火炎を伴う場における瞬時壁面温度分布計測法*

染矢 聡¹⁾, 富永 馨²⁾, 古谷 博秀³⁾, 岡本 孝司⁴⁾

Instantaneous Surface Temperature Measurement Applicable in a Severe Condition with Light Emission

Satoshi SOMEYA, Kaoru TOMINAGA, Hirohide FURUTANI and Koji OKAMOTO

ABSTRACT

A luminescent properties of a phosphor material, $\text{Y}_2\text{O}_3\text{:EuSm}$, was investigated. A temperature sensitivity of the spectral shape was only $0.008\%/^{\circ}\text{C}$. That of the luminescent lifetime was $0.78\%/^{\circ}\text{C}$ in a range of $50\sim 210^{\circ}\text{C}$. A lifetime based phosphor thermometry was performed using simple experimental setup composed of a non-intensified high speed CMOS camera, a single-pulsed UV laser and a phosphor coated with a thin metal film. The proposed system makes it possible to measure an instantaneous wall temperature even in a combustion chamber. It was demonstrated that the effect of the excitation power on the phosphor lifetime was small and that the coated metal film never affected to the phosphor lifetime. The temperature uncertainty was $\pm 4.4^{\circ}\text{C}$ which was evaluated from the measurements of temperature uniform fields. Then, the instantaneous wall temperature measurement was demonstrated in a severe condition with a combustion flame in the RCEM. The measured temperatures were qualitatively correct.

Keywords: Luminescence, Lifetime, Temperature, Visualization, High Speed Camera

1. 諸言

近年の環境問題や、石油資源枯渇の懸念に伴い、代替エネルギーへの転換が求められている。そのなかでも天然ガスを使った発電方式は、日本近海に大量のメタンガスが埋蔵されていることもあり、高効率かつ低公害な内燃機関の燃焼方式である予混合圧縮着火燃焼と共に注目されている。これらの内燃機関の最適設計のためには、筒内温度分布を把握することが重要となる。しかし、内燃機関は高負荷環境であるため、内部の温度分布の定量計測は容易ではない。また、燃焼容器以外でも、防火壁の健全性評価など、強い赤外光を発する火炎に曝される構造物の表面温度を非接触で測定する手法が求められている。

この問題を解決するため、Phosphor Thermometry と呼ばれる、蛍光体を用いた壁面温度分布計測法^(1,2)が開発されている。Omrane ら⁽³⁾は 8 台の Intensified CCD

(ICCD)カメラを使用している。1 カメラにつき露光時間 $100\mu\text{s}$ として励起後 $500\mu\text{s}$ から $1300\mu\text{s}$ までの燐光を 8 台のカメラで連続的に撮影し、 $\pm 1\sim 5^{\circ}\text{C}$ の計測誤差としている。この例では 8 台のカメラを使用しているため、各画像の空間的なマッチングが難しく、また計測スペースの限られた環境では適用が難しい。Khalid ら⁽⁴⁾は燐光の立ち上がり時間を利用し、撮影速度 $1,000,000\text{fps}$ で計測を行っているが、温度算出に 100 枚もの画像を使用しており、計測誤差も $\pm 80^{\circ}\text{C}$ と比較的良くない。Kissel ら⁽⁵⁾は CMOS カメラを利用し $150,000\text{fps}$ の速度で撮影を行っているが、温度算出には 15,000 枚の画像を使用しており、データ取得に要する時間が長い。小酒ら⁽⁶⁾は強度法、寿命法をそれぞれ用いて急速圧縮膨張器(RCEM: rapid compression and expansion machine)の燃焼時における壁面温度分布測定を行っているが、寿命法については光電子増倍管を用いた点計測であり、また、強度法による可視化については単波長の強度法となっており、励起光強度分布の影響を受ける可能性がある。

一方、著者らは近年、有機燐光染料を含有した粒子を用いた温度速度同時計測⁽⁷⁾や、蛍光体粒子を用いた温度速度計測について報告してきた。また、燃焼火炎の存在しない場合のエンジン筒内壁面温度分布計測も実施してきた。

そこで本研究では燐光寿命が温度依存性を持つ無機燐

* 原稿受付 2012 年 2 月 17 日

1) 正会員 産業技術総合研究所, (〒305-8564 茨城県つくば市並木 1-2-1, E-Mail:s.someya@aist.go.jp)

2) 非会員 東京大学大学院

3) 正会員 産業技術総合研究所

4) 正会員 東京大学大学院

光体を用い、燃焼火炎を伴う場合でも適用可能な瞬時温度分布計測法について検討し、実証試験として、燃焼時における RCEM 壁面の瞬時の温度分布計測を行った。

2. 蛍光体の発光特性

2.1 測定方法

本研究では燃焼容器壁面の温度範囲として、 100°C から 200°C ほどの温度を想定し、この温度範囲において高い温度依存性を示す蛍光体 $\text{Y}_2\text{O}_3\text{:EuSm}$ の各温度における発光スペクトル及び発光寿命を測定した。実験装置及び測定方法については以下のとおりとした。

Fig.1 に示すようにデジタルホットプレート (AS ONE ND-2) を用いて蛍光体試験片を加熱する。ヒータは 50°C から最大 210°C まで加熱し、一定の温度間隔毎に発光特性を測定した。試験片は直径 0.5mm の K 熱電対をスポット溶接した SUS304 製の板に蛍光体粉末を塗布したものを用いた。実験ではこの蛍光体試験片に紫外線パルスレーザー (10Hz, 最大出力 20mJ , 波長 355nm) を照射した。紫外線は拡散板により拡げ、発光面を出来る限り一様な強度で励起できるようにした。紫外線により励起された蛍光体から発せられる発光を分光器 (Ocean photonics, Maya2000-Pro), 高速度カメラ (Photron Ltd. FASTCAM SA1.1) で取得した。高速度カメラでは発光寿命を測定し、分光器では発光スペクトルを 20 秒の時間平均値として取得した。高速度カメラのフレームレートは $20,000\text{fps}$ とし、露光時間を $49.8\mu\text{sec}$ とし撮影を行った。画像は 4096 階調の輝度値情報を持ち、空間解像度は $512 \times 512\text{pixels}$ である。高速度カメラにはレンズ (Nikon F1.2 f50mm) 及び光学フィルタ (シグマ光機 O56) を装着した。1 回の励起毎に 7 枚の画像を撮影し、これを 200 回分取得した。

Fig.1 Schematic of the experimental set up.

2.2 二色強度法

分光器を用いて測定した、各温度における時間平均発光スペクトルを Fig.2 にまとめた。図ではわかり易く表示するため 40°C 毎の測定値を示した。図から、発光スペクトルが 625nm と 704nm に高い鋭いピークを持つこと、発光強度が高い温度依存性を持ち、温度が上昇するにつれて全体的に発光強度が低下していることがわかる。 625nm においては、 50°C から 130°C の温度変化に伴っ

て、発光強度が約 50000 から 28000 に低下している。温度に対して線形に低下したと仮定して簡易的に温度感度を見積もると、 625nm における温度依存性は $0.551[\%/^{\circ}\text{C}]$ であった。同様に 704nm では発光強度が約 21000 から 12000 に落ち、 $0.538[\%/^{\circ}\text{C}]$ の温度依存性があった。温度に対する発光強度減衰がそれぞれのピーク波長において異なることから、原理的に励起光強度の影響を受けない二色法の適応ができる可能性がある。

Fig.2 Emission spectrum of $\text{Y}_2\text{O}_3\text{:EuSm}$ at different temperatures

Fig.3 Ratio of photoluminescence intensity

そこで、この 2 つのピーク波長におけるスペクトル強度比を算出し、温度に対してプロットしたものが Fig.3 である。スペクトル強度比が温度に対してほぼ線形に変化している。しかし 50°C から 172°C の温度変化に伴い、発光強度比は 2.40 から 2.33 の変化に留まっており、スペクトル強度比の温度感度は $0.008[\%/^{\circ}\text{C}]$ と低い。また、高温条件において特に 704nm における発光強度が弱い。ため、分光計測時のシグナルノイズ (S/N) 比が悪化すると考えられる。また、二色法では分光を行うために計測系が複雑となり、分光画像の空間的なマッチングも考慮せねばならないなど、誤差要因が多い。以上のことか

ら本研究では二色強度法ではなく、以下に示す寿命法を用いる。

Fig.4 Timing chart of excitation and recording

2.3 燐光寿命法

$\text{Y}_2\text{O}_3\text{S}:\text{EuSm}$ の燐光寿命は温度に応答するため、燐光強度の減衰を時系列に検出することにより温度を求めることが可能である。紫外線で励起する場合、励起の瞬間には、周囲の物質からの蛍光を含め、非常に強い発光が見られる。本研究ではこれらの蛍光をノイズとみなし、励起後 $5\mu\text{s}$ 以降の燐光のみをカメラで測定した。撮影時のタイミングチャートを Fig.4 に示した。レーザーによる励起の $95\mu\text{s}$ 前に撮影を開始し、3 枚目のフレーム I_0 に励起後 $5\mu\text{s}$ 以降の燐光が記録される。

燐光強度を直接用いる計測では、励起光強度分布や染料濃度が発光強度に影響を及ぼすが、寿命を用いた温度計測の場合、先に述べた二色強度法同様に、原理的に励起光強度の揺らぎや蛍光体濃度の影響を受けない。また、分光の必要がないため、計測系が比較的シンプルである。燐光寿命はしばしば単純指数関数を用いて表現される。本研究では $5\mu\text{s}$ 以降の燐光のみを取り扱い、相対的な時系列燐光強度変化を式(1)で近似する。

$$\frac{I}{I_0} = C \exp(-t/\tau) \quad (1)$$

ここで、 I_0 は初期燐光強度、 I は時刻 t における燐光強度を表している。また、時定数 τ は燐光強度が最大強度の $1/e$ (約 37%) になるまでの時間を示しており、本研究ではこれを寿命と定義する。

高速度カメラでは、カメラに入射した燐光が、設定した露光時間にわたって積分された値として各フレームの画像に記録される。そこで高速度カメラによる寿命測定の際には、励起後 $5\sim 55\mu\text{s}$ の燐光を記録した 1 枚目の画像の輝度を I_0 として、 I_0 から I_3 の 4 フレームの相対的な輝度変化から寿命 τ を求めた。寿命 τ と温度との関係を Fig.5 (○) にまとめた。なお、寿命 τ と温度とを関連付ける校正関数については任意の関数で近似して求める。

本研究ではべき乗関数を用いている。

Fig.5 Relation between temperature and lifetime with or without the thin gold film

高温になるにしたがって寿命が短くなっており、本研究で想定している温度範囲において、この蛍光体が温度依存性を持つことがわかる。2.2 節と同様に、 50°C から 130°C の温度変化に伴う寿命の変化をみると、寿命が $577\mu\text{s}$ から $219\mu\text{s}$ と約 62% 減少しており、温度感度は $0.78[\%/^\circ\text{C}]$ であった。寿命法は二色強度法同様に励起光強度に依存しない計測法であり、本研究の範囲内において、二色法の温度感度 $0.008[\%/^\circ\text{C}]$ に比べて高い温度感度を持つことがわかった。また、二色法のように分光を介したリファレンス画像を取得する必要がないため、広い波長帯を温度計測に使用することが可能である。

以上の温度感度に関する予備試験結果から、本研究では燐光寿命法を用いて温度計測を行うこととした。

3. 実験

3.1 励起光強度の影響確認

本研究では燐光の減衰が一次指数関数で表現できると仮定している。しかし、一次の指数関数で厳密に表現できるのは、ある特定のエネルギー準位から一次反応として放出される燐光の減衰のみである。多くの場合、燐光は複数のエネルギー遷移プロセスを経て、複数のエネルギー準位から放出されるため、必ずしも単純な指数関数で完全には表現できない。

一方、燐光寿命は燐光強度の時間変化率であり、通常、その値は励起光強度に依存しないとされている。しかし、カメラのリニアリティなど信号検出プロセスには、発光強度の絶対値に依存する要素が存在し得る。また、本研究では先述の仮定に基づいて寿命 τ を求め、また、寿命 τ と温度との関係も近似して求めており、これら温度算出プロセスを通じて測定結果が励起光強度の影響を受ける可能性を否定できない。

そこで確認のため、 $\text{Y}_2\text{O}_3\text{S}:\text{EuSm}$ の燐光寿命に対する励起光強度の影響を調べた。実験では温度および励起光強度を変化させ、高速度カメラを用いて燐光寿命を測定

した。また、本章では Fig.6 に示す様に、ステンレス板ではなく、後述する実証試験で利用する RCEM の可視化観察窓を用いて燐光寿命と温度の関係を求めた。励起光強度はアテネータで 3 段階に変化させた。パワーメーターで測定した時間平均出力は 0.357mJ/cm^2 , 0.578mJ/cm^2 , 0.625mJ/cm^2 であった。寿命は励起後 $5\sim 205\mu\text{s}$ の画像 4 枚を用いて算出した。実験結果を Fig.7 に示す。

Fig.6 Schematics of the experimental system

Fig.7 Effect of excitation energy on the measured lifetime

0.578mJ/cm^2 と 0.625mJ/cm^2 で励起したときの寿命はほとんど同じだが、 0.357mJ/cm^2 では、寿命に違いが見られる。これは絶対的な発光強度が弱くなり、画像の S/N 比が悪化したことが原因と考えられる。よって計測の際には十分なレーザ出力で励起を行う必要がある。また、パルスレーザの出力揺らぎが 8% 以下であれば、励起光強度は測定結果に影響しないと考えられる。一方、画像の異なる任意の領域 (Area1,2) に着目し、CMOS カメラの画素ごとの非線形性などの影響を調べた。その結果、約 180°C の条件で 2~3% ほど測定値が変化した。この差は大きく、正確な測定のためには無視できないが、画像の小領域ごとに校正関数を作成することで回避できる。

3.2 火炎自発光の遮蔽

燃焼火炎が存在する瞬間の温度測定を行うには、火炎の自発光を遮断する必要がある。本研究で塗布している蛍光体の膜厚が薄いため、蛍光体のみでは火炎光が透過する。火炎光はスペクトル分布が広く、 $\text{Y}_2\text{O}_3\text{:EuSm}$ の

発光波長帯の光も含むため、火炎光を遮蔽しなければ温度計測ができない。そこで本研究は火炎光の遮蔽のため、蛍光体の保護も兼ねつつ、蛍光体膜上に金属膜を蒸着した。蒸着装置 (SANYU ELECTRON SVC-700) を利用し、熱伝導性の高い金 (Au) を蒸着した。

蒸着過程で蛍光体が高温にさらされる。これによる蛍光体の変質がないか確かめるため、3.1 と同様に高速度カメラで燐光寿命を測定した。実験結果を Fig.5 に黒丸 (●) で示した。形成後と前でよく一致しており、燐光寿命の温度依存性は金属膜蒸着の影響を受けていないことがわかる。なお、金属膜、蛍光体膜の厚さはそれぞれ 100nm , $2.5\mu\text{m}$ であり、これによる熱伝達の遅れは約 $25\mu\text{s}$ である。これは測定時間の 1/4 である。本研究では測定時間内の温度変化は考慮しないため、熱伝達の遅れについても考慮しない。

3.3 校正試験と逆計算による測定精度の検討

ここまで述べてきたように、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表す校正曲線を予め求める必要がある。そこで Fig.6 同様に、可視化ガラス窓の金蒸着膜側を加熱し、温度を 100°C から 220°C まで 10°C ずつ変化させ、校正曲線を取得した。金蒸着面の温度は素線直径 0.12mm の T 熱電対でモニターした。これにより Fig.5 とほぼ同一の校正データを得た。ここで、3.1 で述べたように、画像の小領域ごとに校正関数を定める方が良いが、RCEM に可視化ガラス窓を固定した状態で温度校正を行うことが困難であるため、本研究では画像全体で共通の校正関数を用いることとした。本論文では in situ 校正に対し、これを外校正と呼ぶこととする。これにより測定精度は悪化すると考えられるが、個別の校正が不要となり、実用上は有利になる。

そこで、二段階の近似による校正関数の算出や外校正の影響を含め、測定にかかる全プロセスを通じて生じる測定誤差について以下の手順で検討した。その結果、Fig.8 に示すように、本研究の計測誤差は $\pm 4.4^{\circ}\text{C}$ であった。

1) 温度一様に加熱したガラス窓の温度を変化させながら、1 組 4 枚、200 組の燐光画像を撮影して燐光寿命と温度の関係を得る。

2) 上記 1) で利用した温度一様画像を、温度が未知であると仮定し、1) で得た校正関数を利用して温度を算出する。

3) 画像取得の際に T 熱電対で測定した温度 (Fig.8 横軸) と算出した温度 (Fig.8 縦軸) とを比較する。200 回の測定の平均及び標準偏差を得る。

また、本研究と類似の先行研究との計測精度を比較した結果を Table 1 に示す。Table 1 は左から参考文献著者、蛍光体種類、撮影速度及び寿命算出に利用した画像枚数 (n), 1 回の測定に要する時間、誤差 ($^{\circ}\text{C}$) を示している。既往の研究については緒言で述べたとおりである。

これらの先行研究と比較すると、本研究では 20,000fps の撮影速度で、画像 4 枚から温度を算出しているため、データ取得に要する時間も 205 μ s と比較的短い。また、画像の小領域ごとの校正を行わなかったものの、計測誤差が $\pm 4.4^{\circ}\text{C}$ にとどまり、先行研究よりも温度算出の面で改善されていることが分かる。なお、著者らのこれまでの計測では、in situ 校正を行った場合に $\pm 2.5^{\circ}\text{C}$ 、本研究同様の外校正の場合に $\pm 9.5^{\circ}\text{C}$ を達成していたが、in situ 校正は燃焼場では適用できなかった。

また、本研究では燃焼場を対象としており、測定面に触れるガスの圧力やガス成分が時々刻々と大きく変化する。Brubach ら⁹⁾は MFG, $\text{Y}_2\text{O}_3\text{:Eu}$, $\text{LaO}_2\text{S:Eu}$ について、燐光のガス濃度・圧力依存性を調べ、 $\text{Y}_2\text{O}_3\text{:Eu}$ の燐光はガス濃度の影響を受けるが、MFG, $\text{LaO}_2\text{S:Eu}$ の燐光は圧力や、酸素、窒素、メタン、ヘリウム、二酸化炭素、水蒸気の濃度の影響を受けないことを実測して明らかにしている。本研究で用いる $\text{Y}_2\text{O}_2\text{S:EuSm}$ は、その発光スペクトル、燐光寿命、温度依存性など、ほぼ同じ特性を持っているため、本研究では $\text{Y}_2\text{O}_2\text{S:EuSm}$ の燐光も $\text{LaO}_2\text{S:Eu}$ 同様に圧力及びガス濃度の影響を受けないことを仮定する。また、本研究では金属薄膜を蛍光体に蒸着したため、気体と蛍光体との接触が制約されている点からも、測定結果はガス濃度の影響を受けていないと思われる。

Fig.8 Back calculated temperature

Table 1 Comparison with previous researches

	Phosphor	Frame rate(n)	Time	Error
Present study	$\text{Y}_2\text{O}_2\text{S:EuSm}$	20kfps (4)	200 μ s	$\pm 4.4^{\circ}\text{C}$
Author's previous study	$\text{La}_2\text{O}_2\text{S:Eu}$	40kfps (4)	100 μ s	-9.5~7.1 $^{\circ}\text{C}$ -2.4~1.0 $^{\circ}\text{C}$ (in situ calib.)
Omrane. A.	MFG	ICCD $\times$ 8 10kfps (8)	1300 μ s	$\pm 1\sim 5^{\circ}\text{C}$
Khalid. A. H.	$\text{Y}_2\text{O}_3\text{:Eu}$	1Mfps (100)	100 μ s	$\pm 80^{\circ}\text{C}$
Kissel. T.	MFG	150kfps (15000)	100ms	$\pm 1\sim 5.5^{\circ}\text{C}$

4. 火炎を伴う場の瞬時壁面温度分布計測

4.1 RCEM 壁面温度計測の実験装置及び実験条件

本研究では RCEM を用いて燃焼中の瞬時壁面温度分布計測実験を行った。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試験装置である。実験装置の概要を Fig.9 に示す。

ピストンヘッドはフラットなものを使用した。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、中心よりやや下の位置に直径 40mm の可視化ガラス窓を設置できる。可視化ガラス窓の主室側に蛍光体 $\text{Y}_2\text{O}_2\text{S:EuSm}$ を塗布し、その上から金を蒸着した。可視化ガラス窓の正面に高速カメラを設置し、カメラの斜め後方から蛍光面にむかって紫外線レーザーを照射した。撮影の条件は本論文 2, 3 章と同じである。撮影領域は $32 \times 32 \text{mm}^2$ (63 $\mu\text{m}/\text{pixel}$) とした。

Fig.9 Schematics of the experimental system

Table 2 Experimental parameters in RCEM

case	Initial pressure [MPa]		Initial temp. [$^{\circ}\text{C}$]	Equivalence ratio		Compression ratio	Rev. [rpm]
	Main.	Sub.		Main.	Sub.		
1	0.1013	0.1413	127.6	0.6	1.25	10.9	1200
2	0.1393	0.1963					

実験ではピストンの動作開始後 30ms, 40ms, 50ms の 3 条件で実験を行った。RCEM は 1200rpm 相当の速度で動作する。ピストンの動作開始後 34.45ms において着火信号が入り、35.7ms に上死点 (TDC) に達する。

そのため、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。前述したように、RCEM は通常のエンジンのように連続してピストンを作動させることは出来ない。そのため、本実験では 1 回の運転で 1 点のタイミングかつ 1 回の計測を行った。計測は各タイミングで 10 回ずつ行った。2, 3 章の実験では同条件で 200 回連続して撮影を行い、その平均値や偏差を検討したが、RCEM による実験では、全ての条件について 1 回のみの瞬時温度分布計測である。

RCEM の燃焼ではメタン (CH_4) と空気 ($\text{N}_2 + \text{O}_2$) の予混合気を燃料とし、着火には Nd-YAG レーザー (355nm) を副室に集光させて行うブレークダウン方式

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、恒温循環槽を用いて RCEM 全体を昇温し、ピストンの動作開始前の金属製燃焼室側壁を 127.6°C で一定として壁温度計測を行った。温度計測時の RCEM 運転条件を Table.2 に示す。主室及び副室の初期圧力は 2 条件とした。

4.2 瞬時壁面温度分布計測結果

Fig.10 は高速度カメラで取得した、Case2, 計測開始後 40ms の場合の初期燐光画像 (I_0) である。火炎の広がりによる局所的な温度上昇により、燐光強度が不均一となっている様子がわかる。また、背景に火炎光が映り込んでいないことから、蛍光体膜上に形成した金属膜が火炎の自発光を遮っていることがわかる。

Fig.10 Captured image, I_0 , at 40ms (Case2)

Fig.11 Measured temperature at 30ms (Case1)

Fig.12 Measured temperature at 40ms (Case1)

寿命法により、ピストン動作開始後 30ms, 40ms, 50ms における瞬時温度分布を算出した結果が Fig.11~Fig.13 である。30ms における温度は、10 回の実験を通じてほとんど温度分布が変化しなかった。一方、40ms, 50ms においては、計測毎に温度分布が異なる結果となった。これは燃焼火炎形状が燃焼のたびに異なるためである。

本研究の実験条件における火炎伝播の状態を確認するため、別途、燃焼場の撮影を行ったところ、上部の副室で着火した火炎が下方に急速に広がり、シリンダ下部側面に衝突した後に側方や上方に燃え広がる様子が見られた。Fig.12, Fig.13 の温度分布はシリンダ下部に衝突した火炎が広がる様子と定性的に一致する。

Fig.13 Measured temperature at 50ms (Case1)

Fig.14 には本研究による寿命法算出温度と、本研究とは別に行われた E 型高速熱電対 (Medtherm 製, TCS-103-E, 耐圧 14MPa) による壁面温度計測結果⁽⁸⁾をまとめた。

ここでの寿命法算出温度は画像中央の $104 \times 104 \text{ pixel}^2$ の領域における平均温度を示している。図中のエラーバーは 10 回の計測における温度のサイクル標準偏差を示している。着火前の 30ms においては 120°C 弱でサイクルのばらつきが小さく、Case1, 2 でいずれも局所的な温度の標準偏差は $\pm 1^\circ\text{C}$ 以下であった。着火後の 40ms になると一気に温度は上昇し、180°C 前後の値を示しており、50ms では温度が若干低下して 160°C 弱の値を示している。また、着火後の温度である 40ms, 50ms での測定値は、燃焼火炎の影響により計測毎に温度分布が大きく異なることからサイクル標準偏差も大きくなっている。

薄膜熱電対では、シリンダーヘッド (直径=100mm) の上から①10mm, ②30mm, ③50mm, ④70mm, ⑤90mm の 5 箇所の位置で温度測定が行われている。④⑤の位置では、着火直後に急速に温度が上昇し 40ms 前後で最大に達し、ゆっくりと温度が下がり続けていることが確認できる。①②の位置では④⑤より遅れて温度が上

昇し、上昇温度幅も小さい。また、中央の③を境として、①②と④⑤の間で大きな温度差がある。なお、本研究において壁面温度計測を行った領域はおおよそ②～④のエリアに相当し、画像の上部領域が②～③、下部領域が③～④の位置に相当する。本研究の結果においても着火後は、上部領域と下部領域とで温度差が大きく、薄膜熱電対による測定結果と定性的に一致する。

Fig.14 Measured temperature by a thin thermocouple and lifetime based thermometry

ここで、着火前の 30ms における温度は薄膜熱電対を用いた実験結果より、燐光寿命を用いた本研究の測定結果の温度が低い。これは熱電対試験では Fig.9 のガラス窓部が存在せず金属製フランジの温度を測定しているが、本研究では Fig.9 のようにガラス窓を用いる必要があり、ガラスの温度と金属製燃焼室側壁温度が同一になっていないためと考えられる。

一方、薄膜熱電対を用いた実験では、着火後の壁面温度が蛍光体実験で測定した温度よりも低い。薄膜熱電対を用いた実験ではピストン圧縮開始後 35.3ms 後に上死点に到達し、その 0.45ms 後の 35.75ms に着火している。つまり、本研究では上死点到達の 1.25ms 前に、薄膜熱電対実験では上死点到達後の 0.45ms 後に着火されており、本研究のほうが燃焼時の筒内圧が高い。そのため、着火後の筒内ガス温度は蛍光体実験のほうが高く、壁面温度も蛍光体実験において高い結果となった。ここで、着火タイミングの異なる燃焼実験における温度を適切に推定することは困難である。本来全くの同一条件で両者の実験を行うべきであるものの、マシンタイム等の都合により、これまで実施できていない。しかしながら両実験における測定結果は定性的には良く一致しており、本計測手法で燃焼容器壁面の温度分布を測定できると考えられる。

5. 結言

本研究では、蛍光体 $\text{Y}_2\text{O}_2\text{S}:\text{EuSm}$ の燐光を用いた温度測定法について、二色強度法と寿命法について検討した。

その結果、 $\text{Y}_2\text{O}_2\text{S}:\text{EuSm}$ を用いて 100~200°C の温度を測定するには、寿命法が高い温度感度を持つことがわかった。そこで、金属薄膜を蒸着した $\text{Y}_2\text{O}_2\text{S}:\text{EuSm}$ と 1 台の高速度カメラ、シングルパルスレーザーを用いた寿命法により、壁面温度分布の瞬時計測を行った。寿命の算出に際して、蛍光体を励起した 5~205 μs の間の燐光を記録した 4 枚の画像を用いた。

本研究では、寿命法による温度測定において、励起光強度の 8% 程度の変化が測定結果にほとんど影響を与えないことを示した。また、金属薄膜を蛍光体上に蒸着することで火炎の自発光を遮蔽し、この薄膜が蛍光体の温度感度に影響を与えないことを明らかにした。

燐光寿命を用いた温度分布計測法の誤差について調べるため、温度が一樣かつ既知の壁面温度を解析した結果、カメラの素子ごとの校正を行わず、画像全体で共通の寿命-温度校正関数を用いた場合の誤差は $\pm 4.4^\circ\text{C}$ となった。

本手法によって測定した、燃焼火炎を伴う条件における RCEM 筒内壁面温度分布は、火炎形状や既往の研究結果と比べて定性的に正しいことを示した。以上により、本研究で採用した、金薄膜と蛍光体を用いた燐光寿命温度測定法は、耐火・耐熱構造材の開発や燃焼器開発など、火炎を伴う場の容器壁面温度を瞬時に計測することが可能であることを示した。

謝 辞

本研究費の一部は財団法人東電記念科学技術研究所からの助成によるものである。本研究の一部は科研費 (20760129) および (23360089) の助成を受けたものである。ここに謝意を表す。

本研究の遂行に多大なご協力を頂いた、株式会社コベルコ科研、満田正彦氏、川西秀樹氏、延谷義晴氏、松岡寛和氏、および産業技術総合研究所、坂田藍美氏、石井慶子氏に、この場をかりて謝意を表します。

参考文献

- 1) Allison, S.W., Gillies, G.T.: Remote thermometry with thermographic phosphors: Instrumentation and applications, Review of Scientific Instruments, Vol.68, No.7 (1997) pp.2615-2650.
- 2) Khalid, A.H., Kontis, K.: Thermographic phosphors for high temperature measurements: principles, current state of the art and recent applications, Sensors, Vol.8 (2008) pp.5673-5744.
- 3) Omrane, A., Ossler, F., Alden, M.: Temperature measurements of combustible and non-combustible surfaces using laser induced phosphorescence, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol.28 (2004) pp.669-676.
- 4) Khalid, A.H., Kontis, K.: 2D surface thermal imaging

- using rise-time analysis from laser-induced luminescence phosphor thermometry, *Measurement Science and Technology*, Vol.20 (2009) 025305.
- 5) Kissel, T., Baum, E., Dreizler, A., Brubach, J.: Two-dimensional thermographic phosphor thermometry using a CMOS high speed camera system, *Applied Physics B*, Vol.96 (2009) pp.731-734.
- 6) 小酒英範, 河内陽平, 大西毅, 相澤哲哉 : 感熱蛍光体を用いたディーゼル機関燃焼室壁面温度の画像計測, *日本機械学会論文集 B 編*, Vol. 74, No. 738 (2008), pp.490-497.
- 7) Someya, S., Li, Y., Ishii, K., Okamoto, K.: Combined Two-Dimensional Velocity and Temperature Measurements of Natural Convection using a High-speed Camera and Temperature Sensitive Particles, *Experiments in Fluids*, Vol.50 (2010) pp.65-73.
- 8) 満田正彦, 川西秀樹, 延谷義晴, 松岡寛和, 古谷博秀, 徐世中, 本澤尚史, 高橋栄一, 染矢聡, 富永馨: 急速圧縮膨張装置を用いたエンジン模擬実験と燃焼の解析・計測技術~LES 乱流解析と燃焼診断技術~, *自動車技術会学術講演会前刷集 No.109-10* (2010) 60-20105608.
- 9) Brubach, J., Dreizler, A., Janicka, J.: Gas composition and pressure effects on thermographic phosphor thermometry, *Measurement Science and Technology*, Vol.18 (2007) pp.764-770