技術資料

UDC 536.521:621.3.037.3

携帯用デジタル放射温度計「スターサーモ」

長坂浩安*, 宇津野光朗*, 雪吹隆夫*
稲生 博**, 鈴木一雄**

Portable Digital Radiation Thermometer "STAR THERMO"

Hiroyasu Nagasaka, Mitsuo Utsuno, Takao Ibuki,
Hiroshi Inoh and Kazuo Suzuki

Synopsis

Lately, in the iron and steelmaking industry, it is required to make accurate and rapid measurement of temperatures at all the points in the production line from the point of view of high quality and energy saving.

Responding to such a request, there was developed a portable digital radiation thermometer named "STAR THERMO" by which everybody is able to make rapid measurement of temperature with no contact and therefore, there have been described hereunder about the capacity and function.

1. ま え が き

近年、鉄鋼業においては、高品質、省エネルギーの面から、生産ライン中におけるあらゆる箇所での温度を、精度よく、迅速に測定することが要求されている。

従来は携帯用非接触温度計としては、光高温計が使用されていたが、個人誤差が入る、高速で移動する物体は測定しにくいなどの問題があり、その改善が望まれていた。

一方、半導体技術の進歩にともない、低電力型の集積回路が発達してきた。これらのことから誰でも非接触で、迅速に測温できる携帯用デジタル

放射温度計を開発し、ユーザーからのニーズに合わせて改良を重ね、「スターサーモ」を完成したので、その機能や性能について述べる。

2. 放射温度計の原理

光領域の測定にはラジオメトリ（放射測定法）とフォトメトリ（測光法）の二つがある。放射測定法は光スペクトル内のすべての波長（紫外線、可視光線、赤外線）の放射に関して測定する方法で基本単位はワットである。また測光法は可視光線（380～750nm）の波長領域の測定を行う方法で基本単位はルーメン（lm）である。ここで理想的な測光用検出器は平均的な人間の目の視感度に近い分光感度を持つとされている。

放射温度計は、黒体放射の法則にもとずいて、物体表面からの放射エネルギーを検出して、その表面温度を測定するものである。

昭和56年10月9日 受付

*大同特殊鋼㈱研究開発本部中央研究所

**大同特殊鋼㈱研究開発本部商品開発室

2.1 熱放射に関する法則

温度 T [K] の物体から放射される熱放射エネルギー $M(\lambda, T)$ は、物体が完全放射体（黒体）の場合には Planck の法則により次式で表わされる。

$$M(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1} \dots\dots\dots(1)$$

$$C_1 = 2\pi C^2 h = 3.7415 \times 10^{-16} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^2]$$

$$C_2 = Chk^{-1} = 0.014388 \quad [\text{m} \cdot \text{K}]$$

$$C : \text{光速} = 2.99792458 \times 10^8 \quad [\text{m} \cdot \text{S}^{-1}]$$

$$h : \text{Planck の定数} = 6.6256 \times 10^{-34} \quad [\text{J} \cdot \text{S}]$$

$$k : \text{Boltzmann の定数} = 1.38054 \times 10^{-23} \quad [\text{J} \cdot \text{K}^{-1}]$$

(1)式による分光放射発散度と波長および温度との関係を Fig. 1 に示す。Planck の法則による分光放射エネルギー $M(\lambda, T)$ が最大となる波長 λ_m は次式で示される。

$$\lambda_m = C_3 / T \quad [\text{m}] \dots\dots\dots(2)$$

$$C_3 : \text{定数} = 2.8978 \times 10^{-3} [\text{m} \cdot \text{K}]$$

これを Wine の変位則という。

(1)式を全波長域にわたって積分すると

$$M_e(T) = \int_0^\infty M(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4 \dots\dots\dots(3)$$

σ : Stefan-Boltzmann の定数 $= 5.6696 \times 10^{-8}$ $[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}]$ となる。これを Stefan-Boltz-

Fig. 1. Relationship between wavelength and monochromatic emissive power black-body.

mann の法則という。

2.2 実際の放射温度計

実際の放射温度計では、レンズ・フィルターの分光透過特性、検出素子の分光感度特性などによって波長選択特性をもつ。また測温物体も黒体でない（放射率 < 1 ）ため、検出素子の受けるエネルギー M_D は(4)式で表わされる。

$$M_D = \epsilon K^1 \int_0^\infty F(\lambda) M(\lambda, T) d\lambda \dots\dots\dots(4)$$

ϵ : 測温物体の放射率

K^1 : 比例定数

$F(\lambda)$: 受光計の分光特性

(4)式は近似的に次式で表わされる。

$$M_D = \epsilon K T^n \dots\dots\dots(5)$$

K : 比例定数

n : 放射温度計の n 値

2.3 n 値の計算

(5)式の n は放射温度計の重要な指標である。これは放射温度計の分光特性、測定温度などによって決まり、狭帯域および短波長になるほど n 値は大きくなる。また、放射率の変化 $\Delta \epsilon$ が指示温度の変化 ΔT に与える影響は次式で計算できる。

$$\Delta T \approx \frac{1}{n} \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon} T \dots\dots\dots(6)$$

これにより n の値が大きいほど放射率の影響が少ないことがわかる。

この n 値は単波長の場合には理論的に求めることができる。(1)式を微分すると

$$\frac{dM(\lambda, T)}{dT} = \frac{C_1 \cdot C_2}{\lambda^5 T^2} \frac{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right)}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1} \dots\dots\dots(7)$$

ここで(1)式を近似的に

$$M(\lambda, T) = K T^n \dots\dots\dots(8)$$

とおき、微分すると

$$\frac{dM(\lambda, T)}{dT} = n \frac{M(\lambda, T)}{T} \dots\dots\dots(9)$$

となる。(7), (9)式より n 値は次式で求められる。

$$n = \frac{C_2}{\lambda T} \frac{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right)}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1} \dots\dots\dots(10)$$

「スターサーモ」は Fig. 2 に示すような分光特性をもっているの、実測値から n 値を求める。

いま、温度 T_1 [K], T_2 [K] の黒体炉を測定

Fig. 2. Characteristic of spectral sensitivity for "STAR THERMO".

Fig. 3. Relationship between n value and temperature.

した時の放射温度計の検出素子の出力を I_1 , I_2 とすると近似的に(11), (12)式で表わされる。

$$I_1 = KT_1^n \quad \text{.....(11)}$$

$$I_2 = KT_2^n \quad \text{.....(12)}$$

(11), (12)式は

$$\log\left(\frac{I_2}{I_1}\right) = n \log\left(\frac{T_2}{T_1}\right) \quad \text{.....(13)}$$

(13)式から

$$n = \frac{\log\left(\frac{E_2}{E_1}\right)}{\log\left(\frac{T_2}{T_1}\right)} \quad \text{.....(14)}$$

となり n 値が求まる。

Fig. 3 にこれらによって求めた測定温度と n 値の関係を示す。放射率による指示温度変化からみて「スターサーモ」の n 値に最も近い単波長は

Fig. 4. Spectral detectivity comparison for various detectors (Room temperature operation).

0.9 μm である。

放射温度計は検出素子の特性によってその性能が決定されるため、目的に合った素子を選択することは最も重要である。

3. 検 出 素 子

放射温度計の検出素子は熱形と光量子形に大別される。熱形は放射エネルギーを素子の温度変化として検出するので波長選択性がなく、一般的に応答速度は遅く、感度が低い。代表的なものにサーモパイル、焦電素子がある。光量子形は光電効果によるもので、材質により固有の波長選択性がある。応答速度は速く、感度は高いが、検出波長が 5 μm 以上のものは液体窒素等による冷却が必要となる。Fig. 4 に常温で用いることのできる主な検出素子の分光感度と比検出率 D^* を示す。 D^* は検出素子の性能を表わす指数で大きいほど感度が高い。しかしより低い温度が測定できることとは直接関係がない。これは Fig. 1 に示すように黒体放射が低い温度ほど長波側偏に分布しているためである。すなわち、長波側偏で高い検出能力をもつ検出素子が低温まで測定できる能力を有している。最近では生活空間温度 (−30 ~ +300 °C) の測定に焦電素子が多く使用されて来ているが、入射光のチョッピングや長波長を検出する光学系が必要である。

「スターサーモ」は検出素子にシリコンフォトセルを使用している。これは特殊鋼の生産には 1000 °C 前後の温度測定が最も多く、次のような特徴による。

- (1) 感度が高くダイナミックレンジが広い。
- (2) 常温で使用でき、安定している。
- (3) 光のチョッピングが不用。
- (4) 光学系が通常の光学ガラス構成できる。
- (5) 最大波長感度が $0.85\mu\text{m}$ にあり、水膜や水蒸気の影響が少ない。

「スターサーモ」に使用したフォトセルは微弱光から強い光まで測定でき、低雑音、高安定なものを使用している。

4. 「スターサーモ」の構成

「スターサーモ」は、主として光学系と電子回路部から構成されており、その主な仕様を Table 1 に示す。

4.1 光 学 系

「スターサーモ」の光学系は一眼レフ方式でその構成を Fig. 5 に示す。測温対象からの光は可動焦点式対物レンズで集光し、一部はハーフミラーで反射して測温の位置決め（ファインダー内に測温領域指示マークがある）とビント合わせのためにファインダー系に入る。ファインダーは測温のための視野角($2/7^\circ$)に比べてファインダーの視野角を 10° と大きくとってあるので測温の位置決めが速やかにできる。

ハーフミラーを透過した光は微少部分の測温のためスリットにより測温視野を制限している。測温の精度と安定性を高めるためには、できる限り狭帯域で特に外乱となる可視光の影響を受けない

Table 1. Specifcation of "STAR THERMO"

Item	Performance
Temperature measurment range	600~1600℃
Dynamic temperature indicator	4 Digit digital indicator 4Inside of finder5 indication interval : 400ms
Maximum temperature indicator	4 Digit digital indicator (Outside of body) Hold tire : 30sec
Forcal distance	1 m~∞
Minimum target size	5 mm Diameter at 1 meter range
Field of view	2 / 7°
Accuracy (Ta=25℃)*	±10℃
Reproducible ability *	± 1 ℃
Operating temperature range	0 ~50℃
Detector	Silicon photo cell
Spectral range	0.7~1.1 μm
Emissivity compensation	0.2~1.0 Variable
Temperature drift	±0.03%/℃ of temperature indicator
Analog output	0 ~1.0V (600~1600℃) 1 mV/℃
Power source	Battery type : JIS S-006P or AC adapter (AC 100V)
Consumption current	Power switchon : 3 mA Analog output : 6 mA Digital indicator : 20mA
Dimensions	56(W)×205(H)×188(D)mm
Weight	950g

*Emissivity $\approx$ 1

Fig. 5. Block diagram of optical system.

Photo. 1. Potable radiation digital thermometer "STAR THERMO".

ようにする必要がある。このため光学フィルター (F3) により可視光をカットし、分光特性を狭帯域にしている。

4.2 電子回路部

Fig. 6 に「スターサーモ」の電子回路ブロック図を示す。温度 T [K] の物体からの放射エネルギーを受光した時のシリコンセルの出力 I は近似的に

$$I = \epsilon K T^n \quad (15)$$

で表わされることはすでに述べた。この式からシリコンセルの出力 I は温度の n 乗に比例する。シリコンセルは広いダイナミックレンジをもっている所以对数変換をしてやれば増幅器を飽和させず

Fig. 6. Block diagram of electronic circuit.

に広い測温範囲が得られる。一般に対数変換器の出力 V は次式で表わされる。

$$V = A \log \left(\frac{I_{REF}}{I} \right) \quad (16)$$

A : 係数 (スケール・ファクタ)

I_{REF} : 基準電流

I : 入力電流

実際に対数変換はトランジスタのベース・エミッタ間の電圧・電流特性を利用しているので周囲温度の影響を受けるため、これを補償する回路になっている。

(16)式の入力電流 I に(15)式を代入すると

$$V = A \left\{ \log \left(\frac{I_{REF}}{\epsilon \cdot K} \right) - n \log (T) \right\} \quad (17)$$

となり、(17)式より放射率の設定は基準電流を変化させてやればよいことがわかる。ここで放射率が決まると(17)式は

$$V = A' - A n \log (T) \quad (18)$$

となる。ここで A, A' は定数である。(18)式より物体の温度と対数変換器の出力 V は、まだ直線関係にはならないことがわかる。ディジタル表示のためにはリニアライザにより温度と出力の関係をリニアにする必要がある。「スターサーモ」はアナログの7折線近似を行い、近似精度が $\pm 2^\circ\text{C}$ という高い精度を実現している。Fig. 7 にその折線近似特性を示す。リニアライザの出力はA/D変換器によりディジタルに変換後、表示間隔中 (400ms) の最高温度を検出し瞬時温度としてファインダー内にディジタル表示する。さらに個々の瞬時温度を逐次比較して高い方の温度を記憶しておき、温度測定を終了すると、測定中の最高温度がボディ外面に30sec間ディジタル表示され、その後自動的に電源がOFFされる機構になっている。

Fig. 7. Characteristic of linearize aberration.

Dynamic temperature (Inside of finder)

Maximun temperature (Outside of body)

Fig. 8. Digital indicator of "STAR THERMO".

この最高温度表示は、移動物体の温度測定に適している。例えば圧延中の鋼材の测温では、スケールや水膜があると低い温度を示すが、スケールの無い面が一部であれば、その温度を最高温度として測定することができる。また、当社（大同特殊鋼㈱）では棒鋼や線材圧延（ $>\phi 5$ ）が多く材料が振動しているが、瞬時でも测温視野に入れば前記と同様に材料の温度が測定できる。

アナログ出力はリニアライズされており、(Fig. 9) 温度を直読することができる。

Fig. 9. Characteristic of analog output.

「スターサーモ」は携帯用として小型軽量に設計されており、ボディはアルミニウム製で堅牢にできている。

5. 放射温度計による温度測定

「スターサーモ」のような放射温度計は非接触で誰でも手軽に物体の温度が測定できるという便利さから、今後需要が増大していくと思われる。そこで精度のよい温度測定をするための注意点をあげておく。

放射温度計による温度測定に影響を及ぼすファクターには次のようなものがある。

1. 放射率
2. 他からの放射の重畳
3. 测温光路中における吸収、散乱

5.1 放射率について

物質の分光放射率 ϵ_λ は黒体の分光放射発散度 $w(\lambda, T)$ と同一温度にある物質の分光放射発散度 $w'(\lambda, T)$ の比で表わされる。

$$\epsilon_\lambda = \frac{w'(\lambda, T)}{w(\lambda, T)} \quad (19)$$

放射率は测温物体の物性値（固有放射率）や测温条件（物体の表面状態、形状、検出波長）によって変化する。

物質の光学的性質を示す吸収率 α 、反射率 ρ 、透過率 τ との間にはエネルギー保存則より次式の関係がある。

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (20)$$

また Kirchhoff の法則により放射率 ϵ と吸収率 α は等しいことから、不透明物体の場合（ $\tau = 0$ ）は

$$\epsilon = \alpha = 1 - \rho \quad (21)$$

となり、反射率 ρ を求めれば放射率 ε が計算できる。反射率はMaxwellの電磁理論から求められ、これによる計算例は多く¹⁾、また鉄などの放射率の温度特性を解析したものもある²⁾。「スターサーモ」の場合測温範囲が600~1600°Cのため、通常の金属は酸化している場合が多いので文献等による放射率を用いる場合は特に表面粗さ、酸化の有無、測定温度や検出波長に注意する必要がある。

実用的に放射率を求めるには、測温物体の真温度を熱電対により測定し、「スターサーモ」の放射率補正ダイヤルを回し、熱電対の温度と「スターサーモ」の温度表示が等しくなった時の放射率補正ダイヤルの読みがその物体の放射率となる。また測温物質に小穴をあけ黒体に近い条件を作る方法もある^{3), 4)}。

5.2 他からの放射の影響

測温物体に他からの放射がある場合は、この影響を受ける。Fig. 10に示す如く、温度 T 、放射率 ε の測温物体に他からの放射 L_R が重畳されている場合、放射温度計からみた放射輝度 L_o は次式で示される。

$$L_o = \varepsilon L_t + (1 - \varepsilon) L_R \dots\dots\dots (22)$$

(22)式から放射率が小さいほど外部からの放射の影響が大きい。例えば加熱炉内にある材料の測温では、炉壁温度が材料温度より高く、しかも一定でないので、先端に遮蔽板のついた水冷管を測温材の近くに挿入して炉壁からの放射の影響を除いている^{5), 6)}。

太陽光が直接当たっている時も影響がある。これは太陽光が6000Kの黒体放射スペクトルに似ており、大気層で吸収されて、地表にとどく時には減衰されているが測温物体の温度が低く、放射率が低い場合には無視できない。以上のことから外部からの放射は一定でない場合が多く、この影響をうけないような工夫が大切である。

5.3 測温光路中の吸収・散乱

測温光路中に水蒸気、水膜、煙、ガス等が存在

Fig. 10. Influence of external radiation.

すると、それらの物質による吸収、散乱が起こり、実際の温度より低い値を示す。

水膜の影響を調べた報告ではシリコンセル(0.5~1.2 μ m)で-1°C/mmH₂O, PbS(2.0~2.6 μ m)で-160°C/mmH₂Oという結果が出ている^{7), 8)}。これは波長が1 μ m以上になると水の透過率が急激に悪くなるからである。

水蒸気の影響については、その定量化がむづかしく一般には透明の状態と湯気の不透明の状態(散乱の影響が大きい)がある。水蒸気による定性的な実験結果としてはシリコンセルで850°Cで-27°C, PbSで-90°Cの影響があると報告されている⁹⁾。

その他煙や塵なども影響があり、铸造中の温度測定にはエアージェットする等の工夫が必要である。

6. ま と め

「スターサーモ」は、社内ニーズをもとに完成したが現在、各所で使用され好評を得ている。ここでその特長をまとめると次のようになる。

- (1) 微小部分の測温ができる。(距離1mで ϕ 5以上)
- (2) 測温範囲が広い。(600~1600°C)
- (3) 移動物体の測温に適した最高温度表示
- (4) 測温物体と温度を同時に確認できるファインダー内瞬時温度表示。
- (5) 測温物体を容易にとらえられる一眼レフ方式。
- (6) リニアライズされたアナログ出力。

現在、放射温度計へのニーズの拡大とともに、定点黒体炉や単色放射温度計により標準化の努力が払われている。今後の放射温度計はより多様化するニーズに対応した開発を行っていく必要がある。

当社では温度パターン計測や微小な振動物体でも精度のよい温度測定のできるCCD(Charge Coupled Device)イメージセンサを用いた放射温度計も開発した。

この「スターサーモ」が種々の業界で、品質向上や省エネルギーに貢献することを期待している。

(文 献)

- 1) たとえば増喜, 入月, 森下: 計装, **17** (1974) 6, 43
- 2) 大野: 計測自動制御学会論文集, **14** (1978) 3, 67
- 3) JIS Z 8706 光高温計による温度測定方法, (1980)
- 4) 栗田, 岩村, 田村: 川鉄技報, **11** (1979) 2, 93

- 5) 井内, 大野, 草鹿: 鉄と鋼, **61** (1975) 8, 78
- 6) 住金中研: 計測部会資料 (計70—3—9), (1978)
- 7) 神鋼, 加古川: 計測部会資料 (計47—4—1), (1971)
- 8) 鋼管技研: 計測部会資料 (計50—4—2), (1972)
- 9) 白岩, 田村: 鉄と鋼, **59** (1973) 5, 126

—— 海 外 情 報 ——

高速度工具鋼製旋削工具の切削性能に及ぼす熱処理の影響

E. Berkenkamp : Thyssen Edelst. Techn. Ber., 7(1981)2, 134

高速度工具鋼 S10-4-3-10, S6-5-2-5, S6-5-2 の切削性能に及ぼす熱処理条件の影響に関する報告である。オーステナイト化条件として, S10-4-3-10, S6-5-2-5 は $1210^{\circ}\text{C} \times 170\text{s}$, $1240^{\circ}\text{C} \times 200\text{s}$, S6-5-2 は $1190^{\circ}\text{C} \times 170\text{s}$, $1220^{\circ}\text{C} \times 200\text{s}$ に変化させ, それぞれ $550^{\circ}\text{C} + 540^{\circ}\text{C}$ の焼もどしを施した。被削材は Ck60 (0.6C 鋼), $\times 5\text{NiCrTi}26\ 15$ (0.03C-15Cr-26Ni-1.3Mo-2Ti 鋼) を用い, 連続切削および部分的に断続切削試験した。

S6-5-2-5 の切削性能は S10-4-3-10 のそれに近似するが, S6-5-2 では若干異なった結果を示した。いわゆる軽切削では比較的好性能を示すが, 重切削では S10-4-3-10 に比べ劣る。試験結果の一部を第 1 表に示す。以上, 高性能な S10-4-3-10 を安価な低合金鋼に代替することは系統的な熱処理を施せば用途によっては可能であることを結論づけている。

第 1 表 切削試験結果

被削材	切 削 条 件			オーステナイト化	切 削 速 度 (m/min)			切削耐久時間 (min)		
	速 度 (m/min)	所定時間 (min)	切 込 (mm ²)		S10-4-3-10	S6-5-2-5	S6-5-2	S10-4-3-10	S6-5-2-5	S6-5-2
Ck60	—	60	0.5×0.2	高 目 低 目	63 66	63 66	64 68	— —	— —	— —
	70	—	〃	高 目 低 目	— —	— —	— —	25 42	27 38	12 51
	—	60	2×0.36	高 目 低 目	34 36	34 36	32 35	— —	— —	— —
	36	—	〃	高 目 低 目	— —	— —	— —	32 65	28 61	11 30
$\times 5\text{NiCrTi}26\ 15$	—	60	0.2 0.1 0.06		16.8 21.4 26.7	17 20.2 25.2	15.6 19.8 26	— — —	— — —	— — —

(水野博司)