

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月7日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06117

研究課題名(和文) 適応応答補償による熱流体センサ動特性の飛躍的改善と可視化計測への展開

研究課題名(英文) Progressive improvement in the dynamic characteristics of thermofluid sensors by adaptive response compensation techniques and its application to the visualization of velocity and temperature fields

研究代表者

田川 正人 (TAGAWA, Masato)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：80163335

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：物体表面の温度分布がサーモグラフィで容易に可視化できるのに対して、流体の温度分布や速度分布を簡便に可視化計測できる方法はないのが現状である。本研究では、各種熱流体機器で発生する気流の温度や速度の分布を簡便・安全かつ定量的に可視化できる計測法を開発した。基礎となる熱流体計測技術は、本研究者らが長年にわたり取り組んできた細線温度センサと熱線流速計およびそれらのデジタル信号処理法である。これらの技術に「プローブ空間位置の画像計測」を融合することにより、気流の温度や速度の2次元分布を測定対象の画像上に重ねて提示できる簡便で信頼性の高い可視化計測法を実現し、その有効性を実験的に検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

気流の速度や温度の分布をその場で簡単に可視化できれば、熱流体が関与する機器の開発設計や性能評価に役立つだけでなく、機器の設置や設定等の様々な場面で有用な情報を得ることができる。熱電対、抵抗線、サーミスタ等の温度センサや熱線流速計は接触法ではあるが、散乱粒子や蛍光物質等を流体中に導入する必要がなく、安全かつ簡便に計測できる点で優れている。このようなことが背景にあり、レーザ応用計測などの高価で複雑なシステムによらずに熱流動を簡単に可視化できる計測法を実現することは、熱流体機器の研究開発のスピードを高めるだけでなく、点検や整備などの日常業務の効率向上と負荷軽減にも大きく寄与する期待される。

研究成果の概要(英文)：A novel measurement technique called a “fluid temperature-field scanner” has been developed. This technique enables us to visualize the spatial temperature distribution of a non-isothermal fluid flow by tracking the trajectory of a rod-like probe equipped with many temperature sensors by using a high-speed CCD camera. The key technique is an adaptive response-compensation scheme by which the response lag of the temperature sensors can be adequately compensated to reconstruct the temperature profile accurately.

Furthermore, a new measurement technique to visualize the spatial “velocity” distribution of an inhomogeneous flow field has been proposed. In the same manner as the fluid temperature-field scanner, a two-dimensional velocity profile can be visualized quantitatively. The rod-type probe consists of ten hot-wires operated by the constant-temperature anemometers. It is demonstrated that an inhomogeneous velocity field of an air jet flow can be visualized readily and accurately.

研究分野：熱流体工学，乱流伝熱，乱流輸送現象，熱流体計測，乱流モデル

キーワード：熱流体計測 可視化計測 温度センサ 熱電対 熱線流速計 画像計測 温度分布 速度分布

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

(1) サーモグラフィの普及により、物体表面温度の可視化が日常的に利用されている。これに対して、流体の温度や速度の分布を簡便に可視化できる方法はないのが現状である。気流の速度や温度の分布をその場で簡単に可視化できれば、熱流体が関与する機器の開発設計・性能評価に役立つだけでなく、機器の設置や設定等の様々な場面で有用な情報を得ることができる。

(2) 流体の速度や温度の空間分布を可視化する方法として、レーザや超音波による非接触計測法が原理的には優れている。しかし、一般に計測システムが複雑かつ高価であり、それらを適切に使用するには相当の専門知識が必要である。とりわけレーザ応用計測では安全に特別の配慮が求められることもあり、現状では、日常業務や屋外使用に適用できるまでには至っていない。たとえば、医療／食品分野では、レーザ計測でよく用いられる散乱粒子を現場に導入することは認められない場合が多い。一方、熱線流速計や熱電対、抵抗線、サーミスタ等の温度センサは接触法ではあるが、散乱粒子や蛍光物質等を流体中に導入する必要がなく、安全かつ簡便に計測できる点で優れている。簡便で安全な熱流動の可視化計測法を実現することは、熱流体機器の研究開発のスピードを高めるだけでなく、点検や整備などの日常業務の効率向上と負荷軽減にも寄与することが期待される。

2. 研究の目的

(1) 本研究の独自性は、流体の温度測定や速度測定にプローブ位置の画像計測を融合させるところにある。この研究では、本研究者らが長年取り組んできた熱電対、抵抗線、サーミスタ、熱線流速計などの各種の熱流体センサとそれらに関連するデジタル信号処理法やデータ解析技術を基礎として、簡便で安全な熱流体可視化計測法を実現する。

(2) 流体の温度場や速度場を正確に可視化計測するには、基礎となる熱流体計測法の測定精度と信頼性を向上させることが重要である。たとえば、温度センサとして細線熱電対や抵抗線を用いる場合、それらの素線径が大きいと温度変化に対する応答の遅れが問題となる。すなわち、正確な温度測定を実現するには、センサ出力を適切に応答補償する技術が必須である。本研究者らは、「流体温度場スキャナ」とよぶ可視化計測法を提案している。流体温度場スキャナとは、多数の細線熱電対を一列に配置したプローブで測定対象の流体温度場を走査することで、温度分布を短時間で可視化する手法である。しかし、プローブの走査速度が高いと、熱電対の応答遅れのために温度分布を正しく再現できなくなるという基本的で重大な問題がある。そこで、先に開発した「二線式熱電対法」を利用してこの困難を克服する。二線式熱電対法によれば、素線径が異なる二つの熱電対を一組にして、それらの出力からその場で時定数を推定し応答遅れを補償できる（適応応答補償）ので、これを基礎として、流速やプローブ走査速度などの測定条件の影響を受けずに測定対象の温度分布を正確に可視化できる技術を確立する。

(3) 測定対象の空間内をプローブで自在に走査しながら、温度場の特性を塗り絵のように実時間で探査・解析できるリアルタイム可視化計測システムを提案し、そのプロトタイプを構築する。また、流体温度場スキャナの開発で培ってきた手法を発展させて、気流の速度分布を可視化できる計測法「流体速度場スキャナ」を開発する。この速度場スキャナでは、速度センサとして自作の定温度型熱線流速計を用いて、線径 $5\ \mu\text{m}$ のタングステン線 10 本を直線上に配置したプローブで等温円形噴流の二次元速度分布を可視化計測し、その有効性を検証する。

3. 研究の方法

(1) 基礎となる計測技術として、本研究者らが長年にわたり取り組んできた熱線流速計と細線温度センサおよびそれらのデジタル信号処理法を活用する。これに「プローブ空間位置の画像計測」を融合することにより、気流の温度や速度を測定対象の画像に重ねて 2 次元分布として提示できる簡便で安全な可視化計測法を実現する。また、様々な測定対象においてその有用性を実験的に検証する。

(2) 流体温度場のリアルタイム可視化計測システムの開発に取り組む。その第一段階として、測定対象をプローブで自在に走査して温度場を二次元可視化できるプロトタイプを構築する。また、流れの多くが乱流であることから、乱流統計量の分布を二次元可視化できる計測技術の開発を目指す。これが実現できれば、たとえば、測定対象における熱や物質の拡散過程の解明、流体騒音の原因調査や低減対策などに役立つ情報を得ることができると期待される。

4. 研究成果

(1) 流体温度場スキャナの測定精度の検証（二線式熱電対法）

計測システムの構成と使用した温度プローブを図 1 に示す。プローブに使用した二線式熱電対は線径 $51\ \mu\text{m}$ と $76\ \mu\text{m}$ の二つの K 熱電対で構成され、その間隔は $2\ \text{mm}$ である。二線式熱電対の総数は 24 組であり、互いに $4\ \text{mm}$ 間隔で直線上に配置されている。熱電対の起電力は計測

アンプで増幅され、A/D 変換器によりパーソナルコンピュータに取り込まれる。また、プローブの軌跡の捕捉には高速度 CCD カメラを用いる。

実験装置の概要を図 2 に示す。測定対象は直径 54 mm のヘアドライヤーから噴出する高温空気流（流速：8.9 m/s, 最高温度：約 110 °C）である。測定では、図 1 に示す棒状の温度プローブを用いて、噴流出口から約 20 mm 下流の温度場を噴流軸とほぼ垂直な面内で図 2 のように走査する。

図 3 は単一の熱電対で測定対象を順次トラバースして測定された平均温度分布である（測定には約 2 時間を要する）。図 4(a), (b) は、図 1 に示すプローブで高温噴流を走査した際に、下から 14 番目の二線式熱電対の出力（温度波形）であり、それぞれ応答補償前と応答補償後の結果を対比している（この二線式熱電対の測定位置は図 3 の $y = 10$ mm に相当する）。図 4(a) から分かるように、応答補償前では熱電対の応答遅れに起因して、噴流中心付近の低温領域の存在が不明瞭である。一方、図 4(b) に示す応答補償後の温度分布では、それが明確に再現されている。また、図 4(a) と図 4(b) から、線径 51 μm の熱電対は 76 μm の熱電対より応答が速いので、51 μm 熱電対の応答補償量は小さいことがわかる。このように、応答遅れの定量的な評価は二線式熱電対法だからこそできることであり、通常の単一の熱電対では、センサの応

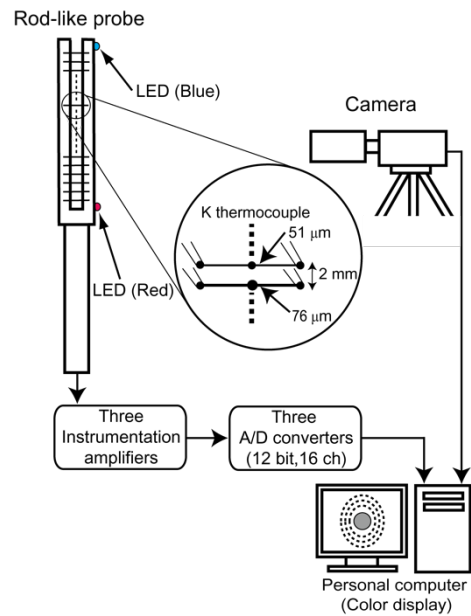


図 1 流体温度場スキャナ（二線式熱電対法）

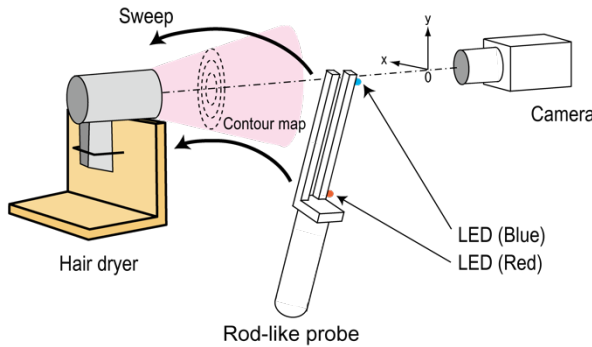


図 2 測定対象（ヘアドライヤーの高温噴流）

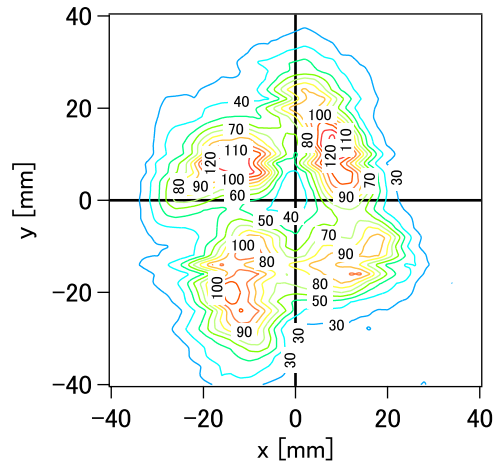
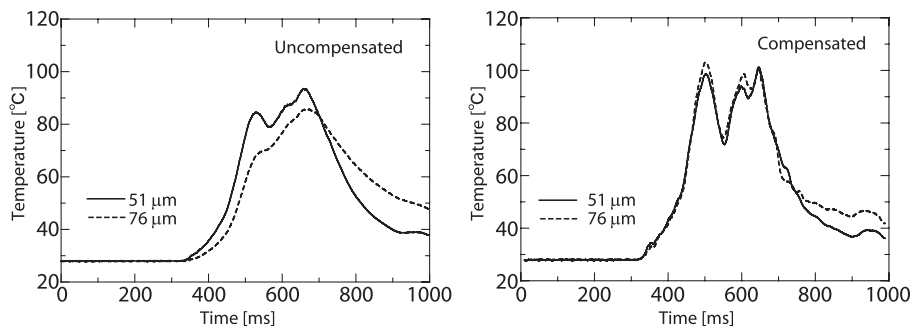


図 3 単一熱電対による測定（従来法）

答速度（時定数）の情報が得られないために、測定結果の妥当性は評価できない。

図 5(a), 5(b) は温度場スキャナで測定された二次元温度分布であり、それぞれ応答補償前と応答補償後の結果を示す。ここでは、応答補償の有効性をより明確に示すために、応答速度が遅い 76 μm 熱電対の測定データを用いて等高線を描いている。この測定に要した時間は約 1 秒である。すなわち、温度場スキャナを用いれば、図 3 のデータを得るのに必要な時間（約 2 時間）と比較して測定時間を格段に短縮できる。応答補償後の結果 [図 5(b)] に見られるように、噴流中心についてほぼ対称な位置にある 4 カ所で、最高温度がおおよそ 120 °C に達する高温領域が形成されるとともに、中心付近には 40 °C 程度の低温域が存在する。この結果は、図 3 に示す時間平均温度分布の測定結果と定量的にもよく一致している。



(a) 応答補償前（原波形） (b) 応答補償後
図 4 細線熱電対の応答補償（二線式熱電対法）

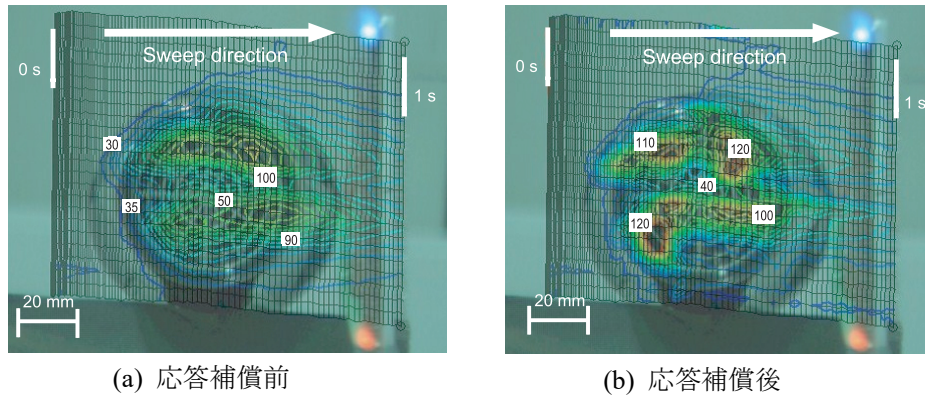


図5 流体温度場スキャナによる測定結果

(2) 流体温度場スキャナの測定精度の改善（抵抗線温度センサによる高速応答の実現）

本実験では、温度プローブとして抵抗線温度センサ（以下では「抵抗線」とよぶ）を直線上に複数取り付け付けた棒状プローブを用いる。使用した棒状プローブの形状と測定システムの概要を図6に示す。抵抗線には、線径 $5\ \mu\text{m}$ 、長さ $1\ \text{mm}$ のタングステン線を使用している。本プローブでは、これらの抵抗線を先端から $10\ \text{mm}$ 間隔で計 10 本取り付けしている。実験方法を図7に示す。測定対象は、直径 $50\ \text{mm}$ の風洞から噴出する加熱された空気流である。測定では、図6に示す棒状プローブを用いて、噴流出口から約 $150\ \text{mm}$ 下流の温度場を噴流軸と垂直な面で走査する。

図8は、単一の抵抗線で測定対象の格子点上（間隔 $10\ \text{mm}$ で計 $11 \times 10 = 110$ 点）を順次トラバースして得られた平均温度の等高線分布を示す。一般にこのような測定には長時間を要する（本実験では約 2 時間）。一方、図9は、流体温度場スキャナで測定された平均温度の等高線分布を示す。流体温度場スキャナの測定時間は約 1 秒であり、単一の抵抗線による通常の測定に比べて格段に短い。図8の単一抵抗線の測定結果が示すように、この噴流の平均温度分布には中心付近に一つのピークがあり、中心から離れるにつれて温度は同心円状に低下する。一方、図9に示すように、流体温度場スキャナの測定結果もこの特徴を適確に捉えていることが分かる。

ところで、研究成果(1)で述べたように、細線熱電対を使用する流体温度場スキャナによる測定では、熱電対の時間的な応答遅れが空間的な位相差となって測定結果に出現するために、平均温度分布の等高線がすい星のように尾を引いて可視化されるという難しい問題がある。これに対して、抵抗線温度センサを用いる流体温度場スキャナには、図9の測定結果に示すように、そのような問題は現れない。これは、極細抵抗線は細線熱電対に比べて一般に高周波数域での応答特性に優れているためである。すなわち、抵抗線を用いた流体温度場スキャナによれば、通常よく行われるように単

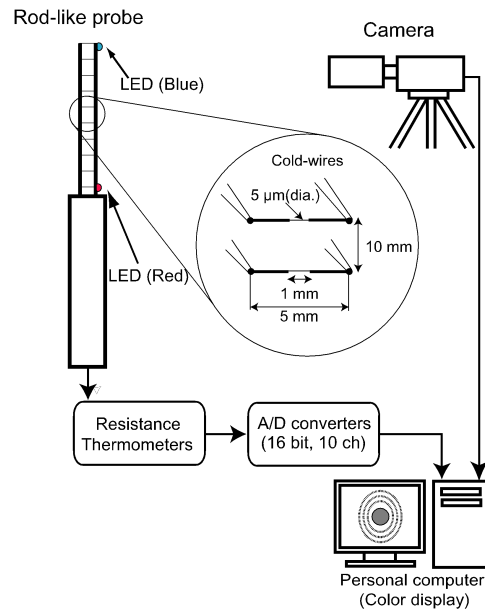


図6 流体温度場スキャナ（抵抗線温度センサ）

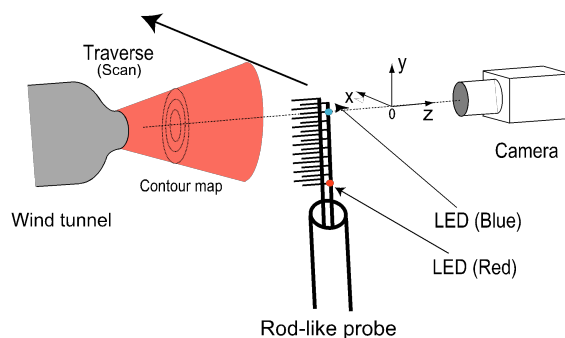


図7 測定対象（加熱円形噴流）

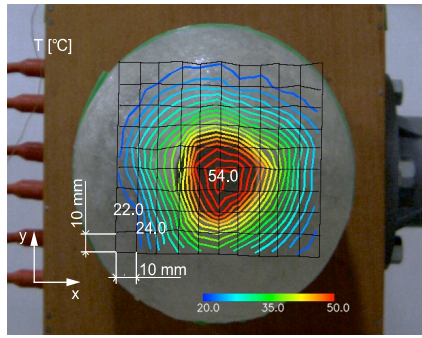


図 8 単一抵抗線による測定結果

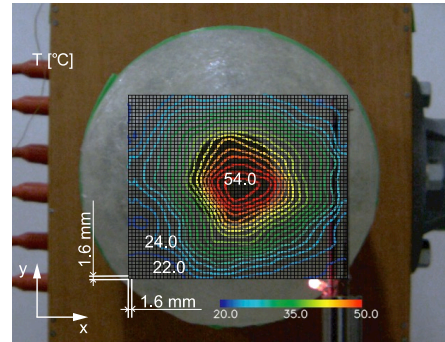


図 9 流体温度場スキャナによる測定結果

一の温度センサで測定対象を順次トラバースして得られる時間平均温度分布を、簡便かつ極めて短時間に測定できることが実証された。

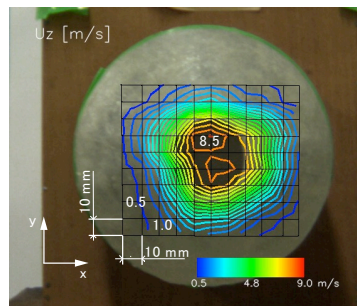
(3) 流体速度場スキャナの開発（熱線流速計による速度場の可視化）

図 6 のプローブにおいて抵抗線温度計として用いたタングステン線を定温度型熱線流速計で駆動すれば、速度場を可視化できる。そこで、図 6、図 7 に示す計測システムと装置を利用して、円形噴流（等温）の速度場の可視化測定を試みる。まず、単一熱線で測定対象の格子点を順次トラバースして得られた時間平均速度の等高線分布を図 10(a)に、流体速度場スキャナで得られた等高線分布を図 10(b)に示す。図 10(a)に示すように、平均速度分布には噴流中心付近に二か所のピークが存在し、中心から遠ざかるにつれて同心円状に速度が低下していく。流体速度場スキャナは、図 10(b)に示すように、このような速度分布の特性を適確に捉えている。すなわち、流体速度場スキャナによれば、等温円形噴流の速度場を簡便かつ極めて短時間に測定できる。

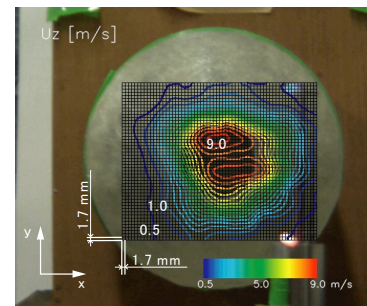
さらに、データ後処理に工夫を施せば、流体速度場スキャナの測定データから速度変動の実効値を測定することができる。速度変動の実効値（rms 値）の分布は、図 11(a)に示すように、乱れの強い領域が噴流出口の周囲にドーナツ状に存在し、その縁から外に向かって同心円状に実効値（乱れ強さ）が低下していく。一方、流体速度場スキャナも、図 11(b)に示すようにこのような乱れ強さ分布に見られる特徴を明確に捉えている。すなわち、流体速度場スキャナで測定された速度データから、通常の単一熱線で測定された時間平均速度および乱れ強さの分布を簡便かつ極めて短時間に再現できることが示された。

(4) 流体温度場のリアルタイム可視化計測

これまでに開発した流体温度場スキャナでは、測定対象の空間サイズがおおよそ $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ であり、これを 1 秒程度の時間で走査することで温度場の二次元可視化を実現した。しかし、エアコンの吹出口や保冷食品陳列棚などの温度場をより機動的かつ柔軟に可視化計測するためには、測定対象空間をプローブで自在に走査して、温度場の特性を塗り絵のように実時間で探查・解析できるリアルタイム可視化計測システムを実現する必要がある。本研究ではそのプロトタイプを構築して有用性を検証した。

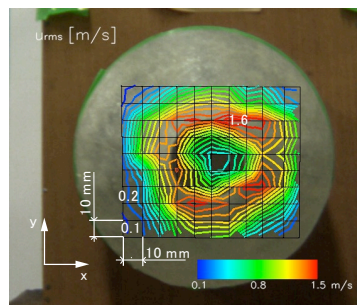


(a) 単一の熱線流速計

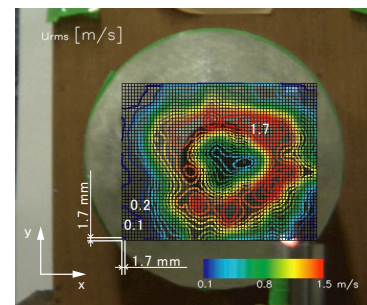


(b) 流体速度場スキャナ

図 10 等温円形噴流の平均速度の等高線分布



(a) 単一の熱線流速計



(b) 流体速度場スキャナ

図 11 等温円形噴流の速度変動の実効値の分布

5. 主な発表論文等 〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 16 件)

1. 岩田みゆう, 保浦知也, 服部博文, 田川正人, 「流体温度場スキャナによる加熱空気噴流の可視化計測」, 第 54 回日本伝熱シンポジウム講演論文集 [2019.5.29-31, 徳島], No. K1414.

2. 保浦知也, 竹下恭平, 田川正人, 「細線温度センサにおよぼす日射の影響に関する研究」, 日本機械学会東海支部第 68 期総会・講演会講演論文集 [2019.3.7-8, 岐阜], No. 418.
3. 成井礼, 保浦知也, 田川正人, 「サブミクロン冷線による乱流温度変動の高精度計測に関する研究」, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2018 講演論文集 [2018.10.20-21, 富山].
4. 浅岡諭史, 保浦知也, 田川正人, 「流体温度場スキャナによる加熱噴流の空間温度分布のリアルタイム計測」, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2018 [2018.10.20-21, 富山], 熱工学コレクション 2018, No. G126.
5. 小川美沙, 吉田峻, 保浦知也, 田川正人, 「マイクロ風向風速センサによる乱流境界層における 2 成分乱流計測」, 日本機械学会 2018 年度年次大会講演論文集 [2018.9.9-12, 吹田], No. J0520104.
6. 岩田みゆう, 杉山周平, 保浦知也, 服部博文, 田川正人, 「流体速度場スキャナによる乱流噴流の可視化計測」, 日本機械学会 2018 年度年次大会講演論文集 [2018.9.9-12, 吹田], No. J0520105.
7. 保浦知也, 杉山周平, 田川正人, 「流体スキャナによる非等温気流の速度と温度の可視化計測」, 日本機械学会東海支部第 67 期総会・講演会講演論文集 [2018.3.13-14, 名古屋], No. 526.
8. 岩田みゆう, 杉山周平, 保浦知也, 田川正人, 「流体速度場スキャナによる時間平均速度分布の高精度測定」, 第 49 回卒業研究発表講演会講演論文集, [2018.3.12, 名古屋].
9. T. Houra and M. Tagawa, “A visualization technique for two-dimensional velocity profiles using newly-developed fluid velocity-field scanner,” Proceedings of the 11th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing, 1-3 December 2017, Kumamoto, Japan, PSFVIP11-064.
10. 吉田峻, 保浦知也, 田川正人, 「マイクロ風向風速センサによる 2 成分乱流速度測定」, 第 15 回日本流体力学会中部支部講演会, 2017.12.1, 名古屋 (名古屋工業大学).
11. 丹羽幸佑, 保浦知也, 田川正人, 「微気象観測のための超小型風向風速センサの開発」, 日本気象学会中部支部研究会, 2017.11.27-28, 岐阜 (岐阜大学).
12. 杉山周平, 保浦知也, 田川正人, 「流体速度場スキャナによる気流速度分布の可視化計測」, 日本機械学会 2017 年度年次大会講演論文集 [2017.9.3-6, さいたま], No. J0520405.
13. 白井大地, 保浦知也, 田川正人, 「細線温度センサにおけるプロング時定数の実験的評価と応答補償」, 第 54 回日本伝熱シンポジウム講演論文集 [2017.5.24-26, さいたま], No.231.
14. 白井大地, 保浦知也, 田川正人, 「細線温度センサにおけるプロング時定数の実験的評価」, 日本機械学会東海支部第 66 期総会・講演会講演論文集 [2017.3.14-15, 浜松].
15. T. Houra, H. Tomita and M. Tagawa, “Improvement of the fluid temperature scanner for practical use,” Proceedings of the 4th International Forum on Heat Transfer (IFHT2016), November 2-4, 2016, Sendai, Japan, No. IFHT2016-1891.
16. 保浦知也, 吉田峻, 田川正人, 「熱線と抵抗線群からなる新型プローブによる 2 成分乱流速度測定」, 日本機械学会 2016 年度年次大会講演論文集 [2016.9.11-14, 福岡], No. J0530206.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名： 該当なし

(2)研究協力者

研究協力者氏名： 該当なし

ローマ字氏名：

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。