

条件等色に対する周辺刺激の影響

山内 泰樹*・河原 勇美**・内川 恵二**

* 山形大学 大学院理工学研究科

〒 992-0038 山形県米沢市城南 4-3-16

** 東京工業大学 大学院総合理工学研究科

〒 226-8502 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259

(受付：2011 年 8 月 30 日；受理：2011 年 11 月 30 日)

Effects of Surround Stimulus on Metameric Color Matching

Yasuki YAMAUCHI*, Takemi KAWAHARA** and Keiji UCHIKAWA**

* Department of Informatics, Yamagata University

4-3-16 Jonan, Yonezawa, Yamagata 992-0038, Japan

** Department of Information Processing, Tokyo Institute of Technology

4259 Nagatsuta-cho, Midori-ku, Yokohama 226-8502, Japan

(Received 30 August 2011; Accepted 30 November 2011)

It is well known that the color matches accomplished visually between different media do not always provide the same tristimulus values measured with a colorimeter. There are several hypotheses to explain these phenomena, such as individual differences in color matching functions (CMFs) and the limitation of applying the CMFs. In this research, we constructed an apparatus that can change its surrounding condition and conducted both metameric color matching experiments and isomeric color matching experiments with the same apparatus in order to clarify the influences of the surrounding stimulus. As the CMFs were obtained in the dark surrounding, the surrounding stimulus might have some effects on metameric color matching.

We found that there were variations in each setting, whose deviations differed depending on the color and on the surrounding conditions. However, the mean values of the matches were almost identical regardless of the surrounding condition.

1. はじめに

人間は感覚が異なる 3 種類の錐体の出力比によって色を知覚している。そのため、スペクトル成分が異なる光であっても、三錐体からの出力が等しくなる場合には同じ色として知覚される（これを条件等色と呼ぶ）。異種メディア間、例えばディスプレイ上に表示された色とプリントアウトされた印刷物の間では、スペクトル分布は異なっても三錐体への刺激量を一致させることにより色の見えを一致させることは可

能であり、ディスプレイとハードコピーなどの異種メディア間での等色が成立するのはこのためである。

その一方で、色の見えが一致しても、測色によって得られる三刺激値では、等色が成立した異種メディアの三刺激値は必ずしも一致しない例も報告されている^{1,2)}。三刺激値を算出する際に用いられる等色関数は、国際照明委員会 (CIE) が定めた標準観測者と呼ばれる仮想的な観察者の視覚特性のものであり³⁾、必ずしも実際の観察者のそれと一致していないことに起因

すると考えられる。現に、標準観測者の等色関数は複数被験者の結果を平均したものであり⁴⁾、個々の観察者の等色関数自体を必ずしも表してはいない。また、等色関数を求める実験は周辺刺激が呈示されていない暗黒中で求められたものであり、オフィスなどの一般的な観察条件とは一致しない。そのため、周辺刺激条件が異なるために等色関数の差異が生じている可能性がある。

これまでに異種メディア間での等色実験に関する報告は数多くされている⁵⁻⁷⁾。カラーマネージメントにおける色再現の検証を行うためには、ほぼこの構成での実験が不可欠である。例えば Oicherman らは、角度にして約 45 deg、距離にして約 80 cm 離れた間隔で色票とディスプレイ上の刺激間で等色実験を実施している^{5,6)}。Komatsubara らは、色票と CRT 上に呈示された刺激を約 60 cm の間隔で置き、CRT の色度を調整して両者を等色させる実験を行い、両者の色度が一致しないことを報告している⁷⁾。

周辺刺激が呈示されず、暗黒内に中心刺激が呈示された場合と、周辺刺激が呈示された中に中心刺激が呈示された場合では、見えとしての中心刺激は大きく異なることが報告されている⁸⁾。特に、前者では刺激自体が発光しているように見える（発光色モード）のに対し、後者では、刺激自体が物体の表面のように知覚される（表面色モード）。これまでに、両者の見えのモードでのカラーネーミングの結果が報告されている⁹⁾が、等色実験などを行う際には、見えのモードを一致させて行われている。特に、光として知覚されたときには明るさの判断はできるが、色の細かい判断が困難であるということが報告されている¹⁰⁾。

また、桿体は本来色覚を持たず、明所視では飽和していると言われてきたが、その一方で、色覚メカニズムへの桿体の寄与¹¹⁾についても、今なお議論が続いている。仮に対比や同化などの刺激間の交互作用（色誘導）があり¹²⁾、中心-周辺型の刺激において、周辺刺激の桿体信号が中心刺激の色知覚に影響を与えるようなメカニ

ズムであれば、周辺刺激で条件等色が成立している場合には、桿体信号においては必ずしも反応が等しくなっていないため、条件等色の影響が中心刺激の等色結果にも影響を与える可能性がある。

本研究では、同一の周辺刺激呈示方法の下、周辺刺激呈示条件だけを変化させることができる実験装置を用いて等色実験を行い、等色実験における周辺刺激の影響を調べることを目的とする。また、実験に際しては、テスト刺激の表示メディアとして、参照・テスト刺激ともに同じ表示メディア（CRT モニタ）を利用した同一設定の実験を参照実験として併せて実施することで、刺激の物理的な分光分布が等色実験結果にどのような影響を与えるかを調べる。

2. 実験

2.1 実験装置

図 1 に示すような装置を用いて等色実験を行った。参照・テスト刺激を呈示するのに、それぞれ色票と CRT ディスプレイを用いた。被験者はあご台で頭を固定し、右目単眼で刺激を観察した。刺激の構成は、白色周辺刺激の中央に視角 1 deg のテスト・参照刺激が 9 deg の間隔

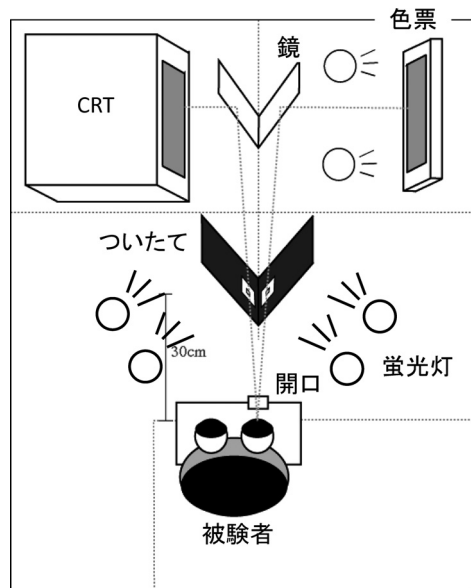


図 1 実験装置の概略図。

で呈示されるようになっている。その実現方法としては、白色周辺刺激の中央に開口を設け、その開口から参照刺激もしくはテスト刺激を構成する色票または CRT ディスプレイが観察できる構成とした。周辺刺激は図 1 に示すように 45 度ずつ傾いた衝立上に配置され、異なる照明によってほぼ相互に干渉せず照明可能であるが、本実験では両者とも蛍光灯ランプ（パナソニック社製ツイン蛍光灯 FML27EX-N）によって照明され、照明条件が同一になるように設定された。蛍光灯が消灯された場合には、周辺刺激が置かれた空間は暗黒になり、被験者は参照・テスト刺激だけを観察することができた。その際には両者は発光体の見えを呈していた。逆に、周辺刺激が呈示された場合には、テスト・参照刺激の両者の色の見えは、両者ともに物体色の見えとなっていた。また、いずれの条件でも被験者は開口を観察しているという印象は受けず、片方が色票、他方が CRT ディスプレイという表示媒体の違いはわからなかった。また、周辺刺激として呈示された白色の輝度は 32.2 cd/m^2 、 xy 色度は (0.361, 0.378) であった。

また、図 1 には参照刺激の呈示に色票を用いた場合の図を示したが、この実験条件下での等色精度を調べるために、参照色票の代わりに CRT ディスプレイを用いた条件でも実験を行えるような機構を付与した。すなわち、テスト刺激を呈示するのに用いたものと同じ CRT ディスプレイ上に色パッチを呈示し、参照刺激呈示用の光路内に鏡をさらに 2 枚追加することで、ディスプレイ面上に表示された色パッチが被験者に呈示された。この場合は、分光分布が等しいメディア上で等色が成立しているので、参照刺激とテスト刺激間の三刺激値を比較することにより、刺激の物理的配置などの影響だけを定量的に評価でき、異種メディア実験の結果の解析時に役立つことが期待される。

2.2 刺激

2.2.1 刺激形状と刺激条件

実験に用いられた刺激の形状は図 2 に示した通りであり、周辺刺激なしの条件の時には、テ

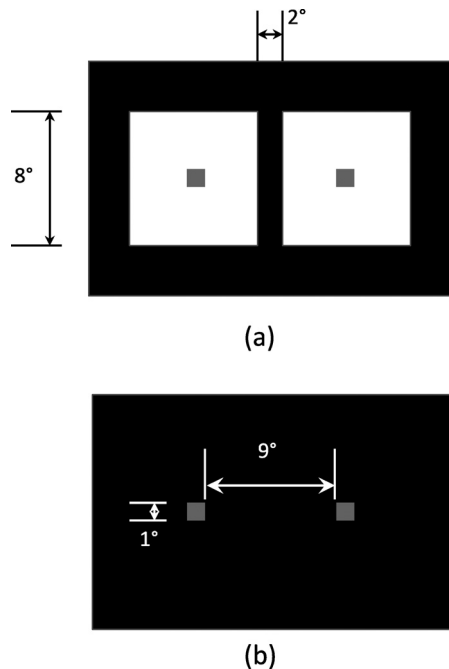


図 2 実験に用いた刺激の形状。(a) が周辺刺激あり、(b) が周辺刺激なしの条件を表す。

スト・参照刺激のみが暗黒中に呈示されたように見え、周辺刺激あり条件の時には、白色背景が周辺刺激として呈示された。

2.2.2 参照刺激の色度

実験では、参照色度として 7 色を選択した。これらの 7 色を選択した理由としては、CRT ディスプレイの基本色である RGB、およびそれらを混色して作られる YMC に無彩色である Gray (White) を加えることで、色の種類がバランスよく取れるためである。無彩色刺激は、周辺刺激が呈示されないときには白色として知覚されたが、周辺刺激が呈示されたときには、周辺刺激の方が輝度が高いため、灰色に知覚された。それぞれの色度を図 3 に、刺激の輝度を表 1 に示す。なお、参照色票の色度は、実際に CRT の表示可能範囲になるように定めた。

2.3 被験者

3 名の被験者 (YY, TK, KS) が実験に参加した。すべての被験者が色覚正常であり、等色実験の経験がある。全被験者とも心理物理実験に関する経験を有する。中でも YY は著者であり、等

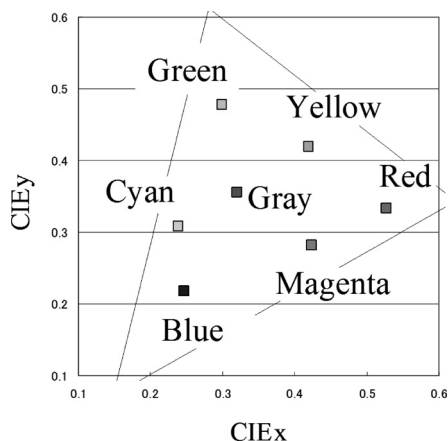


図3 参照刺激の色度.

表1 参照刺激の輝度

Color	Luminance (cd/m ²)
Gray (Gr)	19.21
Yellow	19.73
Green (G)	15.21
Red	8.48
Cyan	15.85
Magenta	7.88
Blue	4.21

色実験に関しては豊富な経験を有している。KSは心理物理実験や色彩を扱う心理物理実験の経験は豊富であるが、等色実験は今回初めて行った。また、被験者 YY, TK の2名は実験の目的を知っていたが、実験結果のばらつきを見ると、実験の目的を知っている影響はほとんど見受けられなかった。

2.4 手続き

被験者は各セッションにおいて、まず前順応として、蛍光灯によって照明された周辺刺激を5分間観察し、その後で等色実験を開始した。7色のテスト色がランダムな順番で呈示され、被験者は手元のトラックボールを用いてテスト刺激の明るさ（輝度）および色み（赤み／緑み、黄み／青み）を変化させて、参照刺激とテスト刺激を等色する。トラックボールの操作により、刺激の色度が $u'v'$ 平面上で変化し、その変化に伴って表示される刺激の色度が増加した。輝度

を変化させる場合には、トラックボールに付随するボタンで輝度の増加／減少を行った。このような輝度・色度変化に関しては、被験者は練習セッションを行い、色および輝度が自由に設定できることを確認した。また、等色が成立して試行が終了すると、周辺刺激あり・なし条件が切り替えられ、同一テスト色に関して等色を行う。1セッション内では各被験者は同一のテスト色に対してそれぞれ4試行（周辺あり、なし条件をそれぞれ2試行ずつ）を行い、その4試行が終了すると次のテスト色が呈示された。被験者は、刺激を観察する際には、視線を移動させて各刺激を交互に中心視で観察するよう教示された。

実験終了後に各調整結果をCRT上に再度表示し、分光輝度放射計（トプコン社製、SR-2）を用いて、三刺激値を実測した。以下の結果では、この実測値に基づいて色度を計算した値であり、CRTのキャリブレーションに起因する誤差は無視できる。

3名の被験者が各テスト色に対する等色実験を周辺あり・なし条件でそれぞれ20試行ずつ行った。

3. 実験結果

3.1 異種媒体（CRT、紙）による刺激呈示

参照刺激として色票を用いた実験の結果を図4に示す。(a): 被験者TK, (b): 被験者KS, (c): 被験者YYの結果であり、それぞれ左側のパネルが周辺刺激ありの条件での結果、右側が周辺刺激なし（暗黒）の結果である。灰色で示された個々のシンボルが実験結果を表し、色票が用いられた参照刺激は図中の白抜シンボルで示した。これらの値はすべて、実験終了後に分光輝度放射計SR-2を用いて測定した実測値である。

これらの色度の分布を見ると、

- 1) すべての被験者で参照色票の色度に対して等色した結果がばらついている。
- 2) 20回の等色結果の平均値は、参照刺激の色度点と一致しないものが多い。

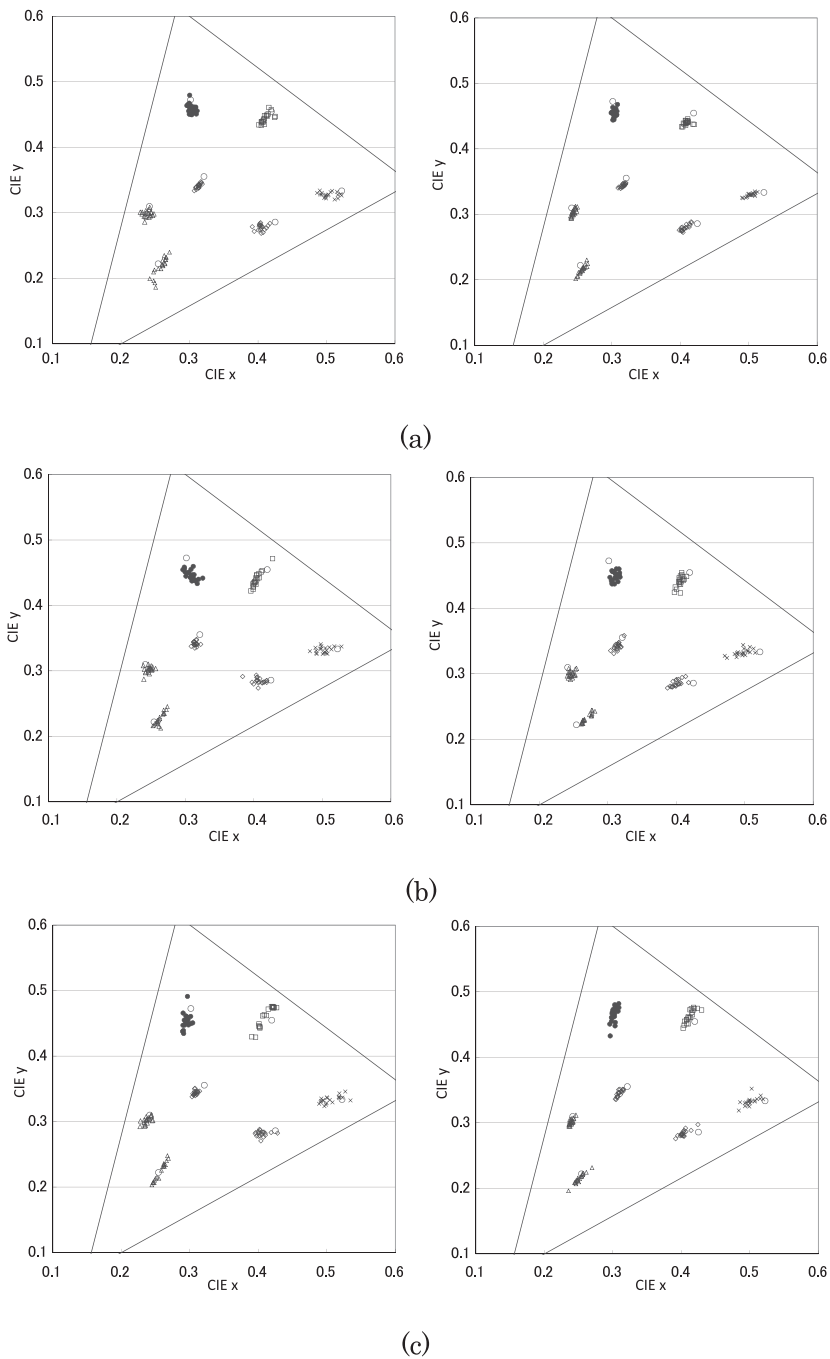


図4 異種メディアでの等色実験結果. (a) が被験者TK, (b) がKS, (c) がYYの結果を表す. 左側が周辺刺激あり, 右側が周辺刺激なし(暗黒)の結果である. 灰色で表されたのが, それぞれの色に関する等色結果であり, 参照刺激として呈示された色票の色度を白抜シンボルで表す.

3) 各被験者で等色した色度が一致しない. ことがわかる. 特に, 各被験者の等色実験結果から平均色度を求め, 参照刺激の色度点との差

に関する検定を t 検定により行った. 検定は, 平均色度からの xy 平面上でのユークリッド距離で行った. これによると, 周辺刺激なしの条

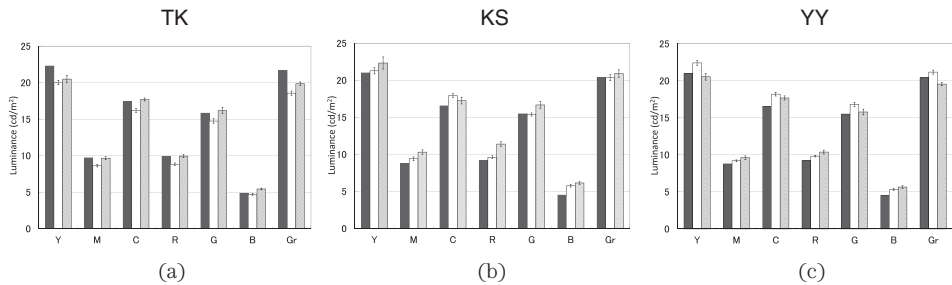


図5 等色した時の輝度値の平均値を被験者ごとに表したもの。(a)が被験者TK, (b)がKS, (c)がYYの結果を表す。無地は周辺刺激あり, ハッチングのバーは周辺刺激なしの結果を表し, 参照刺激の輝度は灰色のバーで表されている。

件では, 7色中, TKが5色(GrGRMY), KSが全色, YYが3色(GrRM), 周辺刺激ありの条件では, TK, KS, YYがそれぞれ4(GrRMC), 4(GrRGM), 4色(GrBGC)において片側5%で有意な違いを呈した。

等色した時の輝度値の平均値を示したのが図5である。各パネルは被験者の違いを表し, 周辺刺激のあり・なし条件で異なるバーで示してある。また一番左側のバーで示されたのが, 参照色票の輝度の測定値である。誤差棒は標準偏差を表す。

等色成立時の輝度値の傾向として,

- 1) すべての被験者で等色成立した時点で輝度値は参照色票の輝度値と異なる。全体的には参照刺激の輝度値よりも平均で周辺なしで108.9%, 周辺ありで103.9%, 高めの輝度で等色した。先ほどと同様に調整の平均値と参照刺激の輝度値でt検定を行ったところ, 周辺なし条件のKSのBlueのみで5%有意との結果が出た。
- 2) 被験者KS, TKにおいては, ほぼ全ての色で周辺刺激なしの時の等色輝度値が高かったが, 被験者YYは周辺条件に対して一貫した傾向は見られず, テスト色によって等色輝度の値が変化した。

ことがわかる。

このように, 等色が成立したと被験者が調整した色は参照刺激と輝度・色度ともに一致していないことが実験的に示された。また個人でそ

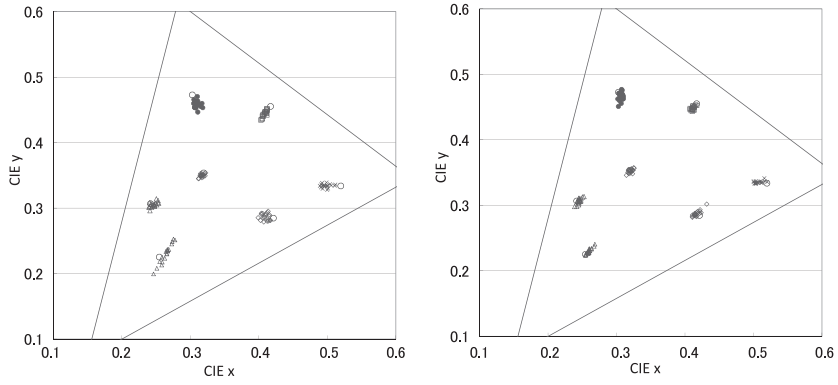
の傾向が異なることから, 視覚特性の個人差が等色結果に影響を与えていることが示唆される。特に, CRTと色票ではその分光分布が異なるために, 等色が成立した時点でも, 条件等色が成立しただけであり, 等色関数が個人で異なるのであれば, その違いが直接的に等色時の色度に現れたことは十分に考えられる。これは, 先行研究⁵⁾と同じ傾向である。また, 周辺刺激の有無により順応条件が変わり, その影響が等色結果にも現れている可能性もある。

そこで, 本実験結果で得られた等色時の色度の違いが, 周辺刺激条件に起因して得られたのか, 刺激の分光分布が異なっていることが主要因であったのかを確認するために, 参照・テスト両刺激を同一のメディア(CRT)で呈示し, 参照実験として行った。

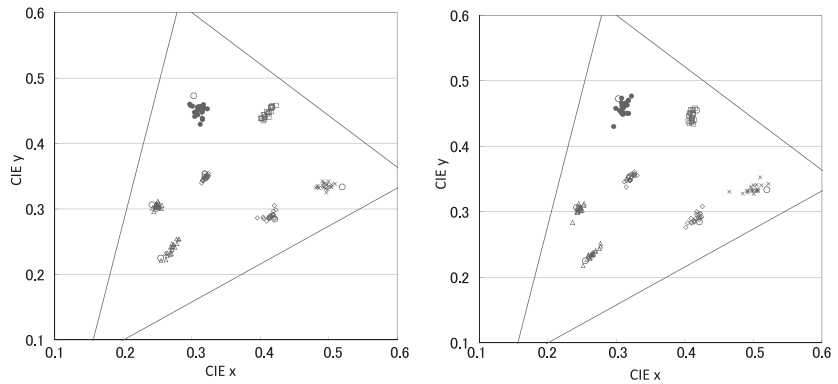
3.2 CRTによる刺激呈示

参照刺激をCRT上に呈示し, その色と等色するようにテスト刺激の輝度・色度を調整する実験結果を示す。2節でも述べた通り, 実験装置の一部光路を変更しただけで, それ以外のセッティングはそのままである。すなわち本実験装置は, 他の要因を極力排除しただけで, 等色に用いる媒体を変化させることが可能である。実験における手順や被験者は前述した実験と全く同様である。

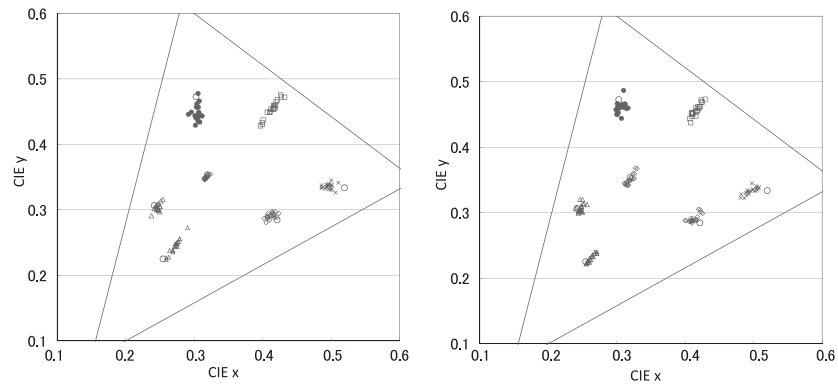
3名の被験者の等色点を xy 色度図上にプロットしたものを図6に示す。(a)が被験者TK, (b)が被験者KS, (c)が被験者YYの結果であ



(a)



(b)



(c)

図6 テスト・参照刺激としてCRTを使用した時の等色実験結果. (a)が被験者TK, (b)がKS, (c)がYYの結果を表す. 左側が周辺刺激あり, 右側が周辺刺激なし(暗黒)の結果である.

り, 左側のパネルが周辺刺激あり条件, 右側が周辺刺激なし条件の結果を示したものである.

この図を見ると, 各被験者とも等色結果にば

らつきがあることなどは前節で示した結果とほぼ等しい. 各被験者の平均色度と, 参照刺激の色度点との差に関する検定を t 検定により行っ

たところ、周辺刺激なしの条件では、TK, KS, YY がそれぞれ 2 色 (RY), 0 色, 1 色 (R), 周辺刺激ありの条件では、TK, KS, YY がそれぞれ 4 (RGMY), 2 (RG), 3 色 (BRG) において片側 5% で有意な違いを呈した。

等色成立時の刺激の輝度については、すべての被験者が参照刺激の輝度よりも高い輝度で等色が成立していた。参照刺激の輝度に対して平均値は、それぞれ周辺刺激なしで 116.2%, 周辺刺激ありで 117.8% であった。また、周辺刺激の有無にともなう輝度の違いは、周辺刺激なしでは被験者 TK が高い輝度で等色し、周辺刺激ありの場合に被験者 YY と KS が輝度が高かった。

4. 考 察

4.1 周辺刺激条件の影響

本節では、実験結果に対する周辺刺激条件の影響を考察する。前述したように、各被験者の等色結果から算出した平均色度、および等色のばらつきから参照刺激の色度の色差が有意であるかを検定した。その結果、色票-CRT 条件（参照刺激が色票、テスト刺激が CRT）では、周辺刺激が呈示されないときには被験者 TK, KS, YY が順に 7 枚中 5, 7, 3 枚の色票で、周辺刺激が呈示されたときには 4, 4, 4 枚の色票で有意に異なっており、周辺刺激が呈示されないときの方が多かった。その一方で、CRT-CRT 条件（参照、テスト刺激ともに CRT）では、周辺刺激なしでは 2, 0, 1 枚、周辺刺激ありの条件では 4, 2, 3 枚が有意な違いを呈しており、周辺刺激が呈示されたときの方が違いが大きくなっていた。周辺刺激条件が、参照刺激の物理的条件にかかわらず、等色に対して同様な影響を与えるのであれば、本実験結果は矛盾しているように見える。等色結果と参照刺激の色差が有意であった割合から、参照刺激が CRT に変更した影響を考えると、周辺刺激が呈示された条件よりも周辺刺激が呈示されない条件で大きく影響を受けたということが出来る。前述したように、発光色モードでは光の明るさの違いほど色の違

いが弁別できない、という報告がされている。周辺刺激が呈示されていないときには、暗黒中でテスト刺激同士を等色したため、発光色モードで刺激の観察を行っていたことになる。そのため、等色が成立したと知覚される領域が表面色モード知覚条件（= 周辺刺激ありの条件）よりも広く、すなわち弁別閾値が高くなり、その結果参照刺激との色差が大きくなったと考えることが可能である。逆に、周辺刺激が呈示されたときには、被験者は表面色モードで刺激を知覚していた。さらに周辺刺激がアンカーとして作用し、周辺刺激との違いを判断基準にしていた可能性もある。周辺刺激がアンカーとして作用したという可能性については、色票-CRT 条件において、周辺刺激あり条件下の輝度値が周辺刺激なし条件よりも低く、なおかつ参照刺激の輝度とほぼ等しいということからも支持されると思われる。その一方で、CRT-CRT 条件の結果は、周辺刺激の有無にかかわらず等色時の輝度値は両者で有意な違いを呈していなかった。刺激の分光分布などの物理的特性を考慮する必要があるのかどうか、については今後の課題といえよう。

次に、CRT-CRT 条件での色度の違いについて考察する。理論的には、CRT-CRT 条件では刺激の分光分布が同一なメディアでの等色であるので、色度を算出する重みづけ関数である等色関数の影響などは排除することができ、両者の色度は一致すべきである。しかしながら、実験結果ではそのようになっていない。この違いは、主として実験刺激の配置が要因であると考えられる。すなわち、本実験では、参照・テスト刺激間が 9 deg 離されて呈示され、それらを同時に観察・比較しないように教示されていた。色票-CRT 条件で得られた条件等色成立時における等色点の色度のずれには、CRT-CRT 条件で得られた色度点のずれが織り込まれていたと考えられる。両者のずれの大きさの違いから、これまで報告されているような条件等色に伴う等色点の違いは本実験結果でも示されたと考えられる。

等色実験のばらつきに対して、周辺刺激条件（刺激の有無）、参照刺激の呈示メディア、テスト色のそれぞれが有意に作用しているかどうかを、3要因の分散分析で行った。その結果、テスト色に関してのみ有意 ($p < 0.05$) であるという結果が得られた。

4.2 実験結果の楕円近似と MacAdam 楕円との比較

MacAdam¹³⁾ や Brown¹⁴⁾ による弁別楕円など、等色結果のばらつきは楕円で精度よく近似できることが知られている。特に、色弁別閾値を表す代表的な指標としてよく MacAdam の楕円が用いられる。そこで、本実験でも、結果のばらつきを定量的に評価するために、等色実験結果を楕円で近似し、MacAdam 楕円と比較することを考える。

正規確率分布を当てはめるために、 x, y, Y に関する分散 (var), 共分散 (cov) を計算し、(1) 式で定義される行列を導入する。

$$\begin{pmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{13} \\ g_{21} & g_{22} & g_{23} \\ g_{31} & g_{32} & g_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{var}(x) & \text{cov}(x,y) & \text{cov}(x,Y) \\ \text{cov}(y,x) & \text{var}(y) & \text{cov}(y,Y) \\ \text{cov}(Y,x) & \text{cov}(Y,y) & \text{var}(Y) \end{pmatrix}^{-1} \quad (1)$$

楕円体の式は行列成分 g_{ij} を係数として (2) 式のように記述することができる。

$$g_{11}(x-x_0)^2 + g_{22}(y-y_0)^2 + g_{33}(Y-Y_0)^2 + 2g_{12}(x-x_0)(y-y_0) + 2g_{23}(y-y_0)(Y-Y_0) + 2g_{31}(x-x_0)(Y-Y_0) = (ds)^2 \quad (2)$$

ただし、 x_0, y_0, Y_0 は全等色点の平均値とする。(2) 式の左辺は自由度 3 の χ^2 分布に従い、 $(ds)^2$ の値によってさまざまな大きさの楕円体を得ることができる。本研究では 95% の分布を含むように $(ds)^2 = 7.81$ とした¹⁵⁾。

被験者 TK と KS の色票 -CRT 条件の等色実験結果を楕円で近似し、それを xy 平面へ投影した楕円を図 7 に示す。各パネルが被験者を表し、太実線で描かれた楕円が周辺刺激あり、細実線の楕円が周辺刺激なしの結果から求めたものである。また、後述する MacAdam の弁別楕円が灰色の楕円で表されている。

図から、周辺刺激が呈示されないことによって、楕円の面積が小さくなるということがわかる。

等色実験の自由度が輝度、色度の三次元であり、特に色度のばらつきが色平面上で分布することを考えると、本手法のように楕円を求め、そこから被験者のばらつきを考察することは有効であるように思われる。実際に、図 7(a), (b) で示された 2 名の被験者の実験のばらつきの大

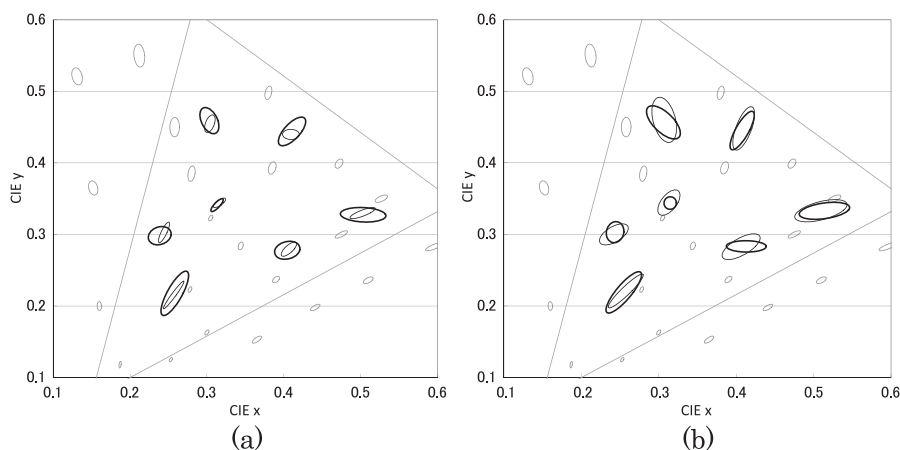


図 7 色票と CRT 間の等色実験結果を楕円で近似し、それを xy 平面へ投影した結果。(a) が被験者 TK, (b) が KS の結果を表す。太実線と細実線が、それぞれ周辺刺激あり、周辺刺激なしの結果から求めた楕円を表す。灰色の実線で表した楕円は MacAdam の楕円である。

表2 色度図上で確率楕円内に参照刺激が含まれるかどうかを調べた結果

		Y	M	C	R	G	B	Gr
色票	TK	O/X	X/X	O/X	O/X	O/X	O/X	X/X
	KS	X/X	O/X	O/X	O/O	X/X	O/O	O/X
	YY	X/X	X/X	O/O	X/O	O/O	O/O	X/X
CRT	TK	O/O	O/O	X/O	O/X	O/O	O/X	O/O
	KS	O/O	O/O	O/X	O/X	O/X	O/X	O/O
	YY	O/O	O/O	O/X	O/X	O/O	O/O	O/O

きさ、およびそのばらつきの方向などは、図から明らかに見ることができる。

この95%の確率弁別楕円内に参照刺激の色度が入るかどうかを調べた結果を表2に示す。

表2内では周辺刺激の表示媒体で分けて列記した。また、列はテスト刺激の色の違いを表し、各被験者において参照刺激の色度が95%楕円の中にあるか(O)、楕円外にあるか(X)で表した。各セル内に2つの記号が記入してあるのは、周辺刺激あり・なしの違いである。周辺条件にかかわらず、CRTを参照刺激として呈示したときには参照刺激の色度が弁別楕円内に入るが、色票を参照刺激とした場合には、色度が弁別楕円外に位置した色は表2中の灰色で塗られたセルである。これを見ると、被験者TKとYYではそれぞれ7色中で2色と3色が、KSにおいても1色が有意に異なっていることがわかる。

最後に、本実験結果をMacAdam楕円¹³⁾と比較してみる。MacAdam楕円は1940年代に行われた実験で得られた結果であり、テスト刺激の色度のある色度方向に調整して隣接する参照刺激に等色させた実験のばらつきを25色について求めたもので、この実験結果のばらつきを示す楕円内の色については人間が弁別できない領域であるということ、またその楕円の大きさは色によって異なることが報告されており、現在でもMacAdam弁別楕円として知られている。よく目にするMacAdam楕円はその弁別閾値を10倍に拡大して表記されることが多いが、JND(Just noticeable difference)は弁別閾値の3倍程度であるということが指摘されている¹⁵⁾。本研究では、このJND値を用いてMacAdam楕円

と実験結果の比較を行う。

JNDのMacAdam楕円と被験者TKとKSの実験結果は図7に記載したとおりである。楕円の傾きについてはMacAdamの楕円の方向とよく一致していることが図からわかる。その一方で、実験結果は周辺刺激の呈示条件にかかわらず、明らかにMacAdam楕円よりも大きい。最も楕円の小さかったTKの結果でも楕円の面積はMacAdamの楕円の4倍以上である。この原因として考えられる要素としては少なくとも2つある。

1つ目は、等色条件を作成する際の自由度である。MacAdamの実験では、光学系を用いていることもあり、2つの単色光の混合比を変化させて等色を作成していた。その際に、両刺激が等輝度で呈示されるように統制されていたため、実質的な自由度は1しかなかった。それに比べ、本実験では自由度は3(輝度、色度が赤/緑、黄/青)あった。自由度が大きかったことにより実験のばらつきが大きくなったという可能性がある。

もう1つの要因は、等色の判断を行う際の刺激の空間配置である。MacAdamの実験では、参照刺激とテスト刺激は隣接していた。そのため、等色したかどうかの判断は個々の色同士の判断よりも、その境界が知覚できるかどうか、という判断基準に基づいていた可能性がある。境界が区別できなくなるように調整するように明示的に教示されないにせよ、二分視野が均一に見えるように合わせる実験を行う際には、境界を見えなくすることは必須であり、そのような判断基準で実験を行う方が容易になると思わ

れる。一方で、本研究の実験配置では参照・テスト刺激間が9deg離れていた。両者の比較を同時に行うことはできなかったため、逐次的な比較を行う際に等色の精度が悪化したことは十分に考えられる。等色実験を刺激の間隔を変化させてそのばらつきを調べた研究により、両刺激が併置された実験結果よりも間隔があいた方がばらつきが大きくなるが、刺激間隔6度から60度くらいまでは、刺激の間隔によらず弁別楕円の大きさはさほど変わらないことが報告されている¹⁶⁾。現実的には、色の比較を行う対象が隣接している場合の方が少ないと思われるので、本研究で行ったような視線の移動を伴う等色のばらつきを把握しておくことは重要であろう。

5. 結 論

本研究では、条件等色成立時の色度に対する周辺刺激の影響を調べ、以下のような結果を得た。

条件等色実験結果はばらつきを有し、そのばらつきは色度によって異なる。また、周辺刺激が呈示されたときと呈示されずに暗黒の周辺であっても、等色点のばらつきの大きさは異なるが、平均色度はほとんど変わらない。このように、色度が周辺刺激の有無にかかわらずほぼ一致することは、等色関数が算出された実験条件である暗黒条件だけでなく、周辺刺激が呈示されたときにも、同じ等色関数を用いて色度算出を行ってもよいことを示唆するものである。

今後の課題としては、以下のことが挙げられる。

今回の実験では、等色を行う際に、被験者には輝度・色度の色空間全体での調整の自由度を与えて行った。そのような実験デザインが、条件等色が成立した時点での色度の違いにどの程度影響を与えているか、を明確にする必要がある。今回は、等色関数の個人差に関する検討を行わなかったが、実際に被験者の等色関数を測定して、その等色関数を用いてカスタマイズした色度を算出すると、条件等色が成立した時点での色度の違いは小さくなるか調べることは、

興味深いことである。もしも、そのような補正で効果が見られるのであれば、真に忠実な色再現を目指した場合に、観察者のカスタマイズ等色関数を求め、それに基づく表示条件を計算することが理想的であることが考えられる。その一方で、等色関数の測定には大掛かりな実験装置と手間のかかる実験を行う必要がある。簡便な等色関数測定法についても、検討を並行してすすめていくことが望ましいと思われる。

また、本研究では中心刺激の条件等色条件に着目したが、周辺刺激の条件等色が成立しているときに、中心刺激の条件等色条件にどのように変化するかを調べれば、色覚メカニズムへの桿体の寄与や色覚の個人差への影響などを明らかにすることが可能になるとと思われるが、それも今後の課題である。

謝 辞 本研究は筆頭著者が富士ゼロックス(株)在籍時代に、東京工業大学との共同研究の一環として行われた成果をまとめたものである。被験者として長時間にわたる実験に参加してくれた東京工業大学の学生・研究生に感謝する。

文 献

- 1) A. Borbely and J. Schanda: Colour matching using LEDs as primaries, *Color Research & Application*, **29**, 360–364, 2004.
- 2) 大澤健郎, 味戸剛幸, 山口雅浩, 大山永昭: 六原色ディスプレイを用いた等色実験, *光学*, **35**, 655–664, 2006.
- 3) CIE Technical Committee 1–48: Colorimetry (3rd Ed.), CIE Technical Reports, CIE 015, 2004.
- 4) J. Guild: The colorimetric properties of the spectrum, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A*, **230**, 149–187, 1932.
- 5) B. Oicherman, R. M. Luo, B. Rigg and A. R. Robertson: Effect of observer metamerism on colour matching of display and surface colours, *Color Research & Application*, **33**,

- 346–359, 2008.
- 6) B. Oicherman, R. M. Luo, B. Rigg and A. R. Robertson: Adaptation and colour matching of display and surface colours, *Color Research & Application*, **34**, 182–193, 2009.
 - 7) H. Komatsubara, S. Kobayashi, N. Nasuno, Y. Nakajima and S. Kumada: Visual color matching under various viewing conditions, *Color Research & Application*, **27**, 399–420, 2002.
 - 8) 内川恵二：開口色と表面色モードの色の見えの特徴. *Vision*, **6**, 61–67, 1994.
 - 9) H. Shinoda, K. Uchikawa and M. Ikeda: Categorized color space on CRT in the aperture and the surface color mode, *Color Research & Application*, **18**, 326–333, 1993.
 - 10) 内川恵二：色覚のメカニズム, 朝倉書店, 1998.
 - 11) P. W. Trezona: Rod participation in the ‘Blue’ mechanism and its effect on colour matching, *Vision Research*, **10**, 317–322, 1970.
 - 12) A. Valberg: Color induction: Dependence on luminance, purity, and dominant or complementary wavelength of inducing stimuli, *Journal of the Optical Society of America*, **64**, 1531–1540, 1974.
 - 13) D. L. MacAdam: Visual sensitivities to color differences in daylight, *Journal of the Optical Society of America*, **32**, 247–273, 1942.
 - 14) W. R. J. Brown: Color discrimination of twelve observers, *Journal of the Optical Society of America*, **47**, 137, 1957.
 - 15) G. Wyszecki and W. S. Stiles: *Color Science, 2nd ed.*, John Wiley & Sons, New York, 1982.
 - 16) 篠田博之, 池田光男：大きな視点移動を伴う等色作業における繰り返し精度, 照明学会誌, **78**, 76–82, 1994.