

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 5 月 19 日現在

機関番号：13903  
研究種目：挑戦的萌芽研究  
研究期間：2012～2014  
課題番号：24656121  
研究課題名(和文) UV照射による革新的流動制御システムの開発

研究課題名(英文) Flow control due to UV irradiation

## 研究代表者

玉野 真司 (TAMANO, SHINJI)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：40345947

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：抵抗低減(DR)効果を有する低環境負荷型非イオン性界面活性剤水溶液とフォトレオロジカル(PR)流体との混合溶液を用いて、紫外線(UV)照射により、DR効果を変化させる試みを行った。DR効果とUV照射時間との関係、ならびにそれに及ぼす界面活性剤の濃度、溶液温度、および界面活性剤と紫外線吸収剤のモル比の影響を明らかにした。さらに、液滴の落下・破断現象を利用したDR効果のスクリーニング手法を構築した。

研究成果の概要(英文)：We tried to control the drag-reducing effect of the mixture of nonionic surfactant solution and photo-rheological fluid by using the UV radiation. We clarified the effect of UV irradiation on friction factor versus Reynolds number, and then the effects of solution temperature and the molar ratio of surfactant and photo-reactive additives. Moreover, we proposed the screening method for the drag-reducing property, which is based on the detachment process of the droplet in the transient elongational flow.

研究分野：流体工学

キーワード：流体工学 非ニュートン流体 抵抗低減 省エネルギー レオロジー UV照射 界面活性剤 PR流体

1. 研究開始当初の背景

外部刺激によりレオロジー特性が変化する流体は、粉碎流体、再生医療など様々な応用技術に繋がる可能性があり、その研究はここ数十年で急速に発展している。特に光を要因とするものは、非接触制御が可能のため、センサーシステムやナノエレクトロニクス、マイクロ流体工学などの多くの工学分野での応用が期待されている。

界面活性剤を用いたフォトレオロジー流体では、界面活性剤のミセル構造が光照射によって変化し、それによるレオロジー特性の変化が期待できるため、抵抗低減 (DR) 効果と組み合わせることで、新たな DR 技術を構築できると期待されている。

2. 研究の目的

本研究では、フォトレオロジー流体を構成する界面活性剤と光反応性添加剤として、環境負荷の小さい非イオン性界面活性剤 (AROMOX) とオルトメトキシ桂皮酸をそれぞれ選定し、そのフォトレオロジー流体の DR 効果を実験的に明らかにする。さらに、一軸伸長流れを利用した、抵抗低減効果のスクリーニング方法についても検討を行う。

3. 研究の方法

図 1 に加圧流下式円管流装置の概略図を示す。管内径は  $d = 5.06 \text{ mm}$  で、差圧測定距離および助走距離はそれぞれ  $80 \text{ mm}$  ( $\cong 16d$ ) および  $1050 \text{ mm}$  ( $\cong 210d$ ) である。作動流体は圧力タンクにより加圧された後、細管を通過する。流量は細管出口のニードルバルブにより調整する。本研究では、圧力損失は差圧変換器により、流量は重量法により測定する。ヘッドタンクの壁面の一部が紫外線 (UV) 透過率の良い石英ガラスとなっており、そこから UV を照射する。本実験装置にはコイル式熱交換器、ウォータージャケットなどの温度調整の機構が設けられている。

本研究ではフォトレオロジー流体を構成する界面活性剤として環境負荷が小さい非イオン性界面活性剤であるアロモックス (AROMOX) (ライオン・アクゾ株式会社製) を用いる。AROMOX は、オレイルジメチルアミンオキンド (ODMAO, 分子量 313) を主成分とする混合物である。ODMAO の構造式を図 2 に示す。また、光反応性物質としてオルトメトキシ桂皮酸 (OMCA と呼ばれる UV 吸収剤) を用いる。OMCA は水溶液に添加した際は trans 型であるが、UV 照射によって cis 型に光異性化し、この変化がミセル構造に変化を与えられられている。OMCA の (a) trans 型、(b) cis 型の構造式をそれぞれ図 3 に示す。

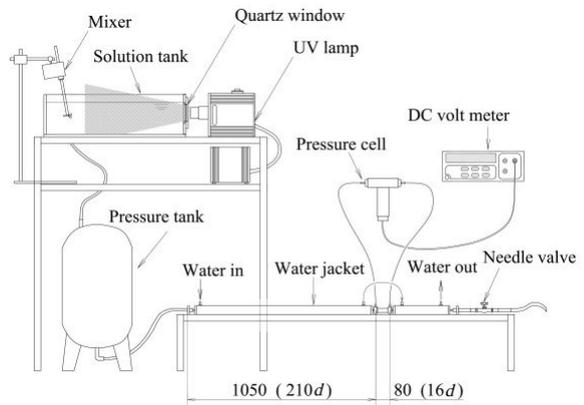


図 1 加圧式円管流の実験装置。

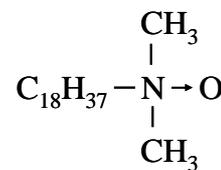
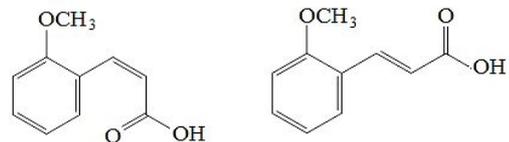


図 2 ODMAO の構造式。



(a) trans-2-OMCA (b) cis-2-OMCA

図 3 OMCA の構造式。

4. 研究成果

図 4 に UV 照射時間を  $t = 0, 4, 8, 12, 16 \text{ h}$  とした場合の溶液 (ODMAO 濃度  $C_s = 500 \text{ ppm}$ , ODMAO に対する OMCA のモル比  $= 0, 0.2, 0.5, 0.8$ ) の管摩擦係数 とレイノルズ数  $Re_w$  の関係を示す。また図 5 に DR [%] とレイノルズ数  $Re_w$  の関係を示す。モル比や UV 照射時間に依らず、溶液はいずれも低レイノルズ数側から見て、レイノルズ数  $Re_w$  が大きくなるにつれて、Hagen-Poiseuille の式とほぼ同じ割合で管摩擦係数が小さくなり、ある  $Re_w$  の値 (臨界レイノルズ数  $Re_{DRmax}$ ) を境に急激に大きくなる (図 4 参照)。抵抗低減率 DR は臨界レイノルズ数  $Re_{DRmax}$  まで大きくなり、 $Re_{DRmax}$  において最大抵抗低減率  $DR_{max}$  となり、 $Re_{DRmax}$  を超えると急激に小さくなる (図 5 参照)。

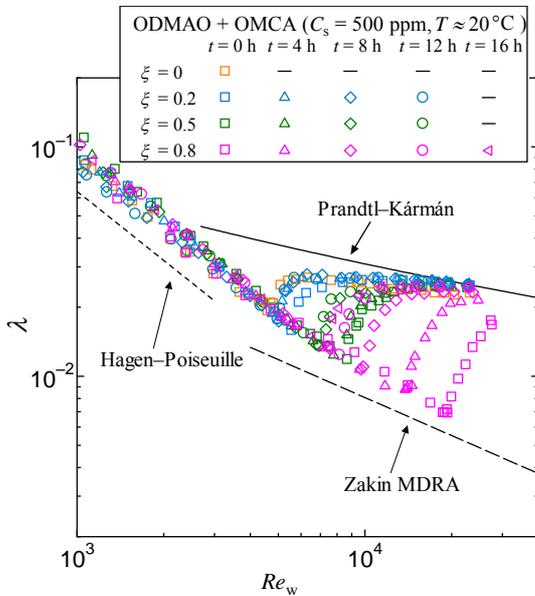


図4 モル比  $\xi = 0, 0.2, 0.5, 0.8$  における管摩擦係数とレイノルズ数の関係。

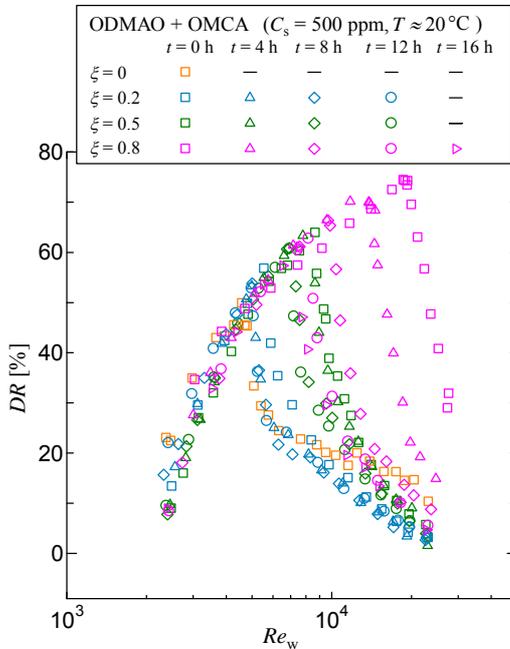


図5 モル比  $\xi = 0, 0.2, 0.5, 0.8$  における抵抗低減率とレイノルズ数の関係。

モル比  $\xi$  が最大抵抗低減率  $DR_{max}$  および臨界レイノルズ数  $Re_{DRmax}$  ( $DR_{max}$  でのレイノルズ数) に及ぼす影響を図6および図7に示す。モル比  $\xi = 0$  の溶液に対し、OMCAを添加することで、 $DR_{max}$  および  $Re_{DRmax}$  はともに大きくなる。また、モル比  $\xi = 0.2, 0.5, 0.8$  においては、UV照射時間の増加に伴い、 $DR_{max}$  と  $Re_{DRmax}$  はともに減少する。ここで、モル比  $\xi = 0.2, 0.5, 0.8$  の溶液がそれぞれUV照射時間  $t \geq 4, 8, 12$  h でDR効果にほとんど変化が見られなくなるのは、trans-OMCA から cis-OMCA への光異性化がそれぞれ  $t = 4, 8, 12$  h でほぼ完了したためだと考えられる。

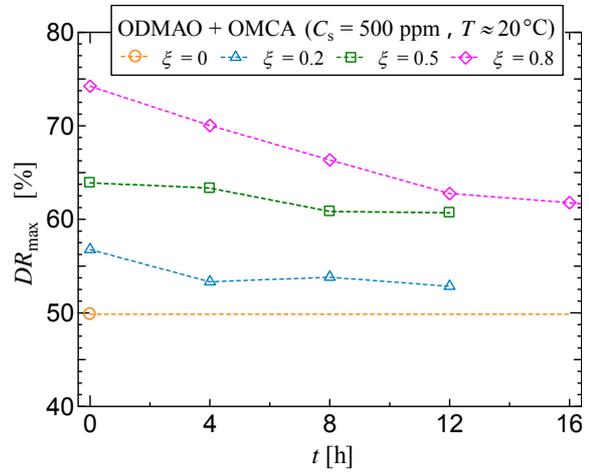


図6 UV照射時間による最大抵抗低減率の変化に及ぼすモル比の影響。

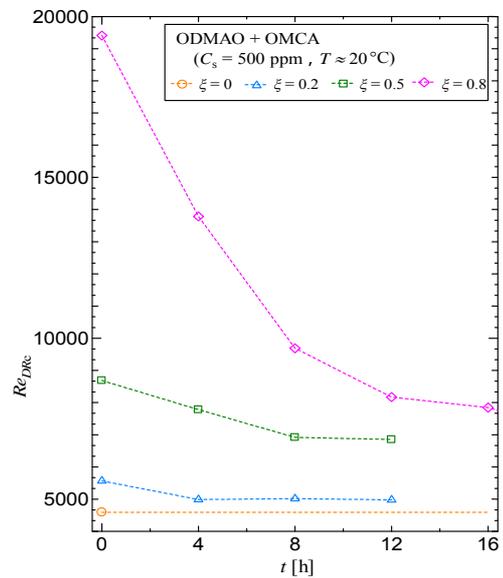


図7 UV照射時間による臨界レイノルズ数の変化に及ぼすモル比の影響。

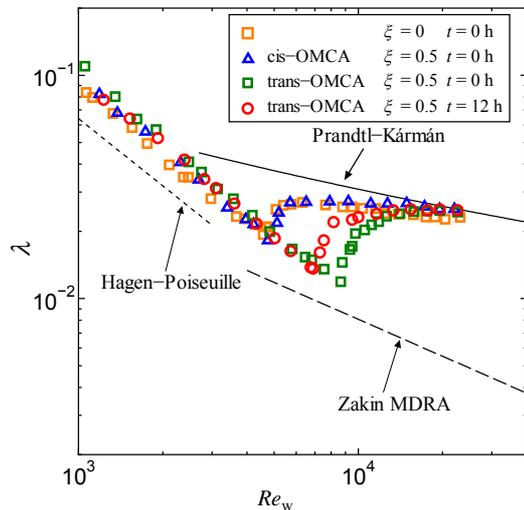


図8 管摩擦係数とレイノルズ数の関係における cis-OMCA と trans-OMCA の比較。溶液濃度  $C_s = 500$  ppm, 溶液温度  $T = 20$  °C。

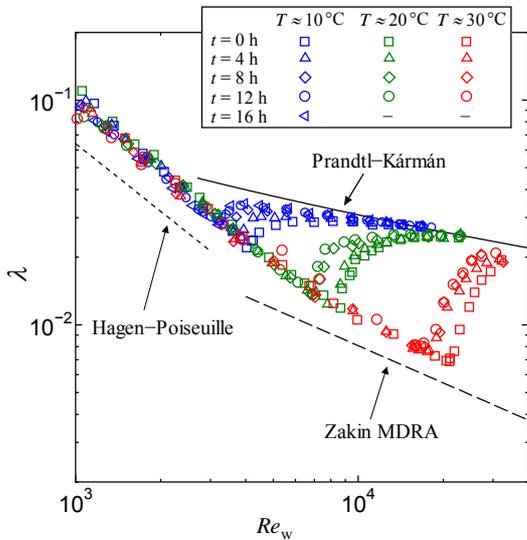


図9 溶液温度  $T = 10, 20, 30\text{ }^{\circ}\text{C}$  における管摩擦係数とレイノルズ数の関係。溶液濃度  $C_s = 500\text{ ppm}$  , モル比 = 0.5 .

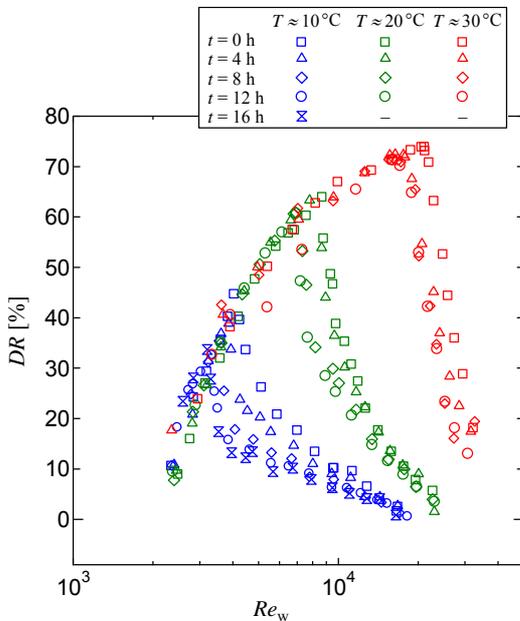


図10 溶液温度  $T = 10, 20, 30\text{ }^{\circ}\text{C}$  における抵抗低減率とレイノルズ数の関係。溶液濃度  $C_s = 500\text{ ppm}$  , モル比 = 0.5 .

このことを確かめるため、ODMAO 水溶液の添加剤として cis-OMCA と trans-OMCA を用いた場合の比較を行う。管摩擦係数 とレイノルズ数  $Re_w$  の関係 (図8 参照) より, cis-OMCA をモル比 = 0.5 で添加した場合には, OMCA を添加しない場合とほぼ同じであることが見て取れる。このことは, cis-OMCA には抵抗低減を大きくする効果がないことを意味し, = 0.5 で trans-OMCA を添加した溶液に UV 照射することにより trans-OMCA から cis-OMCA へと光異性化することで抵抗低減効果が小さくなることと整合している。

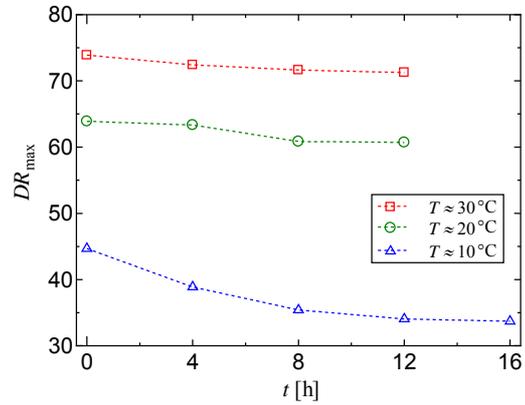


図11 UV照射時間による最大抵抗低減率の変化に及ぼす溶液温度の影響。溶液濃度  $C_s = 500\text{ ppm}$  , モル比 = 0.5 .

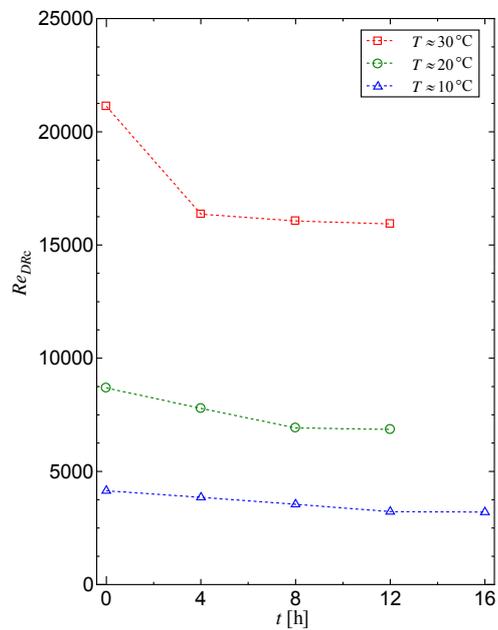
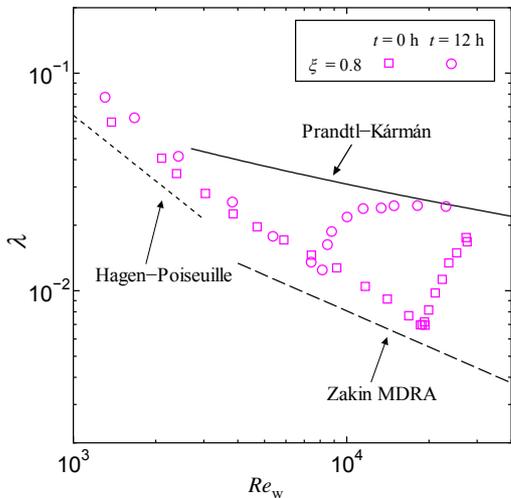
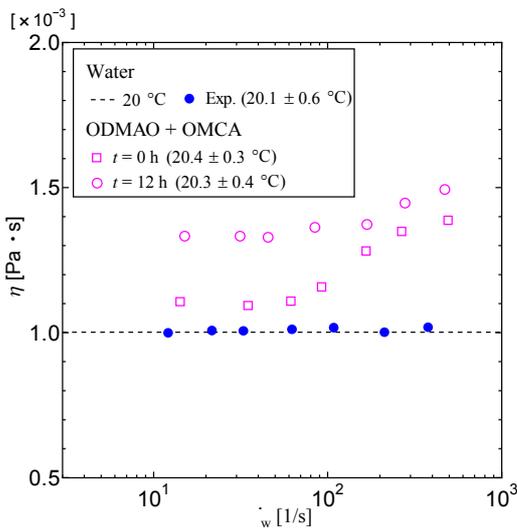


図12 UV照射時間による臨界レイノルズ数の変化に及ぼす溶液温度の影響。溶液濃度  $C_s = 500\text{ ppm}$  , モル比 = 0.5 .

次に, 溶液温度依存性を調べるため, 溶液温度  $T = 10, 20, 30\text{ }^{\circ}\text{C}$  における管摩擦係数とレイノルズ数の関係を図9に, 抵抗低減率とレイノルズ数の関係を図10に示す。また, 最大抵抗低減率  $DR_{\max}$  および臨界レイノルズ数  $Re_{DR\max}$  に及ぼす溶液温度の影響をそれぞれ図11および図12に示す。これらの図より, 溶液温度が高いほどDR効果が大きいことが判る。また, 溶液温度が低いほど, UV照射によるDR効果の変化が大きい。例えば,  $T = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$  ではUV照射により  $DR_{\max}$  がほとんど変化しないが,  $T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$  では  $t = 12\text{ h}$  まで単調に減少する。以上より, UV照射によるDR効果の変化は溶液温度に依存することが明らかになった。



(a) 管摩擦係数 とレイノルズ数  $Re_w$  の関係

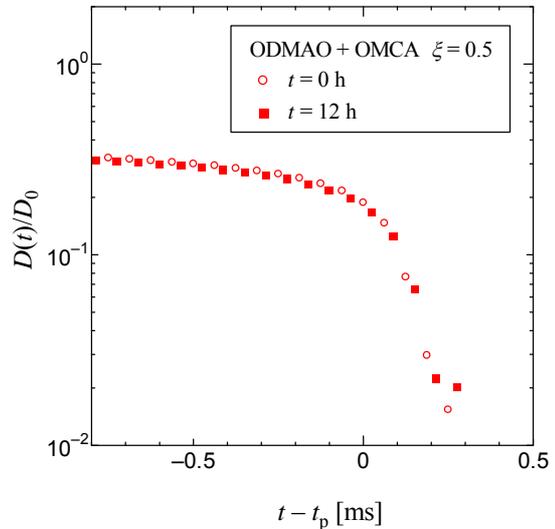


(b) せん断速度とせん断粘度の関係

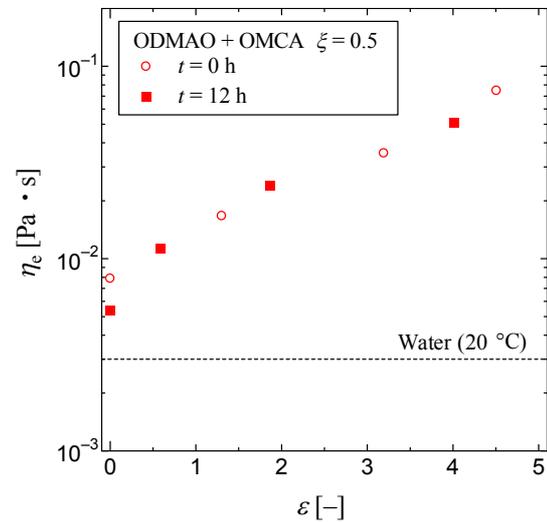
図 1 2 UV照射の有無 ( $t = 0, 12 \text{ h}$ ) による比較. 溶液濃度  $C_s = 500 \text{ ppm}$ , モル比 = 0.8, 溶液温度  $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

ODMAO 濃度  $C_s = 500 \text{ ppm}$ , ODMAO に対する OMCA のモル比 = 0.8 における, UV照射時間を  $t = 0, 12 \text{ h}$  とした場合の管摩擦係数とレイノルズ数  $Re_w$  の関係を図 1 2 (a) に示す. また, これらの溶液について, 自作した細管粘度計により得られた, せん断粘度とせん断速度の関係を図 1 2 (b) に示す. UV照射 ( $t = 12 \text{ h}$ ) により DR 効果が小さくなった溶液のせん断粘度は, UV照射していない溶液のものよりも低せん断速度域で大きくなるのが判る. 今後, さらなるデータ取得により, DR 効果とせん断粘度特性との関係を明らかにする予定である.

次に, 細管 (外径 2.40 mm, 内径 1.90 mm) からの液滴落下 (押出流量 1.0 mL/min) により生じる一軸過渡伸長流れを用いた過渡伸長粘度特性について調査した. 実験には, 自作した過渡伸長粘度計を用いた. LEDマイ



(a) フィラメント直径の時間変化



(b) 過渡伸長粘度とヘンキーひずみの関係

図 1 3 一軸伸長流れにおける UV照射の有無 ( $t = 0, 12 \text{ h}$ ) による比較. 溶液濃度  $C_s = 500 \text{ ppm}$ , モル比 = 0.5, 溶液温度  $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

クロメーター (LS-9006M, 株キーエンス製, サンプル周期 16000 回/s) を用いて測定したフィラメントの直径の時間変化を図 1 3 (a) に, そのデータを基に過渡伸長粘度とヘンキーひずみの関係を算出した結果を図 1 3 (b) に示す.  $t_p$  は臨界時刻 (水のフィラメント破断時刻) である. これらの図より, UV照射前後において, 両者に差がほとんど見られないことが判る. このことは, 現時点においては, 一軸過渡伸長粘度により DR 効果の相違を説明することが出来ないことを意味している. 今後, 測定精度の向上ならびに解析手法の再検討を行う予定である.

## 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)

〔学会発表〕(計 10 件)

玉野真司, 希薄粘弾性流体のレオロジーと乱流抵抗低減, 日本機械学会北海道支部特別講演会, 北海道大学, (2015.1.6), (依頼講演)

大橋陽太, 玉野真司, 森西洋平, 希薄界面活性剤水溶液の一軸伸長流れの過渡特性に関する研究, 第 6 2 回レオロジー討論会, (2014.10.15-17), pp. 1-2.

阿部優剛, 玉野真司, 森西洋平, 非イオン性界面活性剤と光反応性添加剤を用いたフォトレオロジー流体の抵抗低減効果に関する研究, 第 6 2 回レオロジー討論会, (2014.10.15-17), pp. 1-2.

大橋陽太, 玉野真司, 森西洋平, 液滴落下法による希薄界面活性剤水溶液の伸長特性に関する研究, 第 14 回複雑流体研究会, (2014.6.21), pp. 1-2.

阿部優剛, 玉野真司, 森西洋平, 非イオン性界面活性剤を用いたフォトレオロジー流体の抵抗低減効果に関する研究, 第 14 回複雑流体研究会, (2014.6.21), pp. 1-2.

大橋陽太, 玉野真司, 森西洋平, 抵抗低減効果を有する希薄界面活性剤水溶液の伸長粘度計測, 日本レオロジー学会第 41 年会, (2014.5.15-16), pp. 67-68.

玉野真司, 粘弾性流体の乱流境界層流れにおける抵抗低減効果, 第 7 回 I2plus セミナー, 東京理科大学, (2013.11.12). (依頼講演)

玉野真司, 粘弾性流体の乱流境界層流れにおける抵抗低減メカニズムの解明, 日本流体力学会年会 2013 (2013.9.12-14), pp.1-4. (受賞講演)

玉野真司, 粘弾性流体の流動と抵抗低減, 日本レオロジー学会通常総会および第 40 年会, (2013.5.16-17), pp.1-4. (受賞講演)

玉野真司, 希薄界面活性剤水溶液の乱流抵抗低減効果とレオロジー特性, 第 43 回中部化学関係学協会支部連合秋季大会, (2012.11.10-11), p.165. (依頼講演)

〔その他〕

ホームページ等

<http://tamano.web.nitech.ac.jp/>

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

玉野 真司 (TAMANO, Shinji)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 40345947