

# 個人の視覚感度の測定

山内 泰樹

## Measurement of Individual Color Matching Functions

Yasuki YAMAUCHI

In this article, we described our experimental results of measuring individual color matching functions. For this purpose, we built a compact apparatus with the use of a digital micro-mirror device (DMD) that can present any combination of monochromatic light. This can be realized by selectively switching DMD, on which spectrally decomposed light using a diffraction grating is focused. Observers adjusted the color of the test stimulus to match that of the reference white. From the experimental results, we estimated the individual CMFs using a linear algebraic algorithm by assuming the additivity of CMFs. The CMFs of eight observers were different, and also different from those of the CIE standard observer.

**Key words:** color matching functions, visual functions, individual differences

近年、プリンターやディスプレイ等の異種メディア間でのカラーマッチングを高精度に行えるカラーマネージメントシステムが求められるようになってきた。しかし、異種メディア間で刺激の色見えが等しいときに、測色的な三刺激値は必ずしも一致しないことが知られている<sup>1)</sup>。また、多原色ディスプレイを用いて分光組成の異なる条件で等色した際にも、測色値が異なる場合があることが報告されている<sup>2)</sup>。これらの説明として、測色値を求める際に用いられているCIEが制定した標準観測者の等色関数(CIE1931XYZ等色関数)が実在の観測者の等色関数と合っていない可能性や、個々の観測者の等色関数の違いが大きいため、単一の標準感度だけで色を取り扱うことが不適当であることを示している可能性がある。等色関数とは、3つの原刺激をどのような割合で混色したときに各単色光と等色するか、それらの強度の相対値で制定したものである。1931年に標準観測者としてCIEによって定められた等色関数は、17名の実験データの平均値であるが、後にCIEでは10度視野標準観測者や補助標準観測者なども勧告している<sup>3)</sup>。

通常、等色関数測定の実験では、3つの原刺激の波長を固定し、単色のテスト光と原刺激の適当な組み合わせで等

色を行うことにより等色関数を求める。そのような実験装置を用いた実験により新しい等色関数の提案もなされている<sup>4)</sup>が、本稿では、任意スペクトル呈示装置という新しい実験装置を用い、分光組成の異なるたくさんの条件等色対を分析することにより等色関数を算術的に推定する手法、およびその方法を用いて個人の等色関数を測定した結果について紹介する。

### 1. 等色関数測定装置と等色関数の算出

#### 1.1 任意スペクトル呈示装置

本稿で紹介する任意スペクトル呈示装置は、Texas Instruments社から提供されているDigital Micro-mirror Device (DMD<sup>TM</sup>)を中心に構成されている。図1に示したのは実験装置の概略図である。

キセノン光源からの光はレンズを通過後に平行光にされ、反射型グレーティングに入射、スペクトル成分に分光されて、DMD上に集光される。DMDは一辺16  $\mu\text{m}$ のマイクロミラーが一定間隔で配列したデバイスで、オンとオフの状態でミラーの方向が異なるため、ミラーのスイッチングによりスペクトル光の反射方向を変化させることができる。すなわち、所望の単色光が照射されている部分のミラーだけを選択的にオンにすることによって、DMDから

富士ゼロックス(株)技術開発本部 (〒259-0157 神奈川県足柄上郡中井町境 430) E-mail: Yasuki.Yamauchi@fujixerox.co.jp

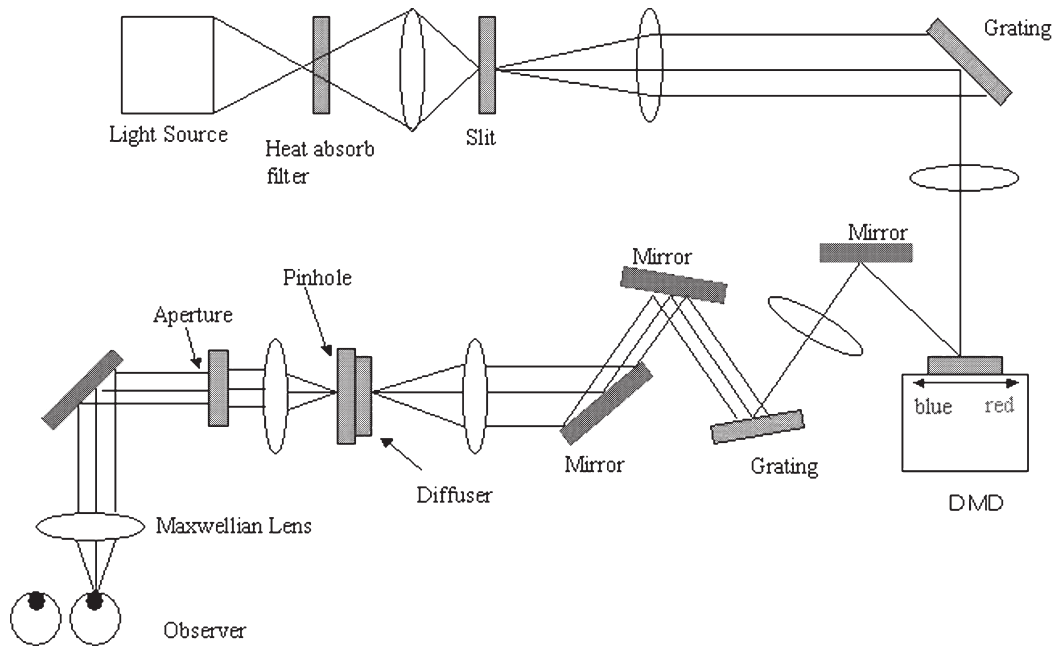


図1 実験装置の概略図.

反射する光を任意の単色光の組み合わせで構成できる．その反射スペクトル光は，グレーティングにより再度混合され，さらに，拡散板，ピンホール，レンズ等を通じた後に，被験者に呈示される．DMD 反射後の単色性を分光放射輝度計により測定したところ，400～700 nm の範囲で，半値幅（FWHM）が 15 nm 程度であった．各波長成分の強度は，集光している個所の DMD のオン時間をパルス変調することによって調節が可能で，実際にはその画素（ミラー）への描画信号（階調値）を変化させた．

刺激は直径 2 度の円形で，周辺は暗黒である．刺激として参照白色光とテスト光を用いたが，被験者の操作により，呈示される刺激は参照白色光とテスト光が交互に切り替えられた．テスト光は，400～700 nm 間の 10 nm ごとの 31 波長成分から選択的に構成される固定強度のオフセット光と，被験者の操作に応じて強度が変化する  $R_0$  (=620 nm)， $G_0$  (=530 nm)， $B_0$  (=450 nm) の原刺激光から構成される．被験者は，参照白色光と見えが完全に等しくなるように，テスト光の色み（黄/青，赤/緑）と明るさを調整した．オフセット光は，呈示される波長成分が互いに一次独立になるような 31 セットを用意し，各波長光が同一強度となるように設定した．また，実験では，原刺激  $R_0$ ， $G_0$ ， $B_0$  だけを用いて等色する試行を含めた．

## 1.2 等色関数の導出

等色が成立したときには，等色関数と呈示された光の強度の積和によって導出される三刺激値が一致すると仮定する．RGB 等色関数を表すマトリックスを  $C$ ，オフセット光

と原刺激の強度をそれぞれ  $m_i$ ， $b_i$  ( $i=1\sim 31$ ) で表すと， $i$  番目のセットのオフセット光で等色が成立した時点でのテスト光と参照白色光（強度： $r_{\text{ref}}$ ）の三刺激値が一致しているので，

$$C(m_i + b_i) = C(r_{\text{ref}}) \quad (1)$$

と記述できる．また，原刺激だけで参照白色光と等色させたときの強度を  $b_0$  と記述すると，

$$C(b_0) = C(r_{\text{ref}}) \quad (2)$$

31 セットのオフセット光すべてに関して式 (1) は成立するので，左辺を  $m_i + b_i$  を要素とする 31 列のマトリックス  $M+B$  とし，同時に式 (1) の右辺をすべて式 (2) で置き換えると

$$C(M+B) = C(b_0 \cdots b_0 \cdots b_0) \quad (3)$$

オフセット光は各単色光の強度が一定 ( $I_{\text{cons}}$ ) であるので， $M = I_{\text{cons}} \cdot M'$  と表記すると， $M'$  はその構成要素が 0 か 1 の行列となり，

$$\begin{aligned} C(I_{\text{cons}} \cdot M' + B) &= C(b_0 \cdots b_0 \cdots b_0) = CP, \\ \text{ただし } P &= (b_0 \cdots b_0 \cdots b_0) \\ \therefore I_{\text{cons}} \cdot CM' &= C(P - B) \end{aligned} \quad (4)$$

$C$  は RGB 等色関数であるので，その定義から原刺激  $R_0$ ， $G_0$ ， $B_0$  に対して等色関数は (1,0,0)，(0,1,0)，(0,0,1) となる．一方，式 (4) の右辺は原刺激成分しかもたない

ので,

$$I_{\text{cons}} \cdot CM' = (P - B) \quad (4)'$$

となる. 31 セットのオフセット光は一次独立であるので,  $M'$  の逆行列が計算でき,  $P$  (すなわち  $b_0$ ) と  $B$  (すなわち  $b_i$ ) が求められれば, 式 (4)' から等色関数  $C$  は

$$C = 1/I_{\text{cons}} \cdot (P - B) \cdot (M')^{-1}$$

と求めることができる.

XYZ 等色関数は, RGB 等色関数から線形変換で求めることができる. 「原刺激の波長  $\lambda_r, \lambda_g, \lambda_b$  では RGB 等色関数の値が (1,0,0), (0,1,0), (0,0,1) となる」という拘束条件を考慮することにより, 求めた RGB 等色関数を  $\bar{r}(\lambda)$ ,  $\bar{g}(\lambda)$ ,  $\bar{b}(\lambda)$  で, XYZ 等色関数を  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$  で表すと,

$$\bar{x}(\lambda) = \bar{x}(\lambda_b) \bar{b}(\lambda) + \bar{x}(\lambda_g) \bar{g}(\lambda) + \bar{x}(\lambda_r) \bar{r}(\lambda)$$

$$\bar{y}(\lambda) = \bar{y}(\lambda_b) \bar{b}(\lambda) + \bar{y}(\lambda_g) \bar{g}(\lambda) + \bar{y}(\lambda_r) \bar{r}(\lambda)$$

$$\bar{z}(\lambda) = \bar{z}(\lambda_b) \bar{b}(\lambda) + \bar{z}(\lambda_g) \bar{g}(\lambda) + \bar{z}(\lambda_r) \bar{r}(\lambda)$$

という変換式が得られる.

## 2. 実験結果

筆者ら 9 名の被験者の結果を図 2 に細線で示す. 6 セッションの平均値である. 太線で示したのは, 標準観測者の等色関数である.

まず, これらの結果から, すべての被験者で等色関数が異なることがわかる. 特に, 短波長成分での  $z$  関数の違いが顕著である. それに対して, 中・長波長に感度を有する  $x, y$  関数についてはさほど違いはみられない. 主成分分析を行うと, この違いはレンズの透過率に関与していると予想される. また, 標準観測者とも等色関数が異なることがわかる. しかしながら, 9 名の平均値を求めると,  $x, y$  関数はほとんど標準観測者と一致する.  $z$  関数に関しては, 短波長成分で標準観測者よりも高めの値になり, 中波長成分では逆に多少の負の値をとった.

等色関数を任意スペクトル呈示装置, および算術的手法を適用することにより, 精度よく各被験者の等色関数を求めることができ, 等色関数に個人差があることが示された. 今後は, これらの個人差が何に起因しているかというメカニズムの検討<sup>9)</sup>, より多くの被験者の等色関数を求め

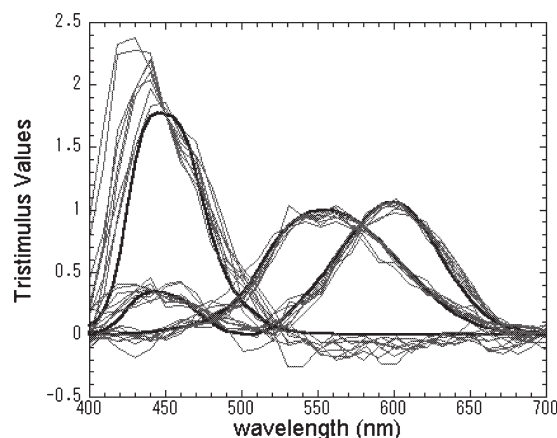


図2 9名の等色関数.

て個人差の定量化を図ること, 個人の等色関数を補償することにより条件等色成立時の三刺激値がどの程度説明できるのかを検証していく必要がある.

最近の学会誌でも, 等色関数の導出方法を論じた論文などが散見され<sup>6,7)</sup>, 近年再度脚光を浴びはじめた感がある. 今後さらに, 精度の高い等色関数に関する知見が獲得されることが期待できる.

## 文 献

- 1) R. L. Alfvén and M. D. Fairchild: "Observer variability in metameric color matches using color reproduction media," *Col. Res. Appl.*, **22** (1997) 174-188.
- 2) K. Ohsawa, T. Teraji, F. König, M. Yamaguchi and N. Ohya: "Color matching experiment using 6-primary display," *Proceedings of the 3rd International Conference on Multispectral Color Science* (2001) pp. 85-88.
- 3) G. Wyszecki and W. S. Stiles: *Color Science*, 2nd Ed. (John Wiley & Sons, New York, 1982) pp. 132-143.
- 4) J. A. Martinez, F. Peres-Ocon, A. Garcia-Beltran and E. Hita: "New deviate observer (JF-DO) obtained from experimental color-matching functions for small fields of real observers," *Col. Res. Appl.*, **28** (2003) 209-215.
- 5) M. A. Webster and D. I. A. MacLeod: "Factors underlying individual differences in the color matches of normal observers," *J. Opt. Soc. Am. A*, **5** (1988) 1722-1735.
- 6) W. A. Thornton: "Spectral sensitivities of the normal human visual system, color-matching functions and their principles, and how and why the two sets should coincide," *Col. Res. Appl.*, **24** (1999) 139-156.
- 7) A. D. Broadbent: "A critical review of the development of the CIE1931 RGB color-matching functions," *Col. Res. Appl.*, **29** (2004) 267-272.

(2005 年 1 月 25 日受理)