

資料

色弁別視野の測定*

内川 弘美**

Color-Discrimination Perimetry

Hiromi Uchikawa

Tokyo Institute of Technology

Abstract

Color discrimination perimetry was performed using Munsell color chips to determine how far from the fovea specific color differences would be just noticeably different. The results show that color discrimination limits were larger in the red to purple and the blue to green regions of the color circle than in the purple to blue, the green to yellow and the yellow to red regions. Achromatic color discrimination limits went further into the periphery than did chromatic limits. We also performed color naming experiments at the fovea and in the periphery (30° nasal). Our results are reasonably well accounted for by the deuteranopic tendencies in the periphery of the retina.

要 旨

色弁別視野の測定をマンセル色票を用いて行ない、中心窩からどのくらい離れたところまで、ある2色が弁別できるかを求めた。結果では、赤—紫領域及び青—緑領域にある2色で決まる色弁別限界の方が、紫—青、緑—黄、黄—赤の各領域にある2色のものより大きくなった。アクロマティックの色弁別限界は、クロマティックのものより大きく広がった。また、カラーネーミングの実験を中心窩と網膜周辺部（鼻側 30°）で行なった。本研究で得られた結果は、網膜周辺部での二色型第二色覚異常者の特性により説明される。

1. はじめに

人間の色覚は網膜の周辺部にいくにつれて、しだいに劣化していくことが知られている。その劣化の程度は、刺激として用いる色によって異なる。いわゆる“カラーゾーン (color zone)”として知られている網膜周辺部での色覚の限界を求めた研究では、緑色の色覚限界が、赤、黄、青の各色よりも小さいことが示されている^{1)~5)}。

カラーネーミング^{6)~8)}や、カラーマッチング⁹⁾といった色の見えに関する研究でも、網膜周辺部での色覚について明らかにされている。それらの研究では、網膜周辺部で、赤色及び特に緑色の感覚が、黄色や青色の感覚よりも早く劣化し、網膜周辺部が二色型第二色覚異常者の特性を持つことを示している。また、網膜周辺部での波

長弁別実験¹⁰⁾¹¹⁾でも同様のことが示されている。しかしながら以上の研究^{6)~11)}は、網膜のある特定の数点で各実験を行っており、網膜全体での特性を示したものではない。

我々の日常生活においては、単なる色の検出よりも、色の弁別の方がより一般的に行なわれていると考えられるが、網膜周辺部での色弁別に関する研究は極めて少ない¹²⁾¹³⁾。中心窩では容易に弁別できる2色でも、周辺部では色覚の劣化に伴い弁別できなくなるであろう。そのため、ある特定の色差を持った2色を弁別できる限界が網膜周辺部に存在するはずである。それを、ここでは色弁別限界とした。本研究では、一定の刺激視野サイズを用い、様々な2色の色弁別限界を求めることにより、網膜周辺部全体での色弁別能の特性を明らかにした。

2. 方法

2.1 刺激

* この資料は、昭和59年に日本色彩学会第1回色彩学論文賞を受賞した以下の論文を要約したものである。 H. Uchikawa, P. K. Kaiser & K. Uchikawa, Color-Discrimination Perimetry, Color Res. Appl. 7, 264-272(1982)。なお、本研究はカナダ・ヨーク大学において行なわれた。

** 東京工業大学

実験 I では刺激として、バリュー 6, クロマ 8 ($V/C=6/8$) のマンセル色票を用いた。Fig. 1 に示すように、テスト刺激としては、ヒュー (H) が 5R, 5Y, 5G, 5B, 5P のものを用いた。比較刺激には、各テスト刺激からカラーサークルにそってマンセルヒューステップで、それぞれ 2.5, 5, 10, 15 異なるもの、片側 4 個、計 8 個用いた。

実験 II では、バリュー 6 のマンセル N (無彩色) 色票をテスト刺激として用いた。比較刺激としては、明暗両側へ 0.5 バリューステップで 4 個ずつ、計 8 個の N 色票を用いた。

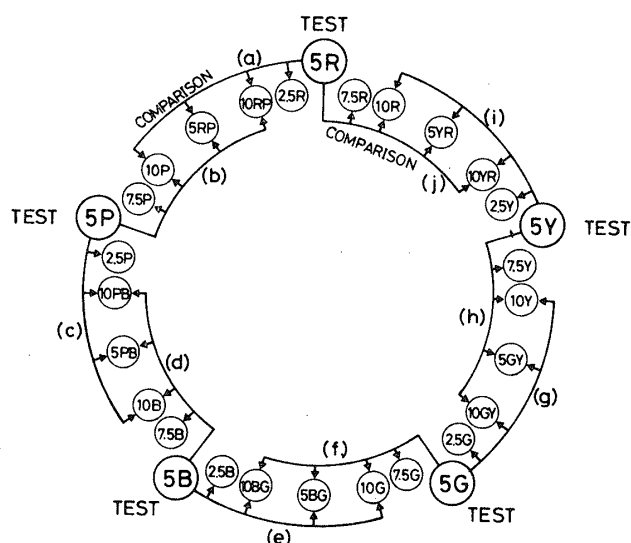


Fig. 1 実験 I に使用したテスト刺激と比較刺激のヒュー (H) の組合せ。刺激のバリュー (V) とクロマ (C) : $V/C=6/8$ 。

2.2 装置

実験装置を Fig. 2 に示す。Fig. 2(a) は、灰色の周辺順応視野 (視角 $105^\circ \times 105^\circ$) を示す。この順応視野上には、21 個の固視点のついた回転棒があり、これを回転させ、16 の方向に各々固定することで固視点の方向を決定している。固視点は、発光ダイオードを用い、中心から周辺に向かって視角 2.5° 間隔でつけてある。順応視野の中心には穴が開けてあり、その穴を通して刺激が呈示される。

Fig. 2(b) に示すように、刺激視野は視角 3.9° の上下の二分視野で、テスト刺激が上側に、比較刺激が下側に呈示される。上下の視野間には、視野 0.5° のマンセル N6 色票で作られたギャップがある。ただし、このギャップは実験 II では取り除かれた。

装置全体を、Fig. 2(c) に示す。順応視野 AF は、2 本の蛍光灯 L_1 , L_2 で照明される。順応視野の (x, y) 色度は、 $x=0.315$, $y=0.333$, 輝度は $51 \pm 9 \text{ cd/m}^2$ である。刺激視野は、小型蛍光灯 L_3 , L_4 で均一に照明され N6 色票を置いた場合、色度は $x=0.332$, $y=$

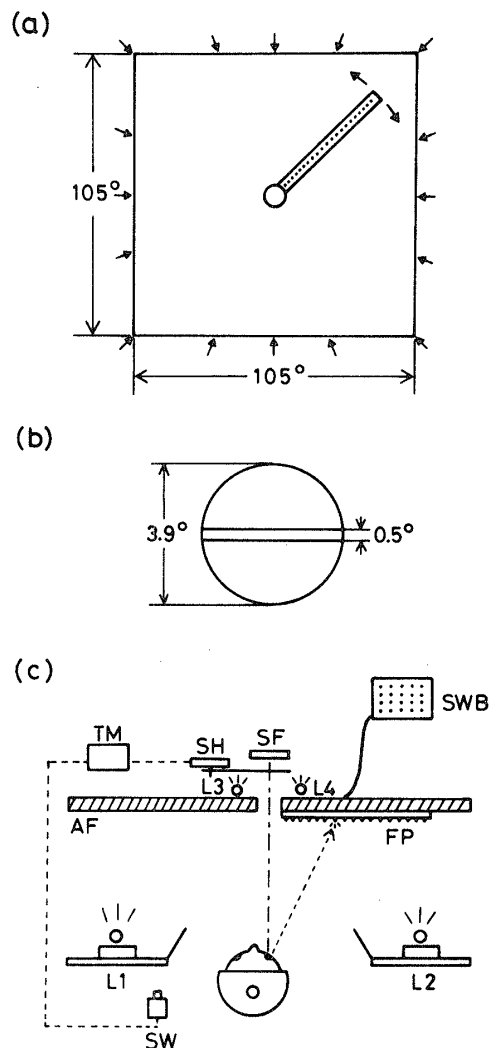


Fig. 2 (a) 灰色の周辺順応視野。21 個の固視点のついた棒が回転し、16 方向のうち 1 方向に固定される。
(b) 刺激視野。テスト刺激は上側に、比較刺激は下側に呈示される。中央のギャップはマンセル N6 色票で作られている。
(c) 装置全体の概略図。詳細は本文参照。

0.338 となり、CIE の C 光源に近い色度となった。

ソレノイドシャッター SH により、刺激は 500 msec 間呈示される。シャッターの羽には、N6 色票がはられてあり、刺激が呈示されていない時には、刺激視野に N6 色票が呈示される。スイッチボックス SWB により、任意の固視点を一つだけ点灯することができる。被験者の頭部はヘルメットにより固定され、実験の際、被験者は右眼だけを使用した。

2.3 被験者

色覚正常者 2 名、KU (男 29 才), HU (女 28 才) を被験者としてすべての実験を通して採用した。

2.4 手続き

実験 I, II とも極限法を用いて, ある色差をもつテスト刺激と比較刺激が中心窩からどのくらい離れた網膜周辺部の位置まで弁別できるか, その色弁別限界を求めた。1 試行は次のような手続きで行なわれた。まず, 実験者はテスト刺激と比較刺激の色差が検出できないと思われる十分離れた網膜周辺部に刺激を呈示するように, 初めの固視点を選ぶ。被験者は, 固視点を固視して手元のスイッチを押し, 刺激の呈示を行なう。被験者は, 2 色の差が認められない場合は, “わからない” と答える。次に, 実験者は固視点を 1 ステップ中心窩に近づける。以上を繰返していき, 被験者がテスト刺激と比較刺激の色の差が知覚できたら, それを答える。たとえば, テスト

刺激が 5R, 比較刺激が 10YR の場合, 被験者が, “上側が赤, 下側が黄色味を含んだ赤” と応答した場合には, 被験者が正しく 2 色を弁別できたと判断した。刺激の呈示は, 正答が 2 回続けて得られるまで, 固視点を中心窩に近づけながら行なわれ, 2 回の正答のうち, はじめの正答の位置をこの試行での色弁別限界とした。

実験 I は 20 セッションからなり, 1 セッション内では 1 つのテスト刺激を用い, そのテスト刺激に対して 8 個の比較刺激のうち片側 2 個ずつ, 計 4 個を選んだ。テスト刺激と比較刺激の 4 つの組合せに対して, 各方向でそれぞれ 3 回ずつ試行がランダムに行なわれた。1 セッション内では, 固視点の方向はランダムに選ばれた。各テスト比較に対して実験は 4 セッション行なわれ, 1 つの

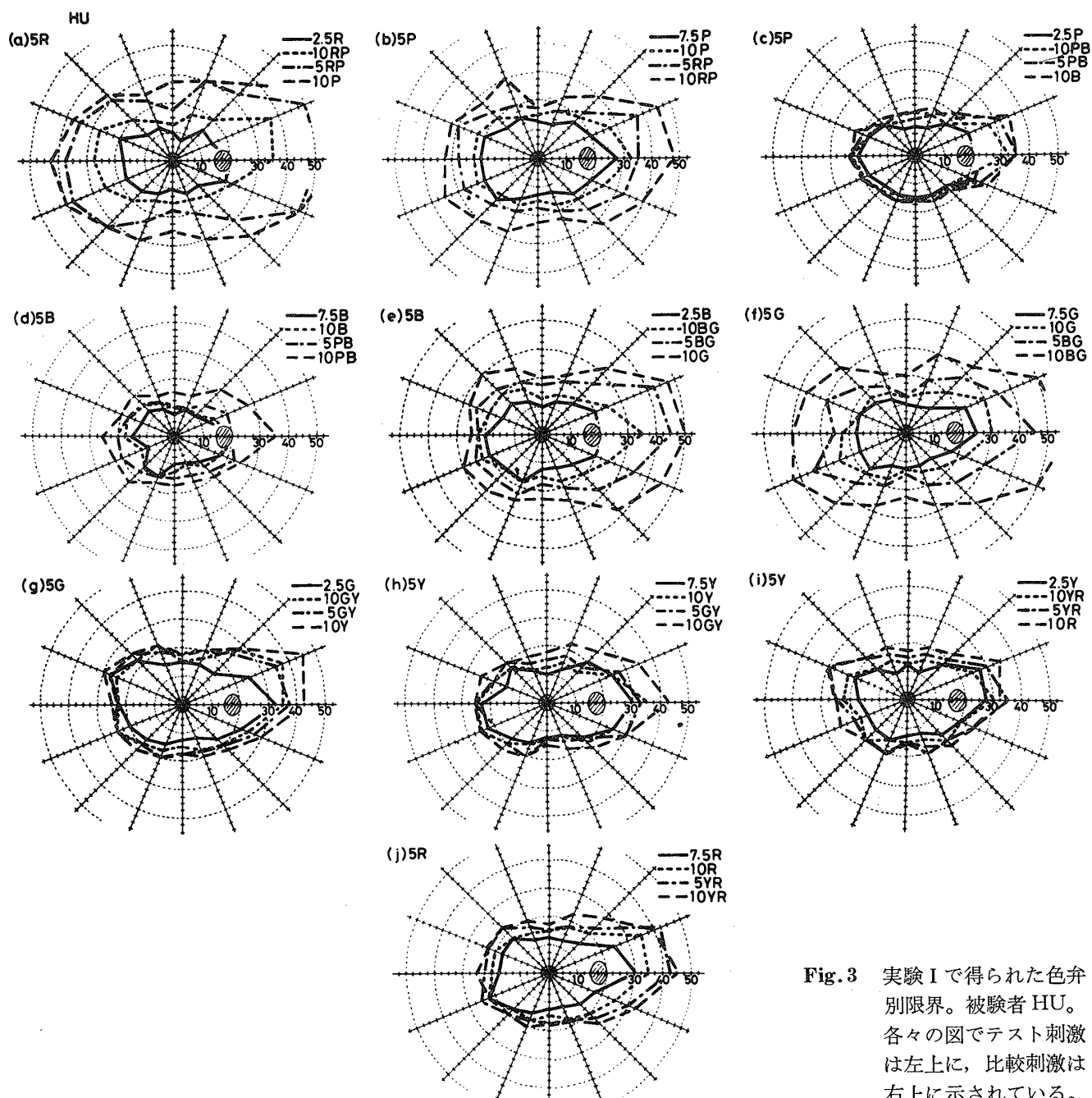


Fig. 3 実験 I で得られた色弁別限界。被験者 HU。各々の図でテスト刺激は左上に, 比較刺激は右上に示されている。

テスト刺激と比較刺激の組合せに対して6回の試行が全16方向で行なわれた。また、被験者の応答の信頼性を確認するために、テスト刺激と同一の色票からなる偽の比較刺激をセッション内で2~3回呈示した。

実験Ⅱでは、N色票を用いた。手続きは実験Ⅰとほぼ同じであるが、実験Ⅱでは、テスト刺激に対し比較刺激8個をすべて同一セッション内で呈示した。実験Ⅱは、2セッションからなり、実験Ⅰと同じく1つのテスト刺激と比較刺激の組合せに対し6回の試行が行なわれた。

さらに、実験結果の理解を深めるために、 0° (中心窩) と鼻側 30° でカラーネーミングの実験を行なったが、この手続きは後述する。

3. 結果と考察

3.1 色弁別限界

実験Ⅰの結果を Fig. 3, Fig. 4 に被験者別に示す。図中、(a)~(j) は図1の (a)~(j) に対応している。すなわち、各 (a)~(j) には、1つのテスト刺激に対する片側4個の比較刺激との色弁別限界が示されている。1つの方向でのそれぞれの限界点は、6回の試行の平均値を示した。限界点の標準偏差は、平均すると HU では 2.06° 、KU では 2.15° となった。Fig. 3, Fig. 4 を見ると、色弁別限界は、水平方向に大きく、特に耳側に大きく広がっている。垂直方向では、HU はほぼ対称、KU は下側にやや大きくなっている。色弁別限界の全体の形状は、これまでに、報告されている色視野の研究結果と類似してい

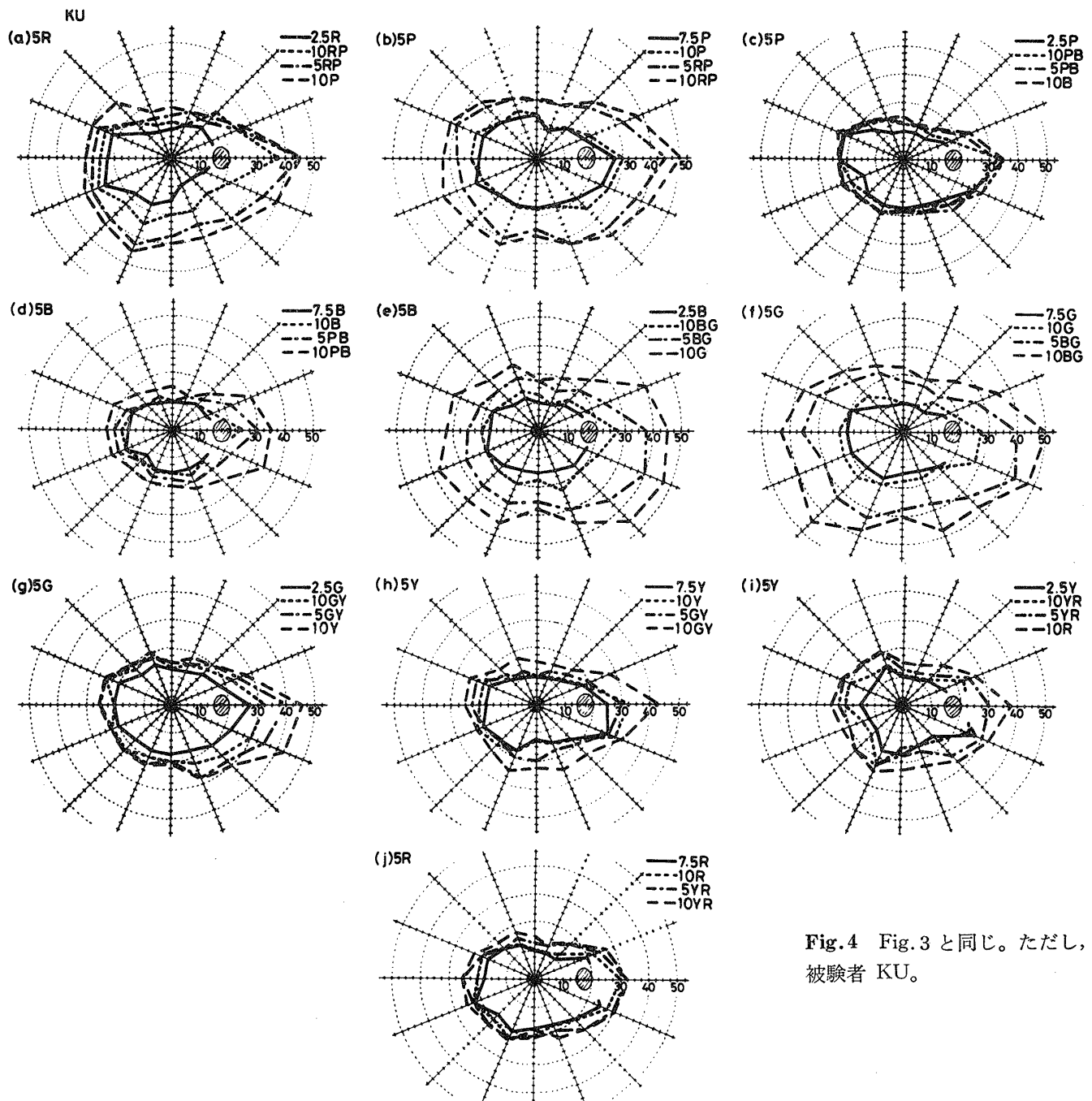


Fig. 4 Fig. 3 と同じ。ただし、被験者 KU。

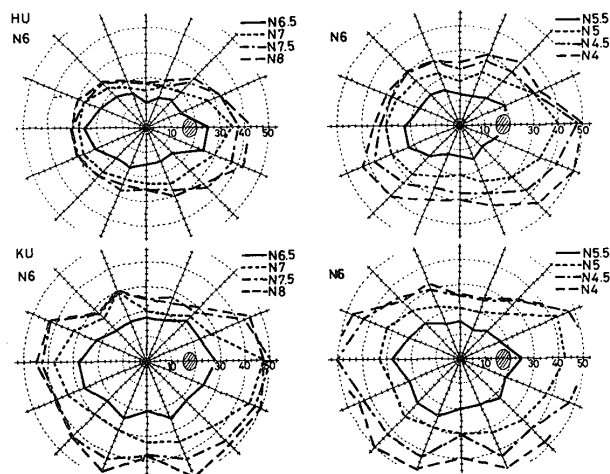


Fig.5 実験Ⅱで得られた色弁別限界。上部は被験者 HU, 下部は被験者 KU。各々のテスト刺激は左上に, 比較刺激は右上に示されている。

る。図中, 実線, 点線, 一点鎖線, 破線は, テスト刺激と比較刺激の色差がそれぞれ 2.5, 5, 10, 15 マンセルヒューステップ異なる場合の色弁別限界である。図から, テスト刺激と比較刺激のマンセルヒューステップの差が大き

くなると, 色弁別限界が広がっていくことがわかる。そして, その広がり方は, テスト刺激と比較刺激の組合せにより違いがあることが認められた。すなわち, Fig. 3, Fig. 4 で両被験者の結果とも, (c)(d)(g)(h)(i)(j)の6つの場合, 色差を広げても, ある一定の網膜部位から先には色弁別限界が広がっていかない。それに対し, (a)(b)(e)(f)の4つの場合には, 色弁別限界が色差の増加とともに網膜周辺部まで大きく広がっていくことが示された。

実験Ⅱの結果を Fig.5 に示す。N 色票の色弁別限界は, テスト刺激と比較刺激の色差(バリュー差)が大きくなると, すべての方向で大きく広がっている。全体の形状は, Fig. 3, Fig. 4 の結果と類似しているが, 水平方向でより対称に近い形になっている。

3.2 網膜位置の関数としての知覚最小色差

ここでは, テスト刺激と比較刺激の色差と, その色弁別限界との関係をより明確にするために, Fig. 3, Fig. 4 の結果を次のように表わし, その一部を図6に示した。テスト刺激と比較刺激を CIE 1976 $L^*a^*b^*$ 空間上に表わし, 色差 ΔE_{ab}^* を計算した¹⁴⁾。Fig. 6 では, 縦軸が色差 ΔE_{ab}^* , 横軸は網膜位置を中心窩からの距離として表わしており, 各々の曲線は, ある網膜位置で知覚できる最

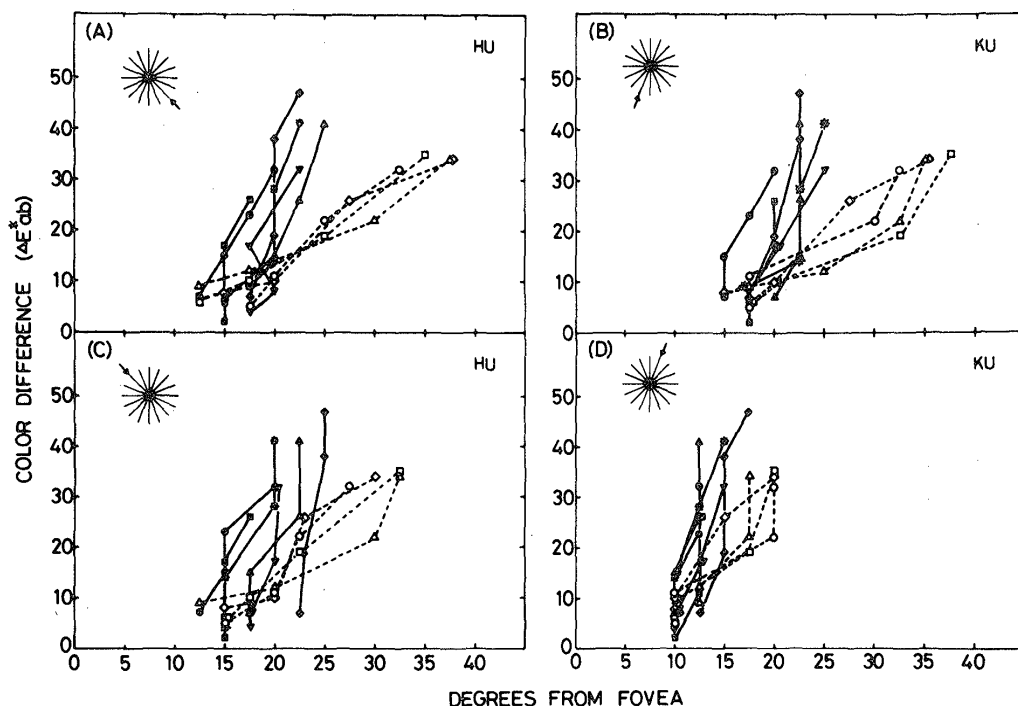


Fig. 6 網膜位置の関数としての知覚最小色差。(A), (C): 被験者 HU, (B), (D): 被験者 KU。方向は各々の図の中に示してある。各シンボルは図の下部に示されているテスト刺激と比較刺激の色の組合せにそれぞれ対応している。

小の色差を表わしている知覚最小色差関数である。中心からの方向は図の中に示してある。

Fig. 6 で明らかなように、破線で示した 4 本の曲線は、実線で表わした 6 本の曲線に比べて増加の傾きがゆるやかであり、それらは中心窩からより離れた網膜位置で、小さな色差の 2 色の弁別が可能であることを示している。このように、実線で示した色の組合せと、破線で示した色の組合せでは、網膜周辺部で、色差の検出が異なった特性を持っていることが明らかとなった。この傾向は、Fig. 6 で示した以外のすべての方向で見られた。

3.3 カラーネーミング実験

実験 I の結果の理解を助けるために、パリュール 6、クロマ 8 のマンセル色票を、2.5 ヒューステップで 40 色選

び、それを用いてカラーネーミングの実験を行なった。それらの色票には実験 I で使用したマンセル色票もすべて含まれている。刺激の呈示位置は、0° と鼻側 30° を選んだ。カラーネーミングの方法は、Boynton ら⁹⁾の方法を用いた。被験者は呈示された刺激に対し、赤、黄、緑、青の 4 色名の中から、1 つ又は 2 つを選び答えた。ただし、どの色も知覚できなかった場合には、“無彩色”と答えた。

0° と鼻側 30° の結果をそれぞれ Fig. 7, Fig. 8 に示す。テスト刺激のヒューを円周に沿って、また各ヒューに対するカラーネーミングの点数を放射線方向に示してある。さらに、各ユニーク色の位置を破線で示した。それぞれのユニーク色の位置は、ユニーク黄、青の場合は、赤と緑の応答が 0 になる点、ユニーク赤、緑の場合

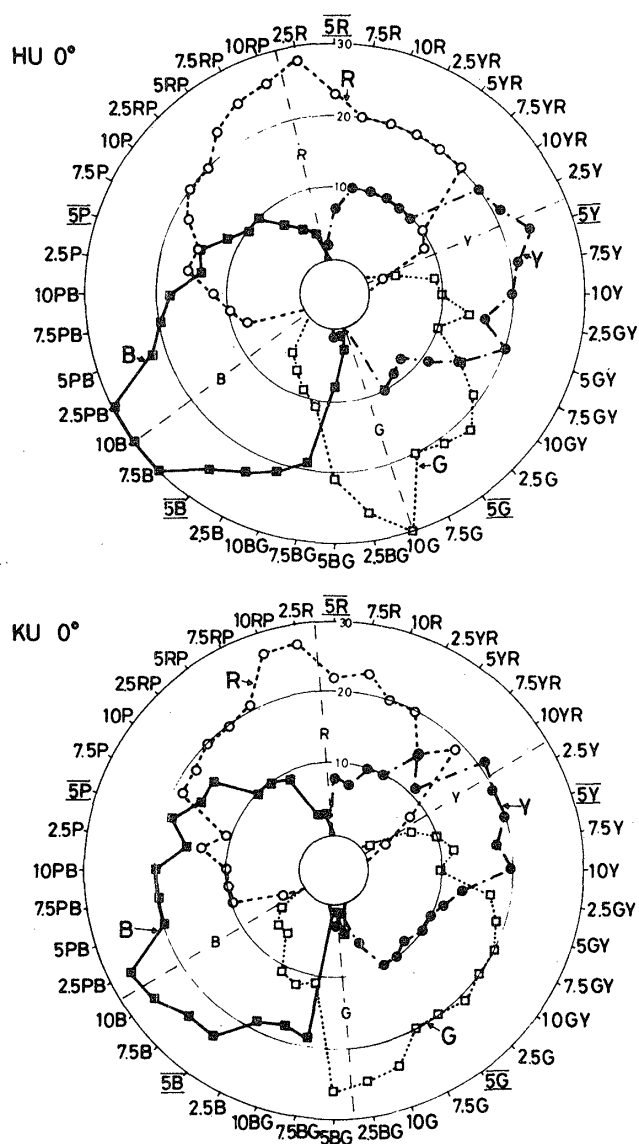


Fig. 7 中心窩 (0°) でのカラーネーミングの得点。得点は中心の円からの距離で表わされている。刺激のヒューは円周に沿って示されている。上部：被験者 HU，下部：被験者 KU。

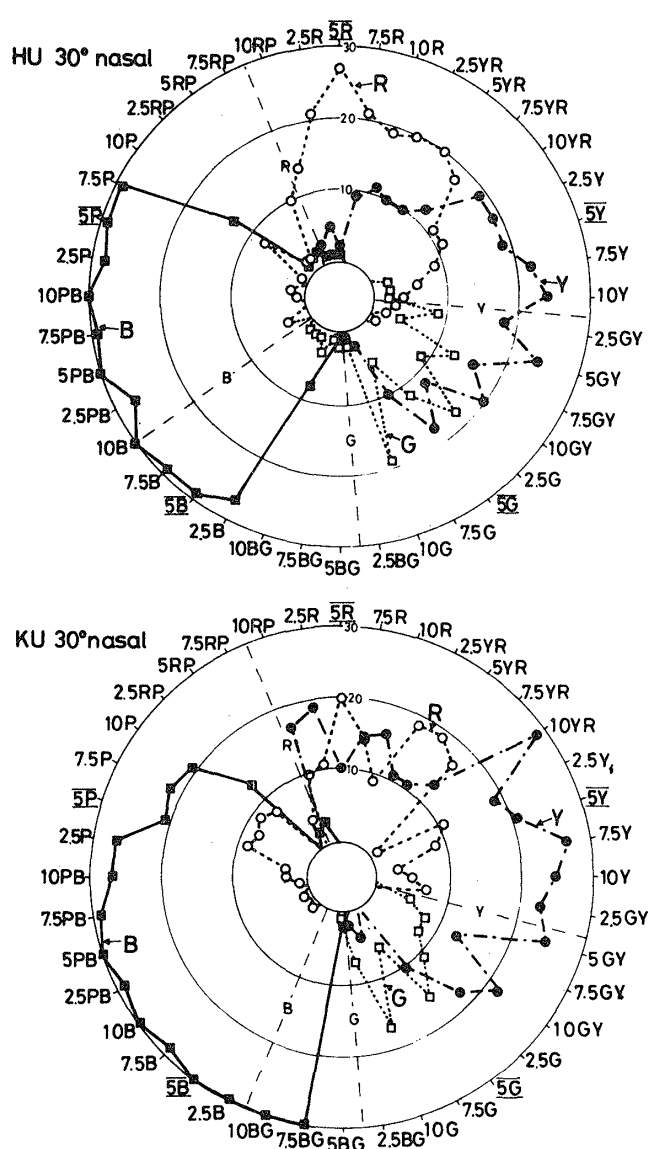


Fig. 8 Fig. 7 と同じ。ただし、網膜周辺鼻側 30° の結果。

は、黄と青の応答が0になる点とした。ただし、赤と緑の応答が0になる点がない場合は、両応答曲線が交わった点、0になる点が多い場合はその範囲の中間点とした。黄と青の場合も同様である。Fig.7では、赤、黄、緑、青の各色がほぼ均等に知覚されているのに対し、Fig.8では、赤色と特に緑色の応答が少なくなり、青色と黄色の応答が増加している。すなわち、網膜周辺部では緑色が非常に見えにくくなっていることになる。

Fig.7, Fig.8を比較すると、網膜周辺部では、5Rと5P、5Bと5Gの間で色の見えが急激に変化することがわかる。実験Iでは、テスト刺激と比較刺激の組合せが、5Rと5Pの間、5Bと5Gの間にある場合(Fig.3, Fig.4中の(a)(b)(e)(f))に、色弁別限界が大きく広がることが示されたが、この領域は、今示したカラーネーミングの結果で、網膜周辺部での色の見えの変化が大きい領域と一致している。さらに、カラーネーミングの結果によると網膜周辺部では、5Pと5Bの間では色の見えの変化が小さいが、同領域で色弁別限界の広がりも小さいことが示されている。

次にユニーク赤及びユニーク緑の位置に注目してみると、網膜周辺部30°では、両被験者ともユニーク赤が、7.5RPと10RPの間にあり、ユニーク緑が2.5BGと5BGの間にあり。色弁別限界を求めた実験の中で、テスト刺激と比較刺激がこのユニーク赤とユニーク緑をばさんで両側にある場合に、網膜周辺部でも高い色弁別能を示している。ユニーク赤、ユニーク緑の位置は、色の見えが黄から青、あるいは青から黄に移る位置であり、その両側に弁別すべき2色がある場合、黄味と青味の弁別が行なわれることになる。従って、網膜周辺部でも、黄味と青味の弁別能は劣化しないことが明らかになった。

Fig.8では、5RPと5BGがほとんど白色に見えることがわかる。この両色票の色度を結んだ直線は、二色型第二色覚異常者の混同色線¹⁵⁾と極めてよく一致し、網

膜周辺部での色の見えが二色型第二色覚異常者と似た傾向を示すことを裏付けている。

3.4 3つのタイプの知覚最小色差関数

Fig.9に実験IIの結果からN色票の知覚最小色差関数をプロットした。この場合も色差は ΔE_{ab}^* で計算した。Fig.9をFig.6と比較すると、Fig.9の曲線はFig.6の場合よりもゆるやかに増加し、無彩色刺激の弁別能が網膜周辺部でもかなり高いことを示している。

Fig.6で示した知覚最小色差関数の2つのタイプと、Fig.9のタイプをまとめて模式的に表わしたのがFig.10である。実線は、赤味と緑味で弁別が行なわれる2色に対する関数、破線は、黄味と青味で弁別が行なわれる2色に対する関数を表わす。点線は、黒白の弁別の場合である。このような3つのタイプの関数を持つことは、網膜周辺部で二色型第二色覚異常者の特性があること、すなわち青味と黄味に比べて、赤味と緑味の知覚が劣化し、両者の弁別が極めて困難になることを示している。縦軸の ΔE_{ab}^* の絶対値は、網膜の方向により変化するが、

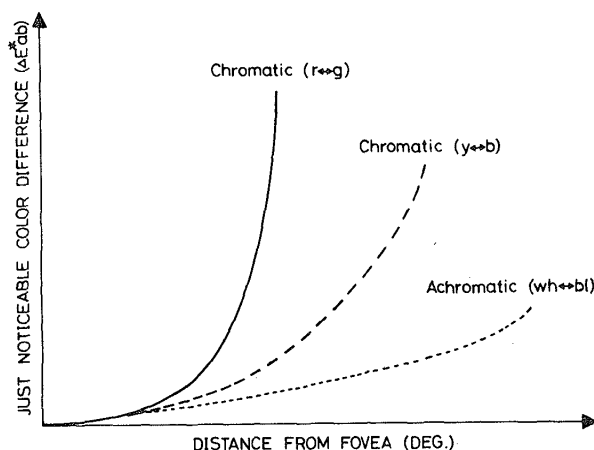


Fig.10 3つのタイプの知覚最小色差関数。

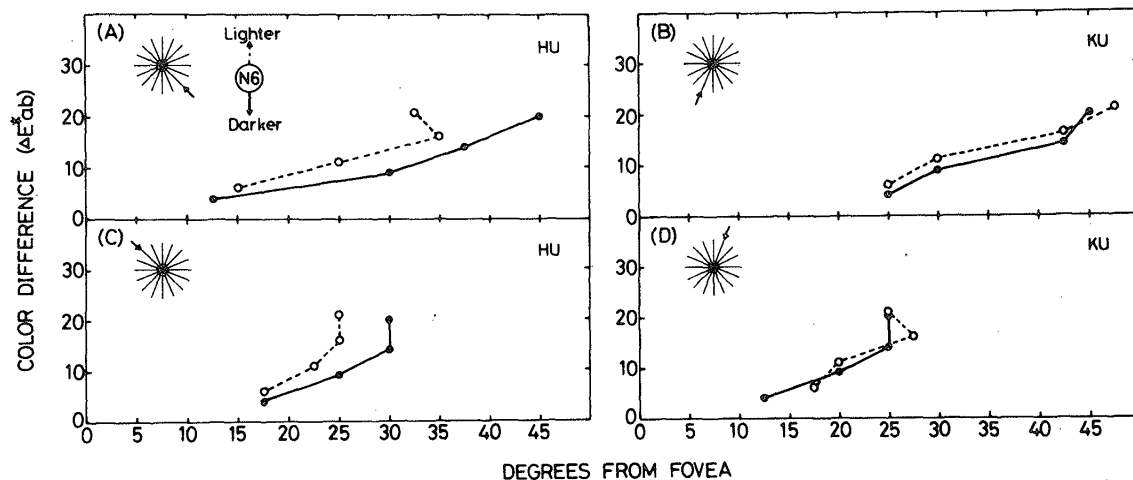


Fig.9 網膜位置の関数としての知覚最小色差。テスト刺激は N6。(A), (C): 被験者 HU, (B), (D): 被験者 KU。方向は各々の図の中に示してある。

この3つの曲線の関係は、すべての方向で保たれた。

参考文献

1. C. E. Ferree and G. Rand, Chromatic thresholds of sensation from center to periphery of the retina and their bearing on color theory, Part I, *Psychol. Rev.* **26**, 16-41 (1919).
2. C. E. Ferree and G. Rand, Effect of brightness of preexposure and surrounding field on breadth and shape of the color fields for stimuli of different sizes, *Am. J. Ophthalm.* **7**, 843-850 (1924).
3. H. A. Wentworth, A quantitative study of achromatic and chromatic sensitivity from center to periphery of the visual field, *Psych. Monographs XL*, Whole no. 183 (1930).
4. P. A. Kelsey and I. Schwartz, Nature of the limit of the color zone in periphery, *J. Opt. Soc. Am.* **49**, 764-769 (1959).
5. M. M. Connors and P. A. Kelsey, Shape of the red and green color zone gradients, *J. Opt. Soc. Am.* **51**, 874-877 (1961).
6. R. M. Boynton, W. Schafer and M. L. Neun, Hue-wavelength relation measured by color naming method for three retinal locations, *Science* **146**, 666-668 (1964).
7. J. Gordon and I. Abramov, Color vision in the peripheral retina. II. Hue and saturation, *J. Opt. Soc. Am.* **67**, 202-207 (1977).
8. D. O. Weitzman and J. A. S. Kinney, Effect of stimulus size, duration, and retina location upon the appearance of color, *J. Opt. Soc. Am.* **59**, 640-643 (1969).
9. J. D. Moreland and A. C. Cruz, Color perception with the peripheral retina, *Opt. Acta* **6**, 117-151 (1958).
10. R. A. Weale, Spectral sensitivity and wavelength discrimination of the peripheral retina, *J. Physiol.* **119**, 170-190 (1953).
11. U. Stabell and B. Stabell, Wavelength discrimination of peripheral cones and its change with rod intrusion, *Vision Res.* **17**, 423-426 (1977).
12. M. Ikeda and H. Uchikawa, Functional visual fields for detecting a colored target, *Acta Chromatica* **3**, 141-146 (1977).
13. M. Ikeda, H. Uchikawa and M. Ayama, The influence of the luminance level upon the functional visual field for detecting a colored target, *J. Light & Vis. Env.* **4**, 18-21 (1980).
14. A. R. Robertson, The CIE 1976 color-difference formulae, *Color Res. Appl.* **2**, 7-11 (1977).
15. D. B. Judd and G. Wyszecki, *Color in business, science and industry*, Wiley, New York, 1975.

(受付 昭和60年3月15日)



うちかわ ひろみ
内川 弘美

昭和50年日本女子大学卒業、同年4月より55年3月まで日本女子大学物理学教室助手
55年5月より57年7月までカナダ・ヨーク大学研究員、60年4月より東京工業大学研究生 視覚の心理物理学の研究に従事。