

塗装面の熱ふく射に関する研究 (第1報)*

— 市販塗料のふく射率に及ぼす膜材と顔料の影響 —

馬 場 弘**

金 山 公 夫**

(昭和49年3月30日受理)

A Study of Thermal Radiation of a Paint Coated Surface (Part 1)

— Effect of Matrix and Pigment to the Emittances
of Commercial Paints —

by Hiromu BABA and Kimio KANAYAMA

The influences of the matrix and pigment of paints on the radiative properties of paint coated surfaces are experimentally made clear. The specimen of paint was prepared by means of mixing matrix and pigment in various ratios and the specimen of coated film was prepared by means of coating paint on a flat aluminum surface. The paint colors were brown, orange and silver. The total emittance for all specimens and the only spectral emittance for several specimens were measured.

Consequently, the following equation of the relation between mixing ratio and normal total emittance was obtained

$$\varepsilon_k = \varepsilon_m e^{-Ak} + \varepsilon_p (1 - e^{-Bk})$$

As a whole, the calculated values agreed well with the measured values except for those in the region of low mixing ratio on the brown and silver paints.

1. ま え が き

著者らはこれまで固体面のふく射に関する研究を行ない、表面あらさとふく射率の関係について一連の報告をしてきた^{1)~3)}。その中で非金属固体には塗装面を用いているが、塗装面が示す固有のふく射特性は、塗膜内部および表面からのふく射機構を明らかにしなければ十分に説明することはできないものと思われる。金属表面に塗布された塗膜のふく射特性は、その膜厚、膜材と顔料の混合割合、膜材および顔料の諸性質に依存し、さらにふく射の波長とも関連した複雑な現象である。しかし、基本的には塗膜内部におけるふく射の射出、吸収および散乱

* 第11回日本伝熱シンポジウム(昭和49年5月名古屋)で発表予定

** 北見工業大学機械工学科

がある場合のふく射エネルギー伝達と、表面から外部へのふく射の射出の問題と考えられる。これに類似する問題として、金属板上に透明または半透明な被膜がある場合のふく射に関する報告^{4)~8)}や散乱に関する報告など^{9)~11)}があるが、それらの結果をそのまま適用して塗装面のふく射機構を説明することは困難である。

この報告では塗装面のふく射機構を実験的に解明するために、さしあたり市販の耐熱塗料から抽出した膜材と顔料の二成分を割合を変えて再混合した試料を作り、その全ふく射率を測定し、混合比と全ふく射率の関係を明らかにすると同時に、一部の試料の分光測定を行ない二成分混合比と単色ふく射率の波長依存性を観察した。

2. 試料および実験方法

試料はこれまで使用してきた耐熱塗料でブラウン、オレンジおよびシルバーの3種類である。顔料は塗料の下層に沈澱しているものを取り、これをろ紙上でアセトンにより洗じょうして抽出した。膜材は塗料の上澄液を取り顔料と再混合してアルミ板(115×230 mm)上に塗布した。混合比は重量割合で0.0(膜材のみ)0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 0.75 および 1.0(顔料のみ)を標準としたが、シルバー塗料は0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5 および 1.0とした。膜材はシリコン樹脂であることが判明しているが³⁾、顔料の物質は市販ペイントの組成が明らかでなく現在のところ不明である。なお膜材の比重は1.3, 顔料の比重はブラウンが4.4, オレンジ4.5およびシルバー2.6である。試料の記号, 混合比, 膜厚および表面あらさは表1に示す。顔料のみを塗布した試料では顔料がアルミ板上に固定されないため膜厚の正確な測定と表面あらさの測定はできない。

実験方法および結果の処理は従来の方法¹⁾と同じである。

3. 実験結果および検討

図1はブラウン塗料の各試料に対する指向全ふく射率を示す。各試料は表1に示す記号の後に混合比を括弧内に記入する。膜材 M1 (0.0) の指向全ふく射率は他の試料に較べて各方向に対してかなり小さい値を示し、45°方向付近で若干ふく射率が增大し楕円の指向性を示す。JP1 (0.02) の垂直全ふく射率は約0.91 で M1 (0.0) と比較して急に増大し、JP2 (0.05), JP3 (0.1) と混合比が増

表1 試料記号, 混合比, 膜厚および表面あらさ

Table 1. Symbol of Specimen, Mixing Ratio, Film Thickness and Surface Roughness.

	記号	混合比	膜厚 (mm)	アラサ Hrms (μ)
	M 1	0.0	0.08	0.07
ブ ラ ウ ン	JP1	0.02	0.08	0.18
	JP2	0.05	0.06	0.55
	JP3	0.09	0.14	1.5
	JP4	0.20	0.10	1.0
	JP5	0.50	0.18	13.0
	JP6	0.75	0.16	9.0
	JP7	1.00	0.13	—
オ レ ン ジ	KP1	0.02	0.08	0.60
	KP2	0.05	0.07	0.90
	KP3	0.07	0.07	1.1
	KP4	0.09	0.09	1.7
	KP5	0.20	0.08	2.0
	KP6	0.50	0.14	10.0
	KP7	0.75	0.07	2.2
	KP8	1.00	0.05	—
シ ル バ ー	LP1	0.05	0.21	3.6
	LP2	0.10	0.14	2.5
	LP3	0.20	0.15	4.5
	LP4	0.30	0.26	8.0
	LP5	0.50	0.26	10.0
	LP6	1.00	—	—

すに従がい緩慢に増大する。しかし JP 3 (0.1) 以上では垂直全ふく射率はほとんど増大しない。またブラウン顔料 JP 7 (1.0) の垂直全ふく射率は約 0.94 である。各試料に対する指向ふく射特性を見ると JP 1 (0.02) から JP 4 (0.2) までは Fresnel の式で求められる非金属平面の指向特性に近いが、JP 5 (0.5), JP 6 (0.75) と顔料が増加するにつれて塗装面が粗面となり乱射性を示す。JP 7 (1.0) は顔料の微粒子が集合した粗面であり指向特性も乱射性となる。

図 2 はオレンジ塗料の各試料に対する指向全ふく射率を示す。KP 1 (0.02), KP 2 (0.05) および KP 3 (0.07) の垂直全ふく射率は約 0.83 であり、指向性も M 1 (0.0) のそれと類似している。KP 4 (0.1) では垂直全ふく射率は約 0.86 となり指向性は非金属平面の性質に接近する。

また KP 5 (0.2) の垂直全ふく射率は約 0.88 でありこの付近の混合比範囲では、非金属平面として安定した大きいふく射率を持つものと考えられる。KP 6 (0.5) は各方向に対して大きいふく射率を示すが、これは試料表面のあらさと膜厚の影響によるものと思われる。KP 7 (0.75) の指向全ふく射率は顔料のそれとほとんど等しく、オレンジ顔料 KP 8 (1.0) の垂直全ふく射率は約 0.81 であり指向特性はブラウンと同様に乱射性となる。

図 3 はシルバー塗料の指向全ふく射率を示す。LP 1 (0.05) および LP 2 (0.1) の垂直全ふく射率はそれぞれ 0.85 と 0.83 であり、LP 3 (0.2)

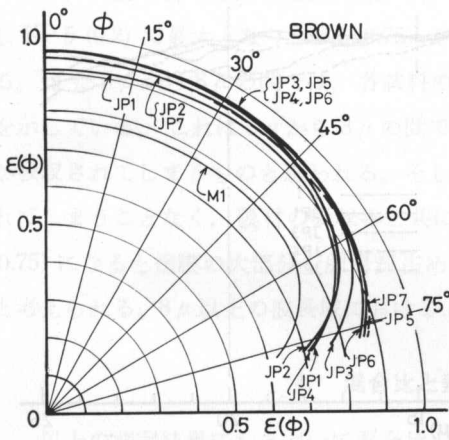


図 1 ブラウン塗料の指向全ふく射率

Fig. 1. Directional total emittances of the brown paints.

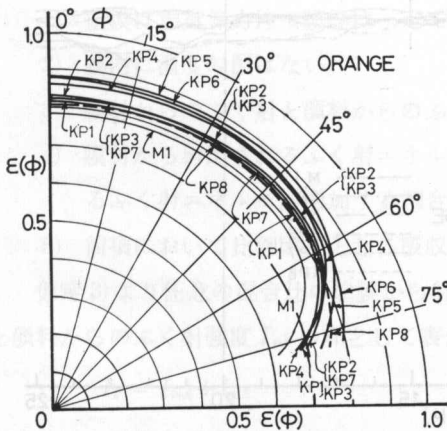


図 2 オレンジ塗料の指向全ふく射率

Fig. 2. Directional total emittances of the orange paints.

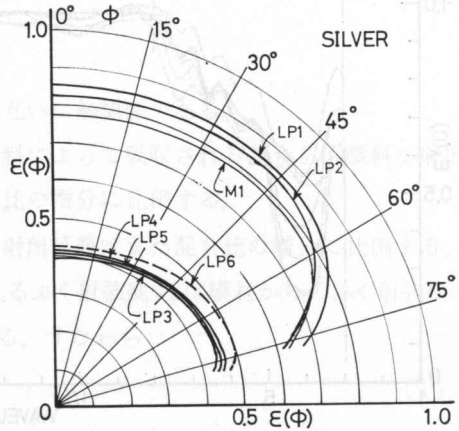


図 3 シルバー塗料の指向全ふく射率

Fig. 3. Directional total emittances of the silver paints.

から LP 6 (1.0) までの値が約 0.4 であるのと比較して非常に大きい。また LP 1 (0.05) と LP 2 (0.1) の指向性が非金属平面的性質を示すのに対して、LP 3 (0.2) から LP 6 (1.0) までの指向特性はいずれも非金属平面的とはならない。低混合比試料におけるふく射率の増大は、シルバー塗料の顔料であるアルミ粉末が低混合比で膜材中に分散することによって生じる光学的な作用によるものと思われる。

図 4 はブラウン塗料に関する顔料混合比と垂直単色ふく射率の波長依存性を示す。膜材 M 1 (0.0) の単色ふく射率は 4μ 付近で最小値、約 8μ で最大値を示しその後ほぼ一定の値を示す。これに対し顔料 JP 7 (1.0) は 3μ から 8μ にかけて 0.95 から 0.96 という高い値を示し、 14μ

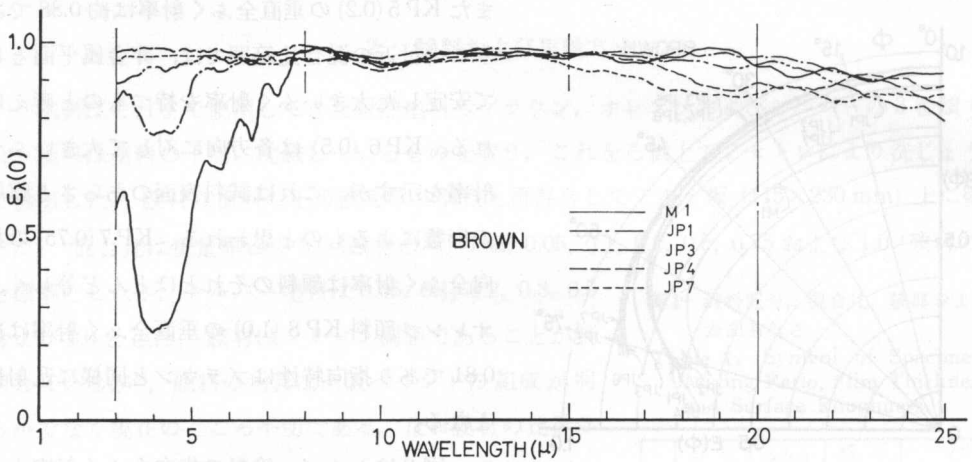


図 4 種々の混合比の試料の垂直単色ふく射率 (ブラウン)

Fig. 4. Normal spectral emittances on the brown paints with various mixing ratios.

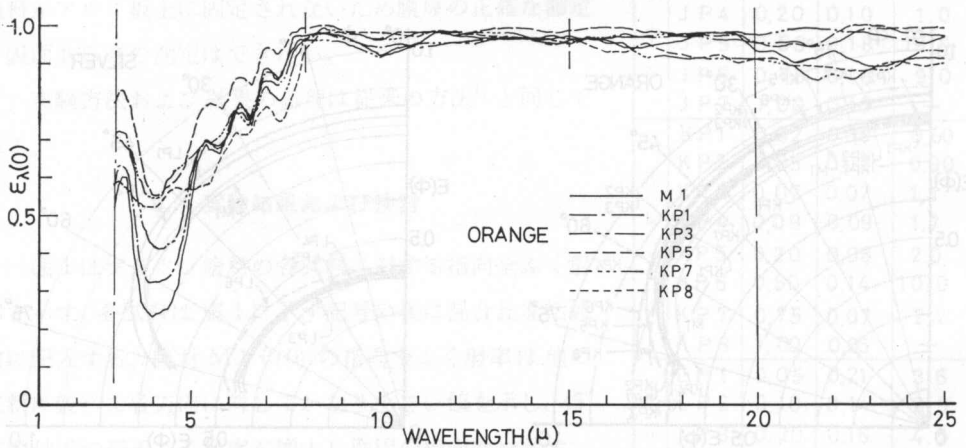


図 5 種々の混合比の試料の垂直単色ふく射率 (オレンジ)

Fig. 5. Normal spectral emittances on the orange paints with various mixing ratios.

付近からやや小さくなる傾向を示す。こうした波長特性を有する膜材と顔料を混合した場合の影響は 3μ から 8μ の波長域にかけて顕著に見られる。 8μ から 15μ の波長域では膜材と顔料のふく射率が互いに接近しているために混合比と無関係にふく射率はほぼ一定になる。 15μ 以上では各試料間でふく射率のばらつきが大きくなるが、これは分光器の精度に起因するものと思われる。

図5はオレンジ塗料に関する垂直単色ふく射率の波長依存性を示す。顔料 KP 8 (1.0) の垂直単色ふく射率は 4μ 付近に最小値を有し、 6.2μ および 7μ に小さいピークを伴って 8μ まで増大しその後ほぼ一定の値を示す。顔料混合比の影響はブラウン塗料の場合と同様に 3μ から 8μ の波長域で明瞭に見られる。特に 4μ 付近では混合比の増加に伴ってふく射率が増大し KP 5 (0.2) で最大となり KP 7 (0.75) でやや減少し顔料のふく射率に接近する様子が見られる。また 5μ から 8μ の間では、各試料のふく射率は KP 5 (0.2) を除いて M 1 (0.0) に近い値を示している。これは 5μ から 8μ の間では膜材の吸収率が大きくなり低混合比の顔料の影響が吸収されてしまうものと思われる。そして KP 5 (0.2) の混合比付近では顔料の影響は吸収されてしまうことなく、膜材の吸収率と共にふく射率を増大させるものと思われる。また KP 7 (0.75) になると塗膜の大部分を顔料が占めることにより膜材の影響はほとんど無視できるものと考えられる。 8μ 以上の波長域におけるふく射特性はブラウン塗料の場合とほぼ同じである。

4. 混合比と垂直全ふく射率の実験式

以上の測定結果にもとづいて混合比と垂直全ふく射率の関係を実験式の形でまとめておくことは実用的意味において重要と思われる。実験式を導くあたり、その影響因子を膜材の垂直全ふく射率 ϵ_m 、顔料の垂直全ふく射率 ϵ_p および混合比 k の3つに限定し、次のような仮定をおく。

- 1) 塗膜は均質等方で膜厚は一定である。
- 2) 膜内に温度勾配はない。
- 3) 膜材からのふく射と顔料からのふく射は互いに無関係である。
- 4) 膜材から射出されるふく射エネルギーが顔料によって吸収される割合と、顔料が射出するふく射エネルギーが増加する割合は混合比の増分に比例する。
- 5) 前項において比例因子となる吸収係数と射出係数はまた混合比の増分に比例する。

仮定3)より任意の混合比の塗膜から射出されるふく射強度 I_k は膜材からのふく射強度 I_{mk} と顔料からのふく射強度 I_{pk} の和として表わされる。すなわち

$$I_k = I_{mk} + I_{pk} \quad (1)$$

とする。また仮定4)より

$$\frac{dI_{mk}}{I_{mk}} = -Adk \quad (2)$$

$$\frac{dI_{pk}}{I_{pk}} = Bdk \quad (3)$$

と書ける。ここで A は吸収係数、 B は射出係数とする。さらに条件として

$k=0$ のとき

$$I_{mk} = I_{m0} = I_m \quad (4)$$

$$I_{pk} = I_{p0} = 0 \quad (5)$$

$k=1$ のとき

$$I_{mk} = I_{m1} = 0 \quad (6)$$

$$I_{pk} = I_{p1} = I_p \quad (7)$$

が考えられる。式(2)および式(3)を条件(4)から(7)のもとに解くと

$$I_{mk} = I_m e^{-Ak} \quad (8)$$

$$I_{pk} = I_p (1 - e^{-Bk}) \quad (9)$$

となる。ここで膜材の垂直全ふく射率を ε_m 、顔料の垂直全ふく射率を ε_p とすると $I_m = \varepsilon_m I_b$ 、 $I_p = \varepsilon_p I_b$ (I_b は黒体の垂直全ふく射強度) であり、式(8)および式(9)を式(3)に代入して

$$\begin{aligned} I_k &= I_m e^{-Ak} + I_p (1 - e^{-Bk}) \\ &= I_b \left\{ \varepsilon_m e^{-Ak} + \varepsilon_p (1 - e^{-Bk}) \right\} \end{aligned}$$

従って塗膜の垂直全ふく射率 ε_k は

$$\varepsilon_k = \frac{I_k}{I_b} = \varepsilon_m e^{-Ak} + \varepsilon_p (1 - e^{-Bk}) \quad (10)$$

となる。

ここで吸収係数 A および射出係数 B は仮定5)より次のようにおく。

$$A = D_1 \varepsilon_p (1 - e^{-Ck}) \quad (11)$$

$$B = D_2 \varepsilon_m (1 - e^{-Ck}) \quad (12)$$

$$C = C_0 (\varepsilon_m + \varepsilon_p) / 2 \quad (13)$$

C_0 、 D_1 および D_2 は実験により求まる定数である。

式(10)は膜材中の顔料濃度を変数としたガスふく射に関する Beer の法則^{12),13)}の変形とみなすことができる。

図6は混合比に対する各試料の垂直全ふく射率の測定値と計算値の関係および実験式の定数を示す。これによると混合比が0.2以上では計算値は全般に測定値とよく一致しているが、ブラウンおよびシルバー塗料の低混合域においては相違している。この点については今後検討していく予定である。

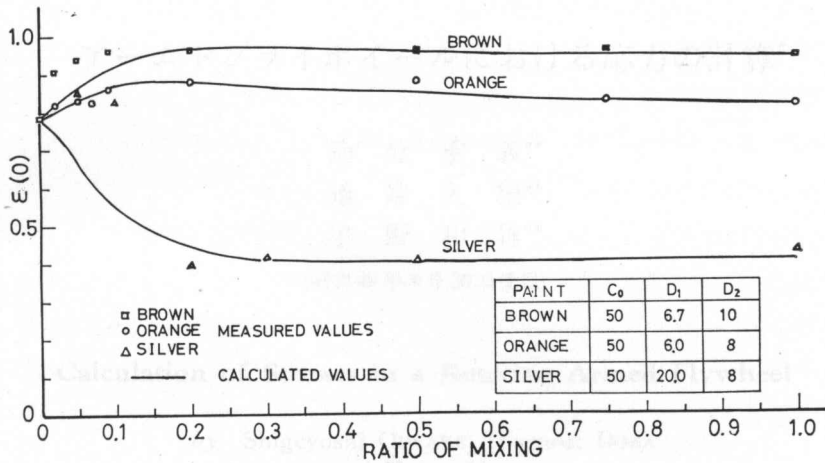


図6 塗料の垂直全ふく射率の測定値と計算値

Fig. 6. Measured values and calculated values of the normal total emittances for several paints.

5. む す び

塗装面のふく射率におよぼす膜材と顔料の影響についてその二成分の混合比を変えた実験を行ない、全ふく射および分光ふく射に見られる特性の概略を把握し、混合比と垂直ふく射率の関係を示す実験式をたてた。

本実験で得られた結果の一般性を確立するためには多くの試料について実験の積み重ねると同時により単純化されたモデルに対する解析と実験を行なわなければならない。

文 献

- 1) 金山：機論，39-319, 907 (昭48-3).
- 2) 金山：機論，39-321, 1635 (昭48-5).
- 3) 金山・馬場：機講論，740-5, 87 (昭49-4).
- 4) Brannon, R. R. JR. and Goldstien, R. J.: Trans. ASME, Ser. C, 92-2, 257 (1970-5).
- 5) Ruiz-Urbieta, M. and Sparrow, E. M.: Int. J. Heat mass Trans., 16, 1643-1645 (1973).
- 6) Domoto, G. A. and Tien, C. L.: Trans. ASME, Ser. C, 92-3, 399 (1970-8).
- 7) Williams, D. A., Lappin, T. A. and Duffie, J. A.: Trans. ASME, Ser. A, 85-3, 213 (1963-7).
- 8) Chupp, R. E. and Viskanta, R.: AIAA J., 8-3, 551 (1970).
- 9) Hottel, H. C. and Sarofim, A. F. ほか2名: Trans. ASME, Ser. C, 92-2, 285 (1970-5).
- 10) Hottel, H. C. and Sarofim, A. F. ほか2名: AIAA J., 9-10, 1895 (1971).
- 11) Bergquam, J. B. and Seban, R. A.: Trans. ASME, Ser. C, 94-1, 36 (1972-2).
- 12) Seigel, R. and Howel, J. R.: Thermal Radiation Heat Transfer, 412 (1972), McGraw-Hill.
- 13) 杉山幸男編：化学工業工学，熱工学総論，244 (1969)，地球出版。