

感温性蛍光体による燃焼時 RCEM 内筒内壁の温度分布計測

染矢 聡¹, 富永 馨², 古谷 博秀³, 岡本 孝司⁴

¹(独) 産業技術総合研究所 エネルギー技術研究部門

² 東京大学大学院新領域創成科学研究科 人間環境学専攻

³(独) 産業技術総合研究所 新燃料自動車技術研究センター

⁴ 東京大学大学院工学系研究科 原子力専攻

1. 緒言

近年、代替エネルギー開発やエネルギー変換機の高効率化が急務であり、内燃機関など高温・高負荷のかかる極限環境における温度計測のニーズが高まっている。しかし、極限環境では高時空間分解能で温度分布を計測することは難しく、これまでブラックボックスとして取り扱うケースが多かった。従来の様々な温度分布可視化法は、高温・高負荷のかかる極限環境へ適用することは難しい。

そこで本研究では感温性蛍光体に着目した。蛍光体は無機質のため耐熱性が高く、数百度以上の高温条件下でも燐光スペクトル・強度・寿命が温度依存性を示す。燐光の強度は励起光強度に強く依存してしまうため安定的な計測は難しい。スペクトル強度比を利用した計測は分光が必要なため、計測系が複雑となり、スペースの限られた場所での計測は困難となる。また、分光に起因して光強度が低下し、長い露光時間が必要となるため、測定的时间分解能が低下する可能性がある。

一方、燐光寿命を利用した温度計測では励起光強度の影響を受けにくく、また、分光も必要としないため計測系をシンプルにすることができる。そのため、本研究では燐光寿命を利用し、一応用例として急速圧縮膨張装置(RCEM)と呼ばれる内燃機関内における二次元壁面温度分布計測法の開発を目指す。本研究では励起直後の燐光強度分布を高速度カメラで撮影し、各部位の燐光強度の時間変化から寿命を求めて温度を評価する。

2. RCEM 筒内壁面温度計測

2.1 燐光特性の測定

本研究では、蛍光体を持つ燐光の温度依存性を利用して温度計測を行うが、蛍光体の種類によって高い温度依存性を示す温度域が全く異なる。そこでまず、蛍光体の燐光特性を把握すべく、蛍光体の温度依存性に関する実験的な調査を行い、RCEM 筒内壁面温度計測で想定される温度範囲(100°C~160°C)において高い温度依存性を示す蛍光体 $Y_2O_2S:EuSm$ を選定した。実験では、各塗布法で蛍光体 $Y_2O_2S:EuSm$ を塗布した試験片を加熱し、波長 355nm の UV レーザ(出力 20mJ)をパルス照射した。励起された蛍光体から発せられる燐光を PIN フォトダイオード、分光器(OPwave MAYP10125)、高速度カメラ(Photron Ltd. FASTCAM SA1.1)で取得した。ヒーターは 100°C から最大 230°C まで加熱し、一定の温度間隔毎に燐光データを計測した。

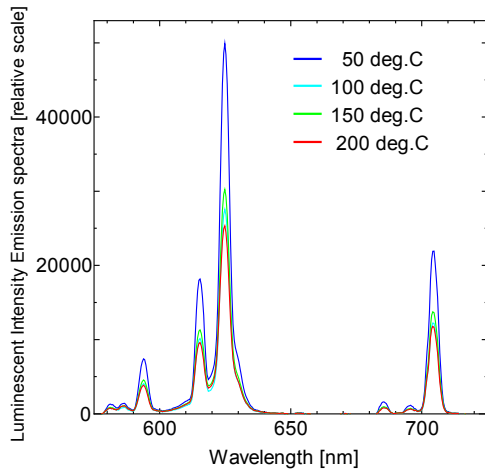


Fig.1 The emission spectra of $Y_2O_2S:EuSm$

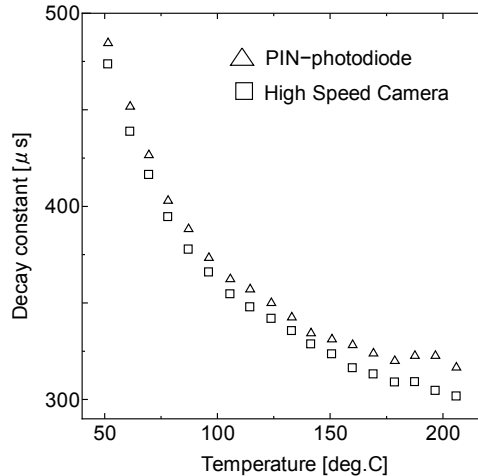


Fig.2 The relation between temperature and the lifetime detected by the PIN photodiode and by the camera

図 1 は利用した $Y_2O_2S:EuSm$ の発光スペクトルを示している。紫外線で励起すると赤い光を放出するが、主に 4 つのピーク波長を持っている。図から発光強度が温度に依存し、高温であるほど暗くなることが分かる。また、これらの波長のピーク値の比も温度に依存する。

2.2 燐光寿命と温度の関係

燐光寿命を用いた温度計測では、燐光寿命と温度の関係を示した校正曲線を予め取得しておく必要がある。そのため、蛍光体を塗布した可視化ガラス窓を、蛍光体塗布面をヒーターに直接接触させて加熱し、各温度における燐光寿命を高速度カメラにて取得した。フレームレートは 20000fps とし、電子シャッターは使わずに撮影した。UV レーザは 5Hz でパルス照射し、1 励起毎に 15 枚の画像を撮影し、これを 300 回分取得した。ヒーターは 100°C から 220°C まで加熱し、K 型熱電対で表面温度を測定しつつ、10°C 毎に燐光画像を取得した。

図 2 は PIN フォトダイオード、高速度カメラで取得した寿命と温度の関係を示している。センサによってリニアリティなどの差異が存在すると考えられるものの、両センサでほぼ同様の温度特性を検出できている。

2.3 実験装置及び測定方法

蛍光体で RCEM 壁面温度計測をする場合、特に燃焼条件を含む壁面温度分布を測定する場合について検討する。ここでは図 3 に示す様に、シリンダ内でピストンが移動し、シリンダトップの位置に可視化窓を設置可能である。移動するピストントップの壁面温度を正面から撮影するのは困難であるため、シリンダトップの可視化窓のシリンダ内側壁面温度を測定する。蛍光体を可視化窓に塗布し、火炎や高温ガスに接する面ではなく、ガラス側の面からの燐光を撮影する。カメラの後方から紫外線レーザで励起する。この場合、蛍光体の膜圧が厚いほど、蛍光体によって熱伝導が遅れ、また、観察部の蛍光体の温度とシリンダ内側のガス温度との差が大きくなると考えられるため、本研究では蛍光体の膜厚を 2~3 μm と薄くした。

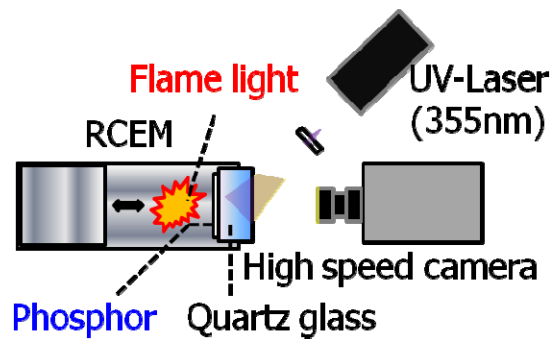


Fig.3 Schematics of experimental apparatus

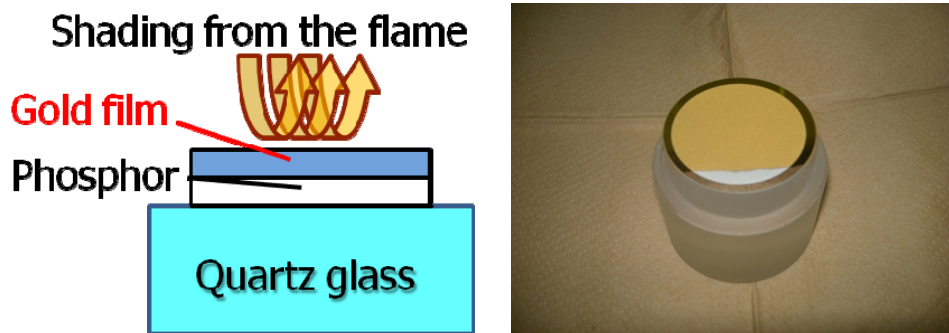


Fig.4 Picture and schematics of the painted visualization window

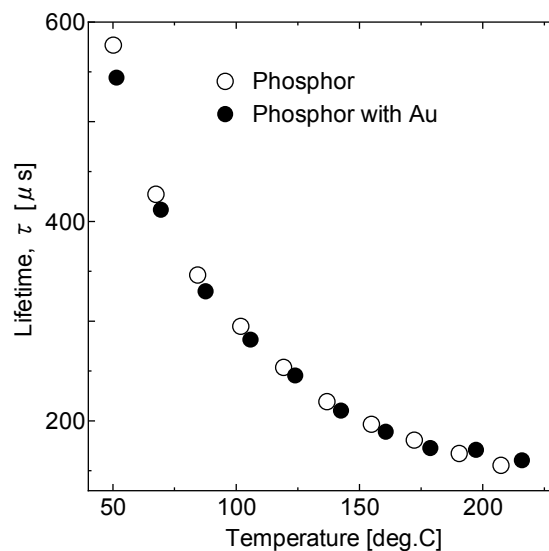


Fig.5 The relation between temperature and lifetime of phosphor, and the effect of gold evaporated film on it

また、蛍光体の保護及び火炎光の遮断を目的として、図4のように、可視化ガラス窓の蛍光体塗布面に金を100nm以下の膜厚で蒸着した。図5は金を蒸着する前後の燐光寿命と温度の関係を示しており、金の蒸着による差異は見られない。ただし、図2で示したパウダー状の蛍光体の温度特性と図5に示した特性は異なるものであった。これはガラス塗布の差異に若干の変質が生じたためと考えられる。

次に、励起光強度の強さとカメラで測定した場合の燐光寿命について調べた。結果を図6に示す。寿命法では原理的に励起光強度の影響を受けない。しかし、図6から、励起光強度の影響をわずかながら受けていることが分かる。これは、受光できる燐光強度や画像のS/N比が変化し、燐光強度の時間減衰を単純指数関数で近似する際に影響が表れるためと考えられる。ただし、図6の▲と■のように10%程度の励起光強度の差であれば、カメラで検出される寿命はほぼ等しくなる。パルスレーザの出力の揺らぎは一般的な可視化用レーザで

あれば 5%以下であるため、同じ条件で実験を行う限りは特に問題とならない。全く異なる条件で実験を行う場合には、温度と寿命の関係式を別途算出することが好ましい。

また、図 6 では画像の異なる位置における燐光寿命も示している。カメラの非線形などによる影響で、場所によって検出される燐光寿命が異なっていることが分かる。そのため、その場校正(in situ calibration)によって温度と寿命の関係式を算出する場合に比べ、外校正、つまり、別途求めた関係式を画像全体に適用する場合には誤差が大きくなる。なお、燐光強度揺らぎの影響は、場所には依存していないことがわかる。

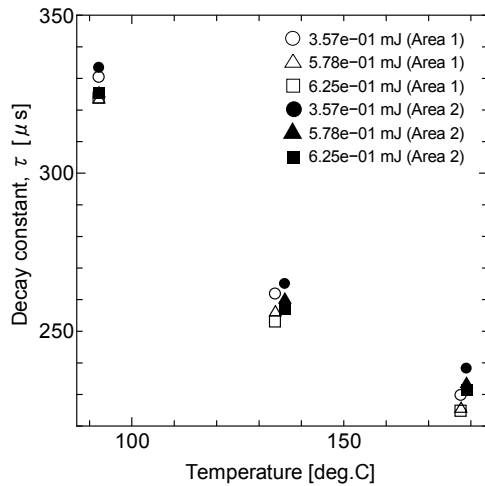


Fig.6 The effect of excitation energy on the measured lifetime

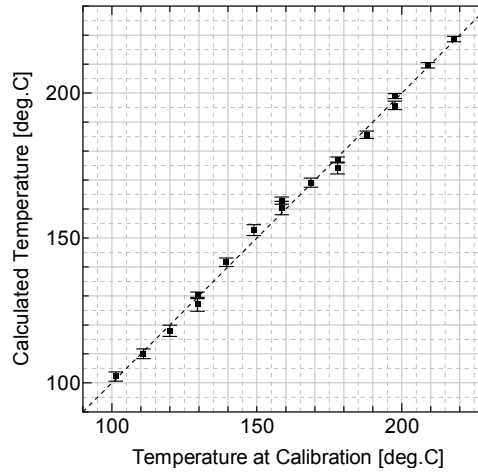


Fig.7 Back calculated temperature

図 7 は温度一様場の画像を、外校正によって計算した場合の誤差を示している。横軸が試料の温度、縦軸が画像計測によって求めた温度を示す。外校正に基づいて温度評価を行う場合の測定誤差は 100~220°C の間で±4.4°C となった。

図 8 には RCEM 及び実験装置の概要を記した。また、実験時の運転条件・撮影タイミングを表 1 及び図 9 にまとめた。RCEM の主室には金属製のシリンダーヘッドが取り付けられており、シリンダーヘッド中心よりやや下に可視化ガラス窓(直径 40mm)を挿入し、主室内壁側に蛍光体塗布面が位置するよう設置した。

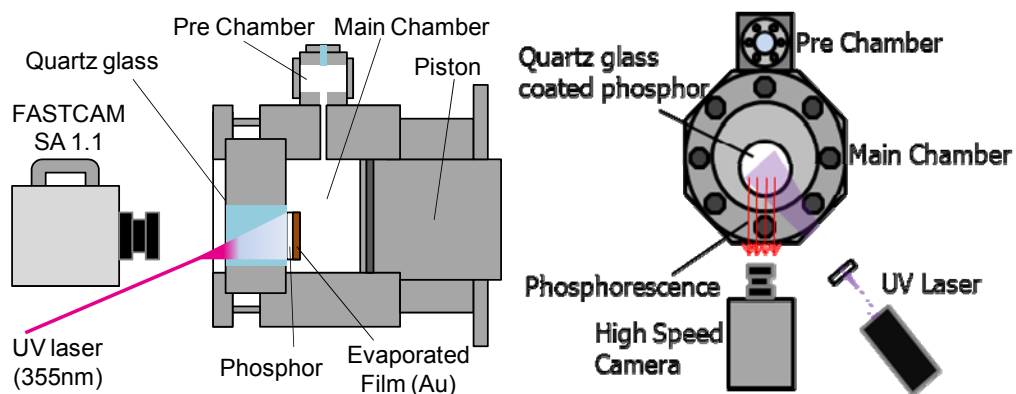
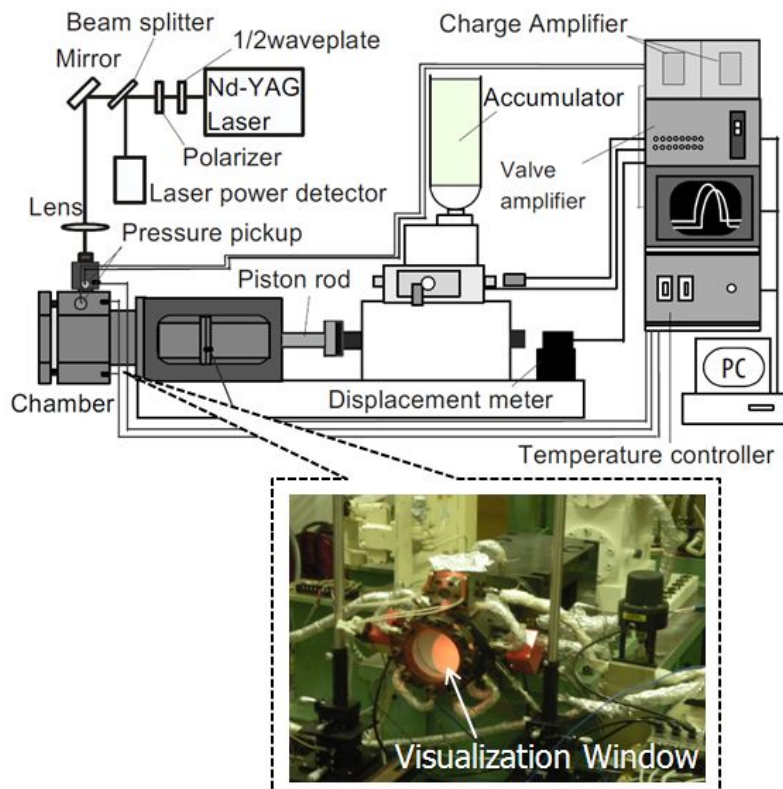


Fig.8 Schematics of the RCEM system

実験ではこの可視化窓の一部を高速度カメラで撮影した。撮影タイミングは、ピストン動作信号から 30ms, 40ms, 50ms の 3 条件とし、各タイミングにおいて 10 回ずつ計測した。RCEM は 1200rpm で動作し、34.45ms において着火信号が入り、35.7ms に上死点(TD C)に達する。30ms は着火前の圧縮過程であり、40ms 及び 50ms は着火後の膨張過程である。RCEM はエンジンの吸気→圧縮→膨張→排気の行程を 1 サイクルだけ模擬する装置であるため、本実験では、1 回の運転で 1 点のタイミング且つ 1 回の温度計測となる。

RCEM の燃焼は、メタン(CH_4)と空気($\text{N}_2 + \text{O}_2$)の予混合気を燃料とし、着火はレーザー(Nd-YAG, 355nm)を副室に集光させて行うブレイクダウン方式を用いた。主室と副室の当量比は、それぞれ 0.6, 1.25 とし、主室は希薄燃焼、副室は過濃燃焼となる。また、計測前に RCEM を昇温し、初期温度を 127.6°C とした後、壁面温度計測を行った。主室及び副室の初期圧力は 2 条件とした。

Table.1. Operation conditions of the RCEM

| Case | Initial pressure [MPa] | | Initial temperature [°C] | Equivalence ratio | | Compression ratio | Rev. |
|------|------------------------|------|--------------------------|-------------------|------|-------------------|------|
| | Main. | Sub. | | Main. | Sub. | | |
| 1 | 0.10 | 0.14 | 127.6 | 0.6 | 1.25 | 10.9 | 1200 |
| 2 | 0.14 | 0.20 | | | | | |

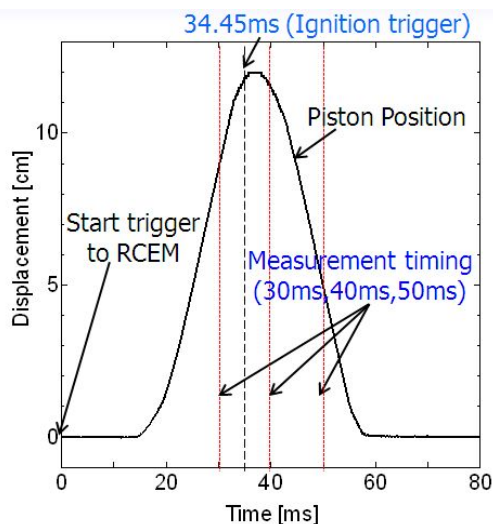


Fig.9 A timing chart of the experiment

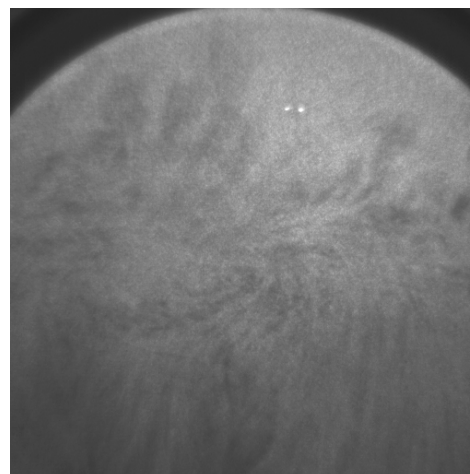


Fig.10 Captured image at 40msec(Case2)

2.4 実験結果及び考察

図 10 に RCEM 筒内壁面温度計測実験にて得られた可視化画像を示した。また、図 11 には RCEM 筒内壁面温度計測実験にて得られた壁面温度分布を示す。図 12 は各タイミングでの 10 回の試行の平均値と偏差を示している。図 11 より、30ms では温度範囲が比較的狭く、分布がほぼ一様になっており、この傾向は 30ms での 10 回の計測結果全てに共通している。分布に若干の偏りが見られるが、これは可視化ガラス窓が一様に加熱されていなかった事が原因であると考えられる。この際、励起光強度及び S/N 比は高く、温度評価には十分な信号が得られている。40ms、50ms では不均一な温度分布が見られ、下部領域では特に温度が高く、40ms では上部領域との差が 100°C 近くあるケースもある。計測毎に温度分布も全く異なっていた。30ms は着火前、40ms、50ms は着火後であるため、40ms、50ms における温度変化は不規則な火炎を伴う燃焼による温度上昇の影響を受けているものと考えられる。

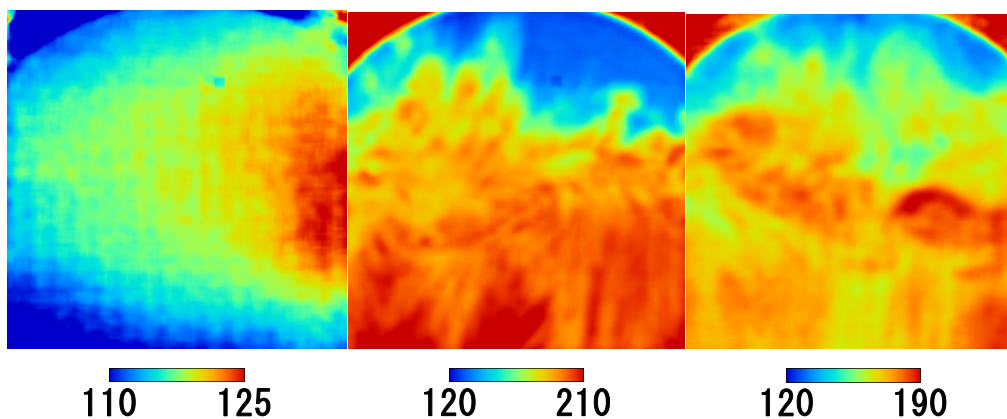


Fig.11 Measured temperature at 30, 40 and 50 msec

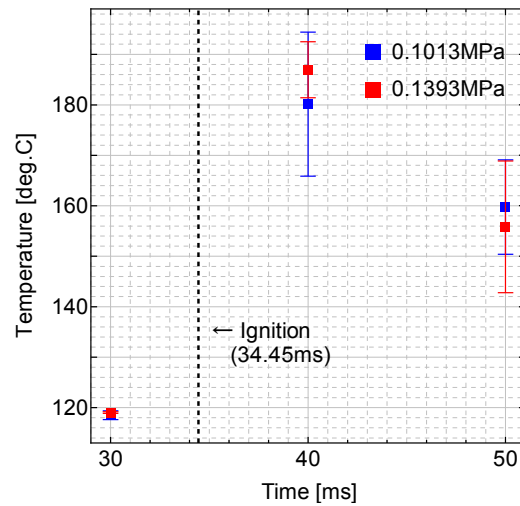


Fig.12 Measured temperatures and the deviation

3. 結論

本研究ではまず、RCEM 筒内壁面温度計測に向け、計測で想定される温度範囲において高い温度応答性を示す可能性のある蛍光体 $Y_2O_2S:EuSm$ の燐光特性について実験的な調査を行った。その結果、 $100^{\circ}C$ から $200^{\circ}C$ において高い温度依存性を示した。そこで蛍光体を RCEM 壁面に塗布し、筒内壁面温度計測を実施した。温度校正データを利用して計測誤差を求めた結果 $\pm 4.4^{\circ}C$ であった。また、RCEM 燃焼時の筒内壁面温度を測定した結果、着火後にのみ画像の下部領域において高い温度分布を示していることが分かり、定性的に正しい結果が得られた。