

# コンピュータ カラーマッチングと 307形カラーアナライザ システム

## Computer Color Matching and Model 307 Color Analyzer System

Computer color matching is becoming popular. For obtaining an initial formulation for color matching, two methods are available; the first method consists in making spectral reflectance distributions equal and the second one, in making tristimulus values equal, the second being favored for practical use. Since the initial formulation requires extensive calculation, computer centers with adequate facilities should be depended on leaving the coloring shops with the process of formulation correction alone.

The model 307 color analyzer system is a spectrophotometric colorimetry system which utilizes data processing by digital signals. With a wide array of peripheral equipment and auxiliary devices being made available this system is ideally suited for color matching.

Although there are a few problems to be solved, computer color matching will come into general application in the near future in the process of modernization of concerned fields.

仙石正行\* Masayuki Sengoku

三間光男\* Mitsuo Zanma

馬場護郎\* Gorô Baba

### 1 緒 言

色材を扱う工業界において、色見本に色合せするための色料の混合割合を予知したいとの要望はきわめて当然のことで、混色機構の理論的解明はかなり古くからなされていた。わが国でも昭和27年ごろより分光測色が一般化するにつれて、混色計算の試みが各所で行なわれたが理論的解明の不十分さと、計算の複雑さのため実用に供されるに至らなかった。昭和35年ごろより欧米では染色における混色の予知が多くの工場で試みられ、理論的進歩と電子計算機の普及によってようやくその工業への適用が可能になった。昨今の色材工業では混色結果の予知という素朴な要求からだけでなく、工業の近代化における要請の一つとしてコンピュータ カラーマッチング(以下、CCMと略す)がとりあげられている<sup>(1)</sup>。

しかし従来の測色用分光光度計は、測定精度、処理能力、デジタル化の点で、ユーザーの要求を満たし得なかったので、今回新しくデジタル機能を内蔵する高性能デジタル測色装置として307形カラーアナライザを開発し、そのシステム化に成功したので、コンピュータ カラーマッチングの概要と307形カラーアナライザ システムについて述べる。

### 2 コンピュータ カラーマッチング

#### 2.1 CCMの目的と効果

CCMの目的は元来数種の色料の混合物の色を実験によることなく予知しようとするものであり、この要求は現在でもCCMの第一の目的である。しかし、CCMの発達に伴い、その効果が種々の方面で確認され、CCMの重要さがさらに認識されるようになった。今、CCMの効果のおもなものを要約すると次のようになる。

(1) 経験や実験によらず目的とする混合処方を速やかに求め

ることができる。その際の処方には不要な複雑化を避けることができ、色材工業における混色処方を組織的に整理することができる。

(2) どのような照明、観測者に対しても色見本と同じに見えるような配合を求めることができる。このようなCCMが不可能なときでも、基準とする照明下で色見本と等しく見える配合を求めることができ、さらにこの色見本と混合色とを他の照明下にもっていったときに起こる色の差を量的に予知することができる。したがって取引先の要望に合致した配合を選択することができる。

(3) 一つの色見本に対し幾とおりの配合を速やかに求めることができるので、各の配合を比較検討できるとともに、コスト、変退色性、染めやすさなどの色以外の要素を加味して配合を決定することができる。

(4) CCMの結果は、着色工程の合理化に役だち将来の連続着色における色の修正や着色の自動化に不可欠のデータを得ることができる。

#### 2.2 混色計算の方法

現状のCCMは大別して色見本に対する配合を一次的に求める混色計算(Initial Formulation)と与えられた配合を修正して色見本に近づけるための計算(Formulation Correction)に分けられる。

##### (1) 一次処方(Initial Formulation)

CCMにおける一次処方とは、色見本の分光反射率分布が与えられたとき、すでに持っている原色材料と素材のデータを用い計算機を使用して色見本と同じ色になるように配合処方を求める方法である。一般に色合せを行なう場合、特殊な場合を除いて色見本とでき上がった色とはどのような照明の

\* 日立製作所那珂工場

もとで、だれが見ても同じに見えるよう、すなわち分光分布の一致した物理的に等しいことが理想的で、このような色合せをアイソメリック マッチ (Isomeric Match) あるいは、スペクトル マッチ (Spectral Match) と称する。しかし、色料が異なるためアイソメリック マッチが不可能なときや、原色の数を限定したほうが有利な場合は、特定の照明のもとで標準的な観測者が見たとき同じ色に見える、すなわち 3 刺激値の等しいあるいは心理物理的に色が等しい色合せを行なうことになる。このような色合せをメタメリック マッチ (Metameric Match) あるいはカラリメトリック マッチ (Colorimetric Match) と称する。双方の色合せを比較すると、アイソメリック マッチは同色となる色合せをすることができる反面、(i) 計算が複雑になる。(ii) 使用する原色の数が多くなることがある。(iii) 分光分布の差が最小自乗的に極小であっても、色彩的な差が極小になるとは限らないなどの欠点がある。

一方、メタメリック マッチでは、(i) 計算が簡単で速く結果が得られる、(ii) 原色の数を少なく選ぶことができる、(iii) 視感的に色差の最小の組合せが得られるなどという利点がある反面、計算に用いた光源以外の照明のもとで色見本との差が大きい場合があるという欠点がある。ただし、この欠点は計算に用いた光源以外の照明で見たときの色差または条件等色の度合を同時に計算して、大きな条件等色対 (Metameric Pairs) の生ずることを防ぐことによって取り除かれる。

実際に計算を行なう場合、各波長について原色濃度と混合物の分光反射率の間になんらかの関係がある (たとえば、「クベルカームンクの二定数理論」<sup>(2)(3)</sup>) と仮定し、アイソメリック マッチでは色見本と混合物との分光反射率差が極小となるよう原色濃度を変化させて混合比率を求める。またメタメリック マッチでは色見本と混合色の分光反射率分布から求めた 3 刺激値差または適当な色差式により求めた色差が極小となるよう原色濃度を変化させて混合比率を求める。

## (2) 処方修正 (Formulation Correction)

CCMにおける処方修正は、(i) 一次処方によって実験的に作った色をさらに色見本に近づけるために修正する場合、(ii) 自社カラーライブラリーに色見本と近似の色があり、そ

の近似値の処方を修正する場合、(iii) 原色や着色条件などのために定められた処方で初期の色が求められず、修正を要する場合などに使用される。

この場合は、色見本と試験色の 3 刺激値とで作られるマトリックスにおいて、原色濃度をわずかに変えたときの 3 刺激値差を与える偏微分係数を用いて、3 刺激値差または色差が極小となるよう計算し、原色濃度の修正量を求める。

処方修正は、その性質上色の一致の度合がよく、また計算が簡単なので速く結果が得られるのが特徴である。

## 3 307形システムのCCMへの応用

### 3.1 307形カラーアナライザの機能

図 1 は光学系統を示したものである。ハロゲン ランプから出た白色光はリトロー形グレーティングのダブル モノクロメータを通して迷光の少ない単色光として採り出される。この単色光はチョッパによって 240Hz の断続光に変換された後、セクタ ミラーによって交照周波数 120Hz で対照光束および試料光束に分離される。分離された光は透過試料室を経た後、積分球に入射しそれぞれ標準白板、反射試料を照明し、積分球内で拡散反射されて光電子増倍管に入射する。図 2 は電気系統を示したものである。光電子増倍管からの出力信号は、プリアンプで増幅され、チョッパおよびセクタ ミラーと連動するゲート回路により、それぞれ零位信号、対照信号、試料信号に分離される。対照信号は基準電圧と比較され、光電子増倍管印加電圧部にフィードバックされ、常に一定値に保たれる。

この状態で試料信号は 100%ライン補正器、対数変換器を経て出力信号として測光値用デジタル パネルメータおよび X-Y レコーダの Y 軸に入力する。

波長信号は波長送り用カムと同一回転するポテンシオメータにより電圧信号として採り出され、波長用デジタル パネルメータおよび X-Y レコーダの X 軸に入力する。また、ポテンシオメータと同期して 5nm ごとに波長サンプリングパルスが発生し、このパルスによって測光値は A/D 変換を行ない、波長値、測光値信号をホールドしてデジタル信号出力となる。

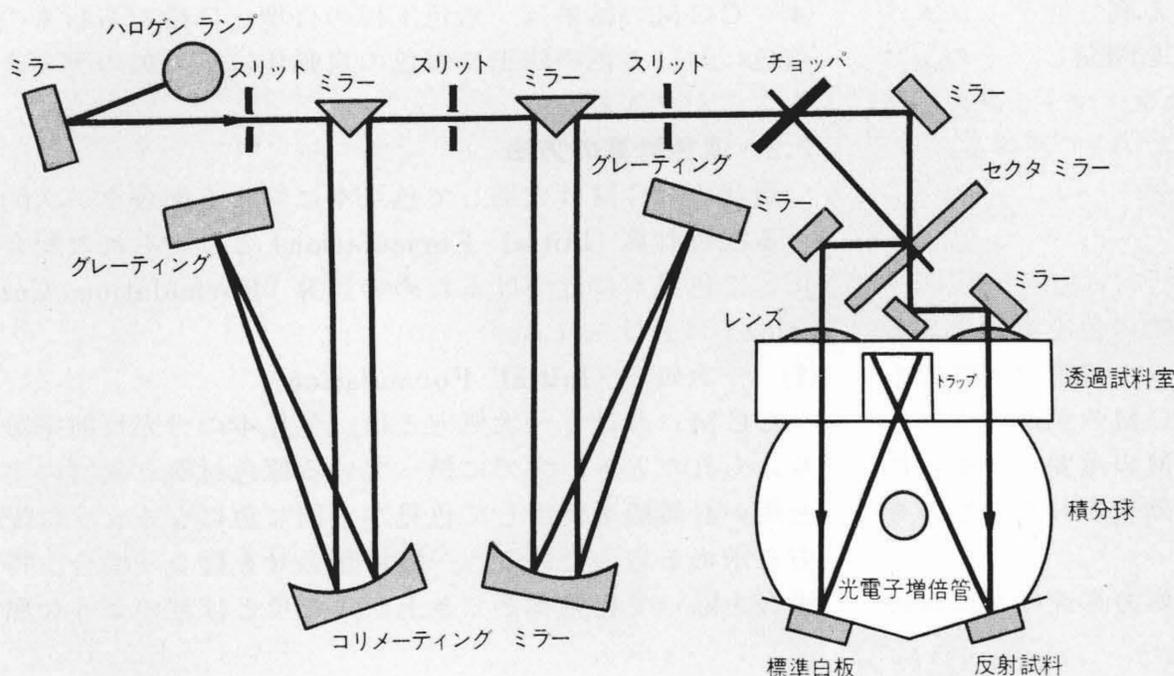


図 1 光学系統 光源はハロゲンランプ、分光器はリトロー形回折格子複分光器、セクタミラーでチョッピングしてダブルビームとし、積分球で拡散反射光を受光する。

Fig. 1 Optical System

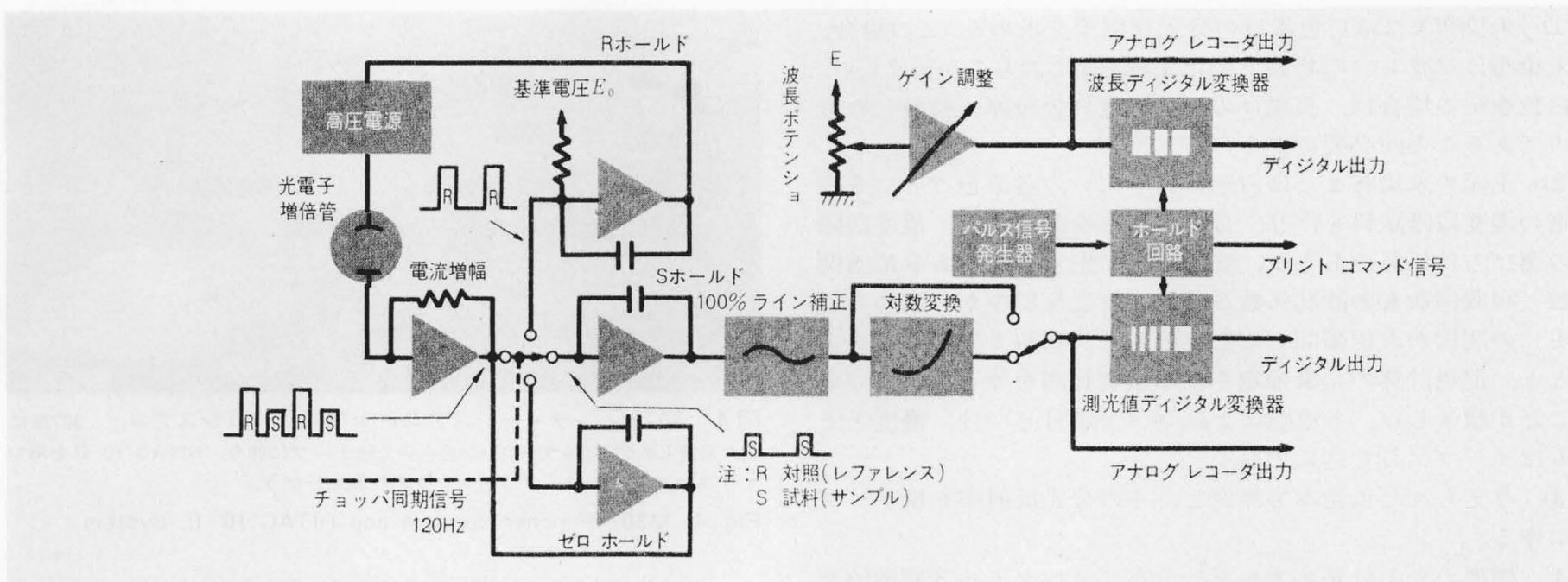


図2 電気系統 対照測光量、試料測光量の比を表示する方式で、アナログ出力で必要な処理をした後、表示部でデジタル化する。波長側はポテンシヨの出力を表示部でデジタル化する。

Fig. 2 Electrical System

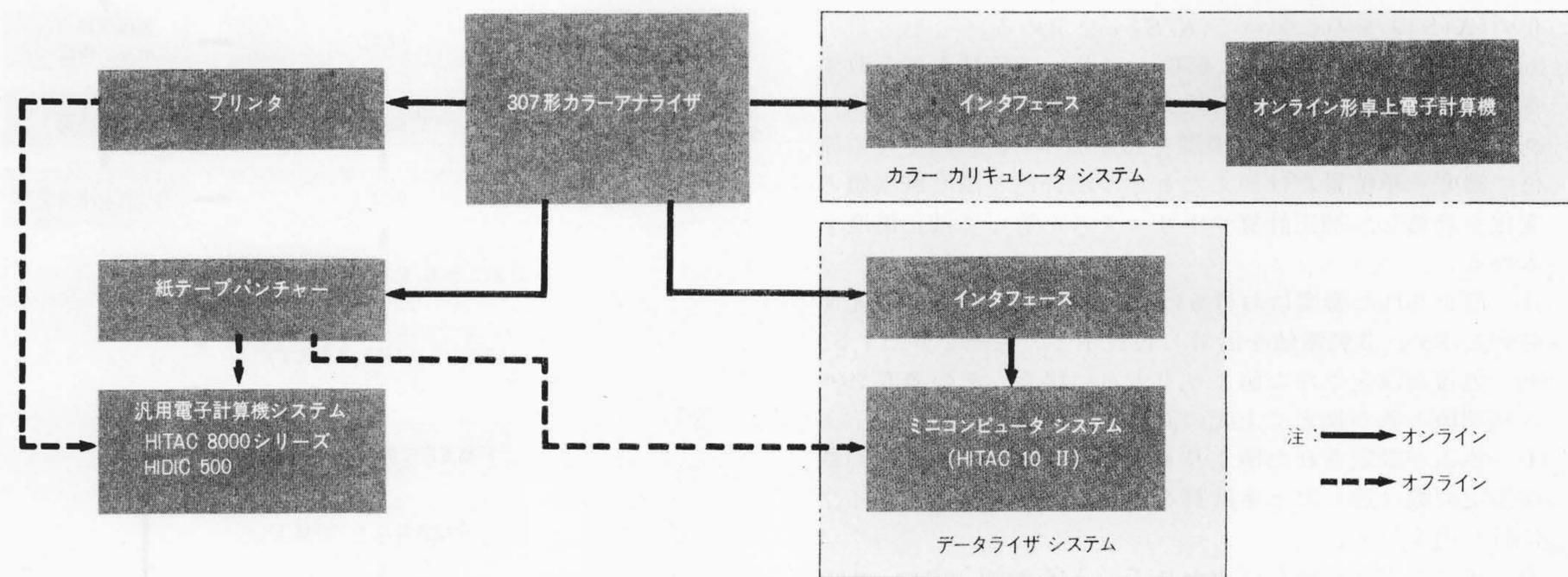


図3 307形カラーアナライザ システム 307形カラーアナライザ システムは、デジタル信号によるデータ処理を考慮して設計された分光測色システムで、CCMに対し最も適している。

Fig. 3 Model 307 Color Analyzer System

### 3.2 307形カラーアナライザ システム

307形カラーアナライザ システムは、デジタル信号によるデータ処理を考慮して設計された分光測色システムであり、CCMに対して最も適している。CCMに対する本システムの優れた点を挙げれば次のようになる。

- (1) データ処理を目的として設計されているため、安定したデジタル信号を出すほか、紙テープパンチャー システム、カラー カリキュレータ システム (卓上電子計算機オンラインシステム)、データライザ システム (ミニコンピュータ オンライン システム) が完備している (図3)。
- (2) 混色計算の精度は、波長精度、波長純度および測光精度に依存する。307形は混色計算に必要なこれらの精度を保持し、特に高彩度の色や暗い色に対しても十分な精度で測定することができる。
- (3) 積分球のスペキュラ カップの着脱により、鏡面反射を含む場合と除いた場合の測定が可能で、混色計算の際の表面補正值を実測値から求めることができる。
- (4) CCMにおいては多量の試料の測定が要求されるが、そ

れらを迅速に処理する能力を備えている。

(5) 色見本に対する相対反射率を測定することによって、色の差を拡大して測定し、色合せの精度を向上させることができる。

(6) 付属装置を用いることにより粉体試料、糸状試料、微小面積試料、けい光性試料および光源の測色が行なわれる。

### 3.3 307形パンチャー システムとミニコンピュータによる CCM

本システムは 307形により測定したデータを、テープパンチャーで紙テープに作り、HITAC 10-IIを用いて、オフラインでカラーマッチングを行なうものである。この方法はまた、プログラムを若干修正することにより、他種電子計算機 (たとえば、HITAC 8000シリーズ、HIDIC 500など) を用いたシステムにかえることができる。

現在主として用いられる混色計算は、380nmから780nmまでの10nm間隔の分光反射率データを用い、3刺激値が色見本と合うようにする、いわゆるメタメリック マッチ法であって、その方法は次のとおりである。

- (1) 未染布または白色素材の分光反射率を求める。この場合、未染布はブランクの状態に染色工程を通したものが望ましい。白色塗料の場合は、裏すけのない程度に十分厚く塗装したものであることが必要である。
- (2) 上記の未染布または白色素材を用い、各原色ごとに5段階の濃度段階試料を作り、分光反射率を測定する。濃度段階の選び方は任意であるが、着色濃度と光学濃度である $K/S$ 関数（吸収係数 $K$ と散乱係数 $S$ の比で分光反射率から求められる）の関係が直線補間したとき著しく実際値と異なることと、混色計算の結果推定される濃度範囲をカバーしていることが望ましい。各原色ごとにコード番号をつけ、濃度とともにテープに打ち込んでおく。
- (3) 与えられた色見本を測定し、その分光反射率を紙テープに作る。
- (4) 標準の光の分光エネルギー分布、スペクトル3刺激値を掛け合わせた重係数をテープに作る。
- (5) 上記各テープをHITAC 10-IIのテープリーダーから読み込ませて計算を行なうが、その内容は以下のとおりである。

- (a) 各測定値(分光反射率)から $(K/S)\lambda$ を求め、さらに未染布の $(K/S)\lambda$ を差し引いて $(K/S)c$ を求める。
- (b) 波長450nm, 550nm, 650nmにおいて色見本と合致するように各染料濃度の粗配合処方を求める。
- (c) 上記(b)で求められた濃度を初期値とし、それぞれの原色の濃度を単位量だけかえたときの混合色の濃度刺激値の変化を計算し、補正計算マトリックスを解いて補正濃度を求める。
- (d) 修正された濃度における $(K/S)c$ から $(K/S)\lambda$ 、分光反射率を求め、3刺激値を計算し色見本との色差を算出する。
- (e) 色差が設定された値よりも大きい場合、その濃度を(c)の初期値と置き換えて上記の計算をくり返す。
- (f) 色差が設定された値よりも小さくなるか、ループ回数が指定回数に達したとき計算を中止し、結果をテレタイプに打ち出す。

上に述べた方法が現在行なわれているメタメリックマッチの概要であるが、重係数テープおよびプログラムの変更により、内容を次のようにかえることができる。

- (a) 計算に用いる標準の光の種類をかえること。
- (b) 色差計算に用いる色差式の種類をかえること。
- (c) 途中計算において濃度刺激値以外の関数を用いること。
- (d) 各ループごとでの途中結果を打ち出すこと。

図4は307形パンチャーシステムとHITAC 10-IIシステムの外観である。

図5はメタメリックマッチを行なう場合のフローチャートを示すものである。

図6は計算結果のプリントアウトフォーマット例である。また、表1は色見本に対し、混色計算を行なった配合処方の結果と、その配合処方で再着色したものの実測値ならびに色見本との色差である。この場合は、2回の修正で色差(ΔE)1以内に入り得ることを示している。

### 3.4 カラーカリキュレータシステムによるCCM

本システムは307形と卓上電子計算機とをオンラインで接続し、307形から送られる測光値信号と、前もって卓上電子計算機のメモリに読み込まれている重係数を用いて表色値を求める装置で、混色の一次処方および修正処方を求めることができる。

#### (1) 一次処方の求め方

本システムによりカラーマッチングの一次処方を求める場

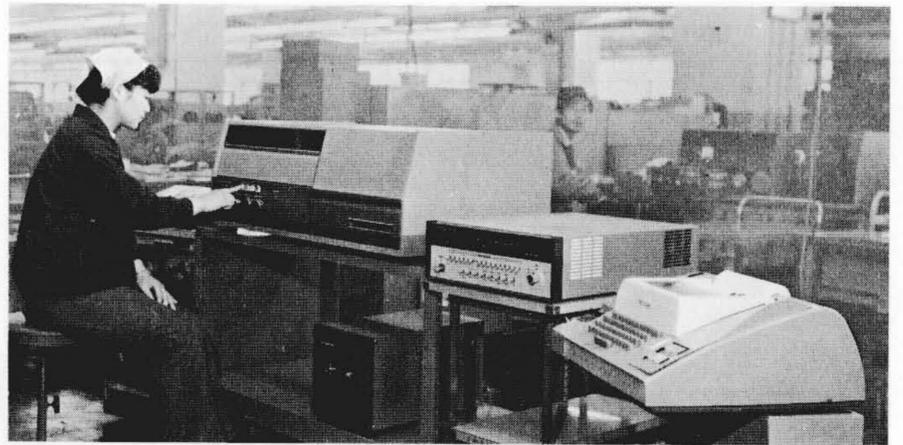


図4 307形パンチャーシステムとHITAC 10-IIシステム 307形により測定したデータをテープパンチャーで紙テープに作り、HITAC 10-IIを用いてオフラインでカラーマッチング予測計算を行なう。

Fig. 4 M307 Puncher System and HITAC 10 II System

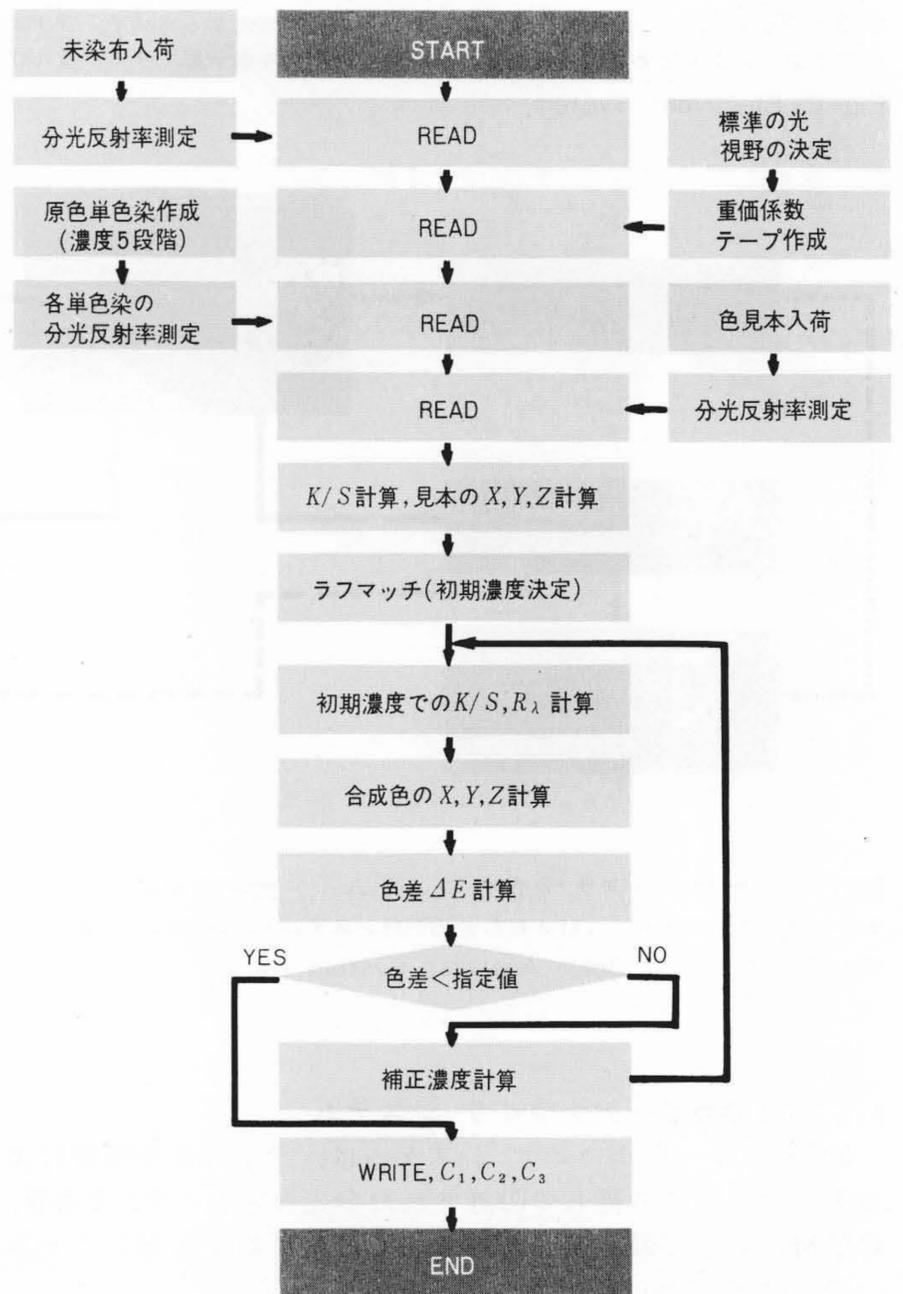


図5 メタメリックマッチフローチャート メタメリックマッチでは未染布、原色単色染め、重係数、色見本のデータを読み込んだ後、合成色と色見本の色差が指定値以下になるまで収束計算をくり返し行なう。

Fig. 5 Metameric Match Flow Chart

合、次の手順に従う。

- (a) 色見本を測定し、測色値 $X_s, Y_s, Z_s$ を求める。
- (b) 染料を3種選定し、それぞれ初期濃度 $C_1, C_2, C_3$ で試染し、試料を測定して $X_0, Y_0, Z_0$ を求める。色見本との差を $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ とする。
- (c) 試料処方において、一成分のみを一定比率 $k$ だけ変化

染料名	染料濃度	色見本 3刺激値	混色予想 3刺激値
DYE	CONC.	SAMPLE	TRIAL
6010=	0.3241	X=0.4229	0.4234
6020=	0.7726	Y=0.4057	0.4059
6030=	0.0835	Z=0.3122	0.3117

LOOP=2	C光源による色差 DE(C)=0.09	A光源による色差 DE(A)=0.13
--------	------------------------	------------------------

DC1/DFX=-5.5875	DC1/DFY= 5.9312	DC1/DFZ=-0.1143
DC2/DFX= 4.9157	DC2/DFY=-7.3081	DC2/DFZ= 2.4950
DC3/DFX= 1.1327	DC3/DFY=-0.6695	DC3/DFZ=-0.0581

DFX/DC1= 0.3391	DFY/DC1= 0.0682	DFZ/DC1= 2.2599
DFX/DC2= 0.5037	DFY/DC2= 0.0735	DFZ/DC2= 2.1654
DFX/DC3= 0.8071	DFY/DC3= 0.4818	DFZ/DC3= 1.8902

波長	色見本反射率	反射率差	波長	色見本反射率	反射率差
W.L	R	DR	W.L	R	DR
380	0.116	-0.078	590	0.489	-0.000
390	0.144	-0.055	600	0.508	0.001
400	0.184	-0.022	610	0.517	-0.000
410	0.210	-0.004	620	0.523	-0.000
420	0.223	-0.000	630	0.526	-0.001
430	0.235	0.000	640	0.528	-0.002
440	0.252	0.000	650	0.530	-0.004
450	0.267	0.001	660	0.533	-0.005
460	0.274	0.000	670	0.536	-0.006
470	0.278	0.000	680	0.539	-0.007
480	0.283	0.000	690	0.543	-0.007
490	0.290	0.001	700	0.547	-0.008
500	0.301	0.000	710	0.550	-0.008
510	0.314	0.000	720	0.553	-0.010
520	0.330	0.000	730	0.556	-0.010
530	0.346	0.000	740	0.557	-0.012
540	0.363	0.000	750	0.558	-0.013
550	0.380	0.000	760	0.557	-0.015
560	0.401	-0.001	770	0.556	-0.016
570	0.429	-0.001	780	0.554	-0.018
580	0.463	0.000			

図6 HITAC 10-IIによるCCM計算結果 染料濃度, 色見本, 混合色の3刺激値, 色差, 補正係数および色見本と混合色の分光反射率差が打ち出される。

Fig. 6 Output Data



図7 カラーカリキュレータシステム 307形と卓上電子計算機とをオンラインで接続し, 測定と同時に表色値を計算することにより, 混色の一次処方または修正処方を求める。

Fig. 7 Color Calculator System

させた試料3種を作り, それぞれ測色して $X_1 \cdot Y_1 \cdot Z_1$ ,  $X_2 \cdot Y_2 \cdot Z_2$ ,  $X_3 \cdot Y_3 \cdot Z_3$ を求める。(b)の試染試料との測色値の差と $kC_1 \cdot kC_2 \cdot kC_3$ より処方補正係数を求める。

$$l_1 = (X_1 - X_0) / kC_1, m_1 = (Y_1 - Y_0) / kC_1, n_1 = (Z_1 - Z_0) / kC_1$$

$$l_2 = (X_2 - X_0) / kC_2, m_2 = (Y_2 - Y_0) / kC_2, n_2 = (Z_2 - Z_0) / kC_2$$

$$l_3 = (X_3 - X_0) / kC_3, m_3 = (Y_3 - Y_0) / kC_3, n_3 = (Z_3 - Z_0) / kC_3$$

(d) 9個の補正係数と色見本との測色値の差 $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ,

$\Delta Z$ によって, 作られる次の三元連立方程式を解いて補正濃度を求め, 初期濃度を加えれば一次処方が得られる。

$$l_1 \cdot \Delta C_1 + l_2 \cdot \Delta C_2 + l_3 \cdot \Delta C_3 = \Delta X$$

$$m_1 \cdot \Delta C_1 + m_2 \cdot \Delta C_2 + m_3 \cdot \Delta C_3 = \Delta Y$$

$$n_1 \cdot \Delta C_1 + n_2 \cdot \Delta C_2 + n_3 \cdot \Delta C_3 = \Delta Z$$

(2) 修正処方の求め方

一次処方および補正係数が前もってわかっており, その処方で試染した結果, なお修正を要する場合, 初めの色見本と試染物との測色値の差を求めれば, 差の値と補正係数とで作られる三元連立方程式を解くことによって修正処方が求められる。

ユーザーの本社または研究所に汎用電子計算機があり, 工場にカラーカリキュレータシステムがある場合, あらかじめ未染布, 各原色基礎データを電子計算機に記憶させておき, 色見本が与えられたときその分光反射率分布を本社に送る。本社では一次処方および補正係数を計算により求めて工場に返送する。工場ではそのデータに従って試染し, カラーカリキュレータシステムを用いて測色することにより, その後の色修正を直ちに行なうことができる。この場合, 本社~工場間の連絡手段さえ完備していれば電子計算機およびカラーカリキュレータシステムを効率的に使用することができる。

図7はカラーカリキュレータシステムの外観である。

図8はカラーカリキュレータシステムを用いた場合のカラーマッチングの方法を示すものである。

4 結 言

現在, CCMを最もよく採り入れているのは染料, 染色業界であり, 通常の染色物に関してはかなりよい結果を得ている。しかし, 光沢のある糸や, 特に表面に凹凸のある織物などの場合は, 測色器による測定と, われわれが物を見ている条件が幾分異なるため, 計算結果と視感判定値が食い違うことがある。また, けい光増白布あるいはけい光染料を含んだ染色物の場合は, けい光成分が「クベルカームシクの理論」に従わないため, 分光反射率成分と, けい光成分を分離して計算を行なうなどの考慮が必要である。

混色計算による結果を実物で判定する場合, 基礎データの単色染色物と色合せした染色物とは全く同一の染色条件で染色されなければならないが, 現在の染色加工の事情からこの

表1 配合処方計算及び測定結果 (a)表中の1回めは一次処方, 2回め, 3回めは処方修正である。(b)表中のDEは色見本と色合せ品との色差である(色差の単位は, NBS unit)。

Table 1 Results of Formulations and Measurements

	黒色	黄色	青色	白色
1回め	0.02%	0.92%	0.74%	98.32%
2回め	0.02%	0.76%	0.56%	98.66%
3回め	0.10%	0.76%	0.56%	98.58%

(a) 配合処方

	X	Y	Z	x	y	見本との色差DE
色見本	42.71	49.49	61.78	0.2774	0.3214	
1回め	39.39	46.40	59.28	0.2715	0.3198	8.3
2回め	43.63	50.72	63.16	0.2770	0.3220	2.0
3回め	42.88	49.59	62.21	0.2772	0.3206	0.4

(b) 測定値

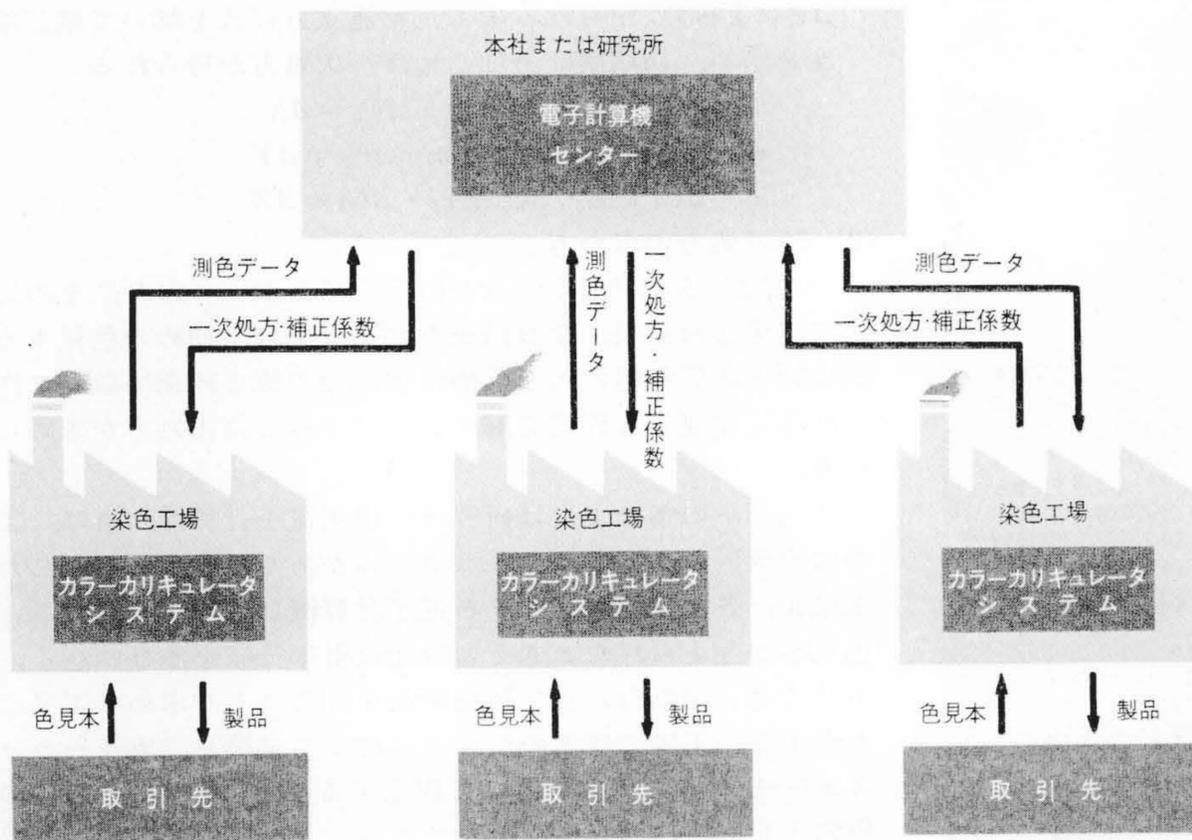


図8 カラーカリキュレータシステムによるCCM カラーカリキュレータシステムを用いた場合、本社または研究所の電子計算機センターで一次処方を行えば、各工場ですぐに処方修正ができる。

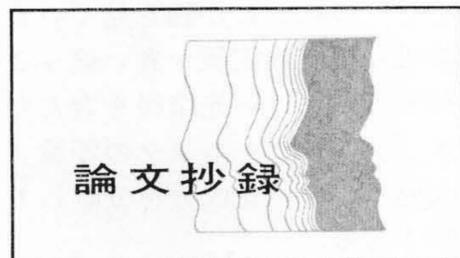
Fig. 8 Color Matching by Color Calculator System

ことは満足されない場合が多い。したがって、染色条件をいかに一定にコントロールするかがCCMを成功に導くポイントであり、染色工程全体の見直しが必要とされている。

染料、染色業界に端を発したCCMは、その後、塗料、塗装、プラスチック、インク、印刷業界でもかなり意欲的な検討が行なわれており、数年後にはこれらの分野においても実用化されるものと思われる。

参考文献

- (1) 川上, 村田, 永田, 平井「カラーマッチングの省力化を考える」塗装技術 p. 90 (1970, 11月号)
- (2) P. Kubelka and F. Munk. "Ein Beitrag zur Optik der Farbanstriche" Zeits, tech. Physik 12 593 (1931)
- (3) P. Kubelka "New Contributions to the Optics of Intensely Light-Scattering Materials……Part I" J. Opt. Soc. Am. 38, 448 (1948)



## スプール形油圧方向切換弁の流量係数 (第4報 切欠き付スプール弁)

東京工業大学 阿武芳朗・日立製作所 秋山伸幸  
日本機械学会論文集 39-319, 889 (昭48-3)

本一連の報告は、油圧制御弁として最も一般的に使用されているスプール弁を対象として、その基本的静特性としての圧力・流量特性を理論的、実験的に求めることを目的としている。これらの報告の内、第1、2報では直角エッジスプール弁、第3報ではテーパランドスプール弁について述べ、本第4報では切欠き付スプール弁について論じた。

スプール軸方向変位を  $x$ 、スプール弁の開口最小面積を  $A$  とし、 $dA/dx$  を面積変化率と名付けると、直角エッジスプールを用いた方向切換弁は面積変化率が大きいため、通常流量制御機能を有さない方向切換弁として用いられる。しかし最近の方向切換弁は、流量制御機能をも有し、切換弁自体に流量制御機能をもたせて方向流量制御弁として使用する要求が強い。そのためにはスプール変位  $x$  に対して、弁を通過する流量  $Q$  が比例し、その変化率も自由に選定できることが望まれる。このような弁を

手動弁に使用すればアクチュエータの速度制御や方向制御も可能となり、従来から人間の感覚にたよっていたイン칭ング(寸動)なども不要となる。更にこれを電磁制御弁に使用すれば電氣的な遠隔操縦や、あらかじめ定めたプログラムによってアクチュエータの速度や方向を制御することも可能となる。

これを実現するには、 $x$  と  $A$  の比例関係が成立すると同時に  $dA/dx$  が任意に定められることと、 $A$  とこの切欠き部を通過する流量  $Q$  との間に、その前後の圧力差が一定のときに比例関係が成立すること、すなわち流量係数が一定であることが成立すればよい。

そこで本報では、基本的切欠き形状を五つに分類し、それらの  $x$  と  $A$  の関係を求め、 $dA/dx$  が一定でありその値を任意に選定できるものを提案した。一方、流体力学的解析においては切欠き部が三次元流体通路であり、厳密な流れ状態を求めることがで

きないので、巨視的観点から近似速度分布を求め、検査面内の運動量と力のつりあい方程式から圧力損失を求め、切欠き付スプール弁の流量係数をレイノルズ数との関係において理論的に求めた。

一方、実験的には精密な二方弁模型を製作し、前述した5種類の基本切欠き付スプール弁を使用して流量係数の測定を行なった。その結果、理論と実験とは良好な一致を示し理論解析の妥当性が明らかとなった。以上の結果をまとめると次のようになる。

- (1) 5種類の基本切欠き形状を示し、その幾何学的、流体力学的特性を示した。
- (2) 一般に切欠き付スプール弁の臨界レイノルズ数は、上向き流れのとき  $10^3 \sim 2 \times 10^3$ 、下向き流れのとき  $10^2 \sim 10^3$  である。
- (3) 結論として、 $x$  と  $Q$  の関係が比例的な切欠き形状は一定みぞ幅、一定テーパ角度(20度以上がよい)で直線状に切削したものであり、 $dA/dx$  はテーパ角度よりみぞ幅で制御したほうが良い特性が得られる。