

暖房放熱面のふく射率に関する基礎研究*

金山 公夫

(昭和42年10月31日受理)

Studies on the Emissivity of Radiation Surface of Radiant Heating Systems

by Kimio KANAYAMA

The power of radiant heating systems is affected by the emissivity of the radiation surface. The author, at the temperature 100 to 250°C, carried out measurements of the emissivity of the radiation surface materials and comparisons between the measured values and the theoretical ones derived by E. M. Sparrow and others. The obtained results are as follows;

Bricks and heat-resisting paints, the values of whose emissivity are large, are more profitable than metals for radiation surface. It is an effective method of raising the emissivity to increase surface roughness.

1. ま え が き

高温水を用いたふく射暖房は、工場、体育館および格納倉など、天井の高い、また換気量の多い寒冷地の建物に適しており、最近、わが国においても次第にこの方式に対する関心が高まり、道内でも2, 3の実施例¹⁾をみるにいたった。また一方、ふく射暖房のプラントテスト²⁾および現場テスト³⁾による放熱器の性能値測定が行なわれ、パネル表面のふく射率とその性能に大きな影響をもつとされている。そこで、この研究においては、パネル表面用材料、その他放熱用材料の比較的低温域(100~250°C)における垂直全ふく射率を測定し、ふく射熱量の計算等、放熱器設計の資料に供するとともに、材料表面の性状および温度などが、ふく射率におよぼす効果について実験的にたしかめ、ふく射理論を用いて定性的な比較、検討を行なった。

2. 固体ふく射の一般的性質⁴⁾

固体表面からのふく射特性は、大きく分けて、自由電子を含む金属と、それを含まない非金属とで根本的に相違している。一般に、金属からのふく射は物体内部の電子自体の運動に起因し、そのスペクトル分布は波長の短い方に多く、非金属のふく射は分子または原子の振動あるいは結晶格子の振動に起因し、波長の長い赤外領域が大部分を占めている。したがって、

* 日本機械学会70周年記念北海道地区講演会(昭42. 8. 28)にて一部発表。

金属のふく射率は 1μ 以下で急激に大きくなるのが特徴的である⁵⁾。

ふく射率には、ふく射エネルギーが分布する全波長にわたる全ふく射率と、各波長ごとの単色ふく射率とがある。また、単にふく射率と称して、物体表面に垂直方向の成分を指す場合と、半球状に積分した値を指す場合があり⁶⁾、正しくは後者を指すべきであるが、混同して使用されることもある。しかし、非金属などでは、垂直ふく射率と半球状ふく射率は似かよった値で、多くの場合比例関係にあり、そのうえ垂直ふく射率は測定が簡単なために、物性値表⁷⁾などには、この値をふく射率としてあげている。

一般に、金属類のふく射率は小さな値で、特に清浄で平滑な良導体表面では極端に小さく(0.1以下)、しかも指向性を有する正則反射面である。それにたいして、非金属類では平滑面でもふく射率は大きく、指向性がほとんどない、いわゆる乱射面を形成している。

また、金属の酸化物は、暗色酸化物の粉末あるいはあれた酸化面では大きなふく射率を有するものもあるが、ここで問題とする温度では平均して中位の値のものが多い。

本来、ふく射特性は、物質固有の性質であるはずだが、実際には面の状態、たとえば表面に凹凸があったり、異質物などが付着していたりすると、固有のふく射率より大きくなるのが普通である。その傾向は、固有のふく射率の小さい金属において顕著にあらわれてくる。非金属材料では、それ自身大きなふく射率を有しているから、その効果はあまり期待できないが、表面を人為的に粗面にすることによって、やはりふく射率は増大する。

このように、表面の性状を加味したふく射率を見かけのふく射率と称し、固有のふく射率と区別されなければならない性質のものである。しかし、この実験で測定した値は、厳密には見かけのふく射率と呼ばなければならないものがあるが、その区別は行なっていない。

3. ふく射率に影響をおよぼす要因

上述のふく射の一般的特性によれば、ふく射率に影響をおよぼす要因として、(1) 表面の温度および方向性、(2) 表面のあらさ、(3) 表面の色、(4) 表面の化学変化および異質物の付着などがあげられる。以下に、各項目ごとに理論および既応の実験結果を引用し、考察をおこなう。

3.1 表面の温度および方向性

非金属および金属におけるふく射率の表面温度依存性および方向性は、電磁理論⁸⁾から導かれるように、固体ふく射の本質的特性である。

非金属の平滑面における垂直ふく射率 ϵ_0 は

$$\epsilon_0 = 1 - \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 \quad (1)$$

ここで、 n は屈折率で、 ϕ は入射あるいは射出の角、 χ は屈折角、添字 0 は $\phi=0$ をあらわすものとする

$$n = \frac{\sin \phi}{\sin \lambda} \quad (2)$$

で示される。

熱ふく射域での n の値は、透明な限られた物質についてしか実測されていないが⁹⁾、多くの非金属の屈折率は $1 < n < 3$ と考えてよく、また、温度が上昇してふく射の波長 λ が減少すると n は増大し、(1)式からふく射率は減少することになる。

一般の射出角度 ϕ にたいするふく射率 ε_ϕ は Fresnel の式

$$\varepsilon_\phi = \frac{1}{2} \left[\frac{\sin 2\phi \cos 2\lambda}{\sin^2(\phi + \lambda) \cos^2(\phi - \lambda)} + \frac{\sin 2\phi \sin 2\lambda}{\sin^2(\phi + \lambda)} \right] \quad (3)$$

で与えられる。(3)式の第一項はふく射の入射面に平行に振動する成分を表わし、第二項は垂直に振動する成分をあらわす。いま、それぞれの ϕ について ε_ϕ を計算すると、 $1 < n < 3$ の範囲では $\phi = 70^\circ$ まではほとんど一定の値を示し、それ以上の角では ε_ϕ は減少し、 $\phi = 90^\circ$ で 0 になる。ゆえに、非金属においては Lambert の余弦則は近似的に成立し、これを灰色体として扱って実用上さしつかえない。

つぎに、金属の平滑面において、ふく射の波長があまり短くない (4μ 以上、 400°C 以下) と仮定すれば、波長 λ (μ) に対する垂直単色ふく射率 ε_{20} は

$$\varepsilon_{20} = 0.365 \sqrt{\frac{r_e}{\lambda}} \times 10^2 \quad (4)$$

となる。ここで、 r_e は比抵抗 ($\Omega\text{-cm}$) で、一般に温度とともに増加して

$$r_e = r_0 \frac{T}{273} \quad (5)$$

で表わされる。ここで、 r_0 は 0°C における比抵抗、 T は絶対温度 ($^\circ\text{K}$) である。

(4)式および(5)式から、金属の垂直単色ふく射率は絶対温度の平方根に比例して増加することになる。

また、 ϕ 方向の単色ふく射率 $\varepsilon_{2\phi}$ は近似的に

$$\varepsilon_{2\phi} = \frac{1}{n} \left(\cos \phi + \frac{1}{\cos \phi} \right) \quad (6)$$

となる。(6)式からそれぞれの ϕ にたいする $\varepsilon_{2\phi}$ を計算すると、強い指向性を有することがわかる。すなわち、 $\phi = 0^\circ$ で $\varepsilon_{2\phi}$ は最小値をとり ϕ とともに増大し、 $\phi = 75^\circ$ で $\phi = 0^\circ$ のときの 2 倍に達する。しかし、入射面に平行および直角に振動する各成分のふく射強度は、黒体ふく射の $1/2$ より大きくならないから、 $\varepsilon_{2\phi}$ は $\phi = 90^\circ$ になっても無限大にはならない。したがって、金属の垂直ふく射率は本質的に小さな値であることが予想される。

3.2 表面のあらさ

表面のあらさがふく射率または反射率の大きさに影響をおよぼすことは、多くの研究者^{10)~17)}によって実験的に確認されている。ところが、あらさ測定法には大別して機械的方法

と光学的方法があり、その表示法には、最高値あらさ、二乗平均あらさおよび中心線平均あらさなどがあるが、それぞれの方法による測定値間には相関関係はなく、また、どの測定法の、どの表示法によるあらさが、ふく射率との関連性を理論的に解析できるものか判然としていない。

そのなかで R. C. Birkebak¹⁸⁾ は、すりガラスにアルミニウムの薄膜をコーティングした面に、入射角 ϕ で入射するふく射について光学的二乗平均あらさ σ_0 と波長 λ が反射率におよぼす影響を実測し、 $\sigma_0 < \lambda$ の範囲では、小さい入射角の場合に Chinmayanandam¹⁰⁾ の関係式がよい一致を示すことを報告している。また、あらさがふく射の波長に比べて、はるかに大きい領域においては、表面の凹凸を単純化して、V 字形溝²⁴⁾、半円形溝¹⁹⁾ あるいは球形空洞²⁶⁾ とみなして、その表面における平均ふく射率を求めた Sparrow らの理論解があるが、この論文ではそれを発展させて、開口面における見かけのふく射率を算出し、実験結果との対比を行なっている。

このように、あらさとふく射の波長の大きさが互に隔たった領域では、物体表面は近似的に乱射面または正則反射面として取扱えるために、理論解析はそれほど困難ではないが、両者が接近した領域では、あらさとふく射の波との相互作用による干渉あるいは回折を引き起し、現象をより一層複雑にするために、その関係を一環した理論によって数式化できないものともわれる。

3.3 表面の色

表面の色とふく射率の関係は、黒色ではふく射率が大きく、白色では小さいものと感覚的に意識している。しかし、ここで扱っているような比較的低温域における熱ふく射では、ふく射エネルギーは大部分波長の大きい赤外領域に分布していて、可視領域 ($0.38 \sim 0.76 \mu$) に存在する割合は、全ふく射エネルギーの 10^{-7} 以下のオーダー²⁰⁾ である。

ゆえに、色をうんぬんすることは可視領域におけるふく射率の大小の問題であるから、このような極微量エネルギーの増減は大勢に影響はなく、物体の色はふく射率にあまり関係しないと言えよう。白ペンキ、白い紙または布、白雪などのふく射率は低温で 0.9 前後の大きい値を有しているのはそのよい例であり、また、Heilman²¹⁾ の実験によれば、逆に白い物体が黒い物体より大きいふく射率を示すことすらある。

3.4 表面の化学変化および異質物の付着

C. S. Taylor ら²²⁾ の実験によれば、アルミニウム表面が酸化された場合の吸収率 α は、酸化膜の厚さが約 2μ になるまでは厚さに比例して急増し、厚さ 2μ において吸収率は 0.63、 4μ で 0.73、 8μ で 0.79 と徐々に増大する。

一方、アルミニウムは空気中で容易に酸化されて、極めて薄いちみつな酸化膜が形成され、内部を保護してそれ以上の成長をはばむ作用をする²³⁾ ので、この実験温度では、ふく射率への影響はほとんど認められない。

それに対して、空気中で容易に酸化される鋼、铸铁または僅かの加熱によって酸化される

銅などにおいては、時間の経過、温度の上昇および加熱のくり返しなどによって酸化が進行し、ふく射率は増大する。

金属面が酸、アルカリ、その他化学薬品によって腐蝕された場合、あるいは、ごみ、油、その他有機物等が物理的に付着した場合にも見かけのふく射率は増大する。

ゆえに、金属のふく射率測定の際には、表面を十分清浄に保ち、かつ、酸化等の化学変化の防止に留意しなければならない。

4. くぼみの見かけのふく射率

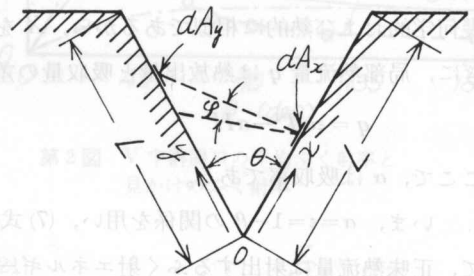
表面に凹凸がある場合は、それぞれのくぼみは自己形態係数を有し、向い側からのふく射を反射するために、ふく射率は増大することになる。以下に、E. M. Sparrow らの理論を発展させて見かけのふく射率を求める。ただし、表面の凹凸はふく射の波長に比べてはるかに大きく、かつ、表面は灰色体と仮定する。

4.1 V字溝開口の見かけのふく射率²⁴⁾

第1図に示すように、紙面に直角方向に延びた単位長さの一本のV字溝において、 x 軸上の任意の点 x に微小面積 dA_x をとる。 dA_x から単位時間、単位面積当り放出するふく射エネルギー $B(x)$ は、その点から射出する成分と向い側の一点から入射してきて反射する成分の和であり

$$B(x) = \epsilon\sigma T^4 + \rho H(x) \quad (7)$$

となる。ここで、 ϵ は固有のふく射率、 ρ は反射率、 $H(x)$ は向い側からの入射エネルギーである。



第1図 V字溝の座標系

いま、向い側の点 y に微小面積 dA_y を考えると、そこを去るエネルギーのうち

$$B(y) dA_y dF_{y-x} \quad (8)$$

だけが x 点に到達する。ここで dF_{y-x} は y から dA_x をみる形態係数であるが、形態係数における相互関係 $dA_y dF_{y-x} = dA_x dF_{x-y}$ を用いて(8)式は $B(y) dA_x dF_{x-y}$ となり、 dA_y を去って x 点に達する単位面積当りの入射エネルギーは

$$B(y) dF_{x-y} \quad (9)$$

しかし、 x 点は向い側の全面から入射エネルギーをうけるから(9)式を $y=0 \sim L$ まで積分して

$$H(x) = \int_{y=0}^L B(y) dF_{x-y} \quad (10)$$

この場合の形態係数²⁵⁾は

$$dF_{x-y} = \frac{1}{2} d(\sin \varphi) \quad (11)$$

であり、また、第1図から容易に

$$\sin \varphi = \frac{y \cos \theta - x}{\sqrt{(y \cos \theta - x)^2 + (y \sin \theta)^2}} \quad (12)$$

を得る。(10)式、(11)式および(12)式から、入射エネルギー $H(x)$ は

$$H(x) = \frac{1}{2} \int_0^L B(y) \frac{xy(1 - \cos^2 \theta)}{(x^2 + y^2 - 2xy \cos \theta)^{3/2}} dy \quad (13)$$

(13)式を(7)式に代入して、エネルギー基礎方程式

$$B(x) = \varepsilon \sigma T^4 + \frac{\rho(1 - \cos^2 \theta)}{2} \int_0^L B(y) \frac{xy}{(x^2 + y^2 - 2xy \cos \theta)^{3/2}} dy \quad (14)$$

が得られる。ここで、無次元量 $X = x/L$, $Y = y/L$, $\beta(X) = B(x)/\varepsilon \sigma T^4$, $\beta(Y) = B(y)/\varepsilon \sigma T^4$ を用いると

$$\beta(X) = 1 + \frac{\rho(1 - \cos^2 \theta)}{2} \int_0^1 \beta(Y) \frac{XY}{(X^2 + Y^2 - 2XY \cos \theta)^{3/2}} dY \quad (15)$$

となり、(15)式は温度 T を含まないから、温度に無関係に適用できる。向い側の面についても幾何学的および熱的に相似であるから、 X を Y におきかえて全く同じ式であらわされる。つぎに、局部熱流量 q は熱放出量と吸収量の差であるから

$$q = \varepsilon \sigma T^4 - \alpha H \quad (16)$$

ここで、 α は吸収率である。

いま、 $\alpha = \varepsilon - 1 - \rho$ の関係を用い、(7)式を考慮すると $q = B - H$ となり、当然の結果として、正味熱流量は射出するふく射エネルギーと入射するふく射エネルギーの差に等しくなる。ここで、局所熱流量を表面が平面のときのふく射エネルギーとの比であらわすと

$$\frac{q}{\varepsilon \sigma T^4} = \frac{1 - \beta \varepsilon}{\rho} = \frac{1 - \beta \varepsilon}{1 - \varepsilon} \quad (17)$$

全熱流量 Q は、局所熱流量を x について積分し $Q = \int_0^L q dx$ で求まるから、(17)式を用いて

$$\frac{Q/L}{\varepsilon \sigma T^4} = \frac{1 - \varepsilon \int_0^1 \beta dX}{\rho} \quad (18)$$

を得る。

ゆえに、V字溝表面からの平均ふく射率 $\bar{\varepsilon}$ は

$$\bar{\varepsilon} = \left(\frac{Q/L}{\sigma T^4} \right) \quad (19)$$

したがって、V字溝開口の見かけのふく射率 ε_a は(19)式から

$$\epsilon_a = \frac{\bar{\epsilon}}{\sin \frac{\theta}{2}} \quad (20)$$

となり、見かけのふく射率は増大することになる。

(19)式から差分法により平均ふく射率 $\bar{\epsilon}$ を数値計算し、(20)式から見かけのふく射率 ϵ_a を求めて、開き角 θ との関係を図示すると第2図のごとくなる。

いま、見かけのふく射率の増加割合を固有のふく射率との比 $\epsilon_a/\bar{\epsilon}$ で表わすと、 $\epsilon_a/\bar{\epsilon}$ は V 字溝の開き角が小さいほど大となり、その増加傾向は $\bar{\epsilon}$ が小さいものほど著しい。 $\bar{\epsilon}=0.1$ のとき $\theta=90^\circ$ で見かけのふく射率は固有のふく射率の約 1.4 倍、 $\theta=45^\circ$ で約 2.2 倍となる。

4.2 球形空洞開口の見かけのふく射率²⁶⁾

第3図のような、天頂角 ϕ^* の円形開口を有する半径 R の球形空洞を考える。

空洞内面の微小面積 dA_1 におけるエネルギー平衡式は、前項の場合と同様に

$$B(dA_1) = \epsilon \sigma T^4 + (1 - \alpha) H(dA_1) \quad (21)$$

ここで、

$$H(dA_1) = \int_{A_2} B(dA_2) dF_{12} \quad (22)$$

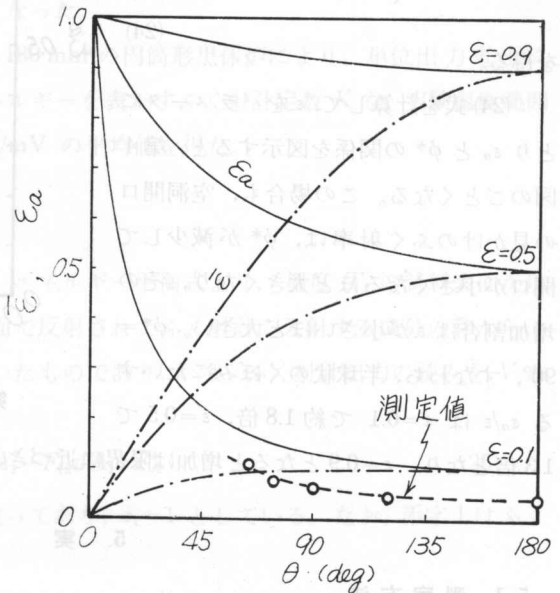
dA_2 は向い側の微小面積、 dF_{12} は 1 から 2 をみる形態係数である。

この場合の形態係数 dF_{12} は $dF_{12} = dA_2 / 4\pi R^2$ 、空洞面積 A^* は、 $A^* = 2\pi R^2(1 + \cos \phi^*)$ の関係から (22) 式は

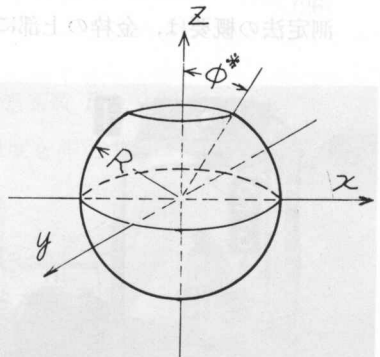
$$H(dA_1) = \int_{A^*} B(dA_2) \frac{dA_2}{4\pi R^2} = \frac{1}{2} (1 + \cos \phi^*) B(dA_2) \quad (23)$$

となる。

(23) 式を (21) 式に代入して、無次元数であらわすと



第2図 V字溝開口の平均ふく射率と見かけのふく射率



第3図 球形空洞の座標系

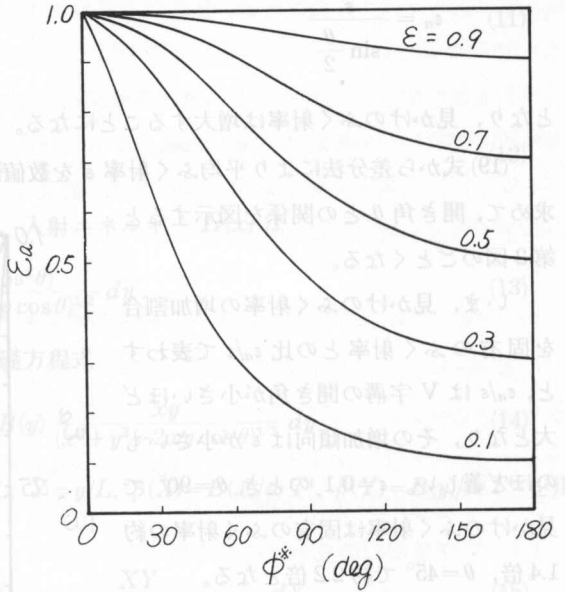
$$(19) \quad \varepsilon_a = \varepsilon + \frac{1}{2} (1-\alpha)(1 + \cos \phi^*) \varepsilon_a.$$

ゆえに、これを整理して

$$\varepsilon_a = \frac{\varepsilon}{\left\{ 1 - \frac{1}{2} (1-\alpha)(1 + \cos \phi^*) \right\}} \quad (24)$$

を得る。

(24)式を計算して、 ε をパラメータにとり ε_a と ϕ^* の関係を図示すると、第4図のごとくなる。この場合も、空洞開口の見かけのふく射率は、 ϕ^* が減少して開口が小さくなるほど大きくなり、その増加割合は ε が小さいほど大きい。 $\phi^* = 90^\circ$ 、すなわち、半球状のくぼみにたいする $\varepsilon_a/\varepsilon$ は $\varepsilon = 0.1$ で約1.8倍、 $\varepsilon = 0.5$ で1.3倍となり、 $\varepsilon = 0.9$ となると増加は限界に近づき、1.05倍にとどまる。



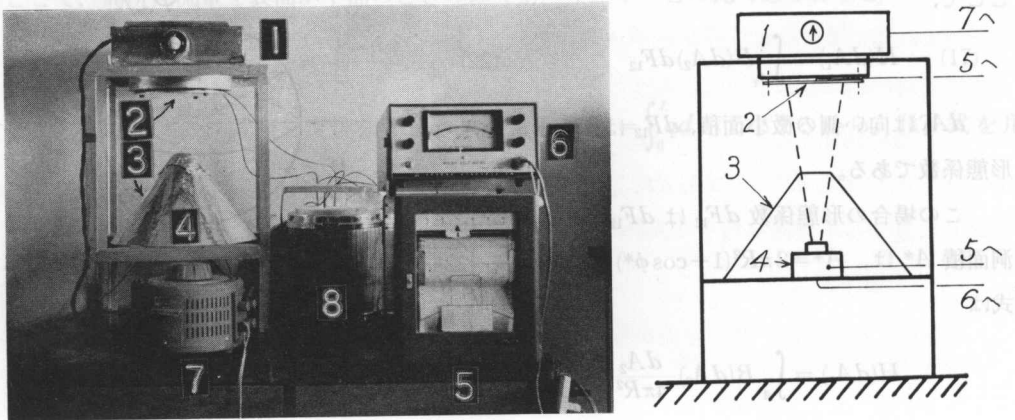
第4図 球形空洞開口の見かけのふく射率

5. 実験

5.1 測定方法

ふの射率の測定装置は Dunkle and Gier²⁷⁾の方式を採用した。装置全体の写真および略図を第5図に示す。

測定法の概要は、金枠の上部に電気ヒーターからなる加熱器を下向きに載せ、これに試料板



第5図 実験装置全景と略図

1. 電気ヒーター, 2. 試料, 3. 円錐形シールド, 4. ふく射計
5. 電子管記録計, 6. μV 計, 7. スライダック, 8. 氷点箱

をとりつけて所定の温度に加熱する。試料板の下には円形開口をもった円錐形シールドがありその内側に熱電堆型ふく射計（東京精工 RE-II 型）が置かれ、シールド開口から入射するふく射をうけて熱起電力を発生する。ふく射計出力は μV 計（大倉電気 AM 1001 型）で読みとり、試料温度およびふく射計温度はクロメル-アルメル熱電対（0.32 mm ϕ ）で検出し、その電圧を電子管式自動平衡記録計で自記させる。試料温度はスライダックでヒータ電源電圧を調節し、温度 100~250°C の範囲の 7 点で測定をおこなった。

ふく射計の較正は、長さ 483 mm、直径 180 mm の円筒形黒体炉により、単位出力電圧に対する単位時間、単位面積当りのふく射エネルギーを表わすふく射計定数 K を、実験温度範囲の点数で測定、算出し、 $K=63.2$ (kcal/m²h)/mV の平均値を得た。

なお、黒体炉の黒度は 0.999 である*。

5.2 ふく射率の算定式²⁹⁾

ふく射計に入射する正味のふく射量は、エネルギー平衡式より、温度 T_2 の試料表面からの入射と、温度 T_R の周囲のふく射が試料面で反射されてふく射計に入射する成分の和から、温度 T_R のふく射計が放出する成分を差引いたものであり、いま、ふく射計出力の読みを V とすると

$$JA_1KV = [\varepsilon_2 T_2^4 - (1 - \varepsilon_2) T_R^4] \sigma F_{21} A_2 - F_{12} JA_1 \sigma T_R^4 \quad (25)$$

ここで、ふく射計内部の温接点は黒く塗ってあり、 $\varepsilon_1=1$ としている。なお、添字 1 はふく射計を、2 は試料をさす。

形態係数の相互関係 $F_{12} JA_1 = F_{21} JA_2$ を (25) 式に代入して、試料ふく射率 ε_2 について整理すると

$$\varepsilon_2 = \frac{KV}{F_{12} \sigma (T_2^4 - T_R^4)} = \frac{KV}{F_{12} C \left\{ \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_R}{100} \right)^4 \right\}} \quad (26)$$

を得る。ここで、 $C = \sigma \times 10^8 = 4.88$ (kcal/m²h $^\circ\text{K}^4$)、装置の形態係数 $F_{12} = 0.0345$ である。

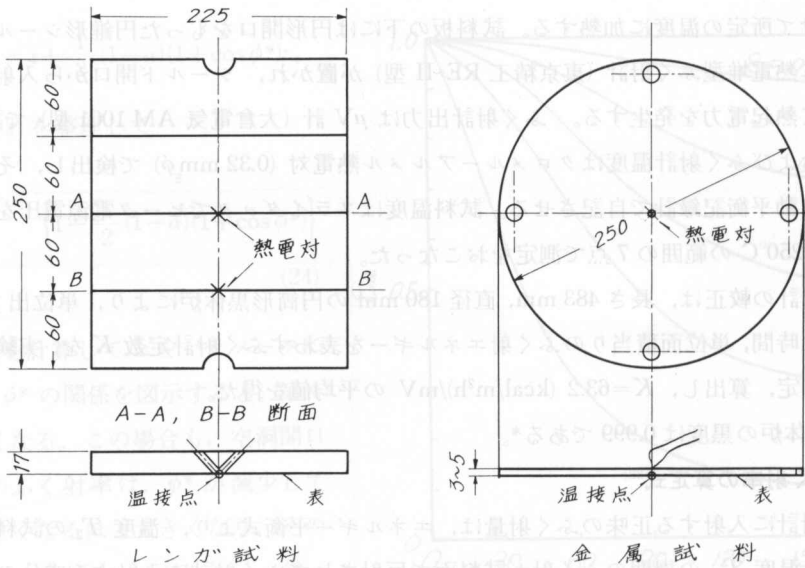
(26) 式から、ふく射計出力、試料温度およびふく射計温度を測定すれば、試料ふく射率 ε_2 が算出される。

5.3 供試材

供試材は金属材料、非金属材料および耐熱塗料である。

金属材料は、銅、アルミニウム、ステンレス、鋼および鋳鉄を選び、形状と寸法は、第 6 図に示すように直径 250 mm の円形で、厚さは鋳鉄のみ 5 mm、その他は 3 mm である。各試料は素材のままのもの、表面を研磨紙でスクラッチしたものなどを準備した。また、特に Sparrow 理論による見かけのふく射率を実験的に確かめる目的で、直径 230 mm、厚さ 5 mm のアルミニウム (JIS 第 1 種) の円板に、種々の角度の V 字溝をピッチ 0.4 mm で切削した加工面を測定に

* 黒度計算は Gouffé の式²⁸⁾によった。



第6図 試料の形状と寸法

供した。

金属試料の熱電対設定個所は、中心部と周辺部の温度差が1%以下であったので、中心部のみとした。

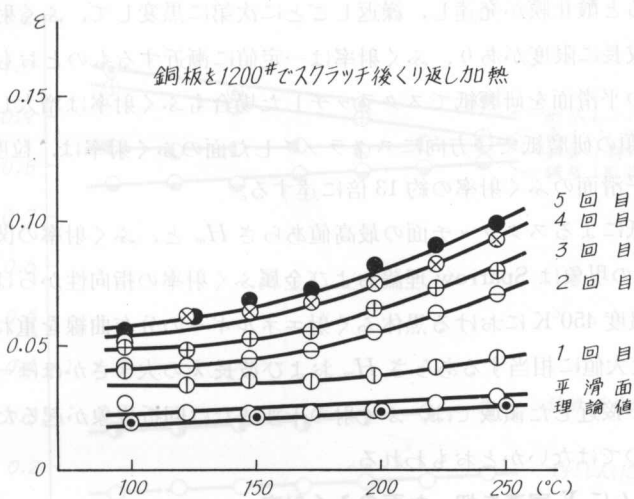
非金属材料は、赤レンガおよび耐火レンガで、第6図に示すごとく厚さ約17mmに切断し、セメントモルタルで接合して板状試料を作成した。熱電対は接合部モルタル中に、試料表面から1~2mmの点に温接点がかかるように埋込み、板の中心とそこから6cm離れた点の2個所に設定し、平均温度を算出した。

耐熱塗料は市販品(商品名パイロジン、耐熱温度600°C)で、色はブラック、グレイ、ブラウン、グリーンおよびシルバーの5種と、高温水ふく射パネル用塗料のライトブルーを準備し、銅板に刷毛で2度塗って仕上げ面とした。さらに、塗料にアスベストレーシング(100 mesh 通過96%)を混入して塗り、あらい塗装面を形成させた。

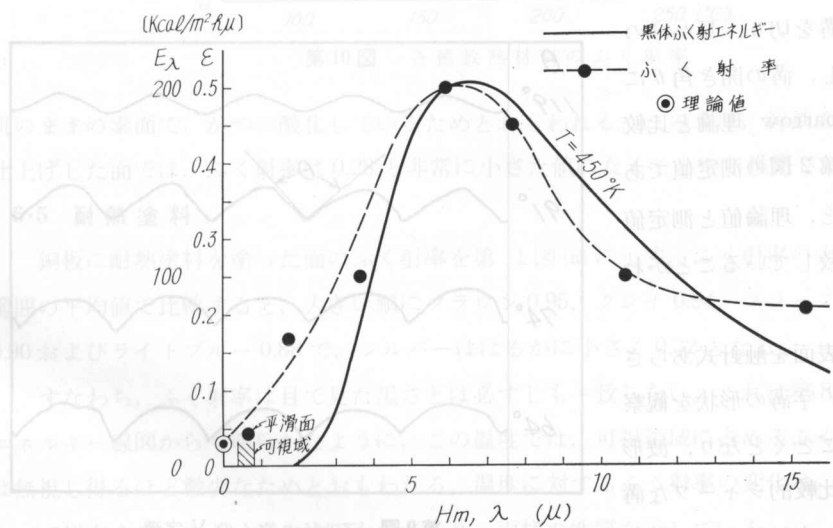
6. 実験結果と検討

6.1 銅およびアルミニウムの平滑面

銅およびアルミニウムの市販のままの光沢面をアセトンで洗って清浄な面とし、ふく射率を測定した結果を、銅は第7図に、またアルミニウムは第8図に平滑面と記入して示してある。各図には、(4)式から計算された垂直単色ふく射率を理論値としてあげてある。銅のふく射率測定値は平均値で $\varepsilon=0.025$ となり、理論値 $\varepsilon_{20}=0.023$ より若干大きい値となっているが、温度依存性の傾向は理論値とほぼ同じである。アルミニウムのふく射率についても同様なことが言われ、第8図で測定温度範囲の平均値として、測定値 $\varepsilon=0.04$ および理論値 $\varepsilon_{20}=0.028$ となっている。



第7図 銅板のふく射率



第8図 アルミニウムのふく射率と黒体エネルギー線図

測定値が理論値をわずかに上まっただ理由は、理論では表面を完全に平滑な清浄面と仮定しているのに対して、実際は銅で最高値あらさ $H_m=0.06 \mu$ 、アルミニウムで $H_m=0.6 \mu$ のあらさがあること、および理論値は垂直単色ふく射率を与えているのに対して、測定値では垂直全ふく射率を得ていることなどの理由によるものとおもわれる。

6.2 銅およびアルミニウムを研磨紙でスクラッチした面

銅の平滑面を数回繰返し加熱すると、表面が僅かに酸化され薄い褐色または紫色を呈するのみであるが、これを1200# 研磨紙でスクラッチすると、表面の roll skin がはがれて加熱によって強く酸化され、ふく射率は増大する。第7図はその結果を示しており、温度100~250°C

間で繰返し加熱すると酸化膜が発達し、繰返しごとに次第に黒変して、ふく射率は増大する。しかし、酸化膜の成長に限度があり、ふく射率は一定値に漸近するものとおもわれる。

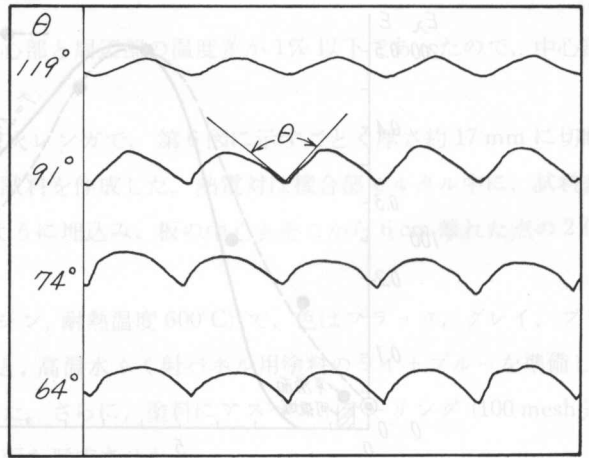
アルミニウムの平滑面を研磨紙でスクラッチした場合もふく射率は増大し、粒度 1200 # から 40 # までの 6 種類の研磨紙で一方方向にスクラッチした面のふく射率は、粒度 400 # のところに最大値を示し、平滑面のふく射率の約 13 倍に達する。

各粒度の研磨紙によるスクラッチ面の最高値あらさ H_m と、ふく射率の関係を示したのが第 8 図である。この現象は Sparrow 理論および金属ふく射率の指向性からは説明できない。図には、測定平均温度 450°K における黒体ふく射エネルギーの分布曲線を重ねて書き入れてあるが、それぞれの最大値に相当するあらさ H_m および波長 λ の大きさがほぼ一致する。このような、 H_m と λ とが接近した領域では、ふく射の干渉または回折現象が起るため、異常なふく射率の増大をみるのではないかとおもわれる。

6.3 アルミニウムに V 字溝を切った面のふく射率

アルミニウムの表面に種々の剣先角に成形したバイトにより、シェーパーを用いてピッチ 0.4 mm の V 字溝を切り、見かけのふく射率を測定し、溝の開き角 θ に対する変化を Sparrow 理論と比較して示したのが第 2 図の測定値である。これによると、理論値と測定値の傾向はよく一致していることがわかる。

なお、試料表面を触針式あらさ計で測定して、V 字溝の形状を観察すると第 9 図のごとくとなり、波形の谷においては比較的シャープな溝になっているが、山においては角が



第 9 図 アルミニウムの V 字溝

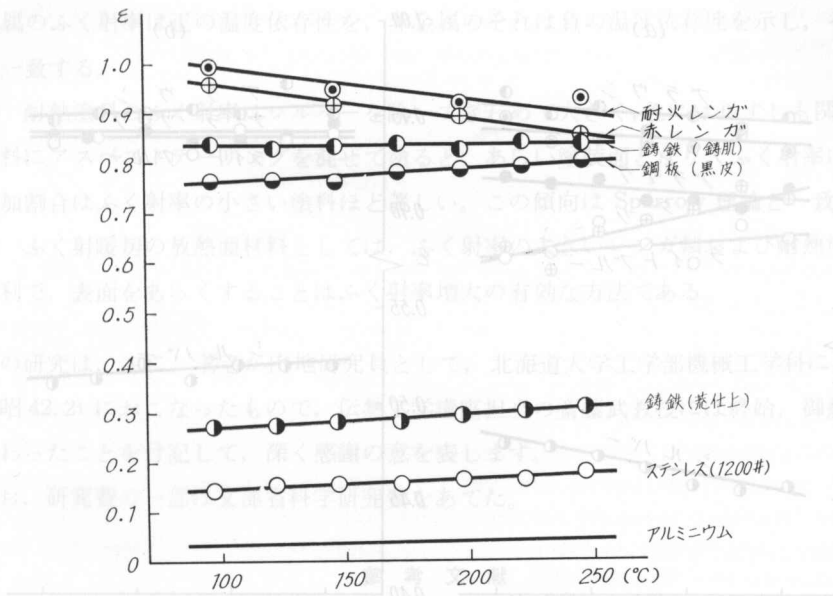
取れて円味をおびており、完全な V 字溝とは言いがたい。

6.4 ステンレス、鋼、鋳鉄、赤レンガおよび耐火レンガ

ステンレス、鋼、鋳鉄、赤レンガおよび耐火レンガのふく射率測定値をアルミニウムの値と比較して第 10 図に示してある。この温度範囲におけるふく射率の平均値は、ステンレス 0.15、鋼 (黒皮) 0.78、鋳鉄 (鋳肌) 0.82、赤レンガ 0.90 および耐火レンガ 0.95 である。

一般的に言って、ふく射率の温度による変化は、金属では温度の上昇とともにふく射率は増大し、非金属では逆に減少しており、ふく射理論における温度依存性と同様な傾向を示している。

鋼および鋳鉄のふく射率は、比較的大きな値を示しているが、これは表面が黒皮または鋳



第10図 各種放熱材料のふく射率

肌のままの素面で、かつ、酸化しているためとおもわれる。この事は、鋳鉄の表面を旋盤で荒仕上げした面では、ふく射率は0.28と非常に小さな値になることから推察される。

6.5 耐熱塗料

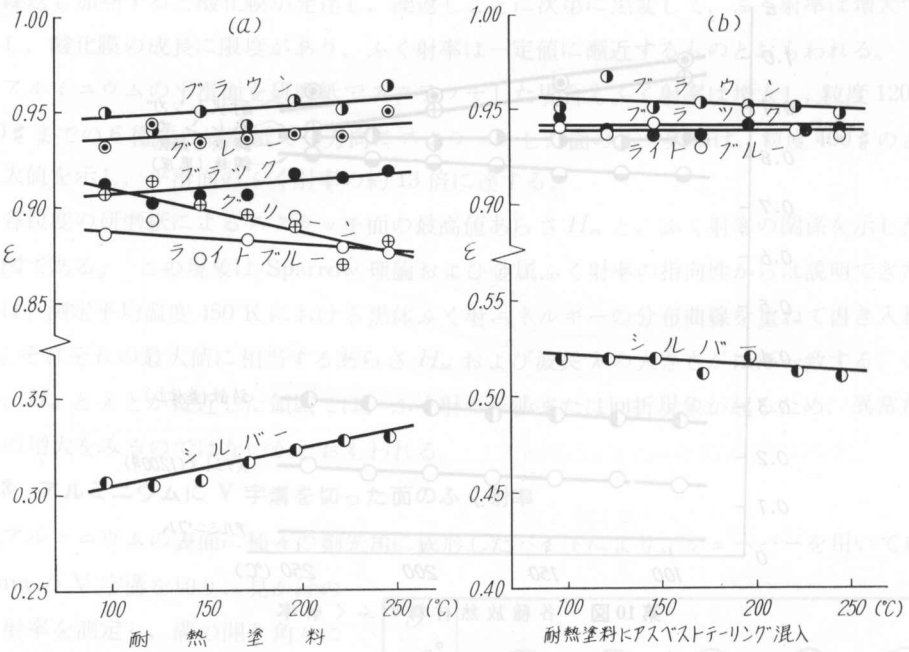
鋼板に耐熱塗料を塗った面のふく射率を第11図(a)に示す。ふく射率の大きさを測定温度範囲の平均値と比較すると、大きい順にブラウン0.95、グレイ0.94、ブラック0.91、グリーン0.90およびライトブルー0.88で、シルバーははるかに小さく0.32となる。

すなわち、ふく射率は目で見ただけの黒さとは必ずしも一致しない。これは第8図の黒体ふく射エネルギー線図からも明らかのように、この温度では、可視領域に占めるふく射のエネルギーは無視し得るほど微小なためとおもわれる。温度に対するふく射率の変化は、温度上昇とともに増大するものと、減少するものがあり、両様の性質を示している。

その理由は、塗料は一般に顔料(金属酸化物)を主成分とし、これを溶剤に解いたものであるが、この温度範囲では、暗色の顔料は温度の上昇とともにふく射率が増大し、明色の顔料はその逆になる傾向を有する³⁰⁾ためとおもわれる。ただし、シルバーはアルミ粉末が主成分であり、金属的性質を示している。

6.6 耐熱塗料にアスベストレーシングを混入した塗装面

鋼板に、アスベストレーシングを混入した耐熱塗料を塗装した面のふく射率を第11図(b)に示す。耐熱塗料にアスベストレーシングを混入することによって、見かけのふく射率は増大し、その割合は塗料自身のふく射率が小さいものほど大きくなる。たとえば塗料自身のふく射率0.32のシルバーは見かけのふく射率0.52、0.88のライトブルーは0.94にそれぞれ増大する



第11図 耐熱塗料およびアスベストテリングを混入した耐熱塗料のふく射率

が、ふく射率 0.95 のブラウンはほとんど変化がみられない。

アスベストテリングを混入した耐熱塗料の塗装面は粗面となり、個々のくぼみを球形空洞とみなして Sparrow 理論を適用することにより、見かけのふく射率の増大を説明することができる。

7. む す び

金属材料、非金属材料および耐熱塗料など、放熱面材料のふく射率測定の結果を総括すると、次のような結論を得る。

1) 銅およびアルミニウムの平滑面のふく射率はきわめて小さな値で、温度の上昇とともに増大する。これは(4)式より理論的に求めた垂直単色ふく射率の値に、大きさ、温度依存性ともかなりよく一致する。

2) アルミニウムを研磨紙でスクラッチした面およびV字溝を切った面では、ふく射率は増大する。前者では400#研磨紙によるスクラッチ面においてふく射率最大となり、平滑面のその約13倍に達する。後者では、溝の開き角が小さくなるにつれてふく射率は増大し、Sparrow理論と傾向を同じくする。

また、銅では酸化の進行にともなってふく射率は増大する。

3) 鋼および鋳鉄の素面のふく射率は大きく、ステンレスの光沢面および鋳鉄の荒仕上げ面では小さい。また、赤レンガおよび耐火レンガのふく射率はきわめて大きい。

金属のふく射率は正の温度依存性を、非金属のそれは負の温度依存性を示し、その傾向は理論と一致する。

4) 耐熱塗料のふく射率はシルバーを除いてきわめて大きく、色には必ずしも関係がない。耐熱塗料にアスベストレーリングを混ぜて塗ると、あらい塗装面となり、ふく射率は増大し、その増加割合はふく射率の小さい塗料ほど著しい。この傾向は Sparrow 理論と一致する。

5) ふく射暖房の放熱面材料としては、ふく射率の大きいレンガ類および耐熱塗料が金属より有利で、表面をあらくすることはふく射率増大の有効な方法である。

この研究は、主に、著者が内地研究員として、北海道大学工学部機械工学科に出向中(昭41.9~昭42.2)におこなったもので、伝熱工学講座担当の斎藤武教授には終始、御懇切な御指導を賜わったことを付記して、深く感謝の意を表します。

なお、研究費の一部は文部省科学研究費をあてた。

参 考 文 献

- 1) 平嶋雅雄：ふく射による暖房(上)、空気調和と冷凍、1967, 9, p. 15.
- 2) 斎藤武・石黒亮二・嶋島正則：ふく射放熱器の性能(第1報)、日本機械学会道支部第11回講演会前刷集、昭41, 9.
- 3) 斎藤武・石黒亮二・嶋島正則：ふく射暖房——実施例における性能測定、空気調和、衛生工学会道支部第1回研究会前刷集、昭42, 1.
- 4) 甲藤好郎：伝熱概論(昭39)、養賢堂。
- 5) N. W. Snyder: Radiation in Metals, Trans. ASME. May, 1954, p. 541.
- 6) 日本機械学会編：ふく射に関する最近の発展(1966), p. 71, p. 118.
- 7) N. S. Marks: Mechanical Engineer's Handbook, McGraw-Hill (1951), p. 382.
W. H. McAdams: Heat Transmission, McGraw-Hill (1954), p. 472.
E. R. G. Eckert: Heat and Mass Transfer, McGraw-Hill (1954), p. 513.
- 8) M. Jakob: Heat Transfer Vol. 1, Wiley, (1964), p. 41.
- 9) T. R. Harrison: Radiation Pyrometry and its underlying Principles of Radiation Heat Transfer, Wiley (1960), p. 191.
- 10) T. K. Chinmayanandam: On the Specular Reflections from Rough Surface, Phys. Rev. Vol. 13, 1919, p. 96.
- 11) A. F. Gorton: Reflection from and Transmission through, Rough Surfaces, Phys. Rev. Vol. 7, 1916, p. 66.
- 12) J. T. Agnew and R. B. McQuistan: Experiments Concerning Infrared Diffuse Reflectance Standards in the Range 0.8 to 20 Microns, J. Opt. Soc. Am. Vol. 43, 1953, p. 999.
- 13) H. Davies: The Reflection of electromagnetic Wave from a Rough Surface, Proc. Inst. Elec. Engr. Vol. 101, 1954, p. 209.
- 14) E. R. G. Eckert, J. P. Hartnett, and T. F. Irvine: Measurement of Total Emissivity of Porous Materials in Use for Transpiration Cooling, Jet Prop. April, 1956, p. 28.
- 15) H. E. Bennett and J. O. Poteus: Relation Between Surface Roughness and Specular Reflectance at Normal Incidence, J. Opt. Soc. Am. Vol. 51, 1961, p. 123.
- 16) A. R. Goadon and G. F. Muchnik: Determinations of the Integral Degree of Blackness, Teplofizika Vysokikh Temperature, Vol. 2, No. 4, July-Aug. 1964, p. 562.
- 17) R. C. Birkebak, E. M. Sparrow, E. R. G. Eckert and J. W. Ramsey: Effect of Surface Rough-

