

塗装用微小光輝材の変角反射率特性

和田隆志，松原弘幸

Characteristics of Bidirectional Reflectance of Flake Pigments for Paint Coatings

Takashi Wada, Hiroyuki Matsubara

要 旨

自動車の外観に対する塗装の寄与は非常に高く，その色・質感はデザイン上，あるいは商品構成上，重要である。近年では，メタリック系塗装が主流であり，塗装の外観・質感は光輝材によるさまざまな効果に負うところが多い。塗装系の外観・質感メカニズムを，詳細に把握するためには微小な光輝材そのものの光学的な特性を把握する必要がある。

そこで，まず光輝材一個一個の変角反射率を調べるために測定光学系を構築し，MIO光輝材（Micaceous Iron Oxide: 板状の酸化鉄）と鱗片状アルミニウム光輝材について測定を行った。MIO光輝材では，粒径，表面処理が光輝材の変角反射率に与える影響が大き

く，アスペクト比の与える影響は小さいことが分かった。一方，アルミ光輝材ではMIO光輝材に比べ反射率が大いこと，個々の試料によって変角反射率分布にばらつきがあることが分かった。

また，光輝材固有の反射メカニズム，要因とその影響を明確にするために変角反射率の数式モデル化を行った。その結果，実測値を良好に再現可能であり，有効であることが確認された。つまり，変角反射率は，主に粒径の大小に基づく回折による影響で説明でき，また反射率の分布形状は，表面性状の違いによる拡散反射の影響であることが明らかになった。

Abstract

Paint coatings have contributed greatly to the appearance of cars, and their colors and textures are very significant in considering car design and a products lineup. Recently, metallic-type paint coatings dominate the market and their flake pigments play a significant part in the paint appearance. To understand the mechanism of the paint appearance, it is necessary to clarify the optical characteristics of very small flake pigments, of which size is of an order of micrometers. First of all, an optical measurement system was set up to investigate the bidirectional reflectance of each flake pigment, and the measurements were made on micaceous iron oxide (MIO), flake pigments and aluminum ones. For MIO flake pigments, the particle size and the surface treatment were found to have a great influence on the bidirectional reflectance and the influence of the aspect

ratio might be negligible. For aluminum flake pigments, on the other hand, it was revealed that the reflectance was larger than that of MIO pigments and that each sample had a different distribution. Mathematical model and its expressions for the bidirectional reflectance are investigated in order to clarify the factor, influence and mechanism of the reflection of the flake pigment itself. This study revealed the reproducibility and validity of the expressions of the bidirectional reflectance based on the measurements. In other words, it has been revealed that the bidirectional reflectance is mainly explained by the diffraction effect on the flake pigment size and that the distribution of the reflectance is changed by the diffusive reflection effect on the surface conditions, including roughness and shape.

キーワード

自動車，塗装質感，光輝材，MIO，アルミニウム，変角反射率，粒径，回折，拡散反射，数式

1. はじめに

自動車の外観に対する塗装の寄与は非常に高く、その色・質感はデザイン上、あるいは商品構成上、重要である。近年では、メタリック系塗装が主流であり、塗装の色・質感（以下、塗装質感と呼ぶ）は光輝材によるさまざまな効果に負うところが多い。通常、塗装質感を解析するために塗板、あるいはその一部分を対象にした測定や評価・解析が行われている¹⁻³⁾。また、最近の質感に関する研究では、深み感／奥行き感を対象にした研究が光輝材の効果について新たな知見を与えている⁴⁻⁹⁾。しかしながら、このような研究においても、程度の差こそあれ、マクロ的な測定と解析の域をでているわけではない。塗装系の色・質感メカニズムを、さらに詳細に把握するためには微小な光輝材そのものの光学的な特性を把握する必要がある。そこで、まず光輝材一個一個の変角反射率分布を調べるために測定光学系を構築することから手始め、隠蔽性光輝材であるMIO光輝材（Micaceous Iron Oxide：板状の酸化鉄）と鱗片状アルミニウム光輝材について測定と解析を行った¹⁰⁾。また、光輝材固有の変角反射率分布の生成メカニズムを解明するために分布特性の数式モデル化を行い、良好な結果を得た¹¹⁾。

2. 測定方法

2.1 測定光学系

光輝材は、数 μm から数十 μm と非常に小さいため、光輝材一つからの光量を測定する変角反射率測定は容易ではない。測定光学系をFig. 1に示す。光輝材の照明には、高輝度な白色光源であるXeランプを用いる。Xeランプからの光は2つの凸レンズとピンホールによって平行光にされ、絞りにによって直径約2mmの光束として、 45° の入射角で試料である光輝材に照射される。光輝材からの光は対物レンズで集光され、光検出器で検出される。光検出器は、さらに必要に応じてCCDカメラと接眼レンズに交換で

きる構成とした。

2.2 変角反射率

測定したい物理量は変角反射率 $r(\theta)$ であり、次式で定義される。

$$\text{変角反射率} = \frac{\text{光輝材からの光量}}{\text{光輝材へ入射する光量}} \quad (1)$$

但し、 θ は光輝材の正反射方向の角度を 0° とした時の角度であり、一般に偏角と呼ばれる。

光輝材は小さいため、Fig. 2に示すように観察範囲より小さい。つまり、測定範囲全体を覆うことがないため、測定範囲内の光輝材の面積を考慮する必要がある。

そこで、

- ・光輝材が測定範囲に占める面積の割合： d
- ・測定範囲に入射する光量： ϕ_0
- ・光輝材からの光量： $\phi(\theta)$

を測定し、

$$r(\theta) = \frac{\phi(\theta)}{\phi_0 d} \quad (2)$$

の式に測定値を代入し変角反射率 $r(\theta)$ を計算する。

ϕ_0 、 $\phi(\theta)$ は光検出器を用いて測定し、測定範囲に占める光輝材の面積の割合 d は、CCDカメラと画像処理装置を用いて測定する。ここで、 d は $\theta = 0^\circ$ のときに観察される面積の割合とする。

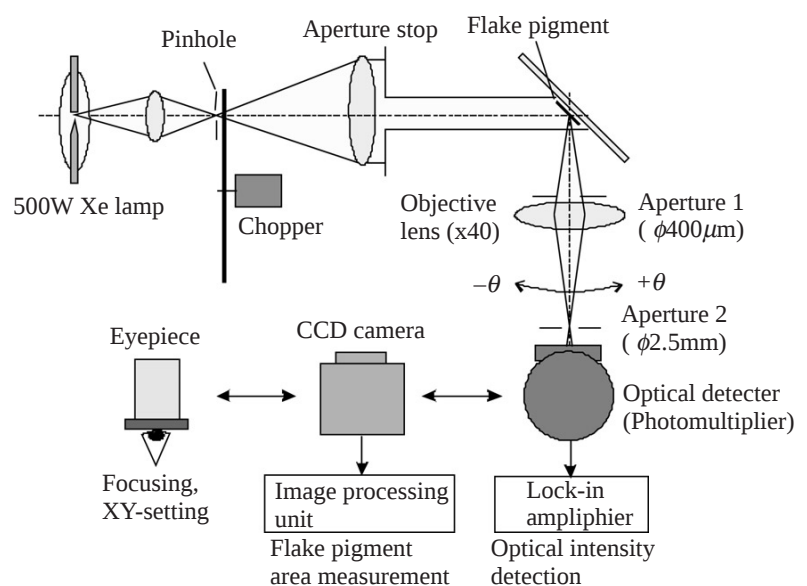


Fig. 1 Optical setup of measurement.

3．変角反射率の測定

3．1 MIO光輝材

Fig. 3に試料として用いたMIO光輝材の電子顕微鏡写真の一例を示す。比較的平滑な表面を有する、六角形の結晶である。また、試料は5種類で、Table 1に詳細仕様を示すように、粒径、アスペクト比、表面処理を変化させたものを用いた。これらを測定し、それぞれの因子の影響を比較・検討した。

Fig. 4に、粒径の異なる3つの試料（試料No.1, 4, 5）の測定結果をもとに式(2)を用いて求めた変角反射率分布を示す。グラフの横軸は正反射からの角度、

縦軸は反射率である。また、グラフは試料No.1については11個の、試料No.4, 5では12個の試料から得られた結果の平均値である。

Fig. 4の結果から、粒径が小さくなると正反射方向（ $\theta = 0^\circ$ ）の反射率が小さくなり、変角反射率分布の広がりが大きくなることが分かる。アスペクト比の差異については変角反射率分布に与える影響は小さいことが分かった。また、クロム処理によって反射率が低くなり分布の広がりも若干広がることが把握された。

3．2 鱗片状アルミニウム光輝材

光輝材の種類による変化を調べるため、鱗片状アルミニウム光輝材（以下、アルミ光輝材と述べる）

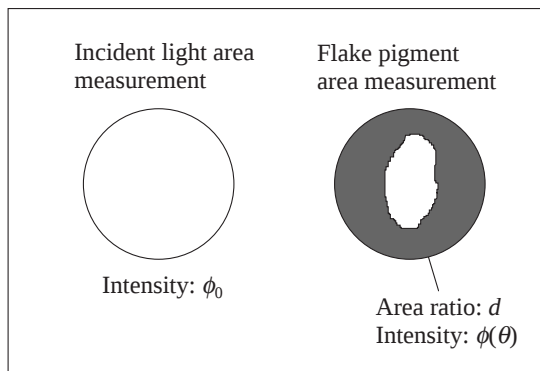


Fig. 2 Measured light intensity and flake pigment area within observation area: It needs to consider flake pigment area when its area does not fully occupied.

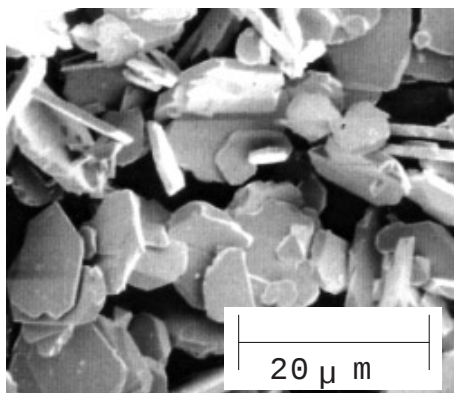


Fig. 3 Appearance of MIO flake pigments: They are hexagonal crystals with flat surface, but some ones aren't so.

Table 1 Specification of MIO samples.

Sample No.	Size (μm)	Thickness (μm)	Aspect ratio	Chromic treatment
1	32.3	4.0	8.1	No
2	16.2	3.5	4.6	No
3	17.2	3.4	5.1	Yes
4	17.2	1.6	10.8	No
5	11.5	1.2	9.6	No

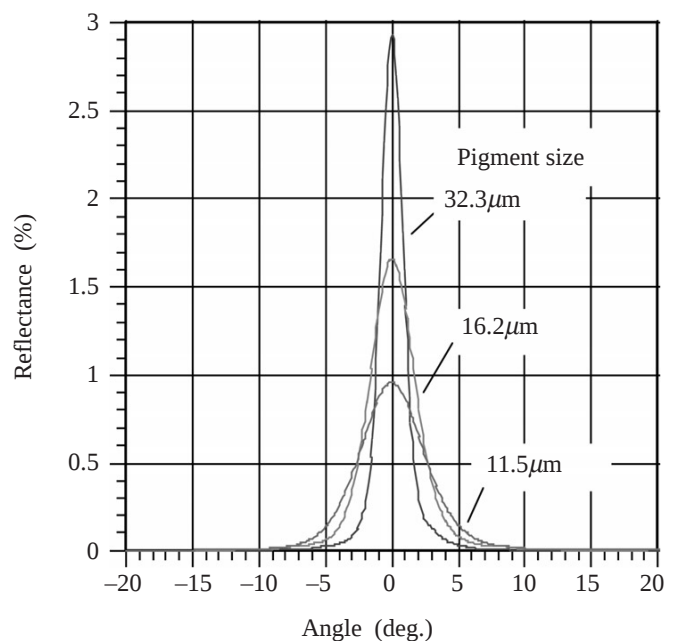


Fig. 4 Relation between flake pigments size and bidirectional reflectance.

について測定を行い，MIO光輝材の結果と比較した。測定には，市販車メタリック塗装に使用されているアルミ光輝材を試料として用いた。この試料の顕微鏡観察した代表的なものをFig. 5に示す。

Fig. 6に，アルミ光輝材の測定結果をもとに式(2)により同様にして求めた変角反射率分布を，粒径がほぼ等しいMIO光輝材の分布と比較して示す。グラフは，アルミ光輝材は10個の試料，MIO光輝

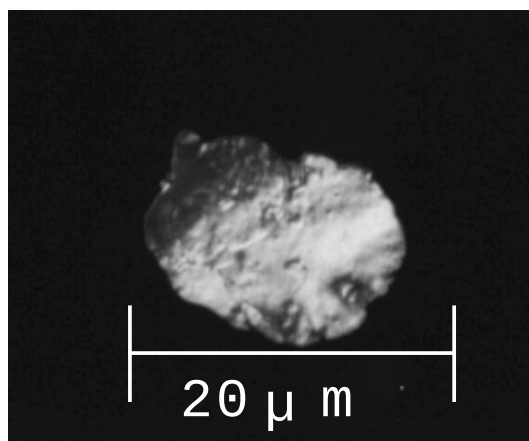


Fig. 5 Appearance of aluminum flake pigment.

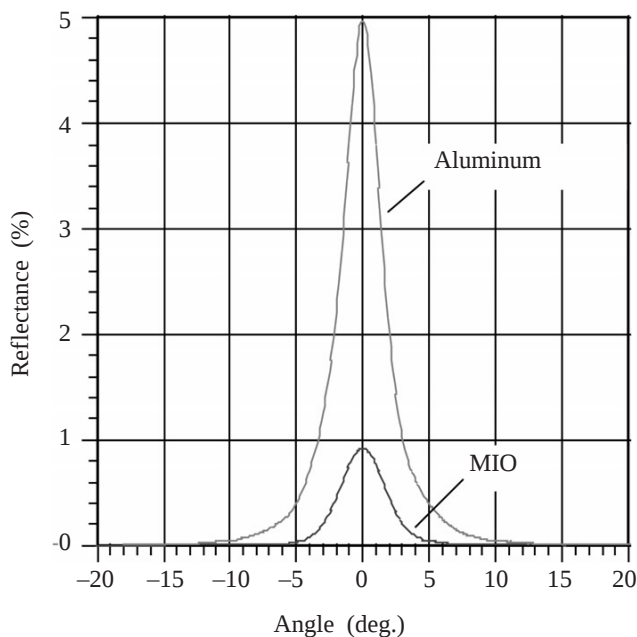


Fig. 6 Distribution of bidirectional reflectance for aluminum flake pigments and MIO ones at almost same size.

材では12個の試料から得られた結果の平均値である。Fig. 6の結果から，アルミ光輝材はMIO光輝材に比べ正反射からの角度（偏角） 0° のときで6倍程度，その周辺部（ $5 \sim 15^\circ$ ）では一桁程度反射率が高いことが分る。これは，光輝材を作っているアルミニウムという物質自体がMIO光輝材に比べて高い反射率を持っているためである。

4．解析と定式化

4.1 反射率分布形状の特徴

得られた5種類のMIO光輝材の反射率分布の特徴を詳細に調べた結果，すべて同じ分布形状，すなわち，相似形をしていることが明らかになった（Fig. 7実線）。しかしながら，MIO光輝材とアルミ光輝材との反射率分布を規格化して比較したところ，Fig. 7で示されるように，分布形状（裾野の広がり方）が異なり，光を反射する基本的なメカニズムが異なることを示唆する結果が得られた。

次に，測定した光輝材の粒径と反射率（ $\theta = 0^\circ$ ）との関係を調べた。光輝材の粒径に相当する量として，変角反射率を求めるために測定した光輝材の面積の平方根を用いた。これは，光輝材を円形とした場合の径に比例する量である。

MIO光輝材の粒径と反射率の関係をFig. 8に示す。これから，MIO光輝材の場合，反射率が概略粒径に比例することが分る。一方，アルミ光輝材については，粒径と反射率との間に有意な相関が見られなかった。これは，MIO光輝材では，一個

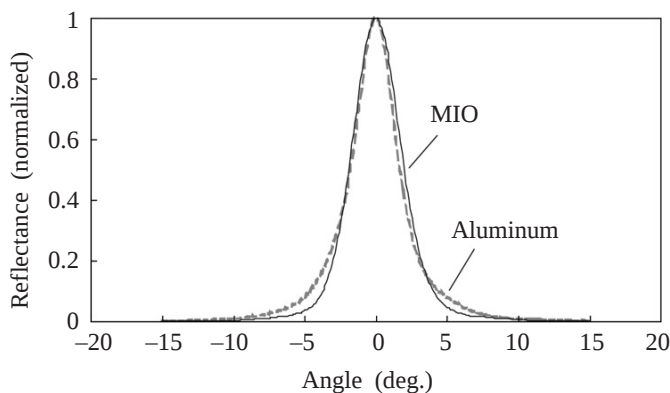


Fig. 7 Distribution of bidirectional normalized distribution of angular reflectance for MIO flake pigments and aluminum ones.

一個が六角形で円形に近いのに対し，アルミ光輝材では一個一個が不定形であるためと推測される。

4.2 変角反射率のモデル式

光輝材による変角反射率が主に，粒径，種類などにより異なることから，影響を与える因子やメカニズムを明確にするために，モデル式を検討することにした。

4.2.1 回折光による影響

粒径が小さくなると，正反射方向の反射率が小さくなり反射率分布が広がることから，微小な光輝材による回折の影響を仮定し検討する。光輝材を円形開口とし，測定光学系の条件より測定される光輝材からの反射光をフラウンホーファー回折として近似すると，変角反射率 $r_d(\theta)$ は第1種のベッセル関数 J_1 を用いて次式で表現できる。

$$r_d(\theta) = k_1 \cdot a^2 (2J_1(a \cdot k \cdot \tan \theta) / a \cdot k \cdot \tan \theta)^2 \quad (3)$$

但し， k_1 ：係数， k ：波数で $k = 2\pi/\lambda$ である。

この式を用い，粒径 $16\mu\text{m}$ と $32\mu\text{m}$ の場合を計算した。 $32\mu\text{m}$ のときの角度 0° の反射率で規格化して比較したのが，Fig. 9である。この計算結果により，反射率の大きさが粒径に比例することが示され，回折現象により反射率の粒径依存性が説明できることが分った。しかし，反射率分布の広がりについてみると，計算結果は測定値よりもかなり小さいことが分かった。すなわち，回折による広がりが主要因ではないと思われる。

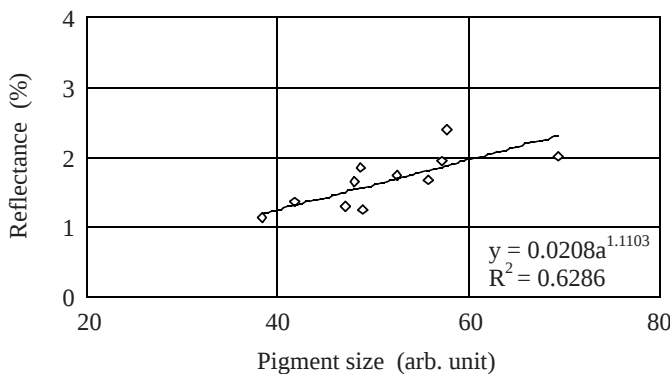


Fig. 8 Relation between flake pigment size and reflectance at $\theta = 0$ degree (MIO sample, No.4).

4.2.2 表面性状による影響

実際の光輝材表面は，MIO光輝材といえども完全な平面ではなく，アルミ光輝材では特にそうであるので，表面粗さなどによる影響を考える必要がある^{1,2)}。ここでは，光輝材表面に存在する微小凹凸による拡散反射による要因を新たに考え，正反射方向の反射率を $R_s(\theta)$ ，それ以外の表面拡散光による反射率を $R_d(\theta)$ として考えると，得られる全体の反射率分布は2つの成分の和となり，それぞれ次式で表される。

$$R_s(\theta) = r_d(\theta) \cdot \exp[-(4\pi\sigma/\lambda)^2] \quad (4)$$

$$R_d(\theta) = |k_2(\cos \theta + 1)^4 \cdot \sin \theta \cdot \exp[-k_3 \cdot \sin^2 \theta]| = r_d(\theta) \quad (5)$$

但し， $k_2 = (k\sigma)^4/4m^2$ ， $k_3 = (k\sigma)^2/2m^2$ ， σ は光輝材表面の平均2乗平方根粗さ， m は表面形状の平均2乗平方根傾きである。

4.3 考察

微小な光輝材の光学特性である，変角反射率のモデル式を導出するために，主として光輝材の大きさ／形状効果である回折と表面性状，特に微小な凹凸による粗さの2つの要因を考えた。これら個々の要因を表す式(3)～(5)は，理論上無限小の角度分解能を有する検出器で測定した場合に相当する。したがって，測定系の角度分解能 $\Delta\theta$ （本測定系では 1.5° ）などの実際の測定系の条件を考慮しなければならない。さらに，実際にはその他の要因も考えられるが，先述した主たる影響と光輝材の種類などのパラメータを考慮すると，測定される

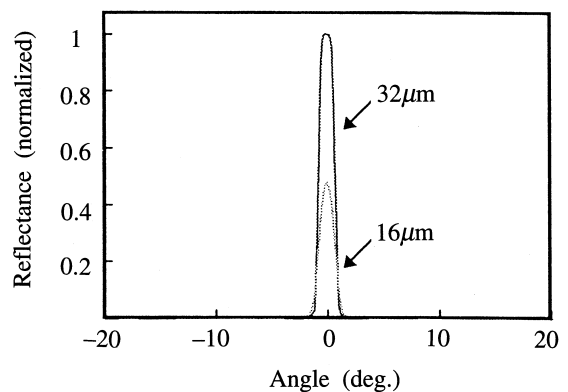


Fig. 9 Calculation result: Relation between flake pigment size and bidirectional reflectance.

変角反射率のモデル式として次式が得られる。

$$R(\theta, a, \sigma, m, \lambda, \Delta\theta, K) = \int_{\theta-\Delta\theta/2}^{\theta+\Delta\theta/2} R_0(K)[r_a(\theta') \cdot \exp[-(4\pi\sigma/\lambda)^2] + r_d(\theta')] d\theta' \quad (6)$$

但し、 θ は角度、 a は粒径、 σ は表面の粗さ(rms: root mean square)、 m は表面の傾き(rms)、 λ は波長、 $\Delta\theta$ は検出器の角度分解能、 $R_0(K)$ は光輝材種 K による基本反射率である。

このモデル式(式(6))により、隠蔽性光輝材であるMIO光輝材やアルミ光輝材などの変角反射率を与えることが可能になると思われる。このモデル式を用いて、MIO光輝材とアルミ光輝材の場合について、適用した結果を以下に示す。

Fig. 10に、MIO光輝材に対して適用した場合の計算結果例とこれに相応する測定結果例(試料No.2のMIO光輝材)を合せて示す。計算に用いた値は、それぞれ、 $a = 16(\mu\text{m})$ 、 $\sigma = 2.5 \times 10^{-3}(\mu\text{m})$ 、 $m = 0.91 \times 10^{-3}$ である。測定した反射率分布と比較的良好一致が見られ、回折のみを考慮した結果(Fig. 9)と比較してみるとその違いがよく分る。

同様に、アルミ光輝材の場合の計算結果例とそれに相応する測定結果例を合せてFig. 11に示す。計算に用いた値は、それぞれ、 $a = 16(\text{mm})$ 、 $\sigma = 2.5 \times 10^{-3}(\mu\text{m})$ 、 $m = 1.77 \times 10^{-3}$ である。MIO光輝材に

比べて裾野の広がり特徴があるアルミ光輝材についても、その裾野の広がり再現されていることが分かる。つまり、この計算結果は光輝材の表面形状の平均傾きが大きければ反射率分布が広がることを示している。

以上のように、変角反射率をモデル化し定式化した式(6)は、MIO光輝材やアルミ光輝材の両方の変角反射率分布に適用可能であることが示された。モデル作成に導入した、基本的な仮定(回折と表面性状の2つ)からして、他の隠蔽性光輝材にも十分適用できるものと考えられる。

5. まとめ

今回、メタリック系塗装による自動車外観の色・質感に影響を及ぼす因子の一つである光輝材について、その光学特性の見地から検討を行った。まず、これまで測定されていなかった光輝材単体の光学特性である変角反射率を測定する光学系を構築し、MIO光輝材やアルミ光輝材について実際に測定を実施した。

MIO光輝材を用いた測定では、粒径、アスペクト比、表面処理の異なる試料について測定を行った結果、光輝材の粒径、表面処理が光輝材の変角反射率分布に与える影響が大きいこと、アスペクト比の与える影響は小さいことが分かった。

また、アルミ光輝材はMIO光輝材に比べ反射率

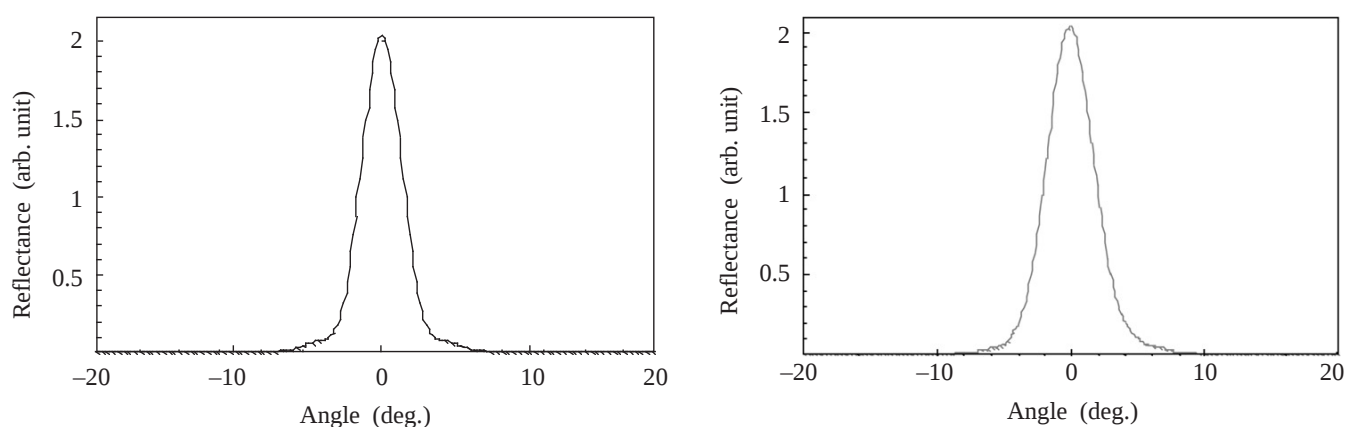


Fig. 10 Bidirectional reflectance of MIO flake pigments: Left figure is one example of calculation results and right one is the corresponding one of measured results.

が大きいこと、個々の試料によって変角反射率分布にばらつきがあることが分かった。

このような測定結果と傾向を踏まえ、光輝材の変角反射率に対する詳細な定量的解析とそのモデル式を検討した。光輝材の反射率分布モデルを定式化して検討した結果、実測値が良好に再現されうることから、光輝材固有の反射のメカニズムを始め、各因子の効果、影響を明確にすることができた。すなわち、変角反射率の大小は粒径に依存し、かつそれは、主に回折による影響で説明できることが分かった。また、反射率分布の広がり、すなわち角度依存性は、表面性状の違いによる、主に微小な凹凸による粗さに基づく拡散反射の影響であることが明らかになった。さらに、その他に、測定光学系依存の条件（検出器の角度分解能など）も要因として考慮すべきであることも把握された。

謝辞

本研究を進めるにあたり、トヨタ自動車(株)、関東自動車工業(株)、関西ペイント(株)の方々のご協力に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 森田操："塗膜鮮鋭性の評価法", 鉄と鋼, 77-7(1991), 217
- 2) 田畑洋："自動車の塗膜質感評価方法", 自動車技術, 44-4(1990), 16
- 3) 浅場尚郎："最近の光輝材塗色の測定方法", 塗装工学, 30-9(1995), 358
- 4) 服部寛, 他5名："塗膜深み感の解析", 塗装工学, 28-5(1993), 168
- 5) 寺田重雄, 他6名：日本機械学会第1回交通・物流部門大会論文集, (1992), 297
- 6) 服部寛, 他6名："自動車の塗装における深み感の形成因子", 自動車技術会論集, 25-1(1994), 124
- 7) Wada, T., et al. : Frontiers in Information Optics, ICO Topical Meet. Dig., (1994), 364
- 8) 鈴木敬明, 他6名："塗装深み感の解析 - 光輝材の見えと奥行き感 - ", 塗装工学, 29-7(1994), 287
- 9) 和田隆志, 他2名："塗装深み感の要因解析", R&Dレビュー, 30-3(1995), 17
- 10) 和田隆志, 他2名："光輝材の変角反射率分布測定", 第43回応用物理学関係連合講演会予稿集, 第3分冊(1996), 902
- 11) 和田隆志, 他1名："光輝材の変角反射率分布解析", 第57回応用物理学会学術講演会予稿集, 第3分冊(1996), 783
- 12) Bennett, H. E. and Poreus, J. O. : "Relation between Surface Roughness and Specular Reflectance at Normal Incident", J. Optical Soc. Am., 51-2(1961), 123

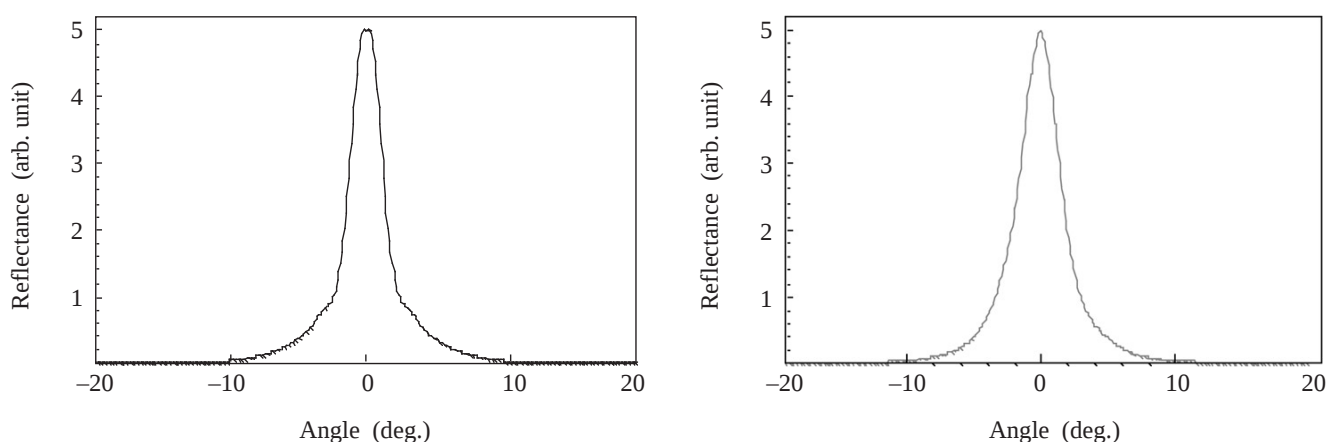


Fig. 11 Bidirectional reflectance of aluminum flake pigments: Left figure is one example of calculation results and right one is the corresponding one of measured results as same as shown in figure 10.

著 者 紹 介



和田隆志 Takashi Wada

生年：1957年。

所属：光応用研究室。

分野：外観・質感計測，解析および光情報計測に関する研究。

学会等：応用物理学会，計測自動制御学会会員。

1994年日本塗装技術協会技術賞受賞。



松原弘幸 Hiroyuki Matsubara

生年：1965年。

所属：光応用研究室。

分野：外観・質感解析および光応用計測に関する研究。