0.65 μm 標準放射温度計の安定性

2. 出力安定性

佐久間 史 洋*・馬 萊 娜*

Stability of 0.65 μm Standard Radiation Thermometer

2. Output Stability

Fumihiko SAKUMA* and Laina MA*

0.65 μm radiation thermometers are used as the standard thermometers at high temperatures. The stability of these thermometers influences largely the calibration uncertainty. Little information is available about the long-term output stability. Therefore, we studied the long-term output stability of ten 0.65 μm radiation thermometers by conducting repeated calibration with the fixed-point blackbodies. Most radiation thermometers showed the tendency that the output signal increased in course of time. Some increases were ascribed to the filter wavelength change. When the center wavelength of the filter shifted to a longer wavelength, the output signal increased. Some thermometers showed a one percent decrease in a short period. These decreases were recovered after cleaning the objective lens. Therefore it is important to be careful not to contaminate the objective lens. The long term stability of the normal thermometer output is estimated to be within 2% per year including the wavelength contribution and 0.2% per year for the gain contribution.

Kew Words: radiation thermometer, output stability, long term, fixed-point blackbody, filter, contamination

1. はじめに

0.65 μm 標準放射温度計は 960°C から 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。波長の安定性については干渉フィルターによる寄与がほとんどである。出力の安定性は、光学系、電気系双方による。光学系では、対物レンズなどの汚れとフィルター透過率の劣化、電気系では増幅器の増幅率の変化が主な要因である。さきに報告した分光応答度の安定性に関する論文³⁾では、実効波長が長波長側

にシフトする放射温度計がいくつかあったことを示した。この論文では産総研での定点黒体による校正結果を基に、放射温度計出力の長期的安定性について報告する。

2. 測定機器

2.1 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³⁾。これらのうち 3 台は日本真空光学(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。RT 4 はトプコン製 TO-399, RT 5 から RT 7 は日本真空光学製の全誘電体干渉フィルター DIF-BPF-2, RT 8 から RT 10 は Barr 製のハードコーティングを使用した。放射温度計の番号は参考文献 3) と同じである。

黒体温度 T におけるトプコン放射温度計の出力 $V(T)$ は 3 係数 A, B, C を用いてつぎの補間式でよく近似される^{3), 4)}。

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

ここで、 c_2 は放射の第 2 定数 (0.014388 m·K) である。 A および B は実効波長に関する係数であり、分光応答度の測定から決められる。 C はゲイン等に関する係数である。実効

* 産業技術総合研究所計測標準研究部門 つくば市梅園 1-1-1

* National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 1-1-1 Umezono, Tsukuba

(Received October 17, 2006)

(Revised January 11, 2007)

波長の変化による出力の変化 R_w は次式から計算される。

$$R_w = \frac{\exp\left(\frac{c_2}{A_0 T + B_0}\right) - 1}{\exp\left(\frac{c_2}{AT + B}\right) - 1} - 1 \quad (2)$$

ここで、 A_0 および B_0 はそれぞれ最初の A および B の値である。またゲインなどの変化による出力変化 R_G は

$$R_G = \frac{C}{C_0} - 1 \quad (3)$$

と表わされる。全出力の変化 R_T は R_w および R_G が小さいとして両者の和で表わされる。

$$R_T = R_w + R_G \quad (4)$$

2.2 定点黒体

使用した定点黒体は銅点(1084.62°C)および銀点(961.78°C)であり、空洞放射率 0.999, 輝度の繰り返し再現性 0.01%, 輝度の標準不確かさ 0.1% である⁴⁾。なお、最近では空洞出口に黒鉛製の開口絞りを追加したものも使用しており、絞り径 3 mm および 6 mm について、それぞれ空洞放射率を 0.9998 および 0.9995 と評価している。

3. 定点黒体測定結果

3.1 W 型金属膜干渉フィルター

W 型は日本真空光学製であり、Fig. 1, 2 および 3 にそれぞれ放射温度計 RT 1, RT 2 および RT 3 の銅点および銀点における出力の経年変化をそれぞれ黒菱形および黒四角で示す。比は初期値を 1 にして規格化してある。Fig. 1 の RT 1 は比較的安定であり、1984 年 5 月から 1990 年 7 月までの間で銅点および銀点における出力の変化が途中 $\pm 1\%$ 以内でばらついたが結局 0.8% 増加した。銅点、銀点は同じように変化している。図に三角形で示す銀点と銅点との出力比は 0.1% 程度増加しており、非常に安定であった。分光応答度測定における中心波長もその期間に 0.3 nm 長波長側に变化した。銅点、銀点における出力の変化を中心波長変化から見積もる

Fig. 1 Output ratios of radiation thermometer RT 1 at the copper (diamond) and silver (square) points. The triangle shows the ratio between silver and copper points. Open diamond and square denote their ratios calculated from the spectral responsivity.

のに放射温度計 RT 1 および RT 2 ではつぎの式³⁾を用いた。

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

ここで dV は出力 V の変化分, λ は波長, そして T は温度である。中心波長の変化から銅点、銀点における出力の変化を見積もった値を Fig. 1 の白抜き菱形および四角に示した。見積もりでは 0.5% 程度出力が増加しているはずであるが、実際の出力増加は 0.8% 程度であった。また、途中での見積もりからの差は $\pm 0.8\%$ 以内であった。なお、以下の Fig. 2~Fig. 10 でも図中の記号の意味は同じである。図の縦軸についてもすべて 1% の目盛間隔に統一してある。

Fig. 2 の RT 2 は銅点および銀点での出力が 1984 年 8 月から 1989 年 2 月まででいずれも 2.5% 程度減少した。この間の中心波長の平均変化は +0.5 nm/年である³⁾。バンド幅(半値全幅)も 15.7 nm から 17.2 nm に増加した。Fig. 2 の白抜き菱形および四角に示す、中心波長変化から見積もられた値は出力が増加しているが、実際の定点測定では出力が減少しており、これからフィルターの透過率の減少が 6.5% 程

Fig. 2 Output ratios of radiation thermometer RT 2 at the copper (diamond) and silver (square) points. The triangle shows the ratio between silver and copper points. Open diamond and square denote their ratios calculated from the spectral responsivity.

Fig. 3 Output ratios of radiation thermometer RT 3 at the copper (diamond) and silver (square) points. The triangle shows the ratio between silver and copper points. Open diamond and square denote their ratios calculated from the spectral responsivity.

度と見積もられる。1989年のデータで銅点のほうが銀点の下側に来ているが、この差の大きさは中心波長変化から予測されたものと測定結果がよく一致している。このことについては定黒体の出力比の変化から波長安定性評価を試みた報告⁴⁾で詳しく述べた。

Fig. 3のRT 3は銅点および銀点での出力が1993年から1997年の間に $\pm 1.5\%$ 程度変化してほぼ元に戻った。実効波長の変化から評価した影響は0.5%以下で小さかった。この放射温度計の途中における出力安定性について後で議論する。

3.2 トプコン製フィルター

TO-399 フィルターを用いた放射温度計 RT 4 の出力変化を Fig. 4 に示す。RT 4 は、1994 年 6 月から 1995 年 10 月までの間で銅点および銀点における出力が1993年に比べて

Fig. 4 Output ratios of radiation thermometer RT 4 at the copper (diamond) and silver (square) points. Open diamond and square denote their ratios of wavelength contribution. Closed diamond and square connected by broken lines denote those of gain contribution.

Fig. 5 Output ratios of radiation thermometer RT 5 at the copper (diamond) and silver (square) points. Open diamond and square denote their ratios of wavelength contribution. Closed diamond and square connected by broken lines denote those of gain contribution. The arrow indicates the contamination of the objective lens.

0.5%程度減少していたが、その後徐々に増加し、2.5%程度増加した。1996年からの変化は(2)式から計算し、図に点線で示した、実効波長が変化したことによる出力変化にびつたりと対応している。すなわち、この温度計は図に破線で示した、(4)式によるゲインなどの変化だけを見ると13年間0.6%以内の安定性であり、波長特性を除いては非常によく安定していたと言える。なお、銀点と銅点との出力比も13年間0.2%以内で安定していた。

3.3 日本真空光学製全誘電体フィルター

放射温度計 RT 5, RT 6 および RT 7 は日本真空光学製全誘電体フィルターDIF-BPF-2を用いている。これらの経年変化をそれぞれ Fig. 5, 6, 7 に示す。RT 5 は銅点および銀点での出力が最初の3年間安定であったが、図に矢印で示すように、2000年4月に産総研の校正室で校正中に1.6%の出力低下を生じた。メーカーに戻してレンズの洗浄をしてもらったのち再校正を行なったところ出力が再現した。2003年以

Fig. 6 Output ratios of radiation thermometer RT 6 at the copper (diamond) and silver (square) points. Open diamond and square denote their ratios of wavelength contribution. Closed diamond and square connected by broken lines denote those of gain contribution.

Fig. 7 Output ratios of radiation thermometer RT 7 at the copper (diamond) and silver (square) points. Open diamond and square denote their ratios of wavelength contribution. Closed diamond and square connected by broken lines denote those of gain contribution.

降、波長が長波長側に変化し始めたのに対応して2005年までに出力が7%増加した。実効波長の変化を除くとゲインなどの変化による出力安定性は図に点線で示すように1%以内であった。

Fig. 6のRT 6も1994年から1997年の間に銅点および銀点における出力が6%増加した。この間に実効波長は長波長側に2.5 nm 変化した。この変化の出力への寄与はFig. 6に点線で示すとおり出力変化とほぼ同じである。図に破線で示す、ゲインなどの変化による出力安定性は1%以内であった。

Fig. 7のRT 7も2001年から4年間で銅点および銀点における出力が1.5%増加した。この間の実効波長変化は0.5 nm, 出力変化への寄与は図に点線で示すように1%程度であり、実際の出力変化のほうが0.5%大きかった。図に破線で示す、ゲインなどの変化による出力安定性は0.5%以内であった。

3.4 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。Fig. 8に示すRT 8は2線の矢印で示すように、1999年の後半に電気回路を改造したので、安定性はとびとびになるが、1998年1月から1年半で出力が0.2%減少した。実効波長の変化の影響も同程度であった。1999年から半年で銅点および銀点における出力が0.2%および0.1%減少したが、図に矢印で示すように、レンズを洗浄したところ0.3%増加し、0.1%から0.2%の増加となった。実効波長の変化の寄与も増加の方向であった。

Fig. 9のRT 9は銅点および銀点における出力が減少し、図に矢印で示すように2000年初めには98.3%まで下がっ

Fig. 8 Output ratios of radiation thermometer RT 8 at the copper (diamond) and silver (square) points. The triangle shows the ratio between silver and copper points. Open diamond and square denote their ratios calculated from the spectral responsivity. The thick arrow indicates the revision of the electronic circuit. The arrow indicates the contamination of the objective lens.

た。対物レンズの洗浄をしたところ出力が1%回復した。その後2005年まで出力は0.3%程度の減少であった。この間実効波長もほとんど変化せず、波長変化による出力変化は無視できた。

また、Fig. 10に示すRT 10は、国際比較や目盛付けの確認などに産総研でよく利用している放射温度計である。1997年から2001年まで1.5%出力が増加した。2001年から2006年まで0.5%以内で安定していた。2000年にRT 5およびRT 9と同じように1%余りの出力の低下が生じ、レンズの洗浄により回復した。2005年5月にも0.5%の低下が生じており、この際もレンズの洗浄で回復した。1997年から2006年まで実効波長の変化は0.1 nm 以下であり、波長の変化による出力変化への寄与は図に点線で示すようにほとんどなかった。

Fig. 9 Output ratios of radiation thermometer RT 9 at the copper (diamond) and silver (square) points. The triangle shows the ratio between silver and copper points. Open diamond and square denote their ratios calculated from the spectral responsivity. The arrow indicates the contamination of the objective lens.

Fig. 10 Output ratios of radiation thermometer RT 10 at the copper (diamond) and silver (square) points. The triangle shows the ratio between silver and copper points. Open diamond and square denote their ratios calculated from the spectral responsivity. The arrows indicate the contamination of the objective lens.

4. 議 論

4.1 放射温度計出力の増加

レンズの汚れを想定すると放射温度計の経年変化としては出力の減少が予想されるが、トプコンの0.65 μm 放射温度計は出力が増加する傾向がRT 4~RT 7およびRT 10の5台で見られた。このうちRT 4~RT 7の4台については波長が長波長側に变化したことでうまく説明ができたが、波長の非常に安定なRT 10については、出力増加を光学系の変化で説明することは難しい。増幅器などの電気系が变化したものと考えられる。

4.2 対物レンズの汚れ

放射温度計の保管については使用しないときは蓋をするなどレンズの汚れには十分注意を払ってきたが、2000年前半に多くの放射温度計でレンズの汚れを生じた。出力の減少はRT 5, RT 9, RT 10でいずれも1%程度、RT 8で0.3%であり、どれもレンズの洗浄により出力が回復した。RT 9およびRT 10では一度に出力が低下したわけではなく、3ヶ月ぐらい掛けて低下している。これ以外に他の波長の放射温度計でも同様の現象が生じた。

当時隣の建物を新築工事中であり、空調を通してにいが侵入してきたりした。こうした外気のせい、あるいは校正室内の機器から汚れが生じたかは不明であった。対策として機器の中では一番怪しいと思われるサーモゲージ比較黒体炉の開口の前にエアカーテンを付けた。

2000年の汚れが生ずるまで産総研では放射温度計のレンズが汚れると、カメラ用ブローアあるいはエアクリーナを用いてゴミを除くだけで、対物レンズの洗浄はしていなかった。この問題の生じた直後は、測定日ごとに対物レンズをアルコールでぬらした洗浄紙で拭いた。しかし、洗浄によりいつも出力が増加するわけではなく、減少する場合もあった。そのため、定点黒体測定の際に1回目のデータが以前のデータより出力の低下が明確に観測された場合にのみ対物レンズをアルコールで洗浄することとした。

2000年の大きな出力低下だけでなく、2003年のRT 10でも出力の低下が観測され、対物レンズの洗浄により回復した。その対策として面積効果測定の際に積分球の前面に置いた石英板交換を行なうとき、放射温度計の蓋を閉めて交換することとした。

4.3 出力の安定性

Fig. 3におけるRT 3は1993年の出力と1997年の出力がほぼ同じで途中で出力が1.5%上下している。このような振る舞いは長期安定性としては考えにくく、他の要因を考慮する必要がある。なお、定点黒体は通常3回測定しており、3つのプラトーの差は通常0.1%以内で一致していた。基準としている定点黒体、電圧計、室温の変化、放射温度計と測定対象との距離(測定距離)の違い、焦点合わせに要因を分けて考察する。

4.3.1 定点黒体

使用した銅点黒体および銀点黒体の安定性については学会の年会でそれぞれ報告した^{5),6)}。同じ定点2台の比較を行なった際によほどの問題がない限り0.12°C以内であるいは0.1%以内で一致している。このことはRT 1からRT 10までの放射温度計の出力の振る舞いが銅点と銀点に対してほとんど同じであり、両者の比が非常に安定していることから確認される。したがって $\pm 1\%$ 変化する原因は定点黒体ではない。

4.3.2 電圧計

現在校正室で使用している電圧計はアジレント製3458 Aであり、銅点および銀点における放射温度計の出力電圧である直流数十mVの出力に対して0.01%より小さい標準不確かさを有する。この電圧計は毎年校正に出しており、値が0.1%以上違うことはあり得ない。1995年以前は横河電機製2501 Aを使用していた。これは購入後校正に出さずに使用していたとき、10 mV以下のレンジで0.1%ほど値がずれたことが一度あった。修理の後このような大きなずれは生じていない。したがって電圧計による出力のばらつきへの寄与は0.1%以下であり、今回の出力変化の原因ではない。

4.3.3 室温

現在の校正室は1998年から使用しており、室温23°C $\pm$ 1°Cで通年安定している。1997年以前の校正室は空調があったが、勤務時間帯のみに稼働しており、測定に必要な際に延長が可能であった。このような事情から、1998年以降のデータは安定である。トプコン放射温度計では初期のものを除いて機器温度を測定しており、また0.65 μm 放射温度計の温度係数は $\pm 0.05\%/^{\circ}\text{C}$ 以内である⁷⁾。1993年から1997年間の定点測定におけるRT 3の機器温度は21°C~23°Cであり、温度係数を考慮すると機器温度の違いによる出力の変化は0.1%以内である。したがって $\pm 1\%$ 変化する原因は室温ではない。

4.3.4 測定距離

放射温度計の定点校正では最近では測定距離を決めて校正しているが、以前は測定距離を決めていなかった。測定距離は設計上200 mmから ∞ まで設定可能であるが、対象の開口径を考慮して実用的な距離を考えて測定距離を300 mmから500 mmまで変化したとして、出力変化を求めた。このときトプコン放射温度計の測定距離による出力の変化(距離効果⁸⁾)は0.1%以内である。したがって $\pm 1\%$ 変化する原因は測定距離ではない。

4.3.5 焦点合わせ

トプコン放射温度計では視準の際に、まずファインダーの接眼レンズの焦点を反射絞りの位置に合わせ、つぎに対物レンズの焦点を測定対象に合わせる。特に前者の調整を怠ると、見かけ上測定対象がはっきり見えていても実際には焦点がずれており、誤差の原因になる。焦点位置は個人により異なり、前の使用者の焦点から再調整する必要がある。1993年から1995年までの間に、測定者が3人交代しており、個

Table 1 Radiation thermometer number, total output change rate, its wavelength and gain contributions, and their standard deviations from the regression lines.

RT	Change rate (%/year)			Standard deviation (%)		
	Total output	Wavelength contribution	Gain contribution	Total output	Wavelength contribution	Gain contribution
RT1	0.23	0.08	0.12	0.33	0.10	0.36
RT2	-0.56	0.76	-1.32			
RT3	-0.16	0.17	-0.16	0.92	0.14	0.51
RT4	0.27	0.21	0.01	0.43	0.37	0.30
RT5	0.97	1.17	-0.14	1.15	1.13	0.13
RT6	1.92	2.84	-0.33	0.61	0.63	0.47
RT7	0.44	0.29	0.16	0.09	0.04	0.10
RT8	-0.08	-0.08	-0.01			
RT9	-0.06	-0.01	-0.06	0.22	0.03	0.24
RT10	0.14	0.02	0.15	0.25	0.05	0.26

人差と調整ミスが±1%の差を生じた可能性がある。RT 4でも1994年から1995年にかけて出力が低下しており、同じ原因により生じたものと推察される。

4.4 出力の長期安定性

放射温度計 RT 1 から RT 10 について、Table 1 に漸近直線近似を用いた安定性のデータを示す。左から放射温度計の番号、全出力の変化率、実効波長の変化による出力変化率、ゲインなどの変化による出力変化率、およびそれらの漸近直線からの差の標準偏差を示す。標準偏差がやや大きいのは4.3節で記述したデータのばらつきに起因するか、あるいは最初の変化が大きかったりして直線近似が良い近似でない場合である。Table 1 の左から2列目に示す全出力安定性は、実効波長の変化した RT 2, RT 5, RT 6 および RT 7 の安定性が悪く、0.4%/年から2%/年の値を取る。波長の安定な放射温度計の安定性は0.2%/年以内である。ゲインなどの安定性は、Table 1 の4列目に示すように、干渉フィルターの透過率の落ちた RT 2 および波長が大きく変化した RT 6 を除いて0.2%/年以内の変化であった。

放射温度計の出力 V が dV 変化したとすると、温度 T での温度変化 dT はつぎの式で表わされる³⁾。

$$dT = \frac{\lambda \cdot T^2}{c_2} \cdot \frac{dV}{V} \quad (6)$$

波長が0.65 μm の場合、出力変化0.2%が及ぼす、銅点、1500°C、2000°Cおよび2500°Cにおける温度値の変化はそれぞれ0.17°C、0.28°C、0.47°Cおよび0.69°Cとなる。これらの値は産総研で供給する標準目盛の標準不確かさと同程度であることから、標準放射温度計の定点校正は年に1度程度の頻度で行う必要がある。実効波長の変化にも対応するために、銅点および銀点黒体で同時に校正することが望ましい。

5. おわりに

トプコン0.65 μm 放射温度計の長期安定性について定点黒体を用いて調べ、実効波長の変化を補正し、対物レンズの汚れを洗浄した場合に安定性が通常0.2%/年以内であるこ

とがわかった。実効波長の変化による出力への影響が大きいので、波長変化していないのを監視すること、また対物レンズが汚れないように注意することが必要である。標準放射温度計としては、年1回程程度の割合で銅点および銀点黒体による校正を行なうことが望ましい。今後、0.65 μm 放射温度計の安定性について監視を続け、汚れの原因を特定したい。また0.9 μm 放射温度計についても安定性の評価を行なうとともに、温度係数の評価などについて詳しく調べる予定である。

参考文献

- 1) 佐久間史博：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，馬：0.65 μm 標準放射温度計の安定性 1. 波長安定性，計測自動制御学会論文集，42-6, 591/596 (2006)
- 4) 佐久間，馬：定点黒体による0.65 μm 放射温度計の波長安定性の評価，計測自動制御学会論文集，42-12, 1283/1287 (2006)
- 5) L. Ma and F. Sakuma: Long term stability of NMIJ copper-point blackbodies, Proc. SICE Ann. Conf. 2005 (2005)
- 6) L. Ma and F. Sakuma: Long Term Stability of Silver- and Aluminum-point Blackbodies, Proc. SICE Ann. Conf. 2004 (2004)
- 7) F. Sakuma and L. Ma: Calibration and characterization of the Transfer Standard Radiation Thermometer for APMP Intercomparison, Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry ed. by D. C. Ripple, American Institute of Physics, 7-2, 589/594 (2002)
- 8) F. Sakuma, L. Ma and Z. Yuan: Distance effect and size-of-source effect of radiation thermometers, Proc. Tempmeko '01 Berlin, 1, 161/166 (2001)

[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 菜 娜

1986年天津大学電子工学科修士課程修了。82年～93年まで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。