

金属の分光放射率と色温度

藤田 清比古*・山口 隆生*²

The Spectral Emissivity and Color Temperature of Metals

Kiyohiko FUJITA and Takao YAMAGUCHI

Synopsis :

When the color temperature is strictly defined, it is classified into "color temperature", "distribution temperature", and "two-color temperature", but these have often been referred to simply as color temperature, without distinguishing them exactly.

In this paper, these three color temperatures will be regarded as distinctive, and the definition and the respective determination methods of these three color temperatures will be proposed. From the viewpoint of measuring the color temperatures mentioned above, some new types of radiators will be defined, based on the characteristics of spectral radiation of the radiator, and then the correlation of each color temperature and the true temperature will be discussed.

When the spectral emissivity of metals ($\epsilon^M(\lambda, T)$) is assumed to be in a linear relationship with wavelength λ , i.e. $\epsilon^M(\lambda, T) = a\lambda + b$ (where $a \mu\text{m}^{-1}$ and b are constant), each of the color temperatures can be expressed as a function of a/b .

Thus, each of the color temperatures for various a/b values is calculated by the determination methods proposed in this paper, and the correlations with each of the other color temperatures and the true temperature of metals are shown. It is checked up whether the assumption mentioned above is reasonable with tungsten, whose wavelength dependency of spectral emissivity is known. Moreover, the color temperature of liquid iron is treated.

1. 緒 言

高温度の金属の色温度は、比較的真温度に近く、測定値を直接真温度と見なしえると考えられたため、古くから注目され種々の測定装置¹⁾²⁾が考案されている。しかしながら一般に色温度¹⁾³⁾と称されていても、厳密には色度温度、分布温度、それに分布温度を簡便に測定するために考えられた二色温度などの種類に分類される。そして被測温体が完全放射体 (full radiator, 黒体ともいう)、灰色体 (gray body) など特殊な場合を除いてはこれら各種の色温度は一致せず、実在の金属の多くはこの条件を満たさないと予想されるので、たとえば同温度の同一物体を各種の色温度計で測定した温度を単に色温度といつてもその内容、すなわち色温度の定義、他の色温度との相互関係、さらには真温度との関係も同一とはならず測定結果を考察する上で不都合が生ずる。そこで各種の色温度を区別して考えることにすると測温対象の分光放射特性、すなわちその物体の分光放射率が主要な因

子となるが、被測温体の分光放射特性と各種色温度の相互関係ははまだ明確にされていない。本報は各種の色温度の定義と決定方法を具体的に示し、色温度を測定する立場から被測温体を分光放射特性により分類して名称をつけ、これと色温度ならびに真温度の関係について考察した。つぎに金属の分光放射率の波長依存性が色に関する波長域で波長に対して1次式で取り扱えるものと仮定して、真温度と各種色温度およびその相互関係を調べた。そしてこのように金属の分光放射率の波長特性を1次式と仮定したことの妥当性を比較的広い波長域にわたって分光放射率が測定されているタングステンについて検討した。さらに溶鉄の色温度についても言及した。

2. 色温度の定義と決定方法

2.1 色度温度と分布温度の定義

色度温度と分布温度を区別している文献はきわめて少ないが、JIS⁴⁾の定義によれば色度温度 (color temperature) とは「ある光に等しい (または少なくとも近

昭和 50 年 10 月 本会講演大会にて発表 昭和 54 年 12 月 17 日受付 (Received Dec. 17, 1979)

* 中部工業大学 工博 (Chubu Institute of Technology)

*² 中部工業大学 (Chubu Institute of Technology, 1200 Matsumoto-cho Kasugai 487)

似的に等しい) 色度をもつ完全放射体の温度をその光の色度温度という」であり、分布温度 (distribution temperature) は「ある光に等しい (または近似的に等しい) 分光分布をもつ完全放射体の温度をその光の分布温度」となっている。この両定義は「厳密に等しい」場合と「近似的に等しい」場合を共に認め、かつこの両者を区別していない。これは色度温度、分布温度それに後述の二色温度の相互関係を定量的に考察する上で混乱を招くおそれがあるから著者らはこの両者を区別して考えることにし、「厳密に等しい」場合をそれぞれ理想的な色度温度 (ideal color temperature), 理想的な分布温度 (ideal distribution temperature) と呼び、このような物体 (本報においては熱放射をとまらぬ発熱体を測温対象に考えているため以後放射体と称する) をそれぞれ理想的な色度温度を持つ放射体 (radiator indicating ideal color temperature), 理想的な分布温度を持つ放射体 (radiator indicating ideal distribution temperature) と称することにした。

2.2 色度温度の決定方法

温度* T , 波長 λ における分光放射率 $\epsilon(\lambda, T)$ のある放射体 (必ずしも完全放射体ではない一般の放射体を以後ある放射体と称する) の色度温度は、定義よりこの放射体の色度と最も等しい色度を呈する完全放射体の温度であるから、まずこの放射体のこの温度における色度を知る必要があるが色度座標 (x_a, y_a) ⁹⁾ は色の理論⁹⁾ よりつぎのように三刺激値 X_a, Y_a, Z_a の相対値として求まる。

$$X_a = \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} \epsilon(\lambda, T) N(\lambda, T) \bar{x} d\lambda \dots\dots\dots (1)$$

$$Y_a = \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} \epsilon(\lambda, T) N(\lambda, T) \bar{y} d\lambda \dots\dots\dots (2)$$

$$Z_a = \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} \epsilon(\lambda, T) N(\lambda, T) \bar{z} d\lambda \dots\dots\dots (3)$$

$$\left\{ \begin{aligned} x_a &= \frac{X_a}{X_a + Y_a + Z_a} = \frac{\int_{\lambda_a}^{\lambda_b} \epsilon(\lambda, T) N(\lambda, T) \bar{x} d\lambda}{\int_{\lambda_a}^{\lambda_b} \epsilon(\lambda, T) N(\lambda, T) [\bar{x} + \bar{y} + \bar{z}] d\lambda} \dots\dots\dots (4) \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} y_a &= \frac{Y_a}{X_a + Y_a + Z_a} = \frac{\int_{\lambda_a}^{\lambda_b} \epsilon(\lambda, T) N(\lambda, T) \bar{y} d\lambda}{\int_{\lambda_a}^{\lambda_b} \epsilon(\lambda, T) N(\lambda, T) [\bar{x} + \bar{y} + \bar{z}] d\lambda} \dots\dots\dots (5) \end{aligned} \right.$$

一方温度 F_c の完全放射体の場合、三刺激値 X, Y, Z は(1)~(3)式の、また色度座標 (x, y) は(4), (5)式の $\epsilon(\lambda, T)$ を 1, $N(\lambda, T)$ を $N(\lambda, F_c)$ に置き換えれば同

様にして求められる。

ただし $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ はスペクトル三刺激値; $N(\lambda, T), N(\lambda, F_c)$ は波長 λ , 温度 T または F_c における完全放射体の分光放射輝度; λ_a, λ_b は色に關係する波長域の波長の下限值と上限値である。(4), (5)式からある放射体の色度座標 (x_a, y_a) を求めれば、あとは光源の色温度を求める手段⁷⁾ を適用すればよい。しかし近似的に等しい色度温度を求める場合 CIE の XYZ 表色系である色度座標では 2 点間の距離が直ちに色差とならない⁸⁾ ので簡単ではない。そこで著者らは XYZ 表色系の色度座標を色差が 2 点間の距離として表される CIE-UCS 色度座標に変換⁹⁾¹⁰⁾ して色度温度を決定することにした。

2.3 分布温度と二色温度の決定方法

いま温度 T , 波長 λ における分光放射率 $\epsilon(\lambda, T)$ のある放射体が理想的な分布温度を持つ放射体であり、理想的な分布温度を F_a^* とすれば

$$N'(\lambda, T) = \epsilon(\lambda, T) N(\lambda, T) = \epsilon_F^* N(\lambda, F_a^*) \dots\dots\dots (6)$$

ただし $N'(\lambda, T)^*$ は T, λ におけるある放射体の分光放射輝度; ϵ_F^* は色放射率である。そして理想的な分布温度を論じているのであるから ϵ_F^* は定義より λ に無関係な定数としてあらゆる λ について(6)式が成立する。一方色放射率が λ に対して無関係な定数とならない放射体はこの放射体の分光分布が、いかなる温度の完全放射体の分光分布とも、近似的にしか等しくならないので理想的な分布温度を持つ放射体ではない。それでこの場合分布温度が定まると色放射率は λ によつて変化せざるをえないものと考えて $\epsilon_F(\lambda)$ と記して ϵ_F^* と区別する。いまある放射体が理想的な分布温度を持たない放射体で、近似的に等しいとして求められた分布温度を F_d とすると(7)式のように表される。

$$N'(\lambda, T) = \epsilon(\lambda, T) N(\lambda, T) = \epsilon_F(\lambda) N(\lambda, F_d) \dots\dots\dots (7)$$

さて放射体の分布温度の決定方法として JIS では任意に選んだ 2 つの特定波長 λ_1, λ_2 における分光放射輝度の比と、同波長における完全放射体の分光放射輝度の比が等しくなる完全放射体の温度とする⁷⁾ という分布温度を簡便に測定する二色温度 (two-color temperature) 測定法を採用しているが、この方法をまず理想的な分布温度を持つ放射体に適用すれば(6)式より(8)式が得られる。

$$\frac{\epsilon(\lambda_1, T) N(\lambda_1, T)}{\epsilon(\lambda_2, T) N(\lambda_2, T)} = \frac{N(\lambda_1, F_c)}{N(\lambda_2, F_c)} \left[\frac{\epsilon_F^* N(\lambda_1, F_a^*)}{\epsilon_F^* N(\lambda_2, F_a^*)} = \frac{N(\lambda_1, F_a^*)}{N(\lambda_2, F_a^*)} \right] \dots\dots\dots (8)$$

* 本報では「温度」とのみ記したときは一般に真温度を指す。とくに星記号が T でなくても単に「温度」といえば真温度をいう。

* 以下分光放射輝度の記号として N と記せば温度を示す添字が T でなくても完全放射体の分光放射輝度を、 N' と記せば必ずしも完全放射体でない一般の放射体の分光放射輝度を示す。

したがって F_t は二色温度であるが、これは理想的な分布温度 F_a^* そのものでもあり、二色温度を測定すれば (理想的な) 分布温度 F_a^* が決定できる。つぎに理想的な分布温度を持つ放射体でない場合にもこの方法を準用すると、この放射体の任意の λ_1, λ_2 における分光放射輝度と近似的に等しいとして求められた分布温度 F_d の関係は (7) 式より (9), (10) 式となる。

$$N'(\lambda_1, T) = \epsilon(\lambda_1, T)N(\lambda_1, T) = \epsilon_F(\lambda_1)N(\lambda_1, F_d) \dots (9)$$

$$N'(\lambda_2, T) = \epsilon(\lambda_2, T)N(\lambda_2, T) = \epsilon_F(\lambda_2)N(\lambda_2, F_d) \dots (10)$$

従来は $\epsilon_F(\lambda_1)$ と $\epsilon_F(\lambda_2)$ が常に等しいとされていたが、理想的でない場合のように等しくなくても数学的には任意の 2 波長 λ_1, λ_2 において両式で等しくなる色放射率たとえば ϵ'_F と完全放射体の温度たとえば F'_t が必ず 1 つ仮定できるので (9), (10) 式の比をとった (11) 式から二色温度 F'_t が決定できる。

$$\frac{\epsilon(\lambda_1, T)N(\lambda_1, T)}{\epsilon(\lambda_2, T)N(\lambda_2, T)} = \frac{\epsilon_F(\lambda_1)N(\lambda_1, F_d)}{\epsilon_F(\lambda_2)N(\lambda_2, F_d)}$$

$$= \frac{\epsilon'_F N(\lambda_1, F'_t)}{\epsilon'_F N(\lambda_2, F'_t)} = \frac{N(\lambda_1, F'_t)}{N(\lambda_2, F'_t)} \dots (11)$$

すなわち二色温度はいかなる分光放射特性を示す放射体であつても必ず厳密に定義された完全放射体の温度をただ 1 つ仮定できるという利点があるが、この場合特定の 2 波長 λ_1, λ_2 で ϵ'_F, F'_t を仮定したものなので真温度 T の同一放射体であつても λ_1, λ_2 の選び方により F'_t は必ずしも一定とは限らない。それでこれを決定した 2 波長を添字として明記し、一般的には $F_t(\lambda_1 - \lambda_2)$ と記すことにした。またこのように決定した二色温度は理想的な分布温度を持つ放射体であれば常に分布温度と一致するが、そうでない場合近似的に等しい分布温度 F_d と一致するという保証はまつたくない。そこで著者らは分布温度のある光に近似的に等しいという定義を満足させる温度とは (7) 式の $\epsilon_F(\lambda)$ が各波長ごとに近似的に等しいと見なしえるという条件を最も満たすような完全放射体の温度 F_d を見出すことと考へた。すなわち (7) 式は (12) 式となり、この F_d に任意の温度を代入して波長をある波長域で n 個とり、各波長に対する $\epsilon_F(\lambda_i)$ を求め (13) 式で σ_{ϵ_F} を計算し、 σ_{ϵ_F} を最小にする温度 F_d をその放射体の分布温度とする方法である。

$$\epsilon_F(\lambda_i) = \frac{N'(\lambda_i, T)}{N(\lambda_i, F_d)} = \frac{\epsilon(\lambda_i, T)N(\lambda_i, T)}{N(\lambda_i, F_d)} \dots (12)$$

$$\sigma_{\epsilon_F} = \frac{\left[\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left\{ \epsilon_F(\lambda_i) - \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \epsilon_F(\lambda_i) \right) \right\}^2 \right)^{1/2} \right]}{\left\{ \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \epsilon_F(\lambda_i) \right) \right\}} \dots (13)$$

またこれを輝度分布を用いて表すには、(14) 式のお

りある放射体の分光放射輝度分布 $D'(\lambda_i, T)$ と任意の温度 F_d の完全放射体のそれ $D(\lambda_i, F_d)$ との比 $E(\lambda_i)$ をとり、これを (13) 式の $\epsilon_F(\lambda_i)$ の項に代入して前記と同様な方法で σ_{ϵ_F} を最小にする F_d を求め、分布温度とする。

$$E(\lambda_i) = \frac{D'(\lambda_i, T)}{D(\lambda_i, F_d)} = \frac{\frac{\epsilon(\lambda_i, T)N(\lambda_i, T)}{\epsilon(\lambda_0, T)N(\lambda_0, T)}}{\frac{N(\lambda_i, F_d)}{N(\lambda_0, F_d)}} \dots (14)$$

以上のようにして求めた色度温度、分布温度、そして二色温度の間に互いに代数的な関係はない。しかし二色温度 $F_t(\lambda_1 - \lambda_2)$ から真温度 T は $\lambda_1, \lambda_2, \epsilon(\lambda_1, T)/\epsilon(\lambda_2, T)$ がわかれば代数的に求まる。したがって二色温度は分布温度の考え方から出発しているのにもかかわらず他の色温度、すなわち分布温度や色度温度より真温度と明確な関係を持つことになる。このことは二色温度にとつて前記の利点と合わせて勝れた特長といえる。

3. 種々の放射体と色温度

3.1 理想的な分布温度を持つ放射体

色放射率が波長に無関係な定数となる放射体が理想的な分布温度を持つ放射体であるから、これについて検討する。色放射率 ϵ_F^* は (6) 式より (15) 式をえる。

$$\epsilon_F^* = \frac{N(\lambda, T)}{N(\lambda, F_a^*)} \epsilon(\lambda, T) = (\text{一定}) \dots (15)$$

まず $T = F_a^*$ とすれば

$$\epsilon_F^* = \epsilon(\lambda, T) = (\text{一定}) \dots (16)$$

になる。これは分光放射率 $\epsilon(\lambda, T)$ が波長に関係なく一定の放射体であるから、完全放射体 ($\epsilon(\lambda, T) = 1$) か灰色体 ($\epsilon(\lambda, T)$ が 1 未満の正の定数) である。よつて完全放射体、灰色体は理想的な分布温度を持つ放射体であり、分光放射率と色放射率が等しくかつ理想的な分布温度と真温度も等しくなる。一方 $T \neq F_a^*$ の場合 $\epsilon(\lambda, T)$ は定義より $0 < \epsilon(\lambda, T) \leq 1$ という条件を満足すればよいので (15) 式の λ による $N(\lambda, T)/T(\lambda, F_a^*)$ の変動を左辺が一定になるようにこれを $\epsilon(\lambda, T)$ の変化で補うとすれば完全放射体、灰色体以外でも理想的な分布温度を持つ放射体は無数に存在することになる。しかし $\epsilon(\lambda, T) \neq \epsilon_F^* = 1$ の放射体は完全放射体ではないので、このような $\epsilon(\lambda, T)$ を持つ放射体を特に同温体 (ideal color body (radiator)) と定義した。同温体の分光放射率を Wien の放射則を用いて (15) 式から求めると (17) 式のようになる。

$$\epsilon(\lambda, T) = \frac{N(\lambda, F_a^*) \epsilon_F^*}{N(\lambda, T)} = \exp \left[\frac{C_2 (F_a^* - T)}{\lambda T F_a^*} \right] \dots (17)$$

ただし $0 < \epsilon(\lambda, T) \leq 1$ であるから $F_a^* < T$ となる。さて理想的な分布温度を持つ放射体はいかなる λ に対しても ϵ_F^* は一定となる必要があるが、色温度測定を

主に考えた場合、あらゆる波長域を必ずしも考察の対象とする必要はない。色とは人間の生理機能に関係した感量であるから、色温度についてもたとえば可視域に限定して考えるのも一方法である。それでこのようにある波長域 ($\lambda_\alpha \sim \lambda_\beta$) に限定して、この波長域で色放射率が一定となるような放射体を同色体 (regular color body (radiator)) と定義した。

3.2 理想的な色度温度を持つ放射体

温度 T のある放射体が理想的な色度温度を持つ放射体で、理想的な色度温度を F_a° とすると、この放射体の色度座標 (x_a, y_a) と温度 F_a° の完全放射体の色度座標 (x, y) がそれぞれ互いに等しいから (18), (19) 式の連立方程式が成立する。

$$\left\{ \begin{aligned} x_a = x &= \frac{\int_{\lambda_a}^{\lambda_b} \epsilon(\lambda, T) N(\lambda, T) \bar{x} d\lambda}{\int_{\lambda_a}^{\lambda_b} \epsilon(\lambda, T) N(\lambda, T) [\bar{x} + \bar{y} + \bar{z}] d\lambda} \\ &= \frac{\int_{\lambda_a}^{\lambda_b} N(\lambda, F_a^\circ) \bar{x} d\lambda}{\int_{\lambda_a}^{\lambda_b} N(\lambda, F_a^\circ) [\bar{x} + \bar{y} + \bar{z}] d\lambda} \dots\dots\dots (18) \\ y_a = y &= \frac{\int_{\lambda_a}^{\lambda_b} \epsilon(\lambda, T) N(\lambda, T) \bar{y} d\lambda}{\int_{\lambda_a}^{\lambda_b} \epsilon(\lambda, T) N(\lambda, T) [\bar{x} + \bar{y} + \bar{z}] d\lambda} \\ &= \frac{\int_{\lambda_a}^{\lambda_b} N(\lambda, F_a^\circ) \bar{y} d\lambda}{\int_{\lambda_a}^{\lambda_b} N(\lambda, F_a^\circ) [\bar{x} + \bar{y} + \bar{z}] d\lambda} \dots\dots\dots (19) \end{aligned} \right.$$

これらの式の $\epsilon(\lambda, T)$ に λ に関係のない定数であるという完全放射体、灰色体の条件を代入すると、直ちに $T = F_a^\circ$ の関係が求められる。つぎに (18), (19) 式の両辺にそれぞれの右辺の分子を分母に、左辺の分母を分子に乗じて両式を整理すると (20), (21) 式のようになる。

$$\left\{ \begin{aligned} \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} [\theta N(\lambda, F_a^\circ) - \epsilon(\lambda, T) N(\lambda, T)] \bar{x} d\lambda &= 0 \dots\dots (20) \\ \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} [\theta N(\lambda, F_a^\circ) - \epsilon(\lambda, T) N(\lambda, T)] \bar{y} d\lambda &= 0 \dots\dots (21) \end{aligned} \right.$$

ただし

$$\theta = \frac{\int_{\lambda_a}^{\lambda_b} \epsilon(\lambda, T) N(\lambda, T) [\bar{x} + \bar{y} + \bar{z}] d\lambda}{\int_{\lambda_a}^{\lambda_b} N(\lambda, F_a^\circ) [\bar{x} + \bar{y} + \bar{z}] d\lambda} \dots\dots\dots (22)$$

(20), (21) 式の連立方程式を満たす $\epsilon(\lambda, T)$ を持つ放射体が理想的な色度温度を持つ放射体となるわけであるが、これらの式の左辺のように λ_a から λ_b の範囲で λ について積分した結果を 0 とする $N(\lambda, T)$, $N(\lambda, F_a^\circ)$, それに $\epsilon(\lambda, T)$ の組み合わせは色色考えられるから一義的

に決定できず、それゆえ理想的な色度温度を持つ放射体は無数に存在する。したがって (20), (21) 式の連立方程式を満たして、この放射体が理想的な色度温度を持つ放射体であるという条件だけでは他の色温度との関係は不明である。しかし (20), (21) 式の [] の中が 0 であれば連立方程式を満たすための十分条件の 1 つとなる。よつて

$$[\theta N(\lambda, F_a^\circ) - \epsilon(\lambda, T) N(\lambda, T)] = 0 \dots\dots\dots (23)$$

とおけば、これから

$$\epsilon(\lambda, T) N(\lambda, T) = \theta N(\lambda, F_a^\circ) \dots\dots\dots (24)$$

となる。ここで θ は (22) 式からわかるとおりに積分した結果の比であるから λ に無関係な数となり、(24) 式は (6) 式の理想的な分布温度を持つ放射体の定義式と等価となる。ゆえに理想的な分布温度を持つ放射体は理想的な色度温度を持つ放射体でもありこの両温度は等しい。しかしながらこの逆である理想的な色度温度を持つ放射体の条件を満たしても上記のごとくこの放射体が理想的な分布温度を持つ放射体とは限らないばかりでなく、理想的な色度温度と分布温度、二色温度とも常に一致するとはいえない。

3.3 二色温度

すでに述べたごとく、二色温度はいかなる放射体についても厳密に定義できるが、理想的な分布温度を持つ放射体であれば任意の 2 つの波長 λ_1, λ_2 における二色温度が常に理想的な分布温度と一致する。一方完全放射体、灰色体であれば真温度と二色温度が等しくなることも明らかである。しかしこのような条件を満たしていかなくても、ある 2 波長 λ_1, λ_2 においてたまたま $\epsilon(\lambda_1, T) = \epsilon(\lambda_2, T)$ となる放射体があれば、その二色温度と真温度は等しくなるので、このような放射体を擬灰色体 (quasi-gray body) と定義した。また二色温度は理想的な分布温度を持つ放射体 (完全放射体、灰色体を含む) 以外では一般に色度温度と明確な関係はない。

以上からわかるとおり、一般に色温度といわれている色度温度、分布温度、それに分布温度の特別な場合である二色温度の三者が、二色温度の 2 つの波長 λ_1, λ_2 に関係なく常に一致する放射体は、完全放射体、灰色体 (この 2 つの放射体は真温度とも一致する)、同温体、それに理想的な分布温度を持つ放射体である。しかしこれらの放射体はすべて理想的な分布温度を持つ放射体に包含される。その他以上のように厳密ではないが、たとえば色度温度、分布温度、二色温度がかなりよく一致し、かつ真温度とも比較的近い値を示す放射体を準灰色体 (semi-gray body) と定義した。Table 1 にこれら種々の放射体の定義と各種色温度の関係をまとめた。同表の

Table 1. The definition of various radiators and their color temperature.

Radiators	Definition	Color Emissivity $\epsilon_F(\epsilon_F(\lambda))$	Color Temperature			
			Color Temp. F_c	Dis. Temp. F_d	Two-Color Temp.	
					$F_t(\lambda_1 - \lambda_2)$	$F_t(\lambda'_1 - \lambda'_2)$
Fullradiator (Black body)	$\epsilon(\lambda, T) = 1$	$= \epsilon(\lambda, T) = 1$	$F_c^a = F_d^a = F_t(\lambda_1 - \lambda_2) = F_t(\lambda'_1 - \lambda'_2) = T$			
Gray body	$\epsilon(\lambda, T)$ is constant but not 1	$= \epsilon(\lambda, T) = \text{const.}$ (but not 1)	$F_c^a = F_d^a = F_t(\lambda_1 - \lambda_2) = F_t(\lambda'_1 - \lambda'_2) = T$			
Radiator indicating ideal* distribution temperature	The spectral distribution is exactly equal to a spectral distribution of the full radiator	$= \text{const.}$ (but not 1)	$F_c^a = F_d^a = F_t(\lambda_1 - \lambda_2) = F_t(\lambda'_1 - \lambda'_2)$			
Radiator indicating ideal* color temperature	The chromaticity is exactly equal to a chromaticity of the full radiator	inconst.	F_c^a	F_d	$F_t(\lambda_1 - \lambda_1)$	$F_t(\lambda'_1 - \lambda'_2)$
Semi-gray body *	The spectral distribution nearly equal to that of the full radiator at the same temperature	$\approx \text{const.}$	$F_c \approx F_d \approx F_t(\lambda_1 - \lambda_2) \approx F_t(\lambda'_1 - \lambda'_2) \approx T$			
Ideal color body *	$\epsilon_F = 1$ (but not equal to $\epsilon(\lambda, T)$)	$= 1$	$F_c^a = F_d^a = F_t(\lambda_1 - \lambda_2) = F_t(\lambda'_1 - \lambda'_2) (< T)$			
Regular color body *	ϵ_F is constant in a limited wavelength region $\lambda_\alpha \sim \lambda_\beta$	constant for $\lambda_\alpha \sim \lambda_\beta$	$F_c^a = F_d^a = F_t(\lambda_1 - \lambda_2) = F_t(\lambda'_1 - \lambda'_2)$ (in a $\lambda_\alpha \sim \lambda_\beta$)			
Quasi-gray body	$\epsilon(\lambda_1, T) = \epsilon(\lambda_2, T)$ in the case of two wavelengths λ_1, λ_2 to determine two-color temperature	$= \epsilon(\lambda_1, T) = \epsilon(\lambda_2, T)$	F_c	F_d	$F_t(\lambda_1 - \lambda_2) = T$	$F_t(\lambda'_1 - \lambda'_2)$
Other thermal radiator		inconst.	F_c	F_d	$F_t(\lambda_1 - \lambda_2)$	$F_t(\lambda'_1 - \lambda'_2)$

* The newly defined radiators in this paper

$\epsilon(\lambda, T)$: spectral emissivity at wavelength λ and temperature T T : true temperature
 F_c^a : ideal color temperature F_c : color temperature F_d^a : ideal distribution temperature F_d : distribution temperature^e
 $F_t(\lambda_1 - \lambda_2)$: two-color temperature at wavelengths λ_1, λ_2 $F_t(\lambda'_1 - \lambda'_2)$: two-color temperature at wavelength shifted $\lambda_1 \rightarrow \lambda'_1, \lambda_2 \rightarrow \lambda'_2$

色温度の欄は真温度を T 、理想的な色度温度を F_c^a 、(近似的に等しい) 色度温度を F_c 、理想的な分布温度を F_d^a (近似的に等しい) 分布温度を F_d 、ある 2 つの波長 λ_1, λ_2 における二色温度を $F_t(\lambda_1 - \lambda_2)$ 、そしてこの 2 つの波長 λ_1, λ_2 が変化してそれぞれ λ'_1, λ'_2 になったときの二色温度を $F_t(\lambda'_1 - \lambda'_2)$ の記号を用いて、これら各温度の相互関係を各種放射体ごとに示した。ただし各欄を区切つて独立した中に温度記号が記入してある場合は他の温度と関係のない特定の温度を示すことを意味し、また $F_t(\lambda_1 - \lambda_2) = F_t(\lambda'_1 - \lambda'_2)$ は 2 つの波長に関係なく常に二色温度が同一値であることを示す。また著者らはこれら各種放射体の真温度 T における分光放射輝度 $N'(\lambda, T)$ と温度 T の完全放射体の分光放射輝度 $N(\lambda, T)$ 、そしてその放射体の色温度に相当する温度 F の完全放射体の分光放射輝度 $N(\lambda, F)$ それぞれを波長の関数として模式的に図示して三者の相互関係を示した¹⁾。

4. 金属の色温度

4.1 分光放射率の直線近似と各種色温度

各種金属の真温度に対する色温度の値はかなり以前に発表¹¹⁾され、その後もこの値が引用¹²⁾されている。しかしこれがいかなる定義による色温度を示したものかは明記されていない。すでに述べたように二色温度に関しては 2 つの波長 λ_1, λ_2 における分光放射率の比 $\epsilon(\lambda_1, T) / \epsilon(\lambda_2, T)$ の値のみを知れば真温度から二色温度が決定できるが、色度温度、分布温度を求めるためには (4)、(5)、(12)、(14) 式からわかるとおり、分光放射率の値が色に関係する波長域でわかつていなければならない。しかしながら金属のこれについての研究はきわめて少ない。一般に金属の分光放射率の波長依存性は、測定値の整っているタングステン^{13)~15)} の例からも、また HAGEN, RUBENS¹⁶⁾、菅野¹⁷⁾、大野¹⁸⁾ の推定法による結

果などからもわかるとおり、紫外から赤外にいたる広い波長域に対しては直線となっていない。しかし考察する波長域を狭くすればするほど、その区間において分光放射率の波長依存性を直線とみなすことができる。この考えから、いま可視域 (本報では $0.38 \mu\text{m} \sim 0.78 \mu\text{m}$ とした。したがって (4), (5) 式で $\lambda_a = 0.38 \mu\text{m}$, $\lambda_b = 0.78 \mu\text{m}$ となる) に限定した場合、金属* の分光放射率の波長依存性は後述のとおり十分直線で近似できるものと考えて以下の考察を行った。真温度 T , 波長 λ における金属の分光放射率 $\epsilon^M(\lambda, T)$ は (25) 式で表せる。

$$\epsilon^M(\lambda, T) = a\lambda + b = \{(a/b)\lambda + 1\}b \dots\dots\dots (25)$$

ただし λ は長さの元を持ち単位は本報では μm を用い、定数 a は長さの逆数の元で単位は μm^{-1} , 定数 b は無次元である。ここで種々の a , b に対する (25) 式の値を (4), (5), (11), (12) 式に代入して各種色温度を求めた。その際完全放射体の分光放射輝度は Planck の放射則を用いて計算した。ただし (11) 式は Wien の放射則を用いた。まず色度温度 F_c を決定する色度座標 (x_M, y_M) は (4), (5), (25) 式より

$$x_M = \frac{b \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} \{(a/b)\lambda + 1\} N(\lambda, T) \bar{x} d\lambda}{b \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} \{(a/b)\lambda + 1\} N(\lambda, T) [\bar{x} + \bar{y} + \bar{z}] d\lambda} \dots (26)$$

$$y_M = \frac{b \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} \{(a/b)\lambda + 1\} N(\lambda, T) \bar{y} d\lambda}{b \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} \{(a/b)\lambda + 1\} N(\lambda, T) [\bar{x} + \bar{y} + \bar{z}] d\lambda} \dots (27)$$

また分布温度 F_d を決定する σ_{ϵ_F} は (12), (13), (25) 式より

$$\sigma_{\epsilon_F} = \frac{b \left[\left(\frac{1}{n} \right) \sum_{i=1}^n \left\{ X_i - \left(\frac{1}{n} \right) \sum_{i=1}^n (X_i) \right\}^2 \right]^{1/2}}{b \left[\left(\frac{1}{n} \right) \sum_{i=1}^n (X_i) \right]} \dots\dots (28)$$

ただし

$$X_i = \left[\{(a/b)\lambda_i + 1\}b \right] \left[\exp\{C_2/(\lambda_i F_d)\} - 1 \right] / \left[\exp\{C_2/(\lambda_i T)\} - 1 \right] \dots\dots (29)$$

そして2つの任意の波長 λ_1, λ_2 における二色温度 $F_t(\lambda_1 - \lambda_2)$ は (11), (25) 式より

$$\frac{1}{F_t(\lambda_1 - \lambda_2)} = \frac{1}{T} - \frac{1}{C_2} \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \ln \frac{\{(a/b)\lambda_1 + 1\}b}{\{(a/b)\lambda_2 + 1\}b} \dots\dots (30)$$

となる。色度温度 F_c , 分布温度 F_d , それに二色温度 $F_t(\lambda_1 - \lambda_2)$ を求める上記 (26) ~ (28), (30) 式において $\epsilon^M(\lambda, T) = \{(a/b)\lambda + 1\}b$ の () の外の b はすべて消去され、 a/b の関数となる。すなわち金属の各種色温度はすべて分光放射率 $\epsilon^M(\lambda, T) = a\lambda + b$ の a, b それぞれの絶

* 鉄や銅などの場合で、銅などの有色金属には適用困難な場合もある。

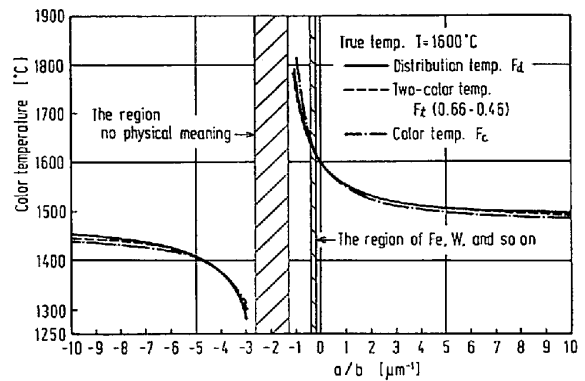


Fig. 1. Relation between true temperature and color temperature at a/b .

対値に関係なく、 a/b の値で決定されることがわかる。

4.2 a/b と各種色温度の関係

真温度 $1200^\circ\text{C} \sim 2000^\circ\text{C}$ の範囲に対して種々の a/b と各種色温度の関係について検討したが、この範囲では同じ傾向を示したのでそのなかから真温度 $T = 1600^\circ\text{C}$ における a/b と色度温度 F_c , 分布温度 F_d , それに分布温度の決定に JIS⁷⁾ が推奨している $\lambda_1 = 0.660 \mu\text{m}$, $\lambda_2 = 0.460 \mu\text{m}$ における二色温度 $F_t(0.66 - 0.46)$ の関係を Fig. 1 に例示した。同図において a/b が $-1.28 \mu\text{m}^{-1} \sim -2.63 \mu\text{m}^{-1}$ の範囲を斜線で示した。これは可視域において一部 $\epsilon^M(\lambda, T)$ が $0 < \epsilon^M(\lambda, T) \leq 1$ の条件を満たさず物理的に意味を持たない部分であり、したがってこの範囲に a/b が近づくほど灰色体より大きく偏ることになる。まず $a > 0$ で、かつ分光放射率が物理的な意味を持つ $a/b > 0 \mu\text{m}^{-1}$, または $a/b < -2.63 \mu\text{m}^{-1}$ ではすべての色温度が真温度より低くなり、 $a < 0$ で、かつ $-1.28 \mu\text{m}^{-1} < a/b < 0 \mu\text{m}^{-1}$ では真温度より高くなる。つぎに $a/b = 0 \mu\text{m}^{-1}$, すなわち完全放射体または灰色体のときは b の値に関係なく、したがって分光放射率の大小に関係なく各種色温度は真温度と一致する。さらに理想的な分布温度を持つ放射体でないと、厳密には $F_c, F_d, F_t(\lambda_1 - \lambda_2)$ は一致するとは限らないので三者は区別して考えることが必要である。しかしこれらは実在の金属の存在が予想される灰色体からの偏りが小さく、したがって色温度と真温度に近い値となる $-0.3 \mu\text{m}^{-1} \leq a/b \leq 0.5 \mu\text{m}^{-1}$ の準灰色体 (詳細は後述する) の部分ではかなりよく一致し、また二色温度に及ぼす λ_1, λ_2 の影響は小さく、種々の2波長における二色温度もかなりよく一致した。なお分布温度の決定に際し波長域は可視域 ($0.38 \mu\text{m} \sim 0.78 \mu\text{m}$) としたが、この波長域で何個の波長に分割するか、すなわち (28) 式の n の数については、両端の波長 $0.38 \mu\text{m}$ と $0.78 \mu\text{m}$ を含めて等間隔でとり出すことにして、 $n = 3$ から $n = 81$ まで検討した結果、

準灰色体の範囲では 1°~2°C の差であり n の影響は無視できるものと思われる。本報では光源色の測定法⁵⁾の色度を求めるのに必要な三刺激値の計算を精密に行う場合の波長間隔に準じて 5 nm 間隔で λ_i をとり分布温度を計算した。この場合の n は 81 となる。

4.3 理想的な分布温度を持つ金属の a/b

真温度 T の理想的な分布温度を持つ放射体の分布温度を F_a^* とするとき、色放射率 ε_F^* が波長 λ に無関係な定数となり、すべての λ において常に (6) 式が成立する。(6) 式を分光放射率 $\varepsilon(\lambda, T)$ について解き、完全放射体の分光放射輝度に Wien の放射則を代入すると (31) 式のようになる。

$$\varepsilon(\lambda, T) = \frac{N(\lambda, F_a^*)}{N(\lambda, T)} \varepsilon_F^* = \exp \left[\frac{C_2(F_a^* - T)}{\lambda T F_a^*} \right] \varepsilon_F^* \dots (31)$$

ここで理想的な分布温度を持つ放射体の分光放射率が波長 λ に対してどのような変化率を持つかを知るために (31) 式を λ で微分すると (32) 式のようになる。

$$\frac{d\varepsilon(\lambda, T)}{d\lambda} = \frac{C_2}{\lambda^2} \left(\frac{1}{F_a^*} - \frac{1}{T} \right) \times \left[\exp \left\{ \frac{C_2}{\lambda} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{F_a^*} \right) \right\} \right] \varepsilon_F^* \dots (32)$$

一方金属の分光放射率を $\varepsilon^M(\lambda, T) = a\lambda + b$ とした場合、これが理想的な分布温度を持つ放射体となるためには $\varepsilon(\lambda, T)$ を λ で微分した (33) 式の右辺が (32) 式の右辺と λ に関係なく等しくならなければならない。

$$d\varepsilon^M(\lambda, T)/d\lambda = a \dots (33)$$

これを満足するのは $T = F_a^*$ のときだけで、この場合は $a = 0 \mu\text{m}^{-1}$ となる。よって分光放射率の波長依存性を直線とした場合、これが理想的な分布温度を持つ放射体となるのは $a/b = 0 \mu\text{m}^{-1}$ となる完全放射体か灰色体のみである。

4.4 理想的な色度温度を持つ金属の a/b

真温度 T 、波長 λ における分光放射率 $\varepsilon^M(\lambda, T) = \{(a/b)\lambda + 1\}b$ なる金属が理想的な色度温度 F_a^* を持つ放射体である場合には (4)、(5) 式にこれを代入した (26)、(27) 式の x_M, y_M と (4)、(5) 式の $\varepsilon(\lambda, T) = 1, T = F_a^*$ と

した完全放射体の x, y を $x = x_M, y = y_M$ 、としてそれぞれ a/b について解いた (34)、(35) 式の連立方程式が解を持つはずである。

この解を得るには $T, (a/b)_x, (a/b)_y$ 、そして F_a^* の関係を知らなければならない。それでつぎのような数値解析を行った。まず同一の T の値に対して種々の F_a^* を与え $(a/b)_x$ と $(a/b)_y$ をそれぞれ計算して $(a/b) - F_a^*$ 平面に両者を図示し、この 2 種類の線の交点を連立方程式の解とした。ただし今回は $T = 1200^\circ\text{C}, 1400^\circ\text{C}, 1500^\circ\text{C}, 1600^\circ\text{C}, 1800^\circ\text{C}, 2000^\circ\text{C}$ について計算したが、たとえば $T = 1600^\circ\text{C}$ の場合、交点は $a/b = 0 \mu\text{m}^{-1}, F_a^* = 1600^\circ\text{C}$ と $a/b = -3.71 \mu\text{m}^{-1}, F_a^* = 1367^\circ\text{C}$ の 2 組があり、これが解である。前者の解は完全放射体あるいは灰色体の場合であり、後者がこれ以外で理想的な色度温度を持つ放射体となる a/b とその理想的な色度温度である。なお実際の解は図上より求めず、計算機によつて数値的に求めたが他の真温度についても、完全放射体や灰色体を含めてすべて 2 組の解が必ず存在し、完全放射体や灰色体でない場合の解である a/b は $T = 1200^\circ\text{C} \sim 2000^\circ\text{C}$ において、 T に対して (36) 式のように近似できた。

$$a/b [\mu\text{m}^{-1}] = -0.0000865 [\mu\text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}] \times T [^\circ\text{C}] - 3.57 [\mu\text{m}^{-1}] \dots (36)$$

$0 < \varepsilon^M(\lambda) \leq 1$ という物理的な条件に可視域を考察の対象とするという条件を満足する a, b の値は $a > 0$ 、したがって $b < 0$ の場合である。実在の金属でたとえば T が 1500°C 付近の a/b が (36) 式で算出されるように $-3.7 \mu\text{m}^{-1}$ 近傍となるものの存在はきわめて少ないと思われるが、 $a > 0$ であることから金属の酸化物などではこの条件を満足するものが存在する可能性も予想される。Table 2 は (36) 式による理想的な色度温度を持つ放射体の真温度 $T, a/b$ 、理想的な色度温度 F_a^* 、分布温度 F_a 、それに 実用二色温度計の種々の 実効波長^{7)19)~25)} における二色温度 $F_{\lambda_1 - \lambda_2}$ を示した。これは理想的な分布温度を持つ放射体ではない場合であるから、各種の色温度が必ずしも一致していない。

$$\left\{ \begin{aligned} (a/b)_x &= \frac{\int_{\lambda_a}^{\lambda_b} N(\lambda, F_a^*) \bar{x} d\lambda \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} N(\lambda, T) [\bar{x} + \bar{y} + \bar{z}] d\lambda - \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} N(\lambda, T) \bar{x} d\lambda \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} N(\lambda, F_a^*) [\bar{x} + \bar{y} + \bar{z}] d\lambda}{\int_{\lambda_a}^{\lambda_b} \lambda N(\lambda, T) \bar{x} d\lambda \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} N(\lambda, F_a^*) [\bar{x} + \bar{y} + \bar{z}] d\lambda - \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} N(\lambda, F_a^*) \bar{x} d\lambda \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} \lambda N(\lambda, T) [\bar{x} + \bar{y} + \bar{z}] d\lambda} \dots (34) \\ (a/b)_y &= \frac{\int_{\lambda_a}^{\lambda_b} N(\lambda, F_a^*) \bar{y} d\lambda \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} N(\lambda, T) [\bar{x} + \bar{y} + \bar{z}] d\lambda - \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} N(\lambda, T) \bar{y} d\lambda \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} N(\lambda, F_a^*) [\bar{x} + \bar{y} + \bar{z}] d\lambda}{\int_{\lambda_a}^{\lambda_b} \lambda N(\lambda, T) \bar{y} d\lambda \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} N(\lambda, F_a^*) [\bar{x} + \bar{y} + \bar{z}] d\lambda - \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} N(\lambda, F_a^*) \bar{y} d\lambda \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} \lambda N(\lambda, T) [\bar{x} + \bar{y} + \bar{z}] d\lambda} \dots (35) \end{aligned} \right.$$

Table 2. Various temperatures of radiator indicating ideal color temperature.

True temp. T [$^{\circ}\text{C}$]		1 200	1 400	1 500	1 600	1 800	2 000
$a/b = -0.0000865 \times T - 3.57$ [μm^{-1}]		-3.67	-3.69	-3.70	-3.71	-3.73	-3.74
Distribution temp. F_d [$^{\circ}\text{C}$]		1 048	1 208	1 286	1 363	1 515	1 663
Color temp. F_c [$^{\circ}\text{C}$]		1 051	1 211	1 290	1 367	1 520	1 669
Two-color temperature ($F_t(\lambda_1 - \lambda_2)$) at various wavelengths [$^{\circ}\text{C}$]	$F_t(0.580 - 0.500)^{19)20)}$	1 052	1 212	1 291	1 369	1 522	1 671
	$F_t(0.610 - 0.420)^{21)}$	1 049	1 209	1 288	1 365	1 517	1 666
	$F_t(0.630 - 0.490)^{22)}$	1 052	1 212	1 291	1 368	1 521	1 670
	$F_t(0.650 - 0.467)^{23)}$	1 051	1 211	1 290	1 368	1 520	1 669
	$F_t(0.660 - 0.460)^{7)}$	1 051	1 211	1 290	1 367	1 520	1 669
	$F_t(0.665 - 0.467)^{24)}$	1 051	1 211	1 290	1 367	1 520	1 669
	$F_t(0.665 - 0.544)^{25)}$	1 051	1 211	1 289	1 367	1 519	1 668

wavelength λ_1, λ_2 : [μm]

Table 3. Various temperatures of tungsten.

Spectral emissivity $\varepsilon^W(\lambda, T)$ ↓		True temp. T^W [$^{\circ}\text{C}$]	1 500	1 600	1 800	2 000
Measured values (DEVos)	Distribution temp. F_d^W [$^{\circ}\text{C}$]	$\lambda = 0.32 \sim 1.30$ μm	1 519	1 622	1 827	2 034
		$\lambda = 0.38 \sim 0.78$ μm	1 518	1 621	1 826	2 033
	Color temp. F_c^W [$^{\circ}\text{C}$]		1 524	1 627	1 833	2 040
	Two-color temp. $F_t^W(0.660 - 0.460)$ [$^{\circ}\text{C}$]		1 518	1 621	1 826	2 031
Approximate values	$\varepsilon^W(\lambda, T) = a\lambda + b$		$-0.126\lambda + 0.528$	$-0.128\lambda + 0.528$	$-0.129\lambda + 0.525$	$-0.130\lambda + 0.522$
	a/b [μm^{-1}]		-0.239	-0.242	-0.246	-0.249
	Distribution temp. F_d^W [$^{\circ}\text{C}$]		1 518	1 621	1 826	2 032
	Color temp. F_c^W [$^{\circ}\text{C}$]		1 521	1 623	1 829	2 035
	Two-color temp. $F_t^W(0.660 - 0.460)$ [$^{\circ}\text{C}$]		1 518	1 621	1 826	2 032

5. 分光放射率の直線近似の検討

金属の分光放射率の波長依存性に対する詳細なデータが少ないので、これを直線近似して考察を進めてきたが、この妥当性を波長依存性が研究されているタングステンについて検討した。Table 3 はタングステンの各種色温度を DEVos¹³⁾ の測定した分光放射率の値を用いて求めた場合と、これを波長 $0.40 \mu\text{m} \sim 0.70 \mu\text{m}$ において最小二乗法で直線近似した値から求めた場合の比較である。Fig. 2 に (真) 温度 1600°C と 2000°C のタングステンの分光放射率とこれを直線近似したものを例示した。同表中 DEVos の測定値で分布温度を決定する場合

の波長域は可視域、すなわち $0.38 \mu\text{m} \sim 0.78 \mu\text{m}$ としたときのみでなく、それよりより広い $0.32 \mu\text{m} \sim 1.30 \mu\text{m}$ の波長域で求めた値も併記した。この両者を比較すると、わずか 1°C の差である。Fig. 2 からわかるようにタングステンの分光放射率の波長に対する勾配の絶対値は長い波長である $0.80 \mu\text{m} \sim 1.30 \mu\text{m}$ において大きくなり灰色体の条件からよりはずれるにもかかわらず、この部分を含めて分布温度を決定しても上記の差であり、この場合はタングステンの分光放射率の波長特性の短波長側に存在する小さい凹凸、および長波長側の灰色体から大きく偏る部分も含めて、この温度域では分布温度決定にあまり影響を与えないことがわかった。つぎに測定値

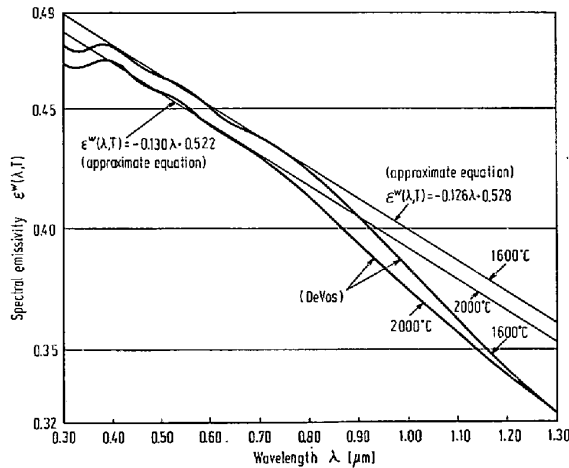


Fig. 2. Spectral emissivity of tungsten [derived from DeVos].

と近似値による差を各種色温度ごとに比較してみると、分布温度、二色温度は真温度 2000°C のとき 1°C、それ以下の真温度ではまったく一致している。一方色温度は近似値による温度が測定値による温度よりも 3°~5°C 低くなり、直線近似することによる誤差がやや大きくなるが、それでも ±0.1% 程度であり、現在の色温度の測定精度以内であると考えられる。以上タングステンについての結果から帰納すれば、金属の分光放射率の波長依存性を取り扱いやすいように直線で近似した場合、色温度は若干の誤差を含むが、他の色温度はよい一致を示すと予想される。これは分光放射率の絶対値に直接

影響される輝度温度などと異なり、色温度はある波長域で決定されること、さらに分光放射率の絶対値ではなく a/b の値に依存するためなどと推定される。したがって色温度測定を対象とした場合、金属の分光放射率の波長依存性は直線とみなして取り扱えるものが多いと予想される。なお DeVos の測定値は IPTS-48 の °K であるが著者らはこれをすべて IPTS-68 の °C に変換した。したがって本報の温度はすべて IPTS-68 である。

6. 純鉄の種々の温度

前章においてタングステンの分光放射率の測定値を直接使用する代わりに、これを波長に対して直線近似したものをを用いても色温度を真温度に換算する精度としては実用上十分であることがわかった。そこで分光放射率の絶対値と波長依存性の測定値のほとんどない純鉄(溶鉄)について、その抵抗率から分光放射率を算出する菅野¹⁷⁾の方法に ELLIOTT, GLEISER, RAMAKRISHNA²⁶⁾ による Fe-C 合金の抵抗率、平山、桑野、小野、八木²⁷⁾の鉄の抵抗率およびこれらの外挿値を代入して推定した鉄の分光放射率を波長に対して直線で近似し、この値を用いた場合の純鉄の真温度と各種の色温度、輝度温度の関係を考察した。これらの値を Table 4 に示す。なお 2000°C における ELLIOTT らの抵抗率は 157 μΩ-cm であり、平山らのそれは 167 μΩ-cm であつたが、この両者より求めた色温度の差は 2°C 以下でよく一致した。同

Table 4. Various temperatures of pure iron [Liquid].

True temp. T^{F^0} [°C]	1 538	1 600	1 800	2 000	
Spectral emissivity $\epsilon^{F^0}(\lambda, T) = a\lambda + b$	$-0.0879\lambda + 0.359$	$-0.0910\lambda + 0.366$	$-0.1004\lambda + 0.387$	$-0.1092\lambda + 0.406$	
a/b [μm^{-1}]	-0.245	-0.249	-0.259	-0.269	
Distribution temp. $F_d^{F^0}$ [°C]	1 558	1 622	1 828	2 035	
Color temp. $F_c^{F^0}$ [°C]	1 560	1 624	1 831	2 038	
Brightness temp. S^{F^0} [°C]	1 376	1 430	1 601	1 771	
Two-color temperature $(F_t(\lambda_1, \lambda_2))$ at various wavelengths [°C]	$F_t(0.580 - 0.500)$	1 557	1 621	1 826	2 033
	$F_t(0.610 - 0.420)$	1 555	1 618	1 823	2 029
	$F_t(0.630 - 0.490)$	1 558	1 622	1 828	2 036
	$F_t(0.650 - 0.467)$	1 558	1 622	1 828	2 035
	$F_t(0.660 - 0.460)$	1 558	1 622	1 828	2 035
	$F_t(0.665 - 0.467)$	1 558	1 622	1 829	2 036
	$F_t(0.665 - 0.544)$	1 562	1 626	1 834	2 043

Wavelength λ_1, λ_2 : [μm]

表は平山らの抵抗率による値である。

純鉄の色温度、分布温度、二色温度は互いにきわめて近い値である。またこれらの色温度は真温度に対して1.5%程度の温度差であり、他の熱放射で定義された温度、たとえば輝度温度が真温度に対して約10%以上低い値をとるのと比較して真温度に近いことがわかる。これは色温度の特徴といつてもよいが、色温度でも灰色体からの偏りが大きくなれば、たとえばFig. 1において a/b が斜線の $-1.28 \mu\text{m}^{-1} \sim -2.63 \mu\text{m}^{-1}$ の範囲に近づくにしたがって真温度との差も大きくなることから、むしろ鉄が準灰色体であると考えた方がよいと判断される。つぎにTable 3, 4からわかるとおりタングステンと鉄の a/b はほぼ $-0.27 \mu\text{m}^{-1} \sim -0.24 \mu\text{m}^{-1}$ であることから、Fig. 1にW, Feに相当する a/b の範囲を記入した。そして著者らは、本研究において検討した真温度 $1200^\circ\text{C} \sim 2000^\circ\text{C}$ では色温度計の精度から考えて、真温度と色温度の差が2%以内となる a/b が $-0.3 \mu\text{m}^{-1} \sim 0.5 \mu\text{m}^{-1}$ までを準灰色体と定義したが、この値は温度測定精度の向上にもなつて将来変更される可能性がある。

7. 結 言

色温度、分布温度、二色温度など各種色温度を区別して考え、分光放射特性により分類した種々の放射体の真温度と各種色温度の関係を考察した。つぎに金属の分光放射率 $\epsilon^M(\lambda, T)$ が $\epsilon^M(\lambda, T) = a\lambda + b$ と波長 λ に対して直線で近似できるものと仮定して金属の真温度に対する各種色温度の値を調べた。そしてこのように金属の分光放射率の波長依存性を直線近似したことの妥当性をタングステンの分光放射率の実測値を用いて検討した。さらに溶鉄の色温度についても考察した。その結果をまとめるとつぎのとおりである。

1) 分布温度の決定方法として色放射率を波長の関数 $\epsilon_F(\lambda)$ と仮定し、各波長における $\epsilon_F(\lambda)$ の偏差を最小とする完全放射体の温度を分布温度とする方法を提案した。

2) 理想的な色温度、理想的な分布温度を定義した。さらに放射体の分光放射特性により、理想的な色温度を持つ放射体、理想的な分布温度を持つ放射体、準灰色体、同温体、同色体、擬灰色体なども定義した。

3) すべての色温度が常に一致するのは理想的な分布温度を持つ放射体のみである。完全放射体、灰色体、同温体なども当然この中に含まれる。

4) 二色温度は真温度と代数的な関係を持ち、いかなる放射体であつても常に厳密に定義された二色温度が決定できるが、それを決定した2波長を明記する必要がある。

5) 分光放射率の波長特性を直線とした場合 $a/b = 0 \mu\text{m}^{-1}$ ならば完全放射体か灰色体であり、すべての色温

度と真温度が一致する。またこの場合以外は理想的な分布温度を持つ放射体とはならない。一方理想的な色温度を持つ放射体となるのは $a/b = 0 \mu\text{m}^{-1}$ の他に真温度 T が 1200°C から 2000°C において T に対して

$$a/b [\mu\text{m}^{-1}] = -0.0000865 [\mu\text{m}^{-1} \text{C}^{-1}] \\ \times T [^\circ\text{C}] - 3.57 [\mu\text{m}^{-1}]$$

のときである。

6) 金属は色温度測定を対象とした場合、分光放射率の波長依存性を直線とみなして取り扱えることを予想した。そして真温度と色温度の差が2%以内となる $-0.3 \mu\text{m}^{-1} \leq a/b \leq 0.5 \mu\text{m}^{-1}$ の範囲を準灰色体と定義したが、溶鉄は準灰色体の条件を満足する。

文 献

- 1) 盛利貞: 日本学術振興会第19委8944(第3-188)(1968年6月)
- 2) たとえば、藤田清比古, 山口隆生, 小野清, 諸岡明: 中部工業大学紀要, 3(1967), p. 8
- 3) たとえば, S. S. PENNER: "Quantitative Molecular Spectroscopy and Gas Emissivities", (1959), p. 458 [Addison-Wesley Pub. Co.]
- 4) 沢田正三編: 「温度と熱」(実験物理学講座12), (1975), p. 56 [共立出版株式会社]
- 5) JIS-Z8105(1964): 色に関する用語
- 6) たとえば, JIS-Z8724(1966): 光源色の測定法
- 7) たとえば, 久保田広: 「光学」, (1965), p. 379 [岩波書店]
- 8) JIS-Z8725(1976): 光源の分布温度及び色温度の測定法
- 9) 文献6), p. 387
- 10) JIS-Z8729(1970): $U^*V^*W^*$ 系による物体色の表示法
- 11) 川上元郎: 私信(1975.3.1)
- 12) International Critical Table, 5(1929), p. 246 [McGraw-Hill]
- 13) たとえば, 西川甚太: 「温度」(工業計測技術大系1), (1965), p. 268 [日刊工業新聞社]
- 14) J. C. DEVOS: Physica, 20(1954), p. 690
- 15) R. D. LARRABEE: J. Opt. Soc. Am., 49(1959), p. 619
- 16) C. TINGWALDT, U. SCHOLY, T. VERCH, und S. TAKATA: Optik, 22(1965), p. 48
- 17) たとえば, D. J. PRICE: Proc. Phys. Soc. 59(1947), p. 118
- 18) S. LIPPMANN: Wiss. Z. Techn. Hochsch. Karl-Marx-Stadt 11, (1969) H. 1, p. 44
- 19) 菅野 猛: 鉄と鋼, 27(1941), p. 59
- 20) 大野二郎: 計測自動制御学会論文集, 14(1978), p. 283
- 21) 称津孔二: 自動制御, 3(1964), p. 144
- 22) 菱刈 功, 北沢文彦: テノニュース, 15(1973) 69
- 23) P. HARIHARAN and M. S. BHALLA: J. of Scientific Instruments, 35(1958) p. 449
- 24) 江森康文, 奥原精一, 石丸 正: 計測と制御, 1(1962), p. 57
- 25) E. R. G. ECKERT and R. M. DRAKE Jr.: "Analysis of Heat and Mass Transfer", (1972), p. 698 [McGraw-Hill]
- 26) 高田誠二, 伊藤 寿: 計測自動制御学会第5回学術講演会予稿集, (1966), p. 119
- 27) 文献12), p. 273
- 28) J. F. ELLIOTT, M. GLEISER, and V. RAMAKRISHNA: "Thermochemistry for Steel-making", II(1963) [Addison-Wesley Pub. Co.]
- 29) 平山勝久, 桑野祿郎, 小野陽一, 八木貞之助: 鉄と鋼, 56(1970) 11, p. 115