

令和 4 年 6 月 24 日現在

機関番号：55301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04203

研究課題名(和文) 流動誘起構造を有する複雑流体の伸張粘度を計測する平面伸張レオメーターの開発

研究課題名(英文) Development of planar elongational rheometer to measure the extensional viscosity of complex fluids with flow-induced structures

研究代表者

加藤 学 (KATO, Manabu)

津山工業高等専門学校・総合理工学科・教授

研究者番号：20370017

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、流動誘起構造変化後の伸張粘度を評価することのできる伸張レオメーターを実現するために、低粘度の粘弾性流体の平面伸張流動特性を評価可能な全く新しい測定手法を提案する。これは平行リング間に試験流体を充填しリングを引き離すことでリング間に円筒状フィルムを成形し、その際の膜厚変化および平面伸張応力を計測するシステムである。本研究では、本システムの開発に成功し、流動性の高い粘弾性流体の平面伸張変形下において力と変形の関係が直接的に観察可能となった。円筒膜の膜厚は重力の影響で徐々に薄くなり、この変化が安定した際に伸張変形を加えることで平面伸張応力と平面伸張粘度が評価可能であることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で得られた測定結果は、流動性の高い粘弾性流体の平面伸張変形時の応力と変形の様子を力学的手法で捉えた初めての測定例である。平行平板リングの間に円筒膜を形成することで試験流体に平面伸張変形を加える本手法は非常にシンプルであり、様々な計測機器との組み合わせが容易である。本研究では、膜厚測定器とロードセルとを組み合わせることで、平面伸張粘度まで評価が行えることを示した。加えて、本手法は既存の回転型レオメーターをプラットフォームとして用いることができ、回転型レオメーターのアクセサリーとして制作することで世界中での利用が可能で複雑流体測定技術に大きなインパクトが期待できる。

研究成果の概要(英文)：In order to develop elongational rheometer that can evaluate elongational viscosity after flow-induced structural changes, we propose a completely new measurement method that can evaluate planar elongational flow characteristics of low viscosity viscoelastic fluids. This system measures film thickness change and planar elongational stress by forming a cylindrical film between parallel rings by filling the test fluid between the rings and pulling the rings apart. In this study, the system was successfully developed, and the relationship between force and deformation can be directly observed under planar elongational deformation of low viscous viscoelastic fluid. The thickness of the cylindrical film gradually decreases under the influence of gravity. When this change becomes stable, elongational deformation is applied, and it is confirmed that the planar elongational stress and viscosity can be evaluated.

研究分野：流体工学

キーワード：平面伸張粘度 平面伸張レオメトリー 動的粘弾性試験 静的粘弾性試験

## 様式 F - 19 - 2

### 1. 研究開始当初の背景

非圧縮性流体の変形（流動）は、せん断変形と伸張変形に大別され、変形の理解や予測にはせん断粘度と伸張粘度の両方が必要とされる。水や油などニュートン流体では、せん断粘度と伸張粘度の比 ( $Tr$ ) は決まっており、せん断粘度さえ測定すれば伸張粘度を計測する必要はない。しかし、流体が複雑流体（高分子、界面活性剤、インク、液晶など）の場合には、 $Tr$  は流動条件や分子構造に大きく依存し、せん断粘度から予測される値と大きく異なる。加えて、流動によって流体内部のマクロ構造の変化を伴う複雑流体では、構造変化後の伸張粘度はその測定手法すら確立していない。インクなどの液滴生成や塗布など構造変化と伸張粘度の両方を考慮する必要がある場合や、これらの高機能化や高性能化には、流動誘起構造と伸張粘度の関係を計測する技術開発が必須である。

### 2. 研究の目的

本研究では、流動誘起構造変化後の伸張粘度を評価することのできる伸張レオメーターを開発する。この手法は、平行リング間に試験流体を充填しリングを引き離すことで円筒状フィルムを成形し、その際の膜厚変化および平面伸張応力を計測するシステムである。そのために、以下の項目について順番に実施する。

平行リングを用いた円筒フィルム成形とフィルム膜厚計測装置システムの構築

円筒フィルム成形のための平行リングに作用する力の計測装置の追加

計測結果から平面伸張粘度の評価の実施

### 3. 研究の方法

(1) 平行円板リングを用いた平面伸張変形 図1に平行円板リングの概略図を示す。上下プレートの外縁部分に試験流体を挟み込み、円板リングを引き離すことで、平板間に円筒状の膜が成形させる。この時、試験流体には平面伸張変形を受ける。この方法の特徴は、試料の両端を掴むことができない程度の低粘度の流体を扱うことが可能な点である。さらに、短冊状のフィルムを伸張させることに比べて、円筒形にすることで伸張方向に沿う両端をなくすことができ、より一様な平面伸張変形を試料に加えることができる。加えて、円板の内外直径を適切に選ぶことで試料の特性に合わせた計測が可能になると考えられる。表1に使用したリングサイズを示す。比較的測定結果が安定して得られたリングサイズのみを示してある。それぞれ中央部分には取り付け用の穴がある。試験流体は上下プレートの外縁部分で挟み込まれる。下部プレートには外縁部から流れ出した流体が流れ落ちないように液だまり部分がある。他方の上部プレートは、円筒膜に空気の出入りができるよう中心の十字部分以外は空洞にしてある。

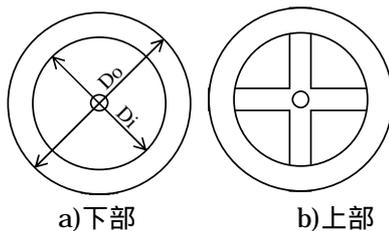


図1 平行円板リングの概略図

	動的試験	静的試験
Do	10	80
Di	40	60

(2) 実験装置 図2に実験装置の概略図を示す。上下プレート間に試験流体を充填し、下部プレートを下方向に移動させることで平面伸張変形を加える。下部プレートの移動は、ステージ部分をボールネジの回転によって制御する。上部プレートはロードセルに接続されており、下部プレートによって生じる上部プレートに作用する力を伸張力として計測する。力の計測と共に、図に示すように膜厚計を固定して円筒フィルムの厚さの計測を行う。センサーヘッドから 15 mm

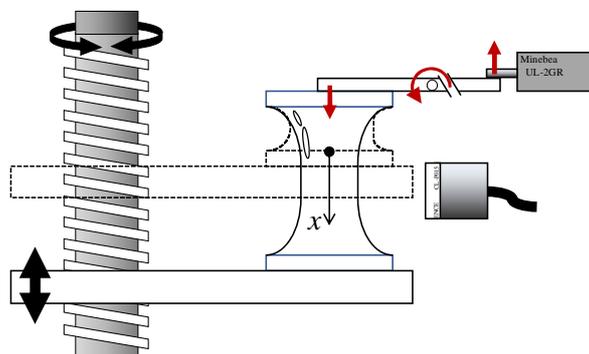
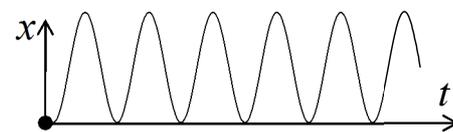


図2 実験装置全体の概略図

#### a) 動的試験



#### b) 静的試験

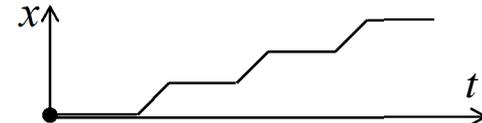


図3 下部プレートの移動

の位置を基準に $\pm 0.5$  mm の領域が計測可能範囲となる。図3は平板リングの移動の様子を示して

いる．初期位置を原点として伸張方向に  $x$  軸をとった場合の  $x$  の時間的变化を示している． $x$  を正弦的に変化させる動的試験と一定速度で変化させる静的試験の二種類の試験を実施した．それぞれの実験条件を以下に示す．

表 2 実験条件

動的試験		静的試験	
振幅 A mm	0.1, 0.2, 0.3	移動量 X mm	8.00
周波数 f Hz	0.10, 0.15, 0.20 1.00, 1.50, 2.00	移動速度 V mm/s	0.500, 1.00

#### 4. 研究成果

(1)円筒膜の形成 図 2 に平行平板リング（静的試験用）を用いて界面活性剤水溶液に平面伸張変形を加えたときの連続写真である．下部円板プレートを一定速度(0.5 mm/s)で 8.0 mm 下げた際の円筒膜の様子を連続写真で示した． $t=0$  s より伸張変形を開始させ， $t=16$  s で停止する．プレートが移動している間とその後において，いずれも安定した円筒膜が得られることがわかる．また，下部プレートの移動が停止した後も，円筒膜は長時間に渡って保持され，その間に中心に向かって徐々に移動することも確認された．

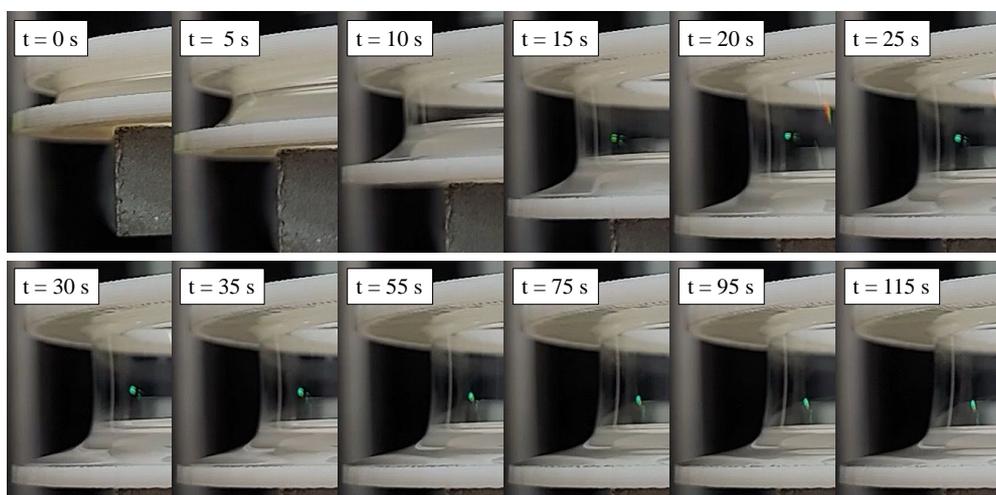


図 4 円板リングによる円筒膜の形成

(2)動的試験の結果 図 4 に動的試験での伸張応力の時間的变化を示す．伸張力から伸張応力への計算には，平板リング外縁の面積を試験流体の断面積として用いた．実線はひずみ量の時間変化を示している．図 4 a)では  $t=15$  s, b)では  $t=8.0$  で下部プレートの移動は停止させた．図 4 より，いずれの条件でも，プレートが正弦的に上下に運動すると，同じ周期で伸張応力も変動していることが確認できる．プレートが停止後の伸張応力は 1 秒程度をかけてゼロに緩和することが確認でき，図 b)ではダウンシュートも確認できる．伸張応力の大きさは，変動周期はひずみと一致するが，ひずみ量に比例した測定結果が得られており，ひずみ速度に比例した伸張応力を反映した測定結果ではない可能性が高い．

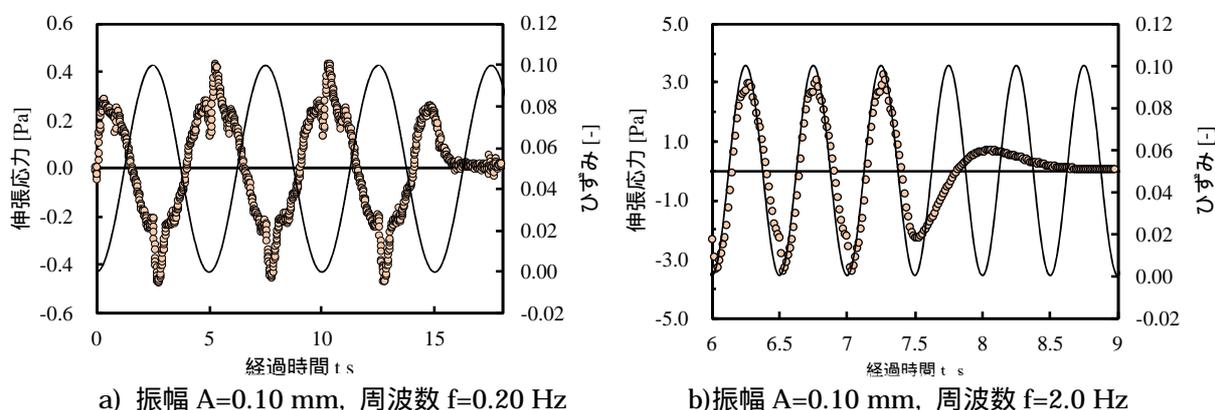
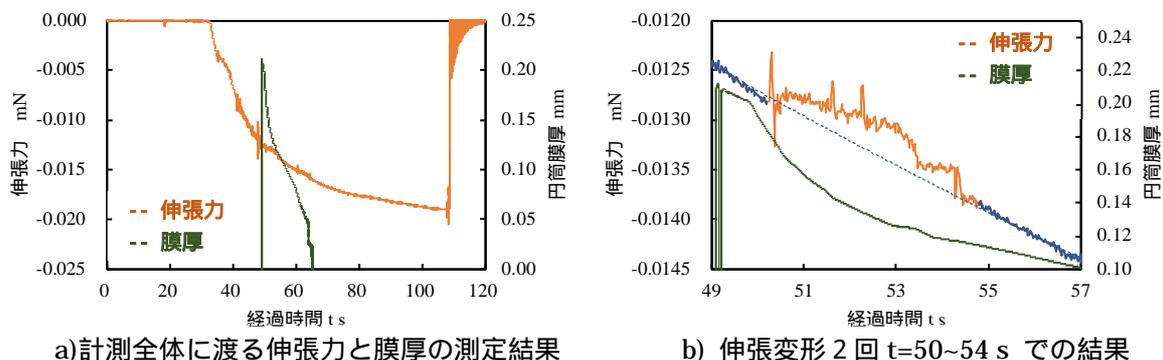


図 5 下部円板リングが正弦的に移動した場合の応力の変動

(3)静的試験の結果 図 6 に静的試験の結果を示す．初期ギャップ 2.0 mm として 18 mm までを

4回に分けて下部プレートを移動させた。移動を開始する時間  $t$  はそれぞれ  $t=40, 50, 65, 75$  s とし、一定速度 ( $V=1.0$  mm/s) で一定距離 ( $X=4.0$  mm) を移動させる。その間の伸張力と膜厚を測定した。図 6 a) より、伸張力は計測開始から減少していき、 $t=30$  s を超えた付近からロードセルの測定可能な範囲に入る。これは、円板リング間の試験流体が下方へ流動することによるものと考えられる。さらに、伸張力の計測値は減少を続け  $t=110$  s 付近において膜が破れることで計測範囲外の値となる。膜厚に関しては、 $t=50$  s から開始される 2 回目の移動 (伸張) の直前で膜が計測可能な範囲に入り  $200 \mu\text{m}$  から  $50 \mu\text{m}$  まで徐々に薄くなるのが確認できる。その後は、膜厚検出の下限値以下となり計測不能となる。次に、膜厚と伸張力が両方計測できた 2 回目の伸張変形前後のデータを拡大して図 6 b) に示す。下部プレートが移動している間の測定データを橙色の実線で示している。 $t=50$  s 付近より減少傾向を示していた伸張力に傾きの変化が生じ、 $t=54$  s で、破線は  $t=54\sim 57$  s 間のデータを対数近似して外挿したものであり、プレート移動前の伸張力も破線と一致していることが確認できる。つまり、プレート移動中以外は同じ傾向で減少を示すことがわかる。すなわち、プレート移動中の破線からの増加部分が伸張変形による寄与と理解できる。膜厚の変化についても、プレート移動中の前後、 $t=50$  s 付近と  $t=54$  s 付近で減少傾向に変化が生じていることが確認できる。この実験結果から、伸張応力、伸張速度  $\eta$  を算出し伸張粘度を算出するとおよそ  $\eta=200$  Pa.s という結果が得られた。



a) 計測全体に渡る伸張力と膜厚の測定結果

b) 伸張変形 2 回  $t=50\sim 54$  s での結果

図 6 円板リングを一定速度 ( $V=1.0$  mm/s) で移動 ( $X=4.0$  mm) させた場合の伸張力の変化

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Y. FUKUSHIMA, M. KATO, T. TAKAHASHI
2. 発表標題 Evaluation of planar elongational viscosity measurement method with parallel rings
3. 学会等名 5th International Conference of "Science of Technology Innovation" 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------