

高温用放射温度計の製作と熱放射実験の教材化

工学部技術部実験教育支援室 増田健二

1. はじめに

本学では、2年次の物理学実験において「光高温計による熱放射実験^[1]」を取り入れており、人気の高い実験種目の一つとなっている。この中で、あらかじめ検定して輝度温度の分かた光高温計用の校正電球を使用し、熱放射物体の輝度温度を測定している。しかしながら、光高温計などの放射温度計では、物体の放射率が波長によって異なることで2000[K]を超えると不安定な測定温度となる。

まず、熱放射の代表には太陽があり、この方法で連続スペクトルを描く光線を発生させている。この熱放射の色（波長）ごとの要素の中で、赤外域から太陽光のピーク（緑色： $\lambda \approx 500$ [nm], $T \approx 5800$ [K]）を過ぎ、紫色域にいくにしたがって高温になっていく。そこで今回の研究の目的としては、近赤外→可視光の領域（ 1000 [K] $< T < 8000$ [K]）までの温度を測定できる高温用放射温度計を製作する。さらに、この温度計を使用し、電球（ハロゲンランプ）および放電管を光源に用いた熱放射実験を行う。

2. 黒体放射と熱放射の原理

電磁波を完全に通さない壁に囲まれた空間を考える。この空間が、まわりの壁を構成する物体と熱平衡にあるとき、この空間の中の放射（電磁波、光）を空洞放射という。空洞放射のスペクトル（波長による強度の変化）を調べるためには、空洞に小さな孔を開け、そこから漏れてくる放射を調べればよい。一方、外部からその孔を通して入った電磁波が、空洞内部で反射などして再び出てくるとは、穴が十分に小さければ無視できる。つまり、外部から入射する電磁波を完全に吸収する黒体とみなすことができる。

空洞放射（黒体放射）における電磁波のエネルギーのうち、振動数が $\nu \sim \nu + d\nu$ の間に

あるエネルギーを $u d\nu$ とするとき、 u を電磁波のエネルギー密度という。プランク

(Planck) による、黒体放射のエネルギー密度の公式（プランクの公式）は、

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

で表される。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 $L d\lambda$ とすれば、 L は、

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

で表される。この L を分光放射輝度という。空洞に小孔を開けて内部の放射をとり出すと、その輝度分布は、式(2)とよく一致する。物体の表面から電磁波が放出する現象を熱放射という。

したがって、ある波長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。放射温度計（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 放電管による光干渉実験

3. 1 測定原理

等しい幅をもつ多数のスリットを等間隔 d で規則正しく並べたものを回折格子といい、 d を格子定数という。回折格子に平行光線を入射させると、各格子によって干渉した光が、後方のスクリーン上に明暗の分布をもつ干渉縞を作る。図1のように、波長 λ の入射光を格子定数 d 、角度 θ の方向に進む光線について、

$$\lambda = d \sin \theta \quad (3)$$

で表される。回折格子から距離 L のスクリーン上に映し出された回折縞の明線の距離 x とすると、明線の回折角 θ は、

$$\sin \theta = \frac{x}{\sqrt{L^2 + x^2}}$$

と表される。

3. 2 測定方法と結果の整理

光源を水素 H などのスペクトル放電管の光線はスリットを通過して、回折格子 $d = 5 [\mu\text{m}] (200\text{par} [\text{mm}])$ にあたり、スクリーン上に干渉縞をつくる。各種物質の干渉縞の写真を図 2 に示す。最も輝度の高い色の輝線の間隔 x を遊尺望遠鏡で測定し、ピーク波長 λ_{max} を求める。

回折格子とスクリーンの距離 ($L = 28.55\text{mm}$) とすると (3) 式を用い、干渉縞の輝線の距離 x から入射光の波長 λ が求まる。表 1 に各物質の最も輝度の大きい色の輝線の間隔 x の測定から求めたピーク波長 λ_{max} と定数表^[2]の値を比較する。また、ピーク波長 λ_{max} の測定値

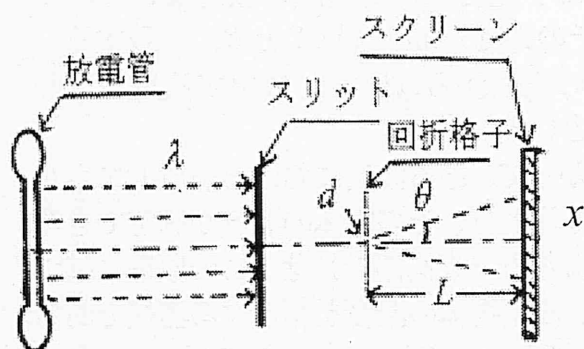


図 1. 光回折測定の実験装置の原理図

よりウィーンの変位則 (4) 式を用いて絶対温度 T を算出する。

$$T \approx 2.898 \times 10^{-3} / \lambda \quad (4)$$

放電管による光干渉実験によって、ネオン Ne の橙色 ($\lambda \approx 630 [\text{nm}]$) から、水素 H の青色 ($\lambda \approx 440 [\text{nm}]$) のほぼ可視光全領域の測定が可能であることが分かった。

4. 電球による光干渉実験

4. 1 測定原理

光源を電球に換えて同様の測定を行った。放電管は励起によって光（電磁波）を放出する輝線スペクトルである。これに対して熱放射体である電球の場合は、図 3 のような色線が連なった連続スペクトルのため、ピーク波長（最も輝いている色線）を目測では見分けられない。そこで、図 4 のようにフォトダイオードを用い、輝度（光度/ m^2 ）を定量的に測定する。センサをデジタルマイクロメータで移動させ、さらにピークの輝度の間隔を測定する方法を考えた。

	輝線の 距離 x [mm]	測定値 λ_{max} [nm]	絶対温度 T [K]	定数値 λ_{max} [nm]
H	2.52	440	6590	434.05
He	3.45	591	4900	587.56
Ne	3.63	631	4590	626.65

表 1. 各種物質のピーク波長 λ_{max} と絶対温度 T

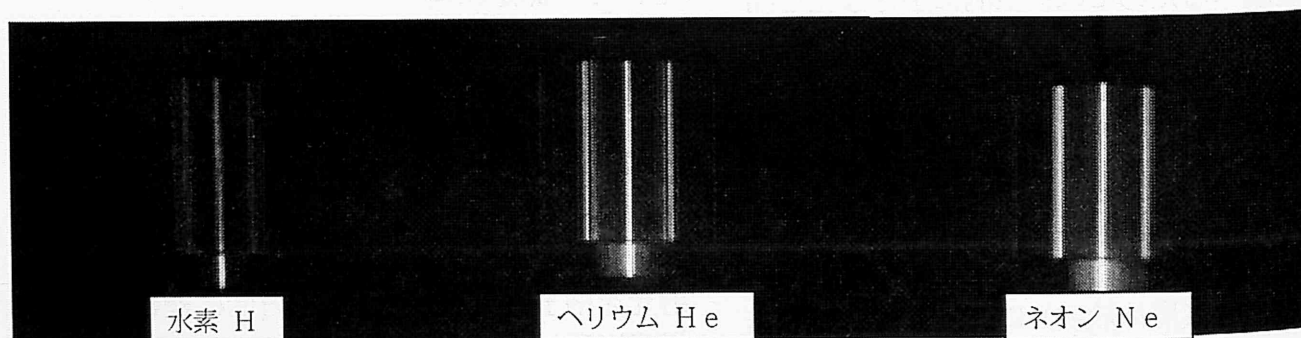


図 2. 各種物質の干渉縞の写真

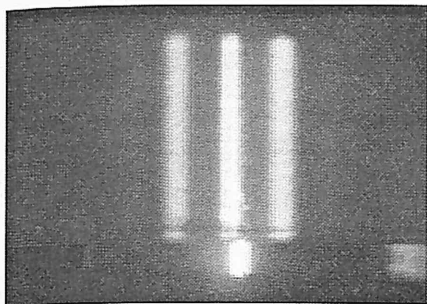


図3. 電球の干渉縞

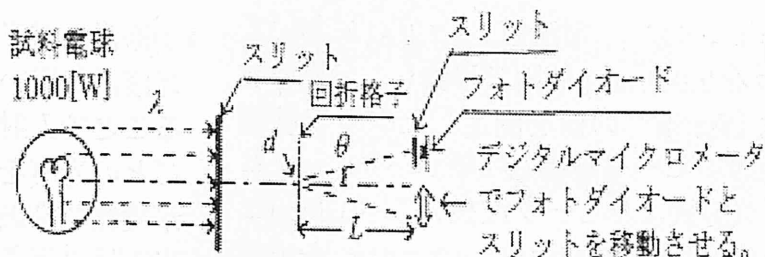


図4. 光干渉による放射輝度の測定原理

4. 2 測定方法

図7に実験装置の写真を示す。試料電球にはハロゲンランプ (PHILIPS JCP 100V, 1000W) を使用した。試料電球のフィラメントに加えた電力 P は、可変変圧器を使用し、電圧 V をかけた際の電流値 J を読み取り $P[W]=VJ$ で算出する。電球の光は放射線状に広がるため、片面凸レンズを用いて平行な光に調節する。スリットで回折 (ホイヘンスの原理) した光を回折格子で干渉させる。デジタルマイクロメータのスピンドルの移動に伴いセンサが回転しないような仕組みを施し、ピークの輝線 (色線) の間隔 x を測定する。

プランクの公式(2)式の単位系は、分光放射輝度 $L [Wsr^{-1}m^{-3}]$ となる。つまり、図5のように電球の電力 $P [W]$ を全球の表面積 $[sr]$ および単位体積当たりの角柱の体積 $[m^3]$ で割ったものである。

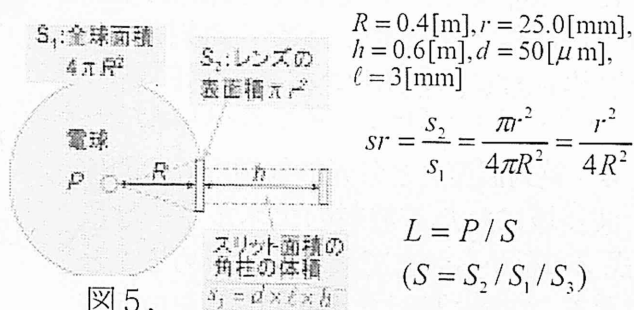


図5.

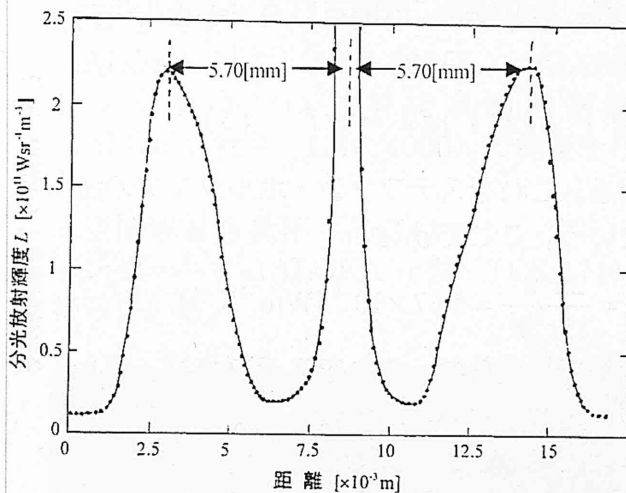


図6. ピーク輝線の間隔 x

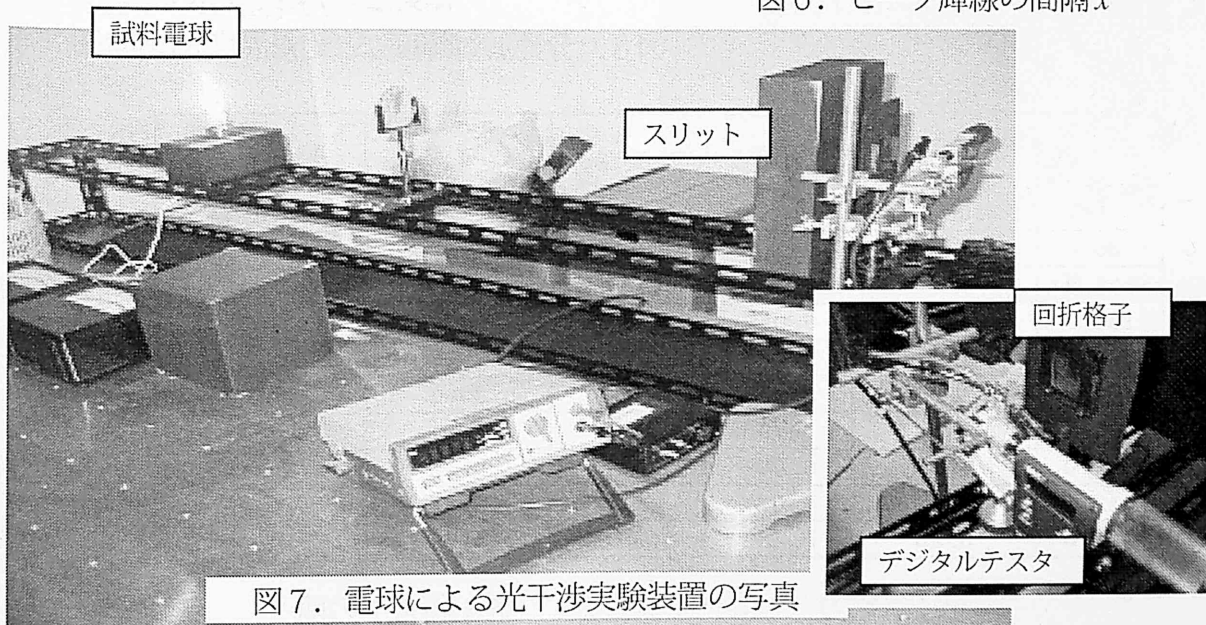


図7. 電球による光干渉実験装置の写真

4. 3 測定結果

電圧 $V = 50[\text{V}]$ 、電流値 $J = 7.1[\text{A}]$ において、センサを $0.01[\text{mm}]$ 間隔で移動し、分光放射輝度 $L [\text{Wsr}^{-1}\text{m}^{-3}]$ の値を測定したグラフを図6に示す。ピーク輝線の間隔 $x = 5.70 [\text{mm}]$ となり、(3)式よりピーク波長 $\lambda_{\text{max}} = 933[\text{nm}]$ となる。(4)式より絶対温度 $T = 3110 [\text{K}]$ を求める。

次に、印加電力 $P [\text{W}]$ を換えて輝線のピーク輝度の間隔 x を測定し、ピーク波長 λ_{max} および絶対温度 T を算出する(表2)。

4. 4 絶対温度 T と分光放射輝度 L の関係

全波長域にわたる放射のエネルギーは、(2)式 $\lambda=0$ をから ∞ 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、

$$E = \int_0^{\infty} L(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4 \quad (5)$$

となる。これをステファン・ボルツマンの法則という。ここで σ は、

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

の関係で与えられ、これをステファン・ボルツマン定数と呼ぶ。したがって、図8のように、横軸に T^4 、縦軸に L をとってプロットすれば、直線が得られステファン・ボルツマンの法則が確かめられた。

5. 評価

通常、電子スペクトルの測定では、分光光度計が用いられ、回折格子に角度をつけることで入射光を分散させ色の各々の波長ごとの光度を精巧に測定するもので仕組みが複雑で高価な機器となっている。今回の光干渉による装置は、仕組みが分かりやすくより安価で製作可能なことから、学生実験等の教具としても活用が可能である。

参考文献

- [1] 静岡大学物理教室：「物理学実験指導書(2006年度版)」, pp.121-128
- [2] 国立天文台：「理科年表(2001年度版)」, pp. 505-506

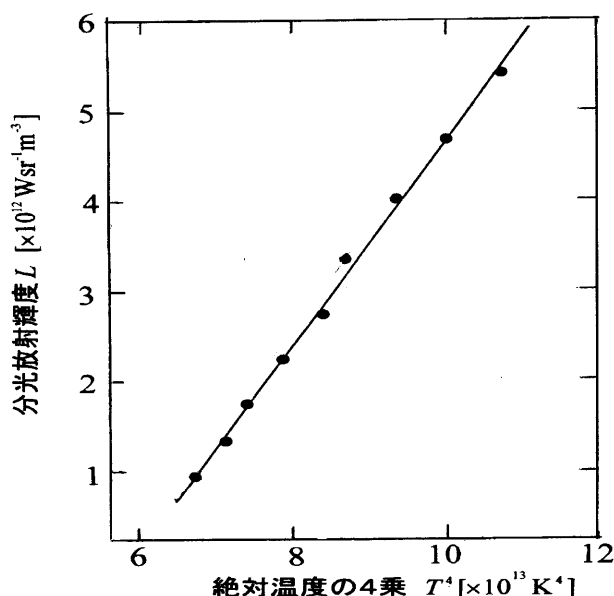


図8. 分光放射輝度 L と絶対温度 T^4 の関係

電力 P [W]	分光放射 輝度 L [$\times 10^{12} \text{ W/m}^3$]	輝線の 間隔 x [mm]	波長 λ [nm]	絶対温度 T [K]	絶対温度 の4乗 T^4 [$\times 10^{13} \text{ K}^4$]
86.0	0.98	6.204	1013	2861	6.700
121.3	1.38	6.097	996	2886	6.941
160.5	1.87	6.052	989	2930	7.370
204.8	2.32	5.967	975	2972	8.167
252.0	2.86	5.895	964	3006	8.167
301.5	3.22	5.790	948	3057	8.733
355.0	4.03	5.689	932	3109	9.348
412.5	4.68	5.591	916	3164	10.02
471.0	5.35	5.568	912	3176	10.61

表2. 電力 P とピーク波長 λ_{max} ・絶対温度 T の関係