

## 特集「測色システムの実際」

## 最近のメタリック・パール色の計測技術

## Recent Measurement Technology of Metallic and Pearlescent Color

大住 雅之

Masayuki Osumi

株式会社 オフィス・カラーサイエンス  
Office Color Science Co., LTD.  
ドロモントジャパン 株式会社  
Dromont Japan Co., LTD.

## 1. はじめに

プロダクトデザインにおける多様性は近年、拡大の一途をたどり、中でもカラーリングは重要な位置づけを持っている。市場に展開される工業製品は、造形と共に色彩と質感を表現手段に加えることで、その時代の芸術的な価値を高めているともいえる。色材や加工技術の進歩によって、現在では様々な表現が可能となり、高度な材料を用いてデザインに取り組むことが出来るようになった。その代表例がメタリック・パール色である。一方で、膨大な種類の材料をうまくデザインと結びつけ、工業生産を行うとなると多くの苦勞が伴われる。合理化の努力が常であり、その背景には電子技術の進歩による、高度な測色システムの存在を語らざるにはいられない。今回は、最新の測色システムにスポットをあて、メタリック・パール色の測定と評価の実際について解説を行い、その将来展望について考察を試みる。

## 2. メタリック・パール色の特長

質感を含めた意匠要素を実現する為には、構成材料の多様性と共に、表面の構造、それも3次元的な構造が関連する。塗料では、色彩と質感の両者を相互的に実現するために、①どのような構成材料を用いるのか、②材料をどのような配合で構成するのか、③どのような塗装方法・条件を用いるのか、といった3つの要素が検討される。

## 2.1. 塗料に用いられる色と質感の表現材料

メタリック・パール色の場合、色彩や質感、テクスチャを表現する材料は、着色顔料、メタル材、マイカ・パール材、フロップ感調整材の4つのカテゴリーに分類される(図1)。着色顔料はソリッド色と同様に、基本的に散乱係数と吸収係数の2つの係数で光学的な

特性が説明できるが、メタリック・パール色の場合、テクスチャを表現するために透明性を高める必要があり、散乱係数が小さい微分散されたものが用いられる。

メタル材、マイカ・パール材は一般に光輝材と呼ばれるものである。メタル材は金属の薄片で、シルバー色を表現するアルミニウムが代表例である。概ね数ミクロンから百ミクロン程度の大きさで、粒径や表面性状により、テクスチャ(粒子感、マイクロ光輝感等)やフロップ感が異なる。塗膜中では、ほぼ平行であるが、厳密には揺らいで配向される(図2)。自動車塗料では膜厚が十数ミクロン程度で、大粒径のものほど平行度が高く、反射率係数がハイライトでは高くシェードでは低い、高フロップの特性を示す。

一方、パール・マイカ系の光輝材は、顔料自体は透過性が高くなり、表面の特殊な構造により干渉色を呈

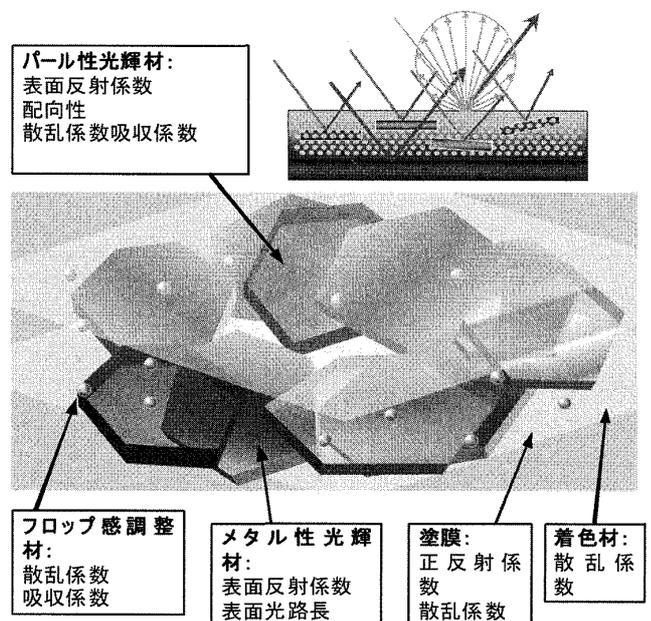


図1. メタリック・パール色の塗膜構造

することなどが、特徴的な部分である。干渉性の光輝材は、コア材に塗膜やコア材(雲母)と屈折率の異なる透明な酸化金属のコーティングを施すことで作成される。屈折率の異なる物質の界面では Fresnel の反射が起こる。コーティングされた物質の厚みと光の照射、受光の光学的な位置関係から生ずる光路長の差によって、光が強めあったり弱めあったりすることで干渉色を呈する。材料の組み合わせや厚み、更にはコーティング層を幾層も形成することで様々な干渉色のバリエーションが提供されている。他の干渉色を発現する方法として、金属化合物の微細な結晶構造により構造発色をするものもある。代表例に、雲母状酸化鉄(MIO : Micaceous Iron Oxide)がある。

フロップ感調整材は、大別すると散乱係数の大きな顔料、例えばTiO<sub>2</sub>のような材料で、入射光を散乱させることで、ハイライトの反射率を低下させ、逆にシェード方向の反射率を増大させる散乱係数調整型や、シリカ材のように無色透明で極めて散乱係数は小さいが、光輝材フレークの反射面を色々な方向に傾ける、配向調整型の材料に大別される。

## 2.2. 塗膜構成による表現方法

塗膜構成も質感表現に大きく関連している。ソリッド色では単層で塗装を行い、これにクリア/カラークリア層を重ねることで、光沢感や深みを持たせる。メタリック・パール色の場合にはもっと複雑で、通常の自動車外装塗装では、着色層に対し、更にクリア層を重ねて表面に光沢を持たせている。着色層をソリッドカラーで構成し、その上の透明なコート層内に、パール・マイカ顔料を含む層を重ねて高級感を演出する、通称3コートパール色や、更に多層にコートする塗装方法が、最近のカラーバリエーションに多く見受けら

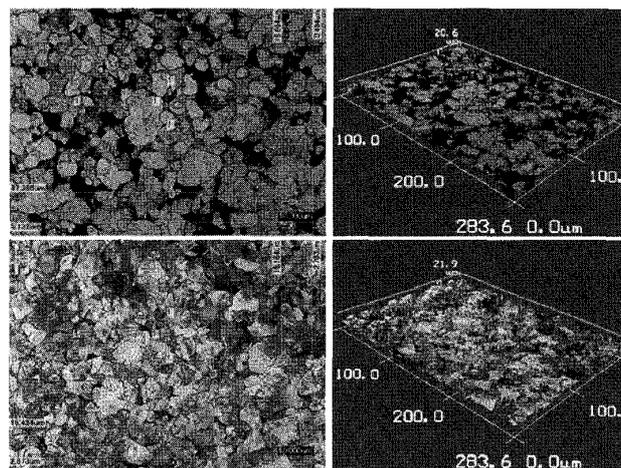


図2. 光輝材のレーザー共焦点顕微鏡画像 上段がメタリック、下段がパール顔料の例(キーエンス社製VK9500 使用)

れる。これとは逆に、メタリック系光輝材で構成される層の上にカラークリア層を形成すると通称キャンディートーンと呼ばれる質感が得られる。

## 3. 計測の実際

メタリック・パール色では、非等方的な光学材料である光輝材が、配向分布をもって塗膜中に含まれる為、照明や受光のジオメトリーによって計測値は大きな影響を受ける(図3)。この為、メタリック・パール色には、多数の照明や受光角で計測可能なマルチアングル型の分光光度計が用いられ、ポータブルシステムに代表されるジオメトリー固定型のシステムと、研究開発や3DCG用のデータ計測に用いられる大型のジオメトリー可変型システムに大別される。

前者は機構が比較的簡単で耐久性に優れ、コンパクトで持ち運びが容易なので、QCや自動車補修のカラーマッチングシステムに多用されているが、メタリック・パール色の場合、ある程度の測定面積(直径6mm程度)が無いと計測誤差が大きく、システムをコンパ

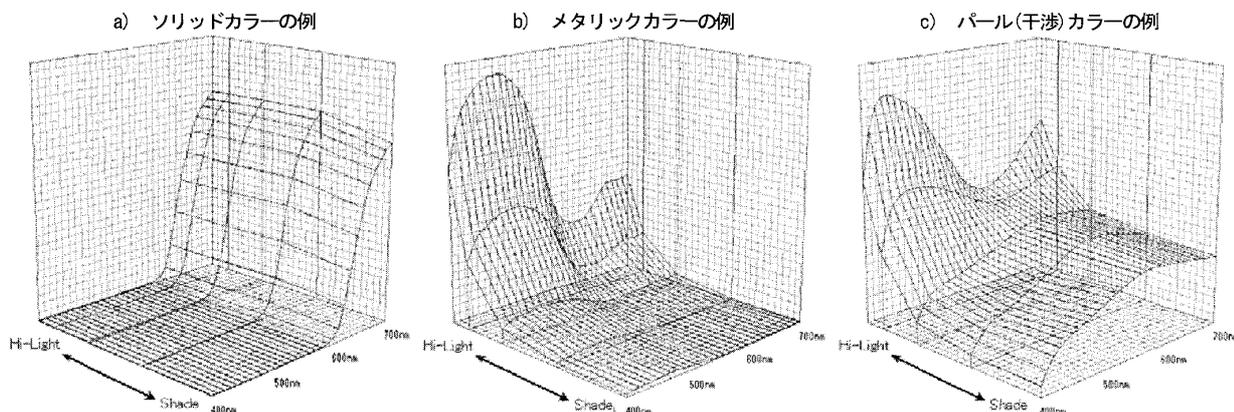


図3. 分光反射率係数の計測例(使用測定器X-Rite MA68II)

クトに纏める必要から、どうしても受光の開き角 (Cone Angle) が大きくなってしまふ。これは計測の空間分解能を低下させ、特に干渉パールでは影響が大きい。受光角が試料面に対して水平に近くなるにしたがって、大きな開き角は計測精度への影響が大である。

一方、大型システムではジオメトリーに余裕がある。開き角を小さくとることができるので、高い空間分解能を実現できる。開き角が異なる2つの分光光度計、村上色彩技術研究所GCMS-4とGCMS-11を用いての比較測定結果を図4に示した。前者は開き角が $2.2^\circ$ 、後者は $0.7^\circ$ である。測定にはMerck社のブルー系干渉パール顔料Iriodin9225を用いた。特に $45^\circ/60^\circ$ の測定条件では、両者の値に違いが認められる。また、両者とも $45^\circ/30^\circ$ と $45^\circ/60^\circ$ では、値が大きく異なる。この測定条件は $45^\circ$ で光を入射し、正反射方向から $+15^\circ$ と $-15^\circ$ で受光することを意味し、正反射方向に対して非対称性を示す干渉系顔料の特徴を表している。

計測は方位角を意識せず、試料面に垂直な面内で照射と受光の関係形成するインプレーンが基本であるが、全方位に亘って計測するBRDF計測が近年注目されている。BRDFとは双方向反射率分布関数 (Bi-Directional Reflectance Distribution Function) の略称である。本来、観察対象である塗色は表面形状や塗膜構成、光輝材により複雑な光学挙動を呈する。また、メタリック・パール色では、スプレーやアプリケーションで展開する際に配向が生じたり、ヘアライン等のテクスチャによっては光学挙動に方向性が生じたりする。この為、全方位に対して照射・受光測定できる装置が必要となってくる(図5)。これらの装置の大半

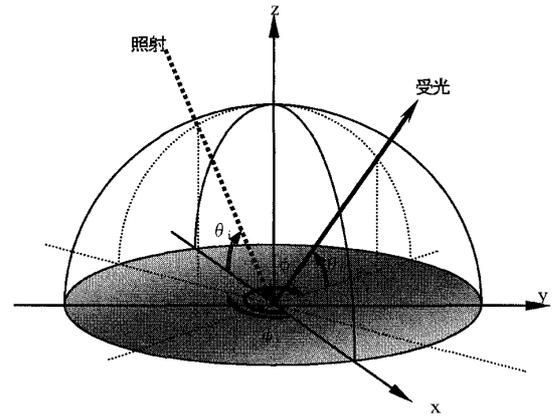


図5 BRDF

(Bidirectional Reflectance Distribution Function: 双方向反射率分布関数) 測定

の目的は、研究開発における評価、厳密な塗装条件の管理・制御を含む品質管理、そしてコンピュータ・グラフィックスへの応用である。

一方、分光光度計は数mmの直径を持つ測定アパーチャーのエリア内平均分光反射率係数を計測する。しかしメタリック・パール色の場合、それだけでは意匠性を含む特徴を捉えることは不可能で、特に粒子感やミクロ光輝感といったテクスチャに関連する要素の情報を得ることは出来ない。そこで最近ではデジタルイメージ情報を組み合わせる方法が開発されている。最近では、ポータブルシステムにCCDカメラを組み込んだ例が登場しており、画像処理によってスパークルに関するパラメータを計算し、単に分光反射率係数だけでなく粒子感を計測することが可能である。QCでの活用は勿論のこと、自動車補修システムの近似色検索用データベースに分光情報と併用することで、当該色処方の検索精度を高めることが期待される。

#### 4. 最近の測定システム

代表的なポータブル測定装置の光学幾何条件を図6に示した。ジオメトリー固定型システムは、米国X-Rite社がパイオニアとして知られている。当時ドイツ工業規格DINで規定された $45^\circ$ の照射角に対して正反射方向から $25^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $75^\circ$ の3角度で受光するシステム(商品名MA58)を開発したのが最初で、自動車塗装の品質管理や、ボディショップ等で用いられる補修用塗料の調色支援システム用センサーとして広く利用された。その後、米国規格のDuPontが考案した角度( $45^\circ$ の照射角に対して正反射方向から $15^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $110^\circ$ の3角度で受光)を組み合わせ、合計5角度で

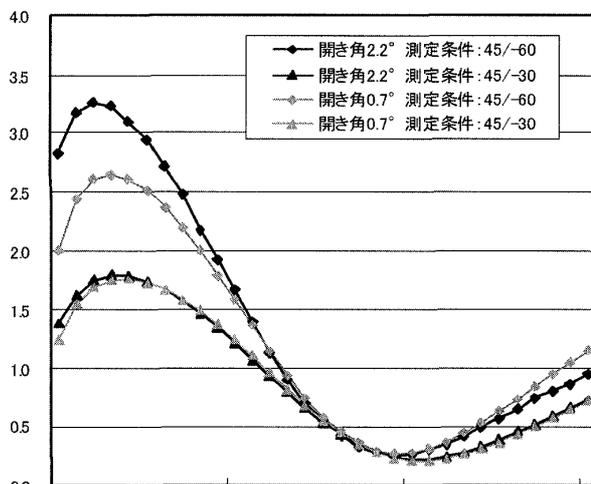


図4. 干渉パールの正反射に対する非対称性と開き角による計測値の影響(村上色彩技術研究所GCMS-4,GCMS-11 使用)

測定するシステムに発展、更に波長分解能の向上などの改良を加えMA68 IIとなった。

この他のジオメトリーを持つシステムとして、3つの異なる角度(25°、45°、75°)で円錐状に照明を行う装置(コニカミノルタセンシング社 商品名CM512m3)があり、曲面が多く存在する対象、例えば自動車や携帯電話等の外装色に対して安定な測定をねらったものである。単一方向からの照射/受光では、特に正反射近傍において僅かな角度のずれでも計測値が大きく変化するので、測定面の曲率に対する影響が大きい。円錐照明とすることで安定化を図っている。デスクトップ機の例では、DataColor社のFX-10があり、3方向の照射に対して、それぞれ正反射から正方向と負方向の両者の受光を備えている。この負方向のジオメトリーは、正反射光に対して非対称な、干渉を発色機構とするパール色の計測に対応している。

最近になってポータブル機が2機種、相次いで発表された。ひとつはBYK-Gardner社のもので、45度照射に対し6方向の受光による分光反射率係数の計測が可能で、更に3方向の照明に対するモノクロイメーシセンサーを組み込んだシステムが、2008年に市販開始された。メタリック・パール色の場合、使用される光輝材の粒子径や表面の反射特性、及び配向の条件から、粒子感やマイクロ光輝感といったテクスチャを計測

する必要がある。本機は画像センサーを備え、スパークルの大きさや強度の2つの粒子感に関するパラメータを照射角度毎に出力できるようにしたもので、これをポータブル機で実現している(図7参照)。尚、分光反射率係数を計測する受光6角度は、その5角度がMA68 IIと同様であるが、1角度は負方向の-15°を備えており、干渉色対応となっている。

X-Rite社からは新機種として、MA98が市販予定であり、こちらは15°と45°の2角度の照射と、正反射方向に対して、-15°、0°、15°、25°、45°、75°、110°の7角度と、25°の位置に正反射方向から左右それぞれ方位として25°、頂点に対して左右直角方向45度の合計11角度の受光系を備えている。干渉パール対策と同時に、塗装の配向状態を品質管理の一環として把握する為の工夫と、前述のBRDF測定の簡易型としての位置づけを持っている(図8)。このカテゴリーの機種の最近の傾向をまとめると、

- ① 干渉性パール色に対応すべく、正反射に対し負方向のジオメトリーを備える。
- ② アウトプレーンのジオメトリーを加え、簡易型の全方位計測を実現する。
- ③ イメージセンサーを備え、マイクロ光輝感や粒子感といった計測機能を実現する。

一方、ジオメトリー可変型システムは、村上色彩技術

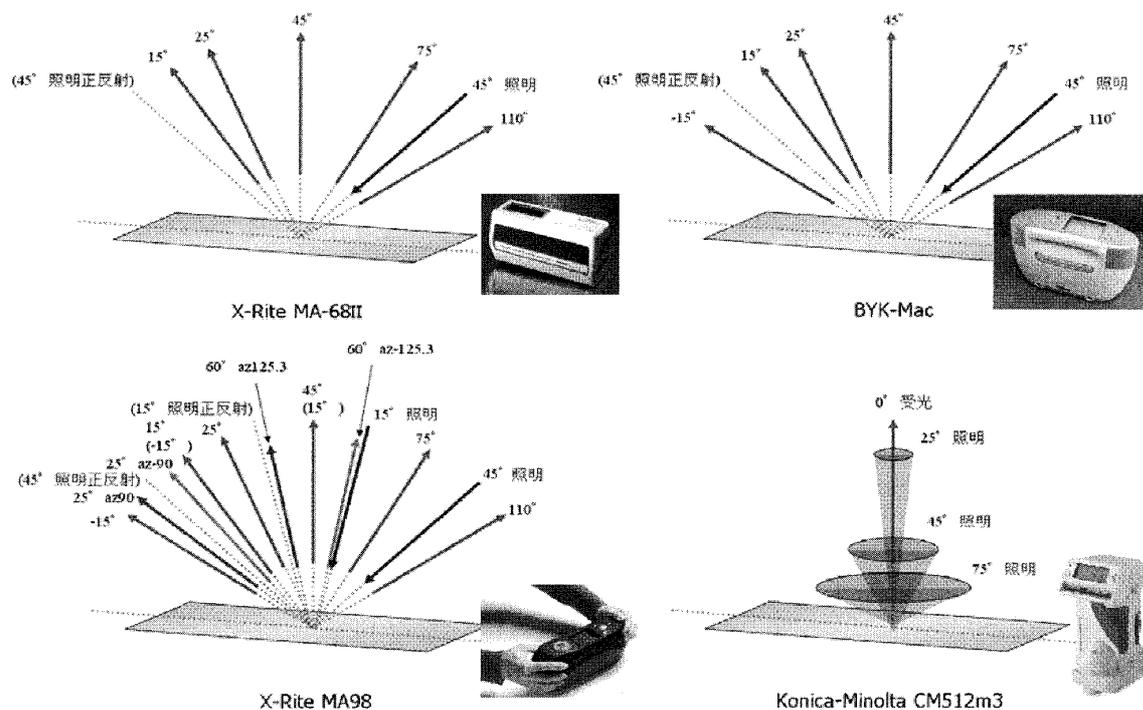


図6 各種ポータブルマルチアングル型分光光度計の例

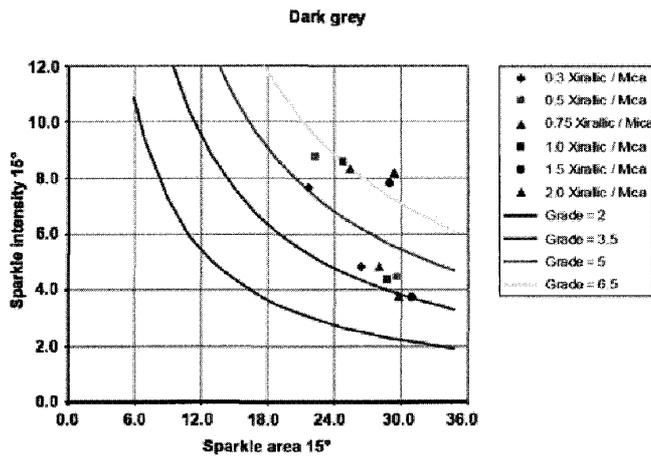


図7 BYK-Macで計測されたスパークル値

研究所や日本電色工業から市販されており、大型のシステムであるので、前述の受光の開き角が小さい。全方位測定に関しては、村上色彩技術研究所のGCMS-11、デジタルファッション社のOGM、海外ではIsoColor社が開発したRevolutionがある。

## 5. メタリック・パール色の評価

測色システムの進歩は目覚しく、製造シーンの多くで利用されている。しかし、製品の色判定での視感チェックの比重は依然として高く、完全な数値管理化には至っていない。特に日本はこの傾向が強く、原因は多種多様な意匠性の実現を必要とする塗料の表面構造のバリエーションを、簡単に的確に空間的に捉えられる光学ジオメトリーを備えたシステムが存在しないことや、色空間、色差判定式の不完全さ、物理計測と視感判定時の観察条件の不一致により引き起こされる判定不信感が払拭できないなど、色彩理論の不理解を含め、様々な原因が存在する。教育・啓蒙の機会を多く設ける必要があると共に、色発現のメカニズムの研究と対応するシステムの開発、的確な工業規格の制定の3者を効率よく進める必要がある。

### 5.1. 色差の評価

メタリック・パール色では、正反射に近い角度では、分光反射率係数が100%を超えることを想定する必要がある。これは完全拡散白色面を反射率係数の100%の基準としているからで、指向反射を起こす場合、反射光は拡散せずに正反射方向にエネルギーが集中する。この状況に対応する色差計算式として、代表的な2例を紹介する。ひとつはCIEの $\Delta E^*_{00}$ 式である。詳しい解説は、本号の他の特集原稿で記載されるので、そちらを参照頂きたい。計算式は、

$$\Delta E^*_{00} = \{ (D_L)^2 + (D_C)^2 + (D_H)^2 + R_T(D_C) \cdot (D_H) \}^{1/2}$$

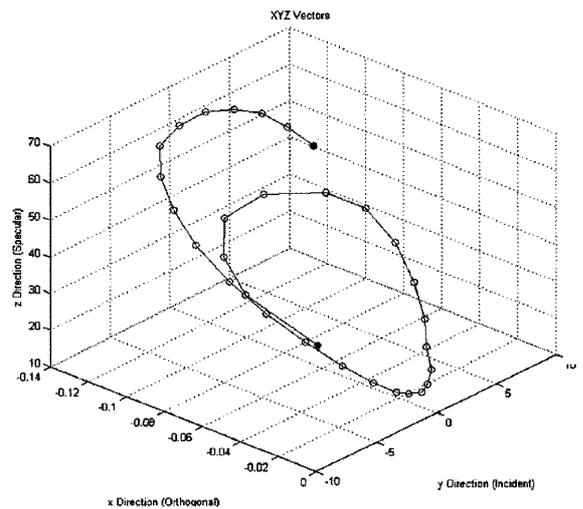


図8 X-Rite MA98で計測された反射率係数変動値の3次元プロット

$$D_L = \Delta L^* / k_L S_L \quad D_C = \Delta C^* / k_C S_C \quad D_H = \Delta H^* / k_H S_H$$

本式は、 $k_L$ 、 $k_C$ 、 $k_H$ の値を調整することで、ソリッド色からメタリック・パール色に至るまで多用途に利用できるように配慮されている。

一方、ドイツ工業規格にはDIN6175-2があり、筆者がヨーロッパの主要顔料・塗料メーカーを訪ねて調査した感触では、利用者からの評判はすこぶる良い。計算式を以下に示す。ここで $\gamma$ は効果角(45度で照明した場合の、正反射方向からの受光角)で、25°、45°、75°、110°の4角度が用いられる。

$$L^*(\gamma) = \{ L^*_{ref}(\gamma) \cdot L^*_{prob}(\gamma) \}^{1/2}$$

$$C^*(\gamma) = \{ C^*_{ref}(\gamma) \cdot C^*_{prob}(\gamma) \}^{1/2}$$

$$S_L(\gamma) = 0.15 \{ L^*(\gamma) \}^{1/2} + 31.5 / \gamma$$

$$S_C(\gamma) = \max[0.7, 0.48 \{ C^*(\gamma) \}^{1/2} + 0.35 \{ L^*(\gamma) \}^{1/2} + 42 / \gamma]$$

$$S_H(\gamma) = \max[0.7, 0.14 \{ C^*(\gamma) \}^{1/2} + 0.2 \{ L^*(\gamma) \}^{1/2} + 21 / \gamma + 0.7]$$

無彩色の場合：

$$(C^*_{ab} < 10) \text{ または } \text{パステル色} (C^*_{ab} < 10 \text{ かつ } L^*_{ab} > 27)$$

$$S_a = 0.7, \quad S_b = 0.7$$

$$\Delta E^*_{ab}(\gamma) = \{ \{ \Delta L^*(\gamma) / (g_L \cdot S_L(\gamma)) \}^2 + \{ \Delta a^*(\gamma) / (g_a \cdot S_a(\gamma)) \}^2 + \{ \Delta b^*(\gamma) / (g_b \cdot S_b(\gamma)) \}^2 \}$$

有彩色を除外する場合：

$$(C^*_{ab} > 10) \text{ ただし } \text{パステル色} (C^*_{ab} < 10 \text{ かつ } L^*_{ab} > 27)$$

$$\Delta E^*_{CH}(\gamma) = \{ \{ \Delta L^*(\gamma) / (g_L \cdot S_L(\gamma)) \}^2 + \{ \Delta C^*(\gamma) / (g_C \cdot S_C(\gamma)) \}^2 + \{ \Delta H^*(\gamma) / (g_H \cdot S_H(\gamma)) \}^2 \}$$

$\Delta E_{ab}(\gamma)$ と $\Delta E_{CH}(\gamma)$ は境界領域で同じ色差にならないため、次式で平滑化される。

$$Co(\gamma) = 10 + 8 / \{1 + e^{(27-L(\gamma))}\}$$

$$\sigma(\gamma) = 1 / \{1 + e^{(C^*(\gamma) - Co(\gamma))}\}$$

$$\Delta E_{\text{eff}}(\gamma) = \sigma(\gamma) \cdot \Delta E_{\text{ab}}(\gamma) + \{1 - \sigma(\gamma)\} \cdot \Delta E_{\text{CH}}(\gamma)$$

$g_L, g_a, g_b, g_c, g_h$ は、適用目的に応じて変更する係数で、塗料の受け入れ検査では、

$$g_L = 1.0 \quad g_a = 1.0 \quad g_b = 1.0 \quad g_c = 1.0 \quad g_h = 1.0$$

塗装後の検査を行う際には、

$$g_L = 2.0 \quad g_a = 1.2 \quad g_b = 1.2 \quad g_c = 1.8 \quad g_h = 1.2$$

で判定を行う。尚、DIN6175-2 はパール色の判定を対象外としているが、 $\Delta E^*_{00}$ は、パール色も判定対象である。 $\Delta E^*_{00}$ とDIN6175-2の互換性は、 $\Delta E^*_{00}$ 計算式中の $k_L, k_C, k_H$ が4:3:2の場合、ほぼ同等の値が得られるとしている。

## 5.2. フロップの評価

メタリック・パール色の光学特性のひとつがフロップ感である。これを数値的に規定しているのが、Dupontが開発したフロップ指標(Flop Index)である。計算には効果角が15°、45°、110°の3角度の $L^*$ 値を用い、基本的には15°と110°の $L^*$ の違いを45°で正規化する形で求められる。計算式を以下に示す。この値が大きいほどフロップ感が強い。

$$F.I. = 2.69 \cdot (L^*_{15} - L^*_{110})^{1.11} / (L^*_{45})^{0.85}$$

## 6. 今後の動向

### 6.1. 3DCGと計測

BRDF計測の目的のひとつに、3次元コンピュータ・グラフィックスへの応用がある。製品を開発する際、デザイナーは造形と共に質感を含めたカラーリングを同時進捗かつ迅速に行いたいところであり、理想を言えば、モックアップを作成する時間も短縮し、開発のリードタイムの減少と合理化を図ることが求められている。BRDF計測した結果をもとに、3次元のレンダリングを瞬時に行えれば、形状と色・テクスチャの決定をすばやく実行することができる。また、構成の混色を分光学的に計算し、BRDF情報に対応する分光反射率分布を予測することができれば、塗料メーカーと顧客であるデザイナーとのカラーコミュニケーションに大きな効果を発揮することができる。メタリック・パール色等、光学挙動の複雑な塗色のシミュレーションにおいては、全方位にわたる色彩値の予測はもとより、粒子感やミクロ光輝感といったテクスチャの再現予測も、実用的なデザインシステムには必要不可欠である。これらの開発も近年、画像の視覚に与えるパラメータの解析とともに進んできている。

### 6.2. シミュレーション技術

最近ではCCM(Computer Color Matching)システムを配合シミュレータとして活用する研究・開発が行われて色を発現する材料も、時々刻々と新しいものが生まれてきており、色彩の発現機構のモデル化と共に、測定システムの開発は常に継続していかなければならない宿命にあるといえる。現在の単一的な光学ジオメトリからBRDF計測の概念に基づくマルチアングル化が今後も益々進展し、視感との対応研究も盛んになっていくことが予想される。測定もマルチアングルによる2次元、あるいは3次元といった画像分光計測への展開も予想され、より重宝な情報の計測が期待される。

以上、塗料の光学計測に関し、将来展望も含めて論じてきた。この分野は、様々な光学的効果を有する顔料や塗色の開発が急進で、計測評価の技術は、まだ必要十分なレベルに至っていない。色彩をめぐる多くのシーンで経験者による視感判定に頼っているのが現状であり、相当の研究の余地が残されているものと考えている。諸兄のご参考になればと願う次第である。

尚、分光光度計メーカーより本原稿の執筆に際し、資料提供のご協力を頂いた。感謝の意を述べたい。

### 参考文献

- [1]井上：色彩管理について 加工技術 Vol23 No9 pp.18-22 (1998)
- [2]新田：パール顔料の研究開発動向 機能性顔料の技術 シーエムシー出版 pp37-50 (2004)
- [3]中塚：色彩計測の技術動向 DIC Technical Review No.5 pp9-16 (1999)
- [4]服部：第9回色彩光学コンファレンス論文集pp11-14 (1992)
- [5]中島：日本色彩学会誌, 16(1) pp69-70 (1992)
- [6]馬場：カラーフォーラムJAPAN'96論文集 pp71-74 (1996)
- [7]大住：CCMと塗料 日本色材協会誌 Vol.80, No.12,pp.530-536 (2007)
- [8]大住：塗料の光学特性と計測方法 最新顔料分散ノウハウ集 技術情報協会, pp328-348 (2008)
- [9]「New Measurement System for Characterizing Total Color Impression of Effect Coating」 ECS Nurnberg May 9th, 2007