円筒型グラファイト空洞放射体の 可視域における黒さ

正会員 吉 江 清* 正会員 鈴木 守*

Blackness of Cylinder Type Graphite Hollow Radiation Body in the Visible Range

By Kiyoshi, Yoshie, Mamoru, Suzuki (Member)
(Electrotechnical Laboratory)

Abstract

In a project to determine the spectral energy distribution of tungsten ribbon lamps, a black body graphite tube furnace has been used as a standard light source, distribution of which is already known.

The blackness of the furnace is of the great importance, because the accuracy of the determination depends upon it directly. Among the methods of calculating the quality of the black body furnace, it is considered that De Vos' method is the most desirable. Using his method and assuming linear temperature gradients along the side wall, the authors have calculated the quality of the graphite tube furnace for different α and S (shown in Table 2). From the table it will be seen that the quality of the black body furnace is not good enough for accurate determination. It is found, however, that the blackness is improved to the practically sufficient value when the temperature of the furnace is measured using optical pyrometer. The result was endorsed by the experiments.

1. はしがき

分光エネルギー分布が既知の光源として黒体が使われることがしばしばある。この場合実験上の必要から黒体として使う空洞に観測用の小さな孔をあけなければならないが、そのためにこの孔を通して観測する空洞の内壁上任意の面の輝きは黒体のそれと多少なりとも異なるのは当然である。この相違を知る目的で、Buckley¹⁾、Liebman²⁾、山内³⁾、中路⁴⁾、氏等が相互反射の積分方程式を解析的にまたは精密数値計算によって解き美しい結果がえられていることは周知の通りである。

これらの計算には空洞の内壁が完全拡散性をもつとともに内壁の温度が一樣であるという仮定が使われているが、実際に空洞に用いる材質たとえばタングステン、グラファイト、トリヤなどは完全拡散性をもたず整反射を多少なりとも含むのが普通でありまた空洞の内壁全体を一樣な温度に保つことは実験上なかなかむずかしいことである。

De Vos⁵⁾ が与えた結果はこの仮定にどれだけの実用性があるかを暗示するもので彼によればたとえば温度一樣で完全拡散性をもたない円筒型空洞について第1表の

第 1 表

拡散性 α	A (完全拡散)	B	C	D
6	0.970	0.957	0.900	0.833
10	0.990	0.986	0.962	0.900
15	0.995	0.994	0.983	0.961
20	0.997	0.997	0.990	0.978
30	0.999	0.999	0.995	0.990

円筒型空洞放射体の黒さ（発散率：0.4）
[De Vos による]

ような結果が与えられている α は円筒の長さをその半径で割った値すなわち半径を単位としてあらわした円筒の長さで第2行は内壁が完全拡散性をもつ場合、(第1図A) B, C, D行は内壁がそれぞれ第1図B, C, D, のような反射曲線をもつ材質の場合で4例とも発散率を0.4にとってある。表の数字はこの円筒と同じ温度にある黒体の分光輝きを1としたとき、この円筒の底の分光輝きすなわち黒さをあらわしている。これらの例では完全拡散性からのはづれがはげしい程空洞の底のかがやきは低下しており、最も条件のよい場合すなわち α が30という非常に奥

* 電気試験所田無分室

第 1 図

深い円筒の場合でさえも材質がDのような場合には完全拡散性をもつものに比べて約1%の輝きの低下がみられる。この円筒の温度が様でないときにはその影響がさらに第1表の値に加えられることは次にのべる De Vos の計算式が示しているところである。

われわれは現在可視域における相対的な分光エネルギー分布の二次標準を作るためにガス入タンングステンリボ

ン電球の分光エネルギー分布曲線を黒体との分光測光による比較によって求めているのでこの測定に黒体として用いる円筒型グラファイト空洞の黒さを De Vos の方式で評価してみた。さらにこの空洞の底の温度を光高温計で測定する限り、円筒の軸方向に沿って相当大きな直線的温度勾配がある場合でも、円筒の底の分光エネルギー分布は、光高温計の指示する温度における黒体の分布と可視域においてほとんどちがわないことを確かめたのでその結果をここに報告する。

De Vos の計算式

De Vos は黒さの計算式として任意の波長において

$$I_w^0 = I_B \left[1 - r_w^{00} \Omega_w^0 - \int_{\Omega_w^n} r_n^{w0} d\Omega_n^0 r_w^{0n} d\Omega_w^n - \int_{\Omega_w^n} k_n e_n^w r_w^{0n} d\Omega_w^n \right]$$

を与えた。

式中の各記号は次のような意味をもっている。第2図は任意の形の空洞放射体でOの位置に孔があいている。この孔が今黒さを求めようとする内壁上的一点Wに対して張る立体角が Ω_w^0 である。 Ω はすべて立体角をあらわし例えば $d\Omega_w^n$ は内壁上任意の微小面 dn が点Wに対して張る微小立体角をあらわす。Wにおける微小面 dw の孔の方向の輝きが I_w^0 である。式中すべて文字の右肩の

第 2 図

記号は方向をあらわし、右下の記号は場所をあらわす。すなわち I_w^0 とはWにおいてO方向の輝きという意味である。孔がない場合この空洞は黒体となるがその輝きを I_B としてあらわす。 r はすべて部分反射率をあらわし一般に r_w^{ab} とは dw において単位量の放射がa方向から入射したときにb方向の単位立体角内に反射される放射

の量で全反射率 ρ_w^a [単位量の放射が a 方向から入射したとき半空間 (立体角 2π) 内に反射される放射の量] とは次の関係で結ばれるものである。

$$\rho_w^a = \int_{2\pi} r_w^{an} d\Omega_w^n$$

また k_n は内壁上の微小面 dn の温度が dw の温度 T に対して $T-T_n=\Delta T$ だけ異った温度にある場合

$$k_n = \frac{I_B(T) - I_B(T_n)}{I_B(T)}$$

で与えられる量で ΔT が小さければ

$$k_n = \frac{\Delta I}{I_B(T)} = \frac{C_2}{\lambda T} \cdot \frac{\Delta T}{T}$$

として計算することができる。ここに C_2 はプランクの第二定数, λ は波長である。また e_n^w は微小面 dn の W 方向の発散率である。

さて De Vos はこの計算式を導くのに dw の孔の方向の輝き I_w^0 は dw 自身の輝きと内壁の各微小面 (孔を除く) からの放射が dw で反射されることによって生ずる輝きとの和であるとして計算したのであるが、第一次近似としてまづ dw と孔を除く内壁の輝きがすべて黒体の輝き (I_B) をもつものとして I_w^0 を求め、ついで第二次近似として内壁の輝きを、 dw と孔を除く内壁に温度の非一様性を与えその輝きを第一次近似で求めた値を使って I_w^0 を求めた。以下同様に第三、第四近似と求めてゆくわけであるが De Vos の意見によればこの方法によると I_w^0 の値は相当早く収斂し、多くの場合第二近似で充分実用しうる結果がえられると述べている。上記の計算式は第二次近似の式である。

2. 円筒型グラファイト空洞

われわれが使っている空洞は第3図(A)のようなものでグラファイトの円筒の中央に空洞の底となる同質のスクリーンをおきその手前に、順次大きく孔のあいた同じくグラファイトのダイヤフラムが適当な間隔をおいてはめこんである。この発熱体に交流電力を与えて白熱させダイヤフラムの孔から出てくる放射を利用するのである。計算は底と一番内側のダイヤフラム(蓋)とで仕切られる空洞(第3図B)の底の黒さについて行った。寸法はすべて円筒の半径を単位としてあらわし、円筒の長さを α , 孔の半径を R , 内壁上の微小面を幅 dy の輪環とし蓋の面から輪環までの距離を y とすると De Vos の式中の各立体角はそれぞれ次のようにあらわすことができる。

$$\Omega_w^0 = \frac{\pi R^2}{\alpha^2}$$

$$d\Omega_n^0 = \frac{\pi R^2 y}{(y^2 + 1)^{3/2}}, \quad \text{蓋の面では } d\Omega_n^0 = 0$$

$$d\Omega_w^n = \frac{2\pi dy}{\{(\alpha - y)^2 + 1\}^{3/2}}, \quad \text{底の面では } d\Omega_w^n = 0$$

$$\text{蓋の面では } d\Omega_w^n = \frac{\pi(1-S)}{\alpha^2}$$

ここに S は R^2 にひとしく蓋の絞りをあらわす。この関係をつかって De Vos の式の各項をかきあらわすと、

$$1) \quad r_w^{00} \Omega_w^0 = r_w^{00} \frac{\pi R^2}{\alpha^2} = r_w^{00} \frac{\pi S}{\alpha^2}$$

$$2) \quad \int_{\Omega_w^n} r_n^{w0} d\Omega_n^0 r_w^{0n} d\Omega_w^n = \int_0^\alpha r_y^{w0} r_w^{0y} \frac{\pi R^2 y}{(y^2 + 1)^{3/2}}$$

$$\times \frac{2\pi dy}{\{(\alpha - y)^2 + 1\}^{3/2}} = 2\pi^2 S \int_0^\alpha \frac{r_y^{w0} r_w^{0y} y dy}{[(y^2 + 1)\{(\alpha - y)^2 + 1\}]^{3/2}}$$

$$3) \quad \int_{\Omega_w^n} k_n e_n^w r_w^{0n} d\Omega_w^n = \int_0^\alpha k_y e_y^w r_w^{0y} \frac{2\pi dy}{\{(\alpha - y)^2 + 1\}^{3/2}}$$

$$+ k_y e_y^w r_w^{0y} \frac{\pi(1-S)}{\alpha^2}$$

ここで k_y は前述のように

$$k_y = \frac{I_B(T) - I_B(T_y)}{I_B(T)} = \frac{C_2}{\lambda T} \cdot \frac{\Delta T_y}{T}$$

であり、 e_y^w は実用上定数と考えることができるから

$$3) \quad \int_{\Omega_w^n} k_n e_n^w r_w^{0n} d\Omega_w^n = 2\pi e_y^w \frac{C_2}{\lambda T^2} \left[\int_0^\alpha \Delta T_y \times \frac{r_y^{0y} dy}{\{(\alpha - y)^2 + 1\}^{3/2}} + \frac{1}{2} \Delta T_y r_w^{0y} \frac{(1-S)}{\alpha^2} \right]$$

A

B

第 3 図

となる。3) 式の右辺かっこ中の第二項は蓋による項である。この 1), 2), 3) の各式を数値計算したのである

が、計算に当って用いたいろいろな数値は次のようなものである。

a) 部分反射率の値

グラファイトの部分反射率はわれわれの使っているものについて実測して第4図のような値がえられた。これは色温度約 2800°K の白色光に対する部分反射率であって矢印は入射光の入射角を示しその各々に対する反射曲線を図にかいてある。用いたグラファイトが完全拡散性をもつならば入射角に関係なく反射曲線は原点において横軸に接する円であらわされる筈であるが実測の結果はあきらかに完全拡散性からはずれていることを示している。これらの曲線から、 r_{ω}^{00} , r_{ω}^{00} , r_{ω}^{00} が求められる、この値は常温で測定した値であるから実際の使用温度約 2000°K における反射率を得るためには Prescott および Hincke⁶⁾ が実測したグラファイトの温度係数 $-5.8 \cdot 10^{-5}$ T を使った。その結果 2000°K における反射率は常温におけるその約 2.2 倍の値をもつこととなる。

b) e_y^w の値

円筒の内壁上任意の面の底の方向の発散率は各方向の発散率の平均値を用いた。その値は 0.80 で比較的大きな値であるから実用上定常として計算しても結果にはひびかない筈である。

第 4 図

c) α および S の値

われわれの円筒は第3図からみられるように $\alpha=2.5$, $S=0.0459$ (孔の半径 1.5mm) であるが参考のために $\alpha=1.5, 2.0, 2.5, \dots, 6.0$ の 7 通り、また $S=0.0204, 0.0459, \dots, 0.2500$ の 6 通りについて計算を行った。

d) ΔT の値

この空洞の使用温度 (2042°K) 附近で円筒の軸に沿って直線的に α 当り $10/6$ 度の勾配があるとして計算を行った。これは $\alpha=2.5$ の場合は 4.1 度、 $\alpha=6$ の場合は 10 度の勾配に相当する。

3. 計算結果とその意味

このようにしてえられた計算の結果は第2表の通りである。7 通りの α (円筒の長さ) に対してそれぞれ 6 通

りの絞り (蓋の孔の面積の蓋の面積に対する比) の場合が計算してある。

各々の絞りに対して 2 行づつの数字が与えてあるが第 1 行の値はこの円筒型空洞の内壁が第 4 図に与えた反射率をもち温度が一様な場合の底の黒さである、第 2 行はこれに加えてこの円筒にその使用温度 2042°K において円筒の軸沿いに α 当り $10/6$ 度の直線的な温度勾配があった場合第 1 行の値に加えるべき値で上から波長 $0.4, 0.55, 0.7\mu$ における値が示してある。そして温度勾配が底から孔に向って上昇している場合は (+) の符号孔から底に向って上昇している場合は (-) の符号をとるものである。

われわれの円筒は $\alpha=2.5$, $S=0.0459$ でその実測法は半径 7mm , 長さ 17.5mm , 孔の半径 1.5mm である。この場合は表からみられるように温度一様ときは 0.998 の黒さをもち温度勾配があるときは波長 0.55μ においてそれぞれ、 $1.000, 0.996$ の黒さをもつ。前者すなわち底から孔に向って温度が上昇している場合には 1000 分の 1 の精度で黒体の黒さと一致することを示している。このことは孔の附近の温度を適当に高めてやることによって底からの放射を黒体放射に匹敵させてやることのできることを意味している。

一般に黒さは部分反射率が大いほど減少するが、部分反射率の変化に対する黒さの変化の割合はグラファイトのように小さな反射率をもつものについては少く例えばこの計算に使った実測反射率の値を仮に 80% 増加させてみると表中かっこ内に示した黒さとなることがわかる。またグラファイトの反射率の波長による変化は文献によれば可視域において $\pm 10\%$ 以内と考えられるからこの表の値は可視域におけるすべての波長に対して通用すると考えても差支えない。表中黒さが 1 を超す場合があるが、これはその温度にある底の輝きがより高い温度にある孔の附近の内壁からの反射光のためにその温度における黒体の放射よりも強い放射となりそれがより高い温度における黒体の放射に相当することを示している。

4. 結果の検討

この計算によってわれわれの使っている寸法の円筒型空洞の黒さは温度一様の場合に 0.998 , 温度勾配が $2.5 \times 10/6 = 4.2$ 度ある場合には波長 $0.4, 0.55, 0.7\mu$ においてそれぞれこの黒さに、 $\pm 0.003, \pm 0.002, \pm 0.002$ を加えた黒さとなることがわかったがこの値がわれわれの分光エネルギー分布の測定におよぼす影響を検討してみることにする。今仮に温度勾配が今迄の 10 倍すなわち $2.5 \times 10/6 \times 10 = 42$ 度あるものとして同様な計算を行ってみるとその結果は第3表のようになる。第3行に与えた数字がそれで、(+) と (-) の符号を別々にして 1 からの開きをかいたものがそれぞれ第 4.5 行である。

第 2 表 材 質 グ ラ フ ァ イ ト (反射率 0.2)

S	0.0204 (例)			0.0459 (例)			0.0816 (例)			0.1276 (例)			0.1837 (例)			0.2500 (例)		
α	円筒半径 7 mm	円筒半径 1 mm	孔の半径	円筒半径 7 mm	円筒半径 1.5 mm	円筒半径 7 mm	円筒半径 7 mm	円筒半径 2 mm	円筒半径 7 mm	円筒半径 2.5 mm	円筒半径 7 mm	円筒半径 3 mm	円筒半径 7 mm	円筒半径 3 mm	円筒半径 7 mm	円筒半径 3.5 mm	円筒半径 7 mm	円筒半径 3.5 mm
1.5	0.998 (0.996)	0.003 0.002 0.002	0.003 0.002 0.002	0.996 (0.991)	0.003 0.002 0.002	0.003 0.002 0.002	0.992 (0.985)	0.003 0.002 0.002	0.988 (0.976)	0.003 0.002 0.002	0.982 (0.966)	0.003 0.002 0.002	0.976 (0.953)	0.003 0.002 0.001	0.976 (0.953)	0.003 0.002 0.001	0.976 (0.953)	0.003 0.002 0.001
2.0	0.999 (0.998)	0.003 0.002 0.002	0.003 0.002 0.002	0.997 (0.995)	0.003 0.002 0.002	0.003 0.002 0.002	0.995 (0.991)	0.003 0.002 0.002	0.993 (0.986)	0.003 0.002 0.002	0.990 (0.979)	0.003 0.002 0.002	0.986 (0.972)	0.003 0.002 0.002	0.986 (0.972)	0.003 0.002 0.002	0.986 (0.972)	0.003 0.002 0.002
2.5	0.999 (0.998)	0.003 0.002 0.002	0.003 0.002 0.002	0.998 (0.997)	0.003 0.002 0.002	0.003 0.002 0.002	0.997 (0.994)	0.003 0.002 0.002	0.996 (0.990)	0.003 0.002 0.002	0.995 (0.986)	0.003 0.002 0.002	0.994 (0.981)	0.003 0.002 0.002	0.994 (0.981)	0.003 0.002 0.002	0.994 (0.981)	0.003 0.002 0.002
3.5	1.000 (0.999)	0.003 0.002 0.002	0.003 0.002 0.002	0.999 (0.998)	0.003 0.002 0.002	0.003 0.002 0.002	0.998 (0.997)	0.003 0.002 0.002	0.998 (0.995)	0.003 0.002 0.002	0.996 (0.993)	0.003 0.002 0.002	0.995 (0.990)	0.003 0.002 0.002	0.995 (0.990)	0.003 0.002 0.002	0.995 (0.990)	0.003 0.002 0.002
4.5	1.000 (1.000)	0.003 0.003 0.002	0.003 0.002 0.002	0.999 (0.999)	0.003 0.002 0.002	0.003 0.002 0.002	0.999 (0.998)	0.003 0.002 0.002	0.999 (0.997)	0.003 0.002 0.002	0.998 (0.996)	0.003 0.002 0.002	0.997 (0.994)	0.003 0.002 0.002	0.997 (0.994)	0.003 0.002 0.002	0.997 (0.994)	0.003 0.002 0.002
5.5	1.000 (1.000)	0.003 0.003 0.003	0.003 0.002 0.002	1.000 (0.999)	0.003 0.002 0.002	0.003 0.002 0.002	0.999 (0.999)	0.003 0.002 0.002	0.999 (0.998)	0.003 0.002 0.002	0.999 (0.997)	0.003 0.002 0.002	0.998 (0.996)	0.003 0.002 0.002	0.998 (0.996)	0.003 0.002 0.002	0.998 (0.996)	0.003 0.002 0.002
6.0	1.000 (1.000)	0.004 0.003 0.002	0.004 0.003 0.002	1.000 (0.999)	0.004 0.003 0.002	0.004 0.003 0.002	0.999 (0.999)	0.004 0.003 0.002	0.999 (0.998)	0.004 0.003 0.002	0.999 (0.998)	0.004 0.003 0.002	0.998 (0.997)	0.004 0.003 0.002	0.998 (0.997)	0.004 0.003 0.002	0.998 (0.997)	0.004 0.003 0.002

第 3 表

 $\alpha=2.5$, $S=0.0459$ 温度勾配 42度

波 長 (μ)	温度勾配が ない場合	温度勾配に孔に向って よる増加	孔に向って 上昇	孔に向って 下降
0.40	0.998	± 0.0307	$+0.0287$	-0.0327
0.55	0.998	± 0.0223	$+0.0203$	-0.0243
0.66	0.998	± 0.0186	$+0.0166$	-0.0206
0.70	0.998	± 0.0175	$+0.0155$	-0.0195

この円筒の底の輝きを光高温計で測定したとするとその指示する輝度温度は第 4, 5 行に対応した指示の増加あるいは減少を示す筈である。例えば 0.66μ の有効波長をもつ光高温計で、孔に向って上昇する温度勾配がある場合に底の輝きを測定したとすると

$$\frac{\Delta I}{I_{B(T)}} = \frac{C_2}{\lambda T} \cdot \frac{\Delta T}{T}$$

において $\Delta I/I_{B(T)} = +0.0166$, $C_2 = 1.438 \text{ cmdeg}$, $\lambda = 0.66\mu$, $T = 2042^\circ \text{K}$ において $\Delta T = +3.2$ 度を得る。即ちこの光高温計は 2042°K より 3.2 度高い輝度温度を与えるわけである。この輝度温度を真温度とみなしてその温度における黒体の分光分布を計算してみると 2042°K の分布を 1 としたときに波長 0.4 , 0.55 , 0.7μ においてそれぞれ $+0.0275$, $+0.0200$, $+0.0157$ の分布を与えることとなり第 3 表の値との差はきわめて僅かとなる。このことは円筒に相当大きな温度勾配があっても底の輝きを光高温計で測定して輝度温度を求めその輝度温度を黒体の真温度とみなして計算する限り、求められた分光分布は円筒空洞の実際の分光分布と殆んど変わらず十分な精度で円筒の放射を黒体放射として使用出来るということである。実際われわれの実験で円筒の温度勾配を故意に大きくし約 50 度の勾配をもたせてその底の放射を分光測光でタンダステンリボン電球に移し取った分光分布曲線

と、温度勾配が 2 度以内の場合にえられた曲線とは可視域全体にわたって $\pm 0.2\%$ のひらきで一致しており測光精度自体が $\pm 0.15\%$ であることを考えるとこの考察が十分当っていることが推定される。

空洞の放射を評価する際に使われるいろいろな温度測定法のうち光高温計による方法の一つの大きな利点がこのみにみられる。光高温計の測温精度は十分に注意された設備と器材とをもってすれば ± 0.5 度の精度をうることは差程困難なことではない。

5. む す び

可視域における相対的な分光エネルギー分布の二次標準を設けるために用いている円筒型グラファイト空洞放射体の黒さを検討し、光高温計でその温度を測定する限り円筒に相当大きな温度勾配があっても実用上差支えないことを確めた。

終りにこの研究に絶えず御懇篤な御指導をいただいている当所中路応用部長に厚く御礼を申し上げますと共に、面倒な数値計算に当られた荻野昭子技官に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) H. Buckley, Phil. Mag. 4, 753, 1927; 6, 447, 1928
17, 576, 1934
- 2) Liebmann, Z. Techn. Physik 12, 433, 1931
- 3) 山内, Comite Int. des P. et M. Proc. Verb. XVI, 243, 1933; 電試研第 378 号 (昭和 10 年)
- 4) 中路, 電試彙 18, 10, 741, 1954; 21, 1, 17, 1957, 照学誌 40, 11, 495, 1956.
- 5) De Vos, Physica 20, 669, 1954
- 6) Prescott et Hincke, Phy. Rev, 31, 130, 1928

照明界のトピックス

牛尾工業クセノンショート アークランプを発売

ジルコンランプの製造で有名な牛尾工業では、今度クセノンショートアークランプの国産化に成功、昭和 33 年始めから本格的生産に入ることになった。月産 100 個を最低目標に現在姫路工場において準備が進められている。

製品化されるものは 150W, 500W の 2 種類で、500W は中心輝度、 $20,000 \text{ c.d./cm}^2$ 、アークの長さ $3 \sim 4 \text{ mm}$ 管全長 200 mm 、幅 33 mm と云う定格で探照灯や天然色映写機などの光源のように比較的大客量、高輝度光源を必要とする場合に使用されるもでの、すでに自衛隊の探照灯用光源の使用も考えられている。

東芝小倉電球製造工場の落成

東芝では昭和 31 年 11 月から約 5 億円の工費で小倉に電球製造工場の建設を進めていたが、この程完成したので去る 11 月 21 日落成式を行った。一部 3 階のある 2 階建の電球工場 1800 坪と平屋建のガラスつや消工場 400 坪とから成っている。ハイスピードマシン 12 連を設備して、つや消工程から組立まで一貫したコンベヤー、システムを採用し、月産 250 万個を目標にしている。