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*

田川 正人^{*1}, 貝 吹 和 秀^{*2}, 保 浦 知 也^{*1}
山 上 洋 介^{*3}, 加 藤 健 次^{*4}Response Compensation of Fine-Wire Thermocouples and Its Application to
Multidimensional Measurement of a Fluctuating Temperature FieldMasato TAGAWA^{*5}, Kazuhide KAIFUKU, Tomoya HOURA,
Yosuke YAMAGAMI and Kenji KATO^{*5} Department of Mechanical Engineering, Nagoya Institute of Technology,
Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 466-8555 Japan

A novel sensor technique is proposed to visualize the readily spatiotemporal behavior of a fluctuating temperature field of airflow. Two temperature probes were fabricated: one is a rod-type probe consisting of 24 two-thermocouple sensors set in line and the other is a plane-type one consisting of 64 two-thermocouple sensors arrayed on a two-dimensional grid (8×8 points). Each two-thermocouple sensor used in these probes was composed of two fine-wire thermocouples (type K) of unequal diameters, e.g., 25 μm and 51 μm . An adaptive response-compensation scheme was applied to accurately reconstruct rapidly-changing airflow temperatures. The plane-type probe enables visualization of fluctuating temperature fields of an artificially disturbed hot-air jet and adequate capture of the spatiotemporal behavior of a rapid circular motion of hot-air jet blown out from a hair dryer. A time-constant estimation scheme was proposed to estimate instantaneous time-constants which serve as a basis for a real-time response compensation technique for multidimensional temperature measurement. In addition, by scanning a temperature field with the rod-type probe, the temperature distribution can be reconstructed in one-dimensional space and time. This quasi two-dimensional visualization can become a prototype of a "scanner" for fluid temperature fields.

Key Words: Sensor, Flow Measurements, Turbulent Flow, Heat Transfer, Flow Visualization

1. 緒 言

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⁽¹⁾。また、適用できる場に強い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性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は至っていない。このようなことから、流体の温度分布を簡便かつ安全に可視化する技術が求められている。

本研究では、取り扱いが容易で信頼性の高い「細線温度センサ⁽²⁾」を基礎とする流体温度場の可視化計測法を提案する。細線温度センサは、一般に、素線径13~100 μm の熱電対(細線熱電対)または線径0.6~10 μm の金属細線(測温抵抗体)の総称である。なかでも細線熱電対は手軽で安価であるとともに、静特性を校正する必要がなく適用範囲も広いことから様々な分野で普及している。しかし、流体温度が高速で変化する場合には、センサの出力が温度変化に追従できずに応答遅れ(利得の低下と位相のずれ)が生じる。このために、細線温度センサを利用して流体温度場を可視化する場合にはこの問題を解決する必要がある。

応答遅れの問題は、基本的には、センサの出力を適切に応答補償し、実質的な応答速度を向上させることで解決される。しかし、応答補償に必要な時定数はセンサ周りの流体の物性や速度に強く依存するために、時定数の値を正確に推定することは難しい。すなわち、応答補償における本質的な課題は時定数値の正確な推定にある。

* 原稿受付 2009年10月28日。

^{*1} 正員, 名古屋工業大学大学院機能工学専攻(〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)。^{*2} 正員, 名古屋工業大学大学院 [現: トヨタ紡織(株)]。^{*3} 名古屋工業大学大学院 [現: (株)デンソー]。^{*4} 正員, 名古屋工業大学大学院 [現: 三菱電機(株)]。

E-mail: m.tagawa@nitech.ac.jp

著者らは、長年この問題に取り組み、その解決策として合理的な時定数推定法とそれに基づく応答補償法を幾つか提案してきた⁽³⁾。以下では、これらを適応応答補償と総称する。適応応答補償は、具体的には、次の3つの要素から構成される。すなわち、1) 応答速度が異なる2つの細線熱電対を一对に組み合わせて一つのセンサを構成するプローブ技術(二線式熱電対)⁽⁴⁾、2) センサの出力(測定データ)から時定数を推定する同定理論、3) 応答遅れを補償するデジタル信号処理技術、である。適応応答補償を用いれば、センサの動特性を校正する必要はなく、その実質的な応答速度を10～100倍に高めることができる⁽²⁾。

本研究では、上記の適応応答補償法を細線熱電対群に適用して、空気流の温度場を可視化する方法を提案する。最初に、64個の二線式熱電対を二次元格子点(8×8)上に配置した平面プローブを製作し、各格子点の測定データに適応応答補償を適用することによって、二次元温度分布の時空間的挙動を正しく捕捉できることを示す。次いで、時定数推定法を進展させて、従来のようにデータ収集後の後処理で時定数を推定し応答補償するのではなく、ほぼ実時間で時定数の推定と応答補償を行う新しい方法を提案するとともに、従来法と比較してその有効性を検証する。最後に、24個の二線式熱電対を直線上に等間隔で配置した棒状プローブを製作し、これで高温気流をスキャンすることによって温度場を二次元で可視化する「流体温度場スキャナ」の原型を提示する。

2. 記号

d : 素線の直径 [m]

f : 周波数 [Hz]

T : 温度 [K]

t : 時間 [s]

τ : 時定数 [s] [$\equiv (2\pi f_c)^{-1}$, f_c : 遮断周波数]

添字

1, 2: 素線径が異なる2つの熱電対

g : センサ周囲の流体

3. 細線熱電対の応答補償

細線熱電対の応答特性は一般に次の1次遅れ系で近似される⁽⁵⁾。

$$T_g = T + \tau \frac{dT}{dt} \quad (1)$$

ここで、 T_g は測定対象となる流体温度、 T は熱電対の出力(測定値)、 τ は時定数である。時定数 τ の値を知れば、式(1)より熱電対の出力 T から流体温度 T_g を求めることができる。

著者らは、応答速度(ここでは細線熱電対の素線径)が異なる2つの熱電対を一对にしてプローブを構成する「二線式熱電対」を用いて、測定される時系列データから各センサの時定数を推定する4つの方法⁽³⁾を見だし、その有効性を様々な条件下で検証してきた。本研究では、その中で時定数推定法の基本である $e_{\min}$ 法⁽⁴⁾を二線式熱電対に適用して、応答遅れを補償する。二線式熱電対の応答特性は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} T_{g1} &= T_1 + \tau_1 \frac{dT_1}{dt} \\ T_{g2} &= T_2 + \tau_2 \frac{dT_2}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

2つの熱電対が同一の流体温度 T_g を感知している理想的な状況($T_{g1} = T_{g2} = T_g$)であっても、式(2)の2つの方程式には3つの未知量 T_g , τ_1 , τ_2 が存在するために、このままでは時定数 τ_1 , τ_2 を決定できない。そこで、式(2)左辺の T_{g1} と T_{g2} の差の二乗平均値

$$e = \overline{(T_{g2} - T_{g1})^2} \quad (3)$$

が最小となるように、式(3)に最小二乗法を適用すれば時定数 τ_1 , τ_2 を決定できる[$\overline{(\quad)}$ は時間平均を表す]。したがって、二乗平均値 e を最小化する τ_1 , τ_2 は次の条件で得られる。

$$\frac{\partial e}{\partial \tau_1} = 0, \quad \frac{\partial e}{\partial \tau_2} = 0 \quad (4)$$

その結果は次式で与えられる⁽⁴⁾。

$$\left. \begin{aligned} \tau_1 &= \frac{\overline{G_2^2 \cdot G_1 \Delta T_{21}} - \overline{G_1 G_2} \cdot \overline{G_2 \Delta T_{21}}}{\overline{G_1^2 \cdot G_2^2} - (\overline{G_1 G_2})^2} \\ \tau_2 &= \frac{\overline{G_1 G_2} \cdot \overline{G_1 \Delta T_{21}} - \overline{G_1^2} \cdot \overline{G_2 \Delta T_{21}}}{\overline{G_1^2 \cdot G_2^2} - (\overline{G_1 G_2})^2} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ここで、 G , ΔT_{21} はそれぞれ温度の時間微分 $G = dT/dt$ と温度差 $\Delta T_{21} = T_2 - T_1$ を表す。

4. 二次元細線熱電対群による変動温度場の計測

4.1 二次元細線熱電対群プローブ 使用した二次元細線熱電対群プローブの写真とその構成を図1に示す。図1(b)に示すように、各測定点では素線径 $d_1 = 25 \mu\text{m}$ と $d_2 = 51 \mu\text{m}$ の2つのK熱電対で二線式熱電対が構成される。二線式熱電対を構成する2つの熱電対は互いに干渉しない範囲で可能な限り接近するように約0.5 mmの間隔で配置される(線間隔の影響については付録を参照)。二線式熱電対は互いに20 mmの間隔で64($= 8 \times 8$)の格子点上に設置されている。合計128個のK熱電対の熱起電力は計測アンプで約800倍に増幅されて、8台(16 ch/台)の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。以下では、添字1, 2はそれぞれ素線径25 μm , 51 μm のK熱電対を表す。

Fig. 1 Two-dimensional probe for measuring a fluctuating temperature field (each grid point consists of a two-thermocouple probe)

4.2 円柱により攪乱された円形噴流温度場の可視化計測 実験装置の構成を図2に示す。測定対象は、直径55 mmの円形ノズルから噴出する高温空気流（流速5 m/s、温度52 °Cでほぼ一様）を人為的に攪乱することで発生する変動温度場である。周囲温度は22 °Cである。攪乱は、風洞とプローブとの間に置かれた直径30 mmの円柱棒を0.2 s程度の周期で揺動させることで導入される。測定プローブは、測定面が噴流軸に垂直になるように風洞出口から70 mm下流に設置した。本実験では、データのサンプリング周波数は1 kHz、データ長は各熱電対あたり5120点である。

最初に、本実験における応答補償の妥当性を検証する。図3にプローブ格子点 $(i, j) = (4, 5)$ [図1(b)参照]で得られた温度変動波形を示す。図3の上段は応答補償前の変動波形 T_1, T_2 であり、下段は式(2)による応答補償後の温度波形 T_{g1}, T_{g2} である。応答補償では、式(5)で推定された時定数 $\tau_1 = 19.5$ ms, $\tau_2 = 51.3$ msを式(2)に適用した。図3から分かるように、応答補

Fig. 2 Wind tunnel for providing an artificially disturbed hot-air jet to test a two-dimensional temperature probe

償によって変動温度の高周波数成分が正しく再生されて、2つの熱電対の波形は互いによく一致する。他の測定点についても、流速等の差異に応じてそれぞれの点で時定数が適切に推定される。その結果、適応応答補償が図3と同様に有効であることを確認した。

次に、円柱棒によって攪乱された温度場を空間二次元で可視化し図4に示す。ここでは、応答補償の有効性をより明確に提示するために、応答速度の低い素線径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した。図4(a), (b)はそれぞれ応答補償前と補償後の温度分布の0.05 sごとの時間変化を等高線で表示している。図4(a)では、熱電対の応答遅れのために温度場の攪乱がほとんど捕捉されずに、プローブの中心付近にピークをもつ同心円状の温度分布（円形噴流の平均温度分布を反映）が大きく崩れることなく保持されている。一方、応答補償後の温度分布を示す図4(b)では、円柱棒による攪乱に応答してプローブ中心付近の温度場は顕著に変化している。とくに、 $t = 0.10$ sの等高線から分かるように、円柱棒が高温噴流の中心を横切るときに、周囲の低温流体が円柱棒の移動に伴って噴流中心に巻き込まれる様子が明確に捕捉されている。

4.3 移動する高温空気噴流の可視化計測 次に、移動する高温空気噴流の軌道を捉えることを目的として、ヘアドライヤーから噴出する高温空気流を二次元細線熱電対群プローブ上ですばやく円運動させて、その温度場を測定した。使用したヘアドライヤーの高温空気流の最高温度は約70 °C、出口流速はおおよそ6 m/sである。

図5に素線径51 μmの熱電対群により測定された温度場の時間変化を示す。図5(a), (b)はそれぞれ応答補償前と補償後の結果であり、温度場の等高線分布が0.05 sごとに変化する様子を表している。図5(a)の応

Fig. 3 Response compensation of thermocouple measurements sampled at $(i, j) = (4, 5)$

答補償前の温度分布では、熱電対の応答遅れ（利得の低下）に起因して最高温度が実際より 30°C ほど低く測定されているために、噴流の温度分布とは大きく異なる緩やかな分布形状となる。一方、図 5(b) に示す応答補償後の温度分布では、応答補償によって噴流の中心温度（約 70°C ）が正しく再現されるとともに高温領域が鮮明になって、噴流が円弧上を移動していく様子が的確に捕捉されている。

注目されることは、図 5 の時刻 $t = 0.05\text{ s}$ に見られるように、応答補償の前後で温度分布のピークの位置に顕著なずれが生じていることである。すなわち、応答補償前の図 5(a) ではこのピークが $x = 8\text{ cm}$, $y = 10\text{ cm}$ に位置するのに対して、応答補償後の図 5(b) では $x = 10\text{ cm}$, $y = 8\text{ cm}$ にある。これは噴流が高速で移動することにより、熱電対の応答における時間的な遅れが空間的な位置のずれとして現れたことを示す。このように、応答補償によって噴流の最高温度が正しく再現されると同時に温度分布の空間的な位相遅れが補償される結果として、噴流の位置が的確に捕捉されることが分かる。

5. 瞬時時定数の推定

二次元細線熱電対群プローブのように多数の二線式熱電対を使用する場合には、式 (5) の時間平均を熱電対の配置に対応する空間平均に置換できる。この操作によって、時定数の推定と応答補償を測定終了後の後処理で行う従来の方法とは異なり、式 (5) 中の時間微分 G の計算に必要な先行時間（本実験では時系列データ 10 点に対応する 10 ms である。この計算には多項式適合法⁽⁶⁾を用いる）が経過した後は、ほぼ実時間*で

*最近のパーソナルコンピュータの性能であれば、式 (6) の計算および応答補償の信号処理に要する時間はほとんど無視できるので、理論的には先行時間の半分（本実験では 5 ms ）の遅れで応答補償できる。

Fig. 4 Two-dimensional visualization of a fluctuating temperature field measured with $51\text{ }\mu\text{m}$ thermocouples (contours in Celsius scale)

の応答補償が可能となる。

以上から、瞬間的な時定数 $\tau_1(t)$, $\tau_2(t)$ は次式で推定される。本研究ではこのようにして推定される時定数

Fig. 5 Spatiotemporal behavior of the temperature field of a precessing hot-air jet ($d_2 = 51 \mu\text{m}$, contours in Celsius scale)

を瞬時時定数とよぶ。

$$\left. \begin{aligned} \tau_1(t) &= \frac{\sum G_2^2 \sum G_1 \Delta T_{21} - \sum G_1 G_2 \sum G_2 \Delta T_{21}}{\sum G_1^2 \sum G_2^2 - (\sum G_1 G_2)^2} \\ \tau_2(t) &= \frac{\sum G_1 G_2 \sum G_1 \Delta T_{21} - \sum G_1^2 \sum G_2 \Delta T_{21}}{\sum G_1^2 \sum G_2^2 - (\sum G_1 G_2)^2} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

ここで、 $\sum$ は $\sum_{0 \leq (i,j) \leq 7}$ を表す。式 (6) から分かるように、瞬時時定数の推定には、二線式熱電対群の各点 (i, j) が一様に寄与するのではなく、二線式熱電対の温度差 ΔT_{21} が大きく変化する点の寄与が大きくなる。すなわち、温度変動が存在する点のみが時定数の推定に関与する。なお、温度変動が検出されない（常

Fig. 6 Signal traces of instantaneous time-constants and temperatures compensated with those values

Fig. 7 Comparison of compensated temperature field between time-averaged time-constants and instantaneous ones (contours in Celsius scale)

に $\Delta T_{21} = 0$ となる) 格子点では、測定温度の時間微分 $G = dT/dt$ も零となるので、時定数の値にかかわらず式 (1) から常に $T_g = T$ が成立する。

以下では、瞬時時定数による応答補償の効果を 4.2 節で測定された実験データを用いて検証する。

図 6 に、瞬時時定数の時間変化（上段）と瞬時時定数を用いた格子点 $(i, j) = (4, 5)$ における応答補償後の温度波形（下段）を示す。図 6 の上段から、瞬時時定

数はかなり大きく変動することがわかる。この変動波形を下段に示す応答補償後の温度波形と対比すれば、低温になる時間帯で時定数が増大する傾向が観察される。この相関は、図2に示すように、円柱が高温噴流を周期的に横切ることによって温度場を攪乱していることに起因すると考えられる。すなわち、温度が低下する時間帯では、プローブの熱電対は円柱によって高温噴流から遮られる状態にあり、熱電対周りの流速が低下して時定数が増大すると推察できる。なお、図6に示す瞬時時定数を時間平均した値は、素線径 $25\ \mu\text{m}$, $51\ \mu\text{m}$ の熱電対についてそれぞれ $17.0\ \text{ms}$, $48.2\ \text{ms}$ であり、式(5)による推定値 $19.5\ \text{ms}$, $51.3\ \text{ms}$ とほぼ合致する。

次に、素線径 $51\ \mu\text{m}$ の二次元細線熱電対群で測定された温度分布を対象として、式(5)の時間平均時定数および式(6)の瞬時時定数で応答補償した。結果をそれぞれ図7(a), (b)に示す。図7から、時間平均時定数と瞬時時定数を用いて応答補償した温度分布の間にそれほど顕著な差は見られず、いずれの手法でも温度場の挙動を再現できることがわかる。したがって、後処理でよければ時間平均時定数で、測定領域内での空間平均的な流速の変化に対応できるように実時間で処理する必要があるれば瞬時時定数でそれぞれ応答補償すればよい。

6. 一次元細線熱電対群による温度場の可視化

6.1 一次元細線熱電対群プローブ ここでは、上述の結果を基礎として、一次元細線熱電対群プローブによる温度場の可視化計測法を提案する。本プローブでは、素線径 $25\ \mu\text{m}$ と $51\ \mu\text{m}$ のK熱電対で構成される合計24個の二線式熱電対を、感温部の長さが $115\ \text{mm}$ となるように $5\ \text{mm}$ 間隔で黄銅棒に配列した。本プローブで高温気流をスキャンすることにより、温度分布を空間一次元と時間の二次元で可視化できることから、ここで提案する手法を以下では「流体温度場スキャナ」と呼ぶ。

6.2 一次元プローブによる温度場の可視化計測 図2の温風風洞で形成される円形噴流において、噴流軸と直交する面内で上記の一次元プローブを一定速度で移動させることにより温度場をスキャンする。本測定のサンプリング周波数は $1\ \text{kHz}$ 、データ長は各センサあたり 1024 点である。

図8に素線径 $51\ \mu\text{m}$ の熱電対群で測定された応答補償前後の結果を示す。図8の上段と下段はそれぞれ応答補償前と補償後の温度分布を表す。図の縦軸は24個の二線式熱電対の位置であり、横軸は時間である。これによって測定対象の温度分布を空間一次元と時間の二次元で可視化できる。

4.2節で述べたように、本実験で使用した高温空気噴流の温度場は 52°C でほぼ一様である。しかし、図

Fig. 8 Quasi two-dimensional visualization by a one-dimensional probe (contours in Celsius scale)

8上図に示されているように、応答補償前の最高温度は 40°C 程度に留まり、噴流温度の 52°C に到達しない。さらに、プローブが噴流を通過した後も測定値は緩やかに低下し続けて、温度分布はすい星のように尾を引いている。これらの現象は熱電対の応答遅れが温度分布に反映した結果である。一方、図8下図の応答補償後の温度分布では、最高温度が 52°C に到達するとともに、温度分布は噴流形状をほぼ正しく表している。また、応答補償前に見られるすい星の尾に似た温度分布も応答補償によってかなりの部分が消失する。ただし、若干は残存する。この残存は、プローブが噴流を通過した直後に熱電対周りの流速が急減して、時定数が急増するために発生すると考えられる。すなわち、式(5)で推定された平均時定数（一定値）ではこのような時定数の急増には十分には対応できないために、応答補償量が不足して発生すると推測される。実際に、噴流通過直後の時間帯では、本来一致すべき $25\ \mu\text{m}$ 熱電対と $51\ \mu\text{m}$ 熱電対の応答補償後の温度波形には若干のずれが生じることを確認している。このような問題を除けば、本研究で述べたように一次元プローブの出力を適応応答補償することにより、原理的には、測定対象場の流速やスキャンの速さによらず同一の温度分布が再現される。

7. 結 言

本研究では、多数の二線式熱電対を一次元に配列した棒状プローブと二次元に配置した平面プローブをそれぞれ製作し、それらで取得された測定データに適応応答補償法を適用することにより、空気流の温度場を可視化計測する方法を提案するとともに、その有効性を検証した。64個の二線式熱電対を二次元格子点 (8×8) 上に配置した平面プローブでは、時空間的に変化する高温空気噴流の挙動を正しく捕捉できることを

Fig. 9 Effects of wire separation, s , between $25\ \mu\text{m}$ and $51\ \mu\text{m}$ thermocouples on uncompensated and compensated temperatures

実証した。また、多数の熱電対を同時に使用する場合には、時定数推定理論における時間平均操作を空間平均に置換できることを見だして、時定数の推定と応答補償を従来のような後処理ではなく、データ収集中にほぼ実時間で実行する方法を提示した。さらに、24個の二線式熱電対を直線上に等間隔で配列した棒状プローブで高温気流をスキャンすることにより温度場を可視化する方法を開発し、その有効性を検証した。この方法は、棒状プローブの空間的な位置を1~2台のCCDカメラで画像計測すれば測定対象の2~3次元空間に温度分布を重ねて提示できる「流体温度場スキャナ」の原型となる。

謝 辞

本研究の一部は科学研究費補助金 [基盤研究, No. 19560202, 22560194] による。

[付録 線間隔が応答補償に及ぼす影響]

素線径 $25\ \mu\text{m}$ と $51\ \mu\text{m}$ で構成される二線式熱電対の線間隔が時定数の推定と応答補償に及ぼす影響を調べる。線間隔 s が異なる3組の二線式熱電対プローブ上 ($s = 0.5, 1.0, 1.5\ \text{mm}$) を4-3節の高温空気噴流が同時にすばやく横切った場合の温度変動波形の測定結果を図9に示す。図9の上段は応答補償前の変動波形であるが、3つの $51\ \mu\text{m}$ の熱電対の波形に線間隔による違いはほとんど認められない。このとき、二線式プローブとして時定数を推定した結果を表1に示す。間隔 s が $0.5\ \text{mm}$, $1.0\ \text{mm}$ の場合には、推定される時定数に差異はほとんど現れないが、間隔を $1.5\ \text{mm}$ まで広げると時定数は小さく推定される。このことは、補償されるべき本来の温度変動信号だけでなくノイズおよび

Table 1 Effects of wire separation on estimation of time constants

Wire separation s [mm]	Time constant [ms]	
	τ_1 ($d = 25\ \mu\text{m}$)	τ_2 ($d = 51\ \mu\text{m}$)
0.5	21.1	48.9
1.0	21.4	49.0
1.5	19.4	47.2

無相関の高周波数成分が応答補償によって同時に増幅されるため、空間分解能が低下すると、式(5)による時定数の推定値が真値より小さくなるためである⁽⁷⁾。表1の時定数で応答補償した温度波形を図9の下段に示す。間隔が $1.0\ \text{mm}$ 以下の場合には互いによく一致するが、間隔が $1.5\ \text{mm}$ になると補償量が不足するため温度のピークが小さく推定される。

以上により、本実験で使用した線間隔 $0.5\ \text{mm}$ のプローブが十分な空間分解能を有することが示された。

文 献

- (1) Taylor, A. M. K. P. (ed.), *Instrumentation for Flows with Combustion*, (1993), Academic Press.
- (2) Tagawa, M., Fine-Wire Temperature Sensors for Measuring Temperature Fluctuations of a Fluid (in Japanese), *Kensa Gijyutsu*, Vol. 14, No. 1 (2009), pp. 1-10.
- (3) Kato, K. and Tagawa, M., Numerical Evaluation of Response Compensation Techniques for Fine-Wire Temperature Sensors (in Japanese), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 73, No. 728 (2007), pp. 1059-1067.
- (4) Tagawa, M. and Ohta, Y., Two-Thermocouple Probe for Fluctuating Temperature Measurement in Combustion-Rational Estimation of Mean and Fluctuating Time Constants, *Combustion and Flame*, Vol. 109, No. 4 (1997), pp. 549-560.
- (5) Kato, K., Tagawa, M. and Kaifuku, K., Fluctuating Temperature Measurement by a Fine-Wire Thermocouple Probe: Influences of Physical Properties and Insulation Coating on the Frequency Response, *Measurement Science and Technology*, Vol. 18 (2007), pp. 779-789.
- (6) Savitzky, A. and Golay, M. J. E., Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures, *Analytical Chemistry*, Vol. 36, No. 8 (1964), pp. 1627-1639.
- (7) Tagawa, M., Shimoji, T. and Ohta, Y., A Two-Thermocouple Probe Technique for Estimating Thermocouple Time Constants in Flows with Combustion: In Situ Parameter Identification of a First-Order Lag System, *Review of Scientific Instruments*, Vol. 69, No. 9 (1998), pp. 3370-3378.