細い移動物体の非接触測温法[†]

横 田 達 也*・花 泉 弘**・稲 村 実**・豊 田 弘 道**

Non-Contact Type Temperature Measurement of Running Thin Lines

Tatsuya YOKOTA*, Hiroshi HANAIZUMI**, Minoru INAMURA** and Hiromichi TOYOTA**

A new method of non-contact type temperature measurement of the running thin lines (e. g. yarns, fibers, and wires) is developed.

In this method, Scanning allows line vibration.

The measuring error caused by the emissivity which is less than unity doesn't occur by use of Zero-method.

The high temperature resolution and the narrow field of view of the radiometer increase the accuracy of measurement. The radiometer isn't required to have high stability.

A temperature controllable radiator, which is made with the same material of the running thin line, is settled at the back of the line. In a scan across the line, one pulse is produced as a radiometer output which level is proportional to the temperature difference between a line and a background radiator. Temperature of the background radiator should be controlled to fade the pulse. When the pulse disappears, temperature of the line is equal to that of the background radiator.

In the experiments, the radiometer whose spectral band is 8~14 [μm] has 0.01 [K] temperature resolution and 40 [mrad] angular field of view, and is settled at a distance of 1 [m] from the 1.06 [mm ϕ] wire. For a high emissive object ($\epsilon=0.955$), the measuring error is ± 0.2 [K]. For a low emissive object ($\epsilon=0.204$), the measuring error is ± 1.0 [K] in using a domy radiator which makes environmental temperature uniform.

1. ま え が き

工業の製造工程においては、製品の品質管理上細い移動物体の温度測定が非常に重要な課題となる。たと

えば、

- i) テترون糸やナイロン糸などのプラスチック糸
- ii) 熱間圧延中の細い条鋼
- iii) 冷間ダイス押出加工中の各種金属線

などの走行中の測温である。

これらについては、今までに温度測定が試みられ、接触式と非接触式の温度計がいくつか製作されているが、それぞれ実用上の大きな問題点を含んでいる。

接触式測温法の例を Fig. 1 (a), (b) に示す。この形式の温度計は、熱電対を利用して細線の温度を測定するが、熱伝導誤差を軽減するために、その表面温度を細線の温度に追従させるような熱補償を行っている。これらはつぎのような問題点をもつ。

- i) 測温対象に傷を付け、製品品質を低下させる。
- ii) 走行対象との間に摩擦熱の発生がある。
- iii) 接触による熱伝導誤差を完全には除去できない。

特に i) は実用上の致命的な欠点である。

非接触式測温法としては、Fig. 2 に示すように、熱電堆を用いて測温を行う機器が市販されているが、

- i) 糸揺れ防止のための導入リングが必要である。
- ii) 細線の放射率が1でないため、温度が実際よりも低い値に測定される。
- iii) 測温誤差が、数 K~10 K 程度も存在する。

という問題点がある。

さらに、放射温度計を利用した場合には、

- i) 測温精度を高めるには狭視野の放射温度計が必要であるが、揺動による測温対象の視野からの逸脱を

Fig. 1 Samples of the contact type thermometer for a running thin line

[†] 第19回計測自動制御学会学術講演会で発表 (昭 55・8)

* 国立公害研究所 茨城県筑波郡谷田部町小野川 16-2

** 東京大学工学部 東京都文京区本郷 7-3-1

* The National Institute for Environmental Studies, Tsukuba-gun, Ibaraki

** Faculty of Engineering, University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo

(Received July 24, 1981)

(Revised October 29, 1981)

防ぐには、狭視野化には限界がある。

ii) 安定な測定を行うためには、放射温度計の温度分解能を単純に小さくすることができない。

iii) やはり細線の放射率の影響を免れない。という問題が生じ、測温精度の向上には限界がある。

そこで、本研究においては、走査 (Scanning) と零位法 (Zero-method) とを利用した新しい非接触式測温法を提案する。本測定法では、放射温度計を温度差の検出器として用いており、しかも走査を行うことによって信号が交流に変調されるため、放射温度計の安定度は問題とならない。したがって狭視野高温度分解能の放射計を用いることにより、高精度の測温システムを実現することができる。これにより細線の温度管理が容易になり、製品品質の向上が期待される。

2. 基本原理

本測定法を用いたシステムの基本構成を Fig. 3 に示す。

走行する測温対象 (以下「細線」と呼ぶ) の下方に、

Fig. 3 Scheme of the measuring system

Fig. 4 (a) Radiometer outputs with respect to the temperature relation between a line and a base
(b) Their derivatives

Fig. 2 Sample of the non-contact type thermometer for a running thin line

Fig. 5 Example of the radiometer output

それと同じ材質の温度制御可能な面熱源 (以下「ベース」と呼ぶ) を置く。ベースの温度分布・実効放射率は一様とし、その形状は平面、彎曲面など、場合に応じて適当なものを用いることにする。熱電対によってベースの温度モニターを行う。

細線およびベースを回転鏡などによって走査し、放射温度計による出力波形を観測する。

放射計の出力 V_{out} には、回転鏡が 1 回転するたびに、Fig. 4(a) に示すように、細線の温度 T とベースの温度 T_b との大小関係に応じた出力パターンが得られる。 $T \approx T_b$ のときに現れる出力中のピークが小さくなるようにベースの温度を制御すれば、ピークが消滅した時のベースの温度 (モニター用熱電対による測定値) が細線の温度となる。

この場合、放射計は対象の絶対温度の測定器としてではなく、細線とベースとの温度差 (ピーク) の検出器として用いているので、温度差の検出感度を高めるために V_{out} の時間微分波形 (Fig. 4(b)) を用いて、その二つのピークを小さくするようにベースの温度制御を行ってもよい。

細線の温度を固定し、ベースの温度を上昇させていったときに、放射計の出力波形が変化するように示す Fig. 5 に示す。

3. 測温理論

ここで使用する放射計は円形の視野をもち、その中で感度は一様であるものとする。また、放射計の視野内において、細線の占める面積が最大となる時点 (Fig. 5 におけるピークの先端にあたる時点) での面積占有率を、面積比 S_R で表わし、Fig. 6 に示すように、

$$S_R = A / (A + B) \quad (3-1)$$

と定義する。

Fig. 6 Definition of the area covering ratio 'SR'

放射計の視野内に細線が含まれないときの放射計出力 W_f は、ベース自身からの放射と、周囲環境からの放射がベースに反射して入射するものと、混合した結果であると考えられるので、次式のように表わされる。

$$W_f = \varepsilon \cdot W_b + (1 - \varepsilon) \cdot W_c \quad (3-2)$$

ここで ε は細線およびベースの放射率(注1), W_b , W_c はそれぞれベース温度 T_b , ベースから見た周囲環境温度 T_c に対応する黒体放射を表わす。

また, 走査中放射計の視野内に細線が入り, その占有面積が最大となる時点での出力 W_p は,

$$W_p = S_R \{ \varepsilon \cdot W_o + (1 - \varepsilon) W_c' \} + (1 - S_R) W_f \quad (3-3)$$

となる。ここで, W_o , W_c' は, それぞれ細線温度 T_o , 細線から見た周囲環境温度 T_c' に対応する黒体放射を表わす(注2)。

さて, 放射計の出力にピークが現れていると, その大きさ ΔW は, 次式のように表わされる。

$$\Delta W = W_p - W_f \quad (3-4)$$

これに(3-2), (3-3)式を代入して整理すると,

$$\Delta W = S_R \cdot \varepsilon \cdot (W_o - W_b) - S_R \cdot (1 - \varepsilon) \cdot (W_c - W_c') \quad (3-5)$$

を得る。

この式から, 周囲環境を人為的に制御して $W_o = W_c'$ とすることができれば,

$$\Delta W = S_R \cdot \varepsilon \cdot (W_o - W_b) \quad (3-6)$$

となることがわかる。

(3-6)式で, ピークが消滅した時点 ($\Delta W \rightarrow 0$) において, $W_o = W_b$; すなわち $T_o = T_b$ となり, そのときのベースの温度から細線の温度を知ることができる。

$\Delta W \rightarrow 0$ においては, ε や S_R の値にかかわらずに $W_o = W_b$ となるので, 本測定法が原理的に放射率や細線の縦揺れ(放射計までの距離が変わるような揺れで, S_R が変化する)の影響を受けないことがわかる。

なお, S_R や ε は, それぞれの値が大きい(1に近い)ほど測定感度が高くなる。そのため, 狭視野の放射計を用いると測定精度が向上する。また, 放射率 ε が1に近い場合には, (3-5)式において $W_c \approx W_c'$ であってもその影響が軽減されるという利点もある。

$W_c \approx W_c'$ かつ $\varepsilon < 1$ の場合には, $\Delta W = 0$ であっても

$$W_o - W_b = \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \cdot (W_c - W_c') \approx 0 \quad (3-7)$$

となるため $T_o \approx T_b$ となってしまう。黒体温度とその放射エネルギーとの関係に $W = \alpha T^n$ の形を仮定す

ると, (3-7)式を変形して

$$\Delta T_{ob} \equiv \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \cdot \frac{W_c}{W_b} \cdot \frac{T_b}{T_c} \cdot \Delta T_{cc'} \quad (3-8)$$

を得る(注3)。ここで, $\Delta T_{ob} = T_o - T_b$, $\Delta T_{cc'} = T_c - T_c'$ である。(3-8)式によると, 周囲環境に温度分布が存在する場合の測温誤差は, 放射率に大きく左右され, $\varepsilon < 0.5$ の場合にはその影響が拡大されることがわかる。

以上のように, 細線の放射率が小さい場合には, 周囲環境の温度分布を一樣にすることが, 測温誤差を小さくするうえで大きな意味をもつ。

4. 実験および考察

4.1 実験方法

細線の放射率が高い場合と低い場合について, 本測温法のシミュレーションを行った。

実験では, 基本原理で示した走査(ミラースキャン)の代りに, 放射計とベースを固定して細線のほうを移動させた。その際, 細線は室温中に放置し, ベースの温度を変化させて, ピークが消滅したときのベースの温度と細線の温度とを比較した。

細線には直径 1.06 mm ϕ の CA 熱電対を用いる。また, この熱電対出力と温度との関係は, あらかじめ温浴を用いて求めておく。これを室温中に長時間放置して熱平衡状態にする。このような安定な状態のもとで, 熱電対出力電圧から求まる温度を細線の真の温度とする。細線の放射率は, 塗料を塗ることによって一定値に制御する。同じ塗料を厚さ 5 mm の銅板に塗布し, これをベースとする。実験に先立って, ベースの温度を細線の温度よりも低い値に設定しておき, 実験開始と同時に電熱器を用いて徐々にこれの加熱を始める。このときベースの温度分布を一樣にする目的で, 同じ銅板 2 枚をベースの下に重ねて敷いておく。また, ベースの温度は, あらかじめ厳密に校正された直径 25 μm ϕ の 3 対直列 CA 熱電対をベースの表面に貼布して測定する。

実験に使用した放射計は, 常温近傍 ($-60 \sim +140$ $^{\circ}\text{C}$) の測温を目的とした高感度熱赤外放射計で, 波長 8~14 μm に感度を有し, 検出器には HgCdTe を用いている。また, 測定視野角は 40 mrad であり, 温度分解能は 0.01 K よりもよい。なお実験は, 放射計と細線との距離 h を変えることにより, 細線の面積占有率 S_R を変化させて行った。

(注1) 細線とベースの材質を同じものにする事で, 両者の実効放射率を共に ε と考えることができる。

(注2) 細線とベースの形状の違いから, 周囲環境に温度分布が存在すると, 一般に $W_c(T_c) \approx W_c'(T_c')$ となる。

(注3) (3-7)式より(3-8)式を得る際に,

$$T \gg \Delta T; \left(1 + \frac{\Delta T}{T}\right)^n \approx 1 + \frac{n \cdot \Delta T}{T}$$

を用いた。

Fig. 7 Radiometer output for a high emissive object ($\epsilon=0.955$)

Table 1 Experimental results ($\epsilon=0.955$)

No.	h[mm]	S_R	Base Temp. A [°C]	Line Temp. A' [°C]	Line Temp. [°C]
1	493	0.0888	19.55	19.72	19.6
2	700	0.0610	19.80	20.09	20.0
3	804	0.0527	19.91	20.15	20.1
4	920	0.0458	20.08	20.35	20.2
5	1017	0.0413	20.09	20.39	20.3

4.2 放射率が高い場合

細線とベースとに塗布する塗料として、黒化塗料 ($\epsilon=0.955$) を用いて実験を行った。このときの記録計出力の一例を Fig. 7 に示す。この図において点 A, A' で示すように、ピークが消滅したと思われる範囲を肉眼で判断し、時点 A, A' におけるベースの温度と細線の真の温度とを比較したものが、Table 1 である。

これによると、直径 1.06 mmφ の細線を 1 m の距離から ± 0.2 K の精度で測温可能であることがわかる。

また、細線の直径は、放射計の視野直径の 1/15~1/30 にあたり、放射計視野よりもはるかに小さな径の細線に対する測温を行えている。ここで、測温可能な細線の最小径は、視野の大きさ、放射計の温度分解能、許容測温誤差に依存する。たとえば、この実験結果によると、視野直径 10 mm、温度分解能 0.01 K、許容測温誤差 ± 2 K の場合には、直径 30 μ m の細線まで測温可能であることがわかる。

本実験に使用した放射計は、フードの温度制御を行っており、その部分の温度は室温に比べてかなり高い。また天井灯などの影響もあり、周囲環境には相当の温度分布が存在していたと考えられる。しかし実験においては、 $W_e=W_{e'}$ とする対策を特に施してはいない。それにもかかわらず ± 0.2 K もの精度で測温が可能であったのは、(3-8)式において、この場合 $T_b \approx T_e$, $W_b \approx W_e$ であるために、 $\Delta T_{eb}=0.0471 \Delta T_{ee'}$ となり、周囲環境の温度分布の影響が、温度差にして

Fig. 8 Radiometer output (derivative) for a low emissive object ($\epsilon=0.204$)

Table 2 Experimental results ($\epsilon=0.204$)

No.	Base Temp. B [°C]	Line Temp. B' [°C]	Line Temp. [°C]
1	23.30	23.71	24.1
2	21.81	22.47	22.8
3*	20.57	20.99	23.4

* without a domy radiator (uniform temperature)

百分の一のオーダーにまで軽減されたためである。したがって $W_e=W_{e'}$ とする対策を施し、4章4節で述べるような同期加算などの信号処理を行えば、より高い精度で測温を行うことができるものと考えられる。

なお、実験では対象の温度が室温に等しい状態で測定を行ったが、本測定法では原理的に細線、ベース、周囲環境の間の相対的な温度差が問題となるので、必要な温度範囲において出力が飽和せずに十分な温度分解能が得られる放射計を使用すれば、本測定法の適用温度範囲は限定されない。

4.3 放射率が低い場合

細線とベースには、放射率 0.204 の銀ラッカーを塗布して実験を行った。

この場合、(3-5)式を W_b で微分すると、

$$\left| \frac{\partial(\Delta W)}{\partial W_b} \right| = S_R \cdot \epsilon \quad (4-1)$$

となり、放射率 ϵ が低いために、ベースの温度変化に対するピークの大きさの変化の割合が小さくなって、ピークの消滅の有無を検出し難くなる。そこで、

Fig. 8 に示すように、放射計出力の時間微分波形を用いて検出を行った。

この場合放射率が低いため $\Delta T_{eb}=3.90 \Delta T_{ee'}$ となる。すなわち周囲環境の温度差は、約 4 倍に拡大されて測温誤差となる。また、実際に製造工程の現場や実験室中には、周囲環境にかなりの温度分布があると考えられる。そこで細線およびベースを取り囲むようにドーム状の放射体を置き、これを室温中に放置して周囲環境温度の一様化を行った。放射計は、このドーム状

放射体に設けた窓をとおして対象の温度を測定する。

Fig. 8 に示す時点 **B, B'** において、細線の温度とベースの温度とを比較した結果が **Table 2** である。

ここで、No. 3 の実験は、比較のためにドーム状の放射体を取り除いて行ったものである。

この結果によると、ドーム状の放射体を使用した場合には測温誤差がより小さくなっており、周囲環境温度の一樣化の効果が大きいことがわかる。

また、この実験では、周囲環境温度の一樣化を図ることによって、測温誤差は約 1°C になるが、これらはすべて測定値 (**B, B'** のベース温度) が細線の真の温度よりも低い値に偏って生じた誤差である。この偏りの原因は、ベースの加熱の影響でドーム状放射体上に温度分布が生じ、 $W_0 > W_0'$ となったことによるものと考えられる。

4.4 本測定法の応用

実験では、肉眼でピークの有無を判断したが、放射計出力とは別にピークのあるべき位置を知り、その信号と放射計出力との相関をとることができれば、雑音に埋もれていたピークの検出が可能になり、結果として測定精度の向上が期待できる。この場合、可視波長域において細線を背景から際立たせることは容易に行えるので、放射計の走査に同期してこの信号を取り込めば、これを参照信号として利用できる。

また、本測温法では、ベースの温度制御系の応答速度に限界があるため、細線の温度変化が激しい場合には追従が困難になる。しかし、温度管理を目的とするならば、あらかじめ一定温度に保ったベースを複数個用意しておくことによって、細線の温度が所定の温度範囲内に納まっているか、またはどの温度範囲にあるか、という情報は迅速に得ることができる。この場

合、**Fig. 9** のように走査鏡を工夫して2次元走査を行えば、1台の放射計でシステムを構成することができる。

5. む す び

以上、細い移動物体の非接触測温法について、原理の説明および実験結果の考察を行ってきたが、つぎに本測定法の特長を挙げる。

- 1) 非接触式であるから製品を傷つけない。
- 2) 測温対象の温度範囲を問わない。
- 3) 走査を用いることにより、細線の横揺れを許容することができる。
- 4) 零位法により、細線の縦揺れによる面積比の変動の影響を受けない。
- 5) 細線と同じ材質のベースを用いることで、放射率によらない測定ができる。
- 6) 放射計は、単に細線とベースとの温度差の検出器として用いられるため、狭視野・高感度の放射計であれば高精度の測温が可能であり、その安定性は問題にならない。
- 7) 放射率が低い対象についても、周囲環境温度を制御して一樣にすることにより、充分な精度で測温することが可能である。
- 8) 零位法すなわち温度追従方式であるため、その追従速度に限界はあるが、温度管理を目的としたシステムには本測定法の実用性は高い。

このように、本測温法は従来の測温法を飛躍的に改善したものであり、特に温度管理システムとして用いる場合には、製品品質の向上に大きく貢献することが期待される。

参 考 文 献

- 1) 東レ：糸表面温度計、(カタログ)
- 2) 東京精工(株)：セイコー糸温度測定用接触式温度計、(カタログ)
- 3) 東京精工(株)：セイコー糸温度測定用非接触式温度計 TH-E 型、(カタログ)
- 4) 豊田，他：高性能熱赤外放射計について、文部省科学研究費特別研究「環境科学」R52 遠隔計測班・昭和54年度研究報告会予稿集，9/16 (1979)
- 5) 豊田，他：高感度熱赤外放射計の開発とその応用，第19回 SICE 学術講演会予稿集，119/120 (1980)
- 6) 豊田，他：細い移動物体の非接触測温法，第19回 SICE 学術講演会予稿集，117/118 (1980)

Fig. 9 Application of the system with multiple temperature background radiators (bases)