

高温用放射温度計の試作とその教材化

工学部技術部情報分析系 増田健二

1. はじめに

現在工学部の1・2年次物理学実験は、学科等別に実施しており、一部学科では受講学生数の増加に伴い、実験室の収容人数を156名から168名に増加することが求められている。しかしそのためには、新たな種目を新設する必要がある、また実験室のスペースの関係から暗室で行う実験という制限もある。そこで今回は光高温計を製作し、熱放射体の輝度温度の測定装置を試作したのでここで報告する。

2. 原理

古代から高温の物体の温度を、その輝きまたは色から判断する方法は、赤熱・白熱体に対する唯一の測定方法であった。しかし目のみで輝きの大小すなわち輝度を知らうとすることは、非常に不確実な測定であった。そこで従来この分野では、光高温計に代表される2つの面の輝度を比較する方法、つまり、あらかじめ検定して輝度の分かった標準電球と、測定すべき物体の輝度とを比較する方法を用い、正確に輝度の大小を知ることができる。

温度を上げると、すべての物体は多量の熱放射エネルギーを出し、黒体については、熱放射エネルギーと温度との関係は式(1)のプランクの公式で表される。

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} \quad (1)$$

ここで、 T は絶対温度の単位で表した空洞壁の温度、 k はボルツマン定数、 h はプランク定数、 c は光速、 ν は振動数である。

エネルギー密度 $u(\nu, T)$ のかわりに、空洞内の任意の面を単位面積当たり、単位時間に通る電磁波のエネルギーを考える。波長が λ と $\lambda + d\lambda$ の間にある電磁波のエネルギーを $I d\lambda$ とすれば、 I は

$$I(\lambda, T) = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \quad (2)$$

で表される。この I を放射強度という。空洞に小孔を開けて内部の放射をとり出すと、その強度分布は、式(2)とよく一致する。従って、ある波長($\lambda = 650\text{nm}$)における熱放射エネルギーを測れば、その物体の温度が測定できる。光高温計は、この原理に基づいて、高温物体の温度を測定する器械である。

3. 装置

3.1 装置の概略

高温の放射体の輝度を既知の温度である標準電球のタングステンフィラメントの輝度と比較することで温度を測定する。光高温計の構造および熱放射体輝度温度測定装置の概略図を図1に示す。温度を測る物体(以降、試料電球)の像を、対物レンズによって電球のフィラメントの位置に結ばせ、両者を接眼レンズを通して見る。赤色フィルターは、輝度の比較を単色光(650nm)で正確に測定するためと、目の保護のためのものである。標準電球の輝度が試料電球と同じになり、

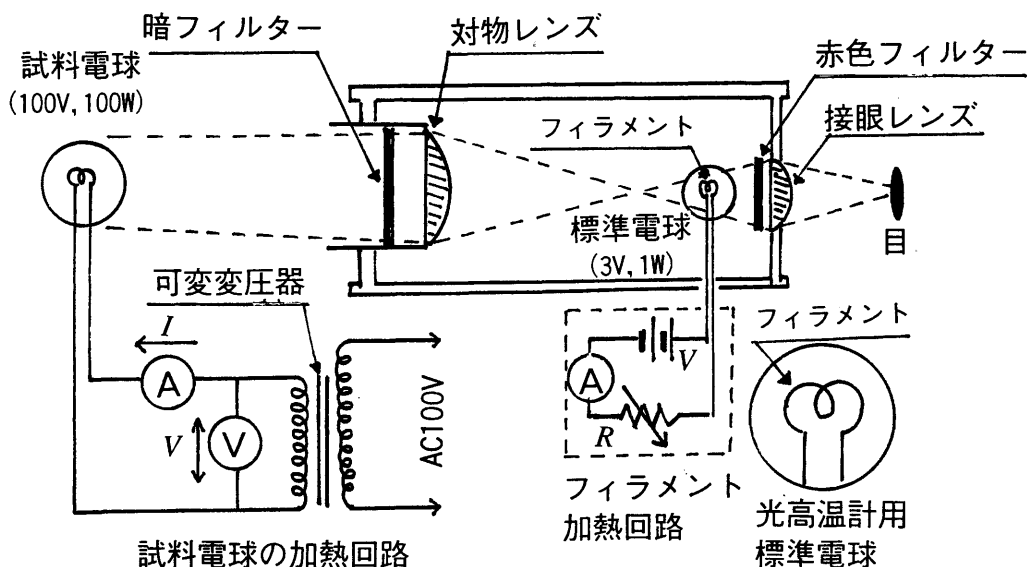


図1 測定装置の概略図

フィラメントが背景に消えた時の加熱電流から輝度温度を算出する。また、試料電球の輝度が標準電球の輝度より明るい場合には、両電球の間に暗(ND2)フィルターを設定し、輝度を 1/2 に下げて測定する。

3.2 標準電球の温度測定

標準電球の写真を図2に、レンズ・フィルター・電球の配置を図3に示す。この電球(東芝製 YE-555)のフィラメントは、直径 0.2mm 程度のタングステンの1本の線できており、3V、1.2W で 400mA までの電流が流せる。光高温計では、たいてい 650nm の赤い光を使うため、ここでは赤色フィルター(MCR1)を通して赤色の光だけを目に入れる。電流を増すほど標準電球の輝度が増し、試料電球の像の輝度と標準電球の輝度とが一致するように可変抵抗器を調節し、そのとき流れている電流値を読み取る。そして検定表を用い、電流値から輝度温度を算出する。

3.3 輝度温度測定

試料電球の加熱装置を図4に示す。試料電球には、プロジェクター用電球(PHILIPS KP-8 100V, 100W)を使用した。試料電球のフィラメントがかすかに赤くなる所まで、可変変圧器(ボルトスライダ)のつまみを回して電圧を上昇させる。電圧 V は 10V から 5V 刻みで 50V までかける。その際の電流値 J を読み取り、フィラメントに加えた電力 $P = VJ$ を求める。

試料電球の輝度に標準電球のフィラメントの輝度が同じになるところまで、標準電球の電流を調節する。このとき図5の中央Bのように、両者の輝度が同じとなり識別できなくなればよい。Aは電流過少、Cは電流過多の状態である。標準電球には、300mA 以上の電流を流すとフィラメントを劣化させる恐れがあるため、より高い輝度温度を測定するには両者の間に暗フィルターをセットする。装置全体の写真を図6に示す。

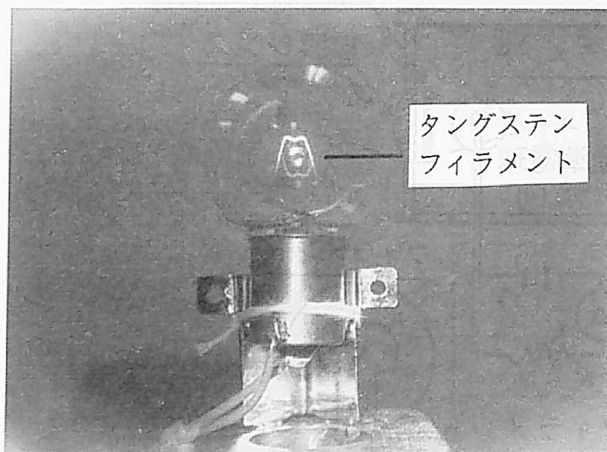


図2 標準電球の写真

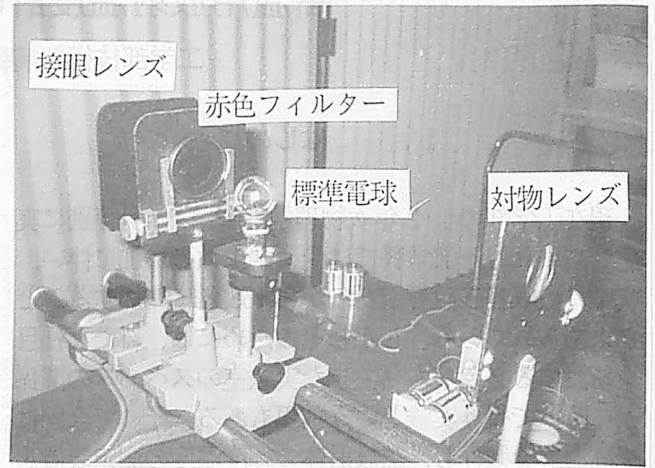


図3 レンズ・フィルター・電球の配置

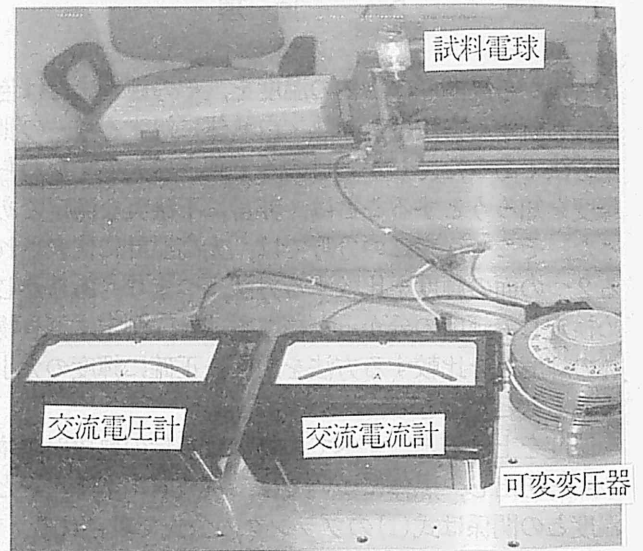


図4 試料電球加圧回路

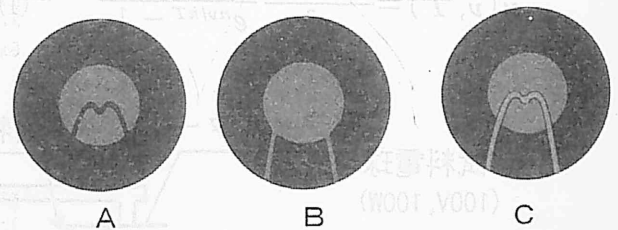


図5 フィラメントの見方

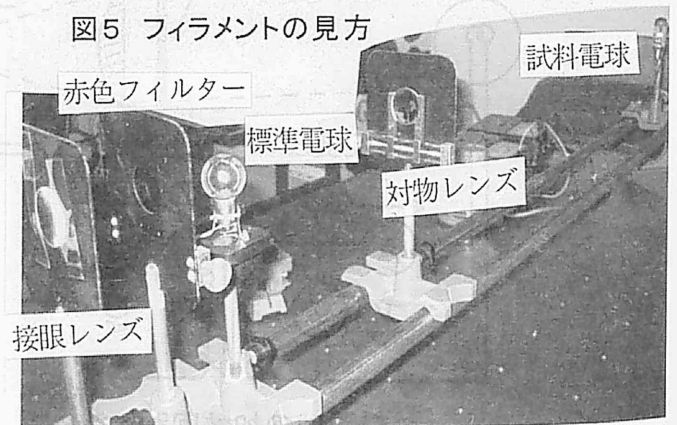


図6 装置全体の写真

4. 結果の整理

4.1 輝度温度と真温度との関係

輝度温度とは、測定している波長領域において、物体の熱放射の輝度と等しい輝度で熱放射する黒帯の温度のことである。波長 λ において、光高温計で測定した輝度温度を T_λ 、物体の真温度を T とする。放射エネルギーの平衡を考えると、黒体は放射を最もよく吸収するので、同時に最もよく放出する性質をもつことになる(キルヒホッフの放射法則)。したがって、つねに $T_\lambda < T$ が成り立つ。

物体の放射強度を I_m 、同温度の黒体の放射強度を I とする。物体の放射率 ϵ_λ を、

$$\epsilon_\lambda = \frac{I_m(\lambda, T)}{I(\lambda, T)} \quad (3)$$

で定義する。上と同じ理由で、つねに $\epsilon_\lambda < 1$ である。放射率は、物質の種類、温度、波長、および表面の形状等によって決まってくる。輝度温度の定義から、

$$I_m(\lambda, T) = I(\lambda, T_\lambda) \quad (4)$$

である。(2)~(4)式を用いると、

$$\begin{aligned} \epsilon_\lambda &= \frac{I(\lambda, T_\lambda)}{I(\lambda, T)} = \frac{1 / \{\exp(c_2/\lambda T_\lambda) - 1\}}{1 / \{\exp(c_2/\lambda T) - 1\}} \quad (5) \\ &= \frac{\exp(c_2/\lambda T) - 1}{\exp(c_2/\lambda T_\lambda) - 1} \end{aligned}$$

となる(ただし $\exp x \equiv e^x$)。ここで、

$$c_2 = \frac{ch}{k} = 0.0144 \text{ [m} \cdot \text{K]} \quad (6)$$

である。いま、

$$\lambda = 650\text{nm}, \quad T \cong T_\lambda \cong 2000\text{K}$$

を仮定すれば、 $\lambda T = 0.0013\text{m} \cdot \text{K}$ となるから、

$$\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) = 6.5 \times 10^4 \gg 1$$

である。したがって、(5)式の分子、分母において1を無視することができて、

$$\epsilon_\lambda = \exp\left\{\frac{c_2}{\lambda} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_\lambda}\right)\right\} \quad (7)$$

としてよい。これを $1/T$ について解けば、

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_\lambda} + \frac{\lambda}{c_2} \ln \epsilon_\lambda \quad (8)$$

が得られる($\ln x \equiv \log_e x$)。したがって、物体の放射率 ϵ_λ が既知であれば、輝度温度 T_λ から真温度 T を

計算することができる。

この実験では、高温物体としてタングステンフィラメントを用いる。タングステンの波長 $\lambda = 650\text{nm}$ (赤)に対する放射率を表1に示す。温度依存性は考えないことにする。このとき、(8)式の第2項は、

$$\frac{\lambda}{c_2} \ln \epsilon_\lambda = \frac{0.65 \times 10^{-6}}{0.0144} \ln(0.44)$$

となるから、(8)式は、 $= -3.7 \times 10^{-5} \text{ (K}^{-1}\text{)}$

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_\lambda} - 3.7 \times 10^{-5} \quad (9)$$

となる。

$T(\text{K})$	ϵ_λ
1000	0.458
2000	0.438
3000	0.418

表1 タングステンの $\lambda = 650\text{nm}$ における熱放射率 ϵ_λ

4.2 真温度と供給電力との関係

全波長域にわたる放射のエネルギーは、(2)式を $\lambda = 0$ から ∞ まで積分して求めることができる。空洞に開けた小孔から、単位面積当たり、単位時間に放射される全エネルギー E は、

$$E = \int_0^\infty I(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4 \quad (10)$$

となる。ここで、 σ は、

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} = 5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4} \quad (11)$$

で与えられ、ステファン・ボルツマン定数と呼ばれる。(10)式をステファン・ボルツマンの法則という。

試料電球フィラメントが、温度 $T(\text{K})$ の定常状態になっているとして、エネルギーのつりあいを考える。まず単位時間当たり放出するエネルギーを考えると、熱放射エネルギーとしてステファン・ボルツマンの法則より $\sigma S T^4$ (S はフィラメントの全表面積)があり、また伝導で失うエネルギーとして P_c がある。次に、エネルギーの供給を考えると、フィラメントに単位時間当たり供給された電氣的エネルギー、すなわち電力 $P = VJ(\text{W})$ がある。フィラメントの周囲(温度 T_0)から放射として流入するエネルギーも原理的には考えられるが、 $T_0^4 \ll T^4$ であるのでここでは考えない。このとき、エネルギーのつりあいから、

$$P = \sigma S T^4 + P_c \quad (12)$$

が得られる。

伝導で失うエネルギーは小さく、従って(12)式は、

$$P = \sigma ST^4 \quad (13)$$

と近似してよい。この両辺の対数をとれば、

$$\log_{10} P = 4 \log_{10} T + \log_{10} \sigma S \quad (14)$$

となる。したがって、両対数グラフを用い、横軸に T 、縦軸に P をとってプロットすれば、直線が得られ、その傾き A は4に近いはずである。

4.3 測定結果

表2(a)に試料電球に10V~50Vまで電圧を印加し、その際の電流値 J を読み取り、供給電力 $P = VJ(W)$ を求めた結果を示す。次に、(b)に試料電球の印加電圧を換えることで輝度を変化させ、標準電球の輝度と比較する方法で測定した標準電球の輝度温度 T_λ を示す。この標準電球(3V, 1.2W)は、400mA程度まで電流が流せ、1600K程度まで測定可能である。またそれ以上の温度を測る場合には、暗(ND2)フィルターを使用する。さらに、(9)式を用い輝度温度 T_λ から、フィラメント自体の放射する温度である真温度 T を求めた。

図7に両対数グラフを用い、横軸に真温度 $T(K)$ 、縦軸に供給電力 $P(W)$ をプロットしたグラフを示す。グラフの傾き A は、フィルターがない場合が3.9、フィルターがある場合が3.7となり、ほぼ傾き A が4に近い値となった。このことから、ステファン・ボルツマンの法則より(13)式 $P = \sigma ST^4$ 、供給電力 P と真温度 T^4 は比例関係にあることが確かめられた。

4.4 太陽の表面温度の計算

ステファン・ボルツマンの法則により太陽の表面温度を求める。1分あたり 1cm^2 あたりのエネルギーは、

$$2.0 \times 4.19 = 8.39 \text{Jcm}^{-2} \text{min}^{-1}$$

太陽から1秒あたりの放射エネルギー P は $3.95 \times 10^{26} (\text{Js}^{-1})$ となる。太陽の表面積 S は、

$6.2 \times 10^{18} (\text{m}^2)$ であり、ステファン・ボルツマンの

法則より、 $P = \sigma ST^4$ に数値を代入すると、

$$3.95 \times 10^{26} = 5.67 \times 10^{-8} \times 602 \times 10^{18} \times T^4$$

太陽の表面温度 $T = 5790(\text{K})$ と計算できる。

5. 物理学実験に導入する上での評価

- ① この光高温計の輝度温度の測定方法はわかりやすく、熱放射を理解する教材としても適している。
- ② 本学部の物理学実験に展開するためには、6セットの装置が必要であり、検定された標準電球は1つしかなく、入手が困難となっている。
- ③ 市販の光高温計は製造中止であり、代用品としてのフォトダイオードを用いた高温用の放射温度計は高価で、仕組みが複雑で理解しにくい。
- ④ 単一波長であれば、フォトダイオードの校正は正確にでき、1本のタングステンフィラメントの電球と組み合わせた測定方法が考えられる。

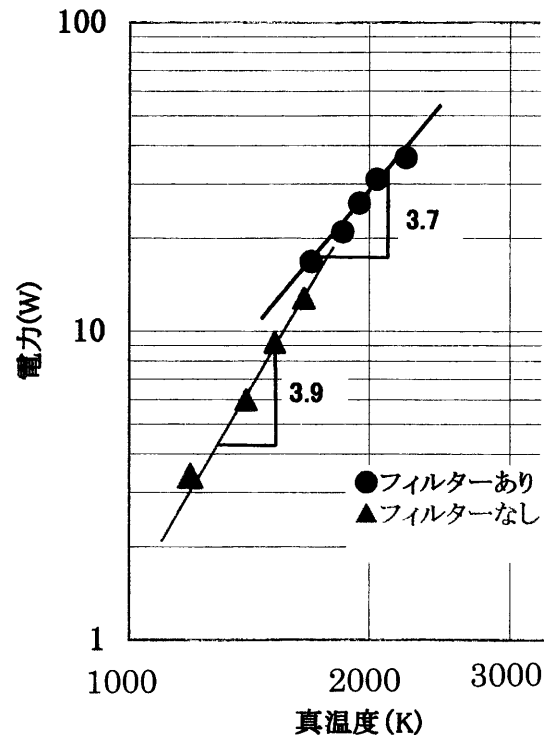


図7 供給電力と真温度の関係

電圧V (V)	電流 (A)	電力P (W)	輝度温度(K)		真温度(K)	
			フィルターなし	フィルターあり	フィルターなし	フィルターあり
10	0.34	3.40	1143		1194	
15	0.40	6.00	1333		1403	
20	0.46	9.20	1443		1525	
25	0.51	12.8	1563	1508	1659	1597
30	0.56	16.8		1593		1693
35	0.60	21.0		1733		1852
40	0.65	26.0		1813		1943
45	0.69	31.1		1913		2043
50	0.73	36.5		2053		2222

表2 (a) 試料電球の供給電力

(b) 標準電球の輝度温度と真温度