自己校正法による光度の測定

准員 吉田 正範* 専門会員 西山 英夫** 専門会員 吉 江 清***

Measurement of Luminous Intensity by the Self-calibration Technique

Masanori Yoshida (Semi-Member)

(Graduate School of Electrical Engineering, Chiba University)

Hideo Nishiyama (Fellow Member)

(Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.)

Kiyoshi Yoshie (Fellow Member)

(Faculty of Engineering, Chiba University)

ABSTRACT

This paper is concerned with a new method for measuring luminous intensity of a tungsten incandescent lamp. Absolute spectral sensitivity of a silicon photodiode was determined by the self-calibration technique developed by the NBS, and a $V(\lambda)$ Correction filter and a diaphragm of known opening area combined with this photodiode were used for the photometer.

Uncertainty of the measurement was estimated to be about 1%, and this method was considered to be a satisfactory practical method for the luminous intensity measurement without using a photometric standard source.

1. は じ め に

1980年にアメリカのNBS (National Bureau of Standards) が発表したシリコンホトダイオードの自己校正法は、シリコンホトダイオードの絶対分光応答度を測定する方法である^{1), 2)}。この方法の特長は、高度な設備がととのっていない研究室でも比較的簡単な測定技術で、シリコンホトダイオードの絶対分光応答度を測定できることにある。千葉大学および松下電器産業(株)照明研究所でもこの方法に着目し、数年前より研究を続けてきた³⁾。その結果、千葉大学における測定値と、電子技術総合研究所における測定値は、0.5%以内の精度で一致していることがわかり、自己校正法が有効な手段であることが確かめられている⁴⁾。

本研究では、上で述べた自己校正法によって、絶対分光応答度を測定したシリコンホトダイオードを用いて、任意の電球の光度を測定する方法を考案し、これを光度標準電球の逆校正法と名づけた。また、この方法により、A社で光度を測定済みの白熱タングステン標準電球の光度を逆校正し、その測定値との比較検討を行った。

さらに、光度標準電球の逆校正法により、光度の値を決定した電球を用いて、試作した照度計の照度の目盛りを校正し、この照度計とB社の照度計の照度目盛との比較を行ない、これについても検討した。

2. 光度標準電球の逆校正法

2.1 逆校正法の原理

図1に光度標準電球の逆校正法の原理図を示す。構造図にあるシリコンホトダイオードは、自己校正法により可視域にわたる絶対分光応答度 $R(\lambda)$ を400~500および600~700[nm]の範囲で20[nm]おきに、また、500~600[nm]の範囲では10[nm]おきに測定したものである。また、視感度補正フィルタは、その分光透過率 $\tau(\lambda)$ の相対値が、 $V(\lambda)/R(\lambda)$ に近似するように(ただし、 $V(\lambda)$ は標準比視感度)松下電器産業(株)照明研究所において設計、製作したもので、色ガラスフィルタを3枚重ねて密着させた構造をしており、大きさは50[mm]×50[mm]×7[mm]である。図2に示すような測定システムにより千葉大学においてこのフィルタの分光透過率を、可視域の範囲で10[nm]おきに測定した結果の概要を図3に示す。このとき、シリコンホトダイオードの表面にはフィラメントの像ではなく、レンズ2によって適当な穴あき板の穴の像を結ばせ、入射光が一樣となるように配慮した。なお、本測定の再現性は、標準偏差が最大0.0008であった。

図1において、タングステン標準電球を分布温度2856[K]で点灯し、シリコンホトダイオードの出力電流 i [A]を測定する。

* 千葉大学大学院工学研究科電気工学専攻 Graduate School of Electrical Engineering, Chiba University

** 松下電器産業株式会社照明研究所 Lighting Research Laboratory, Matsushita Electric Ind. Co., Ltd.

*** 千葉大学工学部 Faculty of Engineering, Chiba University

図 1 (a) 光度標準電球の逆校正の光学系

図 1 (b) 逆校正用受光器の構造図

図 2 視感度補正フィルタの分光透過率測定光学系

図 3 視感度補正フィルタの分光透過率の測定結果

このときの出力電流 i は、以下の式で与えられる。

$$i = C \int_0^\infty \tau(\lambda) R(\lambda) S_\lambda(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

ここで、 $S_\lambda(\lambda)$ は分布温度 2856 [K] のタングステン電球から発して、穴の面積既知の穴あき板 A を通過した放射束の分光分布の相対値で、 $S_\lambda(\lambda)$ はプランクの放射則からえられる完全放射体の分光分布と相対的によく近似しているとみることができる。 C は比例定数である。

一方、この穴あき板 A を通過した光束 ϕ_v は、次式で表わすことができる。

$$\phi_v = C \cdot K_m \cdot \int_0^\infty V(\lambda) S_\lambda(\lambda) d\lambda,$$

$$K_m: \text{最大視感度} = 683 \text{ [lm/W]} \quad (2)$$

したがって、穴あき板 A の穴の面積を A [m²]、タングステン電球から穴あき板 A までの距離を s [m] とすると、タングステン電球の光度 I_v は

$$I_v = C \cdot K_m \cdot s^2 \int_0^\infty V(\lambda) S_\lambda(\lambda) d\lambda / A \quad (3)$$

と表わされ、さらにこれと式(1)より

$$I_v = K_m \cdot \frac{s^2}{A} \cdot \frac{\int_0^\infty V(\lambda) S_\lambda(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty \tau(\lambda) R(\lambda) S_\lambda(\lambda) d\lambda} \cdot i \quad (4)$$

として光度 I_v を求めることができる。

以上により、図1のような実験システムでシリコンホトダイオードの出力電流 i 、タングステン電球から穴あき板 A までの距離 s を測定すれば、式(4)からタングステン電球の光度が測定でき、光度標準電球の逆校正が実現できる。ここでフィルタとホトダイオードを組み合わせたものの絶対応答度を、正規化した相対分光応答度 $S(\lambda)$ と係数 a [A/W] を用いて $\tau(\lambda)R(\lambda) = a \cdot S(\lambda)$ とすると、式(4)はさらに

$$I_v = K_m \cdot \frac{s^2}{A} \cdot \frac{1}{a} \cdot \frac{\int_0^\infty V(\lambda) S_\lambda(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty S(\lambda) S_\lambda(\lambda) d\lambda} \cdot i \quad (5)$$

で表わされる。式(5)中の $\int_0^\infty V(\lambda) S_\lambda(\lambda) d\lambda / \int_0^\infty S(\lambda) S_\lambda(\lambda) d\lambda = V(\lambda)$ と $S(\lambda)$ が完全に一致しない場合の補正項であり、計算によって求めることができる。ここで a [A/W] は $S(\lambda)$ がピークの時の絶対分光応答度を意味する。

穴あき板 A はステンレス鋼（熱膨張率（線膨張率） $\alpha = 1.64 \times 10^{-5}$ ）で作られた精密アパーチャである。穴の形は平均直径 5998.9 [μm] の円形で、その面積は 28.264 [mm²] である。平均直径（真円度測定機と精密測長機による）の測定精度は ± 1 [μm] 以内であるので、穴の面積精度は $\pm 0.03\%$ である。

2.2 逆校正法による光度測定

使用した3個のタングステン電球は、ランプ番号 SB 20717, HA 20010C と No.3 で分布温度 2856 [K] で点灯したときの光度が、それぞれ 262 [cd], 364 [cd], 320 [cd] と与えられている。この値は、A社において直流電源を使用して測定した値である。

本研究では、図1で示した実験システムにより、電球と穴あき板 A の距離 $s = 1.5$ [m] で測定を行なった。電球のガラス球の最大寸法は、3個とも s の1/10以下であるので、この距離で測定すれば、われわれの測光精度内で電球は点光源とみなすことができる。電球と逆校正用受光器は、測光ベンチ上に装置したそれぞれ専用の移動架台に取り付け、電球のフィラメントと受光器のフィルタおよび穴あき板 A が正対するように配置した。なお受光器の穴あき板 A より電球側にフィルタがあるために生じる光路差として、2.3 [mm] の距離の補正を行なった。表1に3個の光度標準電球の逆校正法による、光度の測定結果を示す。A社と千葉大のひらきとは、A社の測定値に対する千葉大の逆校正値のひら

表 1 光度標準電球の逆校正の実験結果

ランプ番号	光度 (cd) (A社)	逆校正値 (cd) (千葉大)	逆校正値の 再現性 (%)	A社と千葉大 のひらき (%)
SB20717	262	265	0.09	+1.1
HA20010C	364	366	0.55	+0.5
No. 3	320	324	0.53	+1.3

きの百分率である。A社における光度の測定値を正しいものとし、千葉大の逆校正値の評価を行なうと、誤差は1.3%以内、測定再現性は0.55%以内であった。現在、各国の国立研究所が光度を測定した標準電球を国際度量衡局に持ち寄り、互いに比較した場合でも、その結果には約2%のばらつきが見られることより、上で述べた逆校正法による測定結果は、満足できるものであると思われる。

3. 自己校正型照度計の試作

3.1 照度計の原理

前節で述べた方法によって電球の光度を校正し、任意の安定なタングステン電球を光度標準電球に仕立てることができた。そこで、その電球を基準として、試作した照度計の照度の目盛りづけを行なった。このようにして校正した照度計は、測光量の標準器を使用せずに照度の目盛りづけができるので、自己校正型照度計と名付けた。図4に、この照度計の構造図を示す。図中の球殻状拡散透過板は、可視域における波長選択性がきわめて少ないもので、入射光がどの角度から入射しても、照度計の出力が入射の余弦則に従うようにするためのものである。シリコンホトダイオードと視感度補正フィルタは、前節で述べたものと同じものを使用している。したがって、このフィルタとシリコンホトダイオードを組み合わせたときの相対分光応答度は、標準視感度に近似している。シリコンホトダイオードの出力は、OPアンプICを用

図 4 自己校正型照度計の構造

いて構成した微小電流-電圧変換回路により電圧として取り出す。したがって、照度計としての出力は電圧値である。このため照度の目盛りづけは、測定基準面の単位照度あたりの出力電圧値を照度応答度 R_E [V/lx] として測定した。

図5に照度計の照度応答度 R_E の測定システムを示す。この測定には、ランプ番号No.3の電球を用いた。電球と照度計は、測光ベンチ上でそれぞれ専用の移動架台に取り付け、電球の光度既知の方向が照度計の測定基準面の中心を垂直に通るように配置した。また、電球と照度計の間に遮光板を二つ置き、電球よりの直接光以外の光が、照度計に入射しないようにした。

測定の結果、本研究で試作した照度計の照度応答度 R_E は、 $R_E = 0.201 \pm 0.001$ [mV/lx]

図 5 照度計の校正の光学系

であった。

3.2 照度計の精度

試作した自己校正型照度計とB社のD900型照度計(計量法による検定済)による照度測定値についての相互比較を行なった。以下これについて述べる。

実験は前節の図5と同様のシステムで、二つの照度計を交互に置き換えて行なった。その際、照度計以外の光学系は動かさないように注意を払った。実験に使用した電球は、ランプ番号SB20717とHA20010Cの2個である。表2に実験結果を示す。

表2の2つの照度計のひらきとは、D900型照度計による測定値に対する自己校正型照度計による測定値のひらきの百分率である。これを見ると、二つの照度計の指示値は、3.5%以内で一致しており、特に200 [lx] 以下の照度では、1.5%以内と良い一致がみられた。二つの照度計が独立した全く異なる方法で校正されたことを考えるとほぼ満足できる結果であると思われる。

表 2 自己校正型照度計(千葉大)とD900型照度計(B社)との比較

ランプ番号	電球と測定基準面の距離(m)	自己校正型照度計指示値(lx)	D900型照度計指示値(lx)	2つの照度計のひらき(%)
SB20717	1.5	120	119	+0.84
	1.25	171	170	+0.59
	1.00	267	261	+2.30
HA20010C	1.5	163	161	+1.24
	1.25	233	227	+2.64
	1.00	363	351	+3.42

4. む す び

本研究では、自己校正法により絶対分光応答度を測定したシリコンホトダイオードを用いて、任意の電球の光度を測定する方法を考案し、その精度も満足すべきものが得られた。なお、本研究で用いた視感度補正フィルタの場合、分布温度2856 [K] 付近の電球の分布温度が30 [K] 以内の正確さで知れていれば、式(5)の補正項の1からのハズレは1/1000以下となることが計算で確かめられている。一方、自己校正法によるオキサイドバイアス特性測定後の応答度低下の現象が報告⁵⁾されており、今後の課題として研究を続ける必要がある。

試作した自己校正型照度計は、200 [lx] 以下の照度の測定においては、満足できる結果がえられたが、200 [lx] 以上の照度の測定では、市販の照度計による測定とのズレが大きかった。これについては、今後、さらに実験をかさねてその原因を追及する予定である。また、この自己校正型照度計が一般に使用されるには、JIS 1609で規定された条件(分光応答度特性、入射角特性など)を満足しなければならないので、これもあわせて検討する

予定である。

今後、この測定法の精度を高めることにより、測光量の標準器を持たない研究室でも、自己校正法による絶対分光応答度を測定したシリコンホトダイオードを用いて、光度標準電球や照度計さらには輝度計を校正できる可能性が十分にあると考えられる。

最後に、この研究にあたって種々のご指導、ご助言をいただいた千葉大学工学部、田中国昭教授、大川澄雄教授、吉川明彦助教授、島倉信講師、吉田利信助手、佐藤直樹大学院生に厚く感謝を申し上げますとともに、ご協力をいただいた(株)東芝照明開発研究部長広瀬吉夫氏ならびに照明事業部照明品質保証部課長石野正敏氏に御礼を申し上げます。

参 考 文 献

(1) Zalewski, E. F. and Geist, J. : Silicon photodiode

absolute spectral response self-calibration, Appl. Opt. **19-8** (1980) 1214~1216

(2) Geist, J. E. F. Zalewski, and Schaefer, A. R. : Spectral response self-calibration and interpolation of Silicon photodiode, Appl. Opt. **19-22**(1980) 3795~3799

(3) 鶴岡浩文, 吉江 清: シリコンホトダイオードの分光応答度の推定, 照学誌 **69-10** (昭61) 531~536

(4) 吉田, 吉江, 斉藤, 三嶋: シリコンホトダイオード自己校正法の精度, 昭和61年度(第19回)照明学会全国大会予稿, P. 45

(5) 大野義弘, 西山英夫: シリコンホトダイオードの自己校正法におけるオキサイドバイアス特性の検討, 昭和62年度(第20回)照明学会全国大会予稿 P. 45

(受付1987年4月28日)

11月号掲載予定目次

(インテリジェントビル特集)

資 料	○ 総論「インテリジェントビルとは」
	○ インテリジェントビルの視環境の要件
	○ インテリジェントビルにおけるシステム制御技術
	○ インテリジェントビルにおけるオフィス作業と照明
	○ インテリジェントビルにおける採光
	○ インテリジェントビルとオフィス家具
施設報告	○ 大阪梅田センタービルの照明
	○ NTT 品川 TWINS の照明設備

その他