

令和 6 年 5 月 22 日現在

機関番号：13501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03915

研究課題名（和文）油温分布3次元計測の非接触検定レス化とキャビテーション現象の解明

研究課題名（英文）3D measurement of oil temperature distribution using LIF method and its application to cavitation phenomena

研究代表者

船谷 俊平（Funatani, Shumpei）

山梨大学・大学院総合研究部・准教授

研究者番号：50607588

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、Pirromethene597を用い独自開発したトランスミッションオイル用2色LIF法により、自動車用トランスミッションオイル内の音響キャビテーションによる温度上昇の可視化計測に成功し、キャビテーションがトランスミッションオイルの局所的な温度上昇をもたらすことを確認できた。しかし計測された約10.0℃の温度上昇はトランスミッションオイルの物性への影響をもたらす要因となるとは言えず、また気泡崩壊による気泡周辺最大温度の概算は未達成である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

我が国におけるエネルギー消費量の70%超が産業、運輸部門における商品である。これらの部門では、建設機械を筆頭に、種々の油圧制御機構（油圧シリンダ、変速機など）が用いられており、これらサブシステムによるエネルギー損失は、機械駆動時のエネルギー損失の約70%に達する。このエネルギー損失の主要因の一つが、キャビテーションにおける気泡断熱圧縮による作動油の酸化劣化とラッカー（酸化縮合物）生成である。このキャビテーションならびに気泡断熱圧縮においては、気泡が崩壊する瞬間に微小な高温高圧領域が生じることが指摘されているが実測されておらず、この現象解明の意義は大きい。

研究成果の概要（英文）：In this study, we succeeded in visualizing and measuring the temperature rise phenomenon caused by acoustic cavitation in automotive transmission oil using a two-color LIF method for transmission oil originally developed using Pirromethene597, and confirmed that cavitation causes a local temperature rise in transmission oil. The measured temperature rise was about 10.5°C. However, the measured temperature rise of about 10.5°C was not significant. However, the measured temperature increase of approximately 10.0°C cannot be said to be a factor affecting the physical properties of the transmission oil, and an estimate of the maximum temperature around bubbles due to bubble collapse has not yet been achieved.

研究分野：Flow Visualization

キーワード：LIF 可視化計測 温度計測

1. 研究開始当初の背景

我が国におけるエネルギー消費量の70%超が産業、運輸部門における商品である(エネルギー白書2020)。これらの部門では、建設機械を筆頭に、種々の油圧制御機構(油圧シリンダ、変速機など)が用いられており、これらサブシステムによるエネルギー損失は、機械駆動時のエネルギー損失の約70%に達することから、エネルギー損失の削減は省エネルギーならびにCO₂削減の観点から急務である。このエネルギー損失の主要因の一つが、キャピテーションにおける気泡断熱圧縮による作動油の酸化劣化とラッカー(酸化縮合物)生成である。このキャピテーションならびに気泡断熱圧縮においては、気泡が崩壊する瞬間に微小な高温高圧領域が生じることが指摘されている。この高温高圧状態は作動油の酸化劣化とラッカー生成に大きく寄与していると推定されているが実測されていない。この超高温高圧現象の発生機構を評価することは、当現象の解明ならびに数値解析の妥当性検証において必要な技術であるが、微小領域の非接触温度計測技術が無いことから実現していない。

気流、水流といった流体の熱流動現象の可視化計測は長年取り組まれており、国内外の産業界、研究機関において様々な可視化計測が行われている。近年では特に、自動車用排ガス触媒の触媒燃焼場の μ PIV計測など、従来の可視化計測システムでは計測困難かつ数値解析の妥当性検証が困難な計測対象に関する取り組みを続けている。

こうした可視化計測の中でも、産業界からの要請が多いにも関わらず、最も技術的難易度が高いのが、本研究課題である気泡断熱圧縮現象の可視化計測である。本研究課題において掲げた目標を達成することで、産業界、研究機関に対する技術的貢献は多大であることが見込まれる。

本研究課題の技術的難易度が高い理由は、個々の技術要素が高度であるのみならず、画像処理、応用化学、計測制御、流体工学、熱工学など多岐に渡り、学際的傾向の強い研究テーマであることによる。そこで本研究では、流体の熱流動現象の可視化計測に関する研究業績を有する研究代表者、気泡断熱圧縮現象に関する研究業績を有する研究分担者が連携することで、本研究に必要な全技術要素を網羅する研究体制を構築した。また、関連する周辺技術として、PSV法による流体速度分布計測法の改良にも取り組んだ¹⁾。

2. 研究の目的

作動油の気泡近傍の微小領域の温度分布を計測したい。しかし、温度分布の可視化計測手法として一般的なLIF法²⁾で用いることのできる感温蛍光体は、水溶性の蛍光染料あるいは微粒子状の蛍光粒子しか知られておらず、油(疎水性液体)を計測できない。気泡が多数存在する気液2相流に対するLIF法の実施例が無い。 μ m未満の微小領域を計測対象とするLIF法の実施例が無い。以上3点から、技術的難易度の高い可視化計測手法であることが予想される。

近年、感温蛍光体の開発に関する化学分野での研究成果は著しい。テルピウムとユウロピウムの2種類の原子を含む有機分子で構成される塗料に紫外線を当てると、そのエネルギーにより緑と赤が混ざった黄色に発光する。このとき温度によって原子に配分されるエネルギーの割合が変わり、発光色が緑から黄色、オレンジ、赤へと連続的に変化する。 $-100^{\circ}\text{C}\sim 300^{\circ}\text{C}$ までの温度を色変化によって測定することができる³⁾。このように、温度センサとして利用できる様々な蛍光体が存在することが知られており、微細化してもその化学的・光学的性質は変わらないことから、超小型温度センサとしての蛍光体利用が見込まれるが、微細化した蛍光体の温度計測利用についての研究は進んでおらず、本申請によってこれを促進する必要がある。特に、温度センサの微細化、速度分布計測との同時計測が今まで実現していなかったため、本研究においてこれを促進する。

3. 研究の方法

本実験で使用した計測手法は、一般的な2色LIF法を様々な添加物を含むトランスミッションオイル内の温度分布計測への応用を目的として改良したものである⁴⁾。一般的な2色LIF法ではカラーフィルターを用いたデュアルカメラ方式をとるが、本計測手法は市販CMOSカメラを使用してRAW記録した通常のカラ画像からR及びG画像を抽出することでシングルカメラ、フィルターレスでの撮影が可能であり、また座標校正を必要としないといった利点を有する。本実験で使用したPirromethene597蛍光体はオイルへ溶解する性質と蛍光スペクトルの温度依存性を持ち、励起波長は526~531nmである。なお、トランスミッションオイルは概ね500nm以下の励起光によって発光する特性が知られているが、Pirromethene597の励起波長はこれよりも長波長帯であるためオイル自体の発光による計測への影響を低減できる。図1にPirromethene597の温度変化に伴うスペクトルの変動を示す。蛍光スペクトルのピークは温度上昇に伴い長波長側へ移動し、曲線の長波長側のみ落ち込みが緩やかになる傾向にある。この特性から、CMOSセンサで記録される530nm付近(G)と600nm付近(R)の波長に注目すると蛍光輝度比 $r(R/G)$ は図2の様な温度依存性を示す。本実験ではこの蛍光輝度比 r の温度依存特性に基づく温度分布可視化計測を行う。

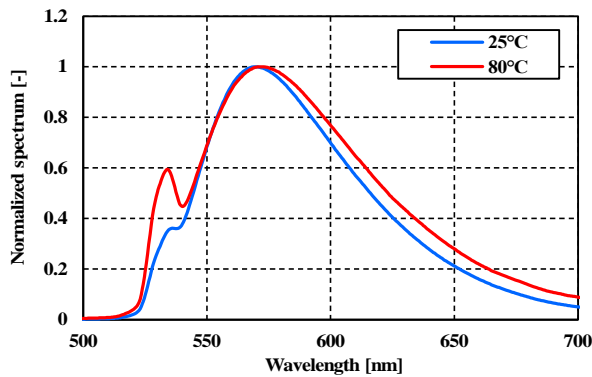


Fig. 1 Spectral variation of Pirromethene597 by temperature

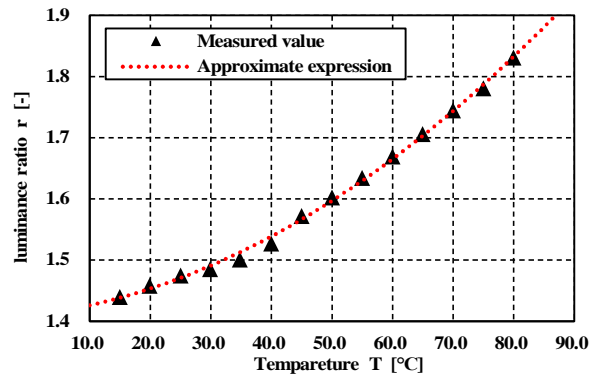


Fig. 2 Temperature dependence of luminance ratio of Pirromethene597

図3に実験装置の概略図を示す．アクリル容器内に超音波振動子を設置し，容器内部はPirromethene597を溶解させたトランスミッションオイルで満たす．溶解濃度は濃度消光が発生しない範囲でスペクトルの温度依存度の高い最適条件を求め， 2.88×10^{-6} mol/Lとした．また超音波振動子上部には金属パイプを設置する．金属パイプはレーザー光の反射を抑えるため黒色クロムメッキを施してあり，エッジ部に加工した切り欠き部にて音響キャピテーションの発生を局部的に促進させる．レーザー光源で発生させた波長 532 nm のレーザーをシリンダリカルレンズでシート状に広げトランスミッションオイル内に入射させる．レーザーシート面に垂直な方向に一眼レフ CMOS カメラ (Nikon, D7100) を設置し，カラーフィルターを使用せず計測領域を撮影する．撮影領域は縦 8.5 mm × 横 12.7 mm であり，ISO 感度 1000，シャッタースピード 1/100 sec で撮影し，取得画像を RAW 形式で記録した．

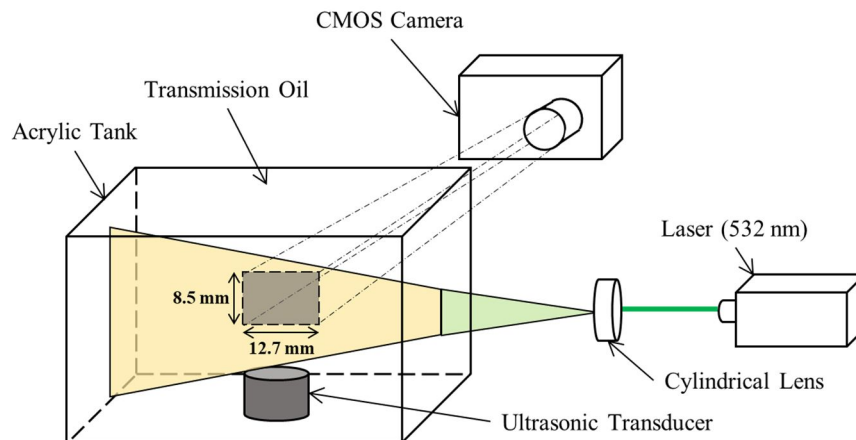


Fig. 3 Schematic of experimental equipment

温度分布計測前に本実験装置上でトランスミッションオイルを 15.0 から 80.0 まで，5.0 間隔で均一に加熱し，各温度 5 枚ずつ撮影した画像から温度と蛍光輝度比 r (R/G) の関係を示す検定式を取得する．その後室温まで冷却し正規化用画像を取得後，超音波振動子による音響キャピテーションを発生させ金属パイプの切り欠き部に発生したキャピテーション集中発生部とその周辺領域を撮影する．取得画像から R 画像と G 画像を抽出しピクセル毎の輝度分布データから蛍光輝度比 r 分布データを作成する．その後レーザーシート光の強度分布による影響を低減させるため，同様に処理した正規化用画像の r 分布データを用いて正規化を行う．正規化後の r 分布データは検定式を用いて温度分布データに変換した．

4. 研究成果

本実験では本実験系上にて取得した式 (1) に示す検定式に基づき，音響キャピテーションによる周辺温度上昇の可視化計測を行った．解析対象画像を図4に，温度分布可視化画像を図5に示す．計測対象画像下部の金属パイプ中央部には切り欠き加工した箇所があり，その周辺で気泡の集中発生 (気泡群) が確認できる．計測対象画像から作成した可視化画像より気泡群上部から上昇，拡散する温度の高い領域を確認できた．この高温領域は，気泡群内部で集中的なキャピテーション気泡崩壊により加熱されたトランスミッションオイルが形成した上昇流であると考えられる．また可視化画

像上の上昇流は周辺温度に対し約 10.0 °C 高い温度を示した。

$$T = -204.64r^2 + 825.91r - 747.31 \quad (1)$$



Fig. 4 Original Image for Temperature Measurement

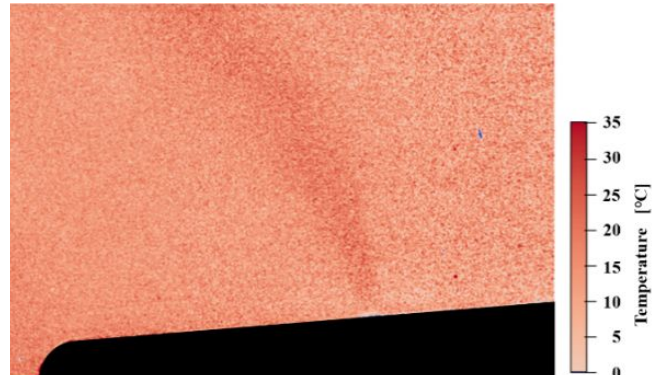


Fig. 5 Visualized image of temperature distribution

本研究では Pirromethene597 を用い独自開発したトランスミッションオイル用 2 色 LIF 法により、自動車用トランスミッションオイル内の音響キャビテーションによる温度上昇の可視化計測に成功し、キャビテーションがトランスミッションオイルの局所的な温度上昇をもたらすことを確認できた。しかし計測された約 10.0 の温度上昇はトランスミッションオイルの物性への影響をもたらす要因となるとは言えず、また気泡崩壊による気泡周辺最大温度の概算は未達成である。一方で、一般にキャビテーション気泡崩壊の瞬間における気泡内部温度は最大で数千 K に達するといわれており、またキャビテーション気泡のサイズは数 μm オーダーから数十 μm オーダーである。本実験結果で直径約 1.3 mm の気泡群から絶えず 10.0 高い温度を示す流れの発生が確認できたことから、気泡崩壊に伴い境界面近傍に存在する微小トランスミッションオイルが起こす温度上昇は更に大きいものであると考えられる。しかし気泡崩壊時に発生する熱がトランスミッションオイルの物性に与える影響を評価するためには、単一気泡の境界面近傍または気泡崩壊後の微小領域を計測対象とし、キャビテーション気泡崩壊によってトランスミッションオイルがさらされる最大温度を計測する必要がある。よって本計測システムの撮影系に対してハイスピードカメラによる高速撮影および顕微鏡撮影を導入し、単一気泡崩壊の様子および境界面近傍の温度分布を捉える必要があると考える。

< 引用文献 >

- 1) Y.Tsukamoto, S.Funatani, Theoretical formulation of streak failure conditions and numerical investigation to optimize the illumination code of particle streak velocimetry, Journal of Visualization, Vol.26, page 1359-1374 (2023).
- 2) S.Funatani, Y.Tsukamoto, K.Toriyama, Temperature Measurement of Hot Airflow Using Ultra-Fine Thermo-Sensitive Fluorescent Wires, Sensors, Vol.22, Paper No. 3175 (2022).
- 3) S.Funatani, Y.Tsukamoto, Improvement of Temperature Measurement Accuracy of Hot Airflow Using Ultrafine Thermo-Sensitive Fluorescent Wires of Lumisic Phosphor, Sensors Vol.24, Paper No. 2510 (2024).
- 4) S.Funatani, R.Takei, Y.Tsukamoto, Development of a Temperature Distribution Measurement System for Transmission Oil for Transportation Equipment, Sensors Vol.23, Paper No.5499(2023).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Shumpei Funatani, Yusaku Tsukamoto, Koji Toriyama	4. 巻 22
2. 論文標題 Temperature Measurement of Hot Airflow Using Ultra-Fine Thermo-Sensitive Fluorescent Wires	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 3175
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/s22093175	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Funatani Shumpei, Tsukamoto Yusaku, Toriyama Koji	4. 巻 22
2. 論文標題 Temperature Measurement of Hot Airflow Using Ultra-Fine Thermo-Sensitive Fluorescent Wires	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 3175 ~ 3175
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/s22093175	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Funatani Shumpei, Takei Ryoga, Tsukamoto Yusaku	4. 巻 23
2. 論文標題 Development of a Temperature Distribution Measurement System for Transmission Oil for Transportation Equipment	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 5499 ~ 5499
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/s23125499	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tsukamoto Yusaku, Funatani Shumpei	4. 巻 26
2. 論文標題 Theoretical formulation of streak failure conditions and numerical investigation to optimize the illumination code of particle streak velocimetry	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Visualization	6. 最初と最後の頁 1359 ~ 1374
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s12650-023-00940-4	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Funatani Shumpei, Tsukamoto Yusaku	4. 巻 24
2. 論文標題 Improvement of Temperature Measurement Accuracy of Hot Airflow Using Ultrafine Thermo-Sensitive Fluorescent Wires of Lumisic Phosphor	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 2510 ~ 2510
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s24082510	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔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.Morito, S. Funatani
2. 発表標題 DEVELOPMENT OF TEMPERATURE MEASUREMENT SYSTEM OF AIRFLOW USING ULTRA-FINE THERMOSENSITIVE LUMISIC PHOSPHOR WIRE
3. 学会等名 Proc. of PSFVIP-13 (国際学会)
4. 発表年 2022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
研究分担者	坂間 清子 (Sakama Sayako) (70773539)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・研究員 (82626)	

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
---------	---------