

令和 2 年 5 月 11 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03177

研究課題名(和文)1000 の高温ガス流動の温度速度同時可視化法

研究課題名(英文) Simultaneous temperature and velocity visualization of a gaseous flow over 1000 centigrade

研究代表者

染矢 聡 (someya, satoshi)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・エネルギー・環境領域・研究グループ付

研究者番号：00357336

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,070,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、1000 の高温ガスの温度と速度の分布を同時に可視化計測する技術を開発した。500～1000 の温度範囲で任意の気体に適用可能とするため二色燐光法とPIVを組み合わせた温度速度同時可視化を実現した。一般的なPIV法同様に蛍光体粒子を僅かな時間間隔で二回励起、撮像して粒子移動量から速度を求め、各励起直後の燐光スペクトルの二つの波長帯の強度比から温度を求めることにより、温度速度を同時に可視化計測した。蛍光体粒子の光学特性を1500 までの範囲で評価するとともに二波長分光ユニットの最適化を行い、時間分解能6 μ sで壁面衝突噴流の温度速度の同時計測を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで気体の温度分布を測定する技術が無かったが、近年、燐光粒子をトレーサーとして利用する方法でこれが実現されつつある。一方、熱利用の高効率化、排熱・未利用熱の活用のため、更には燃焼効率向上のためには高温条件でこれを実現することが重要である。今回1000Kまで測定可能となったことで、学術的には高温ガス温度分布を可視化すること自体の新しさに加えて、燃焼前のガス温度分布が結果に与える影響などの現象解明に資することができる。また、社会的にはデータサーバーや工場内の熱源の廃熱を低動力で換気したり、熱を回収するなどエネルギー利用の総合効率向上に資することができる。

研究成果の概要(英文)：We developed a simultaneous visualization of temperature and velocity distribution of a high temperature gaseous flow. To realize the temperature measurement from 500 to 1000 degrees of any kinds of gas, we coupled the PIV and the ratiometric temperature measurement method. The velocity was measured from the displacement of particles during a short time, as same as the PIV with a double-pulsed laser. The temperature was measured the intensity ratio between two-bands of emission spectrum of luminescence. We investigated the temperature responsibility of phosphor particles from the room temperature to 1500 degrees and optimized the optical filters and a spectroscopic system. The temperature and velocity distribution of high temperature gas flow was successfully visualized at the time resolution of 6 micro seconds.

研究分野：流体工学，熱工学

キーワード：流体計測 可視化 温度 蛍光体 燐光

1. 研究開始当初の背景

エネルギー機器の総合効率向上のため熱の有効利用が重要であり、タービン、エンジンなどの機器では導入するガス温度を高めて高効率高出力化を目指している。これらのシステムでは、排熱を減らして熱をシステム内部に閉じ込めるための遮熱コーティングなどの技術開発も進んでいる。高温システムにおける高度な温度制御のためにはガスの温度分布の理解が重要である。特に構造物壁面近傍において、ガス温度、ガス流速と構造物表面温度の同時計測は、高効率で信頼性の高いシステム開発に不可欠である。温度と速度の境界層厚さや温度速度分布など壁面近傍流れのダイナミクスの理解が重要である。しかし、熱流体の温度分布計測技術は未だ開発途上で、これらの流れの温度速度を計測できる術はない。

2. 研究の目的

そこで本研究では、1000°Cの高温ガスの温度と速度の分布を同時に可視化計測する技術を開発する。赤熱光の強くなる 500°C ~ 1000°Cの広い温度範囲、広範な流速条件、任意の気体に適用可能とするため二色燐光法と PIV を組み合わせた温度速度同時可視化を実現する。無機蛍光体粒子、紫外線レーザー、小型 CMOS カメラを用いる。一般的な PIV 法同様に蛍光体粒子を僅かな時間間隔で二回励起、撮像して粒子移動量から速度を求め、各励起直後の燐光スペクトルの二つの波長帯の強度比から温度を求める(二色燐光法)ことにより、温度速度を同時に可視化計測する。蛍光体粒子の光学特性を 1500°Cまでの範囲で評価するとともに二波長分光ユニットの最適化を行い、時間分解能 5 μ s、精度 \pm 5°Cを達成する。壁面衝突噴流の基礎実験によって開発手法の測定精度・適用可能範囲を評価する。粒子の熱流動場への追従性や粒子が与える影響についても明確にする。

3. 研究の方法

二色温度計測法の開発:

本研究では、高温場での温度計測を行うために二色法を用いる。二色法は、蛍光体のスペクトル形状が温度に依存して変化する特徴を利用して異なる波長帯の発光強度比から温度を算出する手法である。寿命法に比べて短い露光時間での計測が可能のため、赤熱の影響を受けづらく、高い時間分解能から急激な温度変化の計測も可能である。

本研究で様々な蛍光体粒子の温度特性を評価し、高温計測用トレーサー粒子として BAM-G 蛍光体粒子 (BaMgAl₁₀O₁₇:Eu Mn) を選定した。BAM-G 蛍光体の二つの波長の発光強度と温度との関係を Fig.1 に示した。温度上昇に伴い、516nm の光は強度が低下する一方で、450nm の光は強度が一度上昇したあとで減少する。図から二波長における発光強度比も温度上昇に伴い、約 1100°C まで単調に減少することがわかる。図中の発光強度は二波長帯のピーク値とその比を示しているが、実験ではそれぞれの波長帯を二台のカメラで撮影し、その発光強度比から温度計測を行う。

二色法では各波長の発光強度分布を二枚の画像として捉えるが、同一の計測点の発光強度比から温度を算出するため、二つの画像の正確な位置校正が重要となる。本研究では校正板を用いた位置校正を行う。直径 0.5mm の円形が平面に 2mm 間隔で並んだ校正板を二台のカメラで撮影し、その円形の中心座標をテンプレートマッチングによって算出する。算出した中心座標から二元三次多項式近似によって、二つの画像空間の写像関数を求め、反射側カメラの撮影画像を透過側カメラの画像と同じ座標空間に射影する。校正板の円形 100 点の中心座標から位置校正を行った結果、二画像の各中心座標の最大誤差は、0.00174 pixel と非常に小さい値となった。なお、画像の解像度は 1024 \times 1280pixel だが、二画像の撮影位置にズレが生じるため、撮影領域が一致する範囲で座標変換を行った。

4. 研究成果

温度校正と壁面温度計測実験を通じた精度評価:

二色法の検証として、容易に温度一様場を形成できる銅ブロックを用いた温度計測実験を行った。銅ブロックのサイズは 50 \times 50 \times 20mm で、内部に 6 本のカートリッジヒータ (ϕ 6mm, 100W) を設置した。また、二色法による温度計測の精度評価のため、4 本の自作 K 型熱電対 (線径 0.126mm) を厚さ 0.5mm の銅板で挟み固定した。熱電対は温度補償器を通してアンプに接続され、100 倍の出力となって 10kHz で計測される。撮影に用いる 2 台のカメラおよび一つのレンズは、3 枚のフィルタとともに治具に固定されている。銅ブロック表面には蛍光体を塗布し、UV シングルパルスレーザー (355nm, 30Hz) によって励起を行った。励起された蛍光体からの発光強度は、カメラユニット内部のダイクロイックミラーを介して二台のカメラ (1024 \times 1280pixel, 60fps, 12bit) で撮影される。実験装置を Fig.2 に示す。

Fig.1 より BAM-G の燐光の二つのピーク波長での強度比は温度上昇に伴い減少する。カメラによる画像撮影では限られた検出感度の範囲で、ある幅を持つ波長帯の光を計測する。そこでカメ

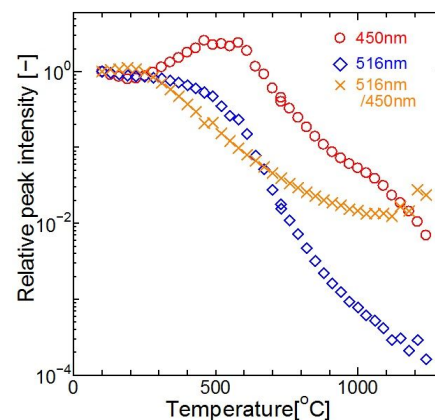


Fig.1 Peak intensities at two different bands of BAM-G at various temperatures

ラユニットに分光器を設置して、温度と燐光強度比との関係、この関係の温度変化に対するヒステリシスの有無を評価し、光学フィルタの組合せを最適化した。また、銅ブロックの温度を700~850~700°Cの範囲で30°Cごとに変化させ、各温度で300組の画像を撮影した。4本の熱電対による計測温度のばらつきは、最大で5.5°Cとなったが、ここでは4点の平均値で温度一様と仮定した。燐光強度比は、それぞれの波長帯の燐光画像を16×16画素で50%オーバーラップさせて平均して、長波長帯を短波長帯で除した値から算出した。

温度感度の最も高かった光学フィルタの組合せにおける、画像中心部での強度比のヒステリシス特性をFig.3に示す。図から、この温度範囲においてBAM-G蛍光体は酸化等の劣化をせず、温度変化に対するヒステリシスが無い、つまり、高温の温度計測用のセンサ物質として有用であることが明らかとなった。なお、このときの光学フィルタの組合せは以下のとおりである。1)レンズ直後に赤熱遮断用として570nmの短波透過フィルタ(LP)、2)分光用ダイクロイックミラーとして510nm(0°入射時)の長波透過フィルタ(HP)、3)ダイクロイックミラーで反射される短波長側波長帯用のカメラセンサ直前に500nmLPを設置した。このとき、最も高い温度感度が得られることがわかった。以後の実験では、フィルタにこの組み合わせを用いることとした。なお、他の光学フィルタの組合せにおいても、高温での温度変化に対して燐光強度比のヒステリシスは見られなかった。

次に、850~700°Cの範囲で10°Cごとに冷却しながら、燐光強度比と熱電対で測定した温度との関係を調べた。得られた強度比と撮影時の温度をもとに、最小二乗法を用いて二次式に近似して温度較正関数を得た。Fig.4に、画像中心点における熱電対と、二色法で計測した時間平均温度の関係を示す。熱電対との最大誤差は2.8°Cであり、高い精度で計測できることがわかった。また、700°Cにおける二色法の標準偏差は1.3°Cであるのに対して、850°Cにおいては4.3°Cと温度上昇に伴い不確かさが大きくなることがわかった。これは、温度上昇にともない二画像の強度が低下するため、各画像強度の時間的なばらつきがその比に与える影響が大きくなったためだと考えられる。

更に、作成した校正関数を使用し、850°Cに加熱した銅ブロックの自然冷却時の表面温度を計測した。計測開始時の壁面温度分布、および熱電対と二色法による計測温度との時間変化の様子をFig.5に示す。

Fig.5左図の壁面温度分布は、比較する熱電対を中心とした20×16mmの領域を示す。Fig.5右図は、熱電対で測定した温度と、熱電対直上の位置での二色強度比から算出した温度との関係を示しており、二色法及び熱電対での測定値がほぼ一致している。ただし、熱電対による計測温度よりも二色法による値の方が全体的に低い値を示している。この誤差の原因として、銅ブロックと0.5mmの銅板で熱電対を挟み、二色法では銅板の外気側表面の温度を測定しているため、熱電対位置での温度が表面温度に比べて高い可能性が挙げられる。

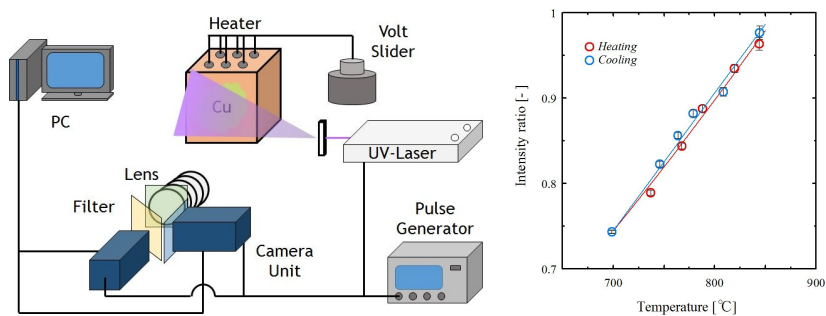


Fig.2 Experimental apparatus of wall surface temperature measurement

Fig.3 Hysteresis of the relation between temperature and the two color ratio of BAM-G phosphor

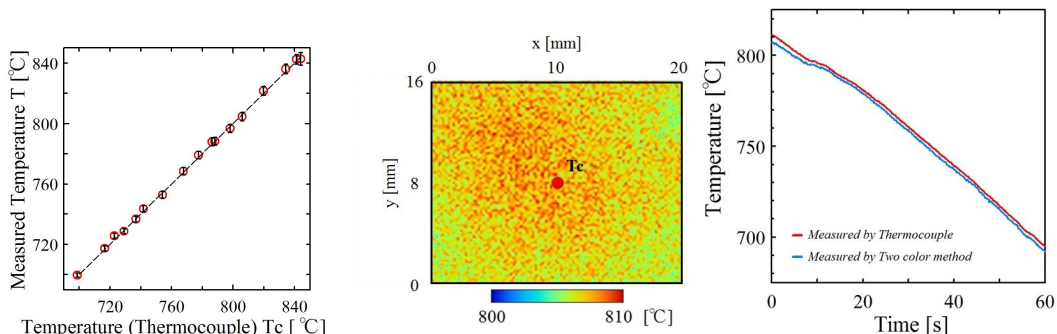


Fig.4 Relation between temperatures measured by thermocouple and the two color method

Fig.5 Temperature measurement of wall surface

高温用トレーサ粒子を用いた速度計測試験：

本研究では、流れ場の温度および速度を制御するために、Fig.6に示す実験装置を製作した。作動流体の空気は、ラスキンノズルでトレーサ粒子と混合される。気体の加熱には、500Wのヒートガンを使用し、温度および速度は流量とヒータ出力によってコントロールされる。加熱された

空気は、直径 8.5mm の出口から実験装置内に噴出して、20mm 離れた壁面に衝突する。気流の温度は、内部に設置された 5 本の K 型薄膜熱電対（応答 100kHz）によって計測される。熱電対は温度補償器、アンプを通して計測を行う。気体流れの PIV で利用される一般的な固体トレーサ（例えば GodBall B25C、かさ密度 180kg/m³）と比べ、BAM-G は重い（かさ密度 1900kg/m³）ため、その流れへの追従性を常温で確認した。また、散乱光粒子像の利用を前提とした PIV 解析を燐光粒子像で行うことに起因する計測誤差についても検討した。

上述の Godball と BAM-G 粒子で LDV 及び通常の PIV 計測を行い、粒子の流体追従性に関する検証を行った。LDV は点計測である。また、本研究で用いた LDV は同軸上にリフレクタを設置する必要があるため、PIV との同時計測を行うことは出来ない。そのため、流れ場の再現性、定常性を仮定し、LDV 計測点における速度の時間平均、変動幅を LDV と PIV 計測とで比較した。また、温度速度同時計測では UV 励起による長寿命の燐光粒子像を用いるため、ほぼ球状の散乱光粒子像と比べて流れ方向に伸びた粒子像となる。PIV 解析では球状、ガウス分布の粒子像を前提としているため、粒子像が伸びることの影響を検証する。散乱光による PIV 計測ではシャッタを開放し、レーザーの照射間隔によって二画像の間の時間間隔(Δt)および粒子の移動量を決定する。高温ガス流れの計測を目的とする本研究では、長い露光時間は赤熱の蓄積を招き、強度が低下する高温環境においては S/N 比の大幅な低下が懸念される。

そこでカメラの撮像速度で Δt を与え、シャッタを 8 μ s のみ開き、シャッタ解放の 2 μ s 後に燐光粒子を励起して 6 μ s 間の燐光を撮影する。この二枚一対の画像を毎秒 30 組取得した。同時計測の概念と、カメラと光源の制御タイミングの略図を Fig.7 に示す。なお、8 μ s の露光時間では 900 $^{\circ}$ C においても赤熱の影響がほぼないことを確認した。また、高温環境における BAM-G の燐光寿命は露光時間よりやや長い。

速度計測は 3.0, 5.0L/min の二つの流量で行い、 Δt はそれぞれ 133 μ s と 80 μ s とした。この速度条件において、6 μ s 間の燐光粒子像の移動量は最大 1pixel 未満のため、粒子像の変形は比較的小さい。

PIV 計測は、Godball + 緑励起(散乱光)、BAM-G + 緑励起、BAM-G + UV 励起(燐光)の 3 条件で行った。緑励起には Nd:YAG ダブルパルスレーザー(532nm)を用いた。Fig.8 に BAM-G + UV 励起による計測結果例と LDV との比較点の位置を、Fig.9 に条件ごとの平均流速(LDV:130 秒または 10 万サンプル、PIV:15 秒、450 サンプル)と偏差を示す。Fig.9 から、粒子と流量が同じで、測定方法のみが異なる場合は、局所的な平均流速が LDV と二種類の PIV とでほぼ等しいことがわかる。また、流量一定にも関わらず、速度変動が大きい。更に、3L/min では GodBall が BAM-G より平均流速が速く、5L/min では逆になるなど、粒子に起因した計測結果の相違には特定の傾向がなく、全体的に流れの変動や不安定が大きいことがわかる。これは乱流や、ヒートガン内部の螺旋状の熱線による気流の旋回や乱流に起因すると考えられる。

なお、このとき LDV 計測点と同じ y 座標の x 方向断面における平均流速(UV-PIV, BAM-G, 3.0L/min)は 0.8683 m/s で、流量から求まる理論値 (0.8939m/s)と近い値が得られた。これらのことから、流れ場の不安定に起因して明確な検証とは言えないものの、各 PIV とともに LDV と同等かつ、適切に二次元速度分布を計測できていると考えられる。以上より、BAM-G の流体追従性に問題は見られず、また、燐光粒子画像による PIV 計測では、通常の PIV 計測と同程度の精度を持った計測ができると考えられる。

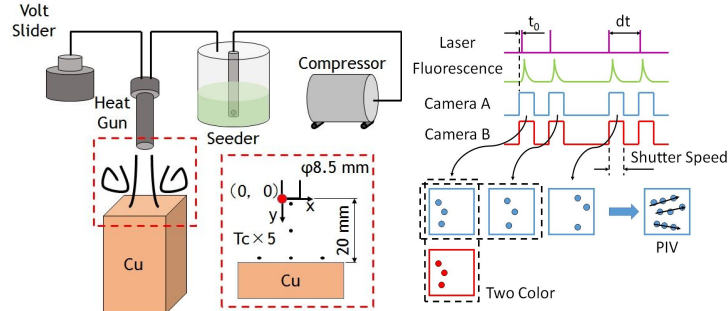


Fig.6 Experimental apparatus of simultaneous measurement of gas flow

Fig.7 Time diagram of simultaneous measurement of temperature and velocity using phosphor

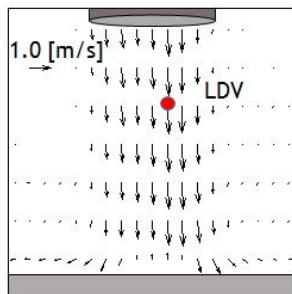


Fig.8 Time averaged velocity of impinging air jet at the flow rate of 3 L/min with UV-PIV

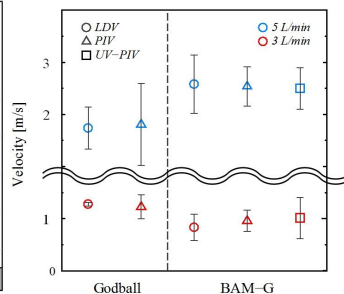
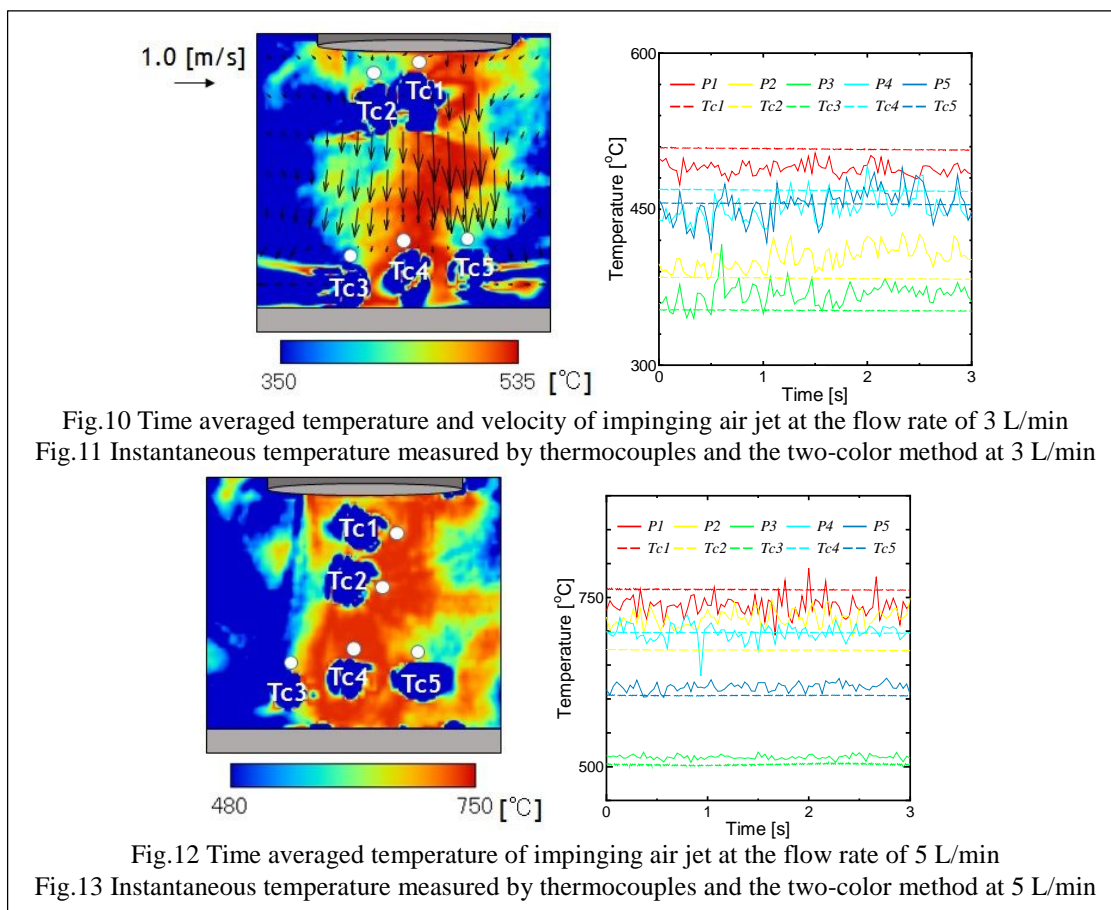


Fig.9 Accuracy evaluation of velocity measurement

温度速度同時計測試験：

壁面衝突噴流を対象として二色法による温度速度同時計測を行った。カメラの性能上、速度計測に最適な撮影速度での計測が流量 3L/min 条件下でしか行えないため、高温場を実現できる 5L/min 条件においては温度計測のみを行った。Fig.10 ~ Fig.13 に、各流量における可視化結果および薄膜熱電対との温度比較を示す。熱電対直上の温度は表面に付着した蛍光体からの光によって計測できないため、中心から 2mm 上方および右方(図内、白丸部)の点 P で比較を行った。Fig.10 および Fig.11 より、ヒートガン中心からの距離や速度分布に応じた温度分布が形成されていることがわかる。BAM-G の数密度はヒートガン中心ほど高く、粒子像が明るい。計測がこの数密度の影響を受ける場合、中心ほど低温という結果になるが、本研究の計測では、粒子数密度の分布の影響をあまり受けず、熱電対での計測結果同様にヒートガン出口近傍かつヒートガン中心軸上が最も高温となった。Fig.11 から測定値も熱電対による結果と近い値を示している。3.3 秒間の時間平均温度の最大誤差は、Tc1 における 20.6°C であった。この原因として、Tc1 の位置が熱電対や噴出口と近いため、それらに付着した蛍光体が発する燐光の影響が考えられる。温度計測のみを行った Fig.12 および Fig.13 から、高温条件においてもヒートガン中心に近いほど高温を示しており、Fig.13 に示す薄膜熱電対との測定結果の差も小さい。この条件における平均温度の最大誤差は、Tc2 における 47.1°C であった。この計測時には Tc1 と Tc2 との距離が近いために、熱電対上部ではなく右側で温度の比較を行っている。水平方向には温度勾配が大きいいため、ヒートガン中心近傍の可視化結果が Tc2 より高くなったと考えられる。熱電対直上で比較を行った Tc3 ~ Tc5 では、最大誤差が 11.8°C と他点に比べて高い精度で温度計測をすることができた。



高温流れ場における、温度速度同時計測手法の開発および評価を目的として、壁面衝突噴流を対象とした実験を行い、以下のような知見を得た。

- (1) 二色法による温度計測の精度評価として、加熱壁面を対象とした実験を行った。実験結果より、850°C までの高温領域において BAM-G が温度計測用のセンサ物質として有用であることが明らかとなった。
- (2) 蛍光体を用いた UV-PIV 計測による速度計測の検証として、常温気流を対象に通常の PIV および LDV との比較を行った。本実験系において、蛍光体をトレーサ粒子とした速度計測は、通常の PIV 計測と同程度の精度を持つことが示された。
- (3) 壁面衝突噴流を対象として、540°C までの気流に対して二色法による温度速度同時計測を実現した。また、750°C までの気流に対して温度分布計測を行い、高温環境における温度速度同時計測の可能性を示した。このとき薄膜熱電対との最大誤差は 47.1°C であった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 染矢聡	4. 巻 24
2. 論文標題 PIV技術を用いた温度場と流れ場の同時計測	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 検査技術	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Someya S.
2. 発表標題 High temperature gas flow measurement over 1000K
3. 学会等名 18th International Symposium on Flow Visualization（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Someya S., Munakata T., Ito H.
2. 発表標題 A Development of Two-Color Thermometry with PIV Using BAMG Phosphor
3. 学会等名 The Ninth JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference（国際学会）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Someya S.
2. 発表標題 High temperature gas flow measurement over 1000K
3. 学会等名 6th German-Japanese Joint Seminar（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 染矢 聡
2. 発表標題 1000Kの気流の温度速度同時可視化計測
3. 学会等名 自動車技術会シンポジウムNo.17-17 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 染矢 聡
2. 発表標題 燐光を用いた温度速度分布可視化法とその実応用
3. 学会等名 自動車技術会シンポジウムNo.21-19 (招待講演)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 染矢聡	4. 発行年 2019年
2. 出版社 (株)エヌ・ティー・エス	5. 総ページ数 7
3. 書名 サーマルデバイス第5章第3節, 潜熱蓄熱システムの最適化	

〔産業財産権〕

〔その他〕

産業技術総合研究所 省エネルギー研究部門 https://unit.aist.go.jp/ieco/groups/index.html 産総研-省エネルギー研究部門 https://unit.aist.go.jp/ieco/groups/index.html
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----