

明順応時の周辺視と中心窓視における色相の異なる高彩度光の色の見えの違い

高瀬 正典*・内川 恵二**

*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

Difference of Color Appearances of the Highly Saturated Colored-Lights with Various Hues in a Light-Adapted Foveal and a Peripheral Vision

Masanori TAKASE* and Keiji UCHIKAWA**

*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

Under a light-adapted condition where rods were saturated completely, appearances of 13 highly saturated colors (2° in diameter) were measured for three subjects at the fovea and the 30° temporal visual locus by a color-scaling method and a brightness magnitude-estimation method. From the results, it was shown that the change of color appearance at the periphery was dependent on the hue of each stimulus at fovea. The difference between the foveal hue and the peripheral hue for nearly balanced-hue colors was respectively larger than that for nearly unique-hue colors. We attempted a curve-fitting by power functions to the hue-change data. These changes of hue and saturation could not be explained by the opponent-color theory.

1. はじめに

明るい視環境における周辺視野での色の見えについて、筆者らは、従来の暗順応条件¹⁾または低い明所視レベルの色光²⁾についての見えと異なり、かなりの離心角(eccentricity)まで見えの彩度の低下の小さいかつ色光間の見えの差の小さい結果を報告した³⁾。この特性は、暗順応条件などでの特性に比べ、色光の輝度と順応レベルを高くすることで周辺視野での色の見えが中心窓の見えに近づいたものと考えられる^{4,5)}。この実験の条件は、全視野にわたり桿体が飽和するほどの周辺背景刺激中にスペクトル光のほぼユニーク色光を呈示する条件を用いており、評価にはカラースケーリング法と明るさのマグニチュード評価法を用いている。一方、Abramov ら⁶⁾は刺激サイズを M スケールにもとづいて周辺視野で大きくすることによって中心窓と同じ色の見えを実現でき

ることを示し、さらに Abramov ら⁵⁾は低いレベルであるが白の周辺光を用いることによって彩度が上昇し、受容野が縮小することを示した。しかしながら、Abramov らの結果は暗順応時と 8 Td の背景視野に順応しているときに得られたものであって、昼間の明るい視環境とは程遠い条件である。また、前報³⁾の実験に用いた刺激はほぼユニークなスペクトル 4 色光であり、これだけですべての刺激の色相を代表できるとは限らない。

そこで本研究では、周辺視野における色の見えの色相と彩度の変化の特性を調べることを目的とし、明るい視環境において刺激の色相を変化させて中心窓と耳側 30° でカラースケーリング実験を行った。

2. 実験方法

2.1 視野位置、刺激および装置

テスト刺激を呈示する視野位置は右眼の中心窓と耳側

*E-mail: takasem@cc.nda.ac.jp

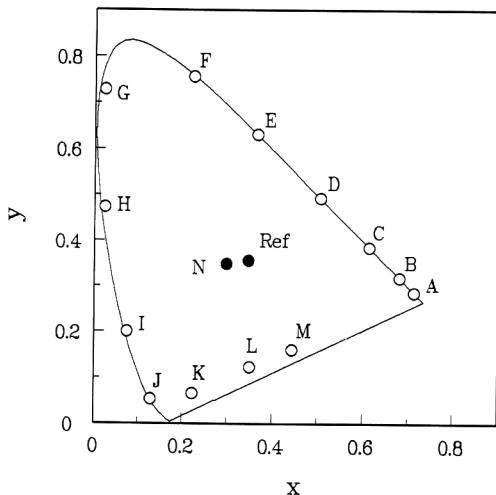


Fig. 1. Chromaticities of the stimuli. Open circles from A to M are test ones. Filled circles of N and Ref are the surround and the reference ones, respectively.

30°とした。左眼は眼帯で覆った。

テスト刺激以外の刺激および実験装置は前報³⁾と同じである。テスト刺激は直径2°の円形で、波長470 nm, 490 nm, 500 nm, 510 nm, 540 nm, 560 nm, 580 nm, 600 nm, 620 nmおよび640 nmの干渉フィルターによる10色および赤紫色ガラスフィルターと色温度変換フィルターとの組み合わせによる3色の合計13色を用いた。テスト刺激は被験者がスイッチを押すことで1秒間呈示される。テストが呈示されない間は背景光刺激(2°, 120 cd/m²)を呈示した。これらのテスト刺激の色度をFig. 1の色度図にAからMまでのアルファベットを付けて示す。図中のRefは白色参照刺激(2°, 250 cd/m²: キセノン灯)を、およびNは周辺背景刺激(180°, 120 cd/m²: 白色蛍光灯照明)を意味している。この120 cd/m²の輝度値は桿体の飽和する下限2000 scot. Tdに相当している。

テスト刺激の輝度値は周辺刺激のある中で参照刺激と中心窓での継時比較による明るさマッチングで決めた。

2.2 被験者および見えの評価法

被験者は前報³⁾の実験にも参加したMS, YU, MTの色覚正常な男性3名である。MSとYUは20歳代、MTは50歳代である。

評価法は前報³⁾と同じである。すなわち、色の見えの評価には、カラースケーリング法の中のGordonら⁷⁾が用いている「4+1」カテゴリー法に黒みの評価を加えた方法を用いた。明るさは、マグニチュード評価法⁸⁾によって参照光の中心窓での明るさを10点、暗黒を0点と

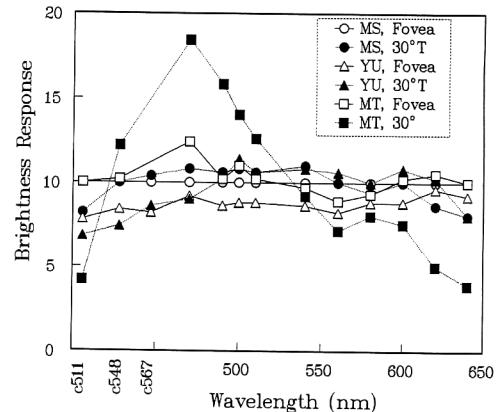


Fig. 2. Magnitudes of brightness estimated by 3 subjects for the 13 stimuli at the fovea (open symbols) and the 30° (filled symbols).

して評価する。

2.3 手順

実験は被験者が半球視野に3ないし5分間明順応した後に始めた。

実験では参照刺激から耳側30°視野位置にテスト刺激を準備し、被験者はまず参照刺激を固視してスイッチを押すことで刺激を呈示する。耳側30°での見えの評価は、まず明るさについて、ついで色み、白み、黒みの割合について（合計10点）、最後に色みの中のユニーク色とその割合について（合計10点）応答する。複数回の呈示を許したが、2秒以上間をおいた。つぎに、テスト刺激を固視して同じ手順で中心窓での応答を得る。この手順をすべての刺激について行って1セッションとし、各被験者は全部で5セッション日を変えて実施した。

3. 結果と考察

まず、明るさ評価の結果をFig. 2に示す。白抜きのシンボルが中心窓、塗り潰しのシンボルが耳側30°での評価である。中心窓で10点からずれた評価があるが、明るさマッチング時と評価時のセッションの違いによるものと思われる。耳側30°でのMSとYUの評価は中心窓に比べ±1.5以内の小さい変化しかなかったが、MTのそれは大幅に短波長域で増加しつつ赤の領域で減少した。これは、MTの黄斑色素の濃度が高いことと赤領域における空間的黒み誘導が大きかったためと思われる。MTの青紫色光K(c 567)でのプロットがないのは明るさマッチングの調整範囲外であったためである。

刺激の色相の変化に対する5回の色の見えのカラース

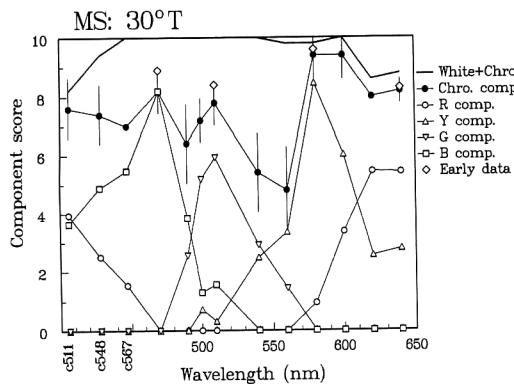
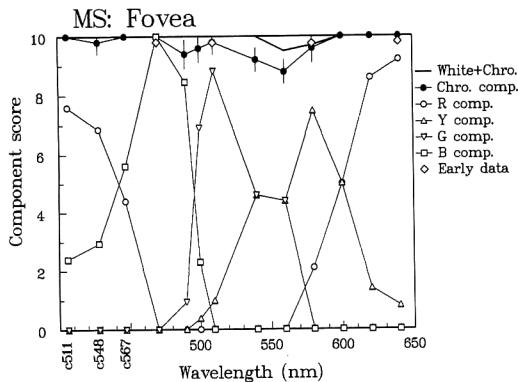


Fig. 3. Color-scaling results of subject MS for the 13 highly saturated stimuli at the fovea (upper figure) and the 30° temporal locus (lower one). Notations, c511, c548 and c567, denote the main wavelengths of complementary colors. Thick solid lines denote the sum of white component and chromatic component (filled circle with vertical bar of standard deviation). Symbols, \circ , \triangle , ∇ and \square , denote unique-hue components of red, yellow, green and blue, respectively.

ケーリング結果を各成分の平均値でもって Fig. 3, Fig. 4 および Fig. 5 に MS, YU, MT の各被験者ごとにそれぞれ示す。上のグラフが中心窓、下が耳側 30° での結果である。横軸は波長で、450 nm 以下にパープル 3 色を補色主波長で示した。縦軸は評価の成分値である。一番上の太い実線は色み成分と白み成分の算術和で、残りが黒み成分を表している。黒丸は色み成分を示し、縦棒は標準偏差を示す。黒丸と太い実線の差が白み成分である。白抜きの丸、三角、逆三角、四角はそれぞれ赤、黄、緑、青の各ユニーク色成分を示す。さらに、ほぼユニーク波長での菱形のプロットは前報³⁾での彩度（色み成分）の結果で、比較のために示した。

結果を見て、まず被験者に共通していえることは、色み成分のテスト色光による変化が中心窓で小さく耳側

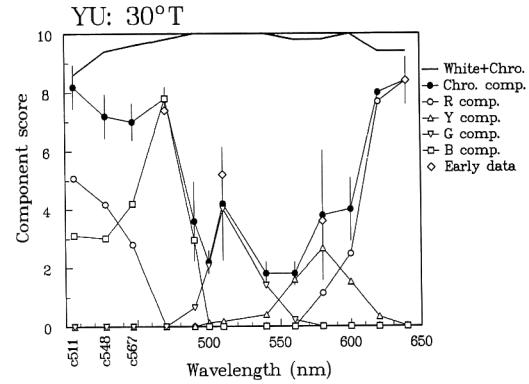
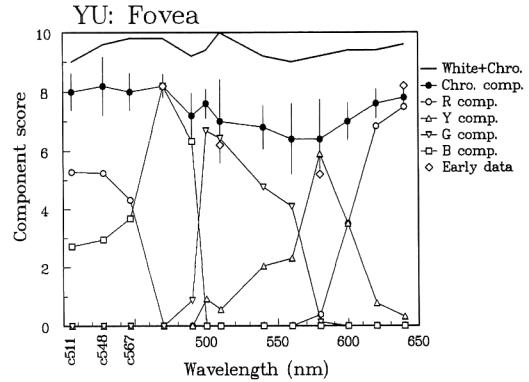


Fig. 4. As Fig. 3 but subject YU.

30° で大きい、そして、耳側 30° での彩度（色み成分）は中心窓よりも低下し、無彩色成分（白み、黒み）が増加することである。この特性は周辺視野での色の見えの一般的なものであるが、30° での色み成分の低下に大きな個人差がみられる。とくに、YU の中波長域での大幅な低下、MT の短波長域での低下と赤色領域での黒みの増加による低下、および MS の黄緑色での低下が特徴的である。また、被験者 MS, YU, MT の結果を前回³⁾と比較すると、MT の短波長での違いが目立つだけで他は大体ばらつきの範囲にある。なお、カラースケーリングで得られた色み成分（彩度）を比較する場合、明るさが大きく異なると比較できないと一般にいわれている。したがって、MT の 30° での彩度と中心窓のそれは比較すべきでないかもしれない。しかしながら、今回の結果をみる限り、波長対彩度関数は被験者で異なるといわざるをえない。すなわち、前報³⁾のほぼユニーク色光について被験者 10 人の平均値として得られたほぼ同じ離心角対彩度関数は、被験者のそれぞれ異なる波長対彩度関数の平均をとった結果、ほぼ同じになった可能性がある。

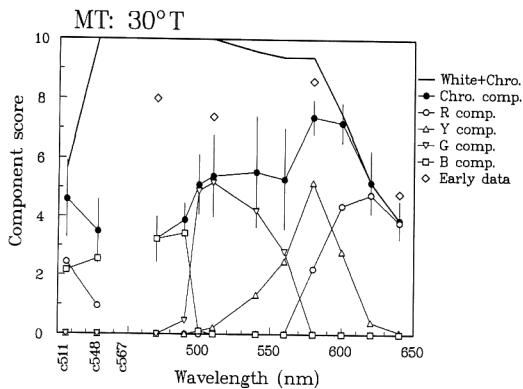
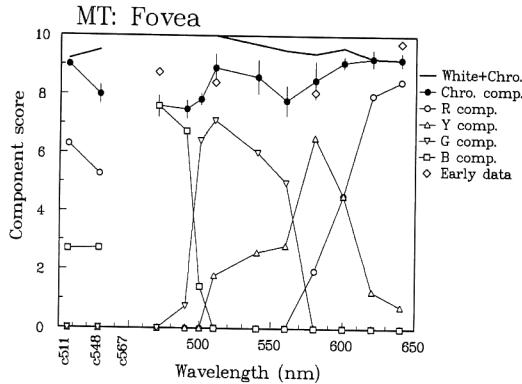


Fig. 5. As Fig. 3 but subject MT.

そこで、このような色相と彩度の変化をみるために、色の見えの反対色極座標表現を行った。3人の被験者についてシンボルを変えてリプロットした結果をFig. 6に示す。白抜きのシンボルが中心窓の見えで、塗りつぶしのシンボルが耳側30°での見えである。外周に付けたアルファベットの位置は刺激の見えの色相の大体の位置を示す。ただし、Fig. 3からFig. 5に所々みられる反対色の出現はセッション間の応答の揺れに起因することから、相殺して、ユニーク色の割合を新たに計算した。色み成分の調整は行わなかった。Fig. 6をみると、前述のような彩度の変化に加えて、中心窓に対する耳側30°での色相の変化にいくぶんの規則性がみられる。まず、色相の変化の方向について右回りの場合が約7割であること、そして左回りの場合が色光F, Gと被験者MSの色光A, B, C, Dについておよび被験者YUの色光Hについてであり、また変化のない場合が色光Jについてである。従来、周辺視野では赤緑反対色の見えが劣化して黄青反対色の見えが残る(2色性)といわれているが、その定説に従う赤緑反対色応答の減少が黄青のそれよりも大きい場合は、MSについての色光A, B, C,

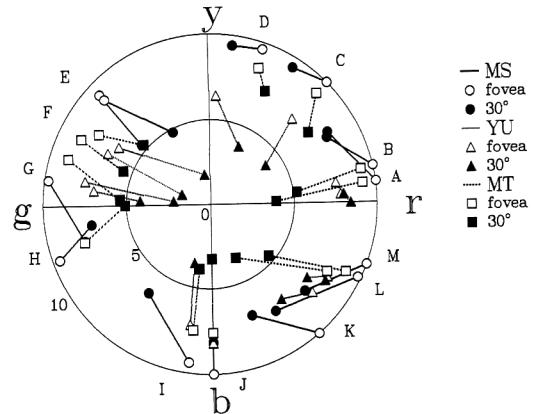


Fig. 6. Replots of 3 subjects data in a polar diagram of opponent color appearance coordinate.

Dおよび3被験者についての色光E, K, L, Mに加えて、変化のない場合が色光Jについてであり、約5割にすぎない。したがって、約5割の場合が黄青反対色応答の減少が赤緑のそれより大きいことになる。被験者の違いとして、黄赤の象限でのMSの黄の応答の周辺視野での減少がなくて逆に増加していることがある。この原因として、周辺視野での白みの増加を黄の増加と知覚する人がある程度いることから、その特性が現れているのかもしれない。しかしながら、他の象限での応答についてMSが他の被験者と質的に同じ変化を示していることをその特性で説明できない。

ほとんどの反対色応答が周辺視野で減少することは明らかであるが、上述のようにその色相の変化はFig. 6の色相象限で異なっている。すなわち、黄赤の象限でのMSの違いを除けば、黄緑の象限で色光E以外の見えの変化が左回りでありかつ色光Jの見えの変化がなく、他の象限では右回りの色相変化である。中心窓に対する周辺視野での色の見えは、従来、短波長光は青へ、中波長光と長波長光は黄へと色相が変化するといわれている。しかし、上述のFig. 6にみられる色相の変化はそれらと異なっていることが明らかである。

一方、ユニーク色に近い色光の見えに対してその中間の色光の見えがどのように変化しているかの問題がある。まず彩度の変化について、Fig. 3からFig. 5の耳側30°のグラフを見ると、MTを除き、ユニーク色光間の色光で彩度が凹状の変化をしているように見える。この原因として、中心窓でもわずかであるが同様の変化を示していることから、例えばユニーク色に近いほど鮮やかに知覚するメカニズムがあるのかもしれない。

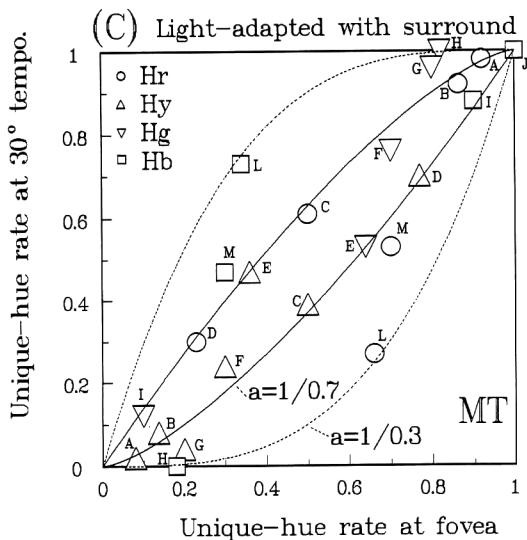
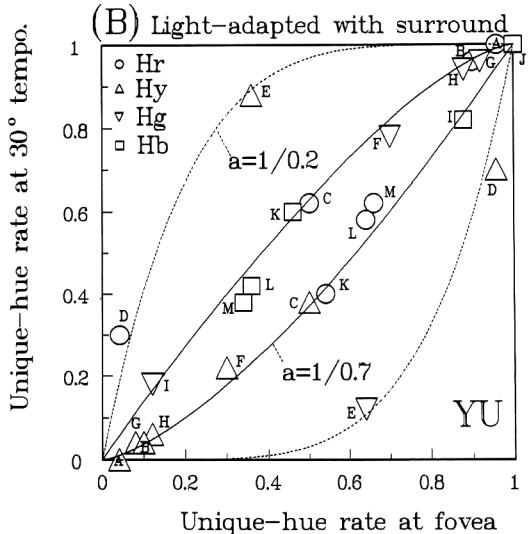
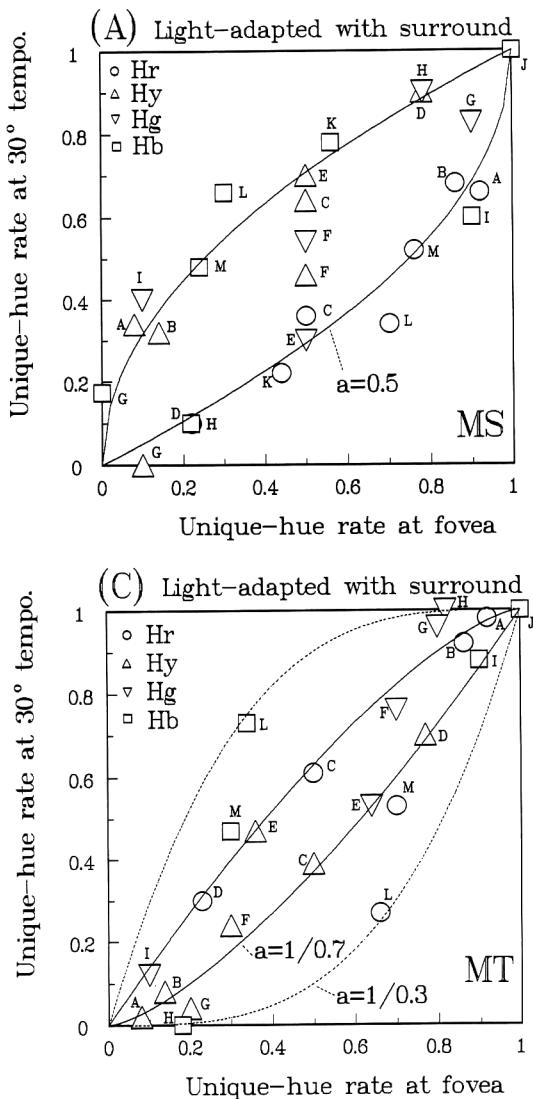


Fig. 7. Hue changes of 13 stimuli between the fovea and the 30° , shown by changes of paired unique-hues for a stimulus. (A): MS, (B): YU and (C): MT. Symbols, \circ , \triangle , ∇ and \square , denote unique-hues of red, yellow, green and blue, respectively. Paired curves show the fitting results by paired power functions to 13 pairs of the unique-hue data.

次に色相の変化について、ユニーク色成分の中心窓に対する耳側 30° での変化は必ずしも減少する場合だけではないことは上述のように Fig. 6 から明らかである。すなわち、ユニーク色成分の割合（色相）が刺激の色相（波長）と視野位置で変化していることを示している。Fig. 6 は彩度の変化も入っているためにユニーク色成分（色相）の変化が詳しくわからない。そこで、13 の色光について視野位置による見えの色相の変化を見るために、1 つの色光に対して被験者が応答した 2 つのユニーク色の割合（最大値を 1 とする）の中心窓での値 (x_1, x_2) を横軸に、耳側 30° での値 (y_1, y_2) を縦軸にとってプロットした。それらを各被験者について Fig.

7(A), (B), (C) に示す。各プロットの側に色光を示すアルファベットを付けて示した。この (x_1, y_1) と (x_2, y_2) の対は色の見えの 2 つのユニーク色の割合の変化を表しており、1 つの色光について $|r-g|$ 反対色の割合の変化と $|y-b|$ 反対色の割合の変化の 2 つのプロットがあって、グラフの中心点 $(0.5, 0.5)$ に対して点対称になっている（この表現は色相の組み合わせが中心窓と周辺視野で異なる場合を前提としているが、Fig. 6 の被験者 MS についての色光 G の場合はそうではない）。これらのプロットの分布をみると、とくに飛び離れた点を除き、なめらかな分布でかつそれぞれよく似た変化を示している。この飛び離れた点について、被験者

YU の色光 D (580 nm) と E (560 nm) の場合は、黄の色相に対する見えが刺激のぼけ具合に関連して中心窓と周辺視野で異なる可能性がないわけではないが、Fig. 4 および Fig. 6 での変化を他の近い波長の色光の変化と比較しても質的に異なるとはいえない。また、MT の色光 L (purple) の場合は、実験条件が異なるが耳側 30° での色の見えを色度図全域について調べた結果⁹⁾ 赤紫領域で彩度が最も低下する特性を示している被験者であることから、本質的な変化と思われる。一方、なめらかに分布しているプロット群は上のグループと下のグループに分離しており、中心窓の見えに対して周辺視野でユニーク色成分の割合が増加する場合と減少する場合にそれぞれ対応している。このグループ間の差は大まかに図の中央部で大きく端の方で小さいように見える。すなわち、中心窓でユニーク色に近い見えは耳側 30° でもある程度ユニーク色に近い見えとなり、中心窓で均衡色に近い見えは耳側 30° では色相の変化が相対的に大きくなることを意味している。この特性が確かであるかどうかについては、とくに各被験者についてユニークな色光を用いてさらに調べる必要があるが、興味深い知見である。また、被験者 MT と YU についての分布の形状は似ているが、それらと MS についての分布の形状は異なっている。これらの特性がどのような色覚メカニズムを反映しているのかを現段階では説明できないが、周辺視野での Bezold-Brücke 現象の色相シフト⁴⁾ にいくらくか似通った色相変化の特性といえる。今後被験者と刺激の色相をさらに増やした実験を積み重ねることによって明らかにする必要がある。

上記特性の解析の手始めとして、Fig. 7 の各上下 2 つの分布に対して種々の関数のフィッティングを行ったところ、以下に示すようなべき乗関数が最もよく適合するように思われた。その適合させた曲線を図中に示した。ただし、飛び離れた点も除けないので別の曲線（点線）で適合させた。この関数は、添字 u と d を付けてそれぞれ上と下の曲線とすると

$a \leq 1$ のとき

$$y_u = x_u^a, \quad y_d = 1 - (1 - x_d)^a \quad (1)$$

および、

$a \geq 1$ のとき

$$y_u = 1 - (1 - x_u)^a, \quad y_d = x_d^a$$

ただし、

$$x_u + x_d = 1, \quad y_u + y_d = 1$$

である。べき乗係数 a はユニーク色の割合の変化の度合を表す係数と考えられ、 $a=1$ で完全に同色相である。

Fig. 7 の滑らかな分布への適合の結果、MS について $a=0.5$ 、YU と MT について $1/a=0.7$ であった。式(1)の適用は、MS と他の被験者でそれぞれ上の式と下の式と異なっていた。また、飛び離れた点は何らかの見えの劣化が顕著に現れている場合で、べき乗係数が 1 から大きく離れる場合に相当している。

以上、中心窓に対する耳側 30° での色の見えについて、波長対彩度（色み成分）関数の変化は被験者で大きく異なること、および色相の変化は色相象限に特有のユニーク色相の増減の傾向が存在すること、そしてその変化はユニーク色光よりも均衡色光のほうが大きいことが明らかになった。さらに、この色相の変化に対してべき乗関数でフィッティングを試み、ある程度適合することを示した。

本実験で得られたような、中心窓視に対する周辺視での色相の変化は、これまでの研究から、赤緑あるいは黄青のペアがそれぞれ同様の変化をするという 2 つの反対色チャネルの違いによって説明できるはずである。しかしながら、実際は色相象限に依存した色相の変化、および別の原因によると思われる色み成分の被験者に依存して大きく異なる波長特性が生じている。しかし、周辺視野位置として耳側 30° だけしか調べていないことから、他の視野位置ではどうかといった問題もある。これらの原因追究は今後の課題であるが、色の受容野サイズが周辺視野位置で中心窓よりも大きく、そのサイズが色相象限で変化するためではないかとも考えられる。Abramov ら⁵⁾ や市川ら¹⁰⁾ はユニーク緑の受容野が一番大きいことを示している。しかしながら、彼らの暗順応時や背景暗黒および低い明所視レベルの特性とは異なり、桿体が飽和するほどの周辺背景光に順応しているときには色の受容野はかなりの離心角まで 2° よりも小さくなっていると予想される。したがって、異なる順応レベルにおける周辺視野での受容野特性の刺激の色相への依存性について、さらなる検討が必要である。

4. まとめ

明順応時の中心窓に対する耳側 30° 周辺視野における色の見えの色相の変化は、高彩度のほぼユニークな色光について小さく、高彩度の均衡色光について相対的に大きい特性を示し、またその色相変化の方向は見えの反対色座標上の色相象限と被験者に依存することを示した。この特性は従来いわれている赤緑反対色チャネルの劣化による 2 色性だけでは説明ができなかった。このユニーク色成分の割合（色相）の変化に曲線フィッティングを

試み、べき乗関数がある程度適合することを示した。一方、波長対彩度関数は被験者で大きく異なっていた。

文 献

- 1) J. D. Moreland and A. C. Cruz: "Color perception with the peripheral retina," *Opt. Acta*, **6** (1958) 117-151.
- 2) 関口修利, 池田光男: "色の見えに基づく色視野の測定", 日本眼光学学会誌, **4** (1983) 122-127.
- 3) 高瀬正典, 内川恵二: "明順応周辺網膜における色光の見え", 光学, **20** (1991) 521-529.
- 4) B. Stabell and U. Stabell: "Bezold-Brücke phenomenon of the far peripheral retina," *Vision Res.*, **22** (1982) 845-849.
- 5) I. Abramov, J. Gordon and H. Chan: "Color appearance across the retina: Effects of a white surround," *J. Opt. Soc. Am. A*, **9** (1992) 195-202.
- 6) I. Abramov, J. Gordon and H. Chan: "Color appearance in the peripheral retina: Effects of stimulus size," *J. Opt. Soc. Am. A*, **8** (1991) 404-414.
- 7) J. Gordon and I. Abramov: "Color vision in the peripheral retina. II. Hue and saturation," *J. Opt. Soc. Am.*, **67** (1977) 202-207.
- 8) V. C. Greenstein and D. C. Hood: "Variations in brightness at two retinal locations," *Vision Res.*, **21** (1981) 885-891.
- 9) 高瀬正典, 阿山みよし, 池田光男: "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", 光学, **20** (1991) 420-429.
- 10) 市川智治, 池田光男, 内川恵二: "網膜周辺における色の受容野の大きさ", 光学, **15** (1986) 407-413.