

二色色温度と真温度の関係について

藤田清比古*, 山口 隆生*, 諸岡 明**

On the Relation between Two-colour Temperature and True Temperature

Kiyohiko FUJITA*, Takao YAMAGUCHI* and Akira MORO-OKA**

(Received September 20, 1968)

Two effective wave lengths λ_1 and λ_2 vary according with the type of adopted pyrometer, the range of temperature, the spectral transmissivities of the optical system (lenses and prisms inserted in the optical path), and spectral emissivities of the object body. Consequently, the applicability of the range of conversion tables prepared for specified two wave lengths λ_1 and λ_2 may be restricted. While, the wave lengths λ_1 and λ_2 which are determined under the condition of measurement, and the respective effective emissivities ε_1 and ε_2 at λ_1 and λ_2 are involved in a constant $K [= \{\lambda_1 \lambda_2 / (\lambda_2 - \lambda_1)\} \ln (\varepsilon_1 / \varepsilon_2)]$, in the range where Wien's equation valid. Taking this fact into consideration, we discuss conversion approximation equations and figures, which are constructed with respect to K as a parameter, relating the two-colour temperature to true one or vice versa.

In the first place, a nomograph is prepared to read K value, and then the two coefficients involved in the linear approximation equation are determined. Moreover, a conversion figure indicating the relation between colour temperature and true one is drawn up.

It is indicated that the precision of the above mentioned conversion method is sufficiently high compared with that of measurement, and that the calculation by the approximation is simple and has a practical use.

Though the present considerations are based on Wien's equation, comparisons of the above results with those by Planck's equation are given, and the precision of the approximation is discussed.

1. まえがき

前報¹⁾において色温度と輝度温度および真温度の相互関係を Wien の放射式および Planck の放射式を用いた場合について考察し, さらにこれら各種温度間の換算表を作成し, その一部を掲載した。また各種色温度の定義についても考察を試みた²⁾。二色温度計の測定に用いられている二つの波長(実効波長)は各機種によって異なるばかりでなく, 測定光路の分光特性によっても変動することなどから, 単にある定まった2つの波長につい

て計算された換算表では不十分な場合が生じてきた。それで今回は二色温度計の実効波長が変動した場合にも応用できる二色色温度と真温度の換算法について記述した。

2. 二色色温度と真温度の関係

真温度 $T^{\circ}\text{C}$ の物体を二色温度計で測温して $F^{\circ}\text{C}$ という二色色温度を得たとすると, 両温度間の関係は Planck の放射式を用いればつぎのように表わすことができる。

$$\frac{\varepsilon_1 \left[\exp \left\{ \frac{C_2}{\lambda_2} \cdot (T + 273.15) \right\} - 1 \right]}{\varepsilon_2 \left[\exp \left\{ \frac{C_2}{\lambda_1} \cdot (T + 273.15) \right\} - 1 \right]} = \frac{\exp \left\{ \frac{C_2}{\lambda_2} \cdot (F + 273.15) \right\} - 1}{\exp \left\{ \frac{C_2}{\lambda_1} \cdot (F + 273.15) \right\} - 1} \quad (1)$$

* 本学生産機械工学科 (Department of Industrial Mechanical Engineering)

** 京都大学工学部 (Faculty of Engineering, Kyoto University)

第1表 $K=1.2$ または -1.2 になる $\varepsilon_1/\varepsilon_2$ の値

λ_1	μm	0.55			0.60				0.65				0.70			
λ_2	μm	0.40	0.45	0.50	0.40	0.45	0.50	0.55	0.40	0.45	0.50	0.55	0.40	0.45	0.50	0.55
$K=1.2$ になる	$\varepsilon_1/\varepsilon_2$ の値	0.44	0.62	0.80	0.37	0.51	0.67	0.83	0.32	0.44	0.57	0.71	0.28	0.39	0.50	0.63
$K=-1.2$ になる	$\varepsilon_1/\varepsilon_2$ の値	2.27	1.62	1.24	2.72	1.95	1.49	1.20	3.17	2.27	1.74	1.40	3.62	2.59	1.99	1.60

第2表 種々の実効波長(λ_1, λ_2)および $\varepsilon_1/\varepsilon_2$ のときの K の値

λ_1	μm	0.55			0.60				0.65				0.70			
λ_2	μm	0.40	0.45	0.50	0.40	0.45	0.50	0.55	0.40	0.45	0.50	0.55	0.40	0.45	0.50	0.55
$\varepsilon_1/\varepsilon_2$	0.66	0.749	1.264	2.810	0.613	0.919	1.532	3.371	0.531	0.747	1.107	1.826	0.477	0.644	0.894	1.311
	0.80	0.327	0.552	1.227	0.268	0.402	0.669	1.472	0.232	0.326	0.483	0.798	0.208	0.281	0.390	0.573
	1.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1.20	-0.267	-0.451	-1.003	-0.219	-0.328	-0.547	-1.203	-0.190	-0.267	-0.395	-0.652	-0.170	-0.230	-0.319	-0.468

第3表 F から T を算出する場合の $\Delta T (=T_K - T_{K+0.001})$ の値(deg)

K		1.199	1.000	0.800	0.600	0.400	0.200	0	-0.200	-0.400	-0.600	-0.800	-1.000	-1.200
F	1000°C	0.09	0.10	0.10	0.10	0.11	0.11	0.11	0.12	0.12	0.13	0.13	0.14	0.14
	2000°C	0.25	0.27	0.28	0.29	0.31	0.34	0.36	0.38	0.41	0.44	0.47	0.51	0.55
	3000°C	0.46	0.50	0.53	0.57	0.62	0.68	0.74	0.81	0.90	1.00	1.11	1.25	1.41

ただし λ_1, λ_2 は二色温度計の2つの実効波長(μm), $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ は $T^\circ\text{C}$ の物体の波長 λ_1, λ_2 におけるそれぞれの有効分光放射率, C_2 は Planck の黒体放射式における第2定数 ($14387.9\mu\text{m}\cdot\text{deg}$) である。(1)式で計算した真温度と二色色温度の関係の一部は前報¹⁾に換算表として掲載したが, これは国産のある二色温度計の実効波長に相当する $\lambda_1=0.630\mu\text{m}$, $\lambda_2=0.490\mu\text{m}$ の場合についてであった。しかし実効波長は二色温度計の種類や測定レンジによって異なるのはもちろん, 同一二色温度計の同一レンジによる測定するときでも, 測定光路に挿入したレンズ, プリズムなどの分光特性, さらに測定対象の分光放射率によっても変動するから, 前報の表の使用は当然限られた場合に制約されることになる。しかしあらゆる2つの実効波長の組み合わせについて換算表を用意することは膨大な量になり不可能に近い。それで直接 λ_1, λ_2 によって索引しなくても使用できる表を作成し, さらに近似式法および図を用いる簡単な換算法について検討を行なった。

二色色温度と真温度との関係は Wien の放射式の成立する範囲 (可視域で温度 3000°K 以下, すなわち $\lambda T < 0.21\text{cm}\cdot\text{deg}$ の範囲では 0.1% よりよい精度で近似される³⁾。また $\lambda T < 0.3\text{cm}\cdot\text{deg}$ では 1% よりよい精度で近似される⁴⁾ では(2)式のようにになる。

$$\frac{1}{T+273.15} = \frac{1}{F+273.15} + \frac{1}{C_2} \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \ln \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \quad (2)$$

なお式中の記号は(2)式も含めて, 以下すべて(1)式と同様である。(2)式において測定装置や測定対象の性質によって決定されるものは, 実効波長 (λ_1, λ_2) および有効分光放射率 ($\varepsilon_1, \varepsilon_2$) であるが, これらの項をまとめて K とおくと(2)式は(3)式のようにになる。

$$\frac{1}{T+273.15} = \frac{1}{F+273.15} + K \cdot \frac{1}{C_2} \quad (3)$$

$$\text{ただし } K = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \ln \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \quad (4)$$

したがって K の種々の値について, F と T との関係の表を作成すれば測定装置や対象がかわっても, 適用できるという利点がある。それで $K=1.200 \sim -1.200$ の範囲で 0.001 間隔, 色温度 (または真温度) 3100°C までの換算表を計算した。この表の適用しうる範囲および精度について述べる。第1表に $K=1.200$ または -1.200 になる λ_1, λ_2 と $\varepsilon_1/\varepsilon_2$ の関係を, 第2表に $\lambda_1, \lambda_2, \varepsilon_1/\varepsilon_2$ の種々の組み合わせのときの K の値を示した。また K を 0.001 間隔で計算したが F から T を算出する場合, K が 0.001 だけ変化したとすると T が何 deg 変化するかを示したのが第3表である。

* T から F を算出する場合は K を $-K$ と考えれば, 第3表は $\Delta F = F_K - F_{(K-0.001)}$ の値を示していることになる。理由は 3-2-2) 項を参照のこと。

この温度換算表は第1表, 第2表からわかるとおり, かなりの範囲の λ_1 , λ_2 , $\varepsilon_1/\varepsilon_2$ の組み合わせに適用でき, さらに第3表からあきらかなとおり精度も高い。しかしながらここに掲載するには量も多くて不適当なので, 今回検討した近似式を用いる方法および図を用いる方法の2種類の簡便法について記述する。

3. 換 算 法

3-1 Kの求め方

Kを求める計算はむづかしくはないが, 自然対数の項が挿入されているから手軽には行えない。それでノモグラフから読み取ることにした。ノモグラフの手法は色々発表⁵⁾⁶⁾されているが, 精度高く読み取るには目盛りを拡大し, 線間距離を広げなくてはならない。このようにするとノモグラフ全体が大きくなり使用上不便であるから, 目盛りを分割したとする。すると今度は図の枚数が増えてやはり不便である。もし1頁内に収めようとするならば分割した目盛りを多重目盛りとして1本の線に重畳させなければならない。しかし多重目盛りにすると各々の対応する目盛りを読み誤る恐れがある。それゆえB5版内に収まり, 使用の過程で思考をはさむ余地をなるべく少なくし, かつある程度以上の読み取り精度が保証されるというノモグラフにするには各々の数値の範囲の設定が第一の鍵となる。本ノモグラフの場合各々の数値の取りうる範囲をつぎのように選定した。すなわち ε_1 と ε_2 はそれぞれ 0.25~1.00 で $\varepsilon_1/\varepsilon_2$ の値の範囲は 1.30~0.75, λ_1 は 0.560~0.680 μm , λ_2 は 0.450~0.525 μm , Kの読み取り範囲は -1.20~+1.20 で小数点以下3桁目なるべく内挿で読み得ることを設定条件とした。以上の条件は実在の溶融金属を市販の二色温度計で測定するという前提をほぼ満足し得るものと予想される。この条

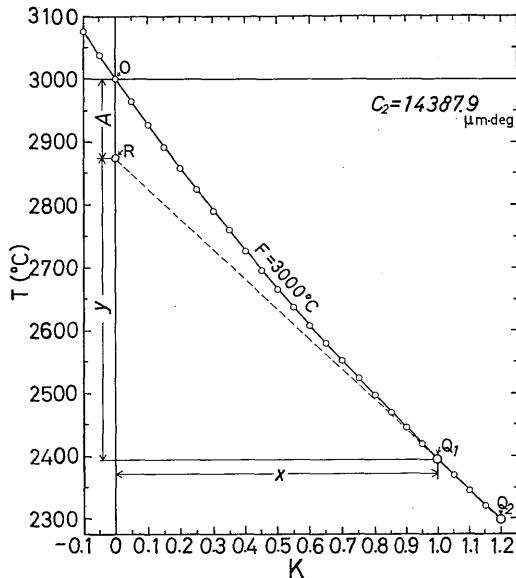
件で作成したノモグラフを付図1(巻末24頁)として使用例とともに示した。この図は K を $\ln \varepsilon_1/\varepsilon_2$ と $\lambda_1 \lambda_2 / (\lambda_2 - \lambda_1) = 1 / \{ (1/\lambda_1) - (1/\lambda_2) \}$ の2つの項に分け, I~IV尺で $\ln \varepsilon_1/\varepsilon_2$ を, VI~VIII尺で $\lambda_1 \lambda_2 / (\lambda_2 - \lambda_1)$ を求め, 両者の積をKの値としてV尺上で知するという方法を採用している。すなわちI, III尺はそれぞれ ε_1 と ε_2 に対応し, 両者の値を結んだ線とII尺との交点が $\varepsilon_1/\varepsilon_2$ の値になるように構成されている。また $\varepsilon_1/\varepsilon_2$ の値は直接必要ないのでII尺上には目盛りがない。 $\varepsilon_1/\varepsilon_2$ の値は二色温度計測温の場合 λ_1 , λ_2 が接近しているため通常 1.30~0.75 の範囲を越えることはないと思われ。付図1からもわかるとおりII尺上におけるこの範囲(太線で示されている)はかなり縮小されて表われるため, これを直接用いてKを求めたのでは, 本目的から考えて精度が不十分である。それで点 $P_1(\varepsilon_1/\varepsilon_2 \leq 1$ のとき) および点 $P_2(\varepsilon_1/\varepsilon_2 \geq 1$ のとき) を用いてIV尺上に拡大することにした。この拡大の操作は誤差が導入される恐れが多く, かつ誤差もそのまま拡大され, その上精度も向上するという保証がないので, $\varepsilon_1/\varepsilon_2$ の値を他の方法, たとえば換算表¹⁾とか計算尺などであらかじめ知った場合はこの値を直接IV尺上に取ってKを求めてもよい。このためにIV尺は $\varepsilon_1/\varepsilon_2$ の値を目盛りである。

一方 $\lambda_1 \lambda_2 / (\lambda_2 - \lambda_1)$ 項の計算はVI尺上に λ_1 を, VIII尺上に λ_2 の値をとって直線で結べば, これとVII尺の交わる点で示される。VII尺上には値は目盛りされていないが, この交点と先に求めたIV尺上の $\varepsilon_1/\varepsilon_2$ の値を結びV尺と交わる点が求めるKの値である。ただしV尺のKの値は絶対値で示してあるが, 本ノモグラフのように $\lambda_1 > \lambda_2$ と設定されている場合, $\varepsilon_1/\varepsilon_2 > 1$ のときは $K < 0$, $\varepsilon_1/\varepsilon_2 = 1$ のときは $K = 0$, $\varepsilon_1/\varepsilon_2 < 1$ のときは $K > 0$ である。一般に二色温度計の実効波長は $\lambda_1 > \lambda_2$ で表

第4表 換算法Iによる計算結果例

$F \rightarrow$ K ↓	1000°C			1500°C			2000°C			2500°C			3000°C			
	T_I	T_W	$T_W - T_I$	T_I	T_W	$T_W - T_I$	T_I	T_W	$T_W - T_I$	T_I	T_W	$T_W - T_I$	T_I	T_W	$T_W - T_I$	
-1.200	1151.00	1151.25	-0.25	1807.00	1807.74	+0.74	2531.00	2531.79	+0.79	3333.00	3334.40	+1.40	4228.00	4229.08	+1.08	+1.200
-1.000	1124.00	1123.60	-0.40	1749.00	1749.24	+0.24	2426.00	2426.53	+0.53	3161.00	3162.13	+1.13	3964.00	3963.91	-0.09	+1.000
-0.750	1089.75	1090.50	+0.75	1680.00	1680.58	+0.58	2306.25	2305.56	-0.69	2968.50	2968.62	+0.12	3673.00	3673.36	+0.36	+0.750
-0.500	1058.00	1058.94	+0.94	1616.50	1616.44	-0.06	2195.50	2194.97	-0.53	2796.00	2795.76	-0.24	3421.00	3420.10	-0.90	+0.500
-0.250	1028.25	1028.80	+0.55	1556.75	1556.37	-0.38	2093.75	2093.48	-0.27	2641.00	2640.39	-0.61	3198.25	3197.38	-0.87	+0.250
-0.001	1000.12	1000.11	+0.01	1500.23	1500.22	-0.01	2000.37	2000.36	-0.01	2500.55	2500.53	-0.02	3000.77	3000.75	-0.02	+0.001
+0.001	999.89	999.89	0	1499.79	1499.78	-0.01	1999.65	1999.64	-0.01	2499.48	2499.47	-0.01	2999.28	2999.26	-0.02	-0.001
+0.250	972.50	972.44	-0.06	1446.75	1447.00	+0.25	1913.75	1913.63	-0.12	2373.00	2372.52	-0.48	2824.75	2823.86	-0.89	-0.250
+0.500	945.50	946.06	+0.56	1397.50	1397.08	-0.42	1833.50	1833.58	+0.08	2256.50	2256.24	-0.26	2667.00	2665.71	-1.29	-0.500
+0.750	921.00	920.76	+0.24	1350.23	1349.97	-0.28	1759.50	1759.18	-0.32	2149.75	2149.75	0	2523.50	2522.93	-0.57	-0.750
+1.000	897.00	896.50	+0.50	1305.00	1305.45	+0.45	1690.00	1689.86	-0.14	2052.00	2051.87	-0.13	2393.00	2393.38	+0.38	-1.000
+1.200	878.00	877.79	-0.21	1272.00	1271.56	-0.44	1638.00	1637.72	-0.28	1979.00	1979.08	+0.08	2297.00	2298.07	+1.07	-1.200
	F_I	F_W	$F_W - F_I$	F_I	F_W	$F_W - F_I$	F_I	F_W	$F_W - F_I$	F_I	F_W	$F_W - F_I$	F_I	F_W	$F_W - F_I$	$\uparrow K$
	1000°C			1500°C			2000°C			2500°C			3000°C			$\leftarrow T$

T_I : (5)式で計算した $T(^{\circ}\text{C})$; T_W : (3)式で計算した $T(^{\circ}\text{C})$; F_I : (8)式で計算した $F(^{\circ}\text{C})$; F_W : (3)式で計算した $F(^{\circ}\text{C})$
 $T_W - T_I$: (deg); $F_W - F_I$: (deg)



第1図 (5)式の定数A, Bについて

示することが多いが, もし $\lambda_1 < \lambda_2$ で表示されている場合はこの λ_1 は本稿で述べる λ_2 のことであり, λ_2 は λ_1 のことであると考えてこのノモグラフを使用すればよい。この場合も長い波長に対する有効分光放射率を ε_1 , 短い波長に対するそれを ε_2 とする。

3-2 換算法-I (近似式法)

3-2-1) 二色色温度から真温度を算出する場合

二色色温度 $F(^{\circ}\text{C})$ を測定して温度 $T(^{\circ}\text{C})$ を求める場合は次式を用いて計算する。

$$T = F - A - K \cdot B \quad (5)$$

ただし $K = \{\lambda_1 \lambda_2 / (\lambda_2 - \lambda_1)\} \ln(\varepsilon_1 / \varepsilon_2)$ で付図1のノモグラフから読み取る。AはKの範囲とFによって定まる定数で付図2(巻末26頁)より読み取る(deg)。BもKの範囲とFによって定まる定数で付図3(巻末27頁)より読み取る(deg)。計算例は図の説明欄に示した。

本方法はすでに $^{\circ}\text{C}$ の関係で表わされ, そのうえ計算は単に1次式の四則演算のみであるから(1)式または(2)式で算出するのに比してきわめて簡単に二色色温度から真温度を求めることができる。しかしあくまでも近似式法であるため精度が懸念される。第4表は(5)式で計算したTの例である。(2)式で計算した真温度をTwとして記載し, 両者の差も計算した。定数A, Bの値を図から読み取るときの誤差を勘案すると(5)式で計算した値(T_I)と(2)式より求めた値(Tw)との差, すなわち誤差は第4表に示した値より大きくなる場合も考えられる。しかしこの誤差を大きく見積って10倍になったとしても, 二色温度

計の測定精度より考えれば決して高い値とはいえず, 本近似法は十分信頼性があると判定された。なお現在AおよびBの値はKの値が0.199の間隔ごとに異なった値を用いるようになっているが, この間隔をさらに広くすることも可能であると考えられる。

つぎに(5)式の原理を略述する。この原理を説明するために一例として $F=3000^{\circ}\text{C}$ におけるKと $T^{\circ}\text{C}$ の関係を第1図に示した。この図からあきらかなとおりKとTの関係は直線ではないが, Kの狭い範囲では直線とみなしうるので, これを1次式で近似したのが(5)式である。すなわちKを0.2(または0.199)の間隔ごとに分割して直線で近似する。たとえば第1図の $F=3000^{\circ}\text{C}$ における $K=1.0$ と 1.2 の間についていえば, Q_1Q_2 間を直線で近似し(必ずしも Q_1 と Q_2 を結ぶとは限らない)これの延長が $K=0$ の線と交わる点をRとする。Rと原点O ($K=0, T=3000^{\circ}\text{C}$ の点)との距離ORが(5)式のA(deg)に相当し, 直線 RQ_1Q_2 の勾配すなわち y/x がB(deg)に相当する。なお(5)式はAおよびKBの前に負の記号がついているが, これは付図2, 3が読み易いようにA, Bを正の値としたためである。

近似式とし(5)式のかわりに次式の形にすることも考えられる。

$$T = A' - KB \quad (5')$$

ただし A' はKの範囲とFによって定まる定数である。この式を用いる方法は(5)式を用いるのに比して計算の手数は減るがFとTとの差が少ないほど誤差が大きくなるという欠点があるうえ, A' の値はAに比して大きくなるので図からの読み取り精度も低下する。したがって本目的には(5)式の方が適している。

実際のAおよびBの値は $F=1000, 1500, \dots$, 3000°C において, つぎのようにして選定し, 中間の温度は付図2, 3のごとく図より内挿することにした。すなわちまずFとTとの関係を上記Fの各温度においてKの値0.001間隔で(3)式を用いて計算する。そしてこの値を(6), (7)式に代入してB, Aの概略値を求める。

$$B = \left[\left\{ \sum_{K_j=K_a}^{K_b} (T(F_i, K_j) - T(F_i, K_j + 0.001)) \right\} / 0.001 \right] / \left[(K_b - K_a) / 0.001 \right] \quad (6)$$

$$A = \left[\left\{ (F_i - T(F_i, K_a)) / K_a \right\} - B \right] \times K_a \quad (7)$$

ただし $T(F_i, K_j)$ は色温度 $F_j^{\circ}\text{C}$, $K=K_j$ のときの(3)式で求めた真温度 ($^{\circ}\text{C}$)。 $F_i=1000, 1500, \dots, 3000^{\circ}\text{C}$, $K_a=-1.200, -1.000, \dots, -0.200, 0, 0.200, \dots, 1.000$, $K_b=K_a+0.199$ (ただし $K_a=-1.200$ および 1.000 のときは $K_b=K_a+0.200$) についてB, Aを求め, これらの値およびこの近傍の値を実

* Fが低くなるほど, KとTの直線への近似性は高くなる。

際に(5)式に代入して、各分割した範囲内ごとの種々の K の値に対して T を求め、これと(3)式で計算した T とがもっともよく一致した値を試行錯誤によって選定した。なお($Ka-Kb$)の範囲を狭くするほど(5)式の近似の程度は向上するが、使用上の手数は増すので近似式使用の意味が希薄となる。

3-2-2) 真温度から二色色温度を算出する場合

真温度 $T(^{\circ}C)$ を知って二色色温度 $F(^{\circ}C)$ を求めるときは(8)式を用いる。

$$F = T - A + KB \quad (8)$$

ただし定数 A および B は付図2, 3の横軸を T と見なし, K を $-K$ と考えて図より読み取る。たとえば $K=+0.25$ の場合であれば付図2, 3の $K=-0.200\sim-0.399$ の線から索引する。具体例は図の説明欄に示した。

このような操作を行なう理由はつぎのとおりである。すなわち F から T を求める式はWienの放射式を用いると(3)式のようにになるが、これを T から F を求める形になおすと(9)式のようにになる。

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{T} - K \times \frac{1}{C_2} = \frac{1}{T} + (-K) \times \frac{1}{C_2} \quad (9)$$

したがって(9)式の T を F , K を $(-K)$ と考えて計算すれば F が T に相当し、結局(3)式と同じ関係となる。なお(5)式を直接変形して $F = T + A + KB$ という形にして、この式を用いて T から F を求めることは付図2, 3の横軸が F で目盛られているため適当でない。

3-3 換算法-Ⅱ (換算図法)

二色色温度 $F(^{\circ}C)$ を知って真温度 $T(^{\circ}C)$ を求めるのに次式を用いる。

$$T = F - \Delta F_K \quad (10)$$

ただし ΔF_K は K における二色色温度と真温度の差、すなわち $\Delta F_K = F - T$ (deg)で、付図4-1~4-5および付図4索引(巻末28頁)より求める。なお K は付図1で求める。なお付図4は(3)式で計算した F と T の関係を用いて作成したが、紙数の都合で K の絶対値の大きくなる範囲は掲載できなかった。

また真温度 $T(^{\circ}C)$ より二色色温度 $F(^{\circ}C)$ を求める場合は次式を用いる。

$$F = T - \Delta F'_K \quad (11)$$

ただし $\Delta F'_K$ (deg)は付図4-1~5の横軸の F を T と考え, K を $-K$ と見なすと ΔF_K の値が $\Delta F'_K$ となる*。

以上の方法はただ1回の減算のみで換算が行なわれ、精度、正確度ともに良好であった。しかし ΔF_K の値の読み取りがやや煩雑になるのが難点といえる。

* 理由は3-2-2)項を参照のこと、(10)式を $F = T + \Delta F_K$ と変形すれば K を $-K$ と見なす必要がないと錯覚するが、付図4の横軸が F で目盛られているため、これは正しくない。

3-4 ϵ_1, ϵ_2 に対する注意

一般に有効分光放射率は波長の関数であるばかりでなく、温度によっても変動する。したがって二色色温度から真温度を求める場合に使用する ϵ_1, ϵ_2 の値はその二色色温度における有効分光放射率を用いなければならない。しかし発表されている分光放射率の値はほとんどある真温度に対する値であるから、使用するときには二色色温度の関数になおすなどの注意が肝要である。また逆に真温度から色温度を求める場合は、その真温度における ϵ_1, ϵ_2 の値を用いなければならない。

3-5 K を用いて温度を換算した場合の正確度

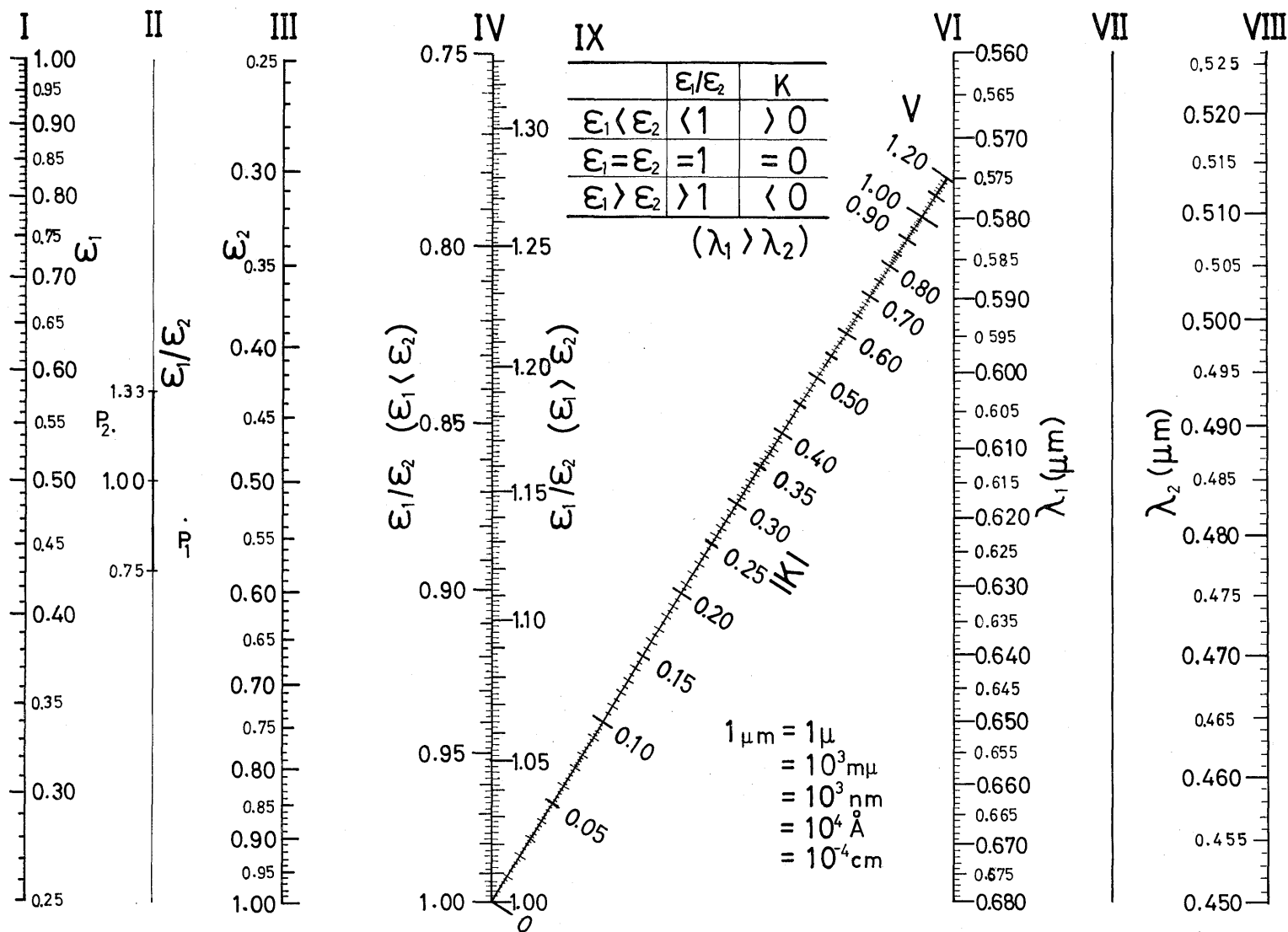
K をパラメータとして二色色温度と真温度の関係を表わす場合は、Planckの放射式を直接用いることはできない。それでWienの放射式を用いて計算を行なったが、温度が高く、 ϵ_1/ϵ_2 の値の1からのかたよりが大きくなり、 λ_1 と λ_2 が長波長側に移りかつ λ_1 と λ_2 が接近するほど近似の度合いは悪くなる。詳細は紙数の都合で次稿に譲るが、 ϵ_1/ϵ_2 を0.70~1.20, λ_1 を0.58~0.70 μm , λ_2 を0.40~0.53 μm , 色温度(または真温度)を3000 $^{\circ}C$ 以下に限定するとWienの放射式で求めた値の誤差は多くの場合5degを越えることはないと考えられる。しかしもし1deg以内の正確度が要求されたとする。二色色温度から真温度を求める場合には ϵ_1/ϵ_2 の値が1.15より大になり、かつ λ_2 が0.50 μm より長くなれば3000 $^{\circ}C$ 近傍においては1degより誤差は増加し、また真温度から色温度を求める場合には、 ϵ_1/ϵ_2 の値が0.85より小さくなり、 λ_2 が0.50 μm より長くなれば3000 $^{\circ}C$ 近傍の正確度はすでに1degより低下したと見なされる。

本稿で述べた換算法はⅠ, Ⅱ法ともWienの放射式を用いて導いているため、正確度は上記の値より良くなることはないが、二色温度計の精度を勘案すれば十分実用になるものと思う。しかしより正確度を要求される場合は本法は適用できず、Planckの放射式を用いて計算を行なう必要がある。

4. む す び

二色温度計の2つの実効波長 λ_1, λ_2 は温度計の機種や測定レンジによって異なるばかりでなく、同一二色温度計の同一レンジによる測温のときでも測定光路に挿入したレンズ、プリズムなどの光学系の分光特性、さらに測定対象の分光放射率によっても左右される。したがって二色色温度(または真温度)から真温度(または二色色温度)を求める換算図表はある特定の λ_1, λ_2 について作成されたものであれば、用途が限定されることになる。それでWienの放射式が成立する範囲においては、測定装置や対象によってかわる変数 λ_1, λ_2 および $\lambda_1,$

(34頁へ続く)

付図1 二色温度計の実効波長 $\lambda_1 \mu\text{m}$, $\lambda_2 \mu\text{m}$ および各波長における有効分光放射率 ϵ_1 , ϵ_2 と定数 K の関係

付図1 使用法 (Kの求め方)

1) 求められる数値

二色温度計およびその測定対象によって左右される定数 K , ただし $K = \{(\lambda_1 \lambda_2) / (\lambda_2 - \lambda_1)\} \times \ln(\varepsilon_1 / \varepsilon_2)$

2) 与える数値

二色温度計の測定に用いられた2つの実効波長:

$$\lambda_1 \mu\text{m}, \lambda_2 \mu\text{m} \quad (\text{ただし } \lambda_1 > \lambda_2)$$

波長 $\lambda_1 \mu\text{m}$, $\lambda_2 \mu\text{m}$ における測定物体のその温度における見掛けの有効分光放射率: $\varepsilon_1, \varepsilon_2$

(もし $\lambda_1 < \lambda_2$ で与えられたときは $\lambda_1 \rightarrow \lambda_2, \lambda_2 \rightarrow \lambda_1$)

3) 使用法—① (第2図参照)

i) $\varepsilon_1 / \varepsilon_2$ の値を求める操作: 与えられた ε_1 の値をI尺上に, ε_2 をIII尺上にとり, これを直線(A)で結ぶ。直線(A)とII尺との交点をUとする。

ii) $\varepsilon_1 / \varepsilon_2$ の値の目盛りを拡大する操作

(ア) UがIII尺の目盛り1より下にあるとき ($\varepsilon_1 / \varepsilon_2 < 1$ のとき): UとP₁を結びこれをIV尺に向って延長する(直線(B))。直線(B)とIV尺の交点をWとする。

(イ) UがIII尺の目盛り1より上にあるとき ($\varepsilon_1 / \varepsilon_2 > 1$ のとき): UとP₂を結びIV尺に向って延長しIV尺との交点を求める(この点が(ア)で求めたW点に相当する)。

(なおU点が1の上であれば, 原理的にはP₁, P₂いずれを用いてもよいが, この場合は $K=0$ となるから) あえて以下の操作を行なう必要はない。

iii) $\lambda_1 \lambda_2 / (\lambda_2 - \lambda_1)$ を求める操作: VI尺上に λ_1 をとり, VIII尺上に λ_2 をとって, これを直線(C)で結ぶ。直線(C)とVII尺との交点をYとする。

iv) K を求める操作: ii) で求めたW点と iii) で求めたY点を直線(D)で結ぶ。直線(D)とIV尺との交点Zの目盛りを読む。これが求める K の絶対値である。

v) K の正負をきめる: 同図中のIX表にしたがって K の値の正負を判定する。すなわち $\varepsilon_1 / \varepsilon_2 < 1$ ($\varepsilon_1 < \varepsilon_2$) のときは+, $\varepsilon_1 / \varepsilon_2 > 1$ ($\varepsilon_1 > \varepsilon_2$) のときは-になる。

4) 使用法—②

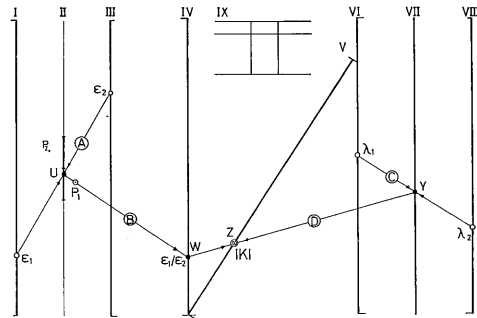
$\varepsilon_1 / \varepsilon_2$ の値を他の方法(たとえば換算表¹⁾, 計算尺等)で知ったとき: $\varepsilon_1 / \varepsilon_2$ の値を直接IV尺上にとる。この点をWとする。続いて使用法—①のiii) 以下の操作を行なって K の値を求める。この方法の方が精度は高い。

5) 使用法例

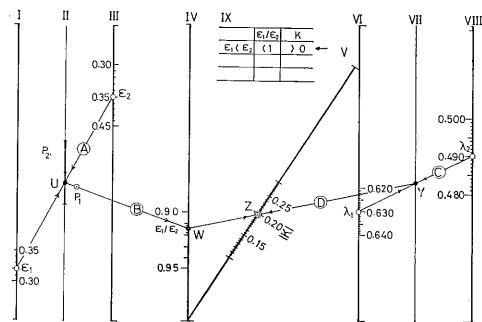
[例1] $\varepsilon_1 = 0.32, \varepsilon_2 = 0.35, \lambda_1 = 0.630 \mu\text{m}, \lambda_2 = 0.490 \mu\text{m}$ のときの K の値を求める。(第3図参照)

⑦ まず $\lambda_1 > \lambda_2$ であることをたしかめる。

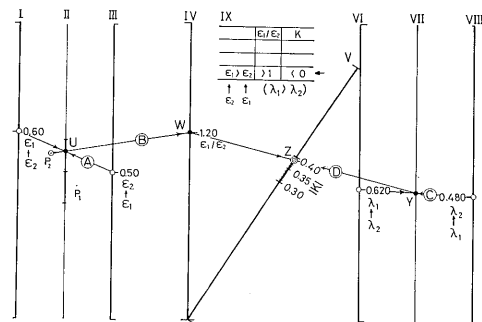
① 使用法—①の順序にしたがって K の絶対値を求める。すなわち第3図に示すごとく(A), (B), (C), (D)直線を順次引き, V尺と(D)直線の交点の目盛りから $|K| = 0.198$ と読み取る。($\varepsilon_1 / \varepsilon_2 < 1$ であるから P₁ 点使用)



第2図 付図1 使用法



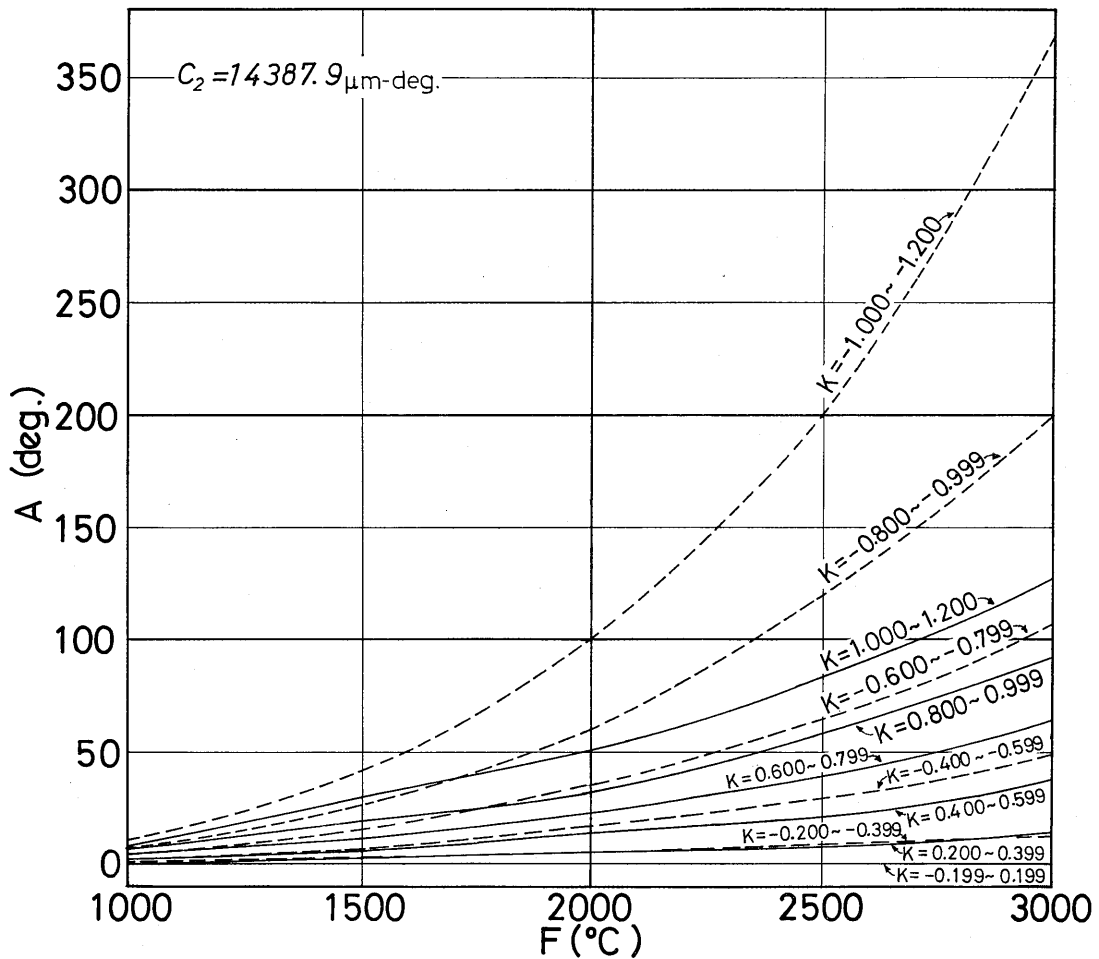
第3図 付図1 使用例1



第4図 付図1 使用例2

⑦ この場合 $\varepsilon_1 / \varepsilon_2 < 1$ ($\varepsilon_1 < \varepsilon_2$) であるから K の値はIX表より正となる。したがって $K = +0.198$ である。
[例2] $\varepsilon_1 = 0.50, \varepsilon_2 = 0.60, \lambda_1 = 480 \mu\text{m}, \lambda_2 = 620 \mu\text{m}$ のときの K の値を求める。(第4図参照)

⑦ $\lambda_1 < \lambda_2$ であるから $\lambda_1 \rightarrow \lambda_2 = 0.62 \mu\text{m}, \lambda_2 \rightarrow \lambda_1 = 0.48 \mu\text{m}, \varepsilon_1 \rightarrow \varepsilon_2 = 0.60, \varepsilon_2 \rightarrow \varepsilon_1 = 0.50$ と考えてノモグラフを用いる。すなわち第4図に(A), (B), (C), (D)直線を引き, V尺と(D)直線の交点より $|K| = 0.388$ と読み取る。($\varepsilon_1 / \varepsilon_2 > 1$ であるから P₂ 点使用) また $\varepsilon_1 / \varepsilon_2 > 1$ ($\varepsilon_1 > \varepsilon_2$) であるから $K = -0.388$ となる。

付図2 定数Kにおける二色色温度 $F(^{\circ}\text{C})$ と定数 $A[(5)\text{式}]$ の関係

付図2, 3 使用法 (換算法—I 例)

〔例1〕 $F=3000^{\circ}\text{C}$, $K=0.432$ のときの T を求める。(Kは元来与えられた λ_1 , λ_2 , ε_1 , ε_2 から付図1または(4)式を用いて求めるものである)

㉞ これは F から T を求める場合であるから(5)式すなわち $T=F-A-KB$ を用いる。

① A の値は付図2の $K=0.400\sim 0.599$ の線の横軸 3000°C のところを読む。 $A=38\text{deg}$

㉞ B の値は付図3の同じく $K=0.400\sim 0.599$ の線より求める。 $B=590\text{deg}$

㉞ これらを(5)式に代入する。

$$T=3000-38-0.432\times 590=2707.12(^{\circ}\text{C})$$

なおこの場合の(3)式より求められた T は 2707.11°C となり差は 0.01deg であった。

〔例2〕 $F=3000^{\circ}\text{C}$, $K=-0.432$ のときの T を求める。

㉞ これも $F\rightarrow T$ であるから(5)式を用いる。

① A の値を付図2, B の値を付図3のそれぞれ $K=-0.400\sim -0.599$ の線より求める。

$$A=49\text{deg}, B=940\text{deg}$$

㉞ したがって $T=3000-49-(-0.432)\times 940=3357.08(^{\circ}\text{C})$

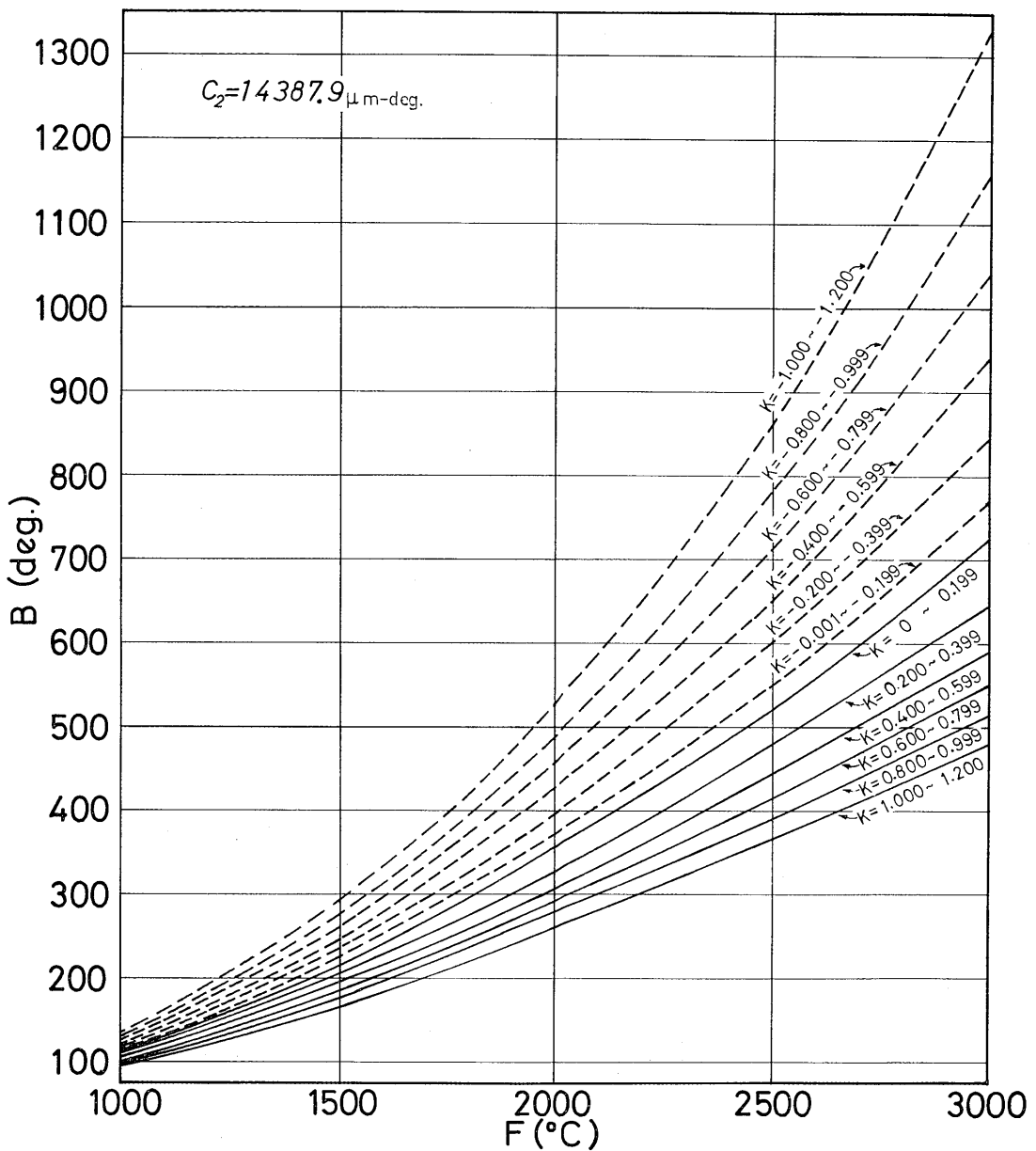
なおこの場合の(3)式より求めた T は 3356.74°C で、差は 0.34deg となった。

〔例3〕 $T=3000^{\circ}\text{C}$, $K=-0.432$ のときの F を求める。

㉞ これは $T\rightarrow F$ であるから(8)式すなわち $F=T-A+KB$ を用いる。 A, B は付図2, 3からそれぞれ求めるが, $T\rightarrow F$ のときは K を $-K$, すなわち $+0.432$ と考え, 同図の横軸を T と考える。

① したがって A の値は付図2の $K=0.400\sim 0.599$ の線の横軸の 3000°C のところを読む。 $A=38\text{deg}$

(27頁へ続く ㄝ)

付図3 定数 K における二色色温度 $F(^{\circ}\text{C})$ と定数 $B[(5)\text{式}]$ の関係

(26頁より続く)

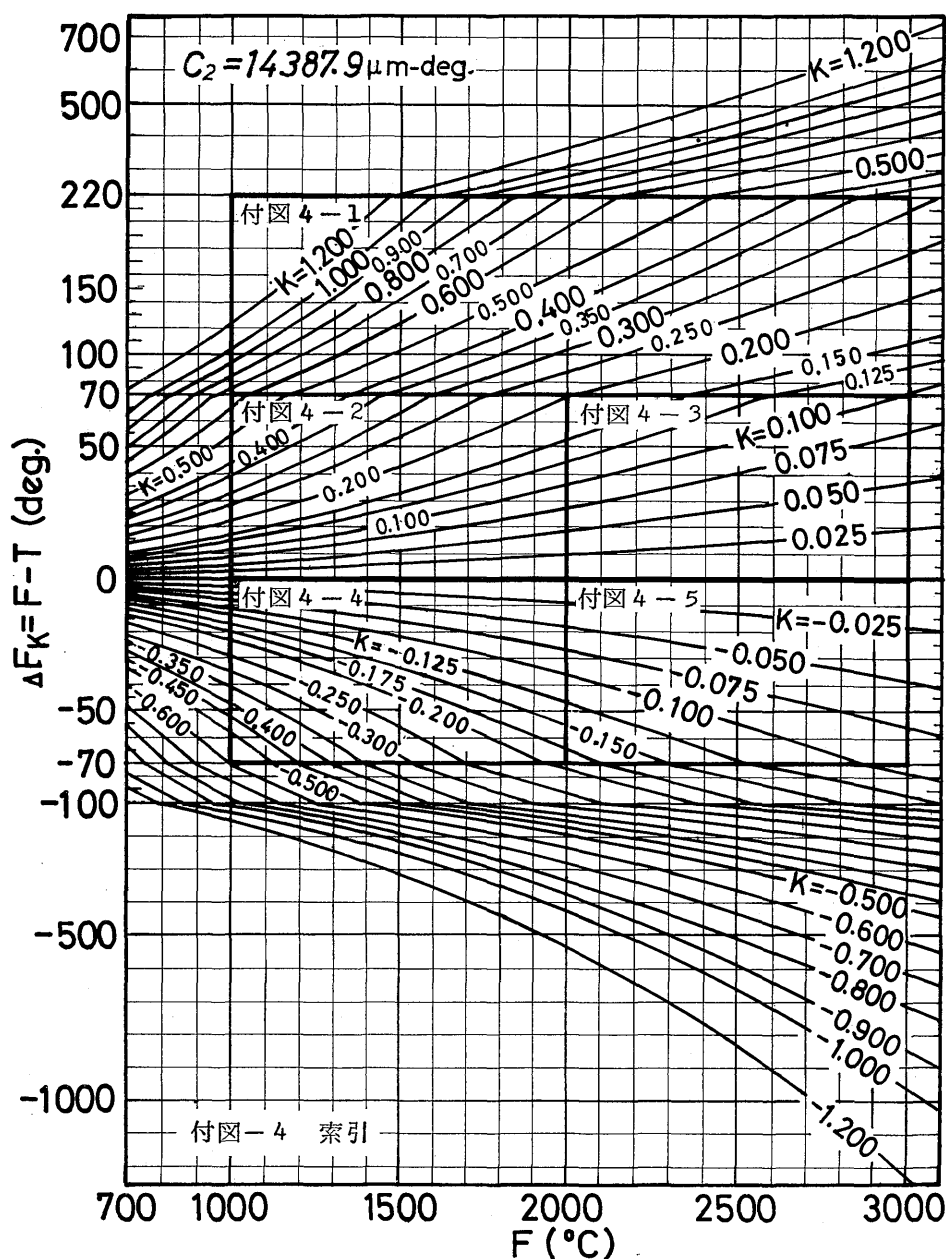
㉞ B の値は付図3の $K=0.400\sim 0.599$ の線と横軸 3000°C のところから読む。 $B=590\text{deg}$

㉟ これらを(8)式に代入する。

$$F = 3000 - 38 + (-0.432) \times 590 = 2707.12(^{\circ}\text{C})$$

(8)式に代入する K は与えられたままの値、すなわち〔例3〕では -0.432 を代入する。正負をかえるのは A 、 B を付図2、3から求めるときのみである。

㊦ (3)式より求めた F は 2707.11°C となり差は 0.01deg であった。なお〔例3〕の計算は〔例1〕の計算と同じであることに注目されたい。



付図 4-索引 定数 K における二色色温度 $F^{\circ}\text{C}$ と真温度 $T^{\circ}\text{C}$ の差 $\Delta F_K \text{ deg}$ と $F^{\circ}\text{C}$ の関係図索引

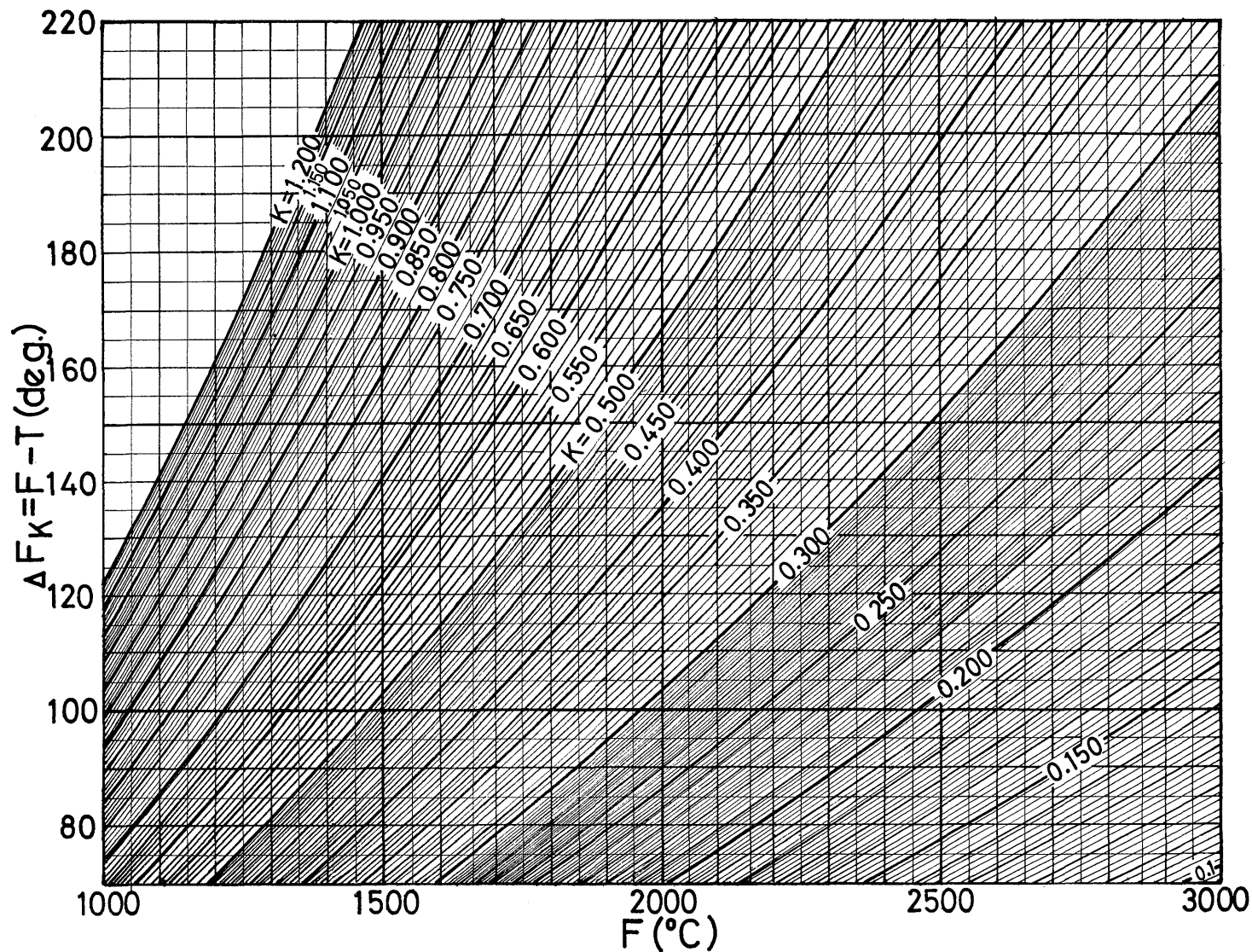
付図 4 使用法 (換算法Ⅱ 例)

〔例 1〕 $F=2600^{\circ}\text{C}$, $K=0.093$ のときの T を求む。

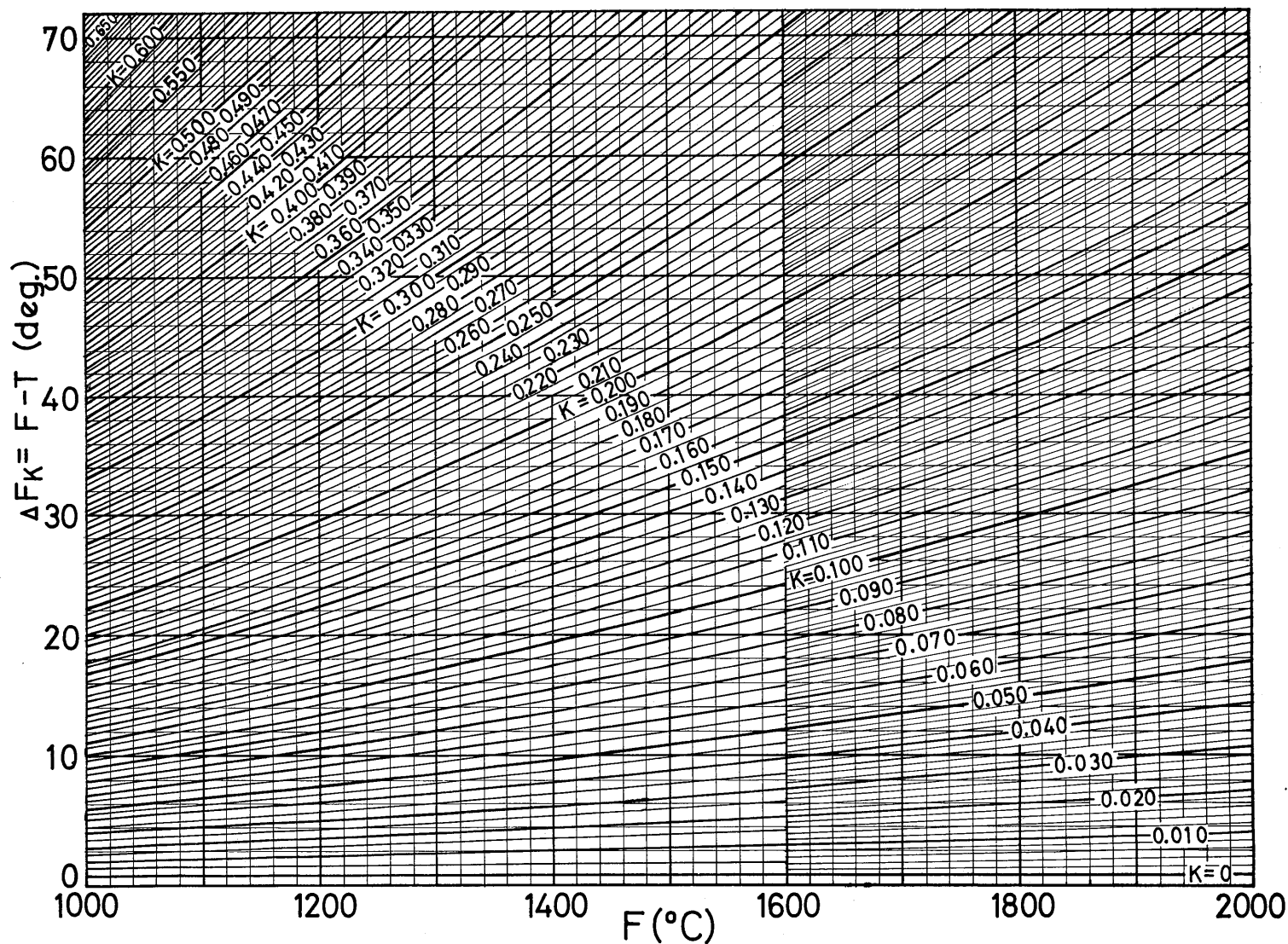
これは $F \rightarrow T$ であるから (10) 式 $[T = F - \Delta F_K]$ を用いる。付図 4 索引よりこの範囲は付図 4-3 にあることを知る。同図より $\Delta F_K = 52.4 \text{ deg}$ と読みとる。したがって $T = 2600 - 52.4 = 2547.6 (^{\circ}\text{C})$ となる。

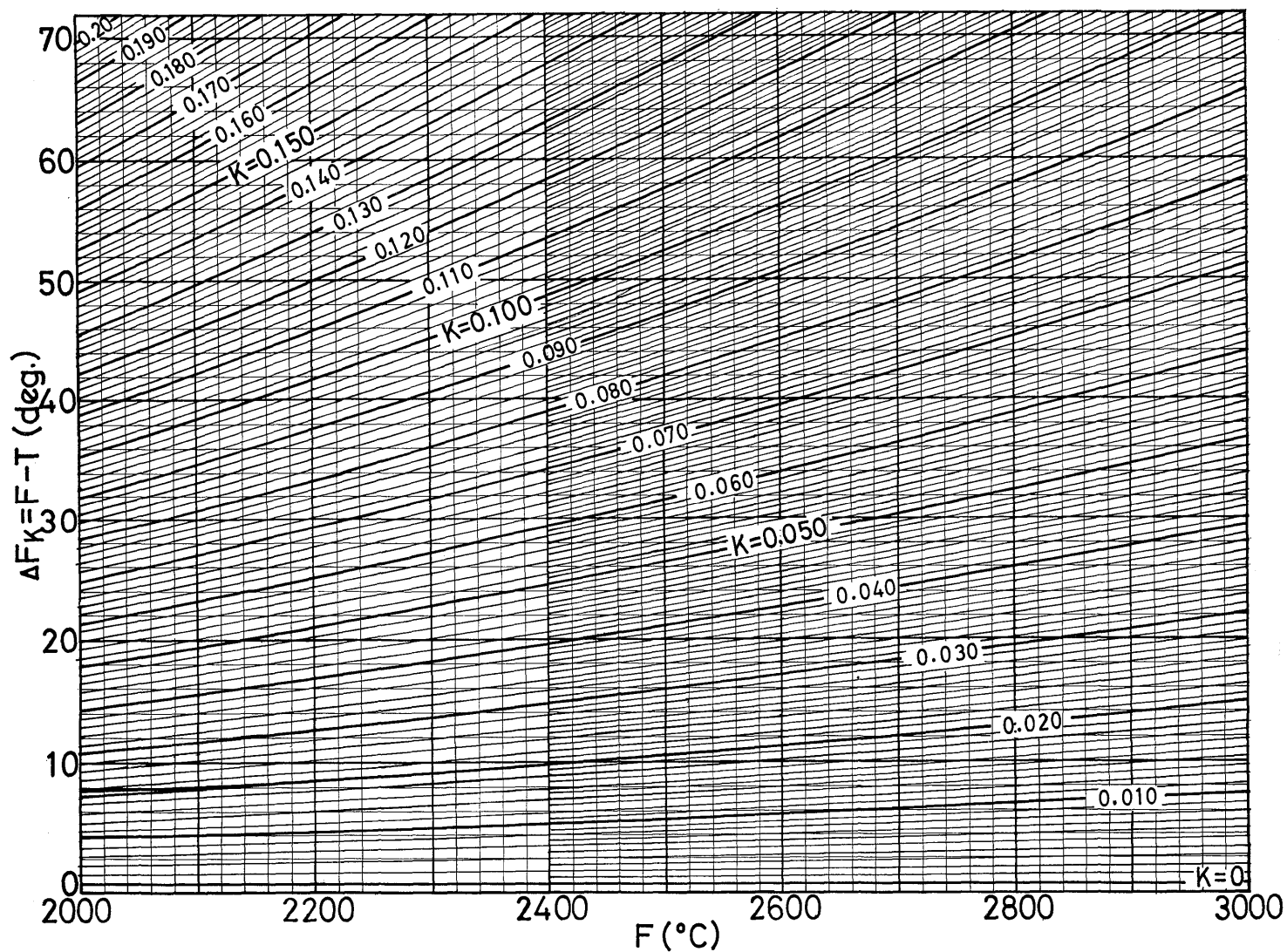
〔例 2〕 $T=2600^{\circ}\text{C}$, $K=0.093$ のときの F を求む。

これは $T \rightarrow F$ であるから (11) 式 $[F = T + \Delta F_K']$ を用いる。 $K = -K$ すなわち $K = -0.093$ とみなし、横軸も T と考えて付図 4 より ΔF_K を読みとればこれが $\Delta F_K'$ の値となる。まず索引より付図 4-5 がこの範囲に入ることを知れば、同図 $K = -0.093$ の線と横軸 2600°C のところから $\Delta F_K = \Delta F_K' = -54.5 \text{ deg}$ が求まる。したがって (11) 式に代入すると $F = 2600 - (-54.5) = 2654.5 (^{\circ}\text{C})$ となる。

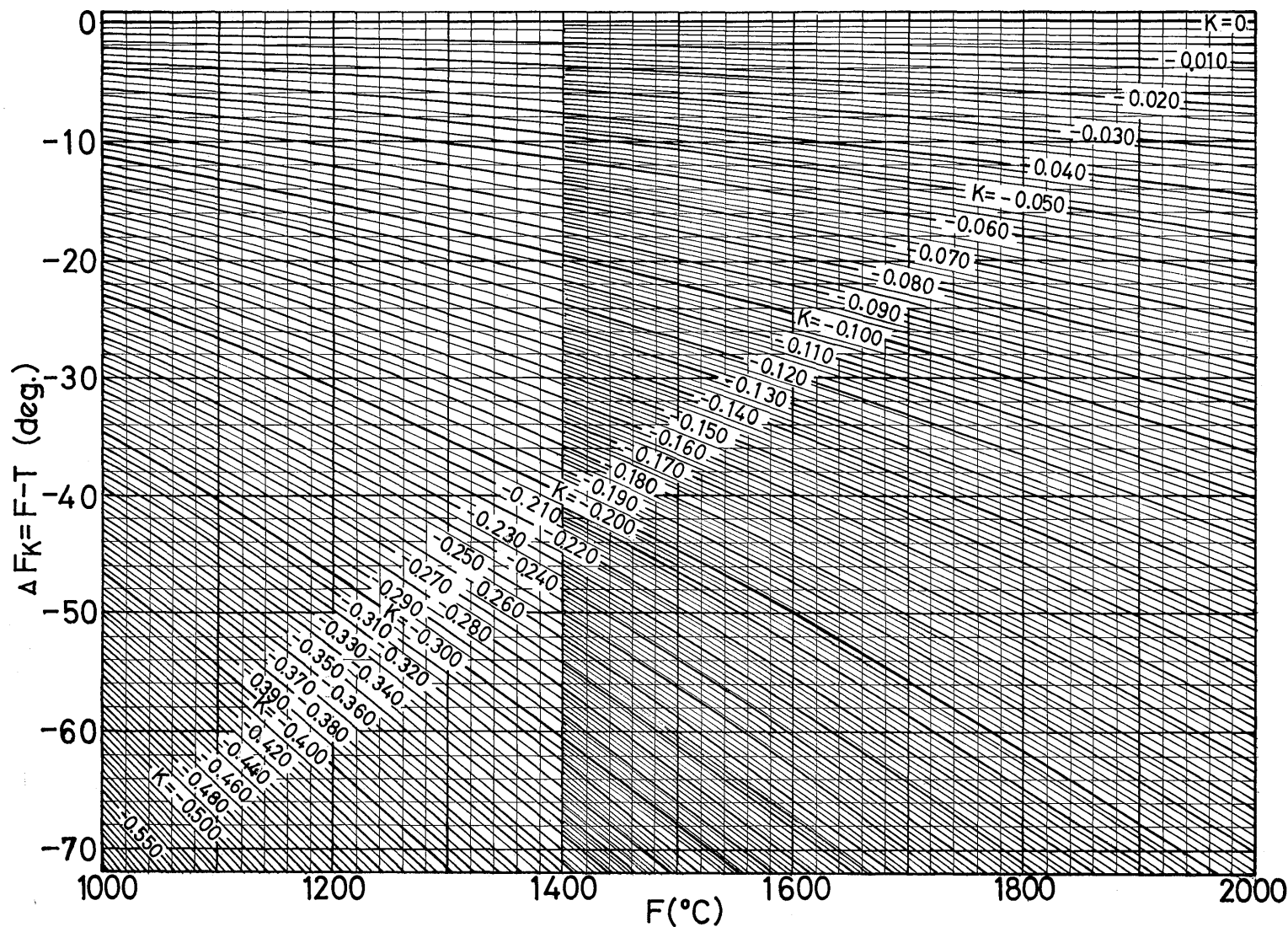


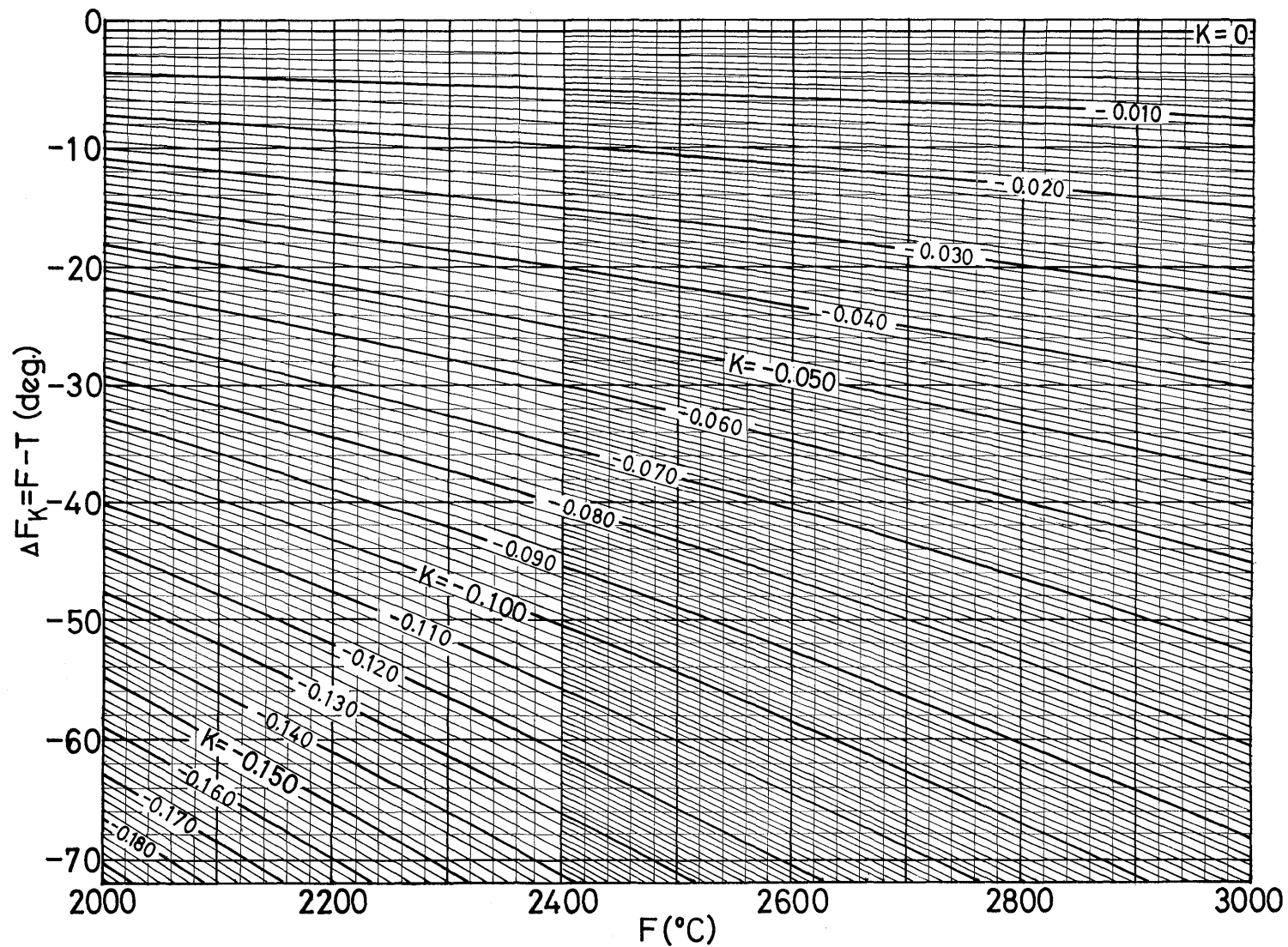
付図4-1 定数 K における二色色温度 $F^{\circ}\text{C}$ と真温度 $T^{\circ}\text{C}$ の差 $\Delta F_K \text{deg}$ と $F^{\circ}\text{C}$ の関係図-1

付図4-2 定数 K における二色色温度 $F^{\circ}\text{C}$ と真温度 $T^{\circ}\text{C}$ の差 ΔF_K deg と $F^{\circ}\text{C}$ の関係図-2



付図4—3 定数 K における二色色温度 $F^{\circ}\text{C}$ と真温度 $T^{\circ}\text{C}$ の差 $\Delta F_K \text{deg}$ と $F^{\circ}\text{C}$ の関係図—3

付図4-4 定数 K における二色色温度 $F^{\circ}\text{C}$ と真温度 $T^{\circ}\text{C}$ の差 $\Delta F_K \text{deg}$ と $F^{\circ}\text{C}$ の関係図-4



付図4-5 定数 K における二色色温度 $F^{\circ}\text{C}$ と真温度 $T^{\circ}\text{C}$ の差 $\Delta F_K \text{deg}$ と $F^{\circ}\text{C}$ の関係図—5

(23頁より続く)

λ_2 における有効分光放射率 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ はすべて $K [= \{\lambda_1 \lambda_2 / (\lambda_2 - \lambda_1)\} \times \ln(\varepsilon_1 / \varepsilon_2)]$ という定数中に一括して包含しうることに着目し, K をパラメータとする二色色温度と真温度 (またはその逆) の換算近似式や図表などにつき検討を行なった。

まずもっとも使用頻度が多いと予想される λ_1, λ_2 , $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ の値を選定し, これらの値より K の値を求めるノモグラフを作成した。ついで二色色温度 ($F^\circ\text{C}$) と真温度 ($T^\circ\text{C}$) の関係を K のある狭い範囲内では直線であると仮定した 1 次の近似換算式を提案し, その式に用いる定数 A, B を決定して図で示した。なおこの近似式の精度は二色温度計の測定の精度に比して十分高く, 実用に供し得ることを確認した。さらに F から T を求める換算図も作成した。また以上のごとく Wien の放射式を用いて換算した場合の正確度についても考察を試みた。

なお本稿をまとめるにあたり, 御指導を賜った京都大学盛 利貞教授にお礼を申し述べる。

また必要な計算は京都大学計算センター KDC-II (HITAC5020) で行なった。

文 献

- 1) 藤田清比古, 山口隆生, 小野清, 諸岡明: 中部工業大学紀要第 3 集 P. 8 (1967)
- 2) 盛 利貞委員提出: 日本学術振興会 19 委 8698 (第 3—169) (1968・5・16)
- 3) 西川甚太編: 「温度」 P. 213 (1965・3) 日刊工業新聞社
- 4) S. S. Penner: "Quantitative Molecular Spectroscopy and Gas Emissivities" P. 9 (1959) Addison-Wesley Pub. Co.
- 5) R. L. Peters: "Materials Data Nomographs" (1965) Chapman and Hall
- 6) 竹内寿太郎: 「ノモグラフの極意」 (1961・6) オーム社