光高温計用標準リボン電球の輝度温度の時間遅れ[†]

藤原 哲雄*・高井 登*・服部 晋**

Transient Characteristics of Tungsten Strip Standard Lamps

Tetsuo FUJIHARA*, Noboru TAKAI* and Susumu HATTORI**

Transient characteristics of Toshiba tungsten ribbon strip lamps widely used for calibration of optical pyrometers were studied both for the initial transient (from the unlighted state to any state ready for pyrometer calibration) and for the intermediate transient (between two lighted states).

Measurements were carried out for four vacuum lamps and four gas-filled lamps under the condition of the constant current input and with the aid of a precise comparator of spectral radiances using photoelectric detection.

The results were so orderly arranged by means of the regression equation that the waiting time necessary for guaranteeing establishment of the steady state within the allowable limit can be evaluated easily and accurately for any luminance temperatures at which pyrometers are to be calibrated.

1. ま え が き

金点 (1064.43°C) 以上の高温の標準は光高温計用標準リボン電球によって値付けされている。一般の工場でも、この電球によって高温の標準が維持されている。

光高温計は普及度の高い高温用温度計であるが、その安定度は必ずしも十分ではなく、使用頻度の高い工場では数ヵ月に一度は、この標準電球で校正しなければならない。

標準電球は、フィラメントへの通電電流によって値付けされており、加熱電流による発熱量と、フィラメントからの伝導、放射、対流による熱損失とが平衡した状態で所定の輝度温度に達する。標準電球による校

正を正しく行うには、この定常状態を再現するに十分な待ち時間が必要である。標準電球の定常状態に達するまでの時間についての測定例は、これまでも見られたが¹⁾、それらは特定の電球の例にとどまっており、一般性のある測定とは必ずしもみなせないのが現状である。ここでは、大形真空電球4個、大形ガス入り電球4個について、光電的な測定法によって得られた、定常状態に達するまでに要する時間について示す。

この測定結果は、従来の測定例に比べ精度も高く、一般性も十分に期待できる。

2. 測定項目および測定法

2.1 測定項目

標準電球を用いて光高温計を校正する場合、電球を点灯する手順には、つぎの二つのケースが考えられる。

- ① 室温から校正しようとする輝度温度に直接点灯する場合
- ② ある設定温度から別の輝度温度に設定変更する場合

従来の測定例¹⁾では①のケースに限られていたが、実用的な測定ではむしろ②のケースが多い。

ここでの測定では、以上の点を考慮して、

- (1) T_0 の輝度温度が得られる校正電流で点灯したときの点灯直後から輝度温度の変化

($0 \rightarrow T_0$ 特性)

- (2) 設定温度 T_1 から別の輝度温度 T_2 に点灯電流を設定変更したときの、設定変更後の輝度温度の変化

($T_1 \rightarrow T_2$ 特性)

の2項目とした。

試料には、東京芝浦電気(株)製(注1)の大形真空電球4個と大形ガス入り電球4個とを用い、測定輝度温度は $0 \rightarrow T_0$ 特性では 1000°C, 1200°C, 1400°C (真空、ガス入り) および 800°C (真空) の4種類の輝度温度

(注1) 現在わが国で製造されている光高温計用標準リボン電球はすべて東芝製である。

[†] 第11回計測自動制御学会学術講演会で発表(昭47・8)

* 計量研究所大阪支所 大阪市北区北扇町75

** 計量研究所 東京都板橋区加賀1-10-4

* National Research Laboratory of Metrology, Osaka Branch, Osaka

** National Research Laboratory of Metrology, Itabashi-ku, Tokyo

(Received December 11, 1976)

を、 $T_1 \rightarrow T_2$ 特性では、真空電球に限定して、800°C, 900°C, 1000°C, 1100°C の輝度温度を選んで測定した。

2.2 測定法

測定には輝度比較装置²⁾を用いた。この装置は、2個の標準電球相互の分光放射輝度を直接比較するもので、分解能は 0.05 K (輝度温度 1000°C の場合)、応答速度 (時定数) は約 1 s である。

$0 \rightarrow T_0$ 特性は、一方の標準電球 R を特定の輝度温度の定常状態に維持し、他方の電球 S (試料) を R に等しい輝度温度 T_0 が得られる電流で点灯して、点灯直後からの比較装置出力の変化によって測定した。 $T_1 \rightarrow T_2$ 特性も同様に、電球 S を輝度温度 T_1 で点灯しておき、電球 R に等しい輝度温度 T_2 に設定変更したときの変化を測定した。

この比較装置では、比較する二つの標準電球の分光放射輝度の差にはほぼ比例した出力信号が得られる。

二つの標準電球はいずれも定電流電源を用いて点灯しており、この測定での出力信号の変化は、電球 S の分光放射輝度の時間遅れのみによって生じたものとみなせる。輝度温度の時間遅れは、このようにして得られた出力信号の変化を、記録紙から読み取り、輝度温度の変化に換算して求めた。定電流方式でない電源を用いた場合については、5. で考察する。

3. 時間遅れの特性とその回帰式

Fig. 1 に $0 \rightarrow T_0$ 特性の測定の一例を示す。これは比較装置出力を記録計に記録したものである。

定常状態での輝度温度 T_0 と、点灯後 (または設定変更後) Z min 経過した時点での過渡時の輝度温度 T_z との差 θ_z (単位 K) は、輝度温度の時間遅れを 1 次遅れとみなせば、

$$\theta_z = A \cdot \exp\left(-\frac{Z}{\eta}\right) \quad (1)$$

Fig. 1 Transient characteristic of a vacuum lamp at 1000°C from room temperature

Table 1 Time constants and their ranges
Vacum lamp

luminance temperature (°C)	800	1000	1200	1400
$\bar{A}$ (K)	26.2	17.3	7.1	2.0
η (min)	8.52	5.78	3.83	2.35
Range of η_i		0.48	0.32	0.60

Gas-filled lamp

luminance temperature (°C)	1000	1200	1400
$\bar{A}$ (K)	11.3	8.1	3.1
η (min)	2.63	1.65	1.63
Range of η_i	1.38	0.65	1.10

ただし

$$\theta_z = T_0 - T_z \quad (2)$$

A は定数、 η は時定数

この測定では、Fig. 1 のようにして得られた記録値を温度換算して、経過時間 Z に対する θ_z を求め、(1)式に代入して、時定数 η と定数 A を求めた (ただし、 η 、 A は $\theta_z < 20$ K の値によって推定している)。

Table 1 に室温から点灯したときの時間遅れ ($0 \rightarrow T_0$ 特性) の測定結果を示す。表の値は、Fig. 1 のような測定を多数回行って得られた値を整理したもので、表には 4 個の電球のおのおのについて (1) 式を適用して求めた個々の電球の A の平均値 $\bar{A}$ と、個々の電球の時定数 η_i の平均値 $\bar{\eta}$ および η_i のレンジを示した。

この表では、 η_i のレンジは小さく、これら 4 個の電球では時定数にほとんど差がないことがわかる。

Fig. 2 は、Table 1 の係数を適用して求めた、点灯後の経過時間 Z と輝度温度差 θ_z との関係を示したものである。

任意の輝度温度に対する一般式を得るための係数の

Fig. 2 Measured response curves of lamps

Table 2 Maximum deviation of measured value from experimental equation

Vacuum lamp		(K)			
min	°C	800	1000	1200	1400
5			0.98	-0.75	0.22
10		0.87	-0.32	-0.13	
15		0.12	0.22		

Gas-filled lamp		(K)			
min	°C	800	1000	1200	1400
5			-0.95	0.36	-0.10

$A(T_{\infty})$ および $\eta(T_{\infty})$ を

$$A(T_{\infty}) = B + CT_{\infty} \quad (3)$$

$$\eta(T_{\infty}) = \frac{a}{\exp(bT_{\infty})} \quad (4)$$

と置き, Table 1 の係数を代入して計算すれば, 真空電球では,

$$A_V(T_{\infty}) = 58.7 - 0.00414T_{\infty} \quad (5)$$

$$\eta_V(T_{\infty}) = \frac{48.31}{\exp(0.00214T_{\infty})} \quad (6)$$

ガス入り電球では,

$$A_G(T_{\infty}) = 32.2 - 0.0206T_{\infty} \quad (7)$$

$$\eta_G(T_{\infty}) = \frac{8.06}{\exp(0.00120T_{\infty})} \quad (8)$$

つぎに(1), (5), (6), (7), (8)式で表わされる回帰式の実測値 (Fig. 2) に対する適合度を Table 2 に示す. この表には, 実測した個々の電球の各輝度温度での時定数 η_i の回帰式 $\eta(T_{\infty})$ からの残差 $\{\eta_i - \eta(T_{\infty})\}$ のうちの最大値を示した.

この表から(1), (5), (6), (7), (8)式が ± 1 K 以内の良い適合度を有することがわかる.

Fig. 3 The time required for change of setting temperature

以上の実験と考察は, 一般の測定においては, この(1), (5), (6), (7), (8)式で十分な精度が得られ, 任意の輝度温度の時間遅れを推定できることを示している.

$T_1 \rightarrow T_2$ 特性についても, 前述の室温からの変化 ($0 \rightarrow T_0$ 特性) と同様な特性をもつと考えられる.

Fig. 3 に $T_1 \rightarrow T_2$ 特性の真空電球での測定結果を示す. これは, 試料電球 S の, 設定値変更前後の温度差 $\theta_z (= |T_1 - T_2|)$ と, 設定値変更後に新しい設定温度 (この場合 T_2) の ± 1 K 以内の温度に達するまでに要する時間 Z との関係を図示したものである.

これらの測定では,

- (1) θ_z の対数値 $\log \theta_z$ と経過時間 Z との関係は $0 \rightarrow T_0$ 特性に比べて非常によい直線性を呈する.
- (2) 電球個々による特性の違いは $0 \rightarrow T_0$ 特性よりもさらに小さい.
- (3) 目標とする輝度温度に上げてゆく場合のほうが下げてくる場合よりも若干早く定常状態に達する傾向がある.

などの特徴が観測された.

ガス入り電球の $T_1 \rightarrow T_2$ 特性は, 比較的時間遅れが大きい 1500°C から 1000°C への設定変更においても小さく, θ_z が 1 K に達するに要する時間は 5 min で, 実用上は無視できる.

4. 測定結果による特性の検討

標準電球では, フィラメント, 支柱, 口金, ソケットなどの熱容量が時間遅れに影響を及ぼす. この測定では, 時間遅れ θ_z は, 1 次遅れとみなして(1)式で近似したが, 厳密には, それらに対する配慮が必要で

Fig. 4 Measured response curve of lamp and its regression equation

$$\theta_{zi} = A_i \exp\left(\frac{Z}{\eta_i}\right)$$

ある。Fig. 4 に、試料に用いた4個の真空電球のうちから任意の一つの電球を選び、その電球を輝度温度1000°Cの点灯電流で点灯したときの過渡状態での輝度温度の変化(0→ T_0 特性)と、その特性から求めた(1)式による回帰特性とを示す。

標準電球の熱損失には、伝導、放射、対流の諸現象が混在するので、過渡状態の理論的な考察は容易でないといえるが、Fig. 4 から推定すれば、図に示すように、時定数の異なる1次遅れとの和

$$\theta_Z = \sum_{i=1}^3 A_i \cdot \exp\left(-\frac{Z}{\eta_i}\right) \quad (9)$$

ただし、 $\eta_i < \eta_{i+1}$ とする

で十分な近似が得られると期待できる (Fig. 4 では、(1)式で求めた回帰式を $i=2$ の項とみなす)。

(9)式の各項は、その時定数から推定して、(1) $i=1$ の項に標準電球フィラメントの熱容量による効果が、(2) $i=2$ の項に支柱の熱容量による効果が、(3) $i=3$ の項に電球の口金、ソケットなどの熱容量の効果が主として表われたと考えられる。

Fig. 4 からわかるように、 $i=1$ の項は短時間で減衰し、実質的にはその影響は無視できる。このことは、(1)式の回帰式からの残差をとってみると5 minで0.37K、7 minで0.03Kと残差が短時間のうちに小さくなることから推定できる。

つぎに、(9)式の $i=3$ の項について検討する。この項では、時定数はさらに大きいと考えられるが、その影響は小さいことが期待できる。

Table 3 に(9)式を

$$\theta_Z = \theta_{Z2} + \theta_{Z3} \quad (10)$$

ただし、

$$\theta_{Z2} = A_2 \cdot \exp\left(-\frac{Z}{\eta_2}\right) \quad (11)$$

と置き、(1)式で求めた回帰式の係数 A, η が、(11)式の係数 A_2, η_2 と一致するとみなして算出した θ_Z の期待値と、(1)式の回帰式からの残差で表わした θ_{Z3} とを示す。

Fig. 4 では、 A_3, η_3 の項の有意性が感じられるが、Table 3 から推定して、その影響 θ_{Z3} は、 θ_{Z2} に比較して小さく、許容される誤差内であるといえる。

Table 3 θ_{Z2} and its residual (θ_{Z3}) from measured curve of lamp

	(K)				
Z(min)	10	15	20	25	30
θ_{Z2}	2.83	1.16	0.48	0.19	0.08
θ_{Z3}	0.00	0.05	0.04	0.03	0.05

ここでは、特定な電球を例にして、その特性を詳細に示した。その他の真空電球についても、この実験の測定条件のもとでは、(9)式の $i=1$ および $i=3$ の項の影響は小さいことが確認されている。

(9)式の $i=3$ の項の影響は、個々の電球で特性が多少異なり、また、ソケットの熱容量や取付け方法に影響されると考えられ、定量的な厳密な検討は困難といえるが、この検討結果から推定すれば、輝度温度1000°C以上で、許容誤差が0.1K以上の場合には、(1)式で必要な精度の回帰式が得られ、十分に目的が達せられると結論できる。

ガス入り電球および $T_1 \rightarrow T_2$ 特性では、 $i=3$ の項の影響はさらに小さく ($T_1 \rightarrow T_2$ 特性では、現状の比較装置の分解能では $i=3$ の項は認められない)、これらにおいても無視できる。

5. 電源の種類による時定数の考察

標準電球は、従来はおもに大容量の蓄電池で点灯されていたが、近年は定電圧装置の採用も各所でみられる。この報告では、計量研究所で採用している定電流装置による点灯方式(注2)を前提に考察と実験を進めてきたが、その他の電源の場合には、その方式によっても時定数が異なる。

さらに、タングステン・フィラメントの抵抗変化(1000°Cの抵抗値は常温の約6倍、3000°Cでは約22倍)を考慮すれば、定電圧装置などでは、点灯前に電源を設定して、時定数を定義すること自体に問題がある。

もし、この測定で採用したように、 T_0 に達する電圧に設定して電源を入れる方式をとれば、点灯直後のrush currentによって、標準電球に悪影響が及ぶ。

以上に述べたことでわかるように、これらの電源については、厳密な検討よりも、むしろ実状に即した考察が必要といえる。

定電圧装置で点灯する場合についてみれば、

- (1) T_0 に達する目標電圧を前もって測定しておき、rush currentの悪影響が及ばぬ程度の最大の電流でしばらく点灯し、その後目標電圧に設定する。
- (2) 一度点灯して、 T_0 に達する電流にほぼ等しく調整し、以後電流変化に応じて適時電流を調整する。

が一般に採用している方式である。

(注2) 標準電球の特性は電流値で表わされており、口金部分での接触抵抗のふらつきなどを考慮すれば、定電流装置による点灯が最も望ましいといえる。

これらの方式による時間遅れは、(1)では、点灯後から設定までの時間に、(2)では、調整の頻度と調整時の電流（いくぶん多い目に調整すれば時間遅れが短縮できる）に左右され、一概に決めることは困難であるが、(1)ではいくぶん短縮され、(2)では、(7)、(8)式にほぼ等しい時間遅れになることが推定できる。

蓄電池では、その電池の容量、放電状態、電流調整用抵抗器などにも左右され、状況はさらに複雑であるが、前述の(2)の方式の採用によって、ほぼ等しい時定数が得られる。

この報告に示した定電流方式での時間遅れは、以上に示した考察でわかるように、これらの電源の採用に対しても十分有効であるといえよう。

6. あとがき

標準電球の過渡特性については、岡田らによる測定が報告され¹⁾、その測定値が JIS にも採用されている。しかし、岡田らの報告に示されている時定数は、真空電球、ガス入り電球おのおの1個についての測定に基づくものであり、さらに、

- (1) 過渡状態の測定には適さないとみなせる光高温計によって測定が行われている（当時は適当な測定器が開発されていなかった）。
- (2) 点灯電源に蓄電池が用いられており、過渡時に電流を一定に保つことが困難である。
- (3) 定電流電源などによる点灯では、経験的に得られる時定数と比較して若干の差が感じられる。

などのために、この測定結果を他の電球に適用するには、信頼性の面で多少欠けるという欠点が残されていた。そのために、実際の校正では安全率を考慮して、安定時間をこの測定結果よりも長くとして測定する必要があった。

また、この報告に示された特性は、点灯時の過渡特性のみに限定されていたので、校正中の設定変更時の特性は、未知のままで残されていた。

今回の測定は、これらの点を考慮して、試料には真空電球、ガス入り電球おのおの4個を用い、設定変更時の特性も測定して示した。

今回の測定と岡田らの報告との差は、真空電球の輝度温度 1000°C の測定値に着目して、定常温度の 1K 以内の温度に達するまでの時間で比較すれば、岡田らの測定が約 30% 短いことがわかる（岡田らの報告では 12 min で 1K 以内の定常温度に達することが報告されているが、今回の測定では約 17 min となった）。

今回の測定においても、試料として使用した標準電球の数は4個で少なく、一般性のある結論を得たとするには不十分といえるが、個々の電球の特性の差が小さいことから推定すれば、かなりの信頼度を期待できる。これらのことを考慮すれば、岡田らの測定は、光高温計の分解能とその追従性および点灯方法が、時定数の評価値に大きな誤差をもたらしたといえよう。

4章で示したように、時間遅れの厳密な検討は困難であり、電球個々によっても若干の差がある。しかし、実用測定に必要な精度に限定すれば、個性は少なくこの測定によって、時間遅れの正確な予測が可能になったといえる。

この測定結果は、JIS の改正、マニュアルの作成にあたり、具体的なデータとして有効だろう。

おわりに、本測定と考察にあたり終始ご指導ご鞭撻いただいた計量研究所高田第2部長に深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 岡田喜義他：光高温計用標準電球の加熱特性，電気試験所彙報，13-8 (1949)
- 2) 服部晋，藤原哲雄：放射輝度の精密な比較装置，計測自動制御学会論文集，8-6 (1972)