高速度カメラを用いた燐光寿命法による 可視化エンジン内壁面温度分布計測*

染 矢 聡^{*1,*2}, 内 田 光 則^{*3}, 大 倉 康 裕^{*4}
李 艷 榮^{*3}, 岡 本 孝 司^{*2}

Lifetime Based Surface Temperature Measurement in an Optical Engine Using a High-Speed Camera

Satoshi SOMEYA^{*5}, Mitsunori UCHIDA, Yasuhiro OKURA,
Yanrong LI and Koji OKAMOTO

^{*5} Energy Technology Research Institutes of AIST,
1-2-1 Namiki, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-8564 Japan,
Graduate School of Frontier Science, The University of Tokyo,
5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa-shi, Chiba, 277-8563 Japan

The surface temperature inside an optical engine both with and without heating the intake gas was measured. The temperature distribution was measured by a lifetime based phosphor thermometry using only three or 10 images recorded using a non-intensified high-speed CMOS camera by accounting for the pixel-to-pixel variation in the nonlinearity of the sensor. The luminescence from the phosphor was recorded at 40 000 frames per second. A decay of luminescent intensity was represented by a mono-exponential function. The decay curves at various temperature conditions were fitted well to a quadric function, from which the decay constant at each temperature was obtained. The shot-to-shot standard deviation of the decay constant at uniform temperature conditions was 0.17~0.33% and it varied $\pm 0.15\%$ with position, indicating that the pixel nonlinearity has a high nonuniformity. This technique was used to measure the temperature in an optical engine and it gave reasonable temperature maps.

Key Words: Luminescence, Lifetime, Temperature, Visualization, High Speed Camera, CMOS

1. 結 言

近年、カメラや光源の著しい発達に伴い、あらゆる時間・空間スケールで流れの可視化が行われている。速度分布についてはPIV(*particle image velocimetry*)が商品化されて定着しているが、温度場測定に関しては気体・液体など作動流体に関わらず適用可能な汎用二次元温度分布計測技術が存在しなかった。

燃焼場における流れのように、乱流流れと温度や物質濃度変化が複雑な相関を持つ場合、現象の理解やその数値シミュレーションの検証には、温度分布と速度分布を同時計測できることが好ましい。そこで筆者らは、まずオイルの流れを対象として、燐光染料を PIV 粒子に焼結させた感温粒子を作成し、一台の高速度カ

メラと一種類の光源のみを用いた比較的シンプルな測定系で撮影した画像から温度速度分布を求める方法を提案してきた^(1,2)。

その他の二次元温度計測技術には放射温度計、光干渉法、感温液晶(LC)、レーザー誘起蛍光法(LIF)や感温塗料など様々な手法がある。放射温度計は固体表面から温度に応じて発せられる赤外線をマイクロボロメータや InAs 等の半導体センサを用いて測定する方法であり、フィールドワークに気軽に利用でき、測定可能温度レンジが非常に広い。ただし、表面状態や周囲のガス成分、湿度等の周辺環境に影響され易い。光干渉法は光路上の全流体密度変化の積分値としての二次元測定となる。LC⁽³⁾は固体表面に塗布したり液中に分散させて液体中の任意断面での二次元温度分布測定に利用できる。白色光を利用可能であり、また、近年その種類が増えつつあるため利便性が高まっているが、一般的に測定可能温度レンジが約 10°C と狭い。LIF 法はマイクロ・マクロスケールの温度・pH・物質濃度の二次元計測に多用されている⁽⁴⁻⁸⁾。気体中のスカラー量計測についてはアセトン等を燃焼場中に添加して測定

* 原稿受付 2010 年 1 月 19 日。

^{*1} 正員, (独)産業技術総合研究所(☎ 305-8564 つくば市並木 1-2-1)。

^{*2} 正員, 東京大学大学院新領域創成科学研究科(☎ 277-8563 柏市柏の葉 5-1-5)。

^{*3} 東京大学大学院新領域創成科学研究科。

^{*4} 正員, (株)本田技術研究所四輪 R & D センター(☎ 321-3393 栃木県芳賀郡下高根沢 4630)。

E-mail: s.someya@aist.go.jp

する方法もあるが、多くは水溶液を対象とした手法である。蛍光染料は乾燥した状態では発光しないものがほとんどであり、主に水溶液の温度測定に利用されている。感温塗料は固体表面に塗布した金属錯体等の蛍光・燐光を利用し、広い温度レンジに対応できる⁽⁹⁾⁻⁽¹³⁾。

一方、蛍光体の燐光発光強度や燐光寿命が温度に依存することが古くから知られている。蛍光体はプラズマディスプレイや蛍光灯など様々な日常品に利用されており、多くの種類が存在するが、いずれも希土類元素を含む無機物質で、その平均粒子径は $2\sim 10\mu\text{m}$ 程度である。無機蛍光体は耐熱性が高く、数百度以上の高温条件でも発光強度・寿命が温度依存性を示す。既往の研究⁽¹⁴⁾⁻⁽¹⁸⁾では蛍光体の発する燐光強度が比較的弱いことからイメージインテンシファイア付きのカメラを用いて強度法による温度測定をした例が多いが、LIF 同様に二色法を適用する必要があるため、複雑な撮影システムを用いていた。非線形なイメージインテンシファイアの光増倍率に起因してカメラで検出される燐光強度変化が励起光強度の影響を受けるため、また、イメージインテンシファイアの蛍光面には残光が長い ($\sim 20\mu\text{s}$) ものが多いため、燐光寿命計測ではイメージインテンシファイアの利用は限られる。寿命を利用する場合はフォトダイオードなどを用いた点計測や時間変化のなだらかな現象を対象とすることが多い。

本研究では蛍光体を感温粒子とし、エンジン内部流れのような高温・高速流れの温度分布・速度分布を同時計測する手法の開発を目指す。また、できるだけ簡便な撮影システムでこれを実現するため、前報^(1,2)同様、一台のカメラと光源のみを用いた寿命法で温度を評価する。本報ではまずそのための第一歩として、無機蛍光体を可視化エンジン内壁に塗布し、高速度カメラを用い、寿命法で壁面温度分布を測定したので報告する。

2. 実験装置

図 1 に実験装置の概要を示した。図 1 下部は観察面をカメラ側から見た様子を示している。また、表 1 にエンジンの諸元を示す。実験では単気筒可視化エンジンを利用した。エンジンはボア 86mm 、ストローク 86mm であり、吸排気それぞれ 2 つのバルブを備え、吸気ガス(空気)を加熱することができる。実験は吸気加熱なし($46\sim 49^\circ\text{C}$)の条件と吸気加熱により吸気ガス温度(T_{intake})を 200°C とした条件について行った。実験ではスロットルを全開とし、 1500rpm でモータリング運転した。また、クランク角を分解能 1° で測定できるエンコーダーを用いてエンジン、光源とカメラを同期

し、これらをエンジン回転数にあわせて 12.5Hz で動作させた。

Fig. 1 Schematic of the experimental set up

Table 1 Specification of the optical engine

Engine	Optical single cylinder	
Bore × Stroke	$86\text{mm} \times 86\text{mm}$	
Displacement volume	500cc	
Compression ratio	12.5	
Valve timing at 1mm lift	In open	12° BTDC
	In close	13° ATBC

エンジン内筒部に埋め込んだ平坦なアルミニウムターゲット(直径 20mm)に蛍光体を塗布し、ターゲット中央部には K 熱電対を設置した。この熱電対は時間分解能が低いため、実験中の時間平均値として、壁面温度(T_w)をモニターした。燐光寿命から算出する壁温とこの熱電対で測定した時間平均値との比較については後述する。また、実験ではクランク角 1° ごとにエンジン内筒内の圧力を測定して 200 サイクルの位相平均を求め、状態方程式から筒内の平均ガス温度(T_{gas})をクランク角ごとに算出した。

本研究では壁面計測用の蛍光体として $\text{Y}_2\text{O}_3\text{:S:EuSm}$ を利用した。蛍光体はセラミックバインダに混合して塗布した。蛍光体を含まずセラミックバインダのみを塗布した壁面にレーザーを照射した結果、カメラ及びフォトダイオードで検出可能な発光は見られなかった。また、蛍光体燐光寿命は蛍光体の量や励起光強度に依存しないはずであるが、確認のため寿命のレーザー励起強度に対する依存性をフォトダイオードで調べた結果、 $2\sim 40\text{mJ/pulse}$ の条件で、依存性は見られなかった。

本実験では条件により、筒内の圧力や酸素分圧が変化する。Feist ら⁽¹⁹⁾、Brubach ら⁽²⁰⁾は $\text{La}_2\text{O}_2\text{S:Eu}$, YAG:Dy, MFG, $\text{Y}_2\text{O}_3\text{:Eu}$ といった無機蛍光体の燐光に与えるガス成分や圧力の影響について報告しており、 $\text{La}_2\text{O}_2\text{S:Eu}$, YAG:Dy, MFG の燐光寿命は酸素濃度、圧力依存性を全く示さず、 $\text{Y}_2\text{O}_3\text{:Eu}$ の燐光寿命は酸素濃度の影響を受けることを明らかにしている。 $\text{Y}_2\text{O}_2\text{S:EuSm}$ の組成は $\text{La}_2\text{O}_2\text{S:Eu}$ に類似しており、応答温度範囲や感度などの温度依存性も $\text{La}_2\text{O}_2\text{S:Eu}$ と良く似ていることから、ここでは $\text{Y}_2\text{O}_2\text{S:EuSm}$ の燐光寿命は酸素濃度、圧力依存性を持たないと仮定した。無機蛍光体の燐光の酸素濃度依存性は十分に調査されているとは言えず、今後、圧力・酸素分圧を独立に調べる必要がある。

レーザー波長は YAG 第 3 高調波 355nm で、実験時のレーザー出力は約 28mJ/pulse とした。また、レーザー光をできるだけ様な強度でターゲットに照射するため、エンジン上部で拡散させた光をターゲットにあてた。高速度カメラ (Photron Ltd., Fastcam S.A.1.1) は 40000 frame per second (fps) で動作させ、蛍光体を励起した 1μs 後から連続して 10 枚の画像を撮影した。電子シャッターは用いず、各フレームの露光時間は約 25μs とした。フレーム間の撮影デッドタイムは約 150ns である。画像は 256 x 256 pixel の空間解像度、256 階調の輝度で撮影した。観察領域はターゲットの約 1/4 で吸気バルブに近い部位とし、その広さは 11.7 x 11.7 mm で、1pixel あたり 45.7μm に相当する。高速度カメラによる温度測定は、各吸気ガス温度において、ピストン位置が上死点前(BTDC) 30°, 60°の瞬間に行った。表 2 に実験条件をまとめた。

Table 2 Experimental parameters in an optical engine

Crank angle BTDC	(a) 60°	(b) 30°	(c) 60°
$T(tc)$ [°C]	105.1	107.4	122.0
$T(gas)$ [°C]	273.0	391.0	386.0
$T(intake)$ [°C]	49.1	46.7	201.1

3. 実験結果および考察

3・1 温度校正 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減衰係数を求めて温度を評価する。そこでまず通電ヒータを用いてアルミニウムターゲット表面の温度を一律にし、大気圧条件下で校正実験を行った。校正実験ではターゲット表面温度を 80~160°C まで 10°C ごとに变化させた。表面温度は K 熱電対でモニターし、各条件で温度を 10 分間ほど安定させてから撮影した。レーザーを 12.5Hz で発振し、各温度条件で 200

セットのデータを取得した。減衰係数の算出及び減衰係数と温度の関係式の算出には、この 200 セットの平均を利用した。

減衰係数(τ)は以下の式を用いて算出した。

$$I/I_0 = C \cdot e^{-t/\tau} \quad (1)$$

ここで I はある時刻(t)にセンサが感じる総燐光強度、 I_0 は初期燐光強度、 C は測定値をより良く近似するために付加した定数係数で、0.98~1.01 の値であった。励起光強度、蛍光体濃度、ターゲットからセンサ素子までの光学パスなどがセンサの各ピクセルによって異なるため、燐光強度は場所によって異なる。減衰係数を利用する寿命法では理論的には 1 セット 10 枚の画像の 1 枚目の画像強度である I_0 で除することにより蛍光体濃度の非均一性、励起光強度の時間・空間的な非一様性による影響を排除できる。しかし高速度カメラの CMOS センサの各ピクセルの光量に対する応答は必ずしも線型ではなく、また、この非線形性はピクセルごとに異なる。この非線形性やセンサノイズは減衰係数の算出結果に影響を与え得る。これらピクセルごとの誤差を低減するため、本研究では 4 ピクセルごとのエリアにメディアンフィルタを適用した輝度を用いて減衰係数を算出した。

Fig.2 Shot-to-shot fluctuation of the decay constant and their spatial deviation at different temperatures

図 2 に各温度における 200 セットのデータから算出した励起ごとの減衰係数の標準偏差を示した。この励起ごとのばらつきによる偏差を以下ではショット偏差と呼ぶ。黒角(■)および白丸(○)は全てのエリアにおけるショット偏差の平均を表しており、エラーバーはエリアによるショット偏差の値のばらつきを示している。本研究では各励起の後、10 枚の画像を取得しているが、

黒角(■)はそのうち初めの 3 枚のみを用いて減衰係数を算出した場合の結果を、白丸(○)は 10 枚を用いた場合の結果を示している。図 2 に示すように、画像 10 枚を用いた場合、80~160°C でのショット偏差の空間平均値は 0.17~0.33%であり、場所によって±0.15%のばらつきがあった。画像を 3 枚のみ用いる場合でもショット偏差は 1.03~1.53%であり、エリアによるばらつきは±0.29%であった。利用する画像枚数が少ない場合、減衰係数のばらつきが大きくなっており、これは式(1)へのフィッティングに起因しているものと考えられる。画像を 10 枚利用した場合は式(1)へのフィッティング決定係数は 0.998~0.999 となっていたため、これらの揺らぎはセンサの受光強度に対する応答の非線形性や、ピクセル応答特性の空間的な非一様性に起因するものと考えられる。ショット偏差の空間的なばらつきはいずれの場合もショット偏差自体と比べて小さく、4 ピクセルごとのエリアにメディアンフィルタを適用することによって空間的なばらつきを抑えることができているが、ショット偏差を低減することは容易ではない。

以下では画像 10 枚、総露光時間 250μs の場合の結果のみについて述べる。これはエンジンのクランク角 1~2 度の時間分解能に相当し、4kHz での温度測定となる。なお、上記の減衰係数のばらつきは温度換算で 0.10~0.53°C に相当する。

Fig. 3 A relation between the decay constant and temperature

得られた減衰係数と温度との関係の例を図3に示した。本研究では各エリアで減衰係数を算出しているため、減衰係数と温度との関係もエリアごとに算出して温度を算出した。図3は画像中央部における減衰係数と温度との関係である。本研究では減衰係数を温度の二次関数として最小自乗法により関係式を求めた。い

ずれのエリアにおけるフィッティングも決定係数が 0.998 以上となり、二次式でよく近似できていた。減衰係数と温度との関係については Arrhenius の式⁽¹⁵⁾に基づいて評価する例が多いが、本研究では校正データに基づく経験式として二次関数を利用した。

Fig. 4 Back-calculated temperature

図4は図3で得られた関係式を用いて、校正画像の画像中央部での温度を逆算した結果を示している。横軸が校正温度、縦軸が逆算して得られた温度を示しており、減衰係数の算出及び減衰係数と温度との関係式の算出におけるフィッティングの誤差が無ければ、計算結果は図中の点線上に位置するはずである。白丸(○)は 200 ショットの平均値を、エラーバーはショット偏差を示している。逆算の結果、点線からのずれは -2.25~1.15°C、ショット偏差は±0.42~2.34°C であった。図3の校正曲線を得る際に低温、高温側の端にあった条件での誤差が大きく、特に高温側でフィッティングに起因する誤差が大きい結果となった。これは減衰係数と温度との関係式を求める際に、より広い温度範囲で関係式を算出することで低減できると考えられる。

3・2 可視化エンジン内温度測定 得られた減衰係数と温度の関係に基づき、可視化エンジン内壁の温度分布を測定した結果を図5に示した。図5(a)(b)(c)は表2の実験条件(a)(b)(c)に相当し、上死点前 60°(吸気加熱なし)、30°(吸気加熱なし)、60°(吸気加熱あり)の場合の測定結果である。図5(a)(b)(c)中の等高線は 3°C 間隔で描いた。図5の右上部に吸気バルブが位置している。図5(b)下部は上死点へ向かって移動するピストンが蛍光体を隠したために温度を測定できていない。図5(c)右下部では実験中にピストンによって蛍光体塗布面がダメージを受けたため測定できなかった領域がある。

いずれの条件においても筒内の平均ガス温度よりは小さい温度で、ある程度の温度分布を持っている。表 2 に示したように図 5(a)では吸気加熱を行わず、筒内の圧力から計算した筒内ガス温度は 273°C で、熱電対で測定したサイクル平均値の 105°C と大きな差がある。測定結果は $110\sim 128^{\circ}\text{C}$ となっており、クランク角 60° [BTDC] は圧縮行程に入っているため、サイクル平均値よりは高温になっている。吸気口近くでは温度がほぼ一様となっている。図 5(b)はクランク角 30° [BTDC] で、筒内ガス温度は 391°C まで上昇している。図 5(b)は(a)の 3ms 後に相当するが、測定値は 10°C ほど高くなっている。温度分布の形状は(a)の場合とほぼ等しく、温度分布を保ったまま温度のみが上昇したと考えられる。吸気加熱を行った(c)の場合、筒内の瞬時ガス温度は(b)よりやや低い 386°C であるが熱電対指示値が 15°C ほど上昇するなど、吸気加熱による昇温が見られている。

(a)

(b)

(c)

Fig.5 Temperature distribution (a) at 60 BTDC without heating of the intake gas, (b) at 30 BTDC without heating and (c) at 30 BTDC with heating

(c)では(a)の場合と比べ、ターゲット中央部(図左下)では約 25°C ほど上昇している。また、この場合は温度分布が他の条件と異なり、吸気口に近いほど温度が高く、測定値は 35°C 高くなっている。これは吸気された 200°C の高温空気が壁面近傍を通過することによる影響と考えられる。また、等高線の間隔が密になっていた。図 5(a)(b)では温度分布形状を維持しながら温度上昇していること、吸気条件の異なる図 5(c)では温度分布に違いが見られることから、筒内ガス温度にも同様の分布が存在する可能性がある。

他の手法で瞬時の壁面温度を評価することが困難であったため、温度分布の定量的な評価は困難であるが、熱電対で測定した時間平均温度と比較した結果を図 6 にまとめた。図 6 中の破線は吸気加熱の無い場合、実線は吸気加熱を行った場合の熱電対による測定結果を示している。白角(□)は吸気加熱がない場合、黒角(■)は吸気加熱を行った場合の図 5(a)中、 $x=0$ で示した位置における、200 回の測定のアンサンブル平均、エラーバーはショット偏差である。ショット偏差はいずれの場合も $\pm 1.8\sim 1.9^{\circ}\text{C}$ であった。吸気加熱の無い場合、上死点前 60° で 112.2°C 、より圧縮された 30° で 122.1°C となり、吸気加熱を行った場合には 134.8°C となっている。いずれの条件も圧縮過程であるため、時間平均温度よりは高温となる。 $x=0$ の位置でも図 5(a)(b)に示したターゲットの他の部分同様に約 10°C 温度が上昇している。

また、図7には図5(a)中に点線で示した位置における温度分布をまとめた。吸気加熱の無い場合にはある程度の揺らぎを持ちつつほぼ一様に分布しているが、その分布形状はやはり類似しており、クランク角の変化によって一様に昇温している。吸気加熱を行った条件では吸気口に近づくほど温度が高くなっていることが図7からも明らかである。

これらの測定結果は他の検証手法に乏しいために十分定量的に議論することができないが、図4で示した校正画像の逆計算の結果、測定誤差 $-2.25\sim-1.15^{\circ}\text{C}$ 、ショット偏差 $\pm 0.42\sim 2.34^{\circ}\text{C}$ で温度を算出できていること、定性的に正しいことから、精度良く高い信頼性で測定できたものと考えられる。

Fig. 6 Temperature in the optical engine at the center interrogation window

Fig. 7 Temperature distribution at different crank angles with and without heating of the intake gas

なお、校正画像の逆算結果から、類似の先行研究と測定精度などを比較した結果を表3にまとめた。表3は左側から参考文献番号、蛍光体種類、撮影速度(frames per second)、利用画像枚数(n)、計測時間分解能、精度($^{\circ}\text{C}$)を示している。

Kissel⁽¹⁶⁾らはMFGを利用し、150000fpsもの高速度で撮影した画像15000枚を用いて温度評価を行ったとしている。Kissel⁽¹⁶⁾らの文献では温度分布等は示されておらず、温度一様場を測定した場合の偏差として精度を記述している。その結果時間分解能0.1sで $\pm 1\sim 5.5^{\circ}\text{C}$ であったとしている。

Table 3 Comparison with previous researches

Ref. No.	Phosphor	Frame rate(n)	Time	Uncertainty
Present	$\text{Y}_2\text{O}_3\text{:EuSm}$	40k(~ 10)	250 μs	$-2.25\sim-1.15$
(16)	MFG	150k(15000)	100ms	$\pm 1\sim 5.5$
(17)	MFG	10k(8)	1.3ms	$\pm 1\sim 5$
(18)	$\text{Y}_2\text{O}_3\text{:Eu}$	1M(100)	100 μs	± 80

Omran⁽¹⁷⁾は8台のICCDカメラを用い、露光時間100 μs で励起後0.5~1.3msの間の燐光の減衰を測定している。利用した画像枚数が8枚と少ない上、Kissel⁽¹⁶⁾らとはほぼ同様に $\pm 1\sim 5^{\circ}\text{C}$ の精度を得ている。ただし8台のICCDカメラの空間的なマッチングを行う必要があるなど、測定手法としては複雑なものとなっている。Khalid⁽¹⁸⁾らの場合は燐光の減衰ではなく、励起直後に燐光強度が大きくなる特徴を利用した寿命法を用いており、10⁶fpsもの高速で撮影した画像100枚を用いて温度を算出しているが、精度が比較的悪い。これらの類似研究と比較すると、本研究ではクランク角1~2°程度の時間分解能で10枚と比較的少ない画像枚数、小さい画像処理負荷で、安定した測定結果を得たと言える。他の研究では外部校正データを用いて温度評価を行っているのに対し、本研究ではエリアごとにその場実験によって校正関数を作成したことにより、少ない枚数かつ短い露光時間で画像を取得したにも関わらず、表3に示す高時間分解能・高精度の結果につながったものと考えられる。ただし測定結果の定量評価は不十分であり、今後、薄膜熱電対等による参照データを同時取得するなどして、詳細な精度評価を行う予定である。また、蛍光体の燐光寿命を用いたガス温度速度同時計測につなげる予定である。

4. 結 言

本研究では蛍光体、1台の高速度カメラ、355nmの単パルスレーザーを用い、寿命法によって可視化エンジン内部の温度測定を行った。減衰係数の算出、減衰

係数と温度との関係式の算出を、その場校正実験によって画像の小エリアごとに行った。得られた減衰係数と温度との関係式を元に、校正画像を逆計算した結果、測定誤差 $-2.25\sim-1.15^{\circ}\text{C}$ 、ショット偏差 $\pm 0.42\sim 2.34^{\circ}\text{C}$ の結果を得た。これは類似の先行研究に比べ、精度、時間分解能とも比較的良好な結果であった。また、クランク角度や吸気加熱温度を変化させつつ、可視化エンジン内壁の温度を測定した結果、いずれも熱電対にて測定したサイクル平均温度や、筒内ガス温度に比べて定性的に正しい結果を得た。壁面には温度分布が存在し、吸気加熱を行わない場合は 12°C 、吸気加熱を行った場合は 30°C の幅を持つ分布となっていた。クランク角によって温度は変化するものの、その分布状態はクランク角にあまり依存していないことが明らかとなった。

謝 辞

本研究を開始するにあたり、名古屋大学、吉川教授より多くの助言を頂いた。ここに厚く謝意を表す。なお、本研究の一部は科研費(20760129)の助成を受けたものである。

文 献

- (1) Someya S., Kura K., Li Y. and Okamoto K., Temperature and Velocity Measurement Using Temperature Sensitive Particles, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.75, No.758(2009), pp.1975-1982.
- (2) Someya S., Uchida M., Ishii K., Tominaga K., Li Y. and Okamoto K., Lifetime Based Temperature and Velocity Measurement Using High-Speed Camera and Temperature Sensitive Particles, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.75, No.759(2009), pp.2207-2214.
- (3) Fujisawa N., Funatani S. and Katoh N., Scanning liquid-crystal thermometry and stereo velocimetry for simultaneous three-dimensional measurement of temperature and velocity field in a turbulent Rayleigh-Bernard convection, *Experiments in fluids*, Vol.38 (2005), pp. 291-303.
- (4) Crimaldi J.P., Planar laser induced fluorescence in aqueous flows, *Experiments in fluids*, Vol.44 (2008), pp. 851-863.
- (5) Coppeta J. and Rogers C., Dual emission laser induced fluorescence for direct planar scalar behavior measurements, *Experiments in Fluids*, Vol.25 (1998), pp.1-15.
- (6) Sakakibara J. and Adrian R.J., Whole field measurement of temperature in water using two-color laser induced fluorescence, *Experiments in Fluids*, Vol.26 (1999), pp. 7-15.
- (7) Sakakibara J. and Adrian R.J., Measurement of temperature field of a Rayleigh-Bernard convection, *Experiments in Fluids*, Vol.37, No.3 (2004), pp. 331-340.
- (8) Someya S., Bando S., Song Y., Chen B. and Nishio M., DeLIF Measurement of pH Distribution around Dissolving CO₂ Droplet in High Pressure Vessel, *Int.J. Heat and Mass Transfer*, Vol.48, No.12 (2005), pp. 2508-2515.
- (9) Bell James H., Schairer Edward T., Hand Lawrence A. and Mehta Rabindra D., Surface pressure measurements using luminescent coatings, *Annual Review of fluid mechanics*, Vol.33 (2001), pp. 155-206.
- (10) Mitsuo K., Asai K., Takahashi A. and Mizushima H., Advanced lifetime PSP imaging system for pressure and temperature field measurement, *Measurements Science and Technology*, Vol.17 (2006), pp.1282-1291.
- (11) Tezuka N., Kameda M., Asai K., Amao Y. and Nakakita K., Adsorptive pressure-sensitive coatings for unsteady flow measurements, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 68, No.669 (2002), pp. 1391-1399.
- (12) Kameda M., Tabei T., Hangai T., Kawakami T., Nakakita K., Sakaue H. and Asai K., Image measurements of surface pressure distribution on a model in a unsteady flow using an anodized aluminum pressure-sensitive coating, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 71, No.710 (2005), pp. 2486-2493.
- (13) Sakaue H., Tabei T. and Kameda M., Hydrophobic monolayer coating on anodized aluminum pressure-sensitive paint, *Sensors and Actuators B*, Vol.119 (2006), pp.504-511.
- (14) Brubach J., Patt A. and Dreizler A., Spray thermometry using thermographic phosphors, *Applied Physics B*, Vol.83(2006), pp.499-502.
- (15) Coyle L.M. and Gouterman M., Correcting lifetime measurements for temperature, *Sensors and actuators B*, Vol.61 (1999), pp.92-99.
- (16) Kissel T., Baum E., Dreizler A. and Brubach J., Two-dimensional thermographic phosphor thermometry using a CMOS high speed camera system, *Applied Physics B*, Vol.96(2009), pp. 731-734.
- (17) 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.
- (18) 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), Paper No. 025305.
- (19) Feist J.P., Heyes A.L., Seefeldt S., Oxygen quenching of phosphorescence from thermographic phosphors, *Measurement Science and Technology*, Vol.14 (2003), N17-N20.
- (20) Brubach J., Dreizler A., Janicka J. Gas compositional and pressure effects on thermographic phosphor thermometry, *Measurement Science and Technology*, Vol.18 (2007), pp.764-770.