(色材, 52〔4〕186-194. 1979)

コンピューターカラーマッチング (CCM)

佐 野 和 雄*

1. はじめに

日常使っている生活用品は、ほとんどのものが彩色されており、もしこれらが彩色されていなかったならば、どんなに味気ないことだろう。自動車、家電、家庭用品、衣類、住宅等の最終製品の色が付けられる過程を大別すると、色を設計するデザイン段階、製品に着色する段階、着色剤を製造する段階に分けられ、一般的には企業分担化されている。つまり、最終製品メーカー、中間製品メーカー、着色剤提供メーカーがあり、調色工程を持つものは、着色剤提供メーカー、ないし中間製品メーカーである。一方、調色された着色剤から最終製品になるまでには、何段階かの色のチェックが行なわれ、最終製品メーカーにとっては、このチェックの方が重要な課題となる。要望する色を作り出す調色作業は、一般には作業者の経験と勘によって行なわれており、非常に手間のかかる仕事である。このため調色作業の合理化は、着色剤を取り扱う業界にとって従来からの大きな課題であった。

機器による調色は、1950年代から研究が活発化し、当初はアナログコンピューターを使用したものが多数発表された^{1,2,3)}。近年、エレクトロニクスの発展に伴って、高精度な分光光度計およびミニコンピューターが普及し、CCM も実用段階に入っている。実際の利用にあたっては、いくつかの応用展開が必要とされるが、その内容は各社のノウハウとなっており、公開されていない。文献類も限られており、そのほとんどが基礎的な研究論文である。本稿では、文献による説明の他に、顔料用 CCM の実用の経験から、多少の考察を交えて話を進めたい。

2. ハードウェア

CCM のシステム構成の中で、精度を左右するものは

昭和 54. 1. 8 受理
Computer Color Matching
Kazuo SANO

* 大日精化工業(株)合成樹脂応用技術部
東京都足立区堀の内 1-9-4 (〒123)

分光光度計であり、種々のタイプがあるのでその選択は重要な問題である。電算機はインハウスを使用する場合と、外部の大型電算機と回線で接続する場合とがある。

2.1 システム構成

CCM のシステム構成は、その運用規模によって大きく変るものであるが、インハウスの場合の一般的なシステム構成を図-1 に示す。ここで CPU はフォートランコンパイラー等を含めて 40K バイト程度が必要とされる。補助記憶装置は染顔料の選択でダイレクトアクセスの可能なディスク装置の使用が多い。また、分光反射率データをインターフェースによって直接電算機に入力する方法と、紙テープ等の外部出力媒体を通じて入力する方法とがあるが、前者は CCM 専用コンピューターとして、1 バッチの処理時間が速い利点がある。後者は複数台の分光光度計のデータ処理や、数十色のデータを連続して処理したり、多目的に電算機を利用する場合に有利である。複数端末機をタイムシェアリングで処理するには、かなり大型の電算機が必要とされるので、インハウスで CCM だけの利用ではコストメリットが出にくい。この場合には、外部の TSS (タイムシェアリングサービス) を利用した方が得策な場合がある。

2.2 分光光度計

CCM に使用される分光光度計は、従来の視感調色における人間の眼の代役を果たすわけであるから、その精度は人間の眼に匹敵するほどの判別能力がなければなら

図-1 一般的な CCM システム構成

ない。分光光度計の精度が悪ければ、いかにすぐれたソフトウェアを使用しても、根底になる測色データに誤差が含まれるために、CCMの精度は低下してしまう。また、後に述べる(7)式の K/S 値は図-2のように反射率の低下に従い指数的に増加し、黄色顔料、赤色顔料の短波長側、青色顔料、緑色顔料の長波長側の反射率は図-3のように、ほぼ黒色顔料と同じ反射率を示す。よって、これらの混色物である色見本からそれぞれの着色剤成分に分解するには、低反射領域で0.02%程度の繰返し精度が要求される。また、CCMで処理するには、あらかじめ染料の光学特性をファイルに登録する必要があるが、これらのデータはそれぞれ測定日が異なるのが通常であり、当然日間誤差が含まれてくる。このため、かなり長期間にわたる測定安定性が要求される。

現在市販されている分光光度計を大別すると、回折格子による分光と干渉フィルターによる分光の二つのタイプに分けられ、それぞれ特徴があり、データを比較した報文⁵⁾もある。光検知器としては、光電子増倍管を使用しているのが一般的であるが、最近では回折格子で分光したものをシリコンアレーで検知するものや、連続干渉

フィルターを使用するなどの高速測定が可能なものも市販されている。また、反射光を計測するので積分球の使用は不可欠であり、鏡面反射光を除いて計測したり、含めて計測したりできるように、ライトトラップの取りはずしは容易なものが良い。測定波長域は380 nmから700 nm前後であり、データ取り出し間隔も10 nmや20 nmのものがある。光源はハロゲンランプが一般的であるが、キセノンランプによるフラッシュタイプもある。光学系は光束照射-拡散受光のものと拡散照射-光束受光のものに分かれる。

いずれにしても、安定性のすぐれた分光光度計を選択することが不可欠であるが、その測光条件も十分考慮に入れる必要がある。つまり、分光光度計とソフトウェアは表裏一体であり、使用する分光光度計によってソフトウェアを変更する必要がある。干渉フィルターの蒸着膜のタイプを変更すると、各種ソフトウェアの適応度が異なることを筆者は確認している⁶⁾。干渉フィルターの選定について、一般的に次のことが指摘される。

(i) 分光性能を良くするために、フィルターの半幅は小さい方がよい。極端に小さくすると、光量不足となり、測定精度を悪くするので注意を要する。

(ii) 光量を多く得るために透過率の高い方がよい。

(iii) すそ切れの良いものがよい。すそ切れの悪いフィルターを使用すると、測定値には常に測定波長点以外の光をも測定する事になり、処方計算にも微妙に影響を及ぼす。

3. ソフトウェア

CCMのソフトウェアは対象にする媒体が、透明、半透明、不透明のいずれであるかによって異なる。透明媒体においては、Lambert-Beerの法則を使用したもの⁷⁾や、光学濃度を使用したもの^{8,9)}が報告されている。半透明媒体においては、拡散光束の他に平行光束を加えた四光束法が提案されている^{9,10)}。不透明媒体においては、基本となる理論は1931年に発表されたKubelka-Munkの二定数理論である^{12,13)}。以来、多くの研究者によって実用に適用しやすいように修正^{14~17)}されているが、その基本は変わっていない。現在では、不透明媒体においては、拡散光束の二光束法であるK-M理論で十分である、というのが一般的であり、CCMに最も多く使用されている。その他、多光束法も提案^{18~20)}されているが、配合計算までには応用されていない。

3.1 Kubelka-Munkの二定数理論

K-M理論の基本は混濁媒体において、反射率は媒体の吸収係数 K と散乱係数 S で表わすことができることを

図-2 反射率と K/S

図-3 顔料の分光反射率

図-4 混濁媒体中の拡散光束モデル

示している。図-4 の厚さ X の媒体中の微小単位 dx において、光束 I と同一方向に進む拡散光束を I 、反対方向に進む拡散光束を J とすれば、それぞれの光束の変化量は (1), (2) 式となる。

$$\frac{dJ}{dx} = -(K+S)J + SI \quad (1)$$

$$\frac{dI}{dx} = -(K+S)I + SJ \quad (2)$$

入射光束 I は媒体内で散乱されて、 I と逆方向に進行する光束 J となり、媒体外に出る。反射率とは I と J の比率であるから、(3) 式で示される。

$$R(X) = \frac{J(X)}{I(X)} \quad (3)$$

(3) 式を一般式で表わすと、(4) 式となる。

$$R = \frac{1 - R_g(a - b \operatorname{ctgh} bSX)}{a + b \operatorname{ctgh} bSX - R_g} \quad (4)$$

ここで、 $a = (1/R_\infty + R_\infty)/2$ 、 $b = a - R_\infty$ 、 R_g は下地の反射率を示す。さらに、下地の影響の出ないほど媒体を厚くした場合の固有反射率は、(5) 式で示される。

$$R_\infty = 1 + \frac{K}{S} - \left\{ \left(\frac{K}{S} \right)^2 + 2 \left(\frac{K}{S} \right) \right\}^{1/2} \quad (5)$$

媒体に複数の着色剤が混合されている場合、それぞれの吸収係数と散乱係数には加法性が成り立ち²¹⁾、(6) 式で示される。

$$\left(\frac{K}{S} \right)_M = \frac{K_1 C_1 + K_2 C_2 + \dots + K_i C_i}{S_1 C_1 + S_2 C_2 + \dots + S_i C_i} \quad (6)$$

ここで $C_1 \sim C_i$ は着色剤の混合比率を示す。各着色剤の吸収係数と散乱係数をあらかじめ求めておけば、(6) 式によって任意の混合比率 C_i での K/S 値が求められ、(5) 式によって反射率が求められる。つまり、任意の混合比率 C_i での反射率を、試料を試作することなしに予測することができる。

各着色剤の吸収係数 K と散乱係数 S を求める場合に、その比率 K/S は (5) 式を変換した (7) 式によって簡単に求めることができるが、それぞれを別々に算出することは非常に困難である。

$$\frac{K}{S} = \frac{(1 - R_\infty)^2}{2 R_\infty} \quad (7)$$

そこで、Davidson と Hemmendinger¹⁾²⁾ は、有色顔料の散乱係数 S_i は白色顔料の散乱係数 S_w と比べて無視

できるほど小さい、と仮定して (6) 式の近似式 (8) 式を示した。

$$\left(\frac{K}{S} \right)_M = \frac{\sum K_i C_i + K_w}{\sum S_i C_i + S_w} = \sum \frac{K_i}{S_w} C_i + \frac{K_w}{S_w} \quad (8)$$

ここで、 K_i/S_w は白色顔料に有色顔料を微量添加した時の K/S 値で近似する。これは染料の場合に使用される (9) 式と共に、一定数法と呼ばれている。

$$\left(\frac{K}{S} \right)_M = \alpha_1 C_1 + \alpha_2 C_2 + \dots + \alpha_n C_n \quad (9)$$

ここで、 $\alpha_1, \alpha_2, \dots$ は単位染料濃度あたりの K/S 値を示す。しかし、実際には有色顔料が多く含まれている暗色や高彩度色も多く、白色顔料が含まれない場合もしばしばある。そこで、散乱係数と吸収係数を別々に求める必要があるが、最も使用されている方法は、濃、その他による参照色を利用する方法であろう²²⁻²⁵⁾。この方法は、参照色 a として白色顔料等を採用し、有色顔料 i と一定混合比率の試料 ($i+a$) を作成すると、(10) 式が成り立つ。

$$\left(\frac{K}{S} \right)_{i+a} = \frac{K_i C_i + K_a C_a}{S_i C_i + S_a C_a} \quad (10)$$

(10) 式の右辺を S_a で割ると (11) 式となる。

$$\left(\frac{K}{S} \right)_{i+a} = \frac{(K_i/S_i)(S_i/S_a)C_i + (K_a/S_a)C_a}{(S_i/S_a)C_i + C_a} \quad (11)$$

(11) 式において、 (K_i/S_i) 、 $(K/S)_{i+a}$ 、 (K_a/S_a) はそれぞれの試料の反射率から求められ、 C_i 、 C_a は定数であるから、未知数 S_i/S_a が求められる。一方、(6) 式は S_i/S_a を使って (12) 式に書き換えられるので、吸収係数と散乱係数とを別々に求めたことと同じになる。

$$\left(\frac{K}{S} \right)_M = \frac{\sum (K/S)_i (S_i/S_a) C_i}{\sum (S_i/S_a) C_i} \quad (12)$$

3.2 配合計算方法

(12) 式、(5) 式によって任意に配合を変化させて計算し、見本の測定値と一致した時点で配合を取り出せば良い。配合の決め方には二通りあり、一方は色見本の分光反射率を合致させる方法であり、他方は三刺激値を合致させる方法である。つまり、アイソメリックマッチとメタメリックマッチの二通りであるが、前者の手法としては、測定波長点での反射率誤差の総和が最小になるように、最小二乗法を使用するのが一般的である。しかし、現実には、色見本と異なる種類の顔料で調色した場合には、完全なアイソメリックマッチは求められず、最適解を求めようとすると、着色剤の種類をふやしていかなければならなくなる。着色剤数をふやすことは、それだけ製品安定性の上でもトラブルのもとになりやすいので、あらかじめ色見本の分光分布を解析して、同じ種類の顔料で配合を計算した方が得策である。図-5 は、色見本 S に

図-5 色見本と異なる顔料で調色した例

対し、分光カーブが似ているBを使用せずに、AとCで調色した例を示す。

メタメリックマッチの計算手法で、一般に使用されているものはニュートン・ラプソン方法によるものが多い。一般的な配合計算方法のフローチャートを図-6に示す。図-6によれば、まず、ターゲットである色見本の三刺激値 X_{std} , Y_{std} , Z_{std} を求める。次に、(12)式の C_i に任意の初期値を与え、予測三刺激値 X_{prd} , Y_{prd} , Z_{prd} を求め、両者の差 ΔX , ΔY , ΔZ を (13) 式にて計算する。

図-6 一般的な CCM フローチャート

$$\left. \begin{aligned} \Delta X &= \sum (R_{std} - R_{prd}) H_{\lambda} \bar{x}_{\lambda} \\ \Delta Y &= \sum (R_{std} - R_{prd}) H_{\lambda} \bar{y}_{\lambda} \\ \Delta Z &= \sum (R_{std} - R_{prd}) H_{\lambda} \bar{z}_{\lambda} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

当然、色見本と初期値予測色とは大きな色差があるので、 C_i の補正量 ΔC_i を計算して、許容差内になるまで補正を繰り返す。補正量の算出方法は、(5)式と(12)式を使用して、着色剤1単位あたりの反射率変動量 $\partial R / \partial C_i$ を計算し、(14)式によって三刺激値の変動量に変換する。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial X}{\partial C_i} \Delta C_i &= \sum \frac{\partial R}{\partial C_i} \cdot \bar{x}_{\lambda} \\ \frac{\partial Y}{\partial C_i} \Delta C_i &= \sum \frac{\partial R}{\partial C_i} \cdot \bar{y}_{\lambda} \\ \frac{\partial Z}{\partial C_i} \Delta C_i &= \sum \frac{\partial R}{\partial C_i} \cdot \bar{z}_{\lambda} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

ΔX , ΔY , ΔZ と補正配合量 ΔC_i との間には (15) 式が成り立つので、このマトリックスを解けば、補正配合量 ΔC_i が求められる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial X}{\partial C_1} \Delta C_1 + \frac{\partial X}{\partial C_2} \Delta C_2 + \dots + \frac{\partial X}{\partial C_i} \Delta C_i &= \Delta X \\ \frac{\partial Y}{\partial C_1} \Delta C_1 + \frac{\partial Y}{\partial C_2} \Delta C_2 + \dots + \frac{\partial Y}{\partial C_i} \Delta C_i &= \Delta Y \\ \frac{\partial Z}{\partial C_1} \Delta C_1 + \frac{\partial Z}{\partial C_2} \Delta C_2 + \dots + \frac{\partial Z}{\partial C_i} \Delta C_i &= \Delta Z \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

マトリックスの解き方は、クラメルや掃き出し方法等がある。(13)式中の光源のエネルギー分布 H_{λ} を任意に変えることによって、各種光源下での調色配合が計算できる。また、(15)式は三元連立式であるが、選顔料が3以上になった場合には、他の光源下での式を追加したりする工夫が必要である。

3.3 分光反射率の補正

分光光度計で実測される反射率は、媒体の外に出た光を測定しており、通常その境界面は空気である。しかし、Kubelka-Munk の二定数理論は媒体中の光束を扱っており、これを適用するには実測値の補正が必要となる。最も一般的に使用されている補正式は Saunderson の式²⁰⁾であり、(16)式で示される。

$$R' = k_1 + \frac{(1-k_1)(1-k_2)R}{1-k_2R} \quad (16)$$

ここで、 R' は実測反射率、 R は補正反射率、 k_1 は試料表面における鏡面反射率、 k_2 は内部鏡面反射率を示す。 k_1 はフレンネルの法則により、(17)式より求められる。

$$k_1 = \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 \quad (17)$$

ここで、 n は試料の屈折率を示す。 k_2 は実測がむずかしく、経験的に求めるのが良いとされており、調色実験を繰り返し決定されているのが一般的であろう。また、分光光度計のタイプによっても、 k_2 は変える必要がある。

一般的な値は $k_2=0.5\sim0.6$ 前後⁶⁾である。このほかに、R.B.Love らの式 (18)¹⁴⁾ や、O.W.Pineo の式 (19)¹⁵⁾ 等が提案されており、織物染色の CCM に使用されている場合が多い。

$$F(R) = \frac{(k_1 - R)^2}{(R - R_0)(1 + k_2 R)} \quad (18)$$

$$\frac{K}{S} = \frac{(1 - R)^2}{2(1 - r)(R' - r)} \quad (19)$$

一方、K-M 理論式 (7) は下地の影響の出ないほどの厚みを持つ試料の固有反射率 R_∞ で成り立っている。しかし、実際の見本はフィルムや塗膜等になっており、下地の影響の出るものが多い。 R_∞ の求め方の簡便な方法として、同色系を下地に置いて測色する方法もあるが、K-M 理論式からも導き出される。下地に白および黒を用意し、それぞれの反射率を R_{g1} , R_{g2} とする。それらを下地に置いた時の試料の反射率をそれぞれ R_1 , R_2 とすれば、(20)式が成り立つ²⁷⁾。

$$R_\infty = \frac{-B + (B^2 - 4A^2)^{1/2}}{2A} \quad (20)$$

ここで、

$$A = R_1 R_{g2} - R_2 R_{g1}$$

$$B = (R_{g1} - R_{g2})(1 + R_1 R_2) - (R_1 - R_2)(1 + R_{g1} R_{g2})$$

である。(20)式は、ある程度の陰べい力を持つ試料の場合に適用される。

色見本の表面状態は、光沢のあるものや、無光沢のもの、あるいは、絞面であったり、様々である。このような場合、同一配合のものでも、表面状態が異なると違って見え、実際に測定しても値は異なる。表面状態は、ツヤ消し処理やエンボスロール等の後加工によるものであって、着色剤成分とは無関係である。本来、同一配合の組み合わせで表面状態だけが異なった試料を CCM 処理した場合には、着色剤配合は同一でなければならない。このような色見本は、表面状態を入力用試料の表面状態にもどして測定しなければならない。逆に、表面状態の異なる面を、あらかじめ予想して配合を決めなければならない場合もある。たとえば、プラスチック成形、レザー等では、調色試作の表面状態と最終製品の表面状態とは異なっている場合が多い。視感調色では、その差異を経験と勘で予想して配合を修正するのであるが、CCM では、その差異を数値管理で予測することが可能である。表面状態の違いは、分光光度計のライトトラップ²⁸⁾を付けた場合と、付けない場合の差や、光沢計²⁹⁾、変角光度計等を用いて検出できる。トラップ有無の測定差は、光沢試料では大きく、無光沢では小さい傾向にある。しかし、物理測定データを目視評価と相関させるためには、何らかのデータ処理が必要とされる。

3.4 補正調色

CCM の第 1 回目の処方を試作して、許容範囲に入らなかった場合や、現場製造品の色修正を行なう場合には、補正調色用プログラムが必要とされる。一般的な手法は、(15)式の ΔX , ΔY , ΔZ に色見本と試作色の実測の三刺激値差を代入することによって、ほとんど同じプログラムで可能となる。また、過去に配合計算を行なった色をファイルして、その中から色見本に近い色を選び出して、図形処理によって、新色配合や補正配合を算出する方法もある。この場合、選択する過去の配合は、当然、同一選顔料でなければならないし、色見本からの色差が大きいと調色精度も落ちる。また、完全に色見本を色立体中に包むような試料を選択するのは、相当のデータ数がないとむずかしいようである。しかし、完全に色立体中に包み込まなくとも、最接近点での配合は計算できる。座標軸には、XYZ, Lab, HVC 等を使用する。XYZ を使用したモデルを図-7 に示す。染料においては、補色三刺激値を用いて、座標上から配合を計算する方法もある³⁰⁾。

3.5 着色濃度の算出

染料の場合は一定数を用いて、単位染料濃度における K/S 値を使用した (9) 式を使用しているので、そのまま着色濃度が算出できる。しかし、顔料の場合では、(6)式が基本となっており、その式の性質上、着色濃度を決定することはむずかしい。つまり、(6)式において、 C_i に定数を掛けた KC_i を使用しても $(K/S)_M$ 値は変わらないことがわかる。つまり、(6)式からは、配合比率は算出できても、着色濃度は算出できないのである。

塗料、レザー、フィルム等では、陰べい力は重要な要素であり、陰べい力の調整はまさに着色濃度の調整そのものである。そこで、まったく別の方法で着色濃度を決定しなければならない。陰べい力を測定する方法はいろ

図-7 座標を用いて配合計算するモデル

図-8 着色層 1mm における陰ベい力と顔料濃度の関係

いろいろあるが、光学測定では、透過率³¹⁾やコントラストレシオ³²⁾が使用されている。コントラストレシオとは、下地黒での反射率 R_b と、下地白での反射率 R_w との比率 R_b/R_w で表わされる。図-8 に、各種顔料の陰ベい力と着色濃度の関係を示す。それによると、陰ベい力と着色濃度は、カーボン等においてはリニアになっているが、チタンや黄鉛等では着色濃度を増加しても、リニアには陰ベい力が増加しないことを示している。また、陰ベい力と層の厚みとの関係は、ほぼ、着色濃度との関係と同じである。このような陰ベい力データを通常の CCM データと共にインプットしておけば、着色濃度の算出も可能となる。

着色する媒体にフィラー等が混入されて、白色化および有色化されている場合には、これらの白色分、有色分をあらかじめ投入されている着色剤と考えることによって、補正をする。たとえば、媒体を白色化させるフィラーが混入している場合には、透明媒体として計算された配合の白分とフィラーの白分とを相殺させれば、最低着色濃度が算出できる。これは、発泡による白分増加においても応用できる。

3.6 その他のアプリケーション

微小面積試料の場合でも、通常の試料と同等の測定精度を保つ必要がある。一般的には、光束をスリットで小

さくする方法と、試料に一定面積が開いたマスクをかけて測定する方法とがある。後者は、グレースケールを用意し、マスクを使用して、測定した値 R_M と通常面積での測定値 R との関係を、最小 2 乗近似で (21) 式のような関係式で表わせば良い。

$$R = a + bR_M + cR_M^2 + dR_M^3 + \dots \quad (21)$$

調色するターゲットが色見本でなく、色彩数値、特にマンセル値で与えられる場合がある。視感調色の場合には、マンセル色票を見て調色するのであるが、ターゲットと一致した色票がない場合が多く、このような場合には目視で補間をして調色する。一方、CCM の場合はターゲットの三刺激値 XYZ があれば良いので、マンセル値を XYZ に変換すれば良い。マンセル値と x, y, Y との対応表が JIS³²⁾ で表示されているので、これらのデータを入力し、補間処理をすれば変換ができる。

4. 調色精度

発表されている CCM システムの調色精度の比較は、各社ともノウハウの公表を避けているため、厳密な比較はできない。筆者らが行なった実験によると、第 1 回目の色差は、UVW 色差で約 0.8 前後となる⁶⁾。実用処理している場合でも、表面状態が曲面とか凹凸が極端でなければ、実験値とはほぼ同等な色差となる。一方、視感調色による場合は、通常 4~5 回の試作が行なわれており、その色差経過は表-1 のようになる。このように、CCM による調色精度は、視感調色の第 3、ないし第 4 回目に相当する。第 1 回目で許容範囲に入っていない場合には、3.4 の補正調色を行なうことによって、ほとんど調色は完了する。また、配合処方、3.5 の着色濃度の算出がなされていないと、陰ベい力調整という手順が加わり、補正調色回数が増える。

あらかじめ配合が既知の色見本、CCM によって調色した場合の色見本配合と予測配合との関係を図-9~図-13 に示す。X軸、Y軸はそれぞれ、

X軸：色見本配合 (%表示)

Y軸：(色見本配合-予測配合)/色見本配合

を示す。色見本としては、3色または4色混合で、彩度の高い赤、黄、橙で6点、マールン4点、青5点、緑6点、茶7点、灰2点、紫2点、淡色3点の計36点を用意し、それぞれ暗色から中間色まで明度を変えて作成し

表-1 視感調色における試作経過

試作回数	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目
ΔE (UVW)	3.5	1.6	0.9	0.6	0.5

である。よって、図-9～図-13 におけるデータ数は 135 点となり、プロット点は重なっている場合が多い。図-9 は、繰り返し精度 0.5% 程度の分光光度計を使用した場合であり、バラツキが非常に大きいことがわかる。しかも、どのようなソフトウェアを使用しても、このバラツキは小さくならない。図-10、図-11、図-12 は、Saunderson の補正式を変えた場合で、それぞれ(22)式、(23)式、(24)式を使用した場合である。使用した分光光度計は、拡散照射—光束受光方式で、繰り返し精度は、低反射率で 0.02% のものである。

$$R = \frac{R' - 0.04}{0.36 + 0.6R'} \quad (22)$$

$$R = \frac{R' - 0.04}{0.46 + 0.5R'} \quad (23)$$

$$R = \frac{R'}{0.5 + 0.5R'} \quad (24)$$

図-10、図-11 よりも、図-12 の方がバラツキが小さいのがわかる。しかし、その影響度合は小さいと言ってよい。図-13 は、図-10～図-12 で使用したデータを、分光光度計の測光条件を加味したソフトウェアで処理したものであり、バラツキが非常に小さくなっている。

図-9 繰り返し精度 0.5% の分光光度計における CCM 精度

図-10 (22) 式を使用した場合の CCM 精度

図-11 (23) 式を使用した場合の CCM 精度

図-12 (24) 式を使用した場合の CCM 精度

このように、測定安定性の良い分光光度計を使用するのはもちろんであるが、ハードウェアに適したソフトウェアを開発することも大切である。より精度の良い CCM システムを開発するには、ハードウェアとソフトウェアの両面から、研究を進めなくてはならない。

5. 色の検定方法

前章までは、配合処方を算出する方法に関して述べてきたが、実際に製作された製品が、望んでいた色と一致しているかどうかの判定も、重要な課題である。たとえば、自動車部品や家電部品では、部品ごとの色管理はもちろんであるが、アセンブルした時に他の部品と色が合っているかどうか、重要な問題である。しかし、部品ごとに絞等の表面状態が異なっている場合が多く、標準色の決定や色の管理では、それらの要素を加味した検定でなければならない。一般的な色の表示方法は、文献³³⁻³⁷⁾を参照していただき、ここでは CCM に関連したものだけを述べる。

5.1 色差式

色差式は多数公表されているが、JIS Z 8730 色差表示方法で決められたものは、次の三つである。

図-13 ソフトウェアを改良した場合の CCM 精度

$$\Delta E(UVW) = [(\Delta W)^2 + (\Delta U)^2 + (\Delta V)^2]^{1/2}$$

$$\Delta E(V_X V_Y V_Z) = 40[(0.23 V_Y)^2 + \{\Delta(V_X - V_Y)\}^2 + \{0.4(V_Z - V_Y)\}^2]^{1/2}$$

$$\Delta E(Lab) = [(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2]^{1/2}$$

採用した色差式によって値は異なるので、色差値には計算した色差式を明記しなければならない。図-6 のフローチャート上の色差は、数回のループ計算でほとんど 0 になるので、どの色差式を使用するかは特に注意を払う必要はない。

5.2 表色方法

表色の基本となるものは、物体色の三刺激値 XYZ であり、これから種々の表色系に変換される。たとえば、Lab, UVW がその例である。しかし、これらの数値を得ても、実際の色の印象が浮かんでこない。これは、われわれが日常使用している赤い、青いとか、明るい、暗いとか鮮やかであるという表現と一致していないためである。この色相、明度、彩度というスケールで表現されたものに、マンセル表色系がある。マンセル表色系の特徴は、実際に人間が目で見ながら、感覚的に等歩度になるように色票で作られたものであるから、他の表色系よ

図-4 赤色ベースカラーのマンセル値グラフ

りも等歩度性がすぐれている。また、色票も市販されているので、実際に表色系を見ることもできる。マンセル表色系は、アセンブルする部品間の色管理や限度枠の設定等に使用すると便利である。

CCM に使用している赤色ベースカラー S に、酸化チタンを漸次増加した試料 A, B, C…… をマンセル表色系を使って表示した例を図-14 に示す。縦軸は明度を、横軸左側は色相を、右側は彩度を示す。酸化チタンが増加するに従い、色相は紫味に移行し、明度 4.5 前後で、彩度が最高になる。CCM に使用するベースカラーは、数多くの顔料の中からできるだけ高彩度発色が可能なものを選ぶ必要がある。つまり、着色剤混合は減色混合であるから、ベースカラーに選定するものは、彩度の高い単一構成の着色剤が望ましい。

6. おわりに

CCM を実用化させるには、基本的なソフトウェアの他に、種々の応用展開が必要とされる。本稿では、実用面を中心に具体的に述べるために、文献類の他に、大日精化のカラコムシステムを参考に筆を進めたが、CCM のハード、ソフトとも、まだまだノウハウに関することも多く、わかりにくい表現があったことはお許し願ひ、御指示、御指導をいただければ幸いです。

参考文献

- 1) H. R. Davidson, H. Hemmendinger : *J. Opt. Soc. Am.*, 48, 281 (1958)
- 2) H. R. Davidson, H. Hemmendinger : *J. Opt. Soc. Am.*, 51, 1459 (1961)
- 3) 江森康文, 菊地 昭 : 計測自動制御学会論文集, 2, No. 3 (1966)
- 4) 平野忠男, 井波英一 : 染色工業, 21, No. 8, 461 (1973)
- 5) F. W. Billmeyer, Jr. 他 : *Applied Optics*, 13,

No. 6, 1510 (1974)

- 6) 佐野和雄 : 第 23 回 光学四学会連合講演会 予稿, p. 32 (1977)
- 7) F. W. Billmeyer, Jr. : *J. Opt. Soc. Am.*, 50, 70 (1960)
- 8) Noboru Ohta : *J. Opt. Soc. Am.*, 62, 129 (1972)
- 9) Noboru Ohta : *J. Opt. Soc. Am.*, 62, 185 (1972)
- 10) S. Q. Duntley : *J. Opt. Soc. Am.*, 32, 61 (1942)
- 11) J. T. Atkins, F. W. Billmeyer, Jr. : *Color Eng.*, 6 (3), 40 (1968)
- 12) P. Kubelka, F. Munk : *Z. Tech. Physik*, 12, 593 (1931)
- 13) P. Kubelka : *J. Opt. Soc. Am.*, 38, 448 (1948)
- 14) R. B. Love 他 : *J. S. D. C.*, 81, 609 (1965)
- 15) O. W. Pineo : U. S. Pat., 2, 218, 357 (1939)
- 16) R. H. Park, E. I. Stearns : *J. Opt. Soc. Am.*, 34, 112 (1944)
- 17) 湊 幸衛, 鈴木時英 : 第 7 回 日本色彩学会予稿, p. 21 (1976)
- 18) S. Chandrasekhar : "Radiative Transfer", Dover Publications (1960)
- 19) P. S. Mudgett, L. W. Richards : *Applied Optics*, 10, 1485 (1971)
- 20) P. S. Mudgett, L. W. Richards : *J. Coll. Interface Sci.*, 39, 551 (1972)
- 21) D. R. Duncan : *J. O. C. C. A.*, 45, 300 (1962)
- 22) 湊 幸衛, 江森康文, 塚田 敢 : 千葉大学工学部研究報告, 18, 33, p. 31~p. 38 (1967)
- 23) 湊 幸衛, 江森康文, 塚田 敢 : 千葉大学工学部研究報告, 18, 34, p. 149~p. 152 (1967)
- 24) S. Minato, Y. Emori, I. Tsukada : *Acta Chromatica*, 1, No. 5, 255 (1967)
- 25) 湊 幸衛 : 千葉大学工学部研究報告, 18, 34, p. 149~p. 152 (1967)
- 26) J. L. Sanderson : *J. Opt. Soc. Am.*, 32, 727 (1942)
- 27) 湊 幸衛 : 千葉大学工学部研究報告, 19, 36, p. 203~p. 208 (1968)
- 28) JIS Z 8722 "2° 視野 XYZ 系による物体色の測定方法"
- 29) JIS Z 8741 "光沢度測定方法"
- 30) 村田幸男 : "工業測色学", p. 387, 繊維社 (1969)
- 31) R. J. Bruehlman, W. D. Ross : *J. Paint Tech.*, 41, 584 (1969)
- 32) ASTM D 589-44
- 33) JIS Z 8701 "2° 視野 XYZ 系による色の表示方法"
- 34) JIS Z 8728 "10° 視野 XYZ 系による色の表示方法"
- 35) JIS Z 8729 "U*V*W* による物体色の表示方法"
- 36) G. Wyszecki, W. S. Stiles : "Color Science, John Wiley & Sons, Inc. (1967)
- 37) D. B. Judd, G. Wyszecki : "Color in Business, Science, and Industry", John Wiley & Sons, Inc. (1963)