0.65 μm 標準放射温度計の安定性

1. 波長安定性

佐久間 史 洋*・馬 萊 娜*

Stability of 0.65 μm Standard Radiation Thermometer

1. Spectral Stability

Fumihiko SAKUMA* and Laina MA*

0.65 μm radiation thermometers are used as the standard thermometers at high temperatures. The spectral stability of these thermometers influences largely on the calibration uncertainty. Little information is available about the spectral stability. Therefore, we studied the long-term spectral stability of ten 0.65 μm radiation thermometers. Most radiation thermometers had the tendency that the effective wavelengths moved to longer wavelengths in course of time. Some thermometers showed that their effective wavelengths moved at a rate about 0.1 nm/year. Interference filters with hard coating showed very stable effective wavelengths. Three radiation thermometers showed large changes in effective wavelengths and once the effective wavelengths started to move, they did not stop. Thermometers with their effective wavelengths moving more than 0.2 nm/year need to be repaired with the filter. The scale of standard radiation thermometers should be managed on the base of this knowledge.

Key Words: radiation thermometer, spectral stability, interference filter, long term, effective wavelength

1. はじめに

0.65 μm 標準放射温度計は960°C~3000°Cの高温における温度目盛の実現に使用される¹⁾。産業技術総合研究所(産総研)では銅点黒体校正, 分光応答度測定, 非線形性測定の3つの測定により, 1990年国際温度目盛(ITS-90)²⁾を実現している。標準放射温度計を目盛付けしてから校正に使用するまでに時間差があり, その間に目盛が経年変化を生ずる。このため放射温度計の安定性が重要となる。安定性が悪ければ, 頻繁に校正することが必要となり, 逆に非常に安定であれば最初の校正だけでよい。しかしながら標準放射温度計の長期安定性に関する報告は少ない。放射温度計の安定性では, 波長の安定性と出力の安定性とに大別される。波長の安定性はほとんどの寄与が干渉フィルターによる。出力の安定性は, 光学系, 電気系双方による。光学系では, 対物レンズ等の汚れとフィルターの劣化, 電気系では増幅器の増幅率の変化が主な要因である。この論文では産総研での経験を基

に, まず, 放射温度計に関する波長の長期的安定性について報告する。

2. トプコン放射温度計

産総研では初期の設計以来6台, 改造を含めてのべ10台のトプコン製0.65 μm 標準放射温度計を扱ってきた。これらは標準の設定, 国内の標準供給, 国際比較などに用いられてきた。その光学系をFig. 1に示す。初期の放射温度計は干渉フィルターが1枚の1枚型で, そのスペクトルは長波長側にピークの 10^{-4} 程度の裾を引いていたが, 1993年以降に産総研が発注, 改造した放射温度計は2枚型で, 波長を決め

Fig. 1 Optical system of radiation thermometer

* 産業技術総合研究所 つくば市梅園 1-1-1

* National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 1-1-1 Umezono, Tsukuba
(Received November 1, 2005)
(Revised January 21, 2006)

Table 1 Spectral specifications of radiation thermometer

	One Filter Type, OCJ	Two Filter Type, Topcon	Two Filter Type, OCJ	Two Filter Type, Barr
Thermometer	RT1, RT2, RT3	RT4	RT5, RT6, RT7	RT8, RT9, RT10
Filter 1	W-type	TO-399	DIF-BPF-2	Hard coating
Manufacturer	OCJ	Topcon	OCJ	Barr
center (nm)	651	651	650	649.3
bandwidth(nm)	14.7	13.3	16.8	14.7
Filter 2	no	DIF-BPF-5	DIF-BPF-5	DIF-BPF-5
Manufacturer	no	OCJ	OCJ	OCJ
center (nm)	no	650	650	650
bandwidth(nm)	no	100	100	100
Detector	S 874-5 K	S 1336-5 BK	S 1336-5 BK	S 1336-5 BK

るバンド幅 15 nm 程度の干渉フィルター以外に、中心波長が同じでバンド幅 100 nm 程度の干渉フィルターをもう 1 つ挿入し、裾切れをピークの 10^{-6} 以下に抑えることにより、実効波長が 1100°C 以下の温度で急激に長波長側に变化することを防いでいる³⁾。Fig. 1 は改造したもので、2 枚の干渉フィルターがあり、多重反射を防ぐために検出器側のフィルターを斜めにしてある。分光特性に関しては 2 枚型はさらに 3 つに分類され、1 枚型と合わせて 4 つのタイプに分類される。各タイプ放射温度計の主な特性を Table 1 に示す。

1) 1 枚型 初期の設計のもので、干渉フィルターが 1 枚であり、日本真空光学(OCJ)製の W 型金属干渉フィルターを用いたもので、放射温度計 RT 1 から RT 3 の 3 台である。W 型は単層の S 型金属干渉フィルターを 2 枚重ねたもので、S 型よりもバンド幅が広くて裾の立ち上がりが鋭い⁴⁾。そのスペクトルでは、ピークと肩が見える。

2) 2 枚型 波長決定用と裾抑制用と用途別に 2 枚の干渉フィルターを用いたもので、放射温度計は RT 4～RT 10 の 7 台である。波長決定用には RT 4 がトプコン製 TO-399、RT 5～RT 7 が日本真空光学製の全誘電体干渉フィルター DIF-BPF-2、RT 8～RT 10 が Barr 製のハードコーティングを使用しており、裾抑制用にはいずれも日本真空光学製の全誘電体干渉フィルター DIF-BPF-5 を使用した。全誘電体干渉フィルターは金属の代わりに誘電体を用いており、こちらの方が裾の切れがよく、透過率も高い⁴⁾。ハードコーティング加工したものは、リモートセンシングで衛星搭載放射計などに利用され、宇宙の過酷な環境で安定な性能を得るために開発されたフィルターであり、プラズマイオンプロセスを用いて製造される。

3. 分光応答度測定

放射温度計の分光応答度測定には 1985 年に産総研で開発した装置 1 を用いた⁵⁾。また、1993 年に開発し、短波長赤外域まで拡張した装置 2 でも一部測定を行ない、差を比較した。いずれも 0.65 μm 放射温度計の分光応答度測定には、

定格電力 150 W のハロゲン電球を光源とし、コリメーター焦点距離 25 cm の零分散式二重回折格子分光器で分光し、サーモパイルを標準検出器、シリコンフォトダイオードを参照検出器として、放射温度計の出力とサーモパイルの出力との比の測定を波長ごとに行なう。サーモパイルの応答度が波長に依存しないとして、その出力比を放射温度計の分光応答度の相対値とする。サーモパイルと放射温度計を直接比較しないのは、サーモパイルの感度が低いので、スリット幅を 3.5 mm (10 nm 相当) に広げた状態のみで測定するためである。放射温度計の測定では、スリット幅 3.5 mm で 400 nm～1250 nm の測定のほか、0.35 mm (1 nm 相当) で 600 nm～700 nm、0.04 mm (約 0.1 nm 相当) で 640 nm～660 nm での測定を行なう⁶⁾。測定日ごとに分光器のスリット幅 0.04 mm に対し水銀ランプの輝線 11 点を用いた波長校正を行ない、400 nm～1100 nm まで 0.2 nm よりも大きな偏差がないことを確認するとともに、放射温度計応答のピーク付近の 625 nm および 730 nm の 2 点での校正の平均値で補正している。1997 年 12 月以降は実験室の室温が 1 年中昼夜 23°C $\pm$ 1°C 以内に制御されるようになり、分光器の波長安定性もよくなった。

4. 目盛の値付けと波長の管理

温度 T の黒体に対する放射温度計の出力 V は、測定された放射温度計の波長 λ に対する分光応答度の測定データ R に温度 T における黒体の分光放射輝度 $L(\lambda, T)$ (Planck の式) を掛けて波長について積分した値に比例する。

$$V(T) = a \cdot \int L(\lambda, T) \cdot R(\lambda) \cdot d\lambda \quad (1)$$

比例定数 a は、銅点黒体での校正值 V_{cu} を基に決定する。

$$a = V_{cu} / \int L(\lambda, T_{cu}) \cdot R(\lambda) \cdot d\lambda \quad (2)$$

これで温度と出力の関係が求まる。つぎに銅点 T_{cu} 、2000°C、3000°C での計算出力値から補間式⁷⁾

$$V(T) = \frac{C}{\exp\left(\frac{c_2}{AT+B}\right) - 1} \quad (3)$$

の係数 A, B, C を決める。なお、 $c_2 = 0.014388 \text{ m} \cdot \text{K}$ は放射の第 2 定数である。バンド幅が狭い場合かつ裾の切れがよい場合には補間式 (3) が (1) 式のよい近似式となる。産総研では、この 3 係数で放射温度計の校正記録を管理している。3 係数のうち、 A, B が波長に関係し、 A は中心波長、 B はバンド幅と関係が深い。銅点と銀点 T_{Ag} との間の平均実効波長 λ_M は次式で近似される⁸⁾。

$$\lambda_M(T_{cu}, T_{Ag}) = A \cdot (1 + B/AT_{cu}) \cdot (1 + B/AT_{Ag}) \quad (4)$$

以下では、主にこの実効波長の経年変化を見ていく。

5. 測定結果

5.1 1 枚型

1 枚型は日本真空光学製の W 型の金属膜干渉フィルターを有する。Fig. 2 に放射温度計 RT 1、RT 2 の中心波長お

よび RT 3 の実効波長の経年変化を示す。中心波長は分光応答度スペクトルのピークの半値を取る 2 つの波長の midpoint である。RT 1 および RT 2 の 2 台は、データが 1989 年以前のため管理方法が異なり、中心波長で示した。黒菱形の RT 1 は比較的安定であり、84 年 5 月～89 年 2 月までの間で中心波長がピークからピークまで 0.3 nm p-p の範囲内であったが、四角白抜ききの RT 2 は 84 年 8 月～89 年 2 月までで 2.2 nm 長波長側に变化した。この間の波長変化の平均は 0.5 nm/年である。バンド幅(半値全幅)も 15.7 nm から 17.2 nm に増加した。三角白抜ききの RT 3 も RT 1 と同様に 93 年 11 月～97 年 1 月までの間で実効波長の範囲が 0.3 nm p-p に収まり比較的安定であった。

5.2 2 枚型, トプコンフィルター

TO-399 フィルターを用いた放射温度計 RT 4 の変化を Fig. 3 に示す。RT 4 は、95 年 6 月～05 年 6 月までの間で実効波長が 0.7 nm 長波長側に变化した。この間の平均は 0.07 nm/年の変化である。最近安定してきたように見える。バンド幅に変化はなかった。

5.3 2 枚型, 日本真空光学全誘電体フィルター

放射温度計 RT 5, RT 6 および RT 7 は DIF-BPF-2 を用いている。これらの経年変化をそれぞれ Fig. 4 に示す。四角白抜ききの RT 5 は最初の 3 年間安定であったが、その後の

2 年で 2 nm 長波長側に变化した。バンド幅は変化していない。三角白抜ききの RT 6 は最初の 1 年間安定だったが、その後 2 年間直線的に 1.5 nm/年で变化した。黒丸の RT 7 は購入当初は中心波長が長波長側に变化していたが、その後 0.1 nm/年程度に収まってきた。RT 4 と同じような変化のしかたである。いずれもバンド幅にほとんど変化がなかった。

5.4 2 枚型, Barr フィルター

放射温度計 RT 8, RT 9 および RT 10 は Barr のハードコーティング加工したフィルターを用いている。これらの実効波長の変化を Fig. 5 に示す。黒四角の RT 8 は 3 年間で 0.1 nm p-p 以内で安定であった。黒三角の RT 9 は最初 3 年間で 0.04 nm p-p の安定性であり、その後 4 年間金属炭素共晶点の測定に用い、3000°C までの高温という過酷な条件で長期間使用した。それでも波長の変化は Fig. 5 に黒三角で示すように 4 年間で -0.05 nm 以内で小さな変化であった。また、RT 10 は産総研の標準として国内の標準供給および国際比較に使用してきた。Fig. 5 に菱形白抜ききで示すように 8 年間で 0.1 nm p-p 以内で非常に安定だった。直線近

Fig. 2 Spectral stability of radiation thermometers RT 1 (closed diamond), RT 2 (open square) and RT 3 (open triangle)

Fig. 3 Spectral stability of radiation thermometer RT 4

Fig. 4 Spectral stability of radiation thermometers RT 5 (open square), RT 6 (open triangle) and RT 7 (closed circle)

Fig. 5 Spectral stability of radiation thermometers RT 8 (closed square), RT 9 (closed triangle) and RT 10 (open diamond)

似を行ない、傾きを求めると 0.0056 nm/年 と小さな値であり、8 年間に測定した 23 データの近似直線からの標準偏差は 0.02 nm と小さかった。この数値は放射温度計の安定性のよさを示すとともに、測定装置 1 の再現性のよさを示している。

6. 議 論

6.1 測定装置による差

分光応答度の装置 1 と装置 2 で放射温度計 RT 10 を 3 年間測定した比較を Fig. 6 に示す。これらの装置は原理的に同じ構成であり、測定結果も平均で 0.03 nm の差以内で一致していた。装置の違いによる実効波長の再現性を 0.03 nm と評価した。

6.2 実効波長と中心波長

Fig. 2 の RT 1 および RT 2 では中心波長で、Fig. 2～5 までのそのほかの放射温度計 RT 3～RT 10 では実効波長で経年変化を評価していたが、直接測定データが得られる分光応答度スペクトルの中心波長と積分計算して得られる実効波長との比較を行なった。Fig. 7 に実効波長と中心波長の差を示す。中心波長に比べて、銅点と銀点の平均実効波長は約 1.7 nm 長波長側にある。これらの温度では黒体の放射スペクトルのピークはフィルター中心波長の長波長側にあり、その影響で実効波長も中心波長の長波長側に来ている。なお、この

Fig. 6 Comparison of the results between spectral responsivity measurement instruments 1 and 2

Fig. 7 Difference of mean effective wavelength from center wavelength. Mean effective wavelength was between silver point and copper point.

差が 0.1 nm p-p でばらついているが、中心波長の読みとりが 0.1 nm までであり、目視の読み取り誤差によると思われる。このようにバンド幅が変わらない場合は、実効波長の変化を管理すれば、中心波長の変化もわかる。

6.3 放射温度計用干渉フィルターの変化

干渉フィルターの中心波長の経年変化は、典型的には 0.08 nm/年 程度であり、 0.2 nm/年 変化するものもあると報告されている⁹⁾。産総研の場合、放射温度計 RT 4 および RT 7 がこの典型例に属する。RT 2, RT 5 および RT 6 が大きく変化しており、フィルターの交換が必要であった。1 枚型 W 型金属膜干渉フィルターを用いた RT 1 と RT 3 および 2 枚型の Barr の干渉フィルターを用いた RT 8, RT 9 および RT 10 の実効波長が安定であった。1 枚型と 2 枚型という種類よりも波長を決めるのに用いたフィルターおのこの安定性が問題になると思われる。

Barr のハードコーティング加工した干渉フィルターは長期的に安定であった。1 枚は 3 年間で 0.1 nm 以下、残りの 2 枚は 8 年間で 0.1 nm 以下の変化であった。性能としては非常によく、推薦できるフィルターである。残念ながら、価格が非常に高いのが難点である。2 年ほど前に価格がさらに 4 倍になったとのことで、さらにハードルが高くなった。国内でもハードコーティング加工のフィルターを製造しているが、やはり値段が高い。今回の報告では、ハードコーティングだからよかったのか、あるいはメーカーの技術がよかったのかさらにはそのフィルターの組がよかったのかは不明である。最近、トプコン放射温度計 2 台のフィルターを Barr のハードコーティング加工した干渉フィルターに変更中であり、異なる組の情報が得られる予定である。また、チノーが産総研と標準放射温度計を共同開発しており、その干渉フィルターに日本製のハードコーティングを採用した。今後その特性についての情報が得られると期待される。

6.4 波長変化の影響

6.4.1 中心波長が変化、銅点で補正しない場合

波長が $d\lambda$ だけ変化した場合の温度目盛の変化分 dT を求める。まずウィーンの様で近似する。

$$V = \frac{D}{\lambda^5} \exp\left(-\frac{c_2}{\lambda \cdot T}\right) \quad (5)$$

(5) 式の両辺の対数を取り、 λ および T について変分する。

$$\frac{dV}{V} = \left(-\frac{5}{\lambda} + \frac{c_2}{\lambda^2 \cdot T}\right) \cdot d\lambda \quad (6)$$

$$\frac{dV}{V} = \frac{c_2}{\lambda \cdot T^2} \cdot dT \quad (7)$$

(6) 式および (7) 式から dT を $d\lambda$ で表わすと (8) 式となる。

$$dT = \left(1 - \frac{5}{\frac{c_2}{\lambda \cdot T}}\right) \cdot T \frac{d\lambda}{\lambda} \quad (8)$$

$d\lambda = 0.2 \text{ nm}$ の場合の値を Fig. 8 に実線で示す。長波長側に变化した場合に $1000^\circ\text{C} \sim 3000^\circ\text{C}$ の範囲で出力が 0.3°C 程度

Fig. 8 Temperature scale change corresponding to the wavelength change of 0.2 nm. Solid line is without the correction by copper point calibration whereas broken line is with the correction

増加する。定点付近での変化は大きい、温度にあまりよらないという特長がある。これは(8)式の右辺でかっこ内が温度の増加とともに小さくなるためである。このかっこ内がなければ、温度変化は温度値 $T(K)$ に比例する。ウィーンの式の代わりにプランクの式を用いても結果は同じである。

6.4.2 銅点で校正し直す場合

中心波長が $d\lambda$ 変化した場合に変化した目盛を、銅点黒体で応答係数だけ校正し直したときの目盛の変化を求める。まず、(5)式で銅点 T_{Cu} での出力 V_{Cu} は次式で表わされる。

$$V_{Cu} = \frac{D}{\lambda^5} \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda \cdot T_{Cu}}\right) \quad (9)$$

(5)式と(9)式から次式が得られる。

$$\frac{V}{V_{Cu}} = \frac{\exp\left(-\frac{C_2}{\lambda \cdot T}\right)}{\exp\left(-\frac{C_2}{\lambda \cdot T_{Cu}}\right)} \quad (10)$$

この両辺の対数を取り、波長について変分する。

$$\frac{dV}{V} = \left(\frac{C_2}{\lambda^2 \cdot T} - \frac{C_2}{\lambda^2 \cdot T_{Cu}} \right) \cdot d\lambda \quad (11)$$

(7)式と(11)式から波長の変化に対する温度目盛の変化が導かれる¹⁰⁾。

$$dT = \frac{T(T_{Cu} - T)}{T_{Cu}} \frac{d\lambda}{\lambda} \quad (12)$$

$d\lambda = 0.2$ nm の場合の目盛の変化を Fig. 8 に破線で示す。銅点では差が零で、銅点から離れるにつれて、温度の2次式に従って差が大きくなる。2000°Cで0.5°C、3000°Cで1.4°Cの差を生ずる。

6.5 目盛の校正周期

現在日本電気計器検定所(日電検)で使用している0.65 μ m放射温度計は産総研で2年に1度校正を行なっている。0.1 nm/年を仮定して計算すると2年で0.2 nm変化する。これは、その後銅点校正を行なわない場合銅点付近で0.3°C、2000°Cで0.3°C変化する。また、銅点校正を行なった場合銅点付近で0°C、2000°Cで0.5°C変化する。産総研が日電検の0.65 μ m放射温度計に対して校正する拡張不確かさが銅点付

近で0.2°C、2000°Cで1°Cであり、2年間での経年変化が校正不確かさより大きくなる場合がある。こうした標準に使用される放射温度計の場合、実効波長が0.2 nm/年以上経年変化する放射温度計ではフィルターの交換が必要になる。

7. おわりに

干渉フィルターの経年変化では、ほとんど長波長側に変化する。中心波長の経年変化の原因は水分の影響と思われる。水分がフィルターを構成する薄膜内に吸収され、膜厚の増加および屈折率の変化を起こし、これらを総合した結果、中心波長が増加すると考えられる¹¹⁾。変化するフィルターには比較的初期から変化するものと最初は安定で途中から変化するものがある。最初変化しないからといって安心はできない。いったん大きく変化し出すとどんどん変化してしまう。

バンド幅については、中心波長が変化してもバンド幅がほとんど変化しない場合と、バンド幅も広がる場合とが見られた。バンド幅の広がる場合は、透過率も低下していた。

標準放射温度計の不確かさを考えると、0.2 nm/年以上変化するフィルターは交換が必要である。また、それ以下の平均変化を有する放射温度計の場合でも年に1度程度の波長の確認、たとえば放射温度計の銀点と銅点との出力の比の管理をすることなどが望ましい。最近各国の標準研究機関で盛んに開発が進められている金属-炭素共晶点¹²⁾を用いた高温黒体炉が簡単に利用できるようになれば、銅点と高温定点との出力比を管理することにより波長安定性の評価がより容易になると期待される。

以上の情報が今後の標準放射温度計の製作・維持管理に役立てば幸いである。

参考文献

- 1) 佐久間史洋：放射温度計のトレーサビリティ、計測と制御、40-9, 653/655(2001)
- 2) H. P. Thomas: The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90), Metrologia 27, 3/10 (1990)
- 3) 佐久間, 坂手: 改良型 0.65 μ m シリコン放射温度計の目盛の精度, 1994 年計測自動制御学会講演予稿集, 東京, 81/82(1994)
- 4) 日本真空光学(株)カタログ: 干渉フィルター, ホームページ <http://www.ocj.co.jp/japanese/index.html>
- 5) 小野, 佐久間, 服部: 可視・近赤外域放射温度計の分光応答度分布測定, 計測自動制御学会論文集, 23-4, 407/409(1987)
- 6) 佐久間, 小野, 服部: 分光応答度に基づく 0.65 μ m シリコン放射温度計の目盛設定, 計測自動制御学会論文集, 25-8, 910/912(1989)
- 7) F. Sakuma and M. Kobayashi: Interpolation Equation of Scales of Radiation Thermometers, Proc. TEMPMEKO '96, 39/44 Torino (1996)
- 8) H. J. Jung and J. Verch: Ein Rechenverfahren zur Auswertung pyrometrischer Messungen, Optik 38, 95/109 (1973)
- 9) J. Fischer, M. Sadli, M. Ballico, M. Battuello, S. N. Park, P. Saunders, Y. Zundong, B. C. Johnson, E. van der Ham, F. Sakuma, G. Machin, N. Fox, W. Li, S. Ugur and M. Matveyev: Uncertainty Budgets for Realisation of ITS-90 by Radiation Thermometry, Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry, 7, Part 2, 631/638 (2003), Edit. By D. C. Ripple AIP Conference Proc. 684

- 10) H. Preston-Thomas, P. Bloembergen and T.J. Quinn :
Supplementary Information for the International Temperature Scale of 1990, CCT WG1 Report, BIPM, 143/163 (1990)
- 11) Sh. A. Furman and M. D. Levina : Effect of Moisture on the Optical Characteristics of Narrow Band Interference Filters, Opt. Spectros, **30**, 404/408 (1971)
- 12) M. Sadli, J. Fischer, Y. Yamada, V. Sapritsky, D. Lowe and G. Machin : Review of Metal-Carbon Eutectic Temperatures: Proposal for New ITS-90 Secondary Points, Proc. of 9th International Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science, Cavtat, **1**, 341/348 (2004)

~~~~~

[著 者 紹 介]

佐久間 史 洋 (正会員)

1979年東京大学大学院理学系研究科修了。理学博士。同年工業技術院計量研究所入所。放射温度標準の設定維持供給の研究、リモートセンシングの研究に従事。現在産業技術総合研究所 計測標準研究部門 温度湿度科 放射温度標準研究室所属。

馬 萊 娜

1986年天津大学電子工学科修士課程修了。82年～93年天津大学電子工学科講師。93年～97年東海大学電子工学科訪問研究員。現在産業技術総合研究所 計測標準研究部門 温度湿度科 放射温度標準研究室所属。放射温度標準に関する測定に従事。

~~~~~