多素子検出器を用いた 112 波長高速放射温度計[†]

小林 正 信*・坂 手 弘 明*
佐久間 史 洋*・小 野 晃*

High-Speed 112-Wavelength Radiation Thermometer Having Linear Array Detectors

Masanobu KOBAYASHI*, Hiroaki SAKATE*,
Fumihiko SAKUMA* and Akira ONO*

A multiwavelength radiation thermometer having a hybrid detector of a 64-element silicon-germanium linear array and an infrared detector of a 48-element InSb linear array was developed for measurements of temperature and emissivity. A wide wavelength range detection by one fixed grating from 0.55 μm to 1.6 μm were realized by the hybrid detector. The InSb detector and a LiF prism were used for the long wavelength range from 1.3 μm to 5.3 μm .

The two-detector optical system without mechanical wavelength scanning and light chopping improved the stability and the response time as short as 256 μs to scan a total of 112 wavelengths. In a continuous 6-month operation without optical adjustment, no wavelength drift and 5% reduction in responsivity were observed.

A reference radiation source of a plane blackbody furnace was used for the compensation of the responsivity reduction and the atmospheric absorption of the optical pass of the multiwavelength radiation thermometer.

The temperature scale and the wavelength of each detector element were calculated from calibration data. Two blackbody furnaces and 24 narrow-band-pass filters were used in the calibration. The noise equivalent temperature differences were estimated from the temperature scales and noise data of the analog signals when the time constant of the amplifiers was 100 ms and the target was a blackbody operated at 1052°C; they were 0.16°C, 0.08°C, 0.24°C, and 0.54°C at the wavelengths of 0.55 μm , 0.66 μm , 2.0 μm , and 5.0 μm , respectively.

Key Words : radiation thermometer, 112 wavelengths, hybrid array detector

1. はじめに

放射率や透過率などの補正を目的として、従来の2波長よりも波長数の多い、新しい多波長放射温度計が試みられている。これまでに報告されている多波長放射温度計は、フィルターと光ファイバーを組み合わせた10波長以下のものが多い^{1),2)}。

しかし、表面に酸化膜が形成された金属など、放射率の波長分布が複雑な対象の熱放射特性を把握するには、10波長程度の波長情報では不十分である^{3),4)}。数十以上の波長数ではフィルターによる分光が困難であり、回折格子を用いるなど、分光器と同様な光学系を採用する必要があるが、一般の分光器の流用では安定度、応答速度などが不十分である。

フィルターによる分光に比べて回折格子やプリズムによる分光は光学系が複雑であり、スリットなどの光学部品の変動

による安定度の低下が懸念される。また、機械的に行われる波長走査によって応答速度が低下するうえ、データにおける波長間の同時性が損なわれてしまう。

従来の機械波長走査に代えて多素子検出器による電子波長走査を用いれば、機械的な動作部分が無い多波長放射温度計が実現でき、光学素子をすべて固定することによる安定度と応答速度の向上が期待できる。回折格子とリニアアレイ検出器を組み合わせた分光輝度計は市販されているが、放射温度計として用いるには安定度や輝度レンジなどが不十分であるほか、波長範囲も限られている。

本論文では試作した112波長の高速放射温度計^{5),6)}の構造、評価結果、および参照放射源を用いた光路吸収と応答度の補正について報告する。試作した放射温度計は放射率補正などに実際必要となる波長数を評価することも目的としているため、このような多波長とした。検出器にSi, Ge, およびInSbの各リニアアレイを用いることにより、0.55~5.3 μm の広い範囲の電子波長走査を実現し、安定度と応答速度の向上を図った。また、SiリニアアレイとGeリニアアレイを複合化することで光学系を単純化し、さらなる安定度の向上を図ったほか、112波長の各信号を並列に増幅することで幅広

[†] 第33回計測自動制御学会学術講演会で発表(1994・7)

* 計量研究所 つくば市梅園1-1-4

* National Research Laboratory of Metrology, Tsukuba
(Received November 28, 1997)
(Revised May 19, 1998)

い輝度レンジを確保した。

高い時間分解能と広い輝度レンジの実現によって、酸化過程にある金属表面など、温度や放射率が急速に変化しつつある対象物の分光輝度を、連続した波長で測定することが可能となる⁴⁾。また、安定度が高いために一般の放射温度計と同様に黒体炉による目盛付けを行って運用し、確かなデータを得ることができる。

2. 放射温度計の構造

2.1 対物光学系

Photo. 1 に放射温度計の外観を示す。右側の放射温度計本体は固定焦点で、3軸直線移動と水平回転が可能な大形のステージ上に設置されており、ステージの移動によって測定位置の調節を行った。左側は付属する電気回路である。

Photo. 2 に対物光学系を中心とした放射温度計内部を示す。測定対象からの熱放射は **Photo. 2** の右側から、 CaF_2 窓を通じて放射温度計内部に導入される。窓の直後には未塗装のアルミニウム板の電動シャッターが設けられており、これを閉じて零点の測定を行った。

開口の直径が 6 mm である標準用の定点黒体炉⁷⁾などの小さな測定対象物に対応するため、幾何光学的な標的サイズを縦 2.5 mm、横 0.75 mm とした。測定距離は CaF_2 窓から約

120 cm、対物球面鏡から 174 cm である。放射温度計に使用した鏡はすべて、保護コーティングの無いアルミニウム蒸着鏡とした。

温度分解能を高めるために直径 150 mm と大形の対物球面鏡を用い、光学系の明るさを F4.7 とした。この対物球面鏡による標的の 0.4 倍像を、平面鏡で折り返してアパーチャ鏡上に結ばせた。アパーチャ鏡の開口は縦 1 mm、横 0.3 mm で、InSb リニアアレイ検出器用分光部の入射スリットとして機能する。アパーチャ鏡の開口以外の部分は平面鏡とし、そこで反射される熱放射をファインダー部に導いた。ファインダー部は一般の放射温度計と同様な標的の目視のほか、レーザー照射による位置合わせが可能な構造とした。

Photo. 3 に Si-Ge 複合リニアアレイ、および InSb リニアアレイの両検出器の光学系を示す。Photo. 3 は迷光防止用の黒色カバーをはずした状態である。アパーチャ鏡のスリットからの熱放射は、軸外し放物面鏡によってコリメートした後、頂角 90 度のナイフエッジ鏡ビームスプリッターによって分割した。短波長側の光量不足を補うため、分割を Si-Ge 複合

Photo. 1 Front view of the radiation thermometer

Photo. 3 Optics of the hybrid detector and the 48-element InSb linear array detector

Photo. 2 Objective optics of the radiation thermometer

リニアアレイ検出器側に約7割, InSb リニアアレイ検出器側に約3割で行った。

2.2 Si-Ge 複合リニアアレイ検出器の光学系

Si-Ge 複合リニアアレイ検出器側に分割された平行ビームは, 軸外し放物面鏡によって入射スリット上に結像させた。入射スリットは縦に約10 mmと長く, 横幅が調整可能で実際にスリット上に結ばせた像に合わせた幅とした。分光には大きさ26 mm×26 mm, 曲率半径93 mm, 格子定数200 本/mmの凹面ホログラフィック回折格子を用いた。

Photo. 4に Si-Ge 複合リニアアレイ検出器の外観を示す。32素子の Si リニアアレイフォトダイオード, および32素子の Ge リニアアレイフォトダイオードを直線に並べた64素子の検出器である。二つのリニアアレイは同一形状であり, 1素子の大きさはアレイ方向に0.25 mm, アレイとの直交方向に3 mmとした。また, 各素子の間隔は0.3 mm, 全長は19 mmであり, Si部分とGe部分の接合部は1素子分のギャップがある状態で接合し, 1本のリニアアレイとした。Si部分, およびGe部分の受光面上には, それぞれ高次光遮断用のローパスフィルターが接着されており, Si用のカットオフを0.55 μm , Ge用のカットオフを1.0 μm とした。

以上に述べた光学系による Si-Ge 複合リニアアレイ検出器側の測定波長帯は0.55~1.6 μm , 分散は1素子あたり17 nmであった。このほか, Ge部分の暗電流を低減するため, Si-Ge 複合リニアアレイ検出器全体を不凍液循環により-10°Cまで冷却可能とした。

2.3 InSb リニアアレイ検出器の光学系

Photo. 3に示したように, ビームスプリッターによって InSb リニアアレイ検出器側に分割された平行ビームは LiF プリズム, および KBr レンズを経て48素子の InSb フォトダイオードによって検出される。LiF プリズムは高さ40 mm, 幅25 mmの正三角柱, KBr レンズは直径35 mm, 波長3.7 μm における焦点距離50 mmの両凸レンズである。長波長における背景放射の増大を避けるため, KBr レンズには通常用いられるヒーター加熱ではなく, 防湿用フッ素樹脂の塗

Photo. 4 Front view of the hybrid detector. It consists of a 32-element silicon linear array and a 32-element germanium linear array. The detector is covered by two low-pass filters

布を行った。放射温度計内部は使用時に乾燥窒素パージされる。

InSb リニアアレイ検出器の1素子の大きさはアレイ方向に50 μm , アレイとの直交方向に300 μm で, 各素子の間隔は100 μm , 全長は4.75 mmとした。この間隔は Si-Ge 複合リニアアレイ検出器の1/3であるので, コリメータの焦点距離150 mmに対して焦点距離50 mmの KBr レンズを用いることにより, 標的サイズを Si-Ge 複合リニアアレイ検出器側とほぼ一致させた。また, 各素子の間隔と KBr レンズの焦点距離に対して適当な分散を持つことから, プリズムの材質に LiF を用いた。1素子あたりの波長差は, 幅4 μm の波長範囲に48素子があるので平均83 nmとなるが, 実際には LiF の分散が波長について不均一であるため, 1.8 μm 付近で140 nm, 5 μm 付近で60 nmであった。

検出素子に入射する熱放射の波長範囲は1.3~5.3 μm と広く, これをレンズ光学系によって結像させれば当然色収差が生ずる。この問題に対処するため, 用いた波長範囲における色収差が比較的小さい KBr をレンズの材質とし, なお残る色収差に合わせて InSb リニアアレイ検出器を, 短波長側の端の素子に対して長波長側の端の素子が約1 mm レンズから遠くなるように斜めに設置した。この設置角度は実際に検出器出力を観測しながら, 2 μm と4.2 μm の両波長間における色収差が無くなる位置に調整して定めた。**Fig. 1**に InSb リニアアレイ検出器, および分光部の水平断面を示す。また, 熱放射の入射範囲に比べてやや小さい開口を持ち, 通常よりも長い冷却された放射シールドを検出素子を覆うように取り付け, 不要な背景放射を低減した。

2.4 電気回路

Fig. 2に放射温度計の電気回路ブロックを示す。検出器からの出力電流は112回路の初段増幅器によって電圧に変換される。初段増幅器の帰還抵抗は短波長側 Si 用が10 M Ω , それ以外が1 M Ω , 時定数はすべて100 μs とした。

初段に続く増幅器は差し替え式の基板を用いて個々の計測に最適なゲイン, 時定数に設定可能とした。増幅された信号は16チャンネルの FET アナログマルチプレクサ7回路によって7系統にされたのち, ゲイン調節回路によって A/D

Fig. 1 Cross sectional view of the InSb detector, the KBr lens, and the LiF prism

変換に適した大きさに再度増幅され、トランジェントメモリに記録される。

放射輝度信号の大きさは測定対象の温度、および放射率の変化による大小の幅が非常に広く、測定中に A/D コンバータのオーバーフローや有効ビット数の極端な減少が生ずる場合がある。このため、ソフトウェアによる制御が可能な回路を用いて、測定中のリアルタイムゲイン調節を行った。高速な測定では16波長ごとのブロック単位でゲインを調節し、0.5秒よりも測定間隔が長い場合は、各波長ごとの出力をモ

ニタしつつゲインを個別に調節した。

トランジェントメモリの仕様は分解能12ビット、変換速度1 μ s、メモリ容量8Mバイトで、112チャンネルのデータ取得に必要な時間は128 μ sであるが、波長間の信号電圧が極端に異なる場合に不正確であることが確認されたため、すべての波長を2回連続で測定した。したがって、Si-Ge 複合リニアアレイ検出器側、または InSb リニアアレイ検出器側のみの測定は128 μ s 間隔で、全波長の測定は256 μ s 間隔で、8Mバイトのメモリが満たされるまで続けることが可能である。放射温度計の出力信号は7系統が並列に出力されているので、トランジェントメモリを2台に増設すれば全体としての A/D 変換速度が2倍になり、全波長で128 μ s 間隔の測定が可能となる。

3. 校正と性能評価

Fig. 3(a)に Si-Ge 複合リニアアレイ検出器側の、Fig. 3(b)に InSb リニアアレイ検出器側の黒体校正データを示す。目盛付けは一般の単色放射温度計と同様に、各波長に対して個別に特性式を適用して行った。ただし、光路吸収補正の必要があるため、測定ごとに黒体開口と同一距離に置いた参照放射源も観測した。光路吸収補正については次章で述べる。

Photo. 5 に示す参照放射源は平面黒体炉であり、設置の容易さのために幅12 cm、脚部を除いた高さ12 cm、奥行き9.5 cmと小形にした。一方、口径は5 cmと大きくし、測定対象が真空容器内にあるときなどの、放射源を放射温度計の標的から離れた位置に置く場合にも対応可能とした。放射源にはニッケル板の表面にピッチ1 mm、角度60度のV形縦溝を密に切削し、大気中での高温酸化により黒化したものを用い

Fig. 2 Block diagram of the electronic system of the radiation thermometer

Fig. 3 Calibration data of the radiation thermometer. The target was a blackbody furnace of a cavity-type except the data at 600°C; the target was the reference radiation source only at 600°C

Photo. 5 Front view of the reference radiation source for the atmospheric absorption compensation of the optical pass of the radiation thermometer

た。これを裏面からヒーター加熱し、温度をニッケル板の側面から中心までのドリル穴に挿入した熱電対によって 600°C に保持した。

校正には温度可変黒体炉を 2 台用いた。500°C 以下の温度域では口径 60 mm の黒体炉を用い、空洞底部付近に埋め込んだ白金抵抗温度計の指示温度を基準にした。780°C 以上の温度域では口径 30 mm の黒体炉を用い、定点黒体炉群によって目盛付けされた標準用の 0.9 μm Si 単色放射温度計⁹⁾の指示温度を基準とした。目盛付けは Si-Ge 複合リニアアレイ検出器側が JIS⁹⁾に標準放射温度計用として記載されている特性式、InSb リニアアレイ検出器側が分光応答度の形を利用する特性式¹⁰⁾を用いて行った。

黒体校正による温度目盛とノイズ測定により算出した、放射温度計の温度分解能を **Table 1** に示す。時定数が 100 μs 、および 100 ms で増幅したアナログ信号のノイズの実効値を測定し、これに等価な温度差を計算した。温度分解能は A/D コンバータによっても制限されるので、測定した SN 比が 1000 以上の場合は SN 比が 1000 のときに相当する温度分解

能を示した。測定温度レンジの下限は **Table 1** に示した温度分解能により定まり、上限は初段増幅器の飽和により定まる。飽和する温度は波長によって異なり、測定対象が黒体の場合、約 2000°C から始まる。

放射温度計の波長に関する特性の評価はハロゲン電球を放射温度計の標的位置に置き、電球に近い光路に狭帯域バンドパスフィルターを挿入して行った。各フィルターの透過特性と 112 素子の出力を走査した波形から、各素子の中心波長の値と概略の波長分解能を評価した。

Si-Ge 複合リニアアレイ検出器側の評価には中心波長が 0.55 μm , 0.65 μm , 0.9 μm , 1.2 μm , および 1.5 μm で、半値全幅が 2~7 nm のフィルターを用いた。フィルターと対応する素子の中心波長を一致させた場合には、112 素子の出力を走査した波形に 1 素子幅の鋭いピークが観測され、両隣の素子の出力はピークの 1~3 割程度であった。

InSb リニアアレイ検出器側の評価には、中心波長が 1.5~5.3 μm のフィルターを合計 20 枚用いた。フィルターの半値全幅は 1.5 μm が 5 nm, 2~3 μm が 36~60 nm, 3 μm よりも長い波長が 130~210 nm であった。フィルターと対応する素子の中心波を一致させた場合の走査波形は、3 μm よりも短い波長では Si-Ge 複合リニアアレイ検出器側と同様なピークが観測されたが、両隣の素子の出力はピークの 5 割程度であった。また、3 μm よりも長い波長ではフィルターの半値全幅が 1 素子あたりの波長差である 60~100 nm よりも広く、フィルターの分光透過率データに近い走査波形が観測された。

試作した放射温度計を放射率測定に約半年間、休日を除いてほぼ連日使用し、その間光学系の調整は行わなかった。この間に 3 回行ったフィルターによる波長校正では、すべての波長に変動が認められなかった。

参照放射源を基準とした場合の応答度は、InSb リニアアレイ検出器側で吸収の少ない 2.26 μm の素子で 5.53% の低下、Si-Ge 複合リニアアレイ検出器側で最も長波長な 1.6 μm が 5.47% の低下であった。Si-Ge 複合リニアアレイ検出器側の応答度低下は、分光されていない熱放射が通過するスリット

Table 1 Noise equivalent temperature differences of the radiation thermometer when varying the target temperature and the time constant of the amplifiers.

Wavelength / μm	300°C		450°C		770°C		1052°C	
	$\tau=100$ μs	$\tau=100$ ms	$\tau=100$ μs	$\tau=100$ ms	$\tau=100$ μs	$\tau=100$ ms	$\tau=100$ μs	$\tau=100$ ms
0.55							4.9	0.16
0.66						1.4	0.86	0.08
0.91					9.8	0.27	0.60	0.11
1.2					1.1	0.09	0.16	0.15
1.5					0.37	0.11	0.18	0.18
2.0		0.86	4.1	0.11	0.33	0.15	0.24	0.24
3.5	2.1	0.08	0.77	0.13	0.26	0.26	0.41	0.41
5.0	3.2	0.11	1.8	0.18	0.76	0.35	0.54	0.54

が2箇所あるため、アパーチャ鏡のスリットの像がSi-Ge複合リニアアレイ検出器側の入射スリット部分に精度良く位置を合わせる必要があるためであり、結像用放物面鏡の調整によって元に復帰した。この原因による応答度の低下は、Si-Ge複合リニアアレイ検出器側全体で同じ割合で生じた。InSbリニアアレイ検出器側の応答度低下の主な原因は、KBrレンズ表面の一部に変色が生じたことから、この部分の劣化によると考えられる。これらの応答度低下は参照放射源の輝度データを用いて補正した。

4. 平面参照放射源による補正

試作した放射温度計を用いた測定の実例として、真空中で加熱したチタンの垂直分光放射率をFig. 4に示す。これは試作した放射温度計と通電加熱を用いた金属材料の垂直分光放射率測定装置¹⁾を用いて測定したもので、試料の純度は99.5%、2方向の平均表面粗さが0.23 μm 、および0.18 μm であった。放射率は試作した放射温度計により測定した試料表面の輝度と、別途測定した試料温度から算出した。

Fig. 4に点線で示した放射率は参照放射源を用いた光路吸収の補正を行う前の値であり、水蒸気の強い吸収帯である3 μm 付近に鋭いピークが生じた。一方、実線で示した放射率は光路吸収の補正を行った後の値であり、無酸化の金属本来の平坦な放射率分布が得られている。放射温度計の校正時は雨天であったのに対し、放射率測定時は晴天であった。

吸収補正の具体的な方法を以下に示す。

$$V_c(\lambda) = R(\lambda) \cdot \tau_c(\lambda) \cdot L_r(\lambda) \quad (1a)$$

$$V_m(\lambda) = R(\lambda) \cdot \tau_m(\lambda) \cdot L_r(\lambda) \quad (1b)$$

ここで(1a)式は黒体校正の際に参照放射源を観測したときの放射温度計の出力 $V_c(\lambda)$ を表しており、 $R(\lambda)$ は放射温度計の応答度、 $\tau_c(\lambda)$ は黒体校正時の光路透過率、 $L_r(\lambda)$ は参照放射源の輝度である。(1b)式は放射率測定の際に参照放射源を観測したときの放射温度計の出力 $V_m(\lambda)$ を表しており、 $\tau_m(\lambda)$

は放射率測定時の光路透過率である。

黒体校正時には黒体炉の温度を変えて多数回の測定を行ったが、それらの測定の中で、最高温度時の参照放射源の測定データを $V_c(\lambda)$ として採用し、他の温度の黒体校正データは光路吸収が最高温度のときと同じになるように補正した。 $\tau_m(\lambda)$ は $V_c(\lambda)$ と $V_m(\lambda)$ の比、および $\tau_c(\lambda)$ を用いて、(2)式に示すように表すことができる。

$$\tau_m(\lambda) = \tau_c(\lambda) \frac{V_m(\lambda)}{V_c(\lambda)} \quad (2)$$

一方、黒体校正時のデータはすべて、(3)式に示すように $\tau_c(\lambda)$ を含んでいる。(3)式の $V(\lambda, T)$ は放射温度計の出力、 $L_b(\lambda, T)$ 黒体炉の輝度であり、温度目盛は黒体放射ではなく $\tau_c(\lambda)$ によって吸収された黒体炉の放射に対して付けられているので、(4)式に示すように $V_c(\lambda)$ と $V_m(\lambda)$ の比を用いて放射率測定時の光路吸収補正を行うことができる。

$$V_0(\lambda, T) = R(\lambda) \cdot \tau_c(\lambda) \cdot L_b(\lambda, T) \quad (3)$$

$$V_1(\lambda, T) = V_0(\lambda, T) \frac{V_c(\lambda)}{V_m(\lambda)} \quad (4)$$

ここで $V_0(\lambda, T)$ は放射率測定用の試料を観測したときの出力、 $V_1(\lambda, T)$ は光路吸収が補正された同出力である。この補正は3 μm などの吸収が非常に強い数波長を除き、良好に行うことができた。

また、 $R(\lambda)$ に変動がある場合は光路吸収補正によって $R(\lambda)$ も同時に補正される。光路吸収が問題とならない2.2 μm 付近などの素子については、 $V_m(\lambda)$ 値を用いて放射温度計の応答度変動をモニターすることが可能である。

5. おわりに

多素子リニアアレイ検出器を複数用いた、電子走査型の多波長放射温度計を試作、評価した。Si-Ge複合リニアアレイ検出器を用いることにより、約0.5~1.6 μm の広い波長範囲を1つの回折格子によって分光測定した。InSbリニアアレイ検出器側を含めて2系統のみの分光検出部によって、広い波長範囲の同時測定を実現した。

単純で機械的な可動部の無い光学系によって高い安定度を実現し、さらに参照放射源を用いた補正を行うことによって、通常の単色放射温度計と同様に各波長に対して温度目盛を付け、長期間にわたる多数回の測定に用いることができた。また、波長走査部分だけでなく、赤外放射温度計で通常用いられるチョッパも除いたことにより、非常に速い応答速度を実現した。

参考文献

- 1) G. Ruffino: A New Multiwavelength Pyrometer: Design and Feasibility Study, Int. J. Thermophys., 13-1, 165/171(1992)
- 2) J. P. Hiernaut, R. Beukers, W. Heinz, R. Selfslag, M. Hoch, R. W. Ohse: Submillisecond six-wavelength pyrometer for high-temperature measurements in the range 2000 to 5000 K, High Temp.-High Pressures, 18, 617/625(1986)
- 3) T. Makino, K. Kaga, B. D. Brajuskovic: Proc. 2nd Asian Thermophys. Prop. Conf., 221/226

Fig. 4 Normal spectral emissivity of a titanium specimen heated up to 1100°C in vacuum. The dotted line and the solid line are the measured emissivity without atmospheric absorption compensation and the compensated emissivity, respectively

- 4) 小林正信, 大月未来, 坂手弘明, 佐久間史洋, 小野 晃: 金属材料の垂直分光放射率, 第 35 回 SICE 学術講演会予稿集, 313/314(1996)
- 5) 坂手弘明, 小林正信, 佐久間史洋, 小野 晃: Si-Ge 複合多素子検出器を用いた高速分光放射温度計, 第 33 回 SICE 学術講演会予稿集, 83/84(1994)
- 6) 小林正信, 坂手弘明, 佐久間史洋, 小野 晃: インジウムアンチモン多素子検出器を用いた高速分光放射温度計, 第 33 回 SICE 学術講演会予稿集, 87/88(1994)
- 7) 佐久間史洋, 服部 晋: 実用形定点黒体炉の試作, 計測自動制御学会論文集, 18-1, 52/57(1982)
- 8) 佐久間史洋, 服部 晋: シリコン単色放射温度計を用いた実用温度標準の確立のための検討, 計測自動制御学会論文集, 18-5, 482/488(1982)
- 9) 日本工業規格, JIS C 1612(1988)
- 10) 小林正信, 佐久間史洋, 小野 晃: 分光応答度の形を利用する放射温度計の特性式, 第 33 回 SICE 学術講演会予稿集, 89/90(1994)
- 11) 小林正信, 坂手弘明, 佐久間史洋, 小野 晃: 直流通電加熱を用いた垂直分光放射率測定装置, 第 34 回 SICE 学術講演会予稿集, 643/644(1995)

=====

[著 者 紹 介]

坂 手 弘 明

1941 年 7 月 21 日生. 64 年高知大学文理学部理学科(物理)卒業. 同年工業技術院計量研究所に入所. アークプラズマに関する研究に従事. 71 年~72 年フランス高温物理学研究所での在外研究の後, 放射测温技術および高温度定点の研究に従事して現在に至る. 計測自動制御学会, 日本分光学会, 日本光学会(応用物理学会)会員.

=====