色の計測技術

Colorimetry in Industry

専門会員 小松原 仁
Hitoshi Komatsubara

1951年1月生まれ、長岡工業高等専門学校電気工学科卒。現在 勸業色彩研究所色彩工学研究室。

◀キーワード：色，測色，色彩計

1. はじめに

色を数値化して表示するための測定を測色という。測色は測定する対象により、光源色及び反射・透過物体色に分けることができる。それぞれ、JIS Z 8724（光源色の測定方法）及び JIS Z 8722（色の測定方法——反射及び透過物体色）として日本工業規格に取り入れられ、広く工業的に利用されている。光の測定に関わる技術は、測光、放射測定が中心であり、測光の中で扱う測色は光源色が中心となる。しかし、測色量を直接用いて色の表示をするという面では、反射及び透過物体色の表示に用いられることが多く、測色計や色彩計という用語も反射及び透過物体色を測定する機器として定着している。

一方、1930年代に色の定量的な表示方法が確立されたことにより、産業界への測色学の普及が進み、「色」も品質管理の対象になり、電子技術の急速な進歩により、短い測定時間で再現性に優れた色彩計が市販されるようになり、様々な製品分野で利用されるようになってきている。しかし、多品種の色彩計が急速に普及したことに伴い、測定方式の違いによって生じる様々な問題が顕在化し、測定結果の取扱いに混乱も見られるようになってきている。

ここでは、反射及び透過物体色の計測技術の動向について概観し、測色において注意すべきいくつかの事例を紹介する。

2. 色彩計の分類

色に関する用語（JIS Z 8105）によれば、色彩計は「色を表示する数値を測定する計測器」であり、ここでいう「色を表示する数値」とは、通常、三刺激値（CIE XYZ 表色系などに代表される三色表色系における色刺激の量）を指す。

色の測定方法——反射及び透過物体色では、色の測定方法を①分光測色方法と②刺激値直読方法に大別し、更に、使用する分光測光器の種類によって①を第1種分光測光器による方法と第2種分光測光器による方法とに分類している。第2種分光測光器は、簡易分光器とも呼ばれ、回折格子によって分散されたスペクトル面にアレイ形の受光素子（シリコンフォトダイオードアレイなど）を配置し、分散の長さ（幅）と受光素子数とから個々の受光素子に対応する波長を特定したり、アレイ形の受光素子の面に干渉フィルタを装着して直接分光反射率を測

定するもので、最近市販されている色彩計の多くがこのタイプに属している。

2.1 分光測色方法の原理

色を数値化して表示する代表的な方法である XYZ 表色系における三刺激値（XYZ）は(1)式によって求めることができる。(1)式の標準の光の分光分布及び等色関数の値は、JIS Z 8720（測色用の標準の光及び標準光源）及び JIS Z 8701（色の表示方法——XYZ 表色系及び $X_{10}Y_{10}Z_{10}$ 表色系）に数表として与えられているので、試料の分光立体角反射率があれば、(1)式の積和を計算することによって三刺激値を求めることができる。このため、測色は分光立体角反射率の測定と(1)式による演算処理に分けることができる。

$$\begin{aligned} X &= K \sum S(\lambda) \bar{x}(\lambda) R(\lambda) \Delta\lambda \\ Y &= K \sum S(\lambda) \bar{y}(\lambda) R(\lambda) \Delta\lambda \\ Z &= K \sum S(\lambda) \bar{z}(\lambda) R(\lambda) \Delta\lambda \\ K &= 100 / \sum S(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta\lambda \end{aligned} \quad (1)$$

ここに、 $S(\lambda)$ ：標準の光の分光分布の波長 λ における値

$\bar{x}(\lambda)$ } XYZ 表色系又は $X_{10}Y_{10}Z_{10}$ 表色系における等
 $\bar{y}(\lambda)$ } 色関数の値
 $\bar{z}(\lambda)$ }

$R(\lambda)$ ：試料の分光立体角反射率

$\Delta\lambda$ ：加算の波長間隔で、一般に、5 nm

Σ ：加算波長範囲は、一般に380nm から780nm

分光立体角反射率は、図1の測定概念図によって波長 λ における標準白色板と試料からの反射光強度を測定し、(2)式によって求める。

$$R(\lambda) = R_w(\lambda) \cdot \{r(\lambda)/r_w(\lambda)\} \quad (2)$$

ここに、 $R_w(\lambda)$ ：標準白色板の分光立体角反射率

図1 分光立体角反射率の置換測定の原理図

$r(\lambda)$: 試料から反射する放射束
 $r_w(\lambda)$: 標準白色板から反射する放射束

2.2 照明及び受光の幾何学的条件

物体から反射する放射束の空間分布は、完全拡散反射面から反射する放射束のように均等拡散ではなく、表面の凹凸によって図2のように均等拡散からはずれた分布をしていることが多い。図1のように完全拡散面に近い空間分布を持つ標準白色板から反射する放射束との比較測定を行う測定では、空間分布の違うもの同士を比較することになり、異なった照明及び受光の幾何学的条件で測定される結果に違いが生じることになる。このため、標準的な照明及び受光の幾何学的条件が規定されている。図3に反射物体色の場合の照明及び受光の幾何学的条件を示す。非金属物体色の場合、表面からの正反射光は照明光とほぼ等しい分光分布を持っているので、光トラップを用いて、正反射光を除いて測定する。

2.3 刺激値直読方法

(1)式から測定波長範囲で、 $S(\lambda)\bar{x}(\lambda)$ 、 $S(\lambda)\bar{y}(\lambda)$ 及び $S(\lambda)\bar{z}(\lambda)$ と等しい分光応答度を持つ受光器があれば、反射光又は透過光を分光せずに直接受光器で測定するこ

とによって(1)式の三刺激値に等しいか、比例する測定値が得られることになり、短時間の測定が可能になる。このような原理によって三刺激値を測定する測色機器を光電色彩計という。光電色彩計の分光応答度は(3)式の条件を満たす必要があるが、この条件をルータ条件という。

$$\begin{aligned} S(\lambda)\bar{x}(\lambda) &= k_x P(\lambda) T_x(\lambda) r(\lambda) \\ S(\lambda)\bar{y}(\lambda) &= k_y P(\lambda) T_y(\lambda) r(\lambda) \\ S(\lambda)\bar{z}(\lambda) &= k_z P(\lambda) T_z(\lambda) r(\lambda) \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、 $P(\lambda)$: 光電色彩計で測定に用いている光源の相対分光分布

$T_x(\lambda)$ } 分光感度補正用フィルタの相対分
 $T_y(\lambda)$ } 光分布
 $T_z(\lambda)$ }

$r(\lambda)$: 光電色彩計で用いている受光器の相対分光応答度

k_x }
 k_y } 定数
 k_z }

分光感度補正用フィルタにはガラスフィルタが用いら

(a)高光沢面, (b)半光沢面, (c)低光沢面

図2 反射光の空間分布の例

図4 光電色彩計の分光応答度の例

図3 照明及び受光の幾何学的条件 (反射光の測定)

表 1 分光測

製品仕様					
①メーカー名	島津製作所	スガ試験場	日本電色工業	日立製作所	ミノルタ
②型名	CLR-7100F	MSC-IS-2DH	SE-2000	C-2000S	CM-3700d
③分光素子	干渉フィルタ自動切り替え	回折格子	回折格子	回折格子	平面回折格子
④受光素子	Si フォトダイオード	Si ダイオードアレイ	シリコンフォトセル	光電子増倍管	Si ダイオードアレイ
⑤測光方法	モニタダブルビーム	モニタダブルビーム	ダブルビーム	ダブルビーム	ダブルビーム
⑥照明および受光の幾何学的条件	0-45	d-8	0-45	0-d, d-0	d-8
⑦測定波長範囲(nm)	400~700	380~780	380~780	380~780	360~740
⑧測定波長幅(nm)	13	—	5	5	—
⑨測定波長間隔(nm)	20	5	10	5	10
⑩測定反射率範囲(%)	0~200	—	—	0~200	0~200
⑪測定用光源	100W ハロゲン	100W ハロゲン	ハロゲン	120W ハロゲン	パルスキセノンランプ
⑫測定面積(mm)	φ30, φ15, φ5	φ30, φ15, φ5	φ30, φ15, φ6	18×2	φ25.4, φ8, 3×5
⑬正反射光の取扱	SCE	SCE/SCI	SCE	SCE/SCI	SCE/SCI
⑭繰り返し性	$\Delta E^*_{ab}(\sigma)=0.015$	$\Delta E^*_{ab}(\sigma)=0.01$	—	—	$\Delta E^*_{ab}(\sigma)=0.01$
⑮再現性	—	—	—	—	—
⑯器差	—	—	—	—	—
表示仕様					
①標準の光	A, C, D ₆₅ , F 6, F 8, F10	A, C, D ₆₅ , F 6, F 8, F10	A, C, D ₆₅ , F 6, F 8, F10	A, C, D ₆₅ , F 8	A, C, D ₆₅ , 他9光源
②視野 (°)	2, 10	2, 10	2, 10	2, 10	2, 10
③色空間	XYZ, xy, CIELAB, CIELUV, HunterLAB, CIELCH, FMC-II 他	XYZ, xy, CIELAB, CIELUV, HunterLAB, CIELCH, CMC 他	XYZ, xy, CIELAB, CIELUV, CIELCH 他	XYZ, xy, CIELAB, CIELUV	XYZ, xy, CIELAB, CIELUV, HunterLAB, CIELCH, CMC
④色指数 色差 白色度 黄色度 条件等色 K/S 分光反射率 統計計算 その他	○ ○(Hunter 他) ○ ○ — ○ — マンセル	○ ○(ISO) ○ ○ — ○ — マンセル グレースケール	○ ○ ○ ○ — ○ ○ マンセル	○ — — — — ○ — マンセル	○ ○(CIE/ASTM) ○ ○ ○ ○ ○ マンセル, グレースケール, 色濃度
⑤インターフェース	RS232C	RS232C FLORA シリーズ	RS232C	RS232C	RS232C

れるが、等色関数の分光分布は単純な形状とはいえず、完全に一致した特性を持つガラスフィルタを入手することは困難である。図 4 に光電色彩計の分光感度と等色関数とを比較した例を示す。

光電色彩計では、ルータ条件とのズレによる測色誤差を考慮する必要があるが、相似した分光反射率を持つ試料対の色差を、簡単な操作で短時間に比較的正確に測定できるため、工業的に広く使用されている。

3. 色彩計の種類

製品のダウンサイジングの流れは色彩計の分野にも波及しており、第 2 種分光測定器を用いた分光型や刺激値直読型の携帯用色彩計が数多く市販されるようになってきている。内外の分光測色方法を用いた代表的な色彩計の仕様を表 1 に示す。表 1 以外にも幾つかの分光測色計

及び携帯用色彩計⁽¹⁾が市販されているが紙面の関係から割愛した。

表 1 は、色彩計のハード面の仕様である製品仕様と測色値の表示や測色値の応用ソフトなどの表示仕様を、各社のカタログを中心にまとめたものであるが、繰り返し性（連続測定における測定値の安定性）、再現性（複数回始動時又は一定周期での測定値の一貫性）、器差についてはカタログによって表現が異なったり記載されていないことが多いため、文献⁽²⁾を参考にした。

表 1 の分光素子及び受光素子の欄を比較すると、干渉フィルタ自動切替えを除くと第 1 種分光測光器の代表例である回折格子／光電子増倍管を用いた波長走査型色彩計は 1 機種だけであり、第 2 種分光測光器を用いた同時測光型色彩計の普及が進んでいることを伺わせる。

色計の種類

村上色彩技術研究所	Hunterlab	BYK-Gardner	Datacolor (ACS)	Milton Roy	Macbeth
CMS-35SP	Ultra Scan	Color Sphere CS-5	Color Mate HDI	Color-Eye	
凹面回折格子	回折格子	回折格子	干渉フィルタ	回折格子	回折格子
Si ダイオードアレイ	Si ダイオードアレイ	Si ダイオードアレイ	Si フォトダイオード	Si ダイオードアレイ	Si ダイオードアレイ
ダブルビーム	モニタダブルビーム	ダブルビーム	ダブルビーム	ダブルビーム	モニタダブルビーム
d-7	d-8	d-8	d-8	d-8, 45-0	d-8
390~730	360~750	380~720	390~710	400~700	360~740
10	10	—	—	—	16
10	10	10	10	20	20
—	0~200	0~200	0~250	0.1~150	0~200
50W ハロゲンランプ	パルスキセノンランプ	ハロゲンランプ	ハロゲンランプ	パルスキセノンランプ	パルスキセノンランプ
12×17, 3.5×7	φ25, φ9.5		φ33, φ9, φ6	φ20, φ8	φ20, 3×8
SCE/SCI	SCE/SCI	SCE/SCI	SCE/SCI	SCE/SCI	SCE/SCI
R%(σ)=0.025	R%0.01p-p	XYZ<0.02	ΔE* _{ab} (σ)=0.01	ΔE* _{ab} (σ)=0.02	ΔE* _{ab} (σ)=0.02
—	ΔE* _{ab} =0.5	—	ΔE* _{ab} <0.2	—	—
—	—	XYZ<0.20	—	ΔE* _{ab} <0.3	ΔE* _{ab} <0.12
A, C, D ₆₅ , F6, F8, F10	A, C, D ₆₅ , 他	A, C, D ₆₅ , 他 8 光源	A, C, D ₆₅ , 他 8 光源	A, C, D ₆₅ , 他 5 光源	A, C, D ₆₅ , F
2, 10	2, 10	2, 10	2, 10	2, 10	2, 10
XYZ, xy, CIELAB, CIELUV, HunterLAB, AN40	XYZ, xy, CIELAB, HunterLab, CIELCH, AN40, CMC	XYZ, xy, CIELAB, HunterLab, CIELCH 他	XYZ, xy, CIELAB, CIELUV, HunterLAB, CIELCH, CMC, 他	XYZ, xy, CIELAB, CIELCH, HunterLAB, CMC, FMC II	XYZ, xy, CIELAB, HunterLab, FMC II
○ ○ ○ ○ ○ ○ — —	○ ○ ○ ○ △ ○ ○ —	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ —	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ —	○ ○ ○ ○ ○ ○ — グレースケール	○ △ △ △ ○ ○ ○ —
RS232C	RS232C	RS232C	RS232C	RS232C	RS232C

4. 測色の特徴

表1の⑥照明及び受光の幾何学的条件を見ると、積分球を用いた拡散照明で試料を照明し、試料法線からやや傾いた方向(8度)の反射光を測定するタイプが多くなっている。更に、⑬正反射光の取扱では、正反射光を含めた測定(SCI)と正反射光を除去した測定(SCE)とに簡単な操作によって切り替えることができるようになってきている。完全拡散面に近い空間分布を持つ無光沢色票と表面にツヤがある高光沢色票をSCI及びSCEの条件によって測定した結果を図5及び図6に示す。無光沢色票の場合には正反射光が含まれないことから正反射光の取扱に関係なく同じ測定値が得られるが、高光沢色票の場

*正反射光の影響を除いて測定するために積分球に取り付ける装置で、一般に、内面が黒色の暗箱が用いられる。

合には、正反射光を含めたSCIの測定値が高く、SCEとの差が測定波長域でほぼ等しく、照明光が重畳された結果であることがわかる。図は無光沢色票と高光沢色票の場合であるが、半光沢色票や金属色の場合では正反射光の取扱による測定値への影響は複雑であり、照明及び受光の幾何学的条件によっても異なる。

前述したように⑥照明及び受光の幾何学的条件では、積分球を用いた拡散照明が多く用いられているが、蛍光増白顔料を含んだ試料では、励起光の強度によって図7のような違いが生じる。図7はキセノンランプの紫外部の強度をフィルタによって変化させたもので、フィルタを挿入していない場合の反射率が高く、蛍光の影響がより強く測定されている。紙・パルプでは、フィルタによって励起光の強度を調整し、一定の値が得られるようにできる色彩計が利用されている。

図5 光トラップの有無による反射率の変化(無光沢色票)

図6 光トラップの有無による反射率の変化(高光沢色票)

また、試料表面の凹凸や透過性の有無によっても測定結果が異なることがある。拡散透過性のある試料を測定時に白色板及び黒色板を裏当て（測定時に試料の背面に置く面）にして測定した結果を図8に示す。白色板を裏当てにした結果の反射率が高く測定されており、試料を透過した拡散光が裏当てに反射し表面反射光として測定された結果である。これと同じ現象が⑫測定面積の違いによっても生じる。このように、拡散透過性を持つ試料や粒状試料については、測色時に試料をどのように調製するかによって測定値に大きな違いが生じる。

拡散透過性や試料表面の形状によって生じる違いは、色彩計の精度とは別に考えるべきであり、測色を難しくしている要因であり、特徴といえる。

5. おわりに

品質保証制度が各産業分野に浸透しつつあり、色彩計のトレーサビリティ**が注目されている。しかし、トレーサビリティの基本となる国家標準が確立されていないことや照明及び受光の幾何学的条件など測定条件の違いによって測定結果が異なることが問題となり、トレーサビリティが確立されるに至っていない。標準白色板は測定の基準となるためメーカー間の違いが小さいことが望まれ

**測定に用いた標準とその目盛り定めに用いた上位標準との関係を明らかにすることで、一般に、国家標準との関係をいう。

図7 励起光の違いによる蛍光増白顔料の反射率の変化

図8 透過性のある試料の裏当ての違いによる反射率の変化

る。このため複数のメーカーが参画して、標準白色板の目盛り付けを行うことを検討している。これらの動きをきっかけとして、少なくとも同じ測定方法による色彩計からの測色値の精度が保証されるようになることが期待される。

反射及び透過物体色の計測技術の動向や問題点について述べた。国内外の色彩計の種類は多様化しており、その中から特定の色彩計を選択する作業は至難なことである。しかし、幸いなことに各メーカーの技術水準は高いレベルにあり、ユーザの要求事項を明確にすることによって解決できる問題も多々ある。最終的な色彩計の選択においては、メーカーとユーザの信頼ある協調関係の確立が必要である。

参考文献

- (1) 大島智夫：「最近の携帯用色彩計の動向」，日本印刷学会誌，Vol. 30，pp.290-296（1993）
- (2) James Rodgers et al："A Comparative Study of Color Measurement Instrumentation"，Color Res. & Appl.，Vol.19，pp. 322-331（1994）