

平成 22 年 5 月 31 日現在

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2008～2009

課題番号：20760129

研究課題名（和文） 燐光を利用した高温気体温度分布の高時間分解能計測技術開発

研究課題名（英文） A time-resolved temperature measurement of gas using luminescence

研究代表者

染矢 聡 ( SOMEYA SATOSHI )

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授

研究者番号：00357336

研究成果の概要（和文）：燐光の寿命を用いた温度分布計測法を開発した。多くの燐光物質の燐光寿命・強度の温度依存性を調査し、データベースを構築した。これに基づき、冷却式 CCD を用いて 2 画像間の燐光減衰を高感度に評価する方法と、高速度カメラを用いて複数画像間の燐光減衰を評価する、計 2 種類の計測方法を開発した。高温場の温度分布計測に加え、当初計画を越えて、これらを液体流れの温度速度同時計測法に発展させた。エンジンシリンダの内側壁面温度分布およびオイルの自然対流場を対象として実験を行い、これらの計測法の精度を評価した。

研究成果の概要（英文）：A novel two dimensional temperature measurement method was developed using a lifetime of luminescence. Temperature effects on the luminescent lifetime and intensity of various luminophors were investigated. Using temperature sensitive luminescent materials, two measurement techniques were developed, one calculated the decay ratio from two images captured by a sensitive cooled-CCD sensor, and the other estimated the decay rate from several sequential images recorded by a non-intensified high speed CMOS camera during a single decay. A temperature distribution on the solid surface of high temperature was successfully measured in an optical gas engine. In addition, beyond an initial plan, a combined measurement of temperature and velocity distribution was performed. We simultaneously measured the temperature and velocity distribution of a double natural convection driven by buoyancy and Marangoni force.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2009 年度	1,900,000	570,000	2,470,000
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：熱工学

キーワード：流れの可視化、燐光、蛍光、温度、寿命

## 1. 研究開始当初の背景

二次元温度測定法について、サーモビューワ、感温液晶、感温塗料などがある。サーモビュー

ワは手軽で、また、温度測定可能レンジも広いものの、測定対象物周りの温湿度やガス成分、対象物の表面状態など周辺環境に強く

影響される。感温液晶も手軽であり、あらゆる温度に対応できるものの、温度測定レンジが約  $10^{\circ}\text{C}$  程度と非常に狭い。感温塗料は高速気流中におかれた翼まわりの定常温度分布を測定する方法として利用されている。一般的に感温塗料は蛍光または燐光染料を塗布した固体壁面上での蛍光/燐光強度を評価する。塗布染料の非均一性や励起光強度分布などを補正するため、温度分布と励起光強度分布は完全に定常であるとの前提の下、温度分布がない一様温度場での事前取得データと温度分布がある場合のデータの比を評価する。また、燐光強度が発光寿命と強い相関を持つことから、燐光染料の発光寿命を利用して、事前の校正画像を用いることなく、染料塗布状況や励起光強度ムラを補正する測定法もある。しかし、燐光発光寿命(発光強度の減衰率)測定法については、タイミングをずらしながら長時間(数千~数万コマ)の多重露光を行うなど、定常現象に適用した例は少なく、過渡現象を評価した例はほとんどない。感温塗料はこれまで空気中に置かれた物体の壁面での定常的な温度計測のために使われたものであり、過渡的な温度分布を計測することに燐光が用いられた例はあまりない。また、これらの従来手法は適用可能な場に制約がある他、表面の温度しか測定できない。

## 2. 研究の目的

本研究では燐光の寿命を用いて、高温場における過渡的な温度分布を測定することを目的とする。

## 3. 研究の方法

上記の目的のため、まず(1)高温場での温度計測に適用可能な温度センサーとして、無機蛍光体に着目し、燐光の光学特性の温度依存性について調べる。

次に、(2)高感度な CCD センサーを用いて、燐光の減衰を評価し、温度を測定する手法を開発する。開発はまず液体流れについて行う。

燐光の減衰や、燐光の分光強度比と温度との関係は一般的には一次関数で表すことはできない。そのため(3)燐光の減衰を高速度カメラで捉え、複数枚の画像の輝度変化から燐光寿命を評価する方法を開発し、これを用いて温度分布計測を行う。

## 4. 研究成果

以下では

(1)燐光物質の光学特性の温度依存性に関するデータ取得

(2)冷却 CCD で撮影した 2 枚の画像を用いた温度分布計測(液体の温度成層場)

(3)高速度カメラで撮影した複数枚の画像を用いた高温場壁面温度分布(エンジンシリンダ内壁)

(4)高速度カメラで撮影した複数枚の画像を用いた温度速度同時計測(液体の自然対流場)について成果をまとめた。

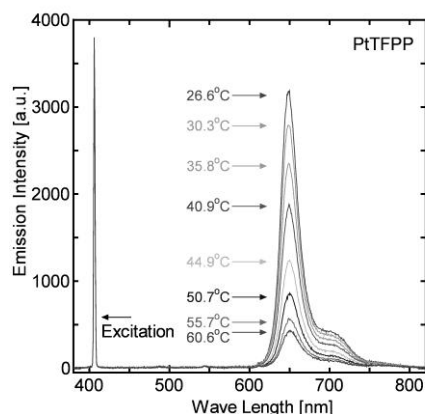


Fig.1 Emission spectra of PtTFPP at various temperature conditions

①図 1 は感温塗料としてしばしば利用される PtTFPP の燐光スペクトルの温度依存性を示している。図 1 では励起光源として波長  $405\text{nm}$ 、出力  $1\text{W}$  の光源を用いた。図 1 から PtTFPP を  $405\text{nm}$  で励起した場合、約  $25^{\circ}\text{C}$  から  $60^{\circ}\text{C}$  の範囲で類似のスペクトル形状を保ちつつ、発光強度が徐々に低下し、燐光強度が温度の関数になることがわかる。約  $34^{\circ}\text{C}$  の温度差で  $650\text{nm}$  あたりのピーク高さが約  $1/8$  になっている。このときフォトダイオードで検出した燐光寿命は  $26.6^{\circ}\text{C}$  で約  $26\mu\text{s}$ 、 $44.9^{\circ}\text{C}$  で約  $11.5\mu\text{s}$  であった。

次に冷却型 CCD カメラ(PCO 社製 PCO1600,  $1600\times 1200\text{pixel}$ ,  $14\text{bit}(16384)$  階調))を用いて各温度での燐光を測定した。このカメラはダブルシャッターモードと呼ばれる機能を有しており、1 秒間に 30 フレーム 15 組の画像を撮影することができ、2 フレーム 1 組の初めの画像の露光時間を任意に設定可能である。また、そのときの 2 画像の撮影時間間隔は  $150\text{nsec}$  である。そこで励起光を OFF にした  $1\mu\text{s}$  後から  $11\mu\text{s}$  後までを 1 フレーム目、 $11.15\mu\text{s}$  後から  $33\text{ms}$  後までを 2 フレーム目として、アクリル樹脂バインダーで濾紙に塗布した PtTFPP の瞬時燐光強度を撮影した。図 2 は、この 2 枚の画像の輝度比(1st frame / 2nd frame)を燐光の減衰率として温度を評価し、PtTFPP の温度依存性をまとめた。ここで、 $20^{\circ}\text{C}$  では輝度比が  $0.63$  ほどで、 $50^{\circ}\text{C}$  での輝度比はほぼ  $1.0$  となる。単純に計算すると  $30^{\circ}\text{C}$  の温度差で比は  $37\%$  変化しており、減衰率の温度感度は  $1.2\%/^{\circ}\text{C}$  であった。これは図 1 のスペクトルから試算した発光ピーク波長の温度感度とほぼ等しい。

これら有機系燐光染料では、EuTTA が特に温度依存性が強く、発光強度で  $-4.3\%/^{\circ}\text{C}$ 、減衰率で  $-6.4\%/^{\circ}\text{C}$  である。また、本研究では気体

の温度分布，気体に触れた固体面の温度分布測定を目的としているため，EuTTA を固体シーディング用の PIV 粒子に焼結し，感温性粒子を作成した．感温性粒子の状態であれば液体中，気体中のいずれでも利用可能であり，固体面に塗布することも可能である．

図 3 は EuTTA を焼結させた固体粒子の燐光寿命を PIN フォトダイオードで測定した結果を示している．

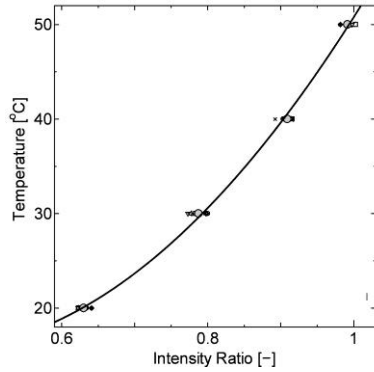


Fig.2 Time averaged decay ratios at 9 different pixel of cooled CCD camera at different temperature conditions

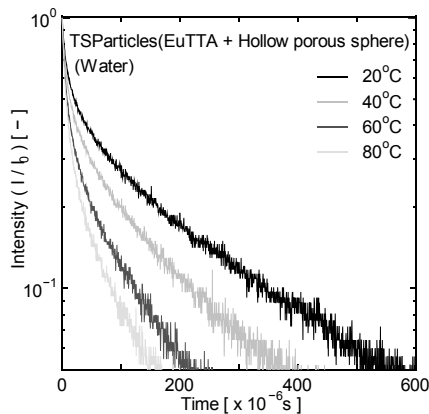


Fig.3 Decay curve of phosphorescence of TSParticles of Eu(TTA) in water under different temperature conditions

その他，無機蛍光体についても調査した．例として Fig.4~6 に  $Y_2O_3:S:Eu$  の燐光強度の時間変化，すなわち燐光減衰の様子を PIN フォトダイオードで測定した結果，発光スペクトル，燐光強度の減衰を高速カメラで測定した結果を示した．また，Fig.7 には燐光発光スペクトル(Fig.5)の 625nm および 704nm におけるピーク強度比(625nm/704nm)の温度依存性をまとめた．なお，Fig.6 は高速カメラを用いて 40000 frame per second(露光時間 25 $\mu$ s)の撮影速度でとらえた画像 4 枚から算出している．Fig.6 中には Fig.4 のフォトダイオードによる測定結果を 25 $\mu$ s ずつ積分し，高速カメラでの撮影条件と同条件としてまとめなおした結果もあわせて示した．

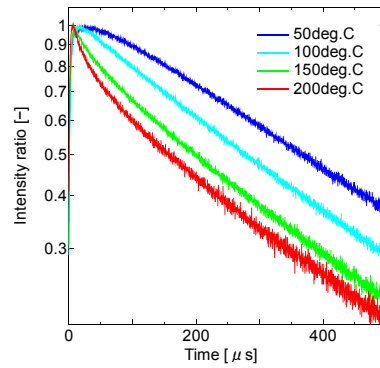


Fig.4 Luminescent decay properties of  $Y_2O_3:S:Eu$  measured by a PIN photodiode at various temperature

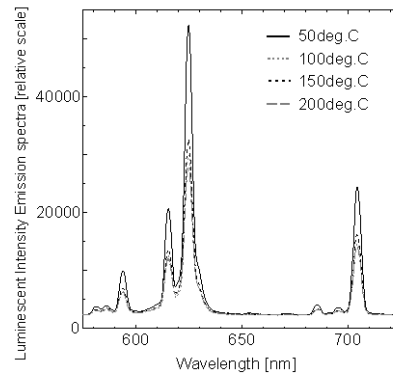


Fig.5 Emission spectra of  $Y_2O_3:S:Eu$  at various temperature

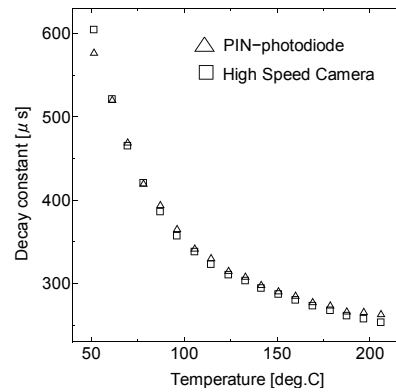


Fig.6 Lifetimes of  $Y_2O_3:S:Eu$

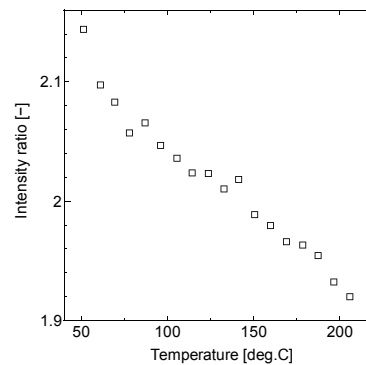


Fig.7 Spectral intensity ratios

② Fig.8 はこの EuTTA 粒子をオイル中に分散させ、温度分布測定を行った結果を示している。オイルバスの自由液面にワイヤーヒーターを浮かべ、これを通電することにより温度成層場を形成した。図は通電開始後 7.5sec 後の瞬間の温度分布を示している。同時に熱電対でもオイルの温度を測定しており、Fig.8 の条件では最も高温の部分で 55°C、低温部で 32°C となっている。ヒーターが液面全体を覆っているわけではないため若干の温度分布ができてはいるが温度成層場が形成される様子が図から確認できる。

また、Fig.9 はこのときの励起光源発光タイミングと画像撮影タイミング及び燐光強度の模式図を表している。励起の瞬間にはガラス容器など他の物質に起因する蛍光も生じると考えられることから、励起の瞬間を含まず、レーザー発光の 1μsec 後から露光時間 160μsec で 1 枚目のフレームを撮影し、その後 150nsec のデッドタイムをおいて 2 枚目のフレームを撮影した。この撮影方式の場合、カメラの機能上の制約から 2 枚目の画像の露光時間を制御することができない。

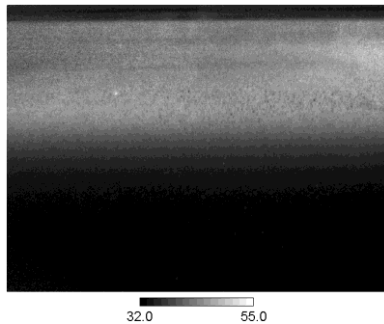


Fig.8 Measured temperature of temperature stratified oil layer

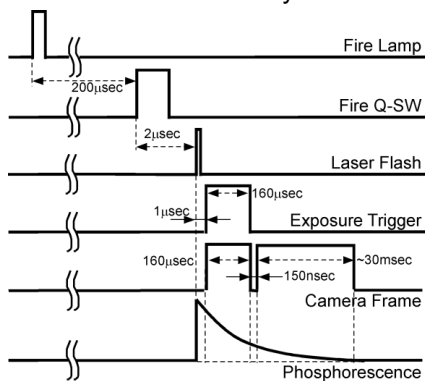


Fig.9 Timing chart for the control of a laser and a camera

③ 上記②により、燐光寿命を用いて過渡的な温度分布を計測できることがわかった。しかし 2 枚目の画像の露光時間を制御できず、露光時間が約 33msec となることから、時間分解能が高いとは必ずしも言えない。そこで Fig.6 に示した高速度カメラの複数枚の画像

から燐光寿命を評価し、温度分布計測をする手法を開発した。この手法の場合、2 枚の画像から温度を算出すれば、計測時間を 50μsec、4 枚の画像から算出すれば計測時間 100μsec と高時間分解能を達成できる。この方法は、燐光寿命の減衰挙動を必ずしも直線関係や単純な指数関数形で表せない場合にも対応可能である。一方、本研究では高温場での温度測定を対象としている。そこで燐光物質として Y<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S:Eu を利用し、単気筒可視化エンジン内筒内壁の瞬時温度測定に開発手法を適用した。装置概要を Fig.10 に示す。エンジン側面に観察用窓、その対面に燐光剤を塗布したターゲットを置き、カメラ側から励起光を拡散させつつ照射した。急速な膨張圧縮によって内部ガス温度が変化し、同時に壁面温度も変化する。

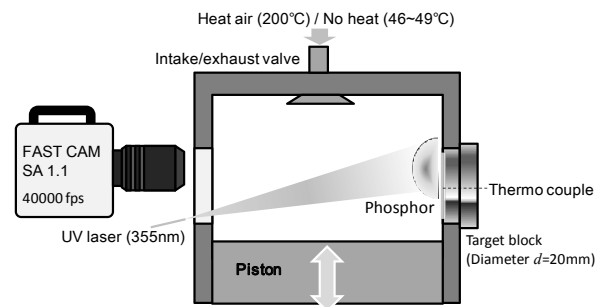


Fig.10 Schematic of the experimental set up

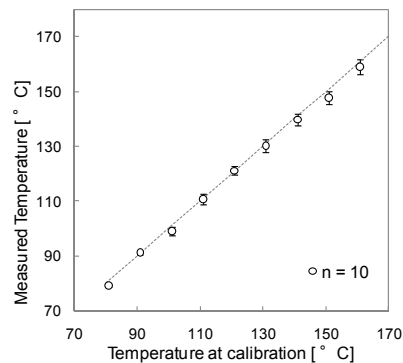


Fig.11 Back-calculated temperature

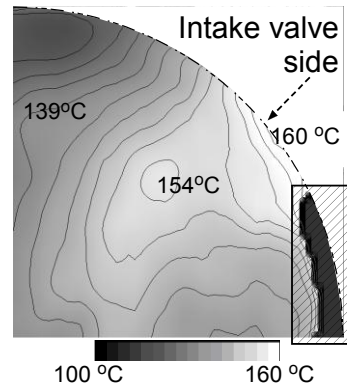


Fig.12 Temperature distribution at 30 BTDC with heating of the intake gas

実験では温度校正用の画像をまず取得し、温度と減衰係数の関係を求めてから、温度が未知の壁面を測定した。校正用画像は温度が一樣かつ既知であるため、これを解析して精度評価を行った結果、温度精度 $-2.25\sim 1.15^{\circ}\text{C}$ であった。また、高速度カメラの非線形性に依存する励起ショットごとの偏差は $\pm 0.42\sim 2.34^{\circ}\text{C}$ であった。最近の類似研究の中でも時間分解能、精度ともに高い結果である。

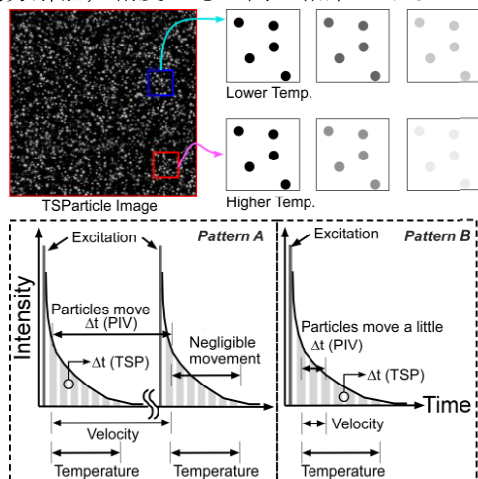


Fig.13 Concept of High Time resolved TSParticle method

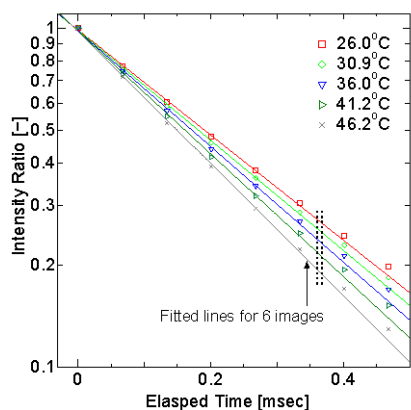


Fig.14 Relation between time and the intensity ratio

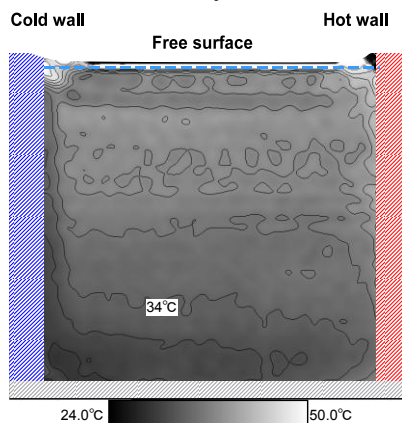


Fig.15 Temperature field in Marangoni convection with the buoyancy driven flow

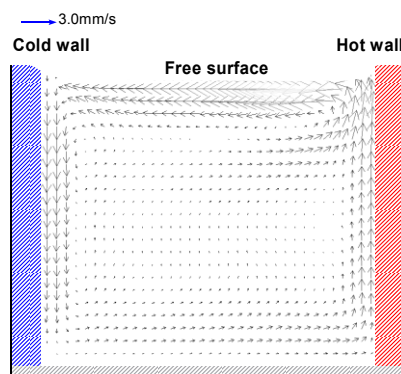


Fig.16 Velocity map in Marangoni convection with the buoyancy driven flow

④ 上記③で開発した高速度カメラによる温度測定法において、上記②と同様に燐光粒子を用いれば、流体中の温度分布を測定可能である。また、この粒子をトレーサーとして PIV 解析を行えば速度分布を算出できる。そこで②で用いた粒子を自然対流場に混入し、温度速度分布計測を行った。手法のコンセプトを Fig.13 に、得られた燐光画像の輝度の減衰と温度との関係を Fig.14 に示した。ここでは 6 枚の画像を用いて温度評価を行う。Fig.14 のように EuTTA の粒子は指数関数的に燐光が減衰した。自然対流場では流速が比較的遅いため、Fig.13 中の A の方法で温度速度を算出する。つまり温度は 1 度の励起後の 6 枚の画像の減衰から求め、速度は各励起直後の明るい画像間で PIV 解析を行って算出した。結果の 1 例を Fig.15,16 に示した。この方法では完全な同時計測にならないが、カメラ、単パルスレーザー各 1 台でデータを取得でき、共通の画像から温度速度を評価することができる。また、気体用粒子を母剤とした EuTTA 粒子の合成も容易にできる他、③の無機燐光物質( $\text{Y}_2\text{O}_3\text{:S:Eu}$  など)を直接粒子として利用することも可能であるため、作動流体を選ばず、低温から高温まであらゆる温度レンジにおける温度速度同時計測に適用可能である。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① 染矢聡、李艶榮、岡本孝司、Combined Two-Dimensional Velocity and Temperature Measurements of Natural Convection using a High-speed Camera and Temperature Sensitive Particles、*Experiments in Fluids*、査読有、2010、(印刷中)(掲載確定)
- ② 染矢聡、内田光則、石井慶子、富永馨、李艶榮、岡本孝司、A visualization of surface temperature by the lifetime

based phosphor thermometry using a high speed camera、Journal of flow visualization and image processing、査読有、2010、(印刷中)(掲載確定)

- ③ 染矢聡、内田光則、大倉康裕、李艶栄、岡本孝司、高速度カメラを用いた燐光寿命法による表面温度分布計測、Trans. JSME B、査読有、2010、(印刷中)(掲載確定)
- ④ 染矢聡、内田光則、石井慶子、富永馨、李艶栄、岡本孝司、高速度カメラと燐光感温粒子を用いた寿命法による温度速度計測、Trans. JSME B、査読有、Vol.75、No.759、2009、pp.2207-2214
- ⑤ 染矢聡、吉田智、李艶栄、岡本孝司、Combined measurement of velocity and temperature distributions in oil based on the luminescent lifetimes of seeded particles、Measurement Science and Technology、査読有、Vol.20、2009、PaperNo.025403

[学会発表] (14件)

- ① 染矢聡、李艶栄、富永馨、丹下学、岡本孝司、Combined Measurement of Temperature and Velocity Distribution of Fluid Flow、the 14th International Heat Transfer Conference (IHTC14)、PaperNo. IHTC14-22504、Washington DC、USA、査読有、2010.8.10(発表確定)
- ② 染矢聡、富永馨、李艶栄、岡本孝司、Combined Velocity and Temperature Measurements of Natural Convection using Temperature Sensitive Particles、15th Int Symp on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics、PaperNo.1744、Lisbon、Portugal、査読有、2010.7.6(発表確定)
- ③ 染矢聡、李艶栄、岡本孝司、Combined Measurement of Velocity and Temperature in a Double Convective Flow、14th International Symposium on Flow Visualization (ISFV14)、PaperNo.095、EXCO Daegu、Korea、査読有、2010.6.22(発表確定)
- ④ 染矢聡、内田光則、李艶栄、岡本孝司、Lifetime-based Phosphor Thermometry of an Optical Engine、14th International Symposium on Flow Visualization (ISFV14)、PaperNo.096、EXCO Daegu、Korea、査読有、2010.6.22(発表確定)
- ⑤ 染矢聡、Phosphor thermometry in a high temperature system、3rd Joint International Symposium on Nuclear Science and Technology “Global Sustainability and Nuclear Engineering、Education and Research”、Shanghai、China、査読無、

2010.1.5 (招待講演)

- ⑥ 染矢聡、内田光則、富永馨、石井慶子、李艶栄、岡本孝司、Lifetime Based Temperature and Velocity Measurement using High-Speed Camera and Temperature Sensitive Particles、62nd Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics、Paper No. EN.00001、Minneapolis USA、査読有、2009.11.22
- ⑦ 石井慶子、染矢聡、内田光則、富永馨、李艶栄、岡本孝司、A Visualization of Surface Temperature by the Lifetime Based Phosphor Thermometry using a High Speed Camera、The 7th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing (PSFVIP-7)、Paper No.094、Kaohsiung、Taiwan R.O.C、査読有、2009.11.17、(代表著者)
- ⑧ 染矢聡、内田光則、富永馨、岡本孝司、石井慶子、燐光寿命を利用した流れの温度速度計測、日本機械学会熱工学コンファレンス 2009、Paper No.A222、宇部、査読無、2009.11.8
- ⑨ 内田光則、富永馨、石井慶子、染矢聡、岡本孝司、蛍光体を利用したシリンダ内壁温度分布計測、日本機械学会熱工学コンファレンス 2009、Paper No.A223、宇部、査読無、2009.11.8
- ⑩ 染矢聡、Temperature sensitive particles~Combined Measurement of Temperature & Velocity、Todai Forum 2009 in the UK、Imperial College London、査読無、2009.4.28 (招待講演)
- ⑪ 染矢聡、Flow and Information Visualization、GCOE Workshop Wisconsin University、U.S.A、査読無、2008.11.18 (招待講演)
- ⑫ 染矢聡、Temperature Sensitive Particles、GCOE Workshop Texas A&M University、U.S.A、査読無、2008.11.15 (招待講演)
- ⑬ 染矢聡、TSParticle、第4回学際領域における分子イメージングフォーラム、早稲田大学国際会議場、東京、査読無、2008.10.9
- ⑭ 染矢聡、Temperature and velocity measurement by using TSParticle、SJTU-UT Joint Workshop on Nuclear Engineering 2008、Shanghai China、査読無、2008.3.21 (招待講演)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

染矢 聡 (SOMEYA SATOSHI)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授

研究者番号：00357336