

研究

周辺網膜における色度図全域にわたる色光の色の見えの変化：一人の被験者についての測定

高瀬 正典*, **・阿山みよし**, ***・池田 光男**, †

* 防衛大学校応用物理学教室 〒239 横須賀市走水 1-10

** 東京工業大学大学院総合理工学研究科 〒227 横浜市緑区長津田町 4259

(1990年11月19日受付, 1991年4月9日受理)

Changes of Color Appearance of Colored Lights in the Whole Area of the Chromaticity Diagram in the Peripheral Retinae: Measurements for One Observer

Masanori TAKASE, ** Miyoshi AYAMA, ** and Mitsuo IKEDA, **, †

* Department of Applied Physics, National Defense Academy,
1-10, Hashirimizu, Yokosuka 239

** Department of Information Processing, Tokyo Institute of Technology
Graduate School, 4259, Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama 227

(Received November 19, 1990; Accepted April 9, 1991)

Color appearances of a large number of colored lights in the whole area of the chromaticity diagram presented at four different retinal positions were studied by the color naming method for a dark-adapted right eye of one observer. The test stimulus (a semi-circle with a diameter of 2°, 120 Td) was presented at 0° (fovea), 5° nasal, 10° and 30° temporal visual eccentricities on the horizontal meridian with respective 195, 195, 35 and 34 different chromaticities. As the visual eccentricity was increased, highly saturated test lights at fovea appeared desaturated independently of the chromaticity. However, for the test lights of middle and low saturation at fovea, changes of saturation depended on the chromaticity; saturation of bluish ones decreased with visual eccentricity while that of the yellowish ones increased. Especially, white lights at fovea appeared to light yellow at 10° and 30° temporal visual eccentricities, and purple ones did to white. These results show that color appearances of mixing lights at the retinal periphery can not easily be predicted from those of spectral lights.

1. はじめに

周辺網膜において色の見えが中心窓と異なることは、

*** 現在: 東京都神経科学総合研究所医学心理学研究室
〒183 府中市武蔵台 2-6

Present address: Tokyo Metropolitan Institute for Neurosciences, 2-6, Musashidai, Fuchu 183

† 現在: 京都大学工学部建築学教室 〒606 京都市左京区吉田本町

Present address: Department of Architecture,
Faculty of Engineering, Kyoto University, Yoshidahonmachi, Sakyo-ku, Kyoto 606

カラーネーミング法による Boynton ら¹⁾や Gordon ら²⁾の研究およびカラーマッチング法による Morland ら³⁾や Stabell ら⁴⁾の研究によってよく知られている。また、阿山ら⁵⁾は色の見えに関する反対色レスポンス関数を中心窓と傍中心窓で測定し、比較している。しかしながら、これらの研究に用いたテスト刺激はすべてスペクトル光である。中心窓における色の見えに関しては色票や CRT ディスプレイを用いる場合も含め色度図上のかなりの領域にわたる複合光について研究が行われているが、周辺網膜における色の見えに関しては、Uchikawa

ら⁶⁾による色票を用いた色弁別の研究以外には詳細な研究はまだ報告されていない。ここに挙げたいいくつかの研究は、スペクトル光だけあるいは色票だけで実現できる色度領域についてそれぞれ別の被験者について測定していることから、個人差を考慮するならば、それらの結果の比較および総合的解釈は難しいといえる。このことを解決するためには、同一の被験者による色度図全域にわたる色光の色の見えを調べる必要がある。

複合光の明るさおよび色覚の反対色過程の非線形的特性が中心窓において明らかにされている^{7,8)}が、このような中心窓における色覚特性を参考にするならば、周辺網膜における色覚特性および色の見えは非線形的特性を示すであろうことが予想される。したがって、従来のスペクトル光についての周辺網膜における色覚特性および色の見えだけから色度図上の大半の複合光についてのそれらの特性を予測することは現段階においては難しいといえる。

我々の視環境における色の見えに関しても、信号灯、標識、誘導灯などの複合光の色を情報伝達の方法として用いる場合、おもに中心窓における見えだけで周辺網膜でどのように見えるのかといった考慮および研究はほとんどないといってよい。

このように周辺網膜における色の見えまたは色覚特性に関しては、中心窓に比べ、桿体の存在、錐体の分布密度、黄斑色素がないなどの形態上の特徴を有するため、現実に現れる特性は複雑で解釈困難なものが多くなることが予想される。しかも、形態的個人差を考えるならば、周辺網膜での色の見えの一般的特性を求めるることは非常に困難に直面することになる。したがって、多くの条件について、まず特定の個人の特性を明らかにすることが必要かつ重要である。そこで、本研究においては、特定の一人の被験者についての周辺網膜における色度図全域にわたる色光の色の見えの変化の特性を求めることが主眼として、カラーネーミングによる測定を試みた。

一方、色光の色の見えの網膜部位による変化に関しては、網膜全域にわたる閻口ら⁹⁾のユニーク色視野の研究があるが、色視野などの研究の他はほとんどの研究において水平線上数箇所の部位についての測定で代表させていている。しかし、閻口らのように色の見えを網膜の不均一性との関係で調べることは応用上とくに重要であり、しかも彼らの研究において明らかにされた周辺網膜の盲点中心的特性は注目に値する。したがって、ここでは水平線上の中心窓と傍中心窓および盲点に対してほぼ対称な10°と30°での色の見えを求ることにした。さら

に、同じ刺激サイズを用いた Boynton ら¹⁾や閻口ら⁹⁾の結果によれば色光の色の見えは網膜部位が周辺に行けば行くほど彩度は低下している。この特性を色の見えの改善だから考へるならば、刺激サイズを大きくすることで彩度の低下を防げるかも知れない^{2,10)}。しかし、本研究では中心窓と同じ見えを得ることが目的ではなく、同じ物理的特性を有する色刺激光の色の見えが網膜部位でどのように変わるかを知ることにあるので、刺激サイズと網膜照度は一定とした。このような条件下での周辺網膜における色の見えの特性を同一の被験者について調べることは、各網膜部位における色光の色の見えを色度図全域において総合的に考察することを可能にする。周辺網膜における色光の見えに関する色度図全域にわたる研究はかつてないことから、被験者一人についてではあるが、得られたデータは色覚および色の見えについての貴重な資料となりうるであろう。

2. 実験

2.1 網膜部位

網膜部位の呼び方について、ここでは刺激の視野上の位置で呼び、離心角 (eccentricity) は固視点と刺激のなす視角を用いる。ただし、一般的呼び方として中心窓 (離心角 0°) および傍中心窓も併用する。テスト部位として、まず中心窓と傍中心窓 (離心角鼻側 5°) を選び、次に閻口ら⁹⁾の結果を参考にして、盲点に対してほぼ対称な離心角耳側 30° および 10° を選んだ。実験はこの部位の順序で中心窓と傍中心窓について実験 1、耳側 30° について実験 2 そして耳側 10° について実験 3 として実施した。

2.2 刺激および装置

実験には 3 光路のマックスウェル視光学系を用いた。1 光路は参照刺激用で、他の 2 光路は複合光を得るために二つの単色光光路である。光源には 500 W キセノンランプを用いた。刺激の視野は直径 2° の 2 分視野で、その周りは暗黒とした。その右半分は参照視野であり、左半分はテスト視野である。実験に使用した装置および複合光を得る手法については阿山らの論文⁷⁾に詳細に記述されている。テスト光には CIE 1976 u'v' 色度図上でほぼ均等に分布する 195 個の色度点の色光を選んだ。中心窓および傍中心窓における実験で 195 個の色光全部を用い、離心角耳側 30° ではその中から色度図上ではほぼ均等に分布する 34 個の色光を傍中心窓における結果を参考にして用いた。さらに離心角耳側 10° では同様に 35 個の色光を傍中心窓と 30° における結果を参考にして用

いた。テスト光の明るさは、2分視野の右半分に 120 Td 一定の白色参照光 ($x=0.34$, $y=0.38$) を呈示し、中心窓において明るさマッチングを行ってそろえた。周辺網膜でのマックスウェル視のために各部位に対応する固視点を設けた。刺激の呈示時間は、中心窓では連続呈示、傍中心窓では被験者のまぶたの開閉による約1秒間呈示、約2秒間閉眼のくりかえし、離心角耳側 10° では電磁シャッタによる1秒間呈示、2秒間暗黒のくりかえし、そして離心角耳側 30° では電磁シャッタによる3秒間呈示、3秒間暗黒のくりかえしである。このように呈示時間が異なるのは、被験者にとってトロクスラー効果¹¹⁾による彩度の低下がなく、しかもカラーネーミングが容易な時間として決めたためである。また、まぶたの開閉による刺激呈示は実験1において電磁シャッタが利用できなかったためである。

2.3 被験者

本実験の被験者は、48歳の男性 MT 1名で、Farnsworth-Munsell 100 hue test により色覚正常であった。色覚の実験においての被験者数は、個人差があるために複数名とするのが通常である。しかしながら、前述のように本研究においては色度図全域における色の見えが特定の被験者について網膜部位でどのように変化するのかを知ることを目的としていることから、刺激光の数や測定部位を増やすことに重点をおいた。

2.4 手順

2.4.1 実験1（中心窓および傍中心窓）

実験には被験者 MT の右眼のみを使用した。中心窓におけるマックスウェル視の状態から 5° 右方の固視点へ視線を移動させた状態においてもマックスウェル視が成立していたので、中心窓での測定と傍中心窓での測定を次に示す一連の実験手順の中で行った。

- (1) 被験者はセッション前暗順応を 10 分以上行う。
- (2) 被験者はテスト光と参照光を中心窓で直接比較し、調整法で3回明るさマッチングを行う。テスト光の輝度は3回の平均値に設定する。
- (3) 被験者は閉眼する。実験者は参照光を消し、固視点を点灯する。
- (4) 被験者は固視点（5° 右方）を確認したのち閉眼する。
- (5) 被験者は、閉眼約 1 秒間（固視点注視）、閉眼約2秒を2、3回行って、次節で説明するカラーネーミングを行う。これを傍中心窓での応答とする。
- (6) 被験者は閉眼し、実験者は固視点を消す。

(7) 被験者は閉眼し、テスト光を注視して、カラーネーミングを行う。これを中心窓での応答とする。

(8) (2)～(7)の手順を 195 個の色光につき、ランダムな順序で約 8 セッションに分けて行う。

(9) 195 個の全色光について各々 3 回の測定となるまで実験を行う。

2.4.2 実験2（耳側 30°）および実験3（耳側 10°）
実験2と実験3は固視点を変更し、被験者の右眼について各々次の手順を行った。

- (1) 被験者はセッション前暗順応を 10 分以上行う。
- (2) 全テスト光について被験者は中心窓で参照光と 3 回の明るさマッチングを行う。実験者は、テスト光輝度設定のために 3 回の平均値を求める。
- (3) 実験者は、固視点を点灯し、手順(2)で求めた平均輝度に設定したテスト光を呈示する。被験者は、カラーネーミングを行う。
- (4) 全テスト光をランダムな順序で呈示し、1 セッションとする。
- (5) 34 個 (30°) または 35 個 (10°) の全色光について測定を 5 回繰り返す。

2.5 カラーネーミング

カラーネーミング法 (color naming method) とは我々が知覚する色の見えを直接数値で表現する方法で、色の見えをあらかじめ設定したいくつかのカテゴリーに分け点数を配分することにより定量化を行う。カテゴリーをどのように設定するかでいくつかの方法があるが、ここでは Gordon ら²⁾による「4+1 categories」法を用いた。スケーリングは 0 点から 10 点までの 11 段階とした。すなわち、被験者は色の見えをまず有彩色成分（色み成分スコア）と無彩色成分とに分け、合計が 10 点となるように点数を配分する。次に、有彩色成分について、赤、黄、緑、青の各ユニーク色のうち最大 2 色を選び、その割合が合計で 10 点となるように点数を配分する。人間はこの赤、黄、緑および青のユニーク色を色相においてこれ以上分けることのできない色として知覚しており、さらにユニーク色である赤と緑の対そして黄と青の対はそれぞれ同時に知覚することはないという反対色の関係にある。

このような被験者の応答から各ユニーク色成分スコアを計算により求め、色の見えの評価値とする。ユニーク色成分スコアは、各ユニーク色応答に色み成分スコアを乗じて、それを 10 点で割った値とする。たとえば、色み成分スコアが 6 点で、ユニーク赤の応答が 7 点およびユニーク黄の応答が 3 点の場合、ユニーク赤成分スコア

は 4.2 ($6 \times 7/10$) 点およびユニーク黄成分スコアは 1.8 ($6 \times 3/10$) 点となる。この方法により、色相の割合が同じでも彩度が異なる色光について異なった評価値が得られる。たとえば、色相の応答がユニーク青 8 点、ユニーク緑 2 点の二つの別の色光の場合、それらの色み成分スコアが異なりそれぞれ 6 点と 2 点であったならば、それらのユニーク青成分スコアは、それぞれ異なる値 4.8 ($8 \times 6/10$) 点と 1.6 ($8 \times 2/10$) 点となる。このユニーク色成分スコアと色み成分スコアを以後のデータ解析に使用する。この方法は、色光の見えを 10 点または 100% に正規化した応答を取り出していることから、色光の明るさが変化するような場合でも、総和が 10 点となる相対値で表現されることに注意する必要がある。

3. 結果と解析

3.1 実験 1（中心窓と傍中心窓）

色光についての三回のカラーネーミングにより得られた各成分スコアの平均値を中心窓と傍中心窓についてそれぞれ Fig. 1 と Fig. 2 の $u'v'$ 色度図上に円グラフで示した。円グラフの大きさは一定で、中心座標は各色光の色度座標をおよび中心円の面積は白み（無彩色）成分スコアを表し、ドーナツ部の面積が色み（有彩色）成分スコアを表している。ドーナツ部はさらに各ユニーク色成分スコアに応じて扇形に分割し、角度を変えたハッチングによって区別した。いくつかの円グラフにおいて、たとえば「赤、黄、青」のように、三つのユニーク色成分が現れており、あたかも反対色が共存する応答があるかのようであるが、これは三回の応答が揺れ動いた結果であり、一回の応答でたとえば「黄 8 点、青 2 点」のような反対色を組み合わせた応答はなかった。また、円グラフが重ならないように一部の色光については中心座標をわずかにずらして描いた。

これらのロー・データから、色光の見えが色度図上でどのように変化しているかを知るために、まず色み成分および各ユニーク色成分についての等スコア線を求ることにする。色み成分はテスト色光の saturation (飽和度、彩度と訳される場合もある。本研究では以下「彩度」を用いる) を定量的に表したものと考えられるので、その等スコア線は等彩度線といえる。ここで、Fig. 1 や Fig. 2 のロー・データのまま彩度や色相の変化を色度図上で表現しようとすると、局所的変動やばらつきが散見された。そこで、それらの変動やばらつきを除くために、ロー・データに色度図上で一種の空間フィルタ（測定点の重みを $1/2$ 、隣合う 4 点の重みを各 $1/8$ とす

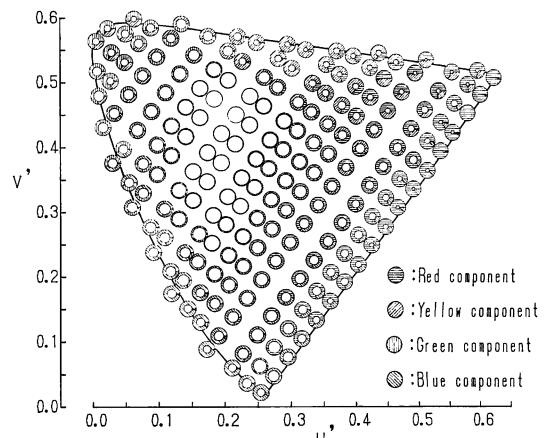


Fig. 1 Color-naming raw-data plots of 195 colored lights at fovea on the $u'v'$ chromaticity diagram. In a circle graph, area of an inner disk shows achromatic component score, and each area with 0° , 45° , 90° and -45° hatching angle shows each unique hue component score of red, yellow, green and blue, respectively.

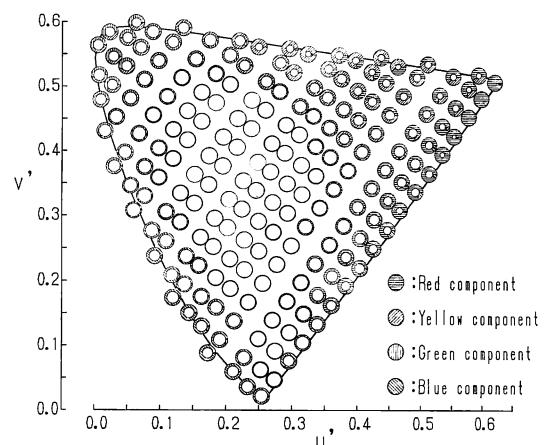


Fig. 2 Color-naming raw-data plots of 195 colored lights at 5° nasal visual eccentricity (parfovea). Others are same as Fig. 1.

る。隣合う点が 3 点の場合は測定点をはさむ 2 点だけを用い、重みを各 $1/4$ とする）を用いる移動平均法によって平滑化を図った。平滑処理の後、色度図上での彩度の変化を見るために、色み成分スコアについて、隣合った色度点間の比例内挿によって、等彩度点列を求め、その点列を直線で結び等彩度線を求めた。その結果を中心窓と傍中心窓についてそれぞれ Fig. 3(A) と Fig. 4(A) に示す。図中の数字は、色み成分スコアの最大値を 10 点としたときの、等色み成分スコア線の点数を表す。次に各ユニーク色成分スコアについても、同じ

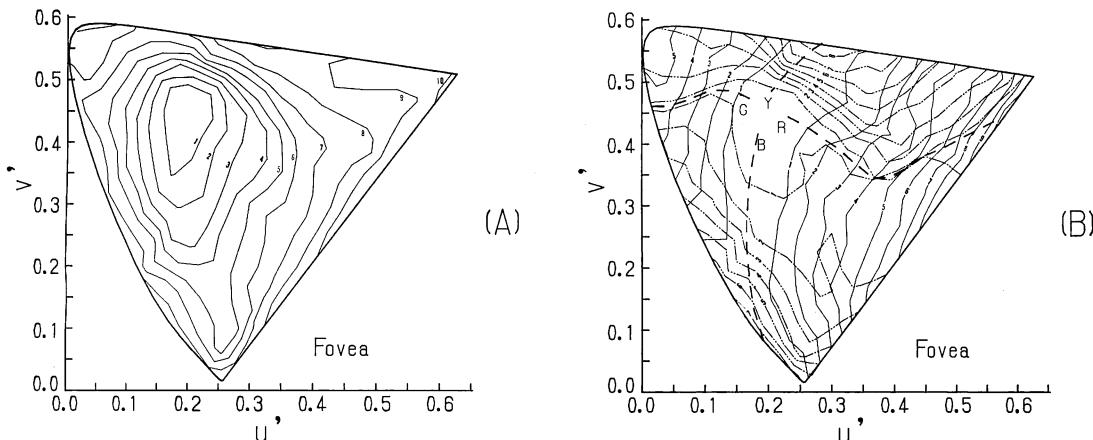


Fig. 3 (A) Equal chromatic component score lines, and (B) equal unique hue component score lines of red: R, yellow: Y, green: G and blue: B, at fovea. Four broken thick lines show unique hue loci of R, Y, G and B.

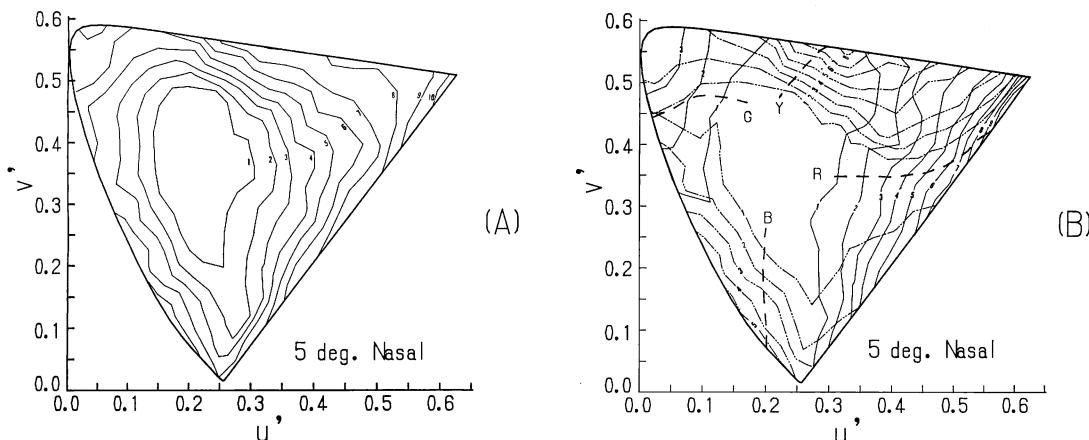


Fig. 4 (A) Equal chromatic component score lines, and (B) equal unique hue component score lines, at 5° nasal visual eccentricity (parafovea). Others are same as Fig. 3.

方法によってユニーク色成分の等スコア線を求めた。その結果を中心窓と傍中心窓についてそれぞれ Fig. 3(B) と Fig. 4(B) に示す。図中の R, G, B, Y は各ユニーク色成分を意味し、図中の数字はそれぞれのユニーク色成分の等スコア線の点数を示す。等スコア線は、R と G については実線で、Y と B については 2 点鎖線で示した。太い破線で示した線は、これらのデータをもとに描いた各ユニーク色軌跡である。

このユニーク色軌跡は、ユニーク色成分スコアが 1 点未満で色み成分スコアがほぼ 0.5 点以上の色度領域の中において、平滑処理後の測定色度点間の比例内挿によって最もユニークな色度点列を求めたのち、フリーハンドで滑らかな線を描いたものである。ユニークな色度領域が一部ない Fig. 3(B) のユニーク赤の軌跡については Y

と B が 1 点の等スコア線の中間に描いた。

被験者 MT の右眼中心窓についての結果である Fig. 3(A) を見ると、等彩度線は黄色の領域において密で、白から赤紫の領域にかけておよび赤の領域において粗である。一般的傾向として、白からスペクトル光にかけて次第に彩度が高くなっている。Fig. 3(B) のユニーク色成分についての等スコア線は、青成分スコアの 1 点と 2 点の線で一部凹凸の変化が他の線に比べて大きくかつ間隔が広いという特徴がみられるが、全体として凹凸の変化の少ないながらかな変化を示している。しかしながら、とくに赤のユニーク色軌跡が大きく湾曲しているのと黄に対する応答が高いことがこの被験者について特徴となっている。

一方、傍中心窓については、解析結果である Fig. 4 を

見ると、Fig. 4(A)ではほぼ全色光で Fig. 3(A)の中心窓よりも彩度が低下したが、黄系統色光の彩度の中心窓に比べての低下は小さかった。Fig. 4(B)のユニーク色成分の等スコア線の間隔は、Fig. 3(B)の中心窓に比べ、緑、青、黄の順で、とくに緑について広くなったが赤については狭くなつた。Fig. 3 に対する Fig. 4 の最大の変化は色み成分 1 点以下の色光の色度図上の領域が増大し、中心窓における赤紫の領域まで達していることである。それにともない、ユニーク色軌跡は変化し、赤のユニーク色軌跡の湾曲が小さくなつた。

3.2 実験 2（耳側 30°）および実験 3（耳側 10°）

どちらの実験においても、5 回のカラーネーミングにより得られた各成分スコアの平均値を Fig. 1 と同様の

方法によって、Fig. 5 と Fig. 6 にそれぞれ描いた。実験中の被験者の内観によれば、傍中心窓ではあまり気にならなかつたテスト刺激の明るさの変化がこれらの実験では顕著に感じられた。とくに中心窓における青色から緑色にかけての色光は、離心角が大きいほど明るく感じられた。等彩度線および等スコア線は、色度図上の隣合つた測定色光のロー・データ間の比例内挿によって等彩度点列および等スコア点列を求めた後、それらの点列に最も適合するような曲線をフリーハンドで描いた。それらの結果を実験 2 と実験 3 についてそれぞれ Fig. 7 と Fig. 8 に示す。それぞれ図中の記号などは Fig. 3 および Fig. 4 と同じである。

耳側 10° および耳側 30° におけるこれらの結果は、中

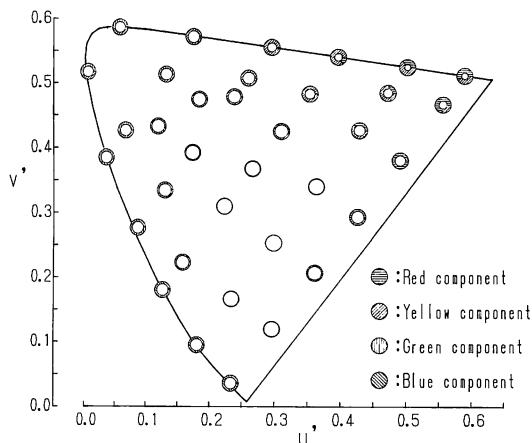


Fig. 5 Color-naming raw-data plots of 35 colored lights at 10° temporal visual eccentricity. Others are same as Fig. 1.

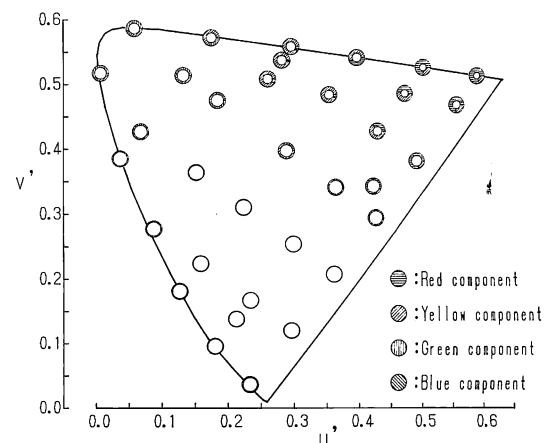


Fig. 6 Color-naming raw-data plots of 34 colored lights at 30° temporal visual eccentricity. Others are same as Fig. 1.

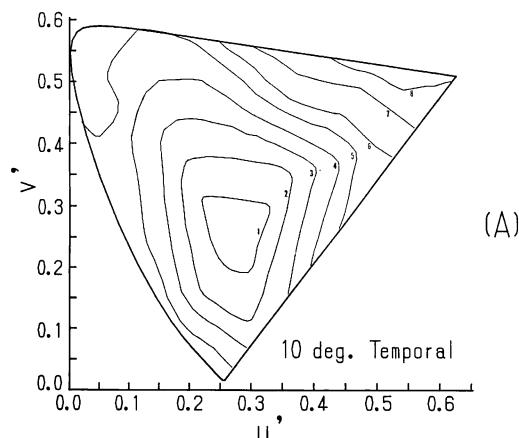
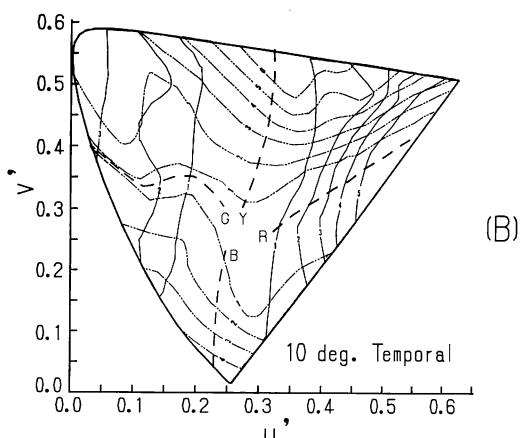


Fig. 7 (A) Equal chromatic component score lines, and (B) equal unique hue component score lines, at 10° temporal visual eccentricity. Others are same as Fig. 3.



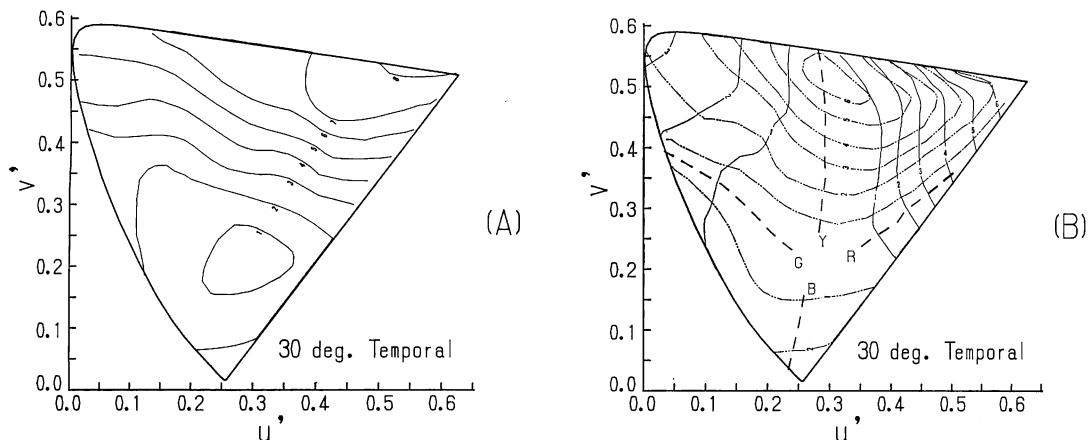


Fig. 8 (A) Equal chromatic component score lines, and (B) equal unique hue component score lines, at 30° temporal visual eccentricity. Others are same as Fig. 3.

心窓や傍中心窓の結果に比べ、まず全体として彩度が低下し、等彩度線およびユニーク色成分の等スコア線の間隔は広くなった。離心角の増加に応じてユニーク青成分スコア値は全体として大きく低下しており、ユニーク赤成分スコア値も低下している。しかし、傍中心窓の結果よりも全体としてユニーク黄成分スコア値は増加し、ユニーク緑成分スコア値もわずかに増加している。さらに、大きな変化の一つはやはり色み成分1点以下の色度領域が離心角の増加に対応して赤紫線の青端寄りの方向へ移動していることである。すなわち、色度図上での白の領域の移動にともない、中心窓で白くまたは低彩度に見えていた色光の彩度が離心角が大きくなるにつれて上昇している。その特性はとくに中心窓で中彩度以下であった色光のユニーク黄成分の増大として現れている。それと対照的に青系統の色光の彩度の低下は大きかった。とくに、中心窓で赤紫に見えていた色光は白に見えるまで変化した。これらの変化の結果、ユニーク色軌跡はさらに変化し、色度図上での湾曲は小さくなつた。

3.3 網膜4部位にわたる解析

これまで色度図上での色光の見えの変化を見てきたが、ここでは網膜4部位で共通に用いた29個の色光に、実験3で一部共通でないが隣合う二つの色光の平均で推定した二つの色光を加えた合計31の色光の離心角に応じた色の見えの変化に注目した。これら31個の色光は色度図上ではほぼ等間隔に分布している。まず31個の色光を中心窓での色の見えのうちの彩度を表すFig.3(A)に従って、色み成分スコア6点以上の高彩度光(19色)、3点から6点未満の中彩度光(9色)および3点未満の低彩度光(3色)に分けた。これらの色光の色の

見えが離心角に応じてどのように変化したかをこの分け方に従い Fig. 9(A), (B), (C)に示す。この直交座標の横軸は赤(R)と緑(G), 縦軸は黄(Y)と青(B)のそれぞれ反対色のユニーク色答を最大値10点で表しており、プロットした座標はテスト光のユニーク色成分スコアを示す。離心角について、 0° は白丸、 5° は三角、 10° は逆三角および 90° は四角でプロットし、物理的に同じ色光はこの順序で実線によって結んだ。

Fig. 9(A)の中心窓で高彩度である色光の離心角の増加による彩度および色相の変化を見ると、まず彩度は赤から黄にかけての色光での低下が小さかったが、そのほかの色光での低下は大きかった。色相については、赤から黄にかけての色光における変化が大きかったが、他の色光ではあまり大きくなかった。次に、中彩度の色光についてFig. 9(B)を見ると、離心角に応じた色の見えの変化は全体として図の右下から左上の方向に移っているのがわかる。すなわち、中心窓で紫から青の色相に見えていた色光は離心角が増大するにつれて彩度が低下した。また、中心窓で赤や赤紫および青緑から緑や黄にいたる色相の色光は、離心角が増大するにつれて、黄または黄緑へと色相が変化し、同時に彩度が増大している。この傾向は、Fig. 9(C)の低彩度の色光についても明瞭に現れており、離心角の増大につれて色相は黄緑の方向へ変化しつつ彩度は増加している。

4. 考 察

特定の一人の被験者について、色度図全域にわたる色光を、中心窓で明るさを等しくした後、周辺網膜に呈示したときの色の見えはどのように変化するかをカラー

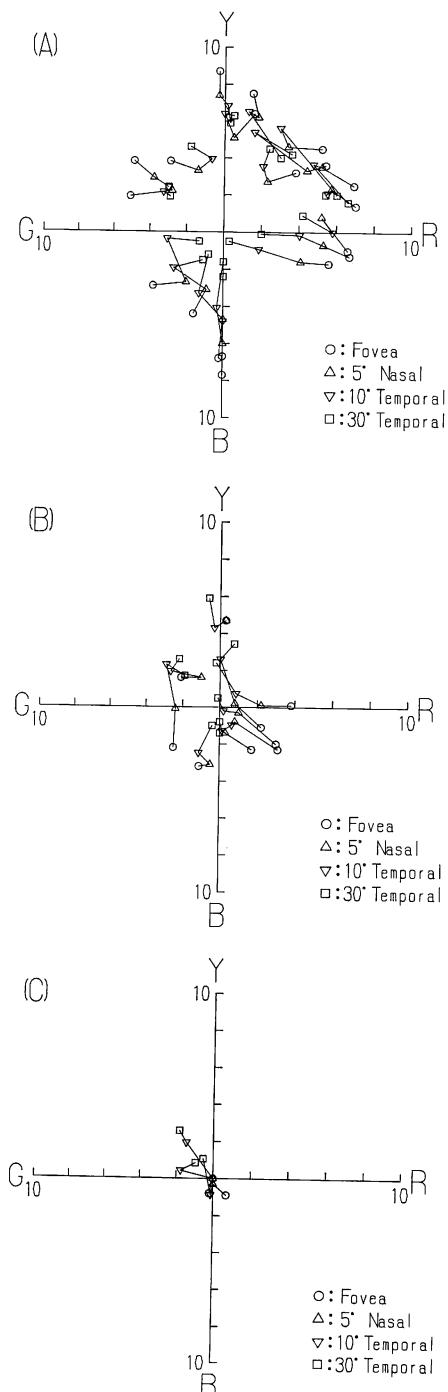


Fig. 9 Change of the unique hue components as the visual eccentricities illustrated on the RG-vs-YB diagram, (A) : highly saturated colored lights, (B) : middling ones and (C) : lower ones at fovea. Symbols of ○, △, ▽ and □ denote scores at fovea, 5° nasal, 10° and 30° temporal visual eccentricities, respectively.

ネーミング法で調べた。その結果、まず用いた色光全体としてみると、離心角の増大とともに色光の彩度は低下した。この傾向は従来の研究結果と同じである^{1,2)}。さらに、本研究の色度図全域に分布する多数の色光についての測定において従来指摘されていなかった変化が見られた。中心窓で高彩度である色光は離心角の増大とともに彩度は低下するが、中彩度以下である色光はその色度領域によって彩度の変化、色相の変化を異にし、とくに、中心窓で白の刺激が低彩度の黄緑へ、および同じく赤紫の刺激が白へと変化した。

このような被験者 MT について得られた周辺視における色の見えの特性の変化が一般的に成り立つという保証はないが、少なくとも一人について観測された事実である。しかし、このような変化に関する報告は筆者の知る範囲にはないことを考えると、非常に希な被験者あるいは滅多に起きない現象である可能性もある。

そこで、そのような現象が他の被験者についても観測されるかどうかを確認するために、被験者 MT および 20 歳代のナイーブな被験者 4 人の合計 5 人について以下に示す観察実験を行った。それは、暗順応 10 分以上で右眼方位 0° の離心角 10° と 30° に背景暗黒で 2° 視野開口を通して白色蛍光灯照明の N 9.5 の白色票 ($x=0.33$, $y=0.34$) を輝度 3.6 cd/m^2 で 2 秒間呈示する方法で、右眼のみで、見えた色を応答させた。この観察実験の網膜照度はほぼ 120 Td と本研究と同じである。この手順をそれぞれの部位について各々 3 回から 5 回行った。さらに離心角 10° において数回の呈示で記憶させた後、白色蛍光灯下でマンセル色票と記憶色とのカラー マッチングを行った。その結果、色の応答については、「少し黄緑」が 2 人、「わずかに黄緑」が 2 人、「わずかに青紫」が 1 人であった。一方、マッチングした色票はそれぞれ (10 Y, 9/2), (7.5 Y, 9/2) : (MT), (10 Y, 9/1), (5 GY, 9/1), および (10 PB, 9/0.5) であった。また、離心角 10° と 30° で応答の違いはほとんどなかった。この観察実験の意味すなわち「白に黄がはいることを調べる」のを知っているのは MT だけで、しかも他の 4 人の被験者は刺激が何であるか何も知らされていなかった。

この結果は、個人差があるものの、Fig. 9(C)の MT についての結果と同じ傾向を示している。しかし、5 人中 1 人の被験者はわずかながら反対の色相の応答を示した。これは色の見えに個人差があることを示している。この観察実験の目的は中心窓で白に見える色光が周辺網膜で低彩度の黄緑に見えるようになる現象の存在を調べ

ることにあったことから、結論としてそのような現象は存在するといえる。また、この観察実験よりほぼ2桁高い輝度のテスト光についても同様の現象が認められた。すなわち、今回設定した実験条件の下で中心窓で白く見えていた色光が周辺網膜で淡い黄緑に見えるという新しい知見が得られたことになる。

これらの観察実験の結果は、本研究の MT 一人について得られた特性が周辺視の色の見えの一般的特性であると認定しているのではなく、むしろ非常に希な被験者あるいは滅多に起きない現象ではないことを示している。すなわち、本研究で得られた MT 一人についての特性はあくまでも特定の被験者について得られた特性であることに変わりはない。

Fig.3(B)に見られるように、中心窓におけるユニーク色軌跡は大きく湾曲している。この特性は、Ayama ら⁸⁾の結果と同様に色覚の非線形的特性を表しているといえる。さらに、周辺網膜部位についての Fig.4(B)、Fig.7(B)およびFig.8(B)のユニーク色軌跡もかなり湾曲している。このユニーク色軌跡の湾曲に加えて、離心角の増大とともに白く見える色度領域が色度図上で移動するという今回の結果と上述の観測実験の結果から、周辺網膜についての色覚特性も非線形的であるといえる。したがって、周辺網膜部位における複合光とくに中彩度以下の色光の色の見えは、各部位でのスペクトル光の色の見えだけから予測できることは明らかで、今回我々が採用した色度図全域にわたる色光の色の見えの測定によって初めて予測を可能とするデータが得られると考えられる。

このような、いわゆる非線形の特性の原因として、たとえば、錐体の密度分布の減少とそのバランスの変化、桿体の影響、黄斑色素の影響、反対色過程から色の感覚出力までの神経経路の特性等が考えられる。まず桿体の影響について考えてみる。実験では中心窓と同じ刺激を周辺網膜に呈示しており、そのときの被験者の内観として青系統および緑系統の色光の明るさは上昇し、とくに青色光の明るさは刺激の見かけの大きさの増大を伴って増加した。暗順応時の周辺網膜における明所視レベルの青系統色光の明るさの増大は桿体の明るさへの関与によることが示されており¹²⁾、今回の実験の結果にもその影響があるものと考えられる。すなわち、この明るさの増大が、色光の見えの白みの増加への桿体の関与が原因であるならば、青系統の色光の彩度が低下することは容易に理解できる。しかし、中心窓で中低彩度の黄系統色光の彩度が周辺網膜で増加することを桿体の関与から説明

するのは難しい。また、黄斑色素は中心窓近傍のみに存在し、青、緑系統の色光をよく吸収することから、周辺網膜ではそれらの色光の明るさは増加する、しかし彩度の低下を説明できない。同じように、中低彩度の黄系統色光の彩度の増加を黄斑色素の影響で説明するのは難しい。さらに、錐体の分布密度の変化または神経経路の特性の変化から、青系統色光の彩度の低下と中心窓で中低彩度の黄系統色光の彩度の増大を説明することも現段階では難しい。

一方、中心窓で高彩度に見えた色光の彩度が離心角の増大とともに低下していることは前述のとおりである。この原因について、中心窓よりも周辺網膜での錐体の分布密度が低いためであると簡単に考えることはできない。錐体の分布密度の対数は離心角の対数にはほぼ反比例する割合で減少している¹³⁾が、そのような急激な彩度の低下はみられなかった。また、Stabell ら¹⁴⁾は錐体の絶対感度（閾値）をスペクトル光について離心角の関数として求め、分布密度の変化では説明が難しいことを示し、より高次のメカニズムの関与の可能性を示唆している。

以上のように、周辺網膜で得られた色光の色の見えの特性に関して考察してきたが、不明な点が多く、これらの原因についてはより詳細な色覚情報処理メカニズムについての研究から解明されるものと期待される。

今回得られた結果は、周辺網膜の色覚に関わる多くの変数の中から実験条件で示した場合について1人の被験者で得られたものであって、一般的特性を示しているとは言い難い。さらに、条件が変われば別の結果が得られることが当然予想される。たとえば、明順応時には桿体の関与は少なくなるであろうし、より大きい離心角または別の方位角での特性が今回の結果から簡単に予想できるとは思えない。また、大きい離心角においても刺激サイズを大きくすることで彩度を回復できる可能性も考えられる^{15,16)}。さらに、刺激レベルや背景との関係によつても変化することが予想される。したがって、周辺網膜における色の見えの一般的特性を求めるためには、多くの被験者で関係する多くの変数についての実験データの積み重ねを必要とする。

他方、今回採用した実験条件を実際の視環境に重ねてみると、夜のしかも明るくない背景中に点灯する比較的小さな色光、たとえば交通信号灯、非常灯、誘導灯、車や航空機などの操縦席内外のライトなどを周辺視野で見るとときにかなり共通した条件となっている。したがって、被験者1人についての結果ではあるが、このよう

な視環境下での水平線上 30°までの色光の色の見えを Fig. 3, Fig. 4, Fig. 7 および Fig. 8 から大まかに予測することが可能である。

5. おわりに

水平線上 30°までの周辺網膜 4 部位における 1人の被験者の色の見えを、色度図全域にわたる色光についてカラーネーミング法で測定した。その結果、中心窓において高彩度であった色光は離心角の増大とともに彩度が低下したが、中彩度以下であった色光はその色度領域によって彩度と色相が変化し、青系統の色光の場合彩度が低下し、黄系統の色光の場合彩度が増加した。とくに、中心窓で白の色光は周辺網膜では淡い黄緑に、また赤紫の色光は白に変化して見えた。これらの結果を具体的な色覚メカニズムの変化により説明するのは現段階では難しい。むしろこれらの結果は、周辺網膜での色の見えをスペクトル光だけの見えから簡単に予測してはいけないことを示している。一方、暗順応、背景なしの 2°視野といった今回の実験条件と類似の視環境下での周辺網膜における色光の色の見えの予測に、1人についての結果ではあるが、利用できると考えられる。

周辺網膜での色の見えを予測可能とするためには関連する変数についてのデータの積み重ねを多数の被験者について行う必要があり、今後の課題と考えられる。

本研究を行うにあたり、種々の便宜と適切な助言をいただいた東京工業大学総合理工学研究科助教授内川恵二先生に感謝します。

文 献

- 1) R. M. Boynton, W. Schafer and M. E. Neun: "Hue-wavelength relation measured by color-naming method for three retinal locations," *Science*, **146** (1964) 666-668.
- 2) I. Abramov and J. Gordon: "Color vision in the peripheral retina. II. Hue and saturation," *J. Opt. Soc. Am.*, **67** (1977) 202-207.
- 3) J. D. Moreland and A. C. Cruz: "Colour perception with the peripheral retina," *Opt. Acta*, **6** (1958) 117-151.
- 4) U. Stabell and B. Stabell: "Color vision in the peripheral retina under photopic conditions," *Vision Res.*, **22** (1982) 839-844.
- 5) 阿山みよし、池田光男: "傍中心窓における反対色レスポンス関数の測定", *日本色彩学会誌*, **5** (1981) 50-62.
- 6) H. Uchikawa, P. K. Kaiser and K. Uchikawa: "Color-discrimination perimetry," *Color Res. Appl.*, **7** (1982) 264-272.
- 7) 阿山みよし、黄江青、池田光男: "色度図全域における明るさ効率比の測定", *光学*, **18** (1989) 549-557.
- 8) M. Ayama, T. Nakatsue and P. K. Kaiser: "Constant hue loci of unique and binary balanced hues at 10, 100, and 1000 Td," *J. Opt. Soc. Am. A*, **4** (1987) 1136-1144.
- 9) 関口修利、池田光男: "色の見えに基づく色視野の測定", *日本眼光学会誌*, **4** (1983) 122-127.
- 10) D. O. Weitzman and J. A. S. Kinney: "Effect of stimulus size, duration, and retinal location upon the appearance of color," *J. Opt. Soc. Am.*, **59** (1969) 640-643.
- 11) M. H. Pirenne: "Light-adaptation," *The Eye Vol. 2*, ed. H. Davson (Academic Press, New York, 1962).
- 12) U. Stabell and B. Stabell: "Spectral sensitivity of the dark-adapted extrafoveal retina at photopic intensity," *J. Opt. Soc. Am.*, **71** (1981) 841-844.
- 13) C. A. Curcio, K. R. Sloan, Jr., O. Packer, A. E. Hendrickson and R. E. Kalina: "Distribution of cones in human and monkey retina: Individual variability and radial asymmetry," *Science*, **236** (1987) 579-582.
- 14) B. Stabell and U. Stabell: "Absolute spectral sensitivity at different eccentricities," *J. Opt. Soc. Am.*, **71** (1981) 836-840.
- 15) J. A. Van Esch, E. E. Koldenhof, A. J. Van Doorn and J. J. Koenderink: "Spectral sensitivity and wavelength discrimination of the human peripheral visual field," *J. Opt. Soc. Am. A*, **5** (1984) 443-450.
- 16) N. Drasdo: "Receptive field densities of the ganglion cells of the human retina," *Vision Res.*, **29** (1989) 985-988.