

平成21年5月29日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2008

課題番号：19560202

研究課題名（和文） 細線による空間2次元変動温度場計測法（サーモネット）の開発

研究課題名（英文） Multidimensional Measurement of a Fluctuating Temperature Field Using a Group of Fine-Wire Sensors

研究代表者

田川 正人（TAGAWA MASATO）

名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：80163335

研究成果の概要：空気や水など流体の温度分布を、安全かつ手軽に可視化できる実用性の高い計測技術が求められている。高出力レーザーや超音波を利用する既存技術は、装置規模が大きく高価であり、また安全性や簡便さの点からも適用範囲が極めて限定される。本研究では、「細線温度センサの応答特性解析理論」と「適応応答補償」という筆者らが長年培ってきた独自技術を基礎として、簡便で安全かつ安価な流体温度場のイメージング技術を開発した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2008年度	1,200,000	360,000	1,560,000
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

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，応答遅れ，時定数，周波数応答，応答補償，乱流，熱電対

1. 研究開始当初の背景

空気や水など流体の温度分布をその場で簡単に可視化できれば、さまざまな熱流体関連機器（たとえば、エアコン、自動車、工場設備など）の開発や性能評価などにおいて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技術としては、高出力レーザーや超音波を用いる計測法が主として研究用に開発されている。しかし、レーザー応用計測法は、一般に装置規模が大きく高価であるとともに、安全性の観点からも適用範囲が極めて限定される。また、超

音波による空間温度分布計測法は劇場ホールなど大スケール空間では有効であるが、小スケール空間には適用困難である。このようなことから、流体温度場を安価で安全かつ手軽に可視化できる実用性の高いイメージング技術の開発が期待されている。

2. 研究の目的

流体温度場を可視化する技術の主流はレーザー応用計測法である。しかし、取り扱いには高度の専門知識が要求されるだけでなく、一般に装置が大規模かつ高価であり、適

用範囲や使用条件には強い制約がある。一方、熱電対などの接触型センサは安価かつ手軽であるとともに精度や信頼性も高いが、一点計測法であること、および応答に遅れ（利得の低下と位相のずれ）が生じるために変動温度の多次元測定に利用することは難しい。ただし、この問題を解決できれば、簡便で安全に流体温度場を可視化できる可能性がある。

本研究の基礎となる測定技術は筆者らが長年培ってきた「細線温度センサの応答特性解析理論」と「適応応答補償法」であり、十分な実績がある。これらの独自技術に立脚すれば、安価で安全かつ信頼性の高い流体温度場のイメージング技術を実現できると考えられる。

本研究では、接触型温度センサの応答速度を測定環境に適応して10~100倍に高速化できる適応応答補償法 (Tagawa *et al.*, 2005) を細線熱電対群に適用して、空気流の変動温度場を多次元計測する方法を提示する。実験では、二線式熱電対 (Tagawa & Ohta, 1997) を2次元格子 (8 × 8) 上に配列して多点同時測定する。測定データから熱電対群の応答特性を同定するとともに、各測定点で応答遅れを補償することにより、流体温度場の時空間的变化が可視化できることを実証する。

3. 研究の方法

(1) 二次元細線熱電対群プローブの試作

試作した細線熱電対群プローブの写真を図1に、その詳細を図2に示す。測定対象は空気流であり、プローブの測定面を流れ方向に対して垂直に設置する。図2に示すように、各測定点は素線径 $d_1 = 25 \mu\text{m}$ と $d_2 = 51 \mu\text{m}$ の2つのK熱電対を一組として構成され (二線式熱電対)、それぞれが20 mmの間隔で64 (8 × 8) の格子点上に設置されている。これら総計128個のK熱電対の熱起電力は計測アンプで約800倍に増幅され、8台のA/D変換器 (16 ch/台) によりパーソナルコンピュータに取り込まれる。サンプリング周波数は $f_s = 1 \text{ kHz}$ である。以下では、添字1, 2はそれぞれ素線径 $25 \mu\text{m}$, $51 \mu\text{m}$ のK熱電対を示す。

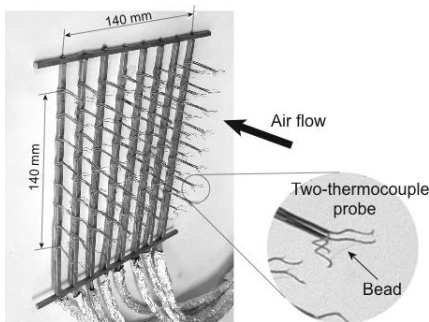


図1 二次元細線熱電対群プローブ (サーモネット)

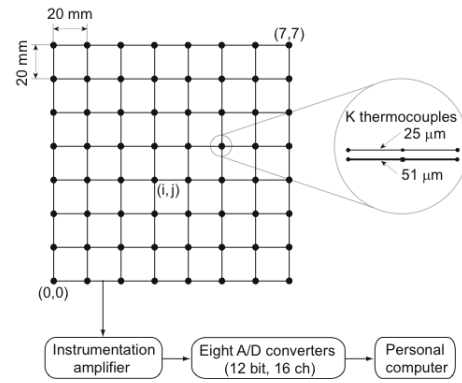


図2 二次元細線熱電対群プローブ (サーモネット) の座標系と計測システム

(2) 適応応答補償法の細線熱電対群への適用
細線熱電対の応答特性は1次遅れ系で近似できる。したがって、時定数が異なる2つの熱電対の応答特性は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} T_{g1} &= T_1 + \tau_1 \frac{dT_1}{dt} \\ T_{g2} &= T_2 + \tau_2 \frac{dT_2}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで、 T_g : 流体温度、 T : 測定値、 τ : 時定数、 t : 時間である。時定数 τ の値を知れば、式(1)より測定値 T から流体温度 T_g が求まる (応答補償)。しかし、流れ場では流速に応じて τ が変化するだけでなく、その値が未知である場合がほとんどである。筆者らは、このような状況においても、流速などの測定環境の情報を用いることなく測定データ自体から時定数を推定し (センサ動特性の校正は不要)、その場で応答補償できる新しい計測技術を開発した (適応応答補償)。これまでに4つの手法を提案した (Kato & Tagawa, 2006) が、本研究では、その中から時定数推定法の基本である e_{\min} 法を適用する。

e_{\min} 法では、式(1)の流体温度 T_{g1} と T_{g2} の差の二乗平均値

$$e = \overline{(T_{g2} - T_{g1})^2} \quad (2)$$

を最小化することで時定数 τ_1 および τ_2 を推定する [$\overline{(\quad)}$ は時間平均を表す]。式(2)の e を最小化する時定数は、 $\partial e / \partial \tau_1 = 0$, $\partial e / \partial \tau_2 = 0$ の条件から、次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \tau_1 &= \frac{\overline{G_2^2 \cdot G_1 \Delta T_{21}} - \overline{G_1 G_2} \cdot \overline{G_2 \Delta T_{21}}}{\overline{G_1^2 \cdot G_2^2} - (\overline{G_1 G_2})^2} \\ \tau_2 &= \frac{\overline{G_1 G_2} \cdot \overline{G_1 \Delta T_{21}} - \overline{G_1^2} \cdot \overline{G_2 \Delta T_{21}}}{\overline{G_1^2 \cdot G_2^2} - (\overline{G_1 G_2})^2} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここで、 G は T の時間微分 $G = dT/dt$ を表す。

4. 研究成果

本研究で開発した細線温度センサによる温度場の可視化技術は、筆者ら独自の理論と技術（流体温度変化に対する細線応答特性の理論解析と適応応答補償）がなければ実現できないものであり、国内外に例をみないユニークな技術である。本技術を画像計測および画像処理技術と組み合わせれば、流体温度場をその場で簡便かつ安全に可視化する新たな手法を構築できる。本研究では、以下に示すように、その基盤となる技術を開発するとともに、その有効性を実験的に検証する。

(1) 応答補償の効果の検証

実験装置を図3に示す。測定対象は加熱された円形空気噴流であり、熱電対群プローブを、その測定面が噴流軸と垂直となるように、風洞出口より70 mm下流に設置した。測定対象の温度場は、直径50 mmの円形ノズルから噴出する高温空気流（流速5.0 m/s、温度52 °Cで一様）を0.2秒程度の周期で人為的に攪乱した変動温度場である。この測定では、サンプリング周波数は1 kHz、データ個数は各熱電対につき5120である。

応答補償の妥当性を検証するために、図2の格子点 $(i, j) = (4, 5)$ 上で収集された温度変動波形を図4に示す。図4(a)が「応答補償なし」、図4(b)が「応答補償あり」の場合の温度変動波形である。このとき、式(3)による時定数の推定結果は、 $\tau_1 = 19.5$ ms、 $\tau_2 = 51.3$ msであり、これらの時定数値を式(1)に適用して応答補償した。図4(b)から分かるように、応答補償によって高周波数成分が正しく再生されて、線径25 μm 、51 μm の2つのK熱電対の波形は互によく一致する（他点についても同様の結果を得た）。

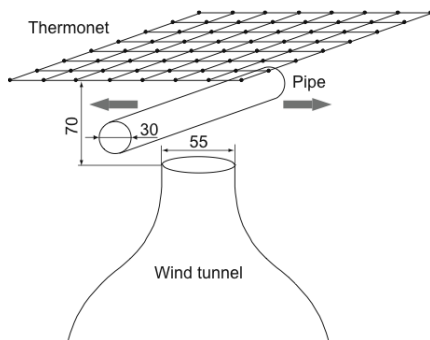
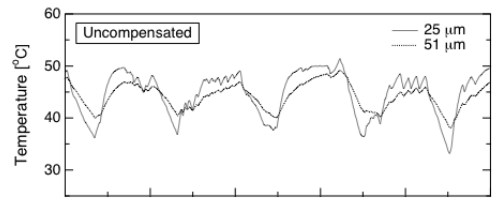
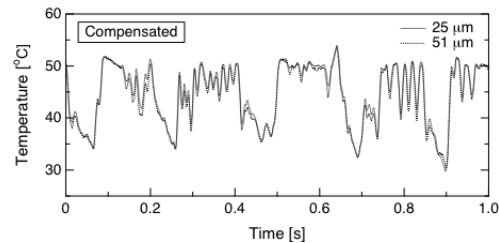


図3 円柱棒で攪乱される円形空気噴流（温風）と二次元細線熱電対群（サーモネット）の配置



(a) 応答補償なし



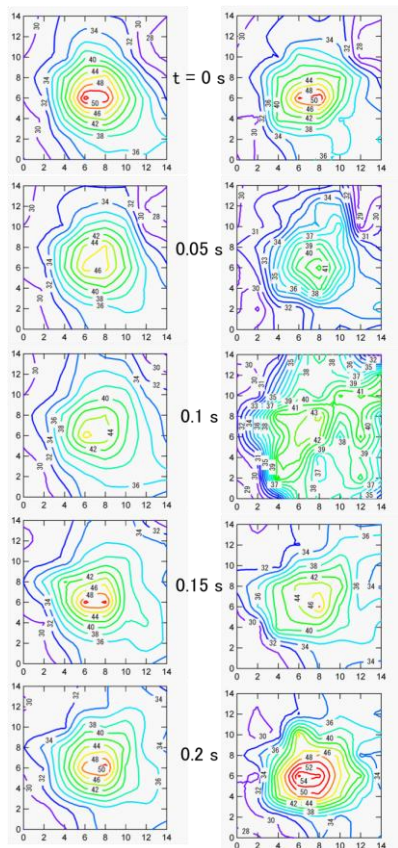
(b) 応答補償あり

図4 円柱棒で攪乱された温度場の測定結果：プローブ格子点 $(i, j) = (4, 5)$ における温度変動波形

(2) 変動温度場の2次元可視化計測

二次元細線熱電対群プローブの各測定点が正しく応答補償されていることが確認されたので、図3に示す円柱棒によって攪乱された温度場を対象として、その時間変化を可視化した。図5に線径51 μm の熱電対群により測定された温度場の等高線分布を示す。図5(a)、(b)は、「応答補償なし」の場合、「式(1)、式(3)による応答補償あり」の場合のそれぞれの等高線分布を0.05秒ごとに連続的に示している。

図5(a)では、熱電対の応答に遅れがあるために、温度場が攪乱されているにもかかわらず温度分布の変化は緩慢であり、熱電対群プローブ中心付近の等高線はほぼ同心円形状のまま保持されている。また、プローブ周辺部の温度分布も緩やかな形状を示す。一方、図5(b)に示すように応答補償を適用した場合には、プローブ中央部で温度場の急激な変化が捕捉されている。なかでも、円柱棒が風洞出口の中心を通過する時刻 $t = 0.10$ sでは、応答補償の有無によって温度の等高線分布に大きな差異が現れる。さらに、時刻 $t = 0.20$ sの結果に見られるように、応答補償によって本来の温度分布に早く復帰していることが確認できる。以上の結果から、応答補償を適用しなければ、円柱棒の攪乱に対する温度場の応答を正確に捕捉できないことは明らかである。



(a) 応答補償なし (b) 応答補償あり

図5 円柱棒で攪乱される温度場の時間変化（応答補償の効果の検証, $t=0\sim 0.2$ s）

次に、移動する高温空気噴流の軌跡を捕捉する実験を行った。この実験では、ヘアドライヤーから噴出する高温空気を二次元熱電対群プローブに吹きつけて、それをすばやく円運動させることで高温噴流を移動させた。この高温空気流は、最高温度が $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 程度であり、出口流速は約 6 m/s である。この測定では、サンプリング周波数を 1 kHz とし、データ個数を各センサあたり 5120 とした。

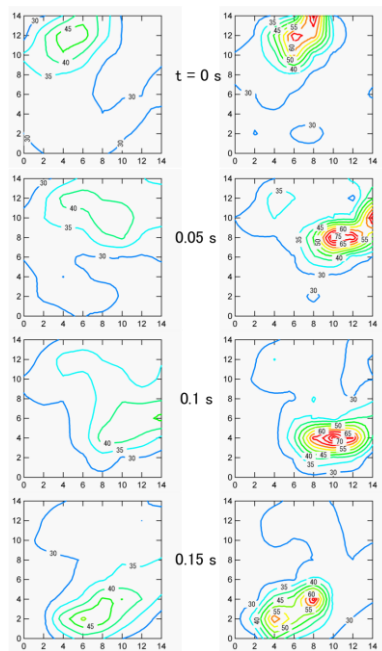
線径 $51\text{ }\mu\text{m}$ の熱電対群により測定された温度場の等高線分布を図6に示す。図6(a)は応答補償しない場合の結果であり、図6(b)は式(3)により時定数を推定し、式(1)を用いて適応応答補償した結果である。それぞれ、温度場の等高線が 0.05 秒ごとに变化する様子が示されている。

図6(a)より、応答補償前では、熱電対の利得が不足していることから、最高温度が実際より $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ほど低く測定されている。また、温度場の变化に十分に追従できないために、等高線の分布形状は緩やかである。一方、図6(b)では、応答補償によって数 Hz から数百 Hz にわたる広い周波数帯の変動成分が再生されるために、熱電対の応答は高速の温度変化にも追従できる。その結果、等高線の分布

形状が急峻になるとともに、噴流の中心温度も正しく再現されている。

なかでも、応答補償の有無によって温度分布がピークをもつ位置に「ずれ」が生じる点が注目される。たとえば、時刻 $t=0.05$ s において、応答補償前の図6(a)ではピークが $(x, y) = (8\text{ cm}, 10\text{ cm})$ に位置するのに対して、応答補償後の図6(b)では $(x, y) = (10\text{ cm}, 8\text{ cm})$ にある。これは、熱電対応答における「時間的な遅れ」が「空間的な位相のずれ」として現れたことを示す。

以上から、応答補償によって、高温噴流の中心温度が正しく再現されるとともに、その軌跡における空間的な位相のずれも補償されて、噴流の挙動を的確に捕捉できることが示された。さらに、応答補償前後の等高線分布の比較から熱源の移動方向を推定することも可能である。



(a) 応答補償なし (b) 応答補償あり

図6 移動する高温空気流（ヘアドライヤーの高温噴流）の追跡（応答補償の効果の検証, $t=0\sim 0.15$ s）

(3) 一次元細線熱電対群プローブによる二次元的可視化法の開発

ここでは、一次元細線熱電対群プローブで空間を走査して流体温度場を二次元的に可視化することを試みる。プローブには、線径 $25\text{ }\mu\text{m}$ と $51\text{ }\mu\text{m}$ の K 熱電対からなる二線式熱電対 24 組を、長さ 125 mm の支持棒に間隔 5 mm で一列に配置した熱電対群を用いた。測定では、図3の円形風洞から鉛直上向きに噴出する高温空気流中を、一次元熱電対群プローブをほぼ一定の速度で走査する。このときのサンプリング周波数は 1 kHz 、収集するデ

ータ数は各センサあたり 1024 である。

測定対象は約 52 °C の一様温度分布をもつ円形空気噴流である (図 3)。図 7 に、線径 51 μm の熱電対群で測定された応答補償前後の結果を比較して示す。図 7 では、縦軸に各熱電対の位置を、横軸に時間をとって、温度分布を二次元的に可視化している。

図 7(a) の応答補償前の温度分布では、熱電対の応答遅れによって、最高温度が噴流温度 (52 °C) に到達せずに、40 °C 付近にとどまる。さらに、熱電対群が高温噴流を通過した後でも温度は緩やかに低下していき、温度分布にはすい星のように尾を引く現象が見られる。

一方、図 7(b) を観察すると、応答補償の効果が次の点から確認できる: 1) プローブが風洞出口の中心付近を通過する時刻において、温度分布の最高温度は噴流温度に達している。2) 温度分布がピークとなる時間が応答補償前よりかなり早くなる。3) すい星の尾に似た温度分布形状はほぼ消える。ただし、詳しく見ると、応答補償後の分布にも僅かながら尾を引く現象が見られる。これは、一次元プローブが噴流を横切った直後に流速が急減することに起因する。すなわち、式(3)では、「測定区間で時定数値は一定である」を前提としているので、流速の急減ともなう時定数値の急増が推定に十分反映されず、結果として、応答補償不足となるからである (この現象は次節の瞬時時定数の推定法を適用することにより改善できることを別途確認している)。

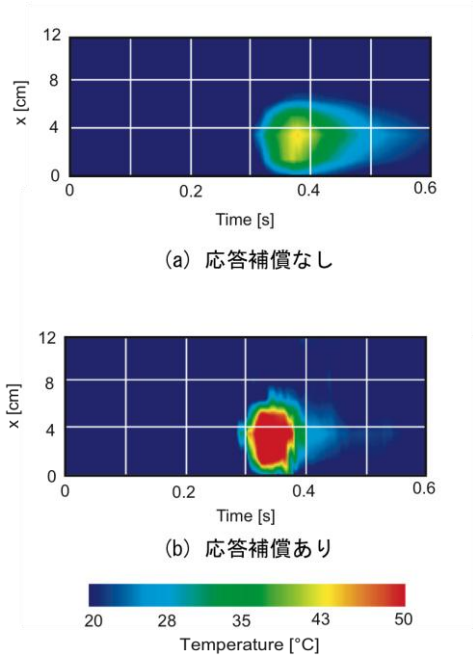


図 7 一次元プローブによる円形噴流温度場の走査

(4) リアルタイム応答補償の可能性 (瞬時時定数の推定)

式(3)では、測定データの時間平均値を用いて時定数を推定することから、通常、応答補償はデータ収集が終了した後に実行される。しかし、本研究で開発した熱電対群プローブのように、二線式熱電対が多数ある場合には、式(3)の時間平均を空間平均で置換することにより、瞬時の時定数を推定できるようになる。すなわち、時間微分 G の計算に必要な先行時間 (本実験では 5 時刻 $\times f_s^{-1} = 5 \text{ ms}$) が経過した後に、ほぼ実時間での応答補償が可能となる。

このようにして得られる瞬時時定数 $\tau_1(t)$, $\tau_2(t)$ はそれぞれ次式で表される。

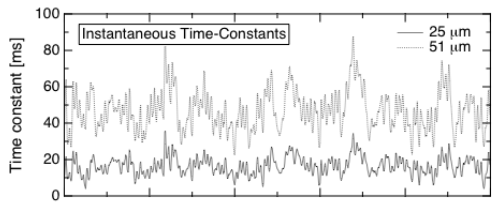
$$\left. \begin{aligned} \tau_1(t) &= \frac{\sum G_2^2 \sum G_1 \Delta T_{21} - \sum G_1 G_2 \sum G_2 \Delta T_{21}}{\sum G_1^2 \sum G_2^2 - (\sum G_1 G_2)^2} \\ \tau_2(t) &= \frac{\sum G_1 G_2 \sum G_1 \Delta T_{21} - \sum G_1^2 \sum G_2 \Delta T_{21}}{\sum G_1^2 \sum G_2^2 - (\sum G_1 G_2)^2} \end{aligned} \right\} (4)$$

ここで、 Σ は空間平均であり、図 2 の熱電対群プローブの場合には $\Sigma_{1 \leq (i,j) \leq 7}$ を表す。

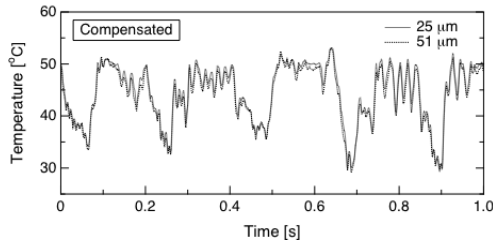
図 8 に式(4)による時定数の推定結果とそれによる応答補償の結果を示す。測定対象は、高温空気噴流を直径 3 cm の円柱棒で周期的に横切ることによって攪乱される温度場である (図 3)。図 8 から、時定数はかなり大きく変動することがわかる。とくに、低温になる時間帯で時定数が増大する現象が顕著である。これは、温度が低下する時間帯は、熱電対群プローブが円柱棒によって高温噴流から遮られている状態にあり、これに対応してプローブ周りの流速が低下し時定数が増大するからである。なお、図 8 に示す変動時定数の時間平均値は、線径 25 μm, 51 μm の熱電対についてそれぞれ 17.0 ms, 48.2 ms であり、式(1)による平均時定数の推定結果とほぼ合致する。

図 9 に、線径 51 μm の熱電対群で測定された温度を、式(3)の時間平均時定数で応答補償した結果 [図 9(a)] と式(4)の瞬時時定数で応答補償した結果 [図 9(b)] を比較して示す。図 9 から、平均時定数と瞬時時定数を用いて

応答補償した温度場は、時間平均時定数による補償と比べて、温度場の攪乱による大きな差異が見られず、温度場が攪乱される様子はいずれも適切に再現されていることがわかる。したがって、この温度場については、実時間で応答補償する必要がある場合は瞬時時定数で、後処理でよければ時間平均時定数で応答補償するというように、目的に応じて使い分けることができる。

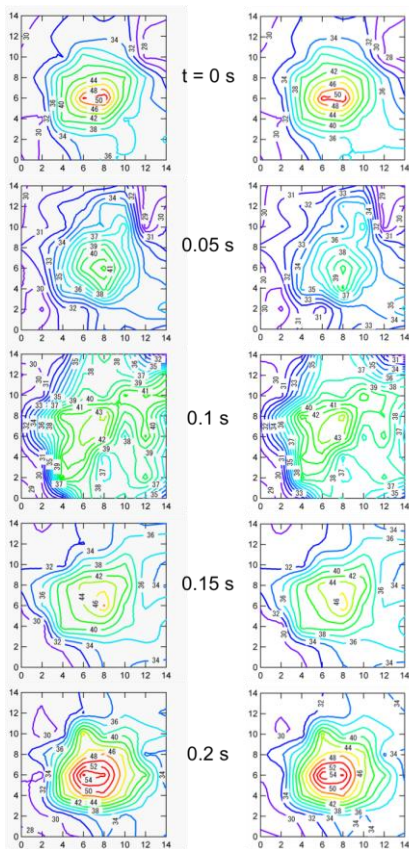


(a) “時定数”の変動波形



(b) 変動時定数による応答補償

図8 円柱棒で攪乱された温度場における瞬時時定数の推定と応答補償結果 (図4 との比較)



(a) 平均時定数 (b) 瞬時時定数

図9 円柱棒で攪乱された温度場の応答とリアルタイム応答補償の可能性 (瞬時時定数による応答補償結果と平均時定数によるそれとの比較, $t = 0 \sim 0.2$ s)

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1件)

- ① 田川正人, (解説) 細線温度センサによる流体温度変動の測定, 検査技術, 査読無, 第14巻, 2009, pp. 1-10.

[学会発表] (計1件)

- ① 山上洋介・貝吹和秀・田川正人, 細線熱電対群の応答補償と変動温度場の多次元計測, 熱工学コンファレンス講演論文集, 2007年11月23日, 京都大学工学部(京都市).

[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]

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・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 80163335

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし