

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 4 月 27 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360089

研究課題名(和文) 燐光寿命を利用した気体流れの温度速度相関計測

研究課題名(英文) Combined measurement of temperature and velocity of gas flow based on the luminescent lifetime

研究代表者

染矢 聡 (Someya, Satoshi)

独立行政法人産業技術総合研究所・エネルギー技術研究部門・上級主任研究員

研究者番号：00357336

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,400,000円、(間接経費) 4,320,000円

研究成果の概要(和文)：任意の空間スケールにおいて、高い時間・空間分解能で、1台のシングルパルスレーザーと1台のカメラで捉えた画像から任意の作動流体(特に気体)の温度(-20～1000℃)と速度を多次元高精度同時計測する手法を開発した。本手法では感温性の燐光粒子を利用するため、燐光寿命、スペクトル、発光強度などの温度依存性といった燐光物質の光学特性データベースを作成した。また、エンジンの高効率化・環境負荷低減に寄与するため、可視化エンジンの温度・速度計測に適用した。

研究成果の概要(英文)：A combined measurement technique of velocity and temperature distribution in a fluid flow was developed. Particle image velocimetry was combined with a lifetime based scalar measurement technique. Developed method needed a high speed camera, a single-pulsed UV laser and temperature sensitive particles. The method was applicable to any kinds of working fluids and to the wide range of temperature. The temperature and the velocity were estimated from common images. We built a database of optical properties of luminescent materials, such as temperature dependency of the lifetime, spectrum and emission intensity. The developed technique was applied to measure the temperature and velocity of the gas flow in the cylinder of the optical engine.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：流体工学 可視化 温度

### 1. 研究開始当初の背景

画像処理を用いて流体の速度分布を計測する粒子画像流速測定法(PIV)は、特に実験室レベルでの研究開発を支える強力なツールとして実用化されている。一方、熱流体中の温度分布計測技術は、未だ開発途上である。蛍光染料の発光強度を利用した LIF(レーザー誘起蛍光法)が知られているが、この方法で高精度計測を実現する場合、クエンチングによる測定エラーが発生し易く、実験の再現性を確保することが難しい。また、気体の温度分布計測では、レーラー散乱を利用する試みもみられるが、膨大な励起光エネルギーを要する上、未だ開発途上である。つまり比較的低温の水以外について温度分布を測定する手法はほとんどなく、気体の温度分布を定量可視化計測する手法は存在しない。

温度と速度の同時計測については、例えば、液体の場合に LIF 法と PIV 法をそれぞれ異なるハードウェアを同時に駆動して計測した例がいくつかあるが、同一のハードウェア・画像を利用した複合計測は分子タギング法以外に例がなく、特に気流の温度速度同時計測についてはこれまで解決策が無かった。実際の開発現場では光学的視野や実験スペース、導入コストなどの制約が大きく、高い普及・波及効果を得るためには、システムを簡易化して1台のレーザー、1台のカメラで同時計測を行う意義は大きい。

一方、これまでは速度計測用の PIV 粒子に燐光物質を用いると残光が速度計測にとってのノイズになると考えられていたことやハードウェア性能の制約により、燐光物質に着目した例がほとんどない。流れの可視化計測では近年世界的に同時計測技術開発の試みが増えているが、高温場、気体中、共通の光源・カメラ利用といったいずれの観点においても、速度とスカラー量の同時計測を達成した例はない。

### 2. 研究の目的

本研究では燐光粒子の燐光寿命を利用し、任意の空間スケールにおいて、高い時間・空間分解能で、共通の画像から任意の作動流体(特に気体)の温度(-20~1000°C)と速度を多次元高精度同時計測する手法を確立する。利用するハードウェアはカメラとレーザー1台ずつとする。また、可視化エンジンの温度・速度計測に適用し、高効率化・環境負荷低減に寄与する。

### 3. 研究の方法

本研究ではシングルパルスレーザーを用いて金属錯体や燐光体などの燐光物質を含むトレーサー粒子を励起し、その燐光強度の減衰率から温度を算出すると同時に、トレーサー粒子の移動量から速度を評価する。ここではエンジンなどの高温場にも適用するため、1)~900°Cの高温条件まで燐光の温度特性データベースを構築する。また、2)高温場での

適用可能性を確認するため、エンジン筒内の非定常な壁面温度を可視化計測するとともに、3)筒内ガス流動の温度速度分布を評価する。また、シミュレーション画像を用いた適用可能範囲の検討及び加熱気体流れの基礎試験を行った。

### 4. 研究成果

燐光物質温度特性データベース構築：  
本研究では約30種類の無機燐光体について、発光寿命の温度依存性を詳細に調査した。燐光体は全て市販のものを利用した。温度制御は比較的低温条件ではホットプレート、高温条件では小型の加熱炉や液体金属を用いた。燐光体粉体の特性評価時には、粉体中に熱電対を挿入して参照温度として利用した。燐光体塗膜の温度特性評価の際には塗膜の端に熱電対を貼り付けて参照温度を得た。燐光特性評価装置の概略を Fig.1 に示した。励起光源はシングルパルス YAG レーザーの3倍波(355nm)を用いた。また、PIN フォトダイオード(または光電子増倍管)、分光器、高速度カメラを用いて燐光のスペクトル(発光強度及び複数波長の発光強度の比)、減衰率を評価した。実測データの例は後述する。

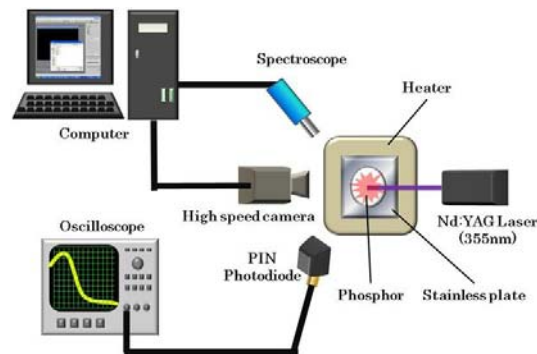


Fig.1 Schematics of measurement system for the temperature dependency of phosphor

エンジン筒内壁面の非定常温度分布計測：  
特性評価を行った燐光体を用いて、実際の高温場でこれを用いた非定常計測を行った。燐光体を可視化エンジン用窓ガラスに、バインダーを用いずに塗布し、燃焼光の遮断及び燐光体の固定のため、金またはアルミでコーティングを施した。Fig.2 に示す測定系でコーティング後の燐光体が温度依存性を維持していることを確認すると同時に、実測条件に合わせた較正データを取得した。燐光体の発光特性の例を Fig.2~Fig.4 に示す。なお、ここで用いた燐光体は  $Y_2O_2S:EuSm$  である。 $Y_2O_2S:EuSm$  の発光スペクトルは Fig.2 に示すように主として4つの波長でピークを持つ。測定波長の分離が容易で、かつ、信号強度の大きい 625nm, 705nm における発光強度の比を評価した。Fig.3 に示すように、発光強度自体(625nm での発光強度最大値)は 150°C の温度変化に対して 80%もの強度変化を示

す. しかしながら発光強度の比は同じ温度変化に対して 0.05 しか変化しなかった. また, 燐光の減衰率は Fig.4 に示すように温度が高くなるほど急速に減衰することを確認できた. ここで, Fig.4 はカメラを用いて評価した減衰率であり, Fig.5 に示すように励起の 10 $\mu$ s 後から 40000fps の撮影速度で取得した 4 枚の画像から算出した.

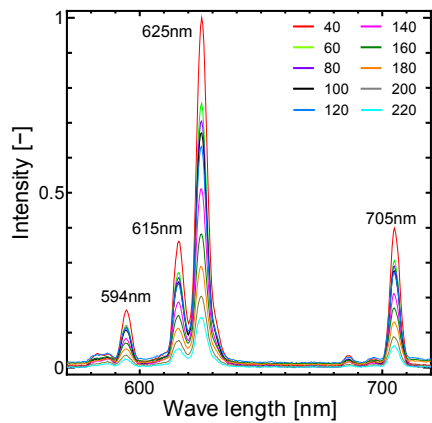


Fig.2 Relation between the decay constant and temperature Emission spectra of  $Y_2O_2S:EuSm$  at various temperatures

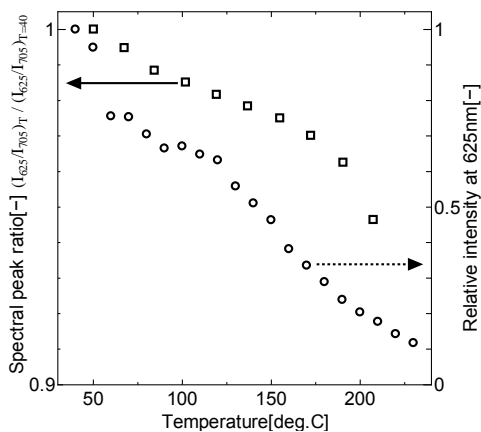


Fig.3 Intensities at 625 and 705 nm and their ratio at various temperatures

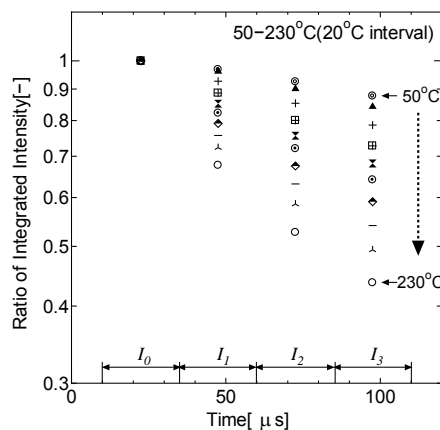


Fig.4 Intensity decay of  $Y_2O_2S:EuSm$  at various temperatures

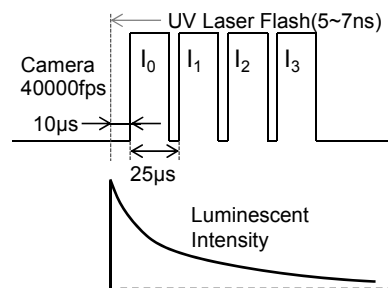


Fig.5 Timing of excitation and recording

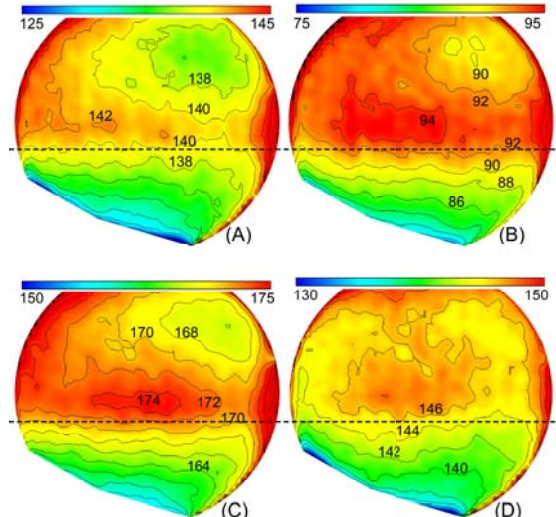


Fig.6 Measured temperature distributions of side window

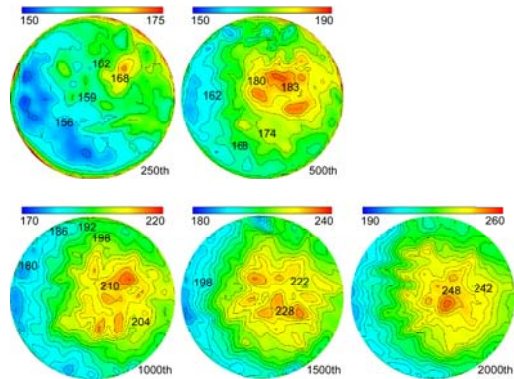


Fig.7 Measured temperature distribution of piston window in (a) 250th, (b) 500th, (c) 1000th, (d) 1500th, and (e) 2000th cycle after starting to fire the engine

燐光の減衰率を評価する方法は前述の特性評価及び後述のガス計測においても基本的に同じである.

この  $Y_2O_2S:EuSm$  を用いて燃焼を伴わないエンジン内筒の側壁温度分布を測定した例を Fig.6 に示した. A-D は冷却水温度, 回転数, 吸気圧を変化させた場合の測定結果を示している. B は A より冷却水温度が 40 $^{\circ}C$  低く, C は A の倍の回転数の時の壁面温度を示している. 冷却水温度や回転数が異なる場合は一定の温度分布を保ったまま, 冷却水温度が高いほど, 回転数が早いほど壁面温度が高くなるのがわかる. これは内部でのガス流動が, 変化しないためと考えられ, 低温の空気が流入する吸気口近傍 (図右上) で排気口

(図左上)より低温となっていた。一方、DはAの場合に比べて吸気圧を低くした場合の測定結果である。吸気圧を変化させると、ガスの流入流速や流速分布が変化する。また、ガス量が減るため筒内における最大圧力及び温度が低下する。これにより吸気口、排気口近傍における温度が低下し、壁面での温度分布がAと異なる結果となったものと考えられる。

次に、ピストントップの表面における温度分布をエンジン燃焼条件において測定した。Fig.7はエンジン始動後、250, 500, 1000, 1500, 2000回転目における温度分布を示している。可動部であるピストンは通常最も温度を測定することが困難な部位である。また、上死点近傍のクランク角で着火するため、ピストントップ面へは火炎が直接接触する。火炎の形状や位置は着火状態などに依存してサイクル平均が大きく、毎回異なる位置に火炎が接触する。4枚の画像のみから温度を評価する非定常計測を行った結果、Fig.7に示すように、サイクルごとに異なった温度分布を示し、また、火炎接触部と思われる位置で局所的に高温になることを確認できた。

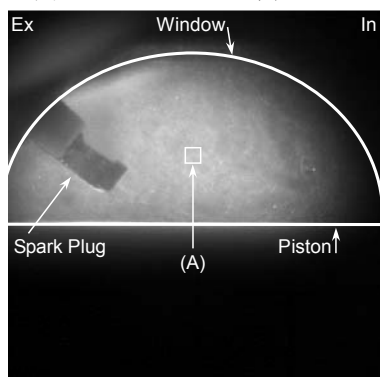


Fig.8 An example of captured images

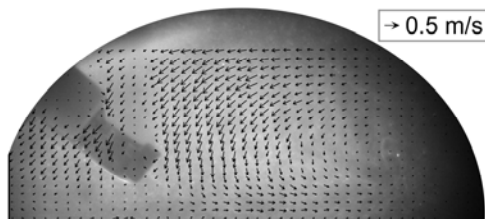


Fig.9 Velocity field ( $N_e=700\text{rpm}$ ,  $P_{\text{intake}}=-62\text{kPa}$ ,  $0\text{deg.ATDC}$ )

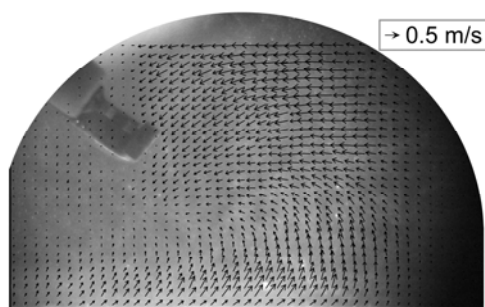


Fig.10 Velocity field ( $N_e=700\text{rpm}$ ,  $P_{\text{intake}}=-62\text{kPa}$ ,  $-30\text{deg.ATDC}$ )

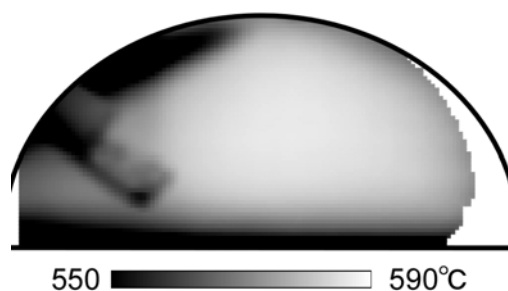


Fig.11 Gas temperature ( $N_e=700\text{rpm}$ ,  $P_{\text{intake}}=-62\text{kPa}$ ,  $0\text{deg.ATDC}$ )

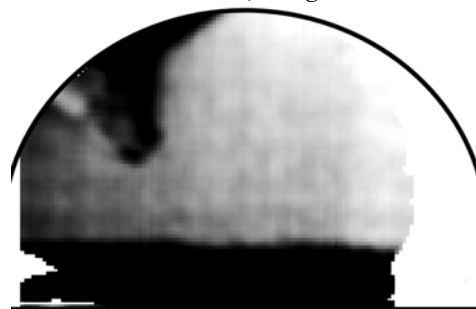


Fig.12 Gas temperature ( $N_e=700\text{rpm}$ ,  $P_{\text{intake}}=-62\text{kPa}$ ,  $-30\text{deg.ATDC}$ )

エンジン筒内ガスの温度速度分布計測：

先述の壁面温度計測において、終日の燃焼実験を経ても蛍光体が劣化せず、その温度依存性を維持することを確認できた。そこで次に、蛍光体粉末を感温性トレーサーとして吸気ガスに混入させ、エンジン筒内のガス温度分布、速度分布の同時計測を行った。ただし、蛍光体は比較的長波長の燐光を出すものが多く火炎光との分離が容易ではないため、ここでは燃焼を伴わない条件にて温度速度同時計測を行った。

Fig.8はシリンダの縦断面、点火プラグ近傍の気流を計測した際に取得した画像の例である。図のように蛍光体粉末は気流中に分散し、一定の濃淡を持つ。これは低温気体流れの速度分布計測時と同様である。そこでこの粒子画像をPIV解析し、筒内気流の速度分布を求めた結果がFig.9, Fig.10である。Fig.9は上死点、Fig.10は上死点前30度における筒内ガス流れを示している。速度分布は、撮影にかかる100 $\mu\text{s}$ の間に最大4pixel程度移動する4枚の連続燐光画像を解析して得たものである。図のように上死点近傍では吸気口あたりを渦中心とするタンブル流が形成されていることがわかる。また、上死点前30度の瞬間には、筒内を循環したガスが右下部から上に流れていることが判る。この時の渦中心位置は点火プラグの右下部であり、Fig.9と比べると、ピストンの上昇にともなって渦が吸気口側へ移動していることがわかった。これらのタンブル流の様子から、この条件では燃料ガスが偏りなくエンジン筒内に分散されていることを確認できた。Fig.11, Fig.12はこれらの画像から算出した温度分布を示している。燃焼を伴わないためあまり大きな温度分布は見られないが、クランク角が進み、

ガスの圧力が高まるほど急速に温度が上昇していることがわかる。これらのクランク角による温度上昇率は断熱圧縮された理想気体の温度上昇率と良く一致する結果を得た。

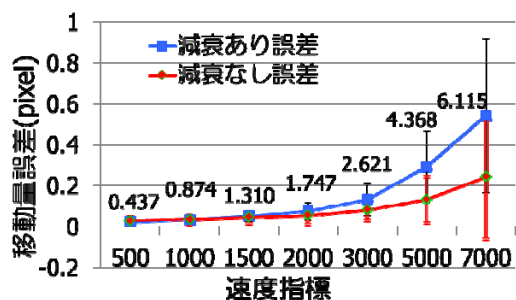


Fig.13 Error of velocity measurement due to the luminescence long decay

燐光画像では粒子が露光時間のあいだ発光し続けるため、粒子像が楕円状になる。これは PIV 計測において誤差要因となる可能性がある。そこで本研究ではシミュレーション画像を用いて、燐光粒子画像を撮影した場合と、通常の PIV 同様に燐光ではない粒子像を用いた場合とで、速度計測誤差を比較した。Fig.13 に結果を示す。ここでは  $25\mu\text{s}$  の露光時間、 $40000\text{fps}$  の撮影速度で 4 枚の連続画像を取得したと想定してシミュレーション画像を作成した。速度分布には画像中央部に渦中心を持ち旋回する伸長渦を与えており、渦中心近傍では非常に剪断の強い流れ場となっている。図内の数字は  $25\mu\text{s}$  あたりの粒子の平均移動量である。図は横軸の速度指標が大きいほど流れが速い条件を示している。図から、 $25\mu\text{s}$  あたりの粒子移動量が約  $2.5\text{pixel}$  以下であれば燐光粒子を用いることに起因した誤差はほとんど生じないことを確認できた。粒子移動量が大きい場合は、通常の PIV に比べて 2 倍程度の誤差となっているが、これは剪断の強い渦中心部で特に大きな誤差が生じたためである。このことから比較的高速で連続画像を取得する開発手法は、移動量が小さい場合には適切に速度を評価できることがわかった。剪断が強く移動量が大きい場合については、誤差要因についてより詳細な検討を継続することが重要である。

##### 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 13 件)

① Someya S., Okura Y., Munakata T. and Okamoto K., Instantaneous imaging 2D temperature in an engine cylinder in a frame combustion condition, Int.J. Heat and Mass Transfer, Vol.62, 2013, 382-390

<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.03.007>

② Someya S., Furutani H. and Okamoto K., Instantaneous phosphor thermometry applicable to walls exposed to flames,

Experimental Thermal and Fluid Science, Vol.47, 2013, 224-231

<http://dx.doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2013.01.017>

③ Someya S., Okura Y., Uchida M., Sato Y. and Okamoto K., Combined velocity and temperature imaging of gas flow in an engine cylinder, Optics Letters, Vol.37, 2012, 4964-4966

<http://dx.doi.org/10.1364/OL.37.004964>

④ Someya S., Uchida M., Tominaga K., Terunuma H., Li Y., Okamoto K., Lifetime-based phosphor thermometry of an optical engine using a high-speed CMOS camera, Int.J. Heat and Mass Transfer, Vol.54, 2011, 3927-3932

<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.04.032>

[学会発表] (計 19 件)

① 染矢聡, PIV 技術を用いた温度場流れ場解析, 自動車技術会シンポジウム「省エネを支える伝熱技術」, 2014 年 2 月 14 日, 東京

② 染矢聡, 熱流体の可視化計測, 第 8 回「学際領域における分子イメージングフォーラム」, 2012 年 11 月 2 日, 東京

③ 染矢聡, 蛍光体を用いたエンジン筒内 2 次元温度と速度の同時計測, 自動車技術会シンポジウム「多様なニーズに対応する計測・診断技術」, 2012 年 1 月 17 日, 東京

④ 染矢聡, 燐光による水・空気の温度速度同時計測法, 2011 第 11 回熱設計・対策技術シンポジウム, 2011 年 7 月 22 日, 東京

[図書] (計 2 件)

① 染矢聡, (株)NTS, サーマルマネージメントー余熱・排熱の制御と有効利用, 第 2 編第 2 章 1 節, 熱流体の可視化技術, 2013, 98-110

② シミュレーション学会編著, (株)コロナ社, シミュレーション辞典, 2012, 50, 89, 100, 343, 353

##### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

染矢 聡 (SOMEYA, SATOSHI)

産業技術総合研究所・エネルギー技術研究部門・上級主任研究員

研究者番号：00357336