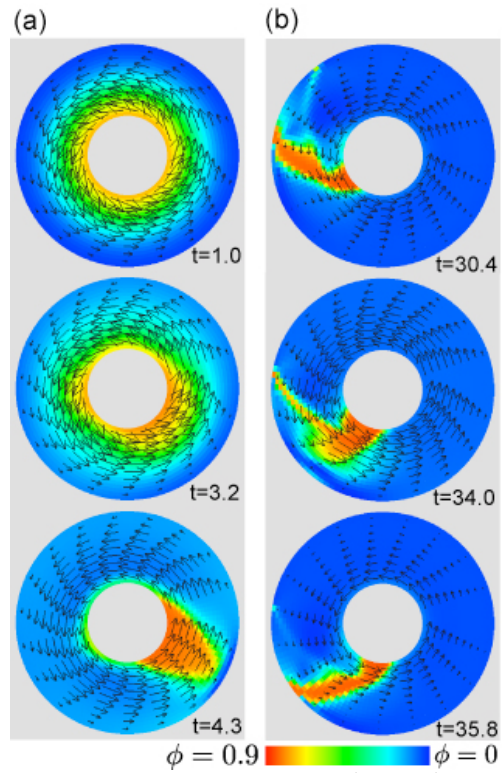


図2 テイラー・クウェット流れに流れのスナップショット。

てプロットしたグラフを示す。ペーストの濃度が $41\text{wt}\%$ と $42.5\text{wt}\%$ の場合について、回転軸表面での応力 S_e が 0.1 kPa から約 1.0 kPa についてそれぞれ図示した。濃度および応力に依存せず、ほぼ 20 Hz の振動を観測した。 $41\text{wt}\%$ の場合は S_e が小さい領域にて 5 Hz 程度の振動が起こり、 S_e の増加するにつれてクロスオーバーを経て振動数が 20 Hz へ変化する。ペーストの濃度 $42.5\text{wt}\%$ では、角速度の緩やかな上昇と急激な減少から成るのこぎり型の波形が現れ、これはシミュレーションの結果と定性的に一致している。

さらに図5に、流れの幅を 2 cm から 5 cm まで 1 cm 刻みで変えたそれぞれの場合について、振動数と振幅をせん断応力 S_e の関数として示した。振動数は外力や流れ幅にほと

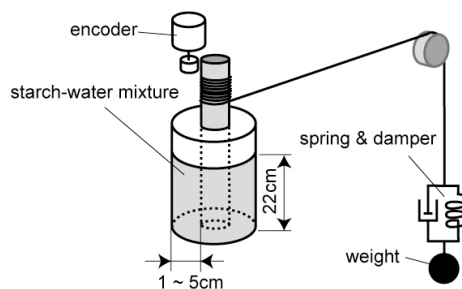


図3 実験装置の概略図

んど依存せず一定の値をとる。20Hz の振動は、せん断応力が一定の大きさを越えたときに起こり、その閾値に置ける振動数が有限の値であることから、ずり粘化流体の自励振動は Hoph 型の分岐として起こることが解った。

議論と総括

本研究で我々が得た成果は

- ・ 非ニュートン流体のダイナミクスを記述できる流体力学モデルを用いて、単純ずり流れについてずり粘化流体が一定応力の下で、自励振動を示すことを理論的に示した。
- ・ ずり粘化流体のテイラー・クウェット流れについて、実験的に自励振動が存在することを確かめた。

の2点に要約される。

本研究課題にて我々は、並進平板上における液膜と液糸のダイナミクス、特に液膜の不安定化と振動の発生機構に着目して研究を行った。シミュレーションから、通常のニュートン流体の場合には樹脂フィルムの製造工程で問題となっている膜の自励振動が起こりえないことを確認し、我々は振動の原因が流体の非ニュートン性にあると予想した。数値モデルと実験によって、単純ずりの境界条件に置いても流体が一定応力下で自発的な振動を起こすことが確かめた。

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) S. Nagahiro, H. Nakanishi and N. Mitarai, "Experimental observation of shear thickening oscillation",

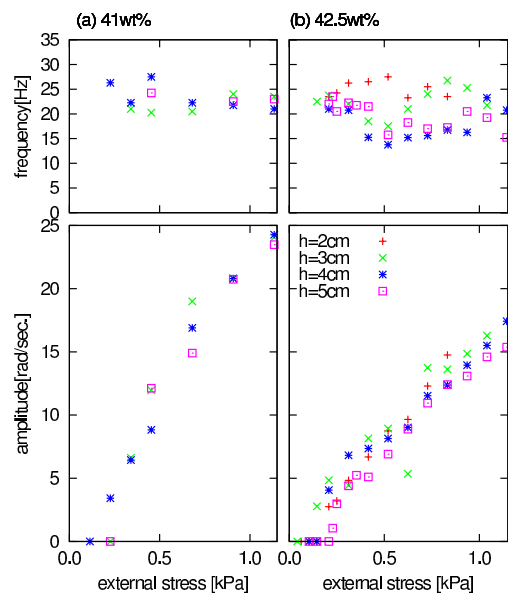


図5 ずり粘化振動における振動数(上段)と振幅(下段)のせん断応力依存性。

Europhysics Letters **104**, 28002 (2013)
査読有り

- (2) H. Nakanishi, S. Nagahiro and N. Mitarai, "Fluid dynamics of dilatant fluid", Physical Review E, **85**, 011401 (2012) 査読有り

[学会発表] (計6件)

- (1) 永弘進一郎、中西秀、御手洗菜美子、"ずり粘化振動における不均一粘化構造の実験的観測" 日本物理学会年次大会、2014年3月28日、東海大学
- (2) S. Nagahiro, H. Nakanishi and N. Mitarai, "Shear Thickening Oscillation in dilatant fluid." レオロジー討論会、2013年9月26日、山形大学(招待講演)
- (3) S. Nagahiro, H. Nakanishi and N.

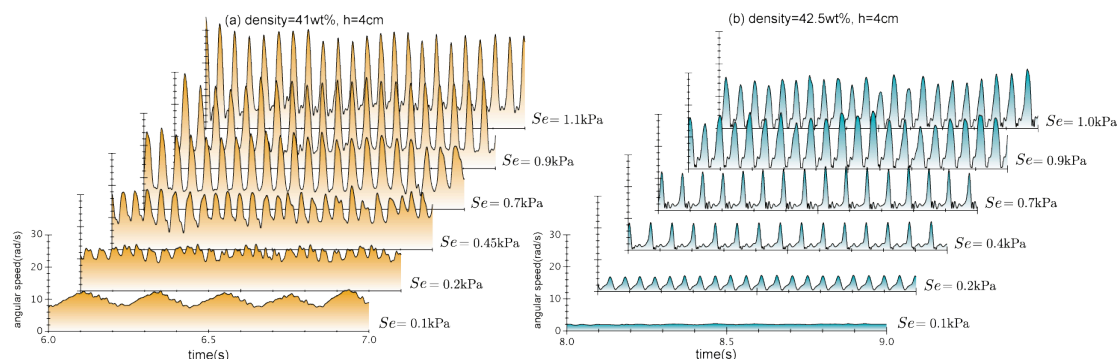


図4 回転軸の回転各速度の時間発展。(a)ペースト濃度 41wt%、(b)42.5wt%であり、各グラフの横に示した値 Se は回転軸表面におけるせん断応力を表す。

- Mitarai, "Experimental Observation of shear thickening oscillation." Physics of Granular Flows, 2013年6月26日、京都大学基礎物理学研究所（招待講演）
- (4) S. Nagahiro, H. Nakanishi and N. Mitarai, "Shear Thickening Oscillation in a Dilatant Fluid." APS March meeting 2013, 2013年3月18日~21日, Baltimore
- (5) 永弘進一郎、中西秀、御手洗菜美子、"ダイラント流体のずり粘化振動の実験観測" 日本物理学会秋季大会、2012年9月19日、横浜国立大学
- (6) 永弘進一郎、中西秀、御手洗菜美子、"ダイラント流体のずり粘化振動" 非平衡系の物理—その普偏的理解を目指して、2012年8月3日、京都大学基礎物理学研究所

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 機械システム工学科
准教授

研究者番号：20419154