

© 1990 ISIJ

論文

酸化雰囲気において加熱した鉄鋼材料の  
分光放射率山口隆生\*・藤田清比古\*<sup>2</sup>

## The Spectral Emissivity of Steels Heated in Oxidizing Atmospheres

Takao YAMAGUCHI and Kiyohiko FUJITA

## Synopsis:

The spectral emissivity  $\epsilon_{(\lambda, T)}$  is required when thermal radiation pyrometers are used to determine the true temperature of a subject. If the surfaces of steels are heated in air, the values of  $\epsilon_{(\lambda, T)}$  changes in dependence on the oxidized condition of the surfaces. However, oxidizing conditions have not been exactly controlled in studies on the spectral emissivity of oxidized surfaces of steels. So, reported values of  $\epsilon_{(\lambda, T)}$  are rather unreliable and sometimes unavailable.

In the present study, the values of  $\epsilon_{(\lambda, T)}$  on the surfaces of commercial steels, that is, JIS S09CK, SUS430, SUS304, and SKH3, which were heated in controlled atmospheres of different oxygen partial pressures, were measured at temperatures from 1 000°C to 1 300°C and in the wavelength region from 0.34 to 0.94  $\mu\text{m}$ .

Experimental results were examined by the equation concerning to free electrons and the lattice vibration and constants which are used to calculate the values of  $\epsilon_{(\lambda, T)}$  were determined.

**Key words:** measurement; oxidation; physical property; spectral emissivity; temperature; radiation pyrometry; color temperature.

## 1. 緒 言

鉄鋼の精錬時の(真)温度や、熱間加工時の加熱(真)温度はその材質を直接左右する因子の一つである<sup>1)</sup>。したがってこの温度を正確に計測することが大切であるが、鉄鋼製造プロセスでは放射を利用した温度計も多方面で使用されている<sup>2)</sup>。放射温度計で測定した温度から真温度を求めるには測定対象のその波長での分光放射率の値を知らなければならない。とりわけ色温度計で測定した色温度は測定対象の分光放射率の波長依存性が正ならば真温度より低く、また負であれば高くなり、しかも真温度との差は波長勾配に関係する係数の大きさに依存するため、色温度を定義した波長域での分光放射率の値が必要となるが、このことについてはすでに報告した<sup>3)</sup>。また鉄鋼の精錬や熱間加工はほとんどが大気中で行われるが、このとき測定対象である鉄鋼の表面は酸化していると考えられる。しかし鉄鋼表面の酸化物の分光放射率についての研究は発表が少なく、特に酸化条件を厳密に制御している研究はほとんど見当たらない。したがって

実際の測定に直接これらの値を使用できない場合が多く、その上酸化物の放射率については理論的解析も難しいとされている<sup>4)</sup>。そこで機械構造用炭素鋼 S09CK、フェライト系ステンレス鋼 SUS430、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304、タングステン系高速度工具鋼 SKH3 の JIS に制定されている実用特殊鋼を酸化雰囲気中で 1 000°C~1 300°C に加熱し、酸化を律則する雰囲気ガス中の酸素分圧(以下  $P_{O_2}$  と記す)<sup>5)</sup> をジルコニアを用いた固体電解質電池で測定<sup>6)</sup> し、所定の  $P_{O_2}$  で加熱し、表面が酸化した鉄鋼材料の分光放射率の温度ならびに波長依存性を可視域とその近傍で測定した。そして測定結果を自由電子に格子振動を考慮した式で解析した。

## 2. 試料ならびに実験方法

## 2.1 試料

本実験に供した試料は市販の S09CK, SUS430, SUS304, SKH3 の直径 19 mm に熱間圧延した丸棒であり、これらの主要な化学組成を Table 1 に示した。試

平成元年 10 月本会講演大会にて発表 平成 2 年 1 月 22 日受付 (Received Jan. 22, 1990)

\* 中部大学工学部 (College of Engineering, Chubu University, 1200 Matsumoto-cho Kasugai 487)

\*<sup>2</sup> 中部大学工学部 工博 (College of Engineering, Chubu University)

料は Fig. 1 に示す形状に機械加工した後、分光放射率を測定する表面はバフ研磨し、さらにアセトン、エチルアルコール等で洗浄した。そして試料後面の中心の穴に真温度を測定するための熱電対を保護管に入れて挿入した。この熱電対保護管を発泡アルミナレンガを加工製作したカラーで支えることで、試料を電気炉に設けた磁器製管(ムライト質)の内壁に接触しないように浮かせ、試料表面に生成した酸化物によって磁器製管が侵食破損

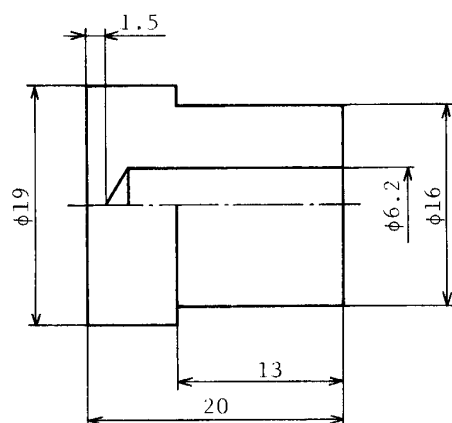


Fig. 1. Dimensions of specimen (mm).

するのを防止するとともに試料の中心と磁器製管の中心を一致させた。

## 2.2 実験方法

Fig. 2 に示す実験装置を用いて試料を電気炉中の磁器製管内に設置した。そして管内を油拡散ポンプで  $7 \times 10^{-4}$  Pa 以下の真空に保つか、あるいは高純度アルゴンガスを  $950^\circ\text{C}$  に加熱した金属チタン層を通してガス中の  $P_{\text{O}_2}$  を  $2.6 \times 10^{-4}$  Pa 以下にして  $700 \text{ ml/min}$  の流量で流し、アルゴンガス気流中で試料を所定の真温度  $T$   $^\circ\text{C}$  に加熱、保持する。この状態で実効波長  $\lambda_0 = 0.65 \mu\text{m}$  のトレーサビリティ用自動光高温計で輝度温度  $S_{(\lambda_0)}$   $^\circ\text{C}$  を測定しながら真空ポンプを切るか、またはアルゴンガスを止めて、系内に空気を徐々に導入する。そのようにすると  $T$  は一定であるが  $S_{(\lambda_0)}$  はしだいに上昇し、ある一定値にほぼ安定する。このときの  $P_{\text{O}_2}$  を予備実験で決定し、実際の測定は  $P_{\text{O}_2}$  がこの値に達したら空気の供給を断ち  $S_{(\lambda_0)}$  を測定する。

ついで試料からの放射光を分光器に導き分光し、前報<sup>7)</sup>と同様の方法で各波長  $\lambda$  における分光放射率  $\epsilon_{(\lambda, T)}$  を求めた。すなわちその光の強さを光電子増倍管で電気信号に変換して分光出力  $I_{(\lambda, T)}$  mV を測定す

Table 1. Chemical composition of the specimens (wt%).

Specimen	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	W	V	Co	$\Sigma \text{Al}$
S09CK	0.12	0.28	0.58	—	—	—	—	—	—	—	0.024
SUS430	0.03	0.42	0.49	0.025	0.004	16.00	—	—	—	—	0.020
SUS304	0.04	0.42	1.82	—	—	19.23	9.24	—	—	—	—
SKH3	0.78	0.31	0.28	—	—	3.99	0.22	17.74	0.92	4.76	—

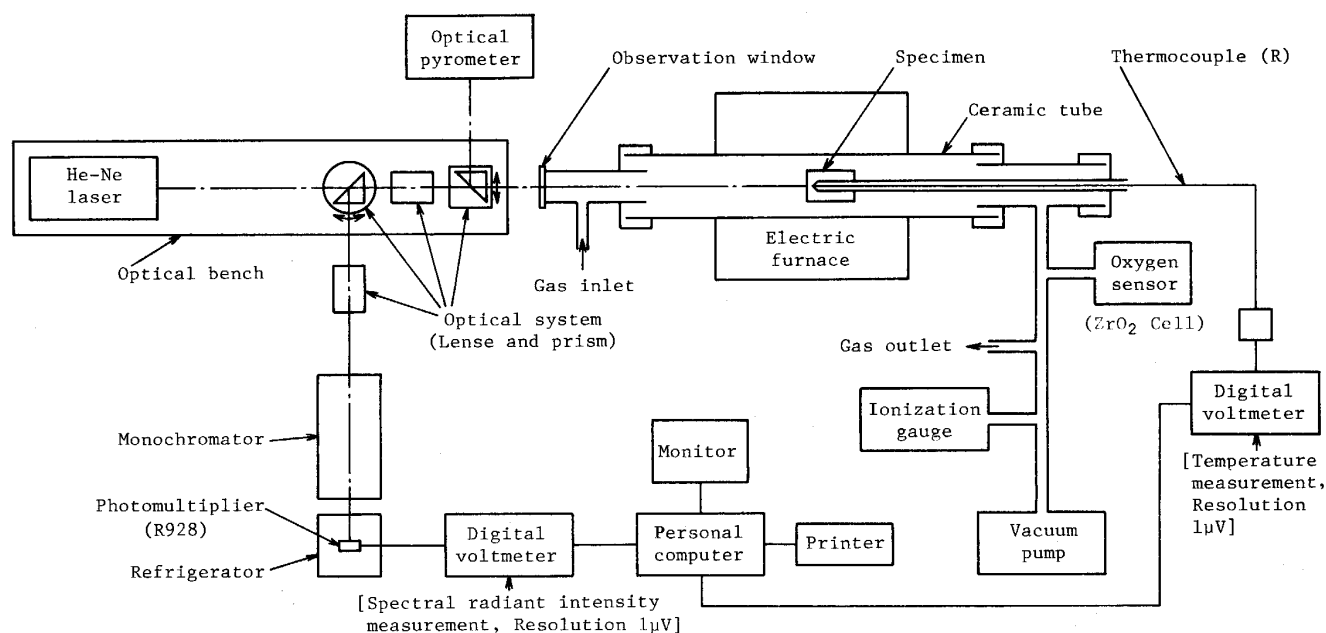


Fig. 2. Schematic diagram of experimental apparatus.

る。そして  $T$  と  $S_{(\lambda_0)}$  の測定値から Planck の放射則を用いた輝度温度測定法<sup>8)</sup> によって  $\lambda_0$  における分光放射率  $\epsilon_{(\lambda_0, T)}$  の値を決定する。この値と  $I_{(\lambda, T)}$  を特定波長  $\lambda_0$  の分光出力  $I_{(\lambda_0, T)}$  で除した相対出力を用いると  $\epsilon_{(\lambda, T)}$  が算出できる。測定温度  $T$  は  $1000^\circ\text{C}$ ,  $1100^\circ\text{C}$ ,  $1200^\circ\text{C}$ ,  $1300^\circ\text{C}$  の4温度とし、測定波長域  $\lambda$  としては、短波長側は使用している光学系の一部がクラウンガラス製であるため近紫外の光の吸収が大きいことと、上記温度域における近紫外の分光放射強度が低いことを勘案して  $0.38\ \mu\text{m}$  より、長波長側は使用した光電子増倍管の有効感度域である  $0.94\ \mu\text{m}$  までとした。所定の温度および波長域における  $I_{(\lambda, T)}$ ,  $P_{\text{O}_2}$ ,  $S_{(\lambda_0)}$  の測定が終了したら再度アルゴンガスを通して冷却過程での試料表面の変化をできる限り防止して室温まで冷却した。冷却後分光放射率の値に影響する試料の表面形状の状態を走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いて観察した。また自動光高温計は光高温計校正用タングステンリボン電球で校正し、さらにタングステンを試料にこの輝度温度を測定し DeVos<sup>9)</sup> が測定したタングステンの分光放射率の値を用いて補正した。

### 3. 実験結果ならびに考察

#### 3.1 各種試料の表面状態と $\epsilon_{(\lambda_0, T)}$

Fig. 3 は各試料を加熱して分光放射率を測定したときの  $P_{\text{O}_2}$  の値である。図から分かる通り各試料、各温度ごとの  $P_{\text{O}_2}$  は一定にできず、 $P_{\text{O}_2}$  は試料 SUS304, SUS430, S09CK, SKH3 の順に高く、かつ  $1000^\circ\text{C}$  より  $1300^\circ\text{C}$  へと加熱温度が上昇するにつれて直線的に高くなった。ただし SUS304 と SUS430 はほとんど同

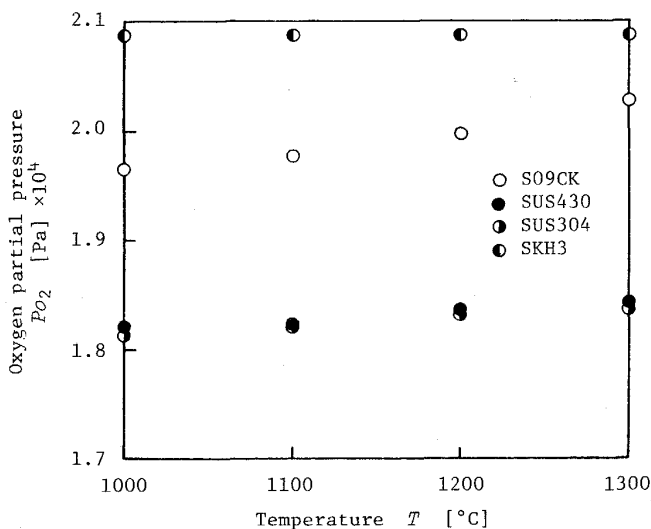


Fig. 3. Oxygen partial pressure  $P_{\text{O}_2}$  as a function of temperature  $T$ .

じであり SKH3 は温度に関係なく一定であった。高温ほど  $P_{\text{O}_2}$  が高くなる傾向は金属とその酸化物の  $P_{\text{O}_2}$  の平衡解離圧を熱力学的に考察<sup>5)</sup> した結果と一致している。

つぎに光高温計の実効波長  $\lambda_0 = 0.65\ \mu\text{m}$  における各温度  $T$  の分光放射率  $\epsilon_{(\lambda_0, T)}$  の測定結果を Fig. 4 に示す。これから分かる通り  $\epsilon_{(\lambda_0, T)}$  の値は  $0.85 \sim 0.89$  となり、鉄鋼や各種金属の発表されている  $0.35 \sim 0.45$ <sup>2)10)</sup> に比してきわめて高い値であった。そしてすべての試料に共通して  $T$  が上昇するにつれて  $\epsilon_{(\lambda_0, T)}$  も高くなった。しかしながら  $1000^\circ\text{C}$  と  $1300^\circ\text{C}$  に加熱して分光放射率を測定した S09CK の SEM 像を例として Photo. 1 に示したように加熱温度により表面形状の凹凸や粒の大きさなどが異なっている。このことは合金元素が添加されている他の試料でも同じであった。このように同一試料であっても加熱温度によって分光放射率の値に大きく影響する試料表面の形状が必ずしも同じでないので物質固有の放射率<sup>11)12)</sup> の考え方を適用して各鋼材の酸化状態の放射率の温度依存性が正であると結論することはできない。それゆえこの場合、試料表面のあらさ、形状などの影響をすべて包含した広い意味での実効放射率<sup>13)14)</sup> の温度依存性が正であると考えらるべきであ

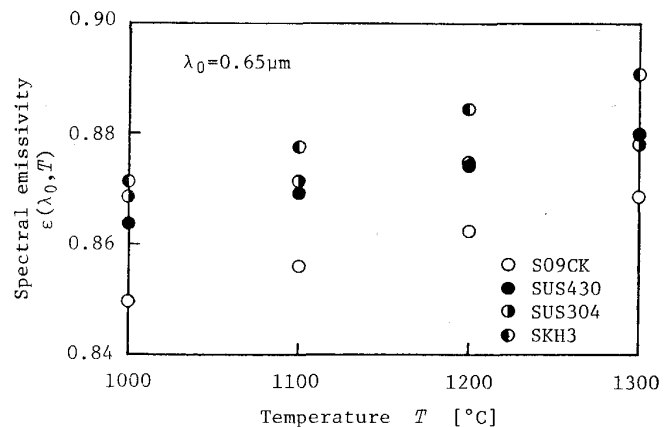


Fig. 4. Spectral emissivity of oxidized surfaces of steels at a wavelength  $\lambda_0 = 0.65\ \mu\text{m}$ .

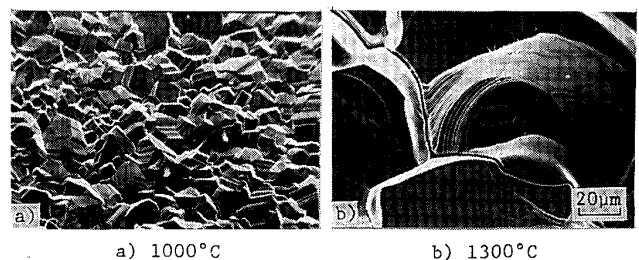


Photo. 1. SEM images of the specimen S09CK.

る。したがって分光放射率を主に自由電子の挙動から考察する場合<sup>15)16)24)</sup>のように、その物質の電気伝導率と関連づけて算出された値が電気伝導率の温度特性に依存するのと同様な説明をすることは適当でなく、このような実効放射率の温度依存性を他の物性値から推定することは困難と思われる。一方後述のように測定色温度から真温度を知るのに重要な波長勾配に関する係数の温度依存性はこの温度域ではほとんど認められなかった。また同一温度における  $\epsilon_{(\lambda_0, T)}$  の絶対値の各試料による差は少ないが、S09CK, SUS430, SUS304, SKH3 の順に合金元素が多くなるにしたがって大きな値を示した。このことは、金属面の分光放射率が純金属に比して合金のほうが高くなる傾向<sup>24)</sup>と一致している。ただし SUS430 と SUS304 は測定波長全域にわたってほぼ同じ値と見なせた。

3.2 分光放射率  $\epsilon_{(\lambda, T)}$  の波長依存性

各試料の波長 0.34~0.94  $\mu\text{m}$ , 測定温度  $T=1000^\circ\text{C}$ ,  $1100^\circ\text{C}$ ,  $1200^\circ\text{C}$ ,  $1300^\circ\text{C}$  における分光放射率  $\epsilon_{(\lambda, T)}$  の波長依存性の測定結果を主要波長について Table 2 に、そのうち  $T=1200^\circ\text{C}$  の結果を後述の自由電子に格子振動を考慮した式からの計算値および他研究者の分光反射率の測定値から算出した値とともに Fig. 5 に図示した。各試料共通してこの波長域、温度域では波長依存性の勾配は正であり、しかも波長特性がほぼ直線となった。著者らはすでに  $\epsilon_{(\lambda, T)}$  の波長依存性を波長に対して(1)式のように直線として種々の考察をし<sup>3)7)17)</sup>色温度と真温度の関係は定数  $a, b$  の絶対値に関係なく  $a/b$  で決定され、色温度は  $a$  が正ならば真温度より低く、負ならば高くなることなどを明らかにしている<sup>3)</sup>。

$$\epsilon_{(\lambda, T)} = a\lambda + b = \{(a/b)\lambda + 1\}b \dots\dots\dots(1)$$

Table 2. Spectral emissivity of oxidized surfaces of steels.

Specimen	Temperature (°C)	Wavelength ( $\mu\text{m}$ )						
		0.4	0.5	0.6	0.65	0.7	0.8	0.9
S09CK	1000	0.816	0.831	0.844	0.850	0.855	0.863	0.870
	1100	0.823	0.838	0.851	0.856	0.861	0.870	0.877
	1200	0.829	0.845	0.857	0.862	0.868	0.877	0.884
	1300	0.835	0.850	0.863	0.869	0.874	0.883	0.891
SUS430	1000	0.824	0.842	0.858	0.864	0.869	0.879	0.887
	1100	0.829	0.847	0.863	0.869	0.874	0.885	0.893
	1200	0.834	0.854	0.868	0.875	0.881	0.891	0.899
	1300	0.840	0.859	0.874	0.880	0.885	0.895	0.904
SUS304	1000	0.821	0.844	0.862	0.869	0.875	0.886	0.895
	1100	0.825	0.847	0.865	0.872	0.878	0.890	0.899
	1200	0.827	0.850	0.868	0.875	0.881	0.892	0.902
	1300	0.832	0.853	0.871	0.878	0.884	0.896	0.906
SKH3	1000	0.844	0.856	0.867	0.871	0.875	0.883	0.889
	1100	0.849	0.862	0.873	0.878	0.882	0.890	0.896
	1200	0.857	0.869	0.880	0.884	0.889	0.897	0.904
	1300	0.863	0.875	0.886	0.891	0.895	0.902	0.909

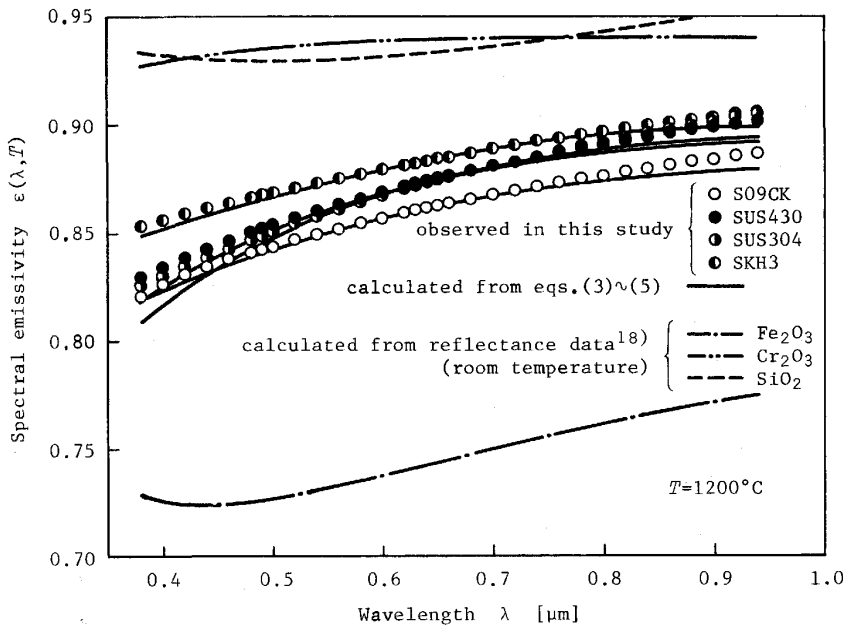


Fig. 5. Spectral emissivity of oxidized surfaces of steels as a function of wavelength at temperature 1200°C.

ただし  $\lambda$  の単位として  $\mu\text{m}$  を用いたので定数  $a$  の単位は  $\mu\text{m}^{-1}$ , 定数  $b$  は無次元である. このように表面が酸化している場合,  $a$  が正, すなわち放射率の波長依存性が一般の金属面の場合とは逆となり, したがって色温度も一般の金属面とは逆に真温度より低くなる. また勾配に関係する係数である  $a/b$  の温度依存性はこの温度域ではほとんど認められず S09CK, SUS430, SUS304, SKH3 の  $a/b$  はそれぞれ 0.13<sub>8</sub>, 0.16<sub>1</sub>, 0.18<sub>9</sub>, 0.11<sub>0</sub>  $\mu\text{m}^{-1}$  であった.  $a/b$  が一番大きい 0.18<sub>9</sub>  $\mu\text{m}^{-1}$  の SUS304 と一番小さい 0.11<sub>0</sub>  $\mu\text{m}^{-1}$  の SKH3 を著者らが実験に使用している二色温度計の二つの実効波長 0.49  $\mu\text{m}$ -0.63  $\mu\text{m}$  における二色温度で比較すると  $T=1000^\circ\text{C}$  で  $994^\circ\text{C}$  と  $996^\circ\text{C}$ ,  $T=1300^\circ\text{C}$  では  $1291^\circ\text{C}$  と  $1295^\circ\text{C}$  とその差は  $4^\circ\text{C}$  以内と大きくない. これらの値について本研究結果と直接比較できる文献は見当たらないが, Fig. 5 に併記した SAMSONOV<sup>18)</sup> による酸化物の常温での分光放射率から算出した分光放射率の値と比較すると, これが純化合物でその上測定温度が異なるなどで  $\varepsilon_{(\lambda, T)}$  の絶対値は異なるものの,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  より  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  の  $\varepsilon_{(\lambda, T)}$  の値が大きくなり, かつ波長勾配も正であることなど本研究の鉄基に対して合金元素が多くなるほどその値が大きくなる値となり, 波長勾配も正であるという結果と同じような傾向を示している. また  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  の  $\varepsilon_{(\lambda, T)}$  の値を最小二乗法で直線で近似して求めたところ,  $a/b$  の値はそれぞれ 0.17, 0.03, 0.06  $\mu\text{m}^{-1}$  となり,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  のそれは本研究の SUS430, SUS304 の値ときわめてよく一致した. そして  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  の  $a/b$  は灰色体の値 ( $a/b=0 \mu\text{m}^{-1}$ ) に近い値となった.

さて金属の分光放射率を推定する古典的な HAGEN-RUBENS<sup>19)</sup> や菅野<sup>15)16)</sup> の式から算出される可視域における分光放射率の結果はすべて波長依存性は負となり, 本研究にこれをそのまま適用することはできない. 最近では遷移金属の分光放射率に関する大野<sup>20)</sup> や, 各種金属材料の分光放射率を自由電子に束縛電子の項を加えた一般式を示し研究対象により式の一部の項を省略して考察した牧野<sup>21)~25)</sup> の研究が報告されている. しかしこれらはすべて金属面についてのものであり本研究のように鉄鋼材料の表面が酸化した状態についてのはほとんど見当たらない. LIPPMANN<sup>26)</sup> は熱伝導や光学的性質を考えると電子の分担分に格子振動の分担分を考慮することの必要性を述べている. それで複素屈折率  $\hat{n}$  ( $=n-ik$ ) が格子振動と自由電子の挙動の和で表されると考えて<sup>27)</sup>, 波長  $\lambda$  を用いると(2)式のように表される.

$$\hat{n}^2 = B + \sum_j \frac{A_j \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_j^2 + i(\lambda_j^2/\lambda_{\gamma j})\lambda} - \frac{4\pi N^* e^2}{m^*} \sum_l \frac{1}{(2\pi C/\lambda)^2 - i(2\pi C/\tau_l \lambda)} \dots\dots\dots (2)$$

ただし  $B$  は真空の比誘電率で 1, 添え字  $j$  は第  $j$  種の格子,  $A_j$  は振動の強さ,  $\lambda_j$  は共鳴波長,  $\lambda_{\gamma j}$  は減衰係数,  $l$  は第  $l$  種の自由電子,  $\tau_l$  は緩和時間,  $e$  は電子の電荷,  $m^*$  は電子の有効質量,  $N^*$  は単位体積中の有効電子数,  $C$  は真空中の光速である.

(2)式右辺の第2項が格子振動の寄与による分担分であり, 第3項は自由電子の分担分である. DRUDE の初期的モデルは第3項のみで, しかも  $l=1$  としたものである.  $l=2$  まで導入して DRUDE の修正モデルと呼ばれている式<sup>28)</sup> もある. Fig. 5 に示した測定結果からわかるとおり,  $\varepsilon_{(\lambda, T)}$  はこの波長域では単調に増加しているので(2)式の分散式において  $j=1$ ,  $l=1$  と最も簡単にし, 各項の分母の共役複素数を分母, 分子に乗じて整理すると(3), (4)式をえる.

$$\varepsilon_1 \equiv n^2 - k^2 = B + \frac{A_1[1 - (\lambda_1/\lambda)^2]}{[1 - (\lambda_1/\lambda)^2]^2 + (\lambda_1/\lambda_{\gamma 1})^2(\lambda_1/\lambda)^2} - \frac{4\pi N^* e^2}{m^*} \cdot \frac{\tau_1^2 \lambda^2}{\lambda^2 + 4\pi^2 C^2 \tau_1^2} \dots\dots\dots (3)$$

$$\varepsilon_2 \equiv 2nk = \frac{A_1(\lambda_1/\lambda_{\gamma 1})(\lambda_1/\lambda)}{[1 - (\lambda_1/\lambda)^2]^2 + (\lambda_1/\lambda_{\gamma 1})^2(\lambda_1/\lambda)^2} + \frac{4\pi N^* e^2}{m^*} \cdot \frac{\lambda^3 \tau_1 / 2\pi C}{\lambda^2 + 4\pi^2 C^2 \tau_1^2} \dots\dots\dots (4)$$

この(3), (4)式の  $A_1$ ,  $\lambda_1$ ,  $\lambda_{\gamma 1}$ ,  $N^*$ ,  $m^*$ ,  $\tau_1$  の6種のパラメーターが実験結果をよく表すように決定されなければならない.

両式の右辺の最終項は前述のようにとも自由電子の分担分を示しており, これは菅野<sup>15)16)</sup> が溶鋼の放射率を電子論から電気伝導率と関連づけて推定した式と同じである. 当然パラメーターの数は少ない方がこの決定は容易であるから, ここですら  $N^*$ ,  $m^*$  については菅野の用いた値を採用し, さらに  $\tau_1$  についても菅野と同じ方法で, 電気抵抗率は SAMSONOV<sup>29)</sup> による  $\text{FeO}$  の  $1300^\circ\text{C}$  の値を初期値とし, また他のパラメーターについても,  $\varepsilon_{(\lambda, T)}$  の測定結果を計算機に画像として示し, これに近づく値を見つけて, これを初期値として用い, 不動点反復法<sup>30)</sup>, プレント法<sup>31)</sup> などにより各試料の実験結果に最適化するパラメーター  $A_1$ ,  $\lambda_1$ ,  $\lambda_{\gamma 1}$  ( $\lambda_1/\lambda_{\gamma 1}$  として求めた),  $\tau_1$  を決定した. その結果  $\varepsilon_{(\lambda, T)}$  の絶対値の大きさは主に  $\tau_1$  に依存させるのが良く,  $\varepsilon_{(\lambda, T)}$  の  $\lambda$  に対する形状, すなわち  $a/b$  に影響するのは  $A_1$ ,  $\lambda_1$ ,  $\lambda_1/\lambda_{\gamma 1}$  であった. 本研究の温度域では  $a/b$  の温度

Table 3. Value of the constants in eqs. (3)~(5).

Specimen	$A_1$	$\lambda_1$ ( $\mu\text{m}$ )	$\lambda_1/\lambda_{\gamma 1}$	$\tau_1 = \alpha T + \beta$ (s)	
				$\alpha (\times 10^{-20} \text{ s}^\circ\text{C}^{-1})$	$\beta (\times 10^{-17} \text{ s})$
S09CK	2.67	0.4	0.96	-1.7943	2.4124
SUS430	2.34	0.4	0.85	-1.5678	2.1296
SUS304	2.33	0.4	0.79	-0.98690	1.3804
SKH3	2.19	0.4	0.96	-1.6903	2.3071

依存性は認められなかったので各試料とも  $A_1$ ,  $\lambda_1$ ,  $\lambda_1/\lambda_{\gamma 1}$  は温度に無関係な定数となる。このようにして求めた結果を Table 3 に示した。同表の右欄は実効放射率の測定結果の温度依存性を記述するために  $\tau_1$  を (5) 式のように  $T$  の関数とした実験式の定数  $\alpha$ ,  $\beta$  の値である。

$$\tau_1 = \alpha T + \beta \dots\dots\dots (5)$$

したがって  $\tau_1$  の温度依存性を電気抵抗率のそれと直ちに關係づけて考察することはできないが、 $\tau_1$  より算出される電気抵抗率の値は SAMSONOV に示される酸化物の値の範囲内にある。また  $A_1$ ,  $\lambda_1$  は牧野ら<sup>23)25)</sup> が自由電子に束縛電子を考慮して金属材料の分光放射率の研究をした式の  $S$ ,  $\lambda_0$  に相当すると考えると鉄鋼の  $S$  は 1.29~7.86 であり、コバルトとクロムの  $\lambda_0$  は 0.82  $\mu\text{m}$  と 1.46  $\mu\text{m}$  であるから、著者らの値もほぼ妥当と考えられる。つぎに Table 3 の値を用いて (3)~(5) 式から算出された各試料の 1200°C における分光放射率の値を Fig. 5 の測定結果と対比して実線で併記したがきわめてよい一致をみた。さらに著者らが実験に使用している二色温度計の二つの実効波長である 0.49  $\mu\text{m}$ -0.63  $\mu\text{m}$  における二色温度を、 $\epsilon_{(\lambda, T)}$  の測定値と近似式から算出した  $\epsilon_{(\lambda, T)}$  を用いた場合の両者を比較したが、その差は  $\pm 0.5^\circ\text{C}$  以内で一致し色温度を考察する上では十分な精度で  $\epsilon_{(\lambda, T)}$  が求められた。

#### 4. 結 言

酸化雰囲気において加熱され表面に酸化物が生成した状態における S09CK, SUS430, SUS304, SKH3 の実用鉄鋼材料の温度 1000°C~1300°C, 波長 0.38  $\mu\text{m}$ ~0.94  $\mu\text{m}$  の分光放射率を測定した。その結果はつぎのとおりである。

1) 表面に酸化物が生成した各鋼材の分光放射率は光高温計の実効波長である  $\lambda_0 = 0.65 \mu\text{m}$  において 0.85~0.89 であった。これはこれら金属面の分光放射率の 0.35~0.45 に比してきわめて高い値である。

2) 表面形状の凹凸や粒の大きさなどの影響を包含した実効放射率の温度依存性は正となったが、電気伝導率のそれとは直接関連づけられない。

3) 分光放射率の波長依存性は正となった。これは金属の多くのそれが負であるのと逆である。したがって表面が酸化した状態の鉄鋼材料の色温度は真温度より低い値となる。

4) 表面が酸化した鉄鋼材料の分光放射率を自由電子に格子振動を考慮した光学定数分散式で解析し、巨視的な分光放射率の挙動とよく一致するよう各定数を決定した。

#### 文 献

- 1) 福高善己, 岩村忠昭: 材料とプロセス, 1 (1988), p. 493
- 2) 大野二郎: 計測と制御, 14 (1975), p. 358
- 3) 藤田清比古, 山口隆生: 鉄と鋼, 67 (1981), p. 113
- 4) 溶鉄・溶滓の物性値便覧 (日本鉄鋼協会溶鋼溶滓部会編) (1972), p. 314
- 5) たとえば, 金属材料の高温酸化と高温腐食 (腐食防食協会編) (1982), p. 21 [丸善]
- 6) 岩瀬正則, 藤村候夫, 盛 利貞: 日本金属学会誌, 39 (1975), p. 952
- 7) 山口隆生, 藤田清比古: 計測自動制御学会論文集, 19 (1983), p. 657
- 8) たとえば, B. N. AL'TSHULER: High Temp., 13 (1975), p. 194
- 9) J. C. DEVOS: Physica, 20 (1954), p. 690
- 10) LANDOLT-BÖRNSTEIN: Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Astronomie, Geophysik, Technik. VI Band Technik, 4 (1967), p. 47 [Springer-Verlag]
- 11) 高田誠二: 計測と制御, 4 (1965), p. 867
- 12) 高田誠二: 応用物理, 38 (1969), p. 537
- 13) 芝 亀吉: 温度 (計量管理技術双書 16) (1959), p. 143 [コロナ社]
- 14) JIS Z 8706-1980, 光高温計による温度測定法
- 15) 菅野 猛: 鉄と鋼, 27 (1941), p. 59
- 16) 高温測定と溶鋼温度 (学振 19 委編) (1960), p. 104 [日刊工業新聞社]
- 17) 山口隆生, 藤田清比古: 計測自動制御学会論文集, 23 (1987), p. 1123
- 18) 遠藤敬一訳: 最新酸化物便覧 (物理化学的性質) 第2改訂増補版 (SAMSONOV 監修) (1979), p. 243 [日ソ通信社]
- 19) たとえば, Y. S. TOULOUKIAN and D. P. DEWITT: Thermophysical Properties of Matter (Handbook of High-temperature Materials No. 3) (1970), p. 3 [PLENUM]
- 20) 大野二郎: 計測自動制御学会論文集, 14 (1978), p. 283
- 21) T. MAKINO and T. KUNITOMO: Bull. JSME, 20 (1977), p. 1607
- 22) T. MAKINO, R. KISHIDA, H. KAWASAKI and T. KUNITOMO: Bull. JSME, 23 (1980), p. 1835
- 23) 牧野俊郎, 川崎博也, 国友 孟: 日本機械学会論文集, 47 (1981), p. 1818
- 24) 牧野俊郎, 国友 孟, 森 敏樹: 日本機械学会論文集, 49 (1983), p. 1040
- 25) 牧野俊郎, 長谷川宏幸, 成宮祥介, 松田昌平, 国友 孟: 日本機械学会論文集, 50 (1984), p. 2655
- 26) S. LIPPMANN: Wiss. Z. d. Tech. Hochsch. Karl-Marx-Stadt, 11 (1960), p. 43
- 27) 工藤恵栄: 光物性の基礎 (1985), p. 90 [オーム社]
- 28) たとえば, 日本鉄鋼協会共同研究会計測部会放射温度計小委員会終了報告 (第 54 回計測部会提出資料 (1973 年 5 月)), p. 134
- 29) 文献 18), p. 208

---

30) S. D. CONTE and C. de BOOR: Elementary Numerical Analysis (An Algorithmic Approach, Third Edition) (1980), p. 88 [McGraw-Hill International Book Co.]

31) 連立非線形方程式プレント法 (たとえば, FACOM FORTRAN SSL II (1980), p. 418 [富士通])

---