

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年5月23日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22560194

研究課題名（和文）細線熱電対群プローブによる「流体温度場スキャナ」の開発

研究課題名（英文）Development of "Fluid Temperature Scanner" (Adaptive Response Compensation and Image Motion Measurement of In-Line Fine-Wire-Thermocouple Probe)

研究代表者

田川 正人 (TAGAWA MASATO)

名古屋工業大学・工学研究科・教授

研究者番号：80163335

研究成果の概要（和文）：空調機や燃焼器など様々な熱流体機器から排出されるガスの温度分布を簡便かつ定量的に可視化できる計測技術が求められている。流体温度場の可視化法には、高出力レーザや超音波を用いる計測法があるが、一般に装置が大規模かつ高価であり、その運用には相当の専門知識が必要である。本研究では、「細線温度センサの適応応答補償」に「プローブ位置の画像計測」を融合させることによって、安全性が高く取り扱いが容易な流体温度場の可視化計測技術「流体温度場スキャナ」の実現に成功した。

研究成果の概要（英文）：A novel measurement technique for visualizing the spatial temperature distribution of a non-isothermal gas flow has been developed. By tracking the movement path of a specifically-developed multi-sensor temperature probe using a commercially-available high-speed CCD camera, we can measure quantitatively a two-dimensional temperature profile and project it to the measurement object image obtained by the CCD camera. The key technique is an adaptive response-compensation scheme based on a "two-thermocouple probe technique," by which the response lag of the temperature sensors can be adequately compensated; hence the temperature profile can be reconstructed accurately. As an example, we have demonstrated that the temperature field of the hot-air jet ejected from a hair dryer can be visualized readily and quantitatively. The results show the effectiveness and usefulness of the proposed visualization technique.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012年度	1,200,000	360,000	1,560,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：温度計測，センサ，流体温度，可視化計測，適応応答補償，細線熱電対，応答遅れ，時定数

### 1. 研究開始当初の背景

空気や水などの流体の温度分布をその場で簡単に可視化できれば、熱や流体が関与する機器の開発設計や性能評価における様々な場面で有用な情報を得ることができる。流体温度の空間分布を可視化する方法には、レーザや超音波による非接触計測法がある。非接触法は原理的に優れているが、一般に、計測システムが複雑であり、その使用には相当の専門知識を必要とする。また、適用できる場に制約があることが多く、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って、実用レベルで普及する段階に至っていないのが現状である。

以上を背景として、本研究では、研究代表者らが長年にわたり開発してきた「細線温度センサの適応応答補償法」に「プローブ位置の画像計測」を融合させることにより、上述の困難を回避する手法を提示する。これにより、安全性が高く取り扱いが容易かつ適用範囲の広い流体温度場の可視化法を開発するとともに、その成果として、「流体温度場スキャナ」とよぶ新しい流体温度の可視化計測技術を実現する。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、空調機や燃焼器など各種熱流体機器から排出される気体の温度分布を、簡便かつ定量的に可視化計測できる「流体温度場スキャナ」を開発することである。本研究では、研究代表者らが独自に開発した「温度センサの適応応答補償」を基礎として、これに「プローブ運動の画像位置計測」を融合させることで、安全で取り扱い易くかつ適用範囲の広い流体温度場の可視化計測法を実現する。

### 3. 研究の方法

(1) 「流体温度場スキャナ」の概念と計測システムの構成を図1に示す。

(2) 研究の目的を達成するために、計測システムに要求される性能 (S/N 比, サンプリング周波数, データ長など) について詳細に検討し、それを実現できる最適なシステムを構築した。

(3) 空間分解能  $4\text{ mm} \times 4\text{ mm}$  を達成するために、高い空間分解能を有する温度プローブを製作した (図2)。プローブの位置計測精度を高めるために、プローブの側面には赤色と青色の二つの LED を設置した。その際、LED 駆動回路の改良と拡散キャップの導入等により、LED の発光特性を改善した。さらに、高速度ビデオカメラの制御プログラムを自作することで、プローブ (熱電対群) 出力の A/D 変換と高速度 CCD カメラによる動画記録の手順を最適化して、温度分布とプローブ位

置を正確に測定できる画像計測・画像処理システムを構築した。

(4) 温度プローブの製作技術の改善および上記(3)のプローブ位置計測の高精度化により、空間分解能をさらに高めて  $2\text{ mm} \times 4\text{ mm}$  を実現することに成功した。ただし、現有のデータ収集システムの制約によって、使用で

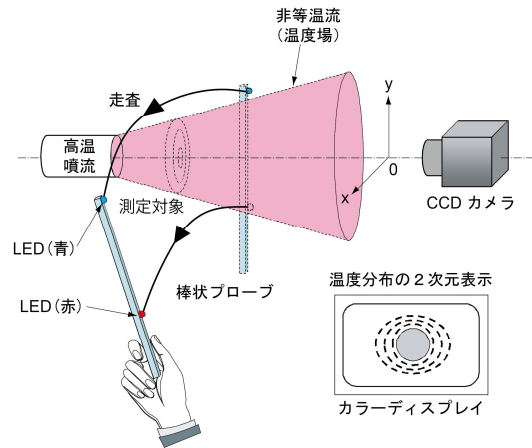


図1 流体温度場スキャナのご概念図。

[温度プローブの軌跡を高速度 CCD カメラで捕捉する。熱電対の出力は A/D 変換器でパーソナルコンピュータに取り込まれて、二線式熱電対法により応答補償される。測定された二次元温度分布 (等高線分布) は測定対象画像に重ねて表示される。]

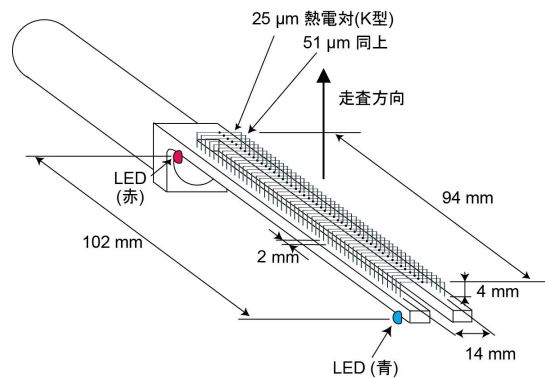
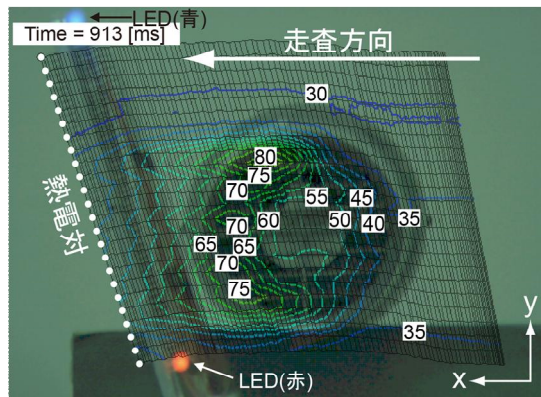


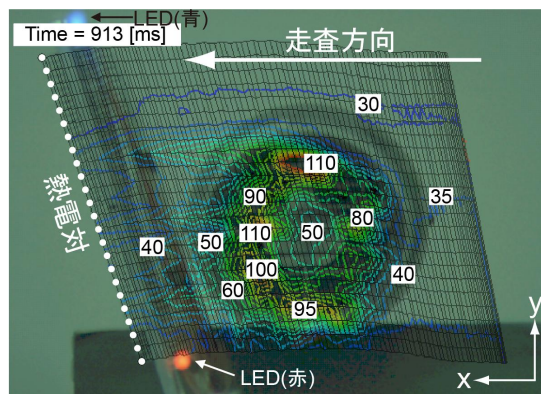
図2 試作した温度プローブの構成。

[二線式熱電対法を適用するために、線径が異なる二つの K 熱電対を 2 mm 間隔で交互に配列して感温部 (全長 94 mm) を構成している。プローブの側面には赤と青の二つの LED を設置して位置認識の精度を高めている。プローブの移動方向は下から上であり、各熱電対の温接点は移動方向の先頭に位置するので、測定値はプローブ本体で誘起される流動の影響をほとんど受けない。]

きるセンサ数の上限が 48 であることから、測定可能な領域(走査領域)は 94 mm × 94 mm となった。なお、測定対象の温度場の空間スケールが大きい場合には、プローブを構成する各熱電対の間隔を大きくして走査領域を拡大できる。すなわち、原理的には、本計測システムの走査領域の大きさに制約はない。(5) 開発した流体温度場計測システムを、ヘアドライヤーから噴出する高温空気噴流(直径: 60 mm, 最高温度: 約 110 °C) に適用して、本可視化計測法の有効性を検証する。測



(a) 応答補償前



(b) 応答補償後

図 3 流体温度場スキャナによる測定例(上段: 応答補償前, 下段: 応答補償後)。

[測定対象はヘアドライヤーから噴出する高温空気流の温度場である。温度分布を測定対象の画像上に重ねて提示することにより、温度場の様子が一目瞭然である。下段の図から分かるように、温度プローブ(熱電対群)の出力を応答補償することによって、この高温噴流の温度場の特性がよく再現される。通常、このような温度分布の測定には3時間ほどを要するが、温度場スキャナを用いれば測定時間を約2秒にまで劇的に短縮できる。]

定結果を図3に示す。応答補償前(上図)では、熱電対の応答遅れに起因して、最高温度が 80 °Cにとどまるとともに、プローブが噴流を通過した後も温度分布が尾を引く現象(tailing)が発生する。一方、応答補償後(下図)では、噴流の最高温度(約 110 °C)が正確に捉えられており、噴流の温度分布がほぼ正しく再現される。このように、応答補償後の温度分布を測定対象に重ねて提示すれば、温度場の全体像が一目瞭然であり、その特性を瞬時に把握できる。また、本手法を用いれば、従来の測定法では3時間を要した空間温度分布の測定を約2秒にまで劇的に短縮できることも大きな利点である。

#### 4. 研究成果

(1) 研究代表者らが先に開発した二線式熱電対法を基礎として、細線熱電対群プローブの適用応答補償法を開発した。本研究では、実用性の向上を重視して、丈夫な素線径 51  $\mu\text{m}$  と 75  $\mu\text{m}$  の K 熱電対で構成される二線式熱電対を採用した。一般に、熱電対の素線径が大きくなると、耐久性は向上するものの、応答遅れが増大するために、応答補償法の優劣が測定結果に顕著に現れる。しかし、開発した適用応答補償法を用いれば、丈夫な 51  $\mu\text{m}$  と 75  $\mu\text{m}$  の二線式熱電対についても、先に採用した 25  $\mu\text{m}$  と 51  $\mu\text{m}$  の二線式熱電対と遜色のない測定結果が得られることを実証した。さらに、この二線式熱電対 24 組を直線上に 4 mm 間隔で配置した温度プローブを製作して、ヘアドライヤーから噴出する高温空気噴流の二次元温度分布を空間分解能 4 mm で可視化計測することに成功した。

(2) プローブ位置の画像計測、二線式熱電対法による時定数の推定と適用応答補償、計測対象画像に測定された二次元温度分布を重ねて提示する画像処理、などを実行する統合ソフトウェアを開発して、データ処理の利便性と柔軟性を大幅に向上させた。測定精度に改善すべき点はあるが、「流体温度場スキャナ」のプロトタイプとしては十分な性能を有することを確認した。

(3) 本計測法の基礎である「細線温度センサによる変動温度測定」の信頼性をさらに高めるために、温度プローブの軸方向熱伝導に起因する測定誤差を理論的に予測できる手法を開発し、その有効性を検証した。

以上のとおり、安全性が高く取り扱いが容易な流体温度場の可視化計測技術「流体温度場スキャナ」を実現するとともに、測定精度と実用性の支配要因を明らかにした。

#### 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8件)

- ① 田川正人・貝吹和秀・保浦知也・山上洋介・加藤健次, 細線熱電対群の応答補償と変動温度場の多次元計測への適用, 日本機械学会論文集(B編), 査読有, 76巻, 2010, pp. 1068-1074.  
http://ci.nii.ac.jp/naid/110007682121
- ② 稲葉貴久・貝吹和秀・保浦知也・田川正人, 流体温度場スキャナの開発(細線熱電対列の適応応答補償と画像位置計測の融合), 日本機械学会論文集(B編), 査読有, 77巻, 2011, pp. 875-881.  
10.1299/ki.kai.b.77.875
- ③ M. Tagawa, K. Kai fuku, T. Houra, Y. Yamagami, K. Kato, Response compensation of fine-wire thermocouples and its application to multidimensional measurement of a fluctuating temperature field, *Heat Transfer-- Asian Research*, 査読有, Vol. 40, 2011, pp. 404-418.  
10.1002/htj.20355
- ④ 貝吹和秀・Soe Minn Khine・保浦知也・田川正人, 定電流型熱線流速計の応答特性の解析と応答補償, 日本機械学会論文集(B編), 査読有, 78巻, 2012, pp. 107-120.  
10.1299/ki.kai.b.78.107
- ⑤ 田川正人・保浦知也, 〔解説〕熱設計のための熱流体計測(熱電対による流体温度場の測定), 機械の研究, 査読無, 64巻, 2012, pp. 29-41.
- ⑥ Soe Minn Khine, T. Houra and M. Tagawa, Heat-conduction error of temperature sensors in a fluid flow with nonuniform and unsteady temperature distribution, *Review of Scientific Instruments*, 査読有, Vol. 84, 2013, pp. 044902-1~044902-11.  
10.1063/1.4801853
- ⑦ Soe Minn Khine, T. Houra and M. Tagawa, An adaptive response compensation technique for the constant-current hot-wire anemometer, 査読有, Vol. 3, 2013 (印刷中).  
10.4236/ojfd.2013.
- ⑧ Soe Minn Khine・保浦知也・田川正人, 温度勾配を有する流体温度場における温度センサの熱伝導誤差の理論解析と実験的検証, 日本伝熱学会論文集, 査読有, 21巻, 2013 (印刷中).  
10.11368/tse.21.

〔学会発表〕(計6件)

- ① 稲葉貴久・貝吹和秀・保浦知也・田川正人, 細線熱電対列プローブによる流体温度場スキャナの開発, 第47回日本伝熱シンポジウム, 2010年5月26日~28日, 札幌

コンベンションセンター(札幌市).

- ② Soe Minn Khine・貝吹和秀・保浦知也・田川正人, 定電流型熱線流速計の応答特性と応答補償, 日本機械学会 2010年次大会, 2010年9月5日~8日, 名古屋工業大学(名古屋市).
- ③ K. Kai fuku, Soe Minn Khine, T. Houra and M. Tagawa, Response compensation of constant-current hot-wire anemometer, 21st Int. Symp. on Transport Phenomena (ISTP-21), 2010年11月2日~5日, Kaohsiung City (台湾).
- ④ K. Kai fuku, Soe Minn Khine, T. Houra, and M. Tagawa, Response compensation scheme for constant-current hot-wire anemometry based on frequency response analysis, 8th ASME/JSME Thermal Engineering Joint Conference (AJTEC 2011), 2011年3月13日~17日, Honolulu, Hawaii (米国).
- ⑤ Soe Minn Khine, T. Houra and M. Tagawa, A two-sensor probe technique for response compensation of the constant-current hot-wire anemometer, 8th KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference, 2012年3月18日~22日, Incheon (韓国).
- ⑥ Soe Minn Khine・保浦知也・田川正人, 温度勾配をもつ変動温度場における温度センサの応答特性(熱伝導誤差の理論解析と実験による検証), 日本機械学会 熱工学コンファレンス 2012, 2012年11月17日~18日, 熊本大学(熊本).

〔図書〕(計0件)

該当なし

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

該当なし

○取得状況(計0件)

該当なし

〔その他〕

該当なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田川 正人 (Tagawa Masato)

名古屋工業大学・工学研究科・教授

研究者番号: 80163335

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

該当なし