

平成 30 年 6 月 11 日現在

機関番号：14301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2016～2017

課題番号：16H06889

研究課題名(和文) 可逆的光異性化反応を利用した粘弾性流体による伝熱制御技術の開発とメカニズム解明

研究課題名(英文) Development and Mechanism Elucidation of Heat Transfer Control Using Reversible Photo-isomerization Reaction of Viscoelastic Fluid

研究代表者

栗山 怜子 (KURIYAMA, Reiko)

京都大学・工学研究科・助教

研究者番号：70781780

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：小型熱交換機器類をはじめとする微小流動場における時空間的かつ能動的な熱流動制御の実現に向けて、光刺激によって粘弾特性が変化する光レオロジー流体を伝熱媒体とした新たな制御手法の検討を行った。Azo化合物と界面活性剤を混合した紐状ミセル水溶液を作製し、粘弾性測定ならびに熱伝達率・圧力損失測定を実施した結果、光の波長や照射時間に応じて各特性が可逆的に変化することを確認した。更に染料による流脈線の可視化やPIV測定を行い、光照射条件に応じて二次渦の発生頻度や流れ場の非定常性が変化することを明らかにした。以上より、伝熱媒体の粘弾性を光制御することによる能動的な伝熱・流動制御の可能性を示すことができた。

研究成果の概要(英文)：In order to realize active and spatio-temporal control of thermal flow field in miniaturized heat exchangers, the present study examined the possibility of usage of photo-rheological fluid (PRF), whose viscoelasticity can be tuned by light stimuli, as a heat transfer medium. We prepared wormlike micellar solutions with surfactant and photo-sensitive azo dyes, and experimentally confirmed that the solutions' rheological properties, heat-transfer coefficient and pressure loss penalty reversibly changed depending on light wavelength and irradiation time. In addition, we investigated the flow pattern of PRF by PIV measurement and flow visualization using ink and revealed that the occurrence frequency of secondary vortex and flow unsteadiness were closely related with light irradiation conditions. These results imply the future possibility of active control of heat transfer and fluid flow by reversible control of viscoelasticity of heat transfer medium.

研究分野：熱流体工学，ナノ・マイクロ工学，光計測

キーワード：熱工学 光レオロジー流体 ミセル水溶液 粘弾性 光制御 熱伝達率 圧力損失 流動構造

## 1. 研究開始当初の背景

電子機器をはじめとする工業製品の小型化に伴い、小型熱交換器の更なる性能向上が求められている。しかし、一般にミリメートル以下の微小流路内ではニュートン流体の流れは層流となり、乱流の場合に比べて熱伝達率が低下する。そのため、高分子や界面活性剤を添加した非ニュートン性の粘弾性流体を利用する伝熱促進が盛んに試みられてきたが、熱伝達と同時に圧力損失が増大するというトレードオフ問題が不可避であった。

この問題の解決策の一つとして、光刺激によって粘弾特性が変化する光レオロジー流体 (PRF: photo-rheological fluid) を伝熱媒体として利用することが考えられる。つまり、光照射によって流体の粘弾特性を時空間的かつ可逆的に制御することができれば、伝熱性能と圧力損失のトレードオフを緩和し、高効率な熱交換を実現できると考えられる。

## 2. 研究の目的

本研究は、光刺激によって可逆的な光異性化反応を呈する化合物に着目し、可逆的かつ短時間に粘弾性が変化する PRF を作製する。また、開発した PRF について、光刺激と水溶液の粘弾特性との相関を実験的に把握すると共に、ミリスケールの小型流路において伝熱特性ならびに圧力損失の測定を行い、微小流れ場における時空間的かつ能動的な熱流動制御の可能性を検証する。上記に加えて、染料による流れ場の可視化や PIV 測定を行うことで、光刺激が流動特性に与える影響を評価し、粘弾性と流れ場の様式、伝熱特性との関連やその制御メカニズムを明らかにすることを目的とする。

## 3. 研究の方法

### (1) PRF の作製および粘弾特性の評価

トランス型 シス型の光異性化反応を可逆的に起こす感光性物質として、 $-N=N-$  の分子構造を有する Azo 化合物に着目し、PRF を作製する。光に対する粘弾特性の応答性を高めるために、様々な溶質の組み合わせを検討するとともに、感光性物質が対イオンとしてミセル形成に効果的に作用するよう溶質濃度の最適化を行う。

作製した PRF について、UV-Vis 吸収スペクトル測定を行い、粘弾性変化に関わる照射光波長を推定した後、水銀ランプを用いて PRF への紫外光・可視光照射を行う。様々な条件(波長、照射時間)で光照射を行った PRF について、レオメータによる粘弾性測定を行い、光刺激に対する粘弾特性変化の可逆性および応答速度を確認する。

### (2) 伝熱特性ならびに圧力損失の測定

壁面を等温加熱した銅製のミリスケール蛇行流路内に PRF を送液し、伝熱面全体にわたる平均熱伝達率ならびに壁面摩擦係数の測定を行う。送液する PRF には、事前に、

もしくは流れ場中で照射を行い、粘弾特性を変化させる。各光照射条件について上記の実験を行うことで、光照射による能動的な伝熱性能・圧力損失制御の可能性を詳細に検討する。

### (3) 流れ場の可視化実験

(2) で用いた銅製流路と同寸法のアクリル製蛇行流路に PRF を送液し、染料による流脈線の可視化や PIV (粒子画像流速計) による速度分布計測を実施する。光照射による粘弾性変化に応じた流れの様式の変化を観察し、流れ場の非定常性や二次渦の発生頻度などを評価することで、伝熱特性の変化の要因となる流動特性について知見を得る。なお、この実験においては、より簡便に再現性のある実験結果を得るため、熱異性化の影響がなく取り扱いが容易な PRF (不可逆な粘弾性変化を呈する PRF) を利用する。

## 4. 研究成果

### (1) PRF の作製および粘弾特性の評価

感光性物質の一種であるアゾベンゼンジカルボン酸 (ADCA) と界面活性剤を混合することで、光によって粘弾特性が可逆的かつ高速に変化する PRF の作製を試みた。

まず、UV-Vis スペクトルおよび  $^1\text{H NMR}$  の測定により、ADCA が、275–375 nm の紫外光を吸収してトランス体からシス体に、375–475 nm の可視光を吸収してシス体からトランス体に変化することを確認した。この測定結果に基づき、励起光源として用いる水銀ランプと PRF の間に、いずれかの波長帯を透過する光学フィルタを設置することで、所望の方向に ADCA の光異性化を進行させることを可能とした。

界面活性剤の一種である臭化ヘキサデシルトリメチルアンモニウム (CTAB) および ADCA をそれぞれ 1.0wt%、0.3wt% の濃度で混合した水溶液に対して、上記の照明装置で光照射を行い、光照射時間・波長と水溶液の粘弾性の関係をレオメータ測定により評価した。結果を図 1 に示す。縦軸は粘弾性の指標である緩和時間  $\lambda$ 、横軸は単位体積 (1L) あたりの光照射時間  $t_{\text{irr}}$  を表す。紫外光照射時間が長くなるにつれて  $\lambda$  が減少し、可視光照射によって光照射前の水準に戻ることが分かる。これは、トランス型とシス型の ADCA では、水溶液中の紐状ミセル形成を促進する作用が異なり、ADCA の光異性化に伴ってミセルの絡み合いの度合いが変化するためである。なお、光照射を繰り返した場合にも光応答性の劣化は見られなかった。以上より、照射光の波長と時間を適切に設定することで水溶液の粘弾性を制御できる可能性が示された。

更に、水溶液の光応答性を高めるため、溶液濃度の調整ならびに界面活性剤の変更を行った。その結果、界面活性剤として CTAB よりも疎水基の長い OTAB (オクタデシルトリメチルアンモニウムプロマイド) を使用す

ることで、緩和時間の変化に必要な光照射時間を CTAB/ADCA 混合溶液の場合と比べて 1/3 程度に速めることに成功した。その際の OTAB/NaSal (サリチル酸ナトリウム) /ADCA の混合割合は、それぞれ 1.0wt%, 0.016wt%, 0.164wt% であった。

光照射に対する応答性は、光源および光照射方法の改善によって更に向上する可能性がある。光異性化に関わる波長帯の光強度を増し、光の透過率を考慮に入れた光照射方法の改善 (薄く伸ばした状態の水溶液に光照射を行うなど) が必要と考えられる。

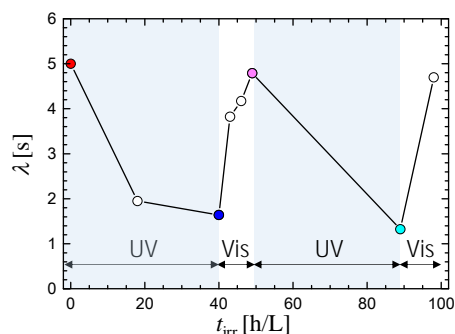


図 1. 光照射時間と緩和時間の関係。

## (2) 伝熱特性ならびに圧力損失の測定

5×5mm の流路断面を有する銅製流路内に PRF を送液して入口・出口部の流体温度を熱電対で測定し、約 40℃ に等温加熱した流路壁全域にわたる平均ヌッセルト数を求めた。また、上記の伝熱実験と同時に入口・出口部の圧力差を測定し、壁面摩擦係数を評価した。なお、流路形状は粘弾性効果が発現しやすい蛇行型を用いた。

光照射条件の異なる CTAB/ADCA 水溶液について平均ヌッセルト数および壁面摩擦係数を測定し、修正レイノルズ数  $Re^*$  に対してプロットした結果を図 2、図 3 にそれぞれ示す。ここで凡例の「UV 0h/L」はトランス型 ADCA のみを含む光照射前の水溶液を、「UV 15h/L」は紫外光を 15h/L 照射した水溶液を、「Vis 5h/L (After UV)」は 15h/L の紫外光照射に引き続いて可視光照射を 5h/L 行った後の水溶液を表す。図 2 より、紫外光照射によって全体的に平均ヌッセルト数が低下し、可視光照射により元の水準程度に回復する傾向が分かる。更に図 3 より、壁面摩擦係数についても同様の傾向を示すことが見て取れる。これらの変化は、図 1 の光照射に対する水溶液の粘弾性変化、つまり ADCA の光異性化に伴う水溶液中のミセルネットワーク構造の変化と関連付けることが出来る。

以上より、光照射による PRF の伝熱特性ならびに圧力損失の能動的制御の可能性を示すことが出来たが、測定点数が少なく、データのバラつきが比較的大きい。そのため、引き続きデータの蓄積を行うとともに、精度向上に向けて取り組んでいるところである。

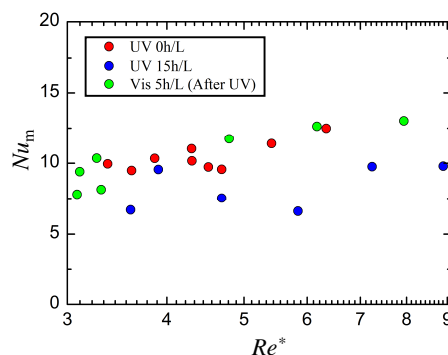


図 2. レイノルズ数に対する平均ヌッセルト数の変化。

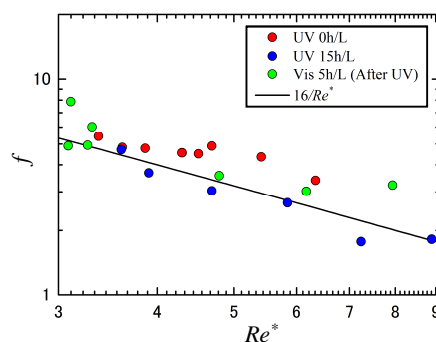


図 3. レイノルズ数に対する壁面摩擦係数の変化。

## (3) 流れ場の可視化実験

CTAB/NaSal/OMCA(2-メトキシ桂皮酸) によって構成される、不可逆的な粘弾性変化を呈する PRF を用いて、光照射が流れ場に与える影響を評価した。光照射条件の異なる PRF を (2) と同形状・同寸法のアクリル製蛇行流路に送液し、少量の染料を注入することにより流脈線の可視化を行った。その結果、粘弾性の高い光照射前の CTAB/NaSal/OMCA 混合水溶液の場合は、流れ場の時間的変動が大きく、流路側面からは流路湾曲の変曲点付近における二次渦の発生が確認された。一方、紫外光照射を行った後の粘弾性の低下した水溶液の場合、流れ場の非定常性は低下し、ニュートン流体に近い流動様式を示すことが明らかとなった。

更に、PIV を用いて流路水平断面および垂直断面における速度を計測し、流れ場のより詳細な観察を行った。その結果、光照射前の PRF 流れにおいては、水溶液の高い粘弾性によって、蛇行流路の変曲点付近に単一渦および双子渦状の二次流れ (図 4) が発生し、その形状が非定常に変化することが明らかとなった。これに対して、粘弾性の低下した光照射後の水溶液では、変曲点付近における二次流れが見られず、流れ場全体がほぼ定常に近い状態であった。

今後は、二次渦の構造や時間変動に関してより詳細な分析を行うため、測定位置の変更や時空間分解能の改善を行い、更なるデータの蓄積を行う予定である。

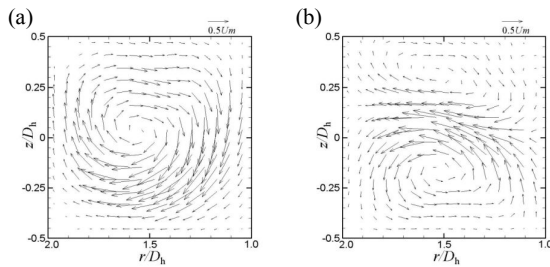


図 4. 光照射前の水溶液を送液した際の垂直断面瞬時速度分布に見られる (a) 一つ渦および(b) 双子渦状の二次渦 .

## 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

Tsuchikawa, S., Kuriyama, R., Sakanaka, I., Enya, T., Tatsumi, K. and Nakabe, K., “Change of Flow Structure and Heat Transfer Performance of Photosensitive Micellar Solutions with Light Irradiation”, International Journal of Advances in Engineering Sciences and Applied Mathematics (in press).

〔学会発表〕(計 7 件)

阪中郁哉\*, 角木亮介, 栗山怜子, 巽和也, 中部主敬, “感光特性を有する界面活性剤水溶液への光照射による流動構造の変化と伝熱特性”, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2016, (日本機械学会, 松山, 2016.10.23).

Enya, T.\*, Kuriyama, R., Tatsumi, K. and Nakabe, K., “Heat Transfer Control by Light Irradiation to Low Reynolds Number Flows Using a Photosensitive Micellar Solution”, The 4th International Forum on Heat Transfer (IFHT2016), Sendai, Japan, (2016.11.2).

Tsuchikawa, S.\*, Sakanaka, I., Enya, T., Kuriyama, R., Tatsumi, K. and Nakabe, K., “Change of Flow Structure and Heat Transfer Performance of Photosensitive Micellar Solutions with Light Irradiation”, The 6th Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow (ASCHT 2017), Chennai, India, (2017.12.11).

阪中郁哉\*, 土川翔伍, 栗山怜子, 巽和也, 中部主敬, “感光性紐状ミセル水溶液の流動構造に及ぼす光刺激の影響”, 第 5 回流体基礎工学研究部門公開セミナー, (京都大学大学院工学研究科付属桂インテックセンター, 京都, 2018.3.9).

磯野翔二郎\*, 石井孝典, 栗山怜子, 巽和也, 中部主敬, “光応答性を有する粘弾性流体を利用した熱流動特性の可逆的制御”, 日本機械学会関西支部第 93 期定時総会講演会, (日本機械学会, 大阪, 2018.3.12).

石井孝典\*, 磯野翔二郎, 栗山怜子, 巽和也, 中部主敬, “光照射条件に応じた粘弾性を示す機能性流体の熱流動特性”, 第 55 回日本伝熱シンポジウム, (日本伝熱学会, 札幌, 2018.5.29).

Kuriyama, R.\*, Ishii, T., Isono, S., Tatsumi, K. and Nakabe, K., “Experimental Investigation on Reversible Characteristics of Heat Transfer and Fluid Flow Using Wavelength-dependent Photoresponse of Aqueous Surfactant Solution”, Proc. 16th International Heat Transfer Conference (IHTC-16), Beijing, China. (To be presented in August 2018).

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称 :

発明者 :

権利者 :

種類 :

番号 :

出願年月日 :

国内外の別 :

取得状況 (計 0 件)

名称 :

発明者 :

権利者 :

種類 :

番号 :

取得年月日 :

国内外の別 :

〔その他〕

該当なし

## 6 . 研究組織

(1) 研究代表者

栗山 怜子 (KURIYAMA, Reiko)

京都大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号 : 7 0 7 8 1 7 8 0

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

なし