レーザ誘起 Phosphor による二次元ガス温度計測*

長谷川 亮^{*1}, 阪田 一郎^{*1}, 柳原 弘道^{*2}
Bengt JOHANSSON^{*3}, Alaa OMRANE^{*3}, Marcus ALDÉN^{*3}Two-Dimensional Gas-Phase Temperature Measurements
Using Laser-Induced PhosphorRyo HASEGAWA^{*4}, Ichiro SAKATA, Hiromichi YANAGIHARA,
Bengt JOHANSSON, Alaa OMRANE and Marcus ALDÉN^{*4} Toyota Motor Corp.,
1200 Mishuku, Susono-shi, Shizuoka, 410-1193 Japan

A new technique based on phosphor thermometry, for measurements of two-dimensional gas-phase temperature in combustion was established as a new laser diagnostic. The temperature calibration of Dy: YAG phosphor was taken at a surface of solid. The validation for applying gas-phase with line-intensity ratios method was evaluated with lifetime method and thermocouple data in a steady flow. These data showed the good agreements. Phosphor thermometry with single-shot was examined in turbulent combustion in an engine. The reasonable temperature deviation and the agreement with calculated data within 5% precision were achieved in the ignition process of compression ignition engine. The influence factors such as chemical luminescence and intrusion in combustion were discussed.

Key Words: Phosphor, Temperature, Laser Diagnostic, Thermometry, Combustion

1. 緒 言

内燃機関の着火、燃焼現象は熱伝導、輸送、混合、化学反応が混在した非線形乱流燃焼である。それら物理、化学現象を定量的に把握するためには基礎的な情報が必要となる。特に、エンジン筒内のガス温度分布は最も重要なパラメータの一つであり、高時間、高空間分解能が必要である。¹⁾。そのためにレーザを用いた燃焼の温度計測が数多く試みられている。

CARS 法は精度の高い温度計測技術の一つであるが²⁾、二次元の温度分布計測への応用が困難である。

Rayleigh, Raman 散乱光による温度計測は S/N 比向上が課題である³⁾と同時に、クロスセクション内の化学種分布が必要となる。また、酸素、燃料、水吸収法は光路内平均温度計測のため、不均質、乱流燃焼場には適用できない。近年、多くの研究例のある二次元温度

計測は LIF 法であり Daily によりレビューされている⁴⁾。しかし、クエンチングによる精度悪化、計測対象分子の存在期間の制限がある。クエンチングを考慮した NO⁵⁾ の LIF ではシングルショット撮影には S/N 比が不十分で、3-pentanone⁶⁾ の LIF では適用温度範囲が 700K 程度までである。一方、TLAF 法⁷⁾による温度分布計測は適用温度範囲が高いことと、他の化学種の影響、高価なシステムが応用を制限している。

Phosphor 法による温度計測は従来、ガスタービン⁸⁾、エンジンシリンダヘッド⁹⁾等の表面温度計測に応用されてきた。他には空間内に浮遊されたシングル液滴粒子の温度計測も行われている¹⁰⁾。しかし現在までガス温度計測に適用された例はない。Phosphor 法は LIF 法等と比べ、数多くの計測上のメリットがある。衝突クエンチング、Doppler broadening、レーザによる表面反射光、Mie 散乱光、他の化学種による蛍光も消去することが可能であり、高精度な計測が可能となる。本研究では Phosphor 法をガス温度計測に適用した際の燃焼に対する影響調査、検証、シーディング方法開発、またエンジン筒内への適用を行い、新計測法として確立することを目的とした。

* 原稿受付 2007 年 10 月 4 日。

^{*1} 正員、トヨタ自動車(株)第 2 パワートレイン開発部(〒410-1193 裾野市御宿 1200)。^{*2} 正員、フェロー、Toyota Motor Europe (Hoge Wei 33 B B-1930 Zaventem, Belgium)。^{*3} Lund University (Ole Romers vag 1, SE-22100 Lund, Sweden)。

E-mail: ryo@hasegawa.tec.toyota.co.jp

Fig. 1 Simplified energy diagram of Dy:YAG.

2. Phosphor による二次元温度計測原理

紫外光を Phosphor に照射した場合、二つの波長の Phosphorescence 強度比はその温度に依存する。これを以降、2 波長強度比法と呼ぶ。図 1 に本研究で使った Dy:YAG の Phosphorescence の簡素化されたダイアグラムを示す。355nm のレーザ光が照射されると、Dy³⁺ は ⁴I_{15/2} と ⁴F_{9/2} の二つのレベルに急速に移行する。低温では ⁴I_{15/2} では多フォノン緩和による無放射遷移（図中の波形矢印）により、主に ⁴F_{9/2} に移行し、497nm の発光を示す。一方、高温では ⁴F_{9/2} 状態の一部が上位レベルの ⁴I_{15/2} に上昇する（図中点線矢印）ため主に 458nm の発光を示す。そして、その分布はボルツマン分布に依存する。一方、CCD に検出された j 番目ステートからの Phosphorescence 強度 S_j は下記の式で与えられる。

$$S_j \propto I_{laser} V N \sigma T e \tau_j \exp\left(-\frac{hc\Delta E_j}{kT}\right) \quad (1)$$

ここで、V は数密度 N の Phosphor を含む検査体積、σ は吸収係数、T e は露光時間、τ_j はフィルタ透過率、h はプランク定数、c は光速、k はボルツマン定数、E_j は放射状態エネルギー、T は温度である。この式は二つの異なるエネルギー状態で除算し、簡易化される。

$$\frac{S_j}{S_{j+1}} = \zeta \exp\left(-\frac{hc\Delta E}{kT}\right) \quad (2)$$

ここで、ζ は実験的に求められた定数である。従って、均質な固体表面からの 2 波長の Phosphorescence 強度比と温度の検定結果を取得し、二次元に適用する際は、各画素に対し、除算した比を求めれば良い。同時

に 2 波長の画像を得るために、本研究ではステレオスコープと二つのバンドパスフィルタを用いた。ここで、ステレオスコープを用いる場合、CCD の検知面による感度違いの補正、内部ミラーによる画像歪みの補正をしなければならない。CCD 感度補正のためには、バックグラウンド画像、空間的に均一な光を与えたレファレンス画像を撮影し、以下の式にて補正した。

$$R_{12} = \frac{I_{phos1} - B_1}{Ref_1 - B_{ref1}} \cdot \frac{Ref_2 - B_{ref2}}{I_{phos2} - B_2} \quad (3)$$

ここで R₁₂ は計測された比、I は Phosphorescence シグナル値、B はバックグラウンド画像のシグナル値、ref はレファレンス画像を示す。画像歪みに関しては、グリッド画像を撮影した後に、画像変換プログラムにて修正を行った。

3. キャリブレーション

ガス相でのキャリブレーションを行う前に、テスト容器内でヒーターにより一定温度に保たれた固体表面温度を計測することで 2 波長強度比法のキャリブレーションを行った。図 2 にその概略図を示す。

Fig. 2 Schematic diagram of calibration setup.

Fig. 3 Dy:YAG spectra at different temperatures.

Fig. 4 Line intensity ratios of Dy:YAG at different temperatures.

表面に均一にコーティングされた平均粒径 $4\mu\text{m}$ の Dy:YAG に 355nm の YAG レーザを照射し、 $\pm 1\text{K}$ の精度を持つ熱電対による温度計測、分光器によるスペクトル計測、光電子倍增管 (PMT) によるライフタイム計測を行った。固体表面のキャリブレーションでは熱電対の温度を基準とし、ライフタイムと温度の関係、2 波長強度比と温度の関係を求めた。ライフタイム τ は Allison らにレビューされているように¹¹⁾、PMT の出力値の時間履歴波形を以下の式にフィットさせることで求めた。

$$I = I_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (4)$$

ここで、 I_0 は時間 $t=0$ での Phosphorescence 強度である。図 3 には温度を変化させ、493nm のシグナル値を 1.0 とした時のスペクトル特性を示す。図 4 は 455nm と 493nm のシグナル強度比と温度の関係を示す。ばらつきはエラーバーにより示されているが、小さく、繰り返し性は高かった。

4. 定常流でのガス温度計測検証

Phosphor をガス相で供給した場合に、均一なシーディング、妥当な温度ばらつきが得られるかどうかを検証する目的で図 5 に示すシステムにて熱電対、2 波長強度比法、ライフタイム計測の比較を行った。

Phosphor の供給された空気は直径 10mm のバーナーの下流より流速 80cm/s で供給された。バーナーは十分に長く、断熱されており、内部は一定温度に保たれている。イメージインテンシファイアの露光開始は Mie 散乱光が減衰した後より、Phosphor のライフタイムが持続されるまでとし、その時間は設定温度により変化した。本条件ではバーナー出口下方 15mm でガス温度を 573K と設定し、露光時間は 150 μs とした。

Fig. 5 Experimental setup for the validation using a steady flow burner.

Fig. 6 Two-dimensional gaseous temperature of phosphor-seeded air.

Fig. 7 Gaseous temperature comparison between thermocouple, lifetime and line-intensity ratios method.

図 6 に 2 波長強度比法で求めたバーナー上方部のガス温度分布を示す。図 7 には、2 波長強度比法から求められた中心軸上の温度、5mm 間隔に高さを変えた際の熱電対の温度とライフタイム法により計測された温度の比較結果を示す。ライフタイム法と 2 波長強度比法で中央値の差は約 3% 以内であった。一方、熱電対のデータは他の方法と比べ、約 10K 低かった。これは熱電対による測定場への干渉で周囲の空気が取り込まれたためと考えられる。

Fig. 8 Experimental setup and observation area.

2 波長強度比法でのノイズ成分は最小空間分解能 0.2mm のサイズを持ち、ショットノイズの影響が支配的と言える。計算したショットノイズは最大 5% 存在し、これは図 7 中の温度ばらつきと一致するため、計測誤差が 5% 以内で存在すると言える。

5. エンジン筒内ガス温度計測

5・1 実験装置 実験装置の概略と観察範囲を図 8 に示す。光源は上記同様に YAG レーザの 3 倍波のシート光をエンジンに入射した。この際、レーザ出力はビームスプリッタにより常にモニタリングした。エンジンのボア径は 82.2mm、ストロークは 94mm であり 4 弁式のディーゼルエンジンである。燃焼室はパンケーキ型で圧縮比は 12.2 である。燃料は n-ヘプタン 50% と iso-オクタン 50% の混合燃料をポート噴射により供給した。エンジン回転数は 1200rpm とした。

図 8 のように、Phosphorescence 信号はレーザシートに垂直な方向に設置したイメージンテンシファイアカメラ (Princeton Instruments PI-MAX) によって撮影された。カメラの前には Lavision 社製のステレオスコープと二つのバンドパスフィルタを用いた (中心波長 458nm, FWHM 9.8nm と中心波長 494nm, FWHM 9.8nm)。ここで、355nm のレーザを燃焼場に用いる場合、強い吸収波長を持つホルムアルデヒド等の蛍光があり¹²⁾、バンドパスフィルタを用いても十分には消すことが出来ない。そこで本研究では Phosphor の特徴である長いライフタイムを利用する方法を初めて適用した。すなわち、イメージンテンシファイアのゲート時間はレーザ照射後 100nsec 後から Phosphorescence のライフタイム時間までとすることで、50ns 程度の発光ライフタイムを持つ反射光、Mie 散乱光、燃焼中間生成物の LIF 光をカットし、化学自発光の影響も抑えた。

5・2 HCCI 燃焼のガス温度計測 図 9 に IMEP=0.25MPa, 当量比=0.27 の n-ヘプタン 50%, iso-

Fig. 9 Single-shot two-dimensional temperature distribution at various timings in HCCI combustion.

Fig. 10 Temperature history of HCCI combustion calculated from cylinder pressure (line) and phosphor thermometry data (dots).

オクタン 50% の予混合燃料を圧縮着火燃焼させた時のシングルショットガス温度分布を示す。図中の Q_{rate} は熱発生率から求めた全発熱量に対する発熱割合である。また図 10 に圧力履歴から求めた温度履歴を示す。図中の●印は Phosphor 結果の画像内平均温度を示す。図 11 は -35, -23deg ATDC の画像内の温度ばらつき分布、 σ 、平均温度を示す。図 10 より Phosphor による画像内平均温度は圧力履歴から求めた温度と高い精度で一致した。本条件では、後述するが、高温酸化反応開始前の -16deg ATDC (熱発生 7%) 以降は化学自発光等の影響により誤差 5% 以内を保持できなかった。

図 9, 11 に示す熱発生のない -35deg ATDC では筒内温度ばらつきは $\sigma=33K$ で、中央値の約 5% である。先

Fig. 11 Histograms for single-shot temperature measurement in HCCI combustion for -35 and -23 deg ATDC.

に示したように計測法で5%の誤差を持つので、それ以上のばらつきは筒内の現象によると考えられる。要因としては乱流による境界層付近の低温部の輸送、混合気の不均質さ等と考えられる。一方、図9の温度ばらつきは約2mmのスケールを持ち、最小分解能0.2mmのスケールとは異なる。これは太田ら¹⁴⁾のシュリーレン画像のむらサイズと一致し、現象としての乱れスケールの可能性が高い。また、Einecke⁹⁾らの計測法でも約2mmのサイズを持った温度ばらつきが約5%存在している。一方、熱発生6%の-23deg ATDCでは76Kまで温度ばらつきが増加し、一部は900K以上の高温酸化反応を開始していることがわかった。過去の研究ではHCCI燃焼のガス温度計測は熱発生が生じる前まで、すなわちトレーサが分解するまでが可能であったが、本研究ではPhosphorを適用することで初めて、着火時の燃焼温度計測も高精度で可能であることがわかった。

5.3 Phosphorの熱平衡時間検討 エンジン筒内でPhosphorに出入りする熱として熱伝導とガス-Phosphor粒子間のフリクシヨンの影響を考慮しなくてはならない。しかし、本研究で用いたDy:YAGのPhosphorを本エンジンの温度、圧力条件範囲ではストークス数は0.14以下となり、粒子はガス流れに追従し、フリクシヨンの影響は無視できると言える。次に作動ガスの温度が変化した場合に、Phosphorが熱平衡に

Fig. 12 Relaxation time behaviors of different diameter of YAG:Dy phosphor.

達するまでの時間を計算にて評価した。ここで、本実験で用いたPhosphorの平均粒径は4μmなので粒子内部の温度分布は一定と仮定し、次のガス中における固体球体のヌセルト数¹³⁾から非定常熱伝導方程式を解いた。

$$Nu = 0.37 Re^{0.6} \quad (5)$$

図12に本エンジン条件において、粒子直径をパラメータとした場合の温度緩和時間結果を示す。90%の温度緩和時間は130μsとなり1200rpmでは0.9degであった。

5.4 Phosphor混入による熱力学的影響 Phosphorをエンジン筒内に混入することは圧縮過程、燃焼自体に影響を与えるので、そのシーディング量は均質な画像が得られる範囲で最小とした。その結果、本実験で用いたシーディング量が温度に与える影響は2%である。一方、Phosphor混入によりHラジカル等の第3体による影響も考えられるが、その影響は熱力学的な影響に比べると小さく¹⁵⁾、無視した。

5.5 レーザパルスエネルギーの影響 レーザパルスエネルギーは通常、最小にすることで、粒子の温度上昇を妨げることが望ましい。しかし、Phosphorによる温度計測ではレーザー出力が低すぎると、光路中のレーザー光減衰が起こり得る。このことを調査するために、燃料噴射なしのモータリング状態にて、レーザー出力を変化させた場合の筒内ガスの画像内平均温度とその温度ばらつきを求めた。ここで撮影タイミングは-30deg ATDCとし、観察範囲は境界層付近の温度影響をほぼ受けない燃焼室中央付近とした。

図13に示すように、本実験条件ではレーザーによるPhosphorの温度上昇はほぼ見られなかった。温度ばらつきσにはレーザー出力の最適範囲が存在した。パルスエネルギーが低い場合は光減衰によりS/N比が悪化し、

Fig. 13 Laser power effect on temperature change and standard deviation change.

出力が高い場合はPhosphor光がシリンダヘッド等で反射してS/N比が悪化したと考えられる。本研究ではパルスエネルギーを80mJとし、このエネルギーではPhosphorによるレーザ光の吸収もほとんどないことを確認した。

5・6 化学自発光の影響 着火および燃焼中のPhosphorescenceを計測する場合、バンドパスフィルタを用いているが、少なからず化学自発光がバックグラウンドとして計測される。その影響調査をするために、Phosphorのシーディング有りとなしの両条件で、シグナルの20サイクル平均値を計測した。エンジン条件は回転数1200rpm, IMEP=0.25MPaのHCCI燃焼とした。

図14にPhosphorescenceのシグナル値を1.0としたときの化学自発光シグナル強度を示す。シグナル値の二波長間の差は最大で4%となり、式(2)に与える影響は少ないが、バックグラウンドとしてPhosphorescenceシグナル値に影響を与えることがわかった。従って、本研究ではバックグラウンドの影響が5%以内となる-10deg ATDCまでは計測可能であった。しかし、イメージンティンシファイアのゲートタイムを短くすることで影響を少なくすることは出来ると予測される。

6. 結 論

Phosphor温度計測法を二次元ガス温度計測に初めて適用することを目的とし、定常ガス流れ中にPhosphorを供給し、2波長強度比法、ライフタイム計測、熱電対による比較を行った。またエンジン筒内のHCCI燃焼へ適用し、誤差の評価と要因について調査し、以下の結論を得た。

- (1) 定常ガス流れ中のガス温度計測結果より2波長強度比法ではショットノイズによる最大5%の計測誤差を持つ。その範囲でガス温度計測に固体表面温度のキャリブレーション結果が適用可能である。

Fig. 14 The effect of chemiluminescence intensity of 493nm and 455nm wavelengths in relation to the phosphorescence signal intensity.

- (2) エンジン筒内ガス温度計測より、画像内平均温度は指圧解析から求めた結果との一致が得られる。
- (3) エンジン筒内では高温酸化反応開始前の熱発生7%までは計測可能であり、着火時の温度分布計測が可能である。着火時における900K以上の高温酸化反応領域の温度計測も可能である。
- (4) 高温酸化反応開始後、化学自発光の強い領域ではバックグラウンドとしてPhosphorescenceのシグナル値に影響を与える。

文 献

- (1) Hasegawa R. et al. SAE Trans., HCCI Combustion in DI Diesel Engine, 2003-01-0745 (2003)
- (2) Stenhouse I.A. et al. Appl. Opt. 18, 3819 (1979)
- (3) Buschmann A. et al. 26th Symp. Int. Comb., 437(1996)
- (4) Daily J.W., Prog. Energy Comb. Sci. 23 (1997)
- (5) Bessler F., Hildenbrand F. Schulz C., Appl. Opt. 40, 748 (2001)
- (6) Einecke S. et al., Two-Dimensional Temperature Measurements in an SI Engine using Two-Line Tracer LIF, SAE paper 982468 (1998)
- (7) Dec J.E. et al., 21th Symp. Int. Comb., p1737-1745 (1986)
- (8) Noel B.W. et al., AIAA 2,565 (1986)
- (9) Omrane A. et al., Demonstration of Two-Dimensional Temperature Characterization of Valves and Transparent Piston in a GDI Optical Engine, SAE paper 2004-01-0609 (2004)
- (10) Omrane A. et al., Appl. Opt. 43, 3523 (2004)
- (11) Allison S.W. et al., Rev. Sci. Instrum., 68, 7, p2615-2650, 1997
- (12) Hasegawa R. et al., Influence of Homogeneity on HCCI Combustion, Auto Technology Vol 4 (2005)
- (13) Holman J.P., Heat Transfer 8th edition, McGraw-Hill, ISBN 0-07-114320-3
- (14) Ohta Y and Takahashi H. AIAA 95,236(1984)
- (15) Hasegawa R. et al., Numerical Analysis of Ignition Control in HCCI Engine, SAE paper 2003-01-1817 (2003)