

2021 年度

気泡断熱圧縮抑制による油圧機器の摩擦抵抗低減
補助事業報告書

山梨大学工学部機械工学科 船谷 俊平

JKA Social Action
競輪とオートレースの補助事業

1. 序論

自動車において、エンジンの動力を伝達するために採用されているトランスミッションは、多くの歯車がかみ合うことによりエンジンからの出力を効率よく車輪に伝達しているため、歯車同士のかみ合いが非常に重要であり、適切に機能させるためにはミッションオイルという潤滑油が必要である。しかしながら、トランスミッションが機能する際、トランスミッションオイル内に気泡が発生することにより、トランスミッション内において発砲音が発生するという現象が生じることが報告されている。この現象はトランスミッションの破損の原因やエンジンの破損の原因となる可能性がある。

問題解決のためには気泡の発生原因を究明、及び気泡の生成消滅のメカニズムを調査する必要がある。トランスミッションオイルの特性を理解する必要がある。その一つの要素として温度に注目することとしたが、気泡温度の非接触温度計測手法が確立されていない。

液体を対象とした非接触での温度分布計測手法として、水に二種の蛍光体を混入し、二色 LIF 法により三次元の温度分布を計測した前例がある⁽¹⁾。しかし、本研究で対象とするトランスミッションオイルは有機化合物であるため、水溶性の蛍光体を使用できず、この手法での計測は困難である。また、従来の二色 LIF 法では蛍光画像の取得に CCD カメラを二台以上使用するため、撮影機材の用意やそれぞれの位置関係の補正など、計測にかかるコストが高いという問題がある⁽²⁾。有色のエンジンオイルを対象とし LIF 法を使用した例もあるが、これは油膜の厚さを計測することを目的としているため、温度分布の計測は行われていない⁽³⁾。

そこで本研究ではステレオアダプター利用し、一度の画像撮影で波長特性の異なる二種類のフィルタを通した蛍光画像を同時に取得することで、二色 LIF を一台のカメラで実行でき、有色オイルへの利用が可能な温度分布計測システムの開発を目的とする。

本計測システムの利点としては、顕微鏡撮影による微小気泡破裂現象計測への適用が容易で低コストかつ、計測にかかる工程が簡易化することが挙げられる。

2. 実験方法・温度計測法

2.1 実験装置

実験装置の概要図を Fig. 1 に示す。本研究では温度トレーサとして Coumarin153 を使用した。選定理由としては、この Coumarin153 は最大蛍光波長が温度依存性を示すことが報告されており、不正軽油の対策として添加されることが多いことから、トランスミッションオイルに使用する温度トレーサとして利用可能であると推測したためである⁽⁴⁾。開発油 900[mL] に対し Coumarin153 を 0.01[g] を混入させ、波長が 455[nm] のレーザーシート光にて励起させる。デジタル一眼レフカメラ (Nikon D40X) に対しステレオアダプター (リコーイメージング株式会社製) を取り付けて光路を 2 分岐し、各光路にバンドパスフィルタ ($\lambda=570$ [nm], 610[nm]) を取り付けた構成となっている。温度制御にはコイルヒーターを使用した。オイル中にコイルヒーターを投入し、PID コントローラを利用して温度制御を行うと同時に、ミキサーにてオイルを攪拌することで、均一な温度管理を図った。

2.2 原理

本研究における計測原理について述べる。

蛍光物質に励起光を照射する、分子内の電子分布が変化し、そのエネルギー準位が基底準位から励起準位へと遷移する。これを電子遷移という。励起されたエネルギーのうち一部は周囲の分子の振動や回転等の運動エネルギーに費やされ移動するが(無放射減衰)、残りのエネルギーは光子として放射される(放射減衰)。この放射減衰が蛍光あるいはりん光である。

蛍光は励起光の照射を受けなくなるとただちに光子の放出も止まるが、りん光では励起光の照射を受けなくなった後でも光子の放出が持続する。単位微小体積の蛍光染料が単位時間当たり放射する光エネ

ルギー $I[W/m^3]$ は、励起光の光子を吸収する分子の単位体積単位時間における数に比例し、次式で表される。

$$I = I_0 C \phi \varepsilon \quad (1)$$

ここで $I_0[W/m^2]$ は微小体積に入射する励起光束、 $C[g/m^3]$ は蛍光染料の濃度、 ϕ は吸収された励起光の蛍光発光に寄与する割合を示す量子収率、 $\varepsilon[m^2/g]$ は入射した励起光強度に対して励起光が単位濃度の溶液を単位長さだけ通過するとき吸収される光強度の割合を示す吸光係数である。光束 $I'_0[W/m^2]$ の励起光が有限体積の蛍光染料溶液に入射し、溶液を $x[m]$ 通過したところでの励起光束 I_0 は、

$$I_0 = I'_0 \exp(-\varepsilon x C) \quad (2)$$

で与えられる。これは Beer-Lambert の法則として知られており、入射した光が溶液を通過する間に吸収され減衰することを示している。よって有限体積を通過した励起光による蛍光の放射エネルギーは式(1)、式(2)より

$$I_0 = I'_0 C \phi \varepsilon \exp(-\varepsilon x C) \quad (3)$$

となる。量子収率 ϕ は温度依存性があり、一般に温度の上昇に伴い減少する。一方、吸光係数 ε の温度依存性は小さいため I_0 、 C を一定とすれば蛍光強度は温度の関数となる。蛍光強度と温度の依存性を示す関数を、計測画像の蛍光強度に当てはめることで、温度分布の可視化が可能である。⁽²⁾

また本研究では、二色のフィルタを通した各温度における蛍光強度の比と、温度の依存性を用いて温度分布を計測することで、計測の高精度化を図る。

2.3 実験方法

始めに Coumarin153 の蛍光強度比と温度の依存性を調査する。オイルを加熱し 25~80[°C]で 5[°C]沖に蛍光画像を取得する。取得した蛍光画像における計測領域の蛍光強度を、570[nm]のバンドパスフィルタを通した Green 画像(G 画像)と、610[nm]のバンドパスフィルタを通した Red 画像(R 画像)のそれぞれで、画像解析により求める。求めた R,G 画像の蛍光強度を G/R の蛍光強度比に変換し、温度との依存性を示す検定曲線を算出する。

次に 80[°C]に加熱した高温のオイル中に、別容器で保持した 20[°C]の低温のオイルを流入させた状況の画像を取得し、計測領域における R,G 画像の対応するピクセルごとに G/R の蛍光強度比を求め、画像解析及び画像処理を行い、温度分布を可視化する。画像処理及び解析にはオープンソースである ImageJ を使用し、温度分布可視化画像の作成にはオープンソースである ParaView を使用した。

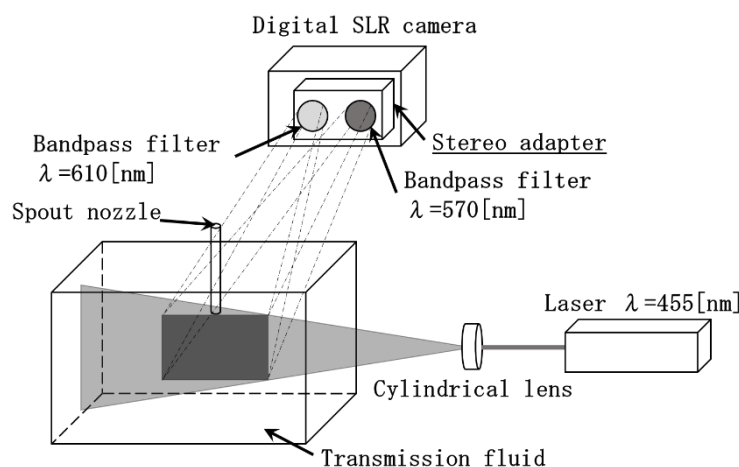


Fig.1 Outline diagram of experimental equipment

3. 実験結果及び考察

3.1 Coumarin153 の温度依存性検証

Fig. 2にCoumarin153を混入させたオイルの、輝度比(蛍光強度比)の温度依存性調査結果を示す。Fig. 3は取得画像を画像解析により、G画像とR画像の両方において計測領域の平均輝度を算出し、温度に対応させ作成したグラフである。なお取得画像は各温度において2枚ずつ撮影し、それぞれの輝度の平均値を使用することで精度の向上を図っている。このグラフより温度が高くなるにつれ、G,Rの輝度がともに減少していることがわかる。

Fig. 3はFig. 2を作成する際に算出したG,Rの輝度を使用し輝度比(G/R)を求め、温度に対応させたグラフである。このグラフからCoumarin153入りのオイルの温度が高くなるにつれ、輝度比が増加していることが読み取れる。以上のことからCoumarin153を混入させたオイルにおいて、輝度比(蛍光強度比)の温度依存性が確認できたため、蛍光強度比を用いた温度分布の可視化計測にCoumarin153が使用可能であるという結果が得られた。なお、G,Rの取得画像の輝度についてはカメラの撮影条件や画像補正等(絞り、シャッタースピード、ISO感度、ホワイトバランスなど)により、得られる数値が変動するため、より効果的な撮影条件の模索が必要である。

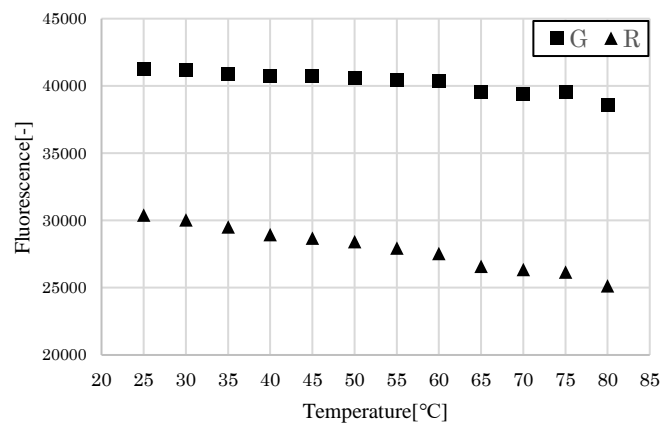


Fig.2 Relationship between brightness and temperature

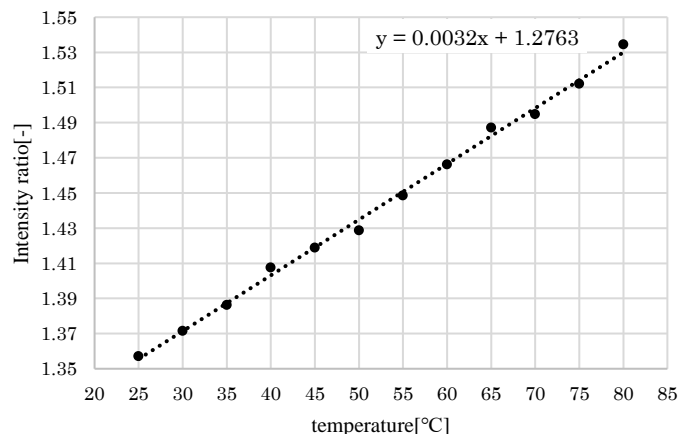


Fig.3 Relationship between luminance ratio and temperature

3.2 温度分布の可視化検証

2.3 で設定した条件での可視化検証を行った。なお今回の取得画像においてレーザー照射面から離れる(水平方向に移動する)ごとに輝度の減少がみられたため、ガウシアンフィルタによる画像処理及び輝

度データの補正を行った。今回行った温度分布可視化の工程を以下に示す。

- [1] オイル中を 80[°C] に保持した画像データ(基準データ)において, G,R 画像に分解し計測領域の各ピクセルにおける輝度データを取得する。
- [2] 温度分布の可視化を行う画像(解析画像)を G,R 画像に分解し, 工程 1 と同様に各ピクセルの輝度データ(解析データ)を取得する。
- [3] 工程 1 で取得した輝度データと工程 2 で取得した輝度データの比をとる。これにより解析データの輝度の正規化を行う。
- [4] 正規化を行った G,R 画像のデータを用いて G/R の輝度比の分布データを取得する。
- [5] Fig.3 から得られた近似曲線を 80[°C] における輝度比を用いて正規化し, 80[°C] の輝度比に対する各温度の輝度比の割合と温度の関係を示す検定曲線を求める。
- [6] 工程 5 で求めた検定曲線を工程 4 で作成した輝度比の分布データに照らし合わせ, 温度分布のデータを取得する。
- [7] ParaView を用いて, 工程 6 で作成した温度分布のデータを可視化する。

以上の工程を用いて可視化した温度分布画像を Fig.4 に示す。また今回使用した解析画像の G,R におけるグレースケール画像を Fig.5, Fig.6 に示す。

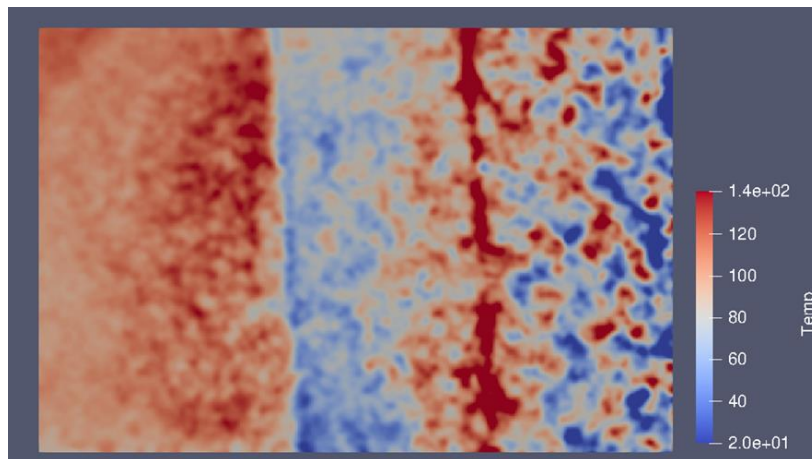


Fig.4 Temperature distribution visualization image



Fig.5 Grayscale image of the analysis area (Green image)

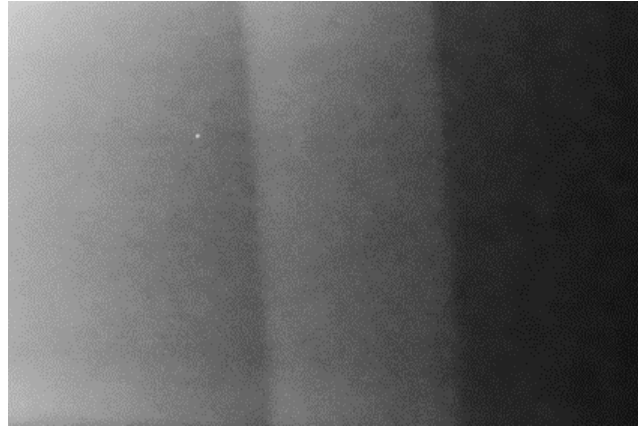


Fig.6 Grayscale image of the analysis area (Red image)

Fig.4 より異なる温度のオイルが流れ込んでいる輪郭が確認できる．可視化画像の左面に注目した際、温度の高低分布は理想的な配置を示しているが、可視化画像右面は温度のばらつきが大きく、低温であるはずの噴流部分が高温を示し、逆に高温部である領域にて低温を示す分布が多く存在している．この原因としてはFig.7に示すよう、に位置に依存してレーザー光による励起光の減少が発生し、Coumarin153が十分に励起されていないことが考えられる．加えて、レーザーによって励起された蛍光がオイル中で拡散、減衰を起し取得画像に影響を与えていることが考えられるため、原因究明が必要である．

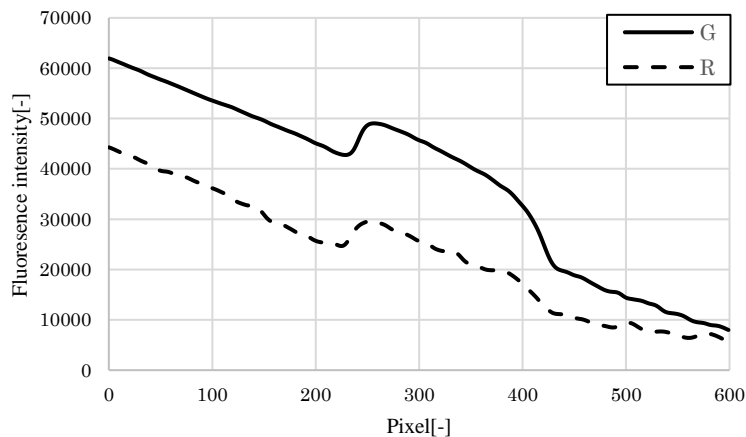


Fig.7 Horizontal luminance transition of the analyzed image

4. 結言

本研究により得られた知見及び今後の課題、展望をまとめる．

- 1) Coumarin153 を混入させたミッションオイルにおいて、蛍光強度比(G/R)と温度との間に依存性があることが分かった．
- 2) Coumarin153 を混入させたオイル中にてレーザー光(励起光)の減衰が起きており、蛍光の分布に差が発生しているため、使用するレーザー及び蛍光体の見直しまたは取得データの補正法を再検討する必要がある．
- 3) 温度分布の可視化については、G,R 画像上での輝度の減衰及び蛍光強度比の変動による影響を強く受けているため、理想とは異なる結果となったが温度差の傾向や、温度ごとの蛍光強度比の違いによる計測領域の輪郭を取得することができた．
- 4) 励起光の減衰及び取得画像における G,R 画像の輝度の変動の課題を克服し、測定領域の蛍光強度比の

変動を解析画像のデータのみで補正できるようになった場合、あらかじめ温度と蛍光強度比の依存性を示す検定曲線を取得することで、任意の領域の温度分布を一度の撮影で取得することが可能となると期待できる。

参考文献

- (1) 榊原潤：二色 LIF による3次元温度計測法の開発, 可視化情報, vol.17, No.1(1997)pp.333-336.
- (2) 可視化情報学会, “PIV ハンドブック”, 森北出版(2018),pp.183-186,pp.229-234.
- (3) 三田修三, 斎藤昭則: レーザ誘起蛍光法 (LIF 法) によるピストンの油膜挙動の解析, 豊田中央研究所 R&D レビュー, Vol.28, No.4 (1993.12)pp.37-47.
- (4) Durba Roy, Sudip Kumar Mondal, Kalyanasis Sahu, Subhadip Ghosh, Pratik Sen, and Kankan Bhattacharyya: Temperature Dependence of Anisotropy Decay and Solvation Dynamics of Coumarin 153 in γ -Cyclodextrin Aggregates, , The Journal of Physical Chemistry A, Vol. 109, No. 33 (2005) pp7359-7364.