

特集 測色の基礎から色再現まで

混色理論と色再現について

Color Matching Theory and Color Reproduction

高橋 譲

Yuzuru Takahashi

住化カラー（株）

Sumika Color Co., Ltd.

はじめに

混色を行い目的の色を創り出すには様々な方法がある。テレビのように光の混色により目的の色を出す加法混色。カラー写真のように重ね合わせたフィルター層により色を再現する減法混色。さらには同じ減法混色ではあるが、染料や顔料などの色材の混合により指定された色に調色する方法などがある。

テレビやカラー写真の分野は一定の決められた色再現システムの中、すべての色をその定められた方式で再現を行うのに対して、色材の混合による調色では、単に様々な被着色材料に着色するだけでなく、客先の個々の要求（各種物性の保持）に対して最も適切な色材を選定し対処する必要がある、複雑なものとなっている。¹⁾ この色材を使った減法混色について説明する。

1. 色材

色材による減法混色を工業的にやっている分野として、繊維染色、ペイント、インキ、樹脂（プラスチック）着色、化粧品などがあげられる。これらの分野で使用される色材が染料と顔料である。減法混色理論に基づき調色を行う場合、染料、顔料ともに製造工程等の問題で、実際の調色時には必ずしも混色理論通りにならないことがある。これを補うため、それぞれの色材の性質を調査し、適切な計算補正などを行い、良好な結果が得られるように処理を行うことが一般的である。このため、単にこれから説明する混色理論を理解するだけでなく、染料、顔料個々の色材に関する知識も身に付けることが必要である。ここではこの2種類の色材の性質について説明する。

1-1. 染料

染色分野では主に染料が使われている。染料は被着色材料中に分子状態で溶解したり、結合したりして、その物質に特定のスペクトルの波長帯において強い光の吸収を与える化学物質をいう。したがって染料分子自体が光を吸収するような分子構造をもっていなければならないし、被着色材料に対して親和力をもっていなければならない。単に溶解しているだけでも色がつくが、堅ろう度が弱く実用価値は低い。この親和力は化学結合であったり、ファンデルワールス力であったりする。繊維を染色する場合は、水中に溶解している染料分子が親和力によって逐次繊維に吸着され、何らかの力によって繊維に結合する必要がある。染料はこのような親和力とか染着性というような性質の影響を受け、必ずしも完全に分子状態で染着するとは限らないので、混色結果が理論通りにならないこともある。

1-2. 顔料

ペイント、インキ、樹脂着色、化粧品などの分野では主に顔料が使われる。顔料はそれ自体が微粒子であり、その粒子が持っている色によって、被着色材料に対して色を与える。顔料は製品となった時点では、細かな結晶が凝集した二次粒子である。しかし、このままで被着色材料に添加、混合しても、顔料のもつ特性を発揮させることはできない。このため被着色材料中にできるだけ0.01～10 μ mといった一次粒子に近い状態になるまで、分散させる必要がある。塗料、インキ、樹脂着色の製造工程はほとんどがこの分散工程といえる。また顔料はその粒子の大きさが光の吸収や散乱に大きく影響する。粒子を小さくすると散乱による

反射光が低減するため、色が鮮やかになり、着色力が增大するが、隠ぺい力が低下する。顔料の場合は、この分散工程の差異により混色結果が理論通りにならないことが多い。用いられる色材の性質を如何に正確に理解しているかがポイントとなる。

2. 色材の減法混色理論

色材は被着色材料中で複雑に散乱あるいは吸収した光が被着色材料表面から反射光あるいは透過光というかたちで眼に入り、色として知覚される。

着色体では、次のようなメカニズムで特有の色を与える。可視光の一部が表面で反射された後、残りの光が着色体に入射する。着色体内の光は一部が色材に吸収され、吸収されない光が種々の方向に散乱する。この一部の散乱した光が再び着色体から表面層へ戻り、特有の色を与える。

混色理論は色材の光学的な性質を定量化し、色材を混合した結果を計算によって予測する方法に関する理論である。この予測は通常分光光度計から得られる分光立体角反射率あるいはこの反射率から計算される三刺激値 (X、Y、Z) や $L^*a^*b^*$ 値によって行われる。

混色結果の予想方法は測定される物体の光学的性質によって不透明体、半透明体、透明体に分けられる。この中で不透明体、透明体に関しては比較的初期に技術確立も完了し、調色工程で使用されるようになったが、半透明体の場合はその光学的な性格のため難易度が高い分野に位置付けられる。

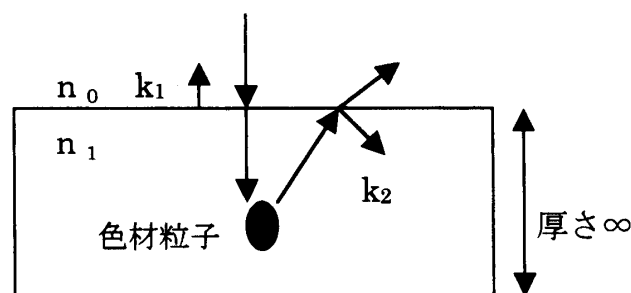


図-1 不透明体の光学モデル

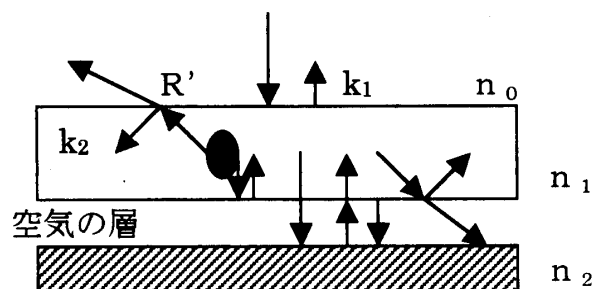


図-2 半透明体の光学モデル

2-1. 不透明、半透明、透明の各光学モデル

不透明体、半透明体に対して混色理論を適用する場合の光学モデルを想定すると図-1、図-2のようになる。²⁾

図-1、図-2の n_0 、 n_1 、 n_2 は境界面における屈折率を表し、一般的には $n_0 \neq n_1 \neq n_2$ の関係にあるが、 $n_1 = n_2$ の場合もある。

混色理論を適用する場合、測定で得られた反射率をそのまま使用して計算したのでは混色結果の予測計算はできない。使用される反射率は理想状態におけるもので、空気との境界面における反射の影響のない自然状態の反射率でなければならないためである。

したがって混色理論に使用される反射率は、通常の測定値としての分光反射率に補正を行って求める必要がある。また隠ぺい性が不十分な場合は白および黒の2種類の下地によって測定し、反射率の補正を行って R_∞ を求めることになる。補正式の中で最も一般的に使用されているものが式-1に示すSaundersonの補正式である。³⁾

$$R = (R' - k_1) / ((1 - k_1)(1 - k_2) + k_2 R' - k_1 k_2) \quad (\text{式-1})$$

この式で R' は実測反射率、 R は補正後の理想状態の反射率を表す。また k_1 は試料表面における鏡面反射率、 k_2 は表面における内部散乱光の内面反射率を示す。ここで k_1 は境界面における屈折率から式-2で計算することができる。プラスチックやガラスなどでは、その屈折率 ($n \approx 1.5$) から計算すると $k_1 = 0.04$ 程度が妥当とされるが、近年ではブルー、グリーンを中心に低反射率となるものも増加しており、その点を考慮した係数の決定を行うと、 $k_1 = 0.035$ になるケースもある。また k_2 も $k_2 = 0.55$ を使用するのが一般的であるが、歯科関係の半透明セラミックのCCMでは $k_2 = 0.58$ が最適値となっている。

$$k_1 = \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 \quad (\text{式-2})$$

n : 境界面における屈折率

またSaunderson補正式は繊維のような表面形状のものには適用できないため、Pineoの式⁴⁾、Finkツ Jensenの式⁵⁾などの補正式が提案されている。

次に透明体に混色理論を適用する場合の光学モデルを想定すると図-3のようになる。⁶⁾

光が板状の透過性の物体に入射角 0° (垂直方向からの入射) で入射、透過した場合は、図-3のように空気との両境界面において反射 (k_1) を生じる。混色理論を適用す

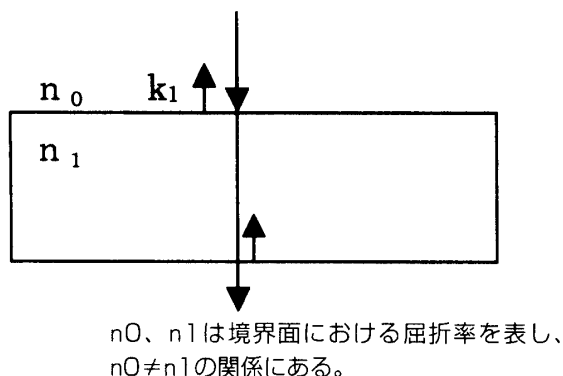


図-3 透明体の光学モデル

場合、これらに対する透過率補正が必要である。

この透過率の補正には式-3が使用される。⁷⁾

$$T' = (1 - k_1)^2 T / (1 - k_1^2 \cdot T^2) \quad (\text{式-3})$$

ここで、 T' は測定値、 T は理想状態における透過率、 k_1 は鏡面反射率をそれぞれ表している。

2-2. 不透明体の混色結果の予測方法

KubelkaとMunkの理論^{8) 9) 10)}の説明はここでは省略するが、図-1のように被着色体の厚さが十分に大きく無限大（ ∞ ）に近い場合は、下地の反射率 R_0 が影響しないので、反射率 R_∞ と吸収係数 K 、散乱係数 S との間には式-4のような簡単な関係が成り立つ。

$$K/S = (1 - R_\infty)^2 / 2R_\infty \quad (\text{式-4})$$

一般的な色材を用いた不透明体の混色計算には、このKubelka-Munkの理論が以下のような理由で利用されている。

- ◇三刺激値、反射率などには、加法性が成り立たないのに対して、Kubelka-Munkの理論で計算される K 、 S 値は次式のような加法性（Duncanの加法性¹¹⁾）式-5が成り立つ。

$$(K/S)_m = \frac{(K_1C_1 + K_2C_2 + \dots + K_iC_i)}{(S_1C_1 + S_2C_2 + \dots + S_iC_i)} \quad (\text{式-5})$$

$(K/S)_m$ ：混色結果の K/S 値、 $K_{1\sim i}$ 、 $S_{1\sim i}$ ：各色材の K 、 S 値、 $C_{1\sim i}$ ：各色材の濃度

- ◇その後発表されている理論に比べ、計算式が単純であるため、E. Allen^{12) 13)}などのようにこの式を基本にした色合せ処方計算用の行列計算式やファジー、ニューラルネットワークといった計算処理式を作成しやすい。

- ◇Saundersonの反射率補正式と組み合わせることで、工業的なレベルで精度も得られている。

不透明体の混色結果の予測方法は、式-5にそれぞれの色材の配合量が入力されると、 $(K/S)_m$ が計算

できる。 $(K/S)_m$ から式-4の逆算で R_∞ （混合された分光反射率）が計算され、さらに式-1の逆算で目標色と比較できる分光反射率が計算できる。したがって色材の配合量が求めれば、混色結果の X 、 Y 、 Z を計算できることとなる。詳細は図-4のフローチャートで説明する。

2-3. 半透明体の混色結果の予測方法

実際の工業的な利用では、下地の色の影響を受けることが多く、不透明体の理論に対してさらに工夫が必要となった。下地の影響を考慮した式として利用されているのがKubelkaの1948年の理論¹⁰⁾となる。この式は下地の反射率 R_0 の上に単位厚さ当りの吸収係数 K 、散乱係数 S の着色層が膜厚 X で存在する着色体の反射率を計算するものである。

透けの影響を受ける半透明試料の K 、 S 値を求める場合、まず厚さ無限大の状態にした場合の反射率 R_∞ を求める必要がある。この R_∞ を計算する場合、湊¹⁴⁾が発表した、反射率が大きく異なる2種類の下地の反射率とこれらを下地として測定した反射率とから R_∞ を求める方法が一般的に用いられているが、ここでは省略する。

正確な R_∞ が求めれば、 K/S 、 K 、 S 値などが求まるので、前記の不透明の理論が利用できる。印刷、樹脂着色のような半透明原料を多く用いる場合には、湊の理論が有効であるが、実際にこの理論を利用する場合、次の点に留意が必要である。

<半透明体測定における留意点>

- ◇分光光度計で測定する場合、試料の側面から光の漏れ（エッジロスエラー）が発生し、精度を低下させることが考えられるため、できるだけ試料の厚みを薄くする。
- ◇重ねた層の間に空気層ができると、その部分で反射率が高くなる。この点を考慮し2種類の層をできるだけ密着した測定を行う。しかし下地を使用する材料によっては、密着させることが難しい場合や密着できても、測定方法が複雑となり個人差が出てしまい測定再現性が悪いという問題が発生する。通常2種類の下地には白と黒のバックを用いることが多いが、特に黒バックの測定が困難である。このため、最近では0%調整に使用されるブラックトラップを試料の裏におき、黒バックの代わりに測定するなどの工夫が行われている。
- ◇できるだけ広い面積に光を照射して、中央の狭い部分を受光するような機器の利用が必要である。

半透明体の混色結果の予測方法は、まず不透明体と同様の方法で許容範囲内の各色材の配合量を計算する。しかし、この計算では単に各色材の配合比率が計算できたにすぎず、この配合比率をもとに、散乱係数 S 値を利用して、被着色材料中への添加量を計算¹⁰⁾しなければならない。最後に決定した色材添加量では被着色材料の影響力が変化するため、色材の配合比率の再計算を行うこととなる。

2-4. 透明体の混色結果の予測方法

微量の染料を配合した透明体試料はフリースタンディングの状態では空気層の透過率を基準として分光透過率が測定される。この分光透過率を T として三刺激値を計算することによって表色が行われる。透明体試料の吸収係数 K は式-6にて求められる。¹⁵⁾

$$K = -\log_e T / CX \quad (\text{式-6})$$

T は式-3の逆算により補正された分光透過率で、 C は染料の添加濃度、 X は厚さである。

透明体の混色結果の予測方法において基本となるのは任意の濃度で添加混合した場合の分光透過率を予測する方法であり、式-7によって計算される。¹⁶⁾

$$K_m = K_1 C_1 + K_2 C_2 + \dots + K_i C_i + K_s C_s \quad (\text{式-7})$$

この式で K_m は混色された吸収係数、 $K_{1 \sim i}$ は各染料の吸収係数、 K_s は被着色体の吸収係数、 $C_{1 \sim i}$ は染料の添加量、 C_s は被着色体の量を表している。また $C_{1 \sim i}$ と C_s の関係は $C_1 + C_2 + \dots + C_i + C_s = 1$ とする。

透明体の混色結果の予測方法は、染料の添加濃度が決定すれば、式-7から K_m が計算できる。 K_m から式-6の逆算で T_m （混合された分光透過率）が計算され、さらに式-3でフリースタンディングの分光透過率が計算できる。したがって染料の添加濃度が決定すれば、混色結果の X , Y , Z を計算できることとなる。

3. 混色理論を用いた調色処方の計算

3-1. 基礎データ作成方法

まず調色計算を行う場合、前準備として透明体原料の場合は K 値および不透明体・半透明体原料の場合は K , S 値を計算できるような試料の作成が必要となる。理論上は、透明体では1点の試料が、不透明・半透明体では、レットダウンサンプルを作成する白色顔料の K , S 値が求めてあれば、2点の試料があれば計算も可能であるが、実際の計算では、レットダウンサンプルを3~8点程度作成し、計算することで精度の向上を図るなどの努力がなされている。このような試料をどのような配合で何点作成するか、作成するためにど

のような色材や添加剤を使用するか、などの作成方法には、各社それぞれの思想があり、様々なものとなっている。いずれにしても、この作成方法に基づき、いかに正確に各色材の試料が作成されたかで、その後の調色計算精度に大きな影響を与える。

3-2. 調色処方の計算方法

調色を行うために色材の配合処方を計算するには今まで述べてきた混色理論における混色結果の予測方法の逆算を行えばよい。図-4に不透明体を例にしたフローチャートを示す。

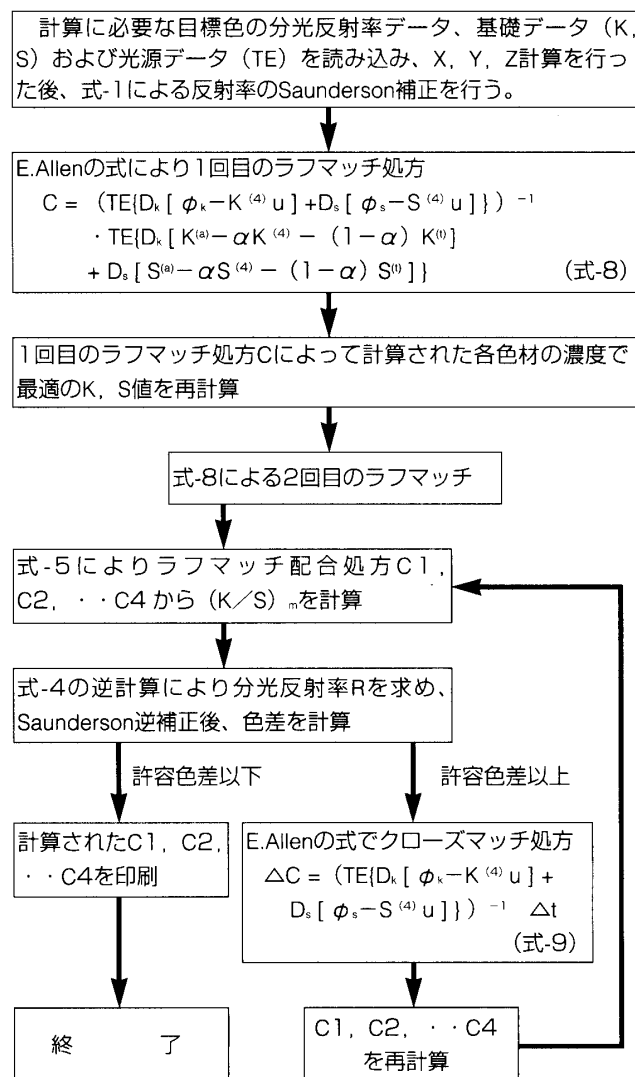


図-4 調色処方の計算フローチャート

C は各色材の濃度、 T はCIE等色関数、 E は標準の光の分光分布を表す以下のような行列式である。

$$C = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_4 \end{bmatrix} \quad (\text{式-10})$$

$$T = \begin{vmatrix} \bar{X}_{400} & \bar{X}_{420} & \cdots & \bar{X}_{700} \\ \bar{Y}_{400} & \bar{Y}_{420} & \cdots & \bar{Y}_{700} \\ \bar{Z}_{400} & \bar{Z}_{420} & \cdots & \bar{Z}_{700} \end{vmatrix}$$

(式-11)

$$E = \begin{vmatrix} S_{400} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & S_{420} & \cdots & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & \cdots & S_{700} \end{vmatrix}$$

(式-12)

D_k , D_s は以下の式で表される対角行列である。

(式-13、14の*i*は各波長を示す。)

$$d_{k,i} = dR/dK = -2R / (S(1-R^2)) \quad (\text{式-13})$$

$$d_{s,i} = dR/dS = R(1-R) / (S(1+R)) \quad (\text{式-14})$$

$$D_k = \begin{vmatrix} d_{k,400} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & d_{k,420} & \cdots & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & \cdots & d_{k,700} \end{vmatrix}$$

(式-15)

$$D_s = \begin{vmatrix} d_{s,400} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & d_{s,420} & \cdots & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & \cdots & d_{s,700} \end{vmatrix}$$

(式-16)

ϕ_k と ϕ_s は各色材の基礎データであり、以下のよう
な行列式で表される。

$$\phi_k = \begin{vmatrix} K_{400,1}, K_{400,2}, \cdots, K_{400,4} \\ K_{420,1}, K_{420,2}, \cdots, K_{420,4} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ K_{700,1}, K_{700,2}, \cdots, K_{700,4} \end{vmatrix}$$

(式-17)

$$\phi_s = \begin{vmatrix} S_{400,1}, S_{400,2}, \cdots, S_{400,4} \\ S_{420,1}, S_{420,2}, \cdots, S_{420,4} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ S_{700,1}, S_{700,2}, \cdots, S_{700,4} \end{vmatrix}$$

(式-18)

$K^{(a)}$, $S^{(a)}$ は色見本の K , S 値であり、 $K^{(4)}$, $S^{(4)}$ は
第4番目の色材に関するものである。通常ここには、
色材濃度が多少変化しても、あまり影響しない白色顔
料を用いる。 $K^{(0)}$, $S^{(0)}$ は被着色物の K , S 値である。ま
た α は色材の添加比率の合計である。クローズマッチ

で用いられている Δt は標準と計算値との三刺激値の
差を表している。 ΔC は C_1 , C_2 , C_3 の3種の色材に対
するものなので、ここでの第4成分 C_4 は変化しない。

4. 混色理論を用いた調色精度

調色精度は年々厳しく、多様化した判定が必要な方
向にある。現在の日本国内での最終判定はほとんどの
業界で目視判定が行われており、仮に測定された色差
の数値が小さい場合でも不合格となるケースがまれに
発生する。この問題は幾何学メタメリズムと照明メタ
メリズムに起因するものである。調色精度を評価する
場合、この要因も配慮した総合的な判定をしなければ
ならない。

一方海外では、ヨーロッパ、アメリカは測定データ重
視の方向であり、その合格範囲はCIELAB色差値で $\Delta E=0.5 \sim 1.0$ 程度が一般的である。東南アジアも測定
データ重視の方向であるが、日本の影響を受け、その
要求精度はさらに厳しいものとなっておりCIELAB色
差値で $\Delta E=0.3 \sim 0.5$ を要求されることが少なくない。
このような状況の中、色材による調色処方計算を行う
場合、以下の留意点を考慮した調色を行うことができ
れば、調色精度は極めて良好な精度を発揮する。(1
回ないしは2回のトライアルで合格範囲 $\Delta E=0.3 \sim$
 0.5 にある調色試料を作成できる。)

最近ではCCMシステムを利用した調色を行うところ
が増えているが、次の点を十分配慮した使用方法が必
要である。

<調色精度向上のための留意点>

◇不透明体という認識で調色を進めていても、測定
データには下地の影響が含まれる場合が多い。下
地を変えた測定を行い、その影響を調査する必要
がある。

◇色材の製造過程による影響や調色時の混合過程で
の影響を極めて受けやすいので、色材ロットの管
理、色材の保存方法には十分注意が必要となる。

◇彩度の高い見本には蛍光成分が含まれているケー
スが多いので、分光反射率曲線などのデータに十
分注意を払う。

◇調色担当者の計量精度に関しても、記録の残るデ
ジタル天秤などを使用して十分注意を払う。仮に
計量精度が5%狂うと、試料の色相によっても異
なるが、CIELAB色差値で $\Delta E=0.5 \sim 1.0$ 程度の
差となる。この点を考慮しなければならない。

◇不透明・半透明体試料の場合、調色見本と調色ト

ライアル試料の表面状態の関係がどのようになっているか調査しておく。

◇透明体の場合、紫外線吸収剤など紫外線や赤外線部に吸収をもった添加剤が多く用いられる。このような場合にはX、Y、Z値に対して予測計算をするメタメリックマッチではなく、透過率に対して予想計算を行うアイソメリックマッチを使用しなければ適正な色材選択ができない。しかしアイソメリックマッチでは収束効率が極めて悪くなるため、両方の利点を併用した方法を工夫する必要がある。

5. 色彩データの伝達に向けて

各方面でデジタル化が進む中、色彩関連業界でも異なったデバイス間での正確な色再現について様々な検討が進められている。すでに欧米では異デバイスを結ぶ有効なソフトウェアなども発表されているが、今後さらなる技術革新が望まれる。我々のような減法混色理論を用いたCCMシステムを開発するものとしても、積極的に異デバイスの知識を身に付け色再現技術の近代化を進めていかなければならない。この技術が確立できれば、デザイナーがイメージした色がそのまま画像データの形態で伝達できるなどの利点も多く、業界全体の大きな変革につながる。しかしこの技術の確立のためには、CCMシステムを使用した調色を推進する側として、以下に述べる課題が解決されなければ、受け渡しされたデータの信頼性を欠き、最終的には物体色試料の付属的なものになってしまう。色彩関連産業がさらなる発展期を迎えていくためにも、各分野の技術者が分野の枠を越えて真剣に課題の解決に取り組むべきではないかと思う。

① 色再現方法の統一化

機器の設計に関しては各メーカーがそれぞれの思想のもとに行っており、機器や計算システムが変われば色彩データも変わり、調色計算された結果も異なったものとなる点などが工業化段階での障害となっている。今後各社が協力して基準の設定を早急に進めていく必要性を感じている。

② 表面状態（光沢）の差異による目視イメージとの違いを追求

色材の添加量の高い低反射率試料において、微妙な表面状態の差が光沢の差となり、目視評価結果と異なる場合がある。このため日本国内では未だに目視評価結果優勢となっている。この結果が工業的に色彩関連

製品を販売している業界において合理化の大きな妨げとなっている。

この問題に関して最近ではゴニオスペクトロフォトメーターを用いた研究が進んでいる。この研究をいかに精度よく工業的なレベルで普及できるものにするかがひとつの課題である。

③ 色材の安定供給

色彩データが伝達され、正確な調色が行われるためには安定した発色性の色材が選択されなければならない。我々のような顔料を製造、加工するものにとって、一定の製造方法および評価方法に基づいて安定した発色の色材供給に努めていくことが使命である。

<参考文献>

- 1) 納谷嘉信：産業色彩学，11.3，株式会社 朝倉書店 (1980)
- 2) 村田幸男：色彩技術ハンドブック，256，株式会社 総合技術センター (1990)
- 3) J.I.Sauderson: J. Opt. Soc. Am., 32, 727(1942)
- 4) O. W. Pineo, U. S. Patents 2, 194, 910 および2, 218, 357 (1940)
- 5) Fink-Jenson, FATIPEC III, 203(1955)
- 6) 村田幸男：色彩技術ハンドブック，259，株式会社 総合技術センター (1990)
- 7) D. B. Judd and G. Wyszecki: Color in Business, Science and Industry Third Edition, John Wiley & Sons (1975)
- 8) P. Kubelka, F. Munk, Z. tech. Phys., 12, 593 (1931)
- 9) D. B. Judd and G. Wyszecki: Color in Business, Science and Industry Third Edition, John Wiley & Sons (1975)
- 10) P. Kubelka, J. Opt. Soc. Am., 38, 448 (1948)
- 11) D.R. Duncan, J. Oil Colour chem. Assoc., 45, 300 (1962)
- 12) E.Allen: J. Opt. Soc. Am., (1966)
- 13) E.Allen: J. Opt. Soc. Am., (1974)
- 14) 湊幸衛：千葉大学工学部研究報告，19, 36, 203(1968)
- 15) 村田幸男：色彩技術ハンドブック，290，株式会社 総合技術センター (1990)
- 16) 村田幸男：色彩技術ハンドブック，290，株式会社 総合技術センター (1990)