

固体ふく射の分光研究 (第1報)*

— 金属平面および粗面の単色ふく射率と全ふく射率 —

金 山 公 夫

馬 場 弘

(昭和45年4月30日受理)

Spectroscopic Study of the Emission from Solids (1st report)

— Monochromatic emittance and total emittance of the
smooth and the rough surfaces of metals —

by Kimio KANAYAMA and Hiromu BABA

Abstract

The monochromatic emittances of smooth and rough surfaces of aluminum and brass were measured directly, at 200°C specimen temp., whose surfaces were scratched by the sand papers of various grain size. The rolled surfaces of metals on the market were used for the smooth surfaces.

At the same time, the total emittances on these surfaces were measured by the vacuum radiometer of thermo-couple type.

Agreement was obtained between the total emittance calculated from definite integral of the monochromatic emittance and the total emittance measured directly.

1. ま え が き

金属の平面および粗面の反射率に関する分光学的研究は、古くは A. R. Gorton¹⁾, T. K. Chinmayanandam²⁾ らが、また近年になっては J. T. Gier, R. V. Dunkle³⁾, J. T. Bevans⁴⁾, N. W. Snyder⁵⁾ あるいは R. C. Birkebak⁶⁾ らが行なっている。それによると、一般に金属の反射率は表面のあらさが増すと減少し、同一あらさの平面の単色反射率は入射光の波長が短い領域で小さく、波長が長くなると増大する。

金属平面のふく射率については、Aschkinass, E. Schmidt および Eckert ら⁷⁾ による電磁理論にもとづいた単色ふく射率および全ふく射率の理論式がある。しかし、金属表面の単色ふく射の直接測定による実験研究は少なく、わずかに R. E. Rolling⁸⁾ による特定波長に対する単色ふく射率の実測があるが、多くは便宜上、単色反射率から算出した値をもって単色ふく射率

* 第7回日本伝熱シンポジウム (1970. 5. 23) で発表

としている。また、R. V. Dunkle³⁾は、陽極酸化アルミニウムおよび白ペイントの単色反射率からふく射エネルギーの波長分布を求めている。

著者らは、金属の平面と粗面の単色ふく射率を直接測定して、Planck のふく射関数にたいする各試料のふく射エネルギー分布を求めて全ふく射率を算出し、さらに従来の方法⁹⁾により測定された全ふく射率と比較することにより、多くの書物に述べられている単色ふく射率と全ふく射率の関係を示す理論式が成立することを確認した。

2. 解析方法

まず、分光計により試料の単色ふく射率 ε_λ が求まれば、(1) 式から各波長に対するふく射のエネルギー分布を計算する。

$$E_\lambda = \varepsilon_\lambda \cdot \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{c_2/\lambda T} - 1} \quad (1)$$

つぎに、波長 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 間のふく射エネルギーの総和

$$E(\lambda) = \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\varepsilon_\lambda \cdot c_1 \lambda^{-5}}{e^{c_2/\lambda T} - 1} \cdot \Delta \lambda \quad (2)$$

を求め、同一波長範囲にたいする黒体エネルギーで割って、(3) 式より全ふく射率を算出する。

$$\varepsilon(\lambda) = \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\varepsilon_\lambda \cdot c_1 \lambda^{-5}}{e^{c_2/\lambda T} - 1} \cdot \Delta \lambda \bigg/ \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{c_2/\lambda T} - 1} \cdot \Delta \lambda \quad (3)$$

一方、同一波長範囲の全ふく射率 ε を別に測定し、 $\varepsilon(\lambda)$ と比較する。

3. 測定装置および方法

自記分光放射計 (日本分光) SR-3 型は、波長範囲 $0.35 \sim 0.80 \mu$, $0.75 \sim 1.2 \mu$, および $1 \sim 25 \mu$ の 3 レンジで、この実験では $1 \sim 25 \mu$ を使用している。

測定原理は Double Beam 方式の比較光学系を採用し、Monochrometer 基準用の Reference (黒体炉 1) と Sample からのふく射を二光路に同時に入射させ、両者の比較値として単色ふく射率の概略値が自記される。別に試料校正用の Reference (黒体炉 2) を、試料ふく射に代えて入射させて基準値とし、試料ふく射の指示値との比をとって補正值とする。この際、Double Beam 法により、室内の炭酸ガスおよび水蒸気による吸収は相殺されて影響はない。

分光ふく射測定装置の概略を第 1 図および第 2 図に、また記録スペクトルからの単色ふく射率の求め方を第 3 図に示す。第 3 図において、読みとりのピッチ $\Delta \lambda = 0.2 \mu$ として、各波長に対する ε_λ を測定算出し、ふく射率計算の基準になる黒体エネルギーの波長範囲は $\lambda_1 = 0 \sim \lambda_2 = 50 \mu$ にとって、次に述べる KRS-5 のそれと一致させた。

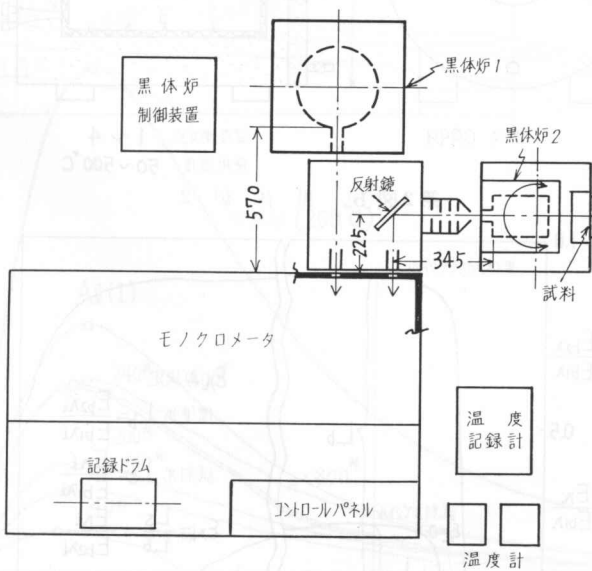
全ふく射率の測定には、KRS-5 ($0.7 \sim 50 \mu$) 付き真空熱電対型ふく射計を用いている。

実験条件は試料温度を $200 \pm 2^\circ \text{C}$, 二個の黒体炉はともに $200 \pm 1^\circ \text{C}$, Monochrometer 温度

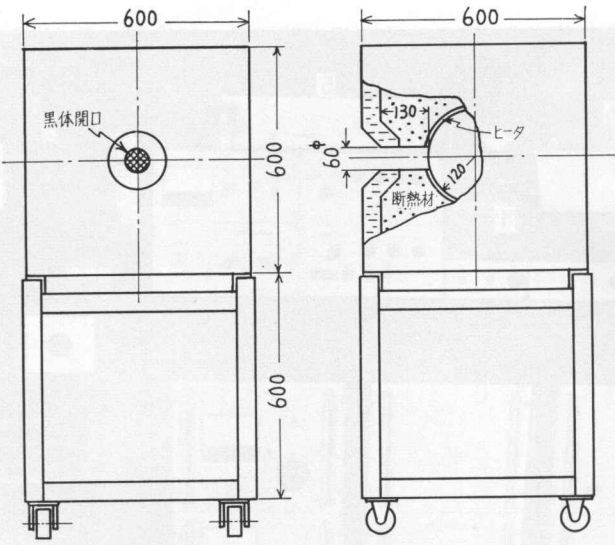


- 1 分光計本体 2 試料加熱器 3 温度記録計 4 温度指示計
5 黒体炉1 6 黒体炉温度制御装置 7 氷点箱

第1図 実験装置全景

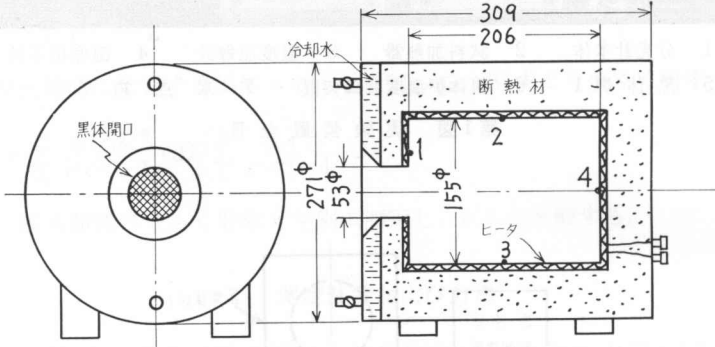


第2図 実験装置概略図



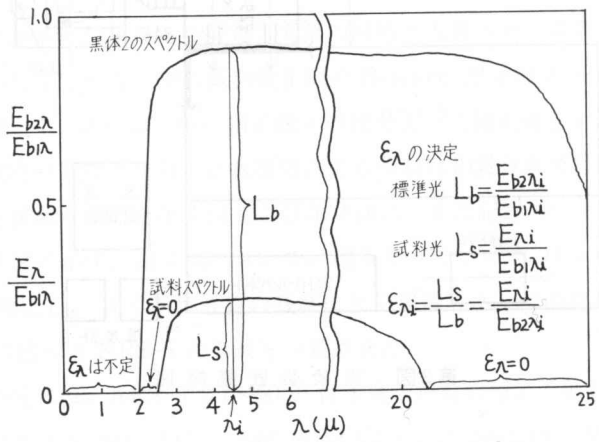
黒度 0.998 使用温度 50~1000℃

第2図(a) 黒体炉 1



黒度 0.999 温度測定点 1~4
使用温度 50~500℃

第2図(b) 黒体炉 2



第3図 試料スペクトルからの単色ふく射率の決定

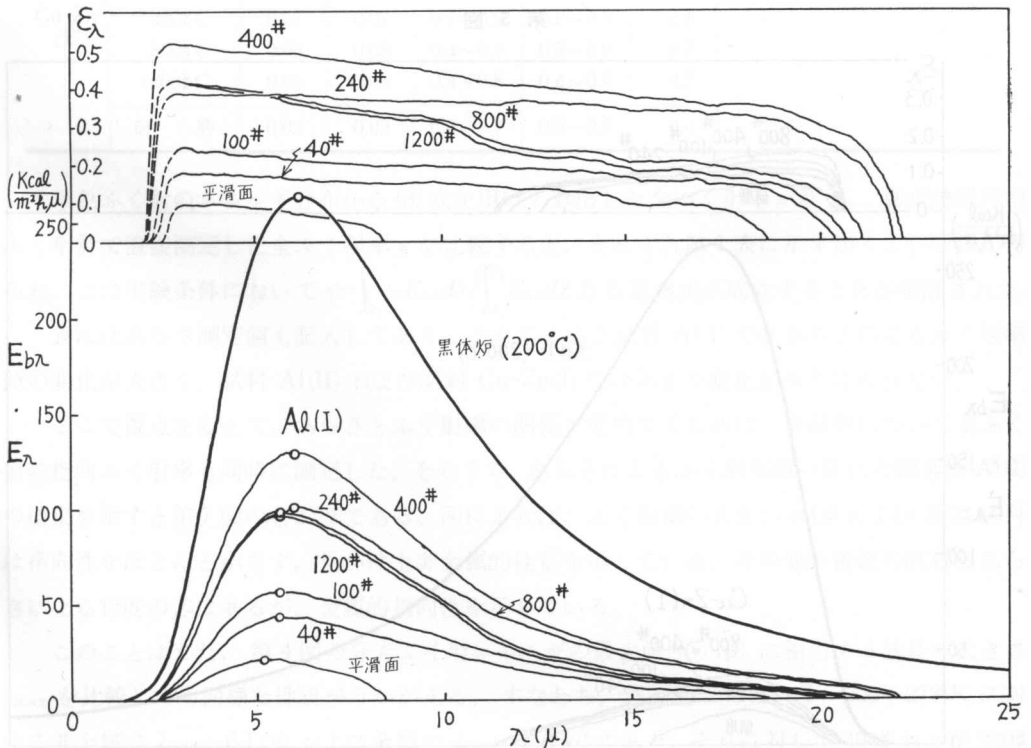
28~29°C, 室温 20~21°C, 湿度は 35% 以下に保ってある。

試料はアルミニウム板 (JIS 第1種) および黄銅板 (JIS 第3種) の二種類で, 試料板の大きさは 115 mm×115 mm×5 mm である。アルミ試料は市販のままの表面のほか, 表面の加工層 (ロールスキン) を取り除くために NaOH 溶液で処理 (4N, 90 分) したものを素材とした。平滑面はロール面をそのまま用い, 研磨面はピカール研磨液で研いた面, 粗面は各粒度の研磨紙または研磨布で一方向にスクラッチした面である。各試料面は測定前にアセトンでよく洗い, 表面の有機物を除き, 測定後にスクラッチに直角方向のあらさ H_a , H_{rms} および H_{max} を測定した。

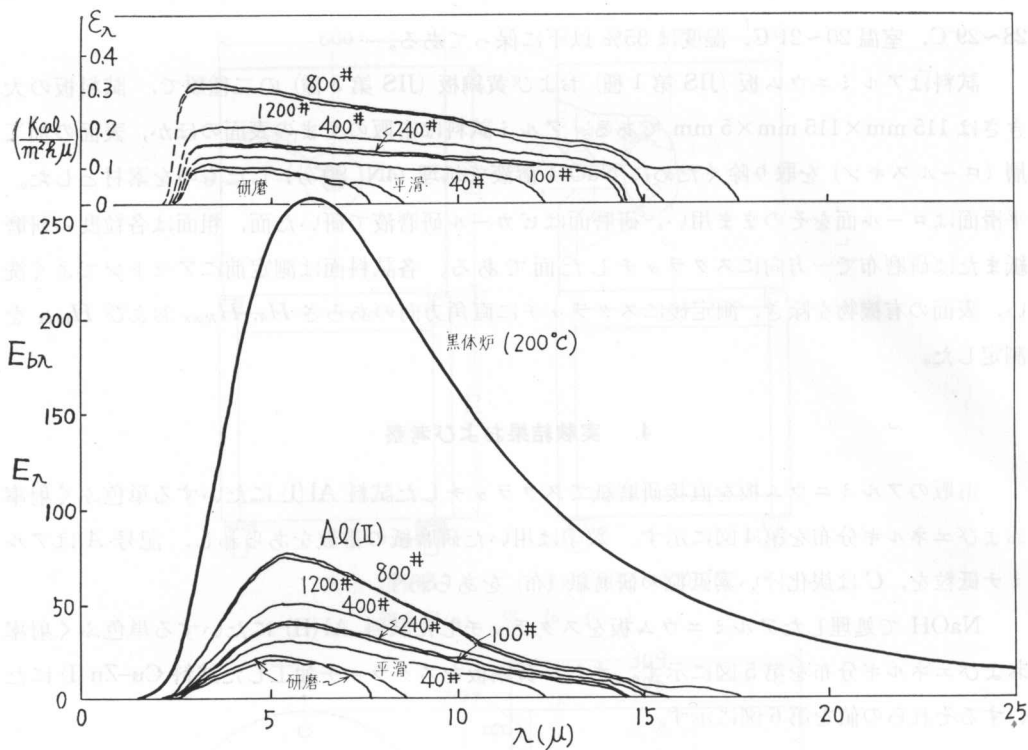
4. 実験結果および考察

市販のアルミニウム板を直接研磨紙でスクラッチした試料 Al (I) にたいする単色ふく射率およびエネルギー分布を第4図に示す。数字は用いた研磨紙の番数をあらわし, 記号 A はアルミナ砥粒を, C は炭化けい素砥粒の研磨紙 (布) をあらわす。

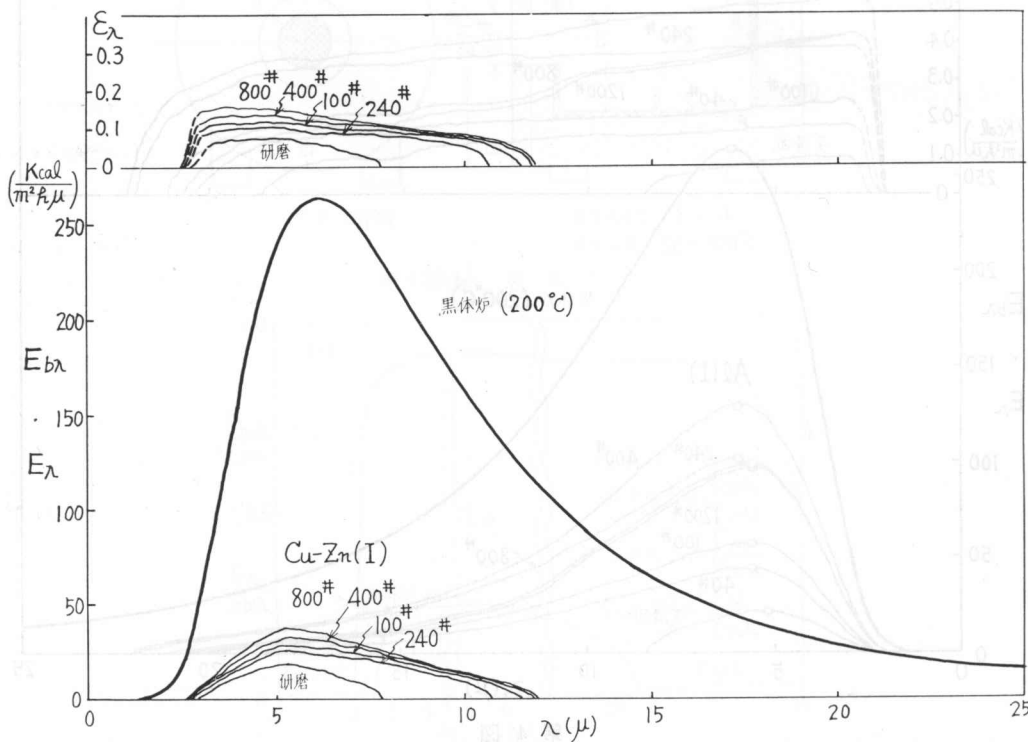
NaOH で処理したアルミニウム板をスクラッチした試料 Al (II) にたいする単色ふく射率およびエネルギー分布を第5図に示す。また, 黄銅板をスクラッチ加工した試料 Cu-Zn (I) にたいするそれらの値を第6図に示す。



第4図



第 5 図



第 6 図

第1表 $\varepsilon(\lambda)$ と ε の比較およびあらさ測定値

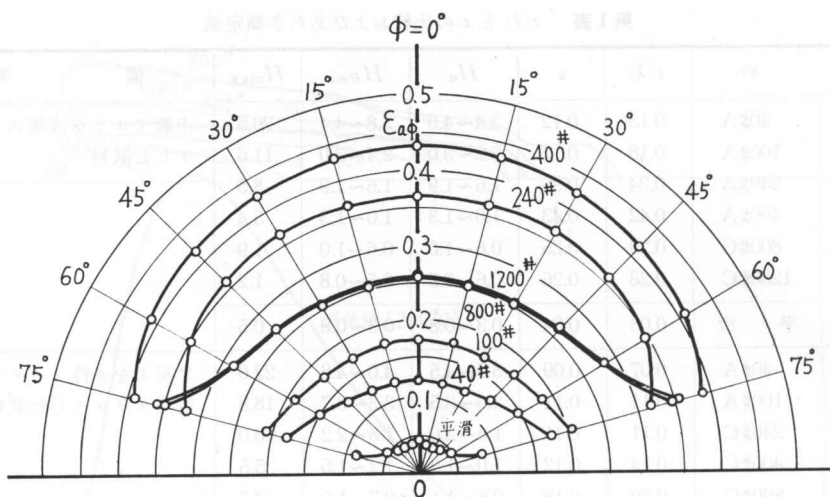
| 試料 | | $\varepsilon(\lambda)$ | ε | H_a | H_{Rms} | H_{max} | 備考 |
|-----------|----------|------------------------|---------------|--------------------|--------------------|------------|------------------------|
| Al (I) | 40#A | 0.13 | 0.12 | 3.4~4.0 | 3.8~4.4 | 20.5 | 市販アルミを直接スクラッチした試料 |
| | 100#A | 0.18 | 0.17 | 2.2~3.0 | 2.4~3.0 | 11.6 | |
| | 240#A | 0.34 | 0.36 | 1.6~1.9 | 1.6~1.9 | 8.5 | |
| | 400#A | 0.42 | 0.43 | 1.0~1.3 | 1.0~1.3 | 5.4 | |
| | 800#C | 0.29 | 0.25 | 0.6~1.0 | 0.6~1.0 | 1.9 | |
| | 1200#C | 0.28 | 0.26 | 0.6~0.8 | 0.6~0.8 | 1.2 | |
| | 平滑 | 0.03 | 0.04 | 0.3~0.8 | 0.3~0.8 | 0.5 | |
| * Al (II) | 40#A | 0.07 | 0.09 | 3.5~4.5 | 4.0~4.8 | 22.0 | アルミをカ性ソーダで処理後スクラッチした試料 |
| | 100#A | 0.11 | 0.11 | 3.0~3.5 | 3.3~3.7 | 18.8 | |
| | 240#C | 0.11 | 0.11 | 1.6~2.0 | 1.8~2.2 | 10.0 | |
| | 400#C | 0.14 | 0.12 | 1.0~1.3 | 1.2~1.5 | 5.5 | |
| | 800#C | 0.20 | 0.18 | 0.6~1.1 | 0.7~1.2 | 3.7 | |
| | 1200#C | 0.20 | 0.16 | 0.5~0.8 | 0.6~1.0 | 2.0 | |
| | 研磨 平滑 | 0.03 0.03 | 0.03 0.04 | 0.5~0.8 0.6~0.9 | 0.6~1.1 0.8~1.0 | 1.8 1.1 | |
| Cu-Zn (I) | 40#A | 0.06 | 0.06 | 2.0~2.3 | 2.2~2.4 | 11.4 | 市販黄銅を直接スクラッチした試料 |
| | 100#A | 0.06 | 0.07 | 1.1~1.4 | 1.2~1.4 | 6.0 | |
| | 240#C | 0.06 | 0.05 | 0.8~1.1 | 0.8~1.3 | 4.6 | |
| | 400#C | 0.07 | 0.07 | 0.7~0.9 | 0.7~0.9 | 2.1 | |
| | 800#C | 0.08 | 0.08 | 0.4~0.8 | 0.5~0.9 | 0.7 | |
| | 1200#C | 0.06 | 0.06 | 0.4~0.8 | 0.4~0.7 | 0.7 | |
| | 研磨 | 0.02 | 0.02 | 0.4~0.7 | 0.5~0.7 | 0.4 | |

単色ふく射のエネルギー分布から (3) 式を用いて算出した全ふく射率 $\varepsilon(\lambda)$ と、真空熱電対型ふく射計で直接測定した全ふく射率 ε を比較すると、それぞれ第1表に示す如くよい一致が得られ、この実験条件において $\varepsilon = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon_{\lambda} E_{b\lambda} d\lambda / \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{b\lambda} d\lambda$ なる定義式が成立することが実証された。

表にはあらさ測定値も記入してあり、それによると試料 Al (I) ではあらさによるふく射率値の変化が大きく、試料 Al (II) および試料 Cu-Zn (I) ではあまり変化がみうけられない。

ここで視点を変えて、あらさとふく射率の関係を究明するために、各試料について全ふく射の指向ふく射率も同時に測定した。そのうち、あらさによるふく射率値の変化の顕著な Al (I) の結果を示すと第7図のとおりである。図によれば、ふく射率の大きい 400# および 250# 試料は指向性をほとんど示さず、見かけ上非金属的性質を示している。その他の番数の試料はあらさによる程度の差はあるが、金属的指向性を示している。

このことはまた、第4図の分光ふく射エネルギーの最大値 (●印) に相当する波長の大きさ λ_{max} を比較しても同様な性質がうかがえる。すなわち、理論的¹⁰⁾には、 $T=200+273^\circ\text{K}$ に対する非金属の $\lambda_{max}=6.1(\mu)$ および金属の $\lambda_{max}=5.6(\mu)$ であり、それに対して 400# および 240# 試料の分光結果は非金属の λ_{max} に近い値を、その他の番数の試料は金属の λ_{max} に近い値を示



第7図 アルミ試料 Al(I) の指向ふく射率測定値

している。

しかし、表面のロールスキンを取り除いた試料 Al(II) および黄銅試料 Cu-Zn(I) では、あらさによるふく射率の変化はそれほど明瞭でないことから、Al(I) にみられるこのような現象はおそらく、400# および 240# 研磨紙の粒度の大きさとアルミナ砥粒の性質により、ロールスキンが細かく剥離されて* 見かけ上非金属的性質となりふく射率の増大をもたらしたものと推察される。

また、単色ふく射率の波長に対する変化は、あらさが小さい試料では波長が短いところで単色ふく射率は大きく、波長が長くなると減少するが、あらさの大きい試料では波長による単色ふく射率の変化は緩慢になる。

いずれにしても、あらさ等の表面性状とふく射率の関係は非常に複雑な現象であるので、電子顕微鏡による表面組織の観察などを行なって、今後さらに追究しなければならない問題である。

5. む す び

アルミニウムおよび黄銅の平面と粒度の異なった研磨紙で一方向にスクラッチした粗面のふく射を直接分光計にかけて、単色ふく射率を測定した。単色ふく射率から積分により求めた全ふく射率と、真空熱電対型ふく射計で測定した全ふく射率との間によい一致が得られた。

また、試料の表面あらさの変化にたいする単色ふく射率と波長の関係、最大ふく射エネルギーを与える波長の理論値と測定値の関係、指向ふく射率にあらわれたふく射の金属性および非金属性など、矛盾のない一連の実験結果が得られた。

* 表面は外見上黒ずんでみえるが、これは剥離粒子が表面に層状に附着して、層内拡散反射¹¹⁾を起すためとおもわれる。

この研究を行なうにあたり、北大工学部機械工学科教授 斎藤武先生に有益な御示唆をいただいたことを感謝致します。

文 献

- 1) A. F. Gorton: Reflection from, and Transmission Through Rough Surfaces, Phys. Rev. Vol. 7, No. 1, Ser. p. 66.
- 2) T. K. Chinmayanandam: On the Specular Reflection from Rough Surfaces, Phys. Rev. Vol. 13, No. 2, Ser. p. 96.
- 3) R. V. Dunkle: Thermal-Radiation Table and Applications, Trans. ASME. May, 1954, p. 549.
- 4) J. T. Bevans, J. T. Gier and R. V. Dunkle: Comparison of Total Emittances with Values Computed From Spectral Measurements, Trans. ASME. Oct. 1953, p. 1405.
- 5) N. W. Snyder: Radiation in metal, Trans. ASME. May, 1954, p. 541.
- 6) R. C. Birkebak and E. R. G. Eckert: Effect of Roughness of Metal Surface on Angular Distribution of Monochromatic Reflected Radiation, Trans. ASME. Feb. 1965, p. 85.
R. C. Birkebak, E. M. Sparrow, E. R. G. Eckert and J. W. Ramsey: Effect of Surface Roughness on the Total Hemispherical and Specular Reflectance of Metallic Surfaces, Trans. ASME. May. 1964, p. 193.
- 7) M. Jakob: Heat Transfer, Vol. 1, Wiley (1964), p. 44-52.
- 8) R. E. Rolling: Effect of Surface Roughness on the Spectral and Total Emittance of Platinum, WPAFB. Contract No. AF 33 (657)-11281, p. 1.
- 9) 金山公夫: V字溝粗面の指向ふく射率, 第6回日本伝熱シンポジウム講演論文集, 1969, p. 229.
- 10) 7)に同じ, p. 45.
- 11) 蓮沼 宏: 光沢, コロナ社 (1965), p. 48.