研究論文

Received May 12, 2005; Revised July 3, 2006; Accepted September 28, 2006

六原色ディスプレイを用いた等色実験

大澤 健郎*・味戸 剛幸*・山口 雅浩**,***・大山 永昭**,***

*オリンパス株式会社研究開発センター 〒192-8512 八王子市久保山町 2-3

**東京工業大学像情報工学研究施設 〒226-8503 横浜市緑区長津田町 4259

***情報通信研究機構赤坂ナチュラルビジョン・リサーチセンター 〒107-0052 東京都港区赤坂 2-17-28 NTT 赤坂ビル旧館 1F

Color Matching Experiments Using Six-Primary Display

Kenro OHSAWA*, Takeyuki AJITO*, Masahiro YAMAGUCHI****** and Nagaaki OHYAMA*****

*Corporate R & D Center, Olympus Co., 2-3 Kuboyama-cho, Hachioji 192-8512

**Imaging Science and Engineering Laboratory, Tokyo Institute of Technology, 4259 Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama 226-8503

***Akasaka Natural Vision Research Center, National Institute of Information and Communications Technology, 2-17-28 Akasaka, Minato-ku, Tokyo 107-0052

We quantitatively investigated the color differences of two color-stimuli perceptually matched by twelve observers due to variations of the observers' color matching functions (CMFs). The experiments were conducted using two different combinations of 3-primary constituting a 6primary display. The average color difference calculated using the CIE (Commission Internationale de l'Eclairage) 1931 CMFs was approximately 10 to 20, measured in ΔE units. The inter-observer variations of the color-matching were also large. The CIE 1964 CMFs and Juddmodified CMFs were also used for the evaluation, with the Judd-modified CMFs reducing the average color difference to approximately 8 in ΔE units. The simulation experiments using ten sets of CMFs data measured by Stiles and Burch indicates that the variation of the observers' CMFs brings large color difference in this experiment. This suggests that the performance of the available CMFs and the variations among the observers' CMFs significantly influence colorimetric color reproduction when a 6-primary display is used.

Key words: multi-primary display, color reproduction, color matching functions, observer metamerism

1. はじめに

現行のディスプレイは, Red (R), Green (G), Blue (B) の三原色により色を表示するが,近年,4つ以上の原色を 用いた多原色ディスプレイの開発¹⁻³⁾が行われている。多 原色ディスプレイでは,広い色域を比較的自由に設計でき ることから,高彩度色を含む CG の作成やディジタルアー カイブ,電子商取引など,被写体の色を忠実に再現するこ とが必要とされるシステムへの応用が期待される。

色再現システムでは、色の定量値(測色値)として、 国際照明委員会(CIE: Commission Internationale de l'Eclairage)の規定するCIE 1931 等色関数⁴⁾を用いて算 出されるXYZ 三刺激値が広く用いられている。人の眼の 網膜には、色を知覚する錐体と明るさを知覚する桿体があ るが、等色関数は錐体のみが働く明所視とよばれる視覚状 態における眼の分光感度に対応している.XYZ 三刺激値 は、眼に入る光のスペクトルと3色の原刺激の混色光とを 等色(色の見えを一致)させるために必要となる原刺激量 であり、スペクトルに等色関数を掛けて波長積分した値と して算出される。被写体のスペクトルと再現画像のスペク トルが異なる場合でも、原理的には CIE の XYZ 三刺激 値を一致させる測色的な色再現により、それらの色の見え を一致させることが可能であるが、そのためには CIE 1931 等色関数が実際の観測者の等色関数と一致している ことが前提となっている。

光学 35, 12 (2006) 655-664

E-mail: ke_ohsawa@ot.olympus.co.jp

³⁵ 巻 12 号 (2006)

CIE 1931 等色関数は、Guild⁵⁾と Wright⁶⁾の色度値の等 色実験データと CIE 1924 比視感度 V(λ) とから,明るさ の加法性を仮定して算出されたものである。しかし、CIE 1931 等色関数の勧告後, Judd⁷⁾, Vos⁸⁾ により V(λ) の修 正が提案され、それに伴って CIE 1931 等色関数にも修正 が必要になると考えられた。また、Stiles と Burch⁹ によ る等色関数の測定においても, 被験者の等色関数データの 平均と CIE 等色関数には有意な差があることが報告され た.しかし、CIEは、これらの差は標準を変更するほど の違いではないとして、現在でも2°視野用に CIE 1931 等 色関数が国際標準として利用されている。また、より広い 視野に関して、Stiles と Burch¹⁰⁾ による 49 名の被験者に 対する等色関数の測定データと Speranskaya¹¹⁾の測定デ ータをもとに、10°視野用のCIE 1964 等色関数が勧告さ れている. その後, 等色関数の再測定はほとんど行われて いないが、CIE 1931 等色関数が多くの人の平均的な等色 関数と一致しているかという観点での正確さや、等色関数 の個人差に関する研究12-18)は数多く行われており、反射 物体とディスプレイ間の等色において, CIE 1931 等色関 数を用いて算出した測色値の間に大きな色差が生じる場合 があることが報告19,20) されている。しかし、これらの等色 実験に関する検討では、おもに反射/透過物体の光とCRT ディスプレイ等を用いた等色であり,等色に用いる刺激の スペクトルが比較的滑らかな特性となっている。一方,六 原色ディスプレイ1)では原色スペクトルが狭帯域であり, 6つの原色の組み合わせにも自由度があるため、三原色の 狭帯域スペクトルを用いた等色12-15,17)の場合と比較して も,等色するスペクトル間にさらに大きな違いが生じる場 合がある。このようにスペクトルの違いがきわめて大きい 等色において,標準観測者と異なる等色関数を有する観察 者が CIE 1931 等色関数により算出した XYZ 三刺激値を 一致させた刺激対を観察した場合に、どの程度の色の違い を感じるか、定量的な検証は行われていない、多原色ディ スプレイや狭帯域の原色スペクトルを利用している三原色 の広色域ディスプレイ²¹⁾では、等色関数の正確さや個人 差による違いが色再現へ与える影響は大きいと考えられ る.

本研究では、測色的な色再現において、CIE 等色関数 と実際の観測者の等色関数との違いにより生じる色差を定 量的に調べることを目的として、六原色ディスプレイの異 なる三原色の組み合わせを用いて等色実験を実施し、等色 した刺激の色差を評価した.さらに、等色実験結果に対し て、CIE 1931 等色関数、CIE 1964 等色関数、Judd 補正等 色関数⁷⁾を用いて計算した色差の比較と、Stiles と Burch



Fig. 1 Spectral power distributions displayed by Projector 1 (dotted line) and Projector 2 (solid line).

の等色関数を用いたシミュレーションとの比較により,実 験結果の色差とばらつきの要因に関して考察した.

2. 六原色ディスプレイを用いた等色実験

2.1 六原色ディスプレイ

+

本実験では、6つの狭帯域スペクトルを原色とする六原 色ディスプレイを用いて等色実験を行った。六原色ディス プレイは,異なる分光特性を有するフィルターが挿入され た2台の三原色(RGB)の液晶プロジェクター(ビクタ ー製 DLA G-10) により構成した。2 台のプロジェクター (プロジェクター1, プロジェクター2) のうち, プロジェ クター1にはRGB 各原色スペクトルのピーク波長付近よ りも長波長側の光のみを透過する短波長カットの干渉フィ ルターを挿入し、同様にプロジェクター2には短波長側の 光のみを透過する長波長カットの干渉フィルターを挿入す ることにより,それぞれ異なる波長帯域の六原色スペクト ルを生成した。これらの2台のプロジェクターの投影光を 透過スクリーン上で重ね合わせて表示することにより,1 枚の六原色の画像を表示した。六原色ディスプレイにより 表示された刺激のスペクトルの一例を Fig.1 に示す。プ ロジェクター1の三原色スペクトル(破線)とプロジェク ター2の三原色スペクトル(実線)により,狭帯域の六原 色スペクトルが構成された。

2.2 実験装置

六原色ディスプレイの構成と実験装置の配置をFig.2 に示す.プロジェクター1とプロジェクター2はそれぞ れ、PC1とPC2により制御されてスクリーン上に画像を 投影表示した.被験者は、背面からスクリーン上に重ね合 わせ投影された画像を観察した.スクリーンのサイズは縦 200 cm×横 265 cm であるが、本実験ではスクリーンの右 下約4分の1の領域を用いた.実験室内は暗室であり、ス クリーン上には、左右に並置したターゲット刺激(target

656 (40)

光 学

+



Fig. 2 Illustration of the apparatus used in the color-matching experiments.

stimulus) とマッチング刺激 (matching stimulus), それ らの境界と周囲の黒いマスク領域 (black mask), その外 側のグレーの近接領域 (proximal field), さらにその外側 の白色の背景 (background) を表示した.近接領域, 背 景はプロジェクター1により表示されており, それらの領 域のサイズはそれぞれ,縦30 cm×横48 cm,縦98 cm× 横128 cm であった.ターゲット刺激とマッチング刺激 は,幅約1 cm のマスク領域により分離されていた.ター ゲット刺激とマッチング刺激のサイズはほぼ等しく,15 cm×15 cm (本実験の観察距離約4 m から見た場合に約 2.2°×2.2°の視野角となる)の正方形であった.なお,被 験者は本実験において,ターゲット刺激とマッチング刺激 がどちらのプロジェクターにより表示されているかは識別 できないようになっていた.

被験者によって等色されたターゲット刺激とマッチング 刺激のスペクトルは,観察位置とほぼ同じ位置に設置され た分光放射輝度計 SR-2A (TOPCON 製) により測定さ れた.SR-2A による測定領域の視野角は 2°,スペクトル の測定波長間隔は 1 nm,測定波長範囲は 380 nm から 780 nm に設定した.ただし,ターゲット刺激とマッチング刺 激の測定領域は各刺激領域の中心付近とした.

なお、測定の精度を検証するために、SR-2Aと同一条 件で分光放射輝度計 PR650 (PhotoResearch 社製) 2 台 を用いて、実験に用いた3種類の刺激を測定した。3 台の 分光放射輝度計により測定した測色値の色差 ⊿Eab は最 大1.6 であった。また、実験に用いた表示スペクトルが SR-2A の測定波長範囲の外側ではほとんどエネルギーを もっていないことと、偏光に対する SR-2A の測定誤差は

Table 1 CIE 1931 XYZ tristimulus values and L*a*b* values measured in displayed areas.

		5				
Displayed area	Х	Y	Ζ	L*	a*	b*
Background	32.42	39.26	31.68	100	0	0
Proximal field	12.64	15.35	13.99	68.82	-0.46	-6.06
Red	11.57	9.54	6.62	56.39	42.54	6.12
Green	12.48	19.73	9.41	76.23	-33.91	25.57
Blue	8.79	8.64	23.81	54.04	21.64	-61.09

無視できる値であることを確認した.また,実験と同一の 測定条件において,ターゲット刺激とマッチング刺激の測 色値が数分間程度の間で十分安定していることを確認した.

2.3 刺 激

本実験では、ターゲット刺激として、赤、緑、青の3種 類の色を設定した。背景、近接領域、ターゲット刺激の CIE 1931XYZ 三刺激値と CIE 1976L*a*b* 値を Table 1 に示す。L*a*b* 値は、背景の XYZ 三刺激値を白色点と して算出した。ターゲット刺激のスペクトルは、プロジェ クターの時間的な変動のため被験ごとに異なっており、 赤、緑、青のターゲット刺激の L*a*b* の標準偏差はそれ ぞれ 2.8、1.1、2.4 であった。Table 1 に示したターゲット 刺激の XYZ 三刺激値は、実験に用いたターゲット刺激の XYZ 三刺激値の平均値である。ターゲット刺激の XYZ 三刺激値は、マッチング刺激を表示したプロジェクター2 の色再現範囲内の値となっていた。

2.4 被 験 者

被験者は, IS (男), NB (男), TT (男), AT (男), MY (女), SJ (女), FK (女), NK (男), OK (男), KF (男), UT (男), YM (男) の 12 名であった. 被験者の年齢は, 23 歳~37 歳, 平均年齢は 28.7 歳であった. すべて正常色覚 者であるが, 4 名 (IS, NB, TT, OK) は裸眼, 8 名は眼 鏡もしくはコンタクトレンズを着用して実験を行った. 被 験者 KF はコーカサス人であるが,他 11 名はすべて日本人 であった. 被験者はおもに色再現に関する研究に携わる学 生・研究者であるが, 被験者 KF 以外は本実験のような等 色実験を行った経験はなかった.

2.5 実験手続き

実験は、被験者が暗室に入ってから5分後に開始した. この間に、インストラクターが被験者に対して、左側の色 (ターゲット刺激)と同じ色となるように右側の色(マッ チング刺激)を変化させるように教示を行った.

被験者は、ターゲット刺激とマッチング刺激を同時に両 眼で観察し、2つの刺激の色が一致(等色)しているか否 かを判断した。等色していないと判断した場合には、等色

35 巻 12 号 (2006)

させるために必要と思われるマッチング刺激の色の変化方 向をインストラクターに口頭で指示した。被験者がインス トラクターに指示する色の変化方向は, RGB もしくは色 相,明度,彩度の色空間のいずれかであった。ただし、こ こで用いられた RGB, 色相, 明度, 彩度の座標は, CIE LAB 等の標準の色空間座標には対応していなかった. イ ンストラクターは、被験者の指示に従って、マッチング刺 激を表示する PC2 のキーボードとマウス操作によりマッ チング刺激の表示色を変化させた。被験者は、変化させた マッチング刺激に対して,再度等色についての判断を行っ た. 被験者がマッチング刺激とターゲット刺激の色が等色 していると判断するまで,この手続きを繰り返した.マッ チング刺激とターゲット刺激の色が等色しているか否かの 判断は被験者に任せられており,等色実験にかける時間に 制限はなかった。被験者が等色していると判断して等色実 験を完了した直後に、ターゲット刺激とマッチング刺激の スペクトルをSR-2Aにより測定した。各被験者は、この 実験を赤、緑、青の3種類のターゲット刺激について順に 連続して行った。

被験者が等色したターゲット刺激とマッチング刺激のス ペクトルから,等色関数を用いてそれぞれの XYZ 三刺激 値,L*a*b*を算出した.ここで,等色関数としては, CIE 1931 等色関数,CIE 1964 等色関数,Judd により補正 された CIE 1931 等色関数⁷¹ (Judd 補正等色関数)を用い た.視野角が4[°]以上の場合に用いられる CIE 1964 等色関 数を用いた理由は,本実験の2つの刺激全体では視野角が 4[°]以上になったこと,被験者の視線を固定していなかっ たことから,より広い視野が等色に寄与していた可能性も 考えられたためである.

実験1として、12名の被験者が赤、緑、青の刺激についての等色実験(1セッション)を行った。次に、実験2 として、実験1における等色の精度を確認するために、上記12名のうち3名(TT,OK,KF)が実験1と同様の 実験を10回(10セッション)繰り返し行った。10セッションの実験は、被験者の要望に応じて2~3回に分割して 行った。ただし、実験を分割して行う場合は、再開する前に再度5分間の順応を行った。各刺激について、12名の 被験者が等色に要した時間は大きく異なり、5~30分程度 であった。

3. 結 果

3.1 実験1

実験1において、赤、緑、青の各刺激について12名の 被験者が等色した結果をTable2に示す.Table2の値 は、各被験者が等色したターゲット刺激とマッチング刺激 に対して, CIE 1931 等色関数を用いて算出した XYZ 三 刺激値とそれらの差 $\Delta X \Delta Y \Delta Z$ を示している。また, Table 1 に示す background の XYZ 三刺激値を白色点と してターゲット刺激とマッチング刺激のL*a*b* 値を算出 し、それらの差 ⊿a* ⊿b* を求めた結果を Fig.3 に示す. Table 2 $\mathcal{O} \Delta X$, ΔY , ΔZ , Fig. 3 $\mathcal{O} \Delta a^*$, $\Delta b^* \mu$, $\nu \tau$ もマッチング刺激の値からターゲット刺激の値を引いた値 である.赤、緑、青の各刺激について、12名の被験者の等 色結果の色差ΔEの平均値(平均色差)は、それぞれ 9.5、 11.5, 19.1, 色差 ∠E の標準偏差は, それぞれ 3.5, 7.5, 5.1 であった. ここで, 色差 ΔEは, ターゲット刺激とマッチン グ刺激のL*a*b* 空間におけるユークリッド距離として定 義した. 色の識別閾は、刺激の提示条件などに依存するた め明確には規定できないが、一般に ⊿E=1 程度とされて おり,本実験結果の平均色差は被験者が等色したとする色 の色差としては大きな値といえる。Table2に示すよう に,ほとんどの等色結果において,ターゲット刺激の XYZ 三刺激値に対してマッチング刺激の XYZ 三刺激値 はそれぞれ小さくなっているが, Yの減少幅に対して X と乙の減少幅が相対的に大きくなっている. そのために, Fig.3の⊿a*⊿b*の分布の中心は原点ではなく, 第二象限 $(\Delta a^* が負, \Delta b^* が正) に偏った分布となった。また、被験$ 者間の等色のばらつきも大きいことがわかる.L*の差 △L* の絶対値は ⊿a*, ⊿b* の絶対値と比較して小さいので 図には示していないが、赤、緑、青の各色について AL*の 平均値は、それぞれ-1.40、-0.93、-1.11、絶対値が最大 となる ⊿L* は、それぞれ-2.42、 -2.99、 -1.86 であった. なお,本実験では,年齢,性別,眼鏡もしくはコンタクト レンズを着用しているか否かにより等色の傾向に違いはみ られなかった.

同様に、CIE 1964 等色関数,Judd 補正等色関数を用い て $\Delta a^* \Delta b^*$ を算出した.ここでXYZ 三刺激値の計算に 用いた、CIE 1931 等色関数,CIE 1964 等色関数,Judd 補 正等色関数の分布を Fig. 4 に示す.Judd 補正等色関数(点 線)は CIE 1931 等色関数(太線)に対して、460 nm 以下の 短波長領域が相対的に高くなっており、460 nm よりも長波 長側では CIE 1931 等色関数と一致している.CIE 1964 等 色関数,Judd 補正等色関数を用いて求めた $\Delta a^* \Delta b^* を$, それぞれ Fig. 5, Fig. 6 に示す.全体の傾向としては、CIE 1931 等色関数を用いて算出した $\Delta a^* \Delta b^* を$ 象限に偏った分布となった.Table 3 に、各等色関数を用 いて算出した平均色差(Avg.)、色差の標準偏差(SD.)、 最大色差(Max.)を示す.3つの等色関数のうちJudd 補

658 (42)

光 学

+

Red stin	Red stimulus									
	Target stimulus			Ma	Matching stimulus			Color difference		
	Х	Y	Ζ	Х	Y	Ζ	⊿x	⊿Y	ΔZ	
IS	11.54	9.90	6.43	10.70	9.29	4.39	-0.83	-0.61	-2.04	
NB	11.56	9.79	6.50	10.40	9.20	5.15	-1.16	-0.59	-1.35	
TT	11.43	9.47	6.53	10.87	9.35	5.75	-0.56	-0.12	-0.78	
AT	11.65	10.05	6.48	11.01	9.74	5.68	-0.64	-0.30	-0.80	
MY	11.64	9.32	6.89	10.56	8.72	5.27	-1.08	-0.60	-1.62	
SJ	11.79	9.61	6.75	10.29	8.70	5.09	-1.51	-0.91	-1.66	
FK	11.76	9.62	6.75	10.58	9.04	5.35	-1.18	-0.58	-1.40	
NK	11.58	9.33	6.64	9.53	8.41	4.58	-2.05	-0.91	-2.06	
OK	11.33	9.27	6.54	10.26	8.87	4.76	-1.07	-0.40	-1.77	
KF	11.22	8.96	6.56	9.84	8.13	5.17	-1.39	-0.83	-1.39	
UT	11.44	9.54	6.52	10.51	9.27	5.08	-0.93	-0.27	-1.44	
YM	11.85	9.58	6.81	11.19	9.24	5.18	-0.66	-0.34	-1.63	
Avg.	11.57	9.54	6.62	10.48	9.00	5.12	-1.09	-0.54	-1.50	

Table 2 CIE 1931 XYZ tristimulus values of the target stimulus, the matching stimulus, and the color differences for individual subjects.

Green stimulus

	I	arget stimulu	1S	Ma	atching stimu	lus	С	olor differend	ce
	Х	Y	Ζ	Х	Y	Ζ	⊿X	⊿Y	ΔZ
IS	12.55	19.85	9.21	10.95	19.74	7.80	-1.60	-0.12	-1.41
NB	12.50	19.82	9.22	11.47	19.13	7.70	-1.03	-0.69	-1.52
TT	12.36	19.55	9.30	11.55	19.23	8.35	-0.82	-0.32	-0.95
AT	12.62	20.00	9.25	11.76	18.54	8.28	-0.85	-1.46	-0.97
MY	12.41	19.54	9.65	10.42	17.70	7.36	-1.98	-1.84	-2.29
SJ	12.88	20.35	9.72	11.78	19.97	8.43	-1.10	-0.38	-1.29
FK	12.38	19.62	9.49	10.77	19.18	7.40	-1.62	-0.44	-2.09
NK	12.33	19.49	9.51	12.45	19.82	7.84	0.11	0.33	-1.67
OK	12.32	19.47	9.31	10.86	19.61	6.78	-1.46	0.14	-2.53
KF	12.19	19.22	9.40	10.95	17.65	8.72	-1.24	-1.58	-0.68
UT	12.43	19.65	9.25	11.62	19.74	7.03	-0.81	0.09	-2.23
YM	12.76	20.18	9.61	10.80	19.44	7.07	-1.96	-0.74	-2.54
Avg.	12.48	19.73	9.41	11.28	19.15	7.73	-1.19	-0.58	-1.68

Blue stimulus

	T	arget stimul	us	Ma	atching stime	ılus	С	olor differend	ce
-	Х	Y	Ζ	Х	Y	Z	⊿X	⊿Y	⊿Z
IS	8.98	9.09	23.47	7.95	8.75	18.79	-1.03	-0.34	-4.68
NB	8.86	8.90	23.36	7.69	8.44	17.91	-1.17	-0.45	-5.45
ΤT	8.74	8.59	23.55	7.20	8.24	16.27	-1.54	-0.35	-7.28
AT	9.00	9.16	23.38	8.12	8.90	19.01	-0.88	-0.26	-4.37
MY	8.78	8.42	24.42	7.50	8.18	17.31	-1.28	-0.24	-7.11
SJ	8.88	8.67	24.22	7.48	8.19	17.67	-1.39	-0.48	-6.54
FK	8.91	8.69	24.29	7.73	8.19	17.64	-1.18	-0.50	-6.65
NK	8.69	8.39	24.08	7.17	7.92	15.82	-1.52	-0.47	-8.26
OK	8.65	8.41	23.59	7.02	7.75	15.35	-1.63	-0.66	-8.24
KF	8.54	8.22	23.66	7.51	7.81	19.87	-1.03	-0.42	-3.79
UT	8.81	8.73	23.56	7.74	8.23	17.26	-1.07	-0.50	-6.30
YM	8.69	8.41	24.18	7.81	8.24	18.48	-0.88	-0.17	-5.70
Avg.	8.79	8.64	23.81	7.58	8.24	17.62	-1.22	-0.40	-6.20

正等色関数を用いた場合の平均色差が最も小さくなった が,赤,緑,青の刺激に対しての平均色差はそれぞれ 6.2, 9.6, 8.4 であり,依然として大きな値となっている.な お,Judd 補正等色関数をさらに修正したとされる Vos の 等色関数⁸⁾を用いて同様の評価を試みたが、色差の低下は みられなかった。Judd 補正等色関数から Vos の等色関数 への修正はわずかであり、本実験結果に有意な差を与える ほどの違いはないと考えられる。

35巻12号(2006)

659 (43)







Fig. 4 The CIE 1931 color-matching functions (bold lines), the CIE 1964 color-matching functions (solid lines), and the Judd-modified CIE 1931 color-matching functions (dotted lines).



Fig. 5 Color-difference distributions calculated using the CIE 1964 color-matching functions. (a) Red stimulus, (b) Green stimulus, (c) Blue stimulus.



Fig. 6 Color difference distributions calculated using the Judd-modified CIE 1931 color-matching functions. (a) Red stimulus, (b) Green stimulus, (c) Blue stimulus.

Table 3 Average color differences (Avg.) between RGB target and matching stimuli calculated using the CIE 1931 CMFs, the CIE 1964 CMFs, and the Judd-modified CIE 1931 CMFs.

	(CIE 1931 CMFs	
	Avg.	SD.	Max.
R	9.5	3.5	15.5
G	11.5	7.5	20.9
В	19.1	5.1	26.0

	C	IE 1964 CMFs	
	Avg.	SD.	Max.
R	8.8	3.6	11.9
G	24.7	7.7	32.5
В	10.4	4.8	16.4

	Ju	dd-mod. CMFs	
	Avg.	SD.	Max.
R	6.2	3.7	12.6
G	9.6	7.6	17.3
В	8.4	5.2	15.3

The corresponding standard deviation of the color difference (SD.) and the maximum color difference (Max.) are also included.

3.2 実験2

3名の被験者が実験1と同様の実験を、各刺激に対して 10 回繰り返して行った結果の ⊿a*, ⊿b* の平均値(TT △, OK □, KF ◇) と標準偏差を Fig. 7 に示す. ここで, XYZ 三刺激値の計算には CIE 1931 等色関数を用いた。Fig. 7 には, Fig.3 に示した実験1の結果(12 点の●)もプロッ トした. Fig.7 (a) の TT と KF の結果はほぼ重なってい る.3名の被験者 TT, OK, KF が,3種類の刺激(赤,緑, 青) についてそれぞれ 10 回行った等色結果の L*a*b* 空間 における標準偏差は、TT (1.9, 3.0, 4.3), OK (1.2, 4.6, 2.2), KF(1.7, 2.8, 3.2) である。3名の標準偏差の平均は (1.6, 3.5, 3.2) であり, Table 3 に示した平均色差, 標準 偏差よりも小さい値となっている。3名の標準偏差の平均 を実験1における精度とみなすと、実験1の12名の等色 結果のばらつきには有意な差があるといえる。また、被験 者間の等色結果のばらつきについて、Fig.7に示す3名の 被験者の ΔX についてウェルチの検定を試みたところ, 有意水準 5% で OK の *d*X と TT の *d*X に有意な差がみ られた.同様の検定により、OKの ΔZ とTTの ΔZ ,OK の *Δ*Z と KF の *Δ*Z で有意な差がみられた。これらの結果 から、実験1における12名の等色結果のばらつきには、 等色関数の個人差によるものが含まれると考えられる.

3.3 Stiles-Burch データからのシミュレーション 等色関数の個人差に関しては, Stiles と Burch が測定



Fig. 7 Average color-differences by three observers (square, triangle, diamond) in ten trials. Horizontal bars of each point show standard deviations of Δa^* and vertical bars show standard deviations of Δb^* . The color-difference distributions calculated using the CIE 1931 color-matching functions are also shown. (a) Red stimulus, (b) Green stimulus, (c) Blue stimulus.



Fig. 8 Individual 2° color-matching functions of ten observers (Stiles and Burch).

した10名の2°視野等色関数と20名の10°視野等色関数 のデータにより、ある程度定量的にも知られている。 そこ で,現在知られている等色関数の個人差に関するデータと して, Stiles と Burch が測定した 10 名の 2° 視野等色関数 データ⁹⁾を用いて等色実験の計算機シミュレーションを行 い,実験1における等色結果のばらつきと比較した.10 名の等色関数データは、Trezonaの文献²²⁾から得たデー タを線形補間により1nm 間隔にリサンプリングしたデー タ (Fig. 8) を用いた. シミュレーションでは, まず, 10 名の被験者の各等色関数データとターゲット刺激のスペク トルデータを用いてターゲット刺激の三刺激値を算出し, ターゲット刺激の三刺激値と等しい三刺激値を与えるマッ チング刺激のスペクトルを求めた。ここで、マッチング刺 激のスペクトルは、プロジェクター2の3つの原色スペク トルの線形和で表されるものとしてモデル化し,各原色ス ペクトルに掛ける係数を求めることにより算出した.次 に、これら10名の被験者により等色されたターゲット刺

35 巻 12 号 (2006)







Fig. 9 Color-difference distributions in the psychophysical experiments (triangles) and the simulation using Stiles and Burch's data (squares). (a) Red stimulus, (b) Green stimulus, (c) Blue stimulus.

Table 4 Average color differences of RGB stimuli obtained by the simulation and experimentally.

	Simul	Simulation		iment
	Avg.	vg. SD.		SD.
R	4.8	3.5	9.5	3.5
G	4.5	4.7	11.5	7.5
В	11.9	7.3	19.1	5.1

The corresponding standard deviations of the color difference (SD.) are also included.

激のスペクトルとマッチング刺激のスペクトルに対して, CIE 1931 等色関数を用いて XYZ 三刺激値を算出し,ター ゲット刺激とマッチング刺激の間の ΔL* Δa* Δb* を求め た.Fig.9に,各刺激についてのシミュレーション(□)と CIE 1931 等色関数を用いた実験1(▲)の Δa* Δb* 分布を 示す.また,Table4に,各刺激についてのシミュレーショ ン結果と,CIE 1931 等色関数を用いた実験1の結果の平 均色差と標準偏差をそれぞれ示す.赤,緑,青の各刺激の 標準偏差は,実験1の結果ではそれぞれ3.5,7.5,5.1で あるのに対して,シミュレーション結果では3.5,4.7,7.3 となっており,等色のばらつきは概ね同等のレベルとなっ ている.この結果から,実験1の等色のばらつきは,現在 知られている等色関数の個人差により定量的にも説明がつ くといえる.なお,シミュレーション結果の平均色差は, 本実験結果の平均色差の半分程度に小さくなった.

4. 考 察

12 名の被験者の等色結果から CIE 1931 等色関数を用い て算出した $\Delta a^* \Delta b^*$ の分布は, Fig. 3 に示すように分布 の中心が原点から $\Delta E = 10 \sim 20$ 程度ずれており,分布のば らつきは $\Delta E = 10$ 程度の範囲に広がっている.これらの 色差は,実験2の結果から見積もられる等色実験の精度 ($\Delta E = 3$ 程度)を考慮しても有意な大きさである.このこ とから,実験1の等色結果は,CIE 1931 等色関数が12名

の被験者の等色関数の平均的な特性になっていないこと, 12 名の被験者の等色関数に個人差があることを示唆している。なお、等色関数の個人差に関しては、数名の被験者 が他の被験者の等色結果を観察し、それらが明らかに異な る色に見えたという内観報告が得られていることからも裏 づけられている。

被験者の等色関数の平均的な特性が CIE 1931 等色関数 と異なる要因としては,本実験の観察条件にかかわる要因 と、CIE 1931 等色関数の正確さにかかわる要因が考えら れる. 観察条件にかかわる要因としては、視野角の違いと 桿体の寄与が考えられる。視野角の違いに関しては、CIE 1931 等色関数が2°視野の等色関数であるのに対して、刺 激の視野角が本実験のターゲット刺激とマッチング刺激の 領域を合わせると4°以上になることや、等色実験におい て被験者の視線を固定していないことから、より広い視野 が等色に寄与している可能性がある。視野角の違いが色差 の要因になっているとすると, 10°視野の CIE 1964 等色 関数を用いることで改善される可能性もあると考えられ る.しかし, Fig.5 に示すように, CIE 1964 等色関数を 用いて算出した ⊿a* ⊿b* 分布は CIE 1931 等色関数を用い て算出した ⊿a* ⊿b* 分布と比較して,赤刺激と緑刺激に ついては分布の中心が原点に近づく傾向はみられない。特 に、緑の刺激については、CIE 1931 等色関数を用いて算 出した色差と比較して2倍程度に大きくなっており,視野 角の違いが本実験の色差の要因になっているとはいえな い。桿体の寄与に関しては、視野角と刺激の輝度を考慮す る必要がある。桿体は中心窩にはほとんど存在せず,視野 角としては2°以上の領域に存在し、数 cd/m²以下の輝度 で働くといわれている。本実験では、ターゲット刺激とマ ッチング刺激を合わせた領域の視野角は4°程度であり, 被験者の視線を固定していないことから、桿体の存在する 領域で等色された可能性もある.しかし,等色におけるタ ーゲット刺激の輝度は、最も低い青の刺激において8.64 cd/m² であり, Table 3 に示した平均色差 10~20 程度と いう大きな色差を生じさせるおもな要因にはなっていない と考えられる。

次に、CIE 1931 等色関数の正確さに関して、CIE 1931 等色関数と本実験の被験者の等色関数がどのように異なっ ているかを、Table 2 に示す等色結果の XYZ 三刺激値と CIE 1931 XYZ 等色関数の分光分布と各刺激スペクトルの 関係とから考察する。ここでは、各プロジェクターの三原 色スペクトルを、長波長側から R スペクトル、G スペクト ル、B スペクトルとよぶ。等色結果は、赤、緑、青のいず れの刺激についても、ほとんどの被験者でマッチング刺激 の XYZ 三刺激値がターゲット刺激の XYZ 三刺激値より も小さくなっており、Z 値が最も大きな差を生じている. Fig. 4 に示す CIE 1931 等色関数の $z(\lambda)$ の波長帯域は、 Fig. 1 に示すマッチング刺激の B スペクトルとターゲッ ト刺激の B スペクトルの波長帯域にほぼ対応しており、R スペクトルと G スペクトルは Z 値にほとんど寄与してい ない.マッチング刺激の B スペクトル (実線) とターゲ ット刺激の B スペクトル (破線) は、 $z(\lambda)$ を 450 nm 付 近でそれぞれ短波長側と長波長側に二分している.これら の関係から、被験者の等色したマッチング刺激の CIE 1931 の Z 値がターゲット刺激の CIE 1931 の Z 値よりも 小さくなっていることは、450 nm 付近よりも短波長側の

+

小さくなっていることは、450 nm 付近よりも短波長側の 波長帯域において、被験者の $z(\lambda)$ 等色関数よりも CIE 1931 の $z(\lambda)$ 等色関数が低い傾向にあることを示唆して いる。このことは、CIE 1931 等色関数は 460 nm 以下の波 長において感度が低すぎるとした、Judd による補正提案 と合致している。Fig. 6 に示すように、各刺激について Judd 補正等色関数を用いて算出した $\Delta a^* \Delta b^*$ は CIE 1931 等色関数を用いて算出した $\Delta a^* \Delta b^*$ は CIE 1931 等色関数を用いて算出した $\Delta a^* \Delta b^*$ と比較して平均 的に小さくなっており、Judd 補正等色関数に近い特性である と考えられる。CIE 1931 等色関数の $x(\lambda)$ と $y(\lambda)$ に関 しては、それらの波長帯域には、それぞれ3つ以上の刺激 スペクトルが含まれているため、本実験結果から CIE 1931 等色関数との違いを考察することはできなかった。

CIE 1931 等色関数を用いて算出した色差に対して, Judd 補正等色関数を用いて算出した色差は低減されたが, これが有意な差であることを検証するために,3名の被験 者 (TT, OK, KF) の CIE 1931 等色関数を用いた評価結 果 ΔX , ΔY , ΔZ と, Judd 補正等色関数を用いた評価結 果 *Δ*X, *Δ*Y, *Δ*Z の間でそれぞれウェルチの検定を試み た. ウェルチの検定では、実験2の結果から算出した各被 験者の ⊿X, ⊿Y, ⊿Z の分散の推定量を用いた。検定の結 果, *Δ*X と *Δ*Z については, 有意水準 5% で3名全員の結 果に有意な差がみられた.また、同様の検定により、△Y については TT のみに有意な差がみられた。これらの結 果から, Judd 補正等色関数は CIE 1931 等色関数よりも, 3名の被験者(TT, OK, KF)の等色関数をより正確に 表していると考えられる.しかし,赤,緑,青の各刺激に 対する色差 ⊿E は 6.2, 9.6, 8.4 であり, 実験 2 から見積 もった等色実験の精度(△E=3程度)以上に大きな色差 となっている. これらの結果から,実験1の被験者の等色 関数の平均的な特性はCIE 1931XYZ 等色関数よりも Judd 補正等色関数に近いが、Judd 補正等色関数からも乖

662 (46)

光 学

離があると考えられる.この乖離の要因については,等色 実験における桿体の寄与なども考えられるが,本実験では 明らかにできなかった.

等色関数に個人差があることは、黄斑の濃度の個人差 や加齢による水晶体の分光透過率の変化等に起因するこ ととして知られている。実験1では、等色のばらつきが ∠E=10程度と大きいが、StilesとBurchのデータを用い たシミュレーション結果においても本実験と同程度のばら つきを生じていることから、本等色実験に用いたターゲッ ト刺激とマッチング刺激のスペクトルの差が大きいため に、このような大きな色差が生じたと考えられる。

本実験は23歳から37歳と限られた年齢層の被験者に対 して実施したものであるが、より広い年齢層では、加齢に よる水晶体の分光透過率の個人差も広がり、等色のばらつ きもさらに大きくなると考えられる。等色関数の測定デー タは Stiles と Burch のデータなどに限られており、等色 関数の個人差を定量的に把握するためには、さらに多くの 測定データの収集が必要となる。

5. ま と め

本研究では,六原色ディスプレイの異なる原色スペクト ルの組み合わせを用いた等色実験により、観測者の等色関 数と CIE 1931 等色関数との違いが等色に与える影響を定 量的に評価した。12名の被験者により等色した刺激対に 対して, CIE 1931 等色関数を用いて算出した平均色差は ⊿E=10~20程度と大きく、被験者間のばらつきも大きか った。Judd 補正等色関数と CIE 1931 等色関数を用いた比 較評価から, CIE 1931 等色関数を用いた等色結果の平均 色差には Judd により指摘されている V(λ)の誤差が寄与 していると考えられるものの, Judd による修正のみでは 説明しきれない差異が生じていることを明らかにした。ま た,3名の被験者により等色実験の精度を検証し,12名の 被験者の等色結果のばらつきは等色関数の個人差によるも のであることを示した. Stiles と Burch により測定され た10名の等色関数データを用いた等色シミュレーション と,本実験結果との比較から,本実験結果の等色のばらつ きが Stiles と Burch のデータにより知られている等色関 数の個人差により定量的に説明できることを示した.

本研究の結果から,狭帯域のスペクトルを原色光とする ディスプレイによる色再現において,等色関数の正確さと 個人差が色再現性に大きな影響を与えることが示された. したがって,近年普及しつつある三原色の広色域ディスプ レイや多原色ディスプレイ等の設計や利用において,等色 関数の特性を考慮することは無視できない課題になるとい える.

現行の色再現システムは、測色値を再現する考え方に基 づいており、スペクトル情報を積極的に利用する仕組みは ない。今後、広色域ディスプレイの分野で正確な色再現を 目指すためには、画像データをスペクトル情報として入力 し、等色関数の個人差に関する情報やディスプレイの原色 スペクトル情報を利用した色再現システム²³⁾が必要にな ると考えられる。

文 献

- T. Ajito, T. Obi, M. Yamaguchi and N. Ohyama: "Expanded color gamut reproduced by six-primary projection display," Proc. SPIE, **3954** (2000) 130–137.
- B. Hill: "Optimization of total multispectral imaging system: Best spectral match versus least observer metamerism," Proc. SPIE, 4421 (2002) 481-486.
- S. Roth, I. Ben-David, M. Ben-Chorin, D. Eliav and O. Ben-David: "Wide gamut, high brightness multiple primaries single panel projection displays," *SID 03 Digest* (2003).
- 4) CIE: CIE Puble. No.15: 2004. *Colorimetry* (CIE Central Bureau, Vienna, 2004).
- 5) J. Guild: "The colorimetric properties of the spectrum," Phil. Trans. R. Soc. A, **230** (1931) 149-187.
- W. D. Wright: "A re-determination of the trichromatic coefficients of the spectral colours," Trans. Opt. Soc., 30 (1928–1929) 141–164.
- G. Wyszecki and W. S. Stiles: *Color Science*, 2nd ed. (John Wiley & Sons, Inc., New York, 1982) pp. 330–331.
- J. J. Vos: "Colorimetric and photometric properties of a 2° fundamental observer," Color Res. Appl., 3 (1978) 125-128.
- 9) W. S. Stiles and J. M. Burch: "Interim report to the Commission Internationale de l'Eclairage, Zurich, 1955, on the National Physical Laboratory's investigation of colourmatching (1955)," Opt. Acta, 2 (1955) 168-181.
- W. S. Stiles and J. M. Burch: "N. P. L. colour-matching investigation: Final report (1958)," Opt. Acta, 6 (1959) 1– 26.
- N. I. Speranskaya: "Determination of spectrum color coordinates for twenty-seven normal observers," Opt. Spectrosc., 7 (1959) 424-428.
- W. A. Thornton: "Toward a more accurate and extensible colorimetry. Part I," Color Res. Appl., 17 (1992) 79–122.
- W. A. Thornton: "Toward a more accurate and extensible colorimetry. Part II," Color Res. Appl., 17 (1992) 162–186.
- W. A. Thornton: "Toward a more accurate and extensible colorimetry. Part II," Color Res. Appl., 17 (1992) 240–262.
- A. D. North and M. D. Fairchild: "Measuring colormatching functions. Part I, II," Color Res. Appl., 18 (1993) 155–170.
- 16) M. Shaw and M. D. Fairchild: "Evaluating the CIE 1931 color matching functions," Color Res. Appl., 27 (2002) 316-329.
- 17) A. Borbely and J. Schanda: "Colour matching using LEDs as primaries," Color Res. Appl., **29** (2004) 360–364.
- 18) 中野靖久: "等色関数の個人差による色の見え方の問題",光 学,6 (2005) 282-290.
- R. L. Alfvin and M. D. Fairchild: "Observer variability in metameric color matches using color reproduction media,"

35 巻 12 号 (2006)

Color Res. Appl., 22 (1997) 174-188.

- D. C. Rich and J. Jalijali: "Effects of observer metamerism in determination of human color-matching functions," Color Res. Appl., 20 (1995) 29-35.
- 21) 谷添秀樹, 杉浦博明:"広色域ディスプレイの動向",映像情報メディア学会誌, 58 (2004) 194-198.
- 22) P. W. Trezona: "Individual observer data for the 1955

Stiles-Burch 2° pilot investigation," J. Opt. Soc. Am., 4 (1987) 769-782.

Y. Murakami, J. Ishii, T. Obi, M. Yamaguchi and N. Ohyama: "Color conversion method for multi-primary display for spectral color reproduction," J. Electron. Imaging, 13 (2004) 701–708.

+