

明順応周辺網膜における色光の見え

高瀬 正典 内川 恵二

研究

明順応周辺網膜における色光の見え

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

(1991年3月13日受付, 1991年5月23日受理)

Appearance of Colored Lights in the Light-Adapted Peripheral Retina

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

(Received March 13, 1991; Accepted May 23, 1991)

Appearance of four spectral lights near the unique-hues were measured with a color naming method as a function of eccentricity up to 70° across the horizontal and vertical meridians in the light-adapted retinae of 10 subjects. The colored lights, which were matched to a reference of 250 cd/m^2 in brightness at the fovea, were presented in a 2° aperture with a white surround of 120 cd/m^2 . The surround was of a half spherical shape. The results show that the colored lights do not desaturate at periphery as much as the previous results obtained in the dark-adapted condition. Chromatic components-vs-eccentricity functions, normalized at the fovea, were turned out to be of the same shape for four test colored lights.

1. はじめに

周辺網膜における色の見えについては、これまでの多くの研究から、刺激呈示の離心角 (eccentricity) の増加とともに彩度が急激に低下し、色相も変化することが知られている^{1,2)}。この特徴を色み (chromaticness) が知覚できる網膜領域である色視野として表すと、反対色対で同じ様相を示し、赤緑が狭く、黄青が広いという色視野の特性が報告されている³⁻⁶⁾。しかし、われわれの日常生活の経験ではこれまで言われているほどの急激な彩度の低下や顕著な色相の変化はないように思える。この違いについて考えられることは、従来の研究における実験条件では、テスト刺激を暗順応時の網膜に背景暗黒の条件で短時間呈示していることである。日常の視環境においては明順応レベルの明るい背景刺激が存在している場合が多い。また、従来の研究では、テスト刺激を明所視レベルで呈示するといっても、明るい昼間の視環境に比

べれば、低いレベルである。これらの実験条件と日常の視環境条件の違いを見ると、周辺網膜での色の見えに対して、桿体の影響と、背景刺激の有無が大きな要因となっていると考えられる。

まず、桿体の影響について調べた研究には Stabell ら⁷⁻⁹⁾の実験がある。Stabell ら⁷⁾は、傍中心窩で暗順応過程における色の見えを cone plateau レベルより 2 log ユニット高いテストスペクトル光について調べ、桿体は cone plateau 期間中には機能しないがそれ以降では色の見えに大きな影響を及ぼし、彩度の低下と色相の黄青への変化が生ずることを示した。しかし、cone plateau 中であってもテスト刺激の輝度が閾レベルではなくそれ以上であれば、桿体の影響が混入する可能性もある。Stabell ら⁸⁾は、とくに桿体の寄与を除くように cone plateau 中の色の見えをその閾上 2.5 log ユニットのスペクトル光について測定したが、暗順応条件と同様な結果を得ている。この結果は、彼らも指摘している

テスト色光を固視して(5)~(11)の手順を繰り返した。1セッションに要する時間は2時間から2時間30分であった。

3. 実験結果

一条件5回の繰り返し測定の結果から、白みと黒み、各ユニーク色成分値と明るさの評価値の平均と標準偏差を計算した。その一例を Fig. 2 (A), (B) に示す。この例は、データ点のばらつきがもっとも大きい例として選んだ。Fig. 2 (A) は、被験者 MS の 505 nm 単色光に対する 0° 方位と 180° 方位におけるカラーネーミング結果、Fig. 2 (B) は明るさ評価の結果である。図の横軸は離心角で、右側の 0° 方位 (視野耳側) を正、左側の 180° 方位 (視野鼻側) を負にとってある。図の縦軸は、(A) が色光の見えの成分値で、(B) が明るさの評価値である。Fig. 2 (A) の平均値のプロット点のうち、一番上の折れ線は 10 点から黒み成分を差し引いた値を表しており、中の破線は色み成分値を表し、そして一番下の折れ線はユニーク緑成分値を表している。すなわち、

Fig. 2 (A) は合計 10 点を上から、10 点と上の折れ線の間では黒み成分、上の折れ線と中の破線の間では白み成分、中の破線と下の折れ線の間では第 2 の色相の黄成分、および下の折れ線と 0 点の間では第 1 の色相の緑成分に分割して表現している。プロット点に付けた上下の誤差棒は標準偏差 SD である。これらの誤差棒がよく見えるように、一番上のプロット点では左に 1.5°、一番下のプロット点では右に 1.5° 移動させて描いてある。この例を見るだけでも、緑成分の低下が 0° 方位では 180° に比べて顕著ではないことに加えて、離心角 30° あたりまで中心窩より明るく感じていることがわかる。色の見えや明るさが網膜上において不均一であり、かつ中心窩に対して非対称となっている。

10 人の平均値と標準偏差の一例を Fig. 3 (A), (B) に示す。図の表現は Fig. 2 と同じである。SD の大きさは、10 人についての各平均値が相互にどのくらい違っているか、そのばらつきを表す目安となる。Fig. 3 (A) は最も SD が大きかった 576 nm 単色光の 0° と 180° 方位での結果であり、(B) は明るさの評価が最もば

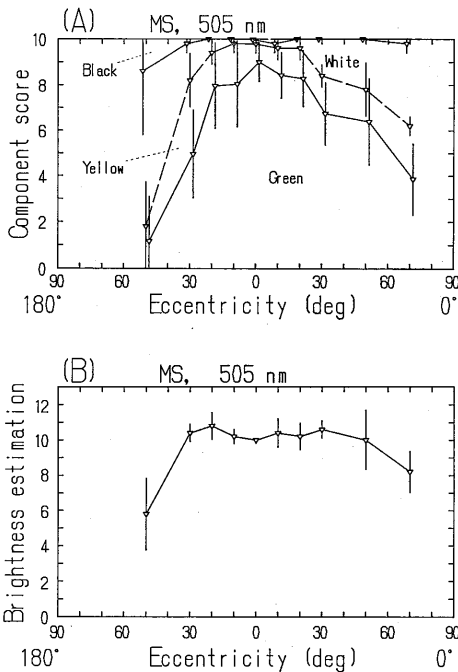


Fig. 2 (A) Component scores of black, white, chromaticness, first and second unique-hues by color naming, and (B) brightness estimation, by the subject MS for the 505 nm test light, as a function of visual eccentricity at the 0° and 180° meridians. Error bar shows standard deviation of 5 data.

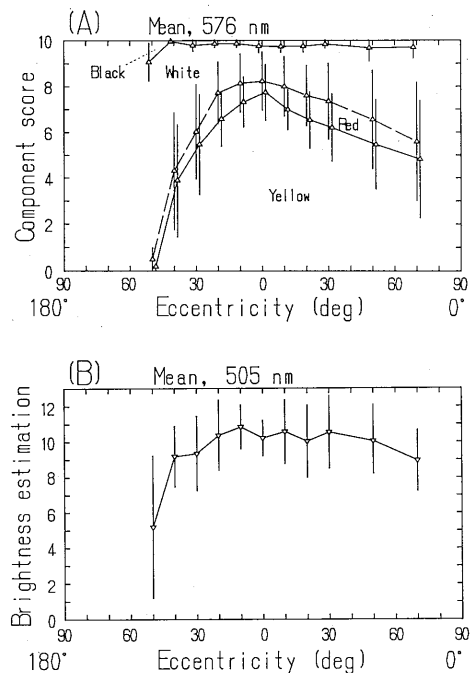


Fig. 3 (A) Mean component scores of black, white, chromaticness, first and second unique-hues by color naming for the 576 nm test light, and (B) brightness estimation, for the 505 nm test light, of 10 subjects as a function of visual eccentricity at the 0° and 180° meridians. Error bar shows standard deviation of 10 means.

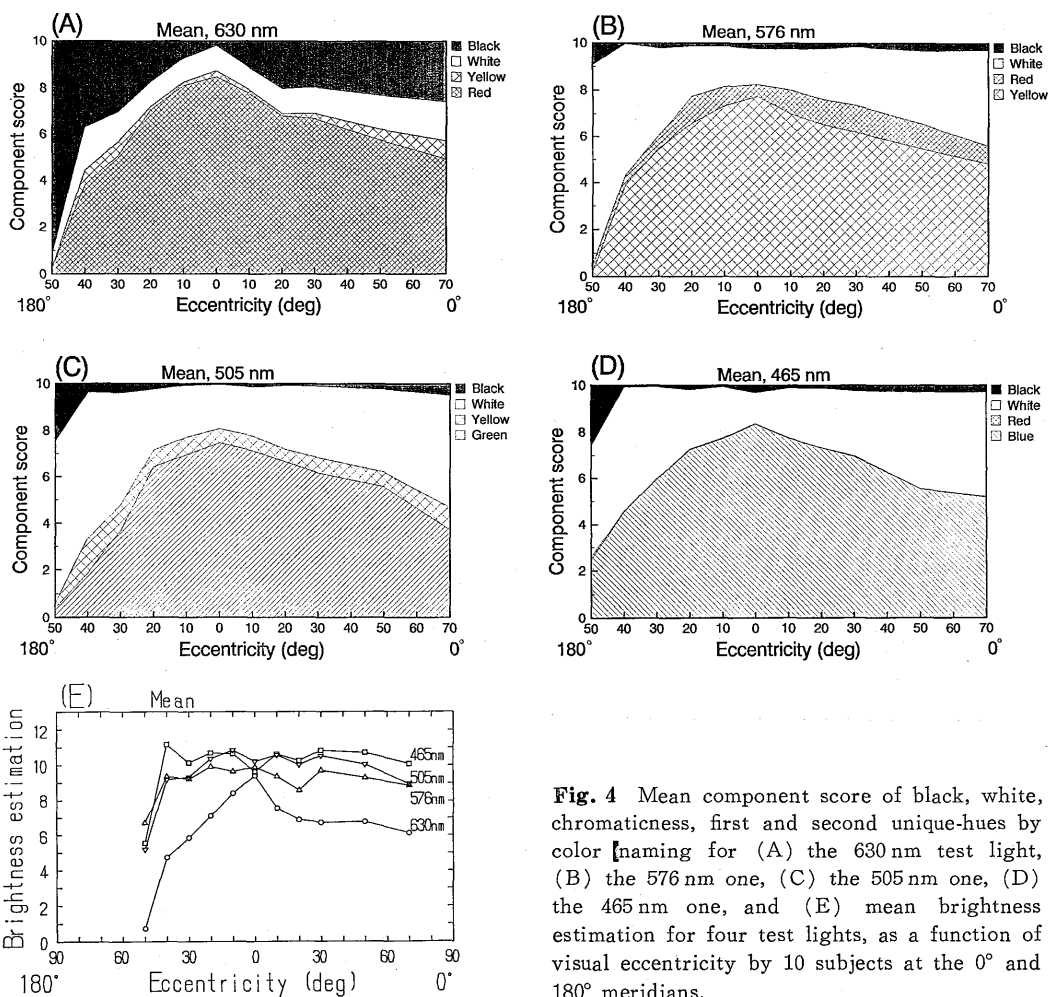


Fig. 4 Mean component score of black, white, chromaticness, first and second unique-hues by color [naming for (A) the 630 nm test light, (B) the 576 nm one, (C) the 505 nm one, (D) the 465 nm one, and (E) mean brightness estimation for four test lights, as a function of visual eccentricity by 10 subjects at the 0° and 180° meridians.

らついた 505 nm 単色光の 0° と 180° 方位の結果である。なお、10 人全ての被験者で応答がとれなかった条件もあり、Fig. 3 (A) の 180° 方位、離心角 40° の点は 7 人の結果の平均値、および同方位、離心角 50° の点は 3 人の結果の平均値である。Fig. 2 (A), (B) と Fig. 3 (A), (B) をそれぞれ比較すると、色光が異なっても折れ線の形状は似ている。しかし、SD の大きさは Fig. 3 の方が大きい。これは個人間の差の方が個人内の差よりも大きいことを意味している。この SD の大きさは、カラーネーミングでは 576 nm, 630 nm, 505 nm および 465 nm 単色光の順で小さくなり、明るさの評価では 505 nm と 465 nm 単色光で大きく、630 nm と 576 nm 単色光で小さかった。

Fig. 2 と Fig. 3 では、測定の一連の繰り返しによるばらつきおよび被験者の個人差によるばらつきのもっとも大きい例を示した。他の被験者および条件についての結果の

ばらつきは同程度もしくはそれ以下であったので、以降の結果は 10 人の平均値のみで示す。

0° 方位と 180° 方位 (左右方位) でのカラーネーミングの結果を Fig. 4 (A)~(D) に、明るさ評価の結果を Fig. 4 (E) に示す。同図 (A)~(D) において、まず明らかなのは、0° 方位と 180° 方位で色の見えが極端に非対称で、しかも各色光の色み成分と第 1 ユニーク色成分についての傾向がほとんど同じであることである。彩度の急激な低下は、180° 方位では離心角 20° あたりから始まっているが、0° 方位では離心角 70° でもなかった。色光による違いとして、630 nm 単色光について黒み成分の誘導が大きかった。

次に、Fig. 4 (E) の明るさの評価は、465 nm と 505 nm 単色光で中心窩より周辺網膜において明るく感じしており、576 nm, 630 nm 単色光の順序で暗くなっている。とくに 630 nm 単色光では明るさ評価の低下と黒み成分

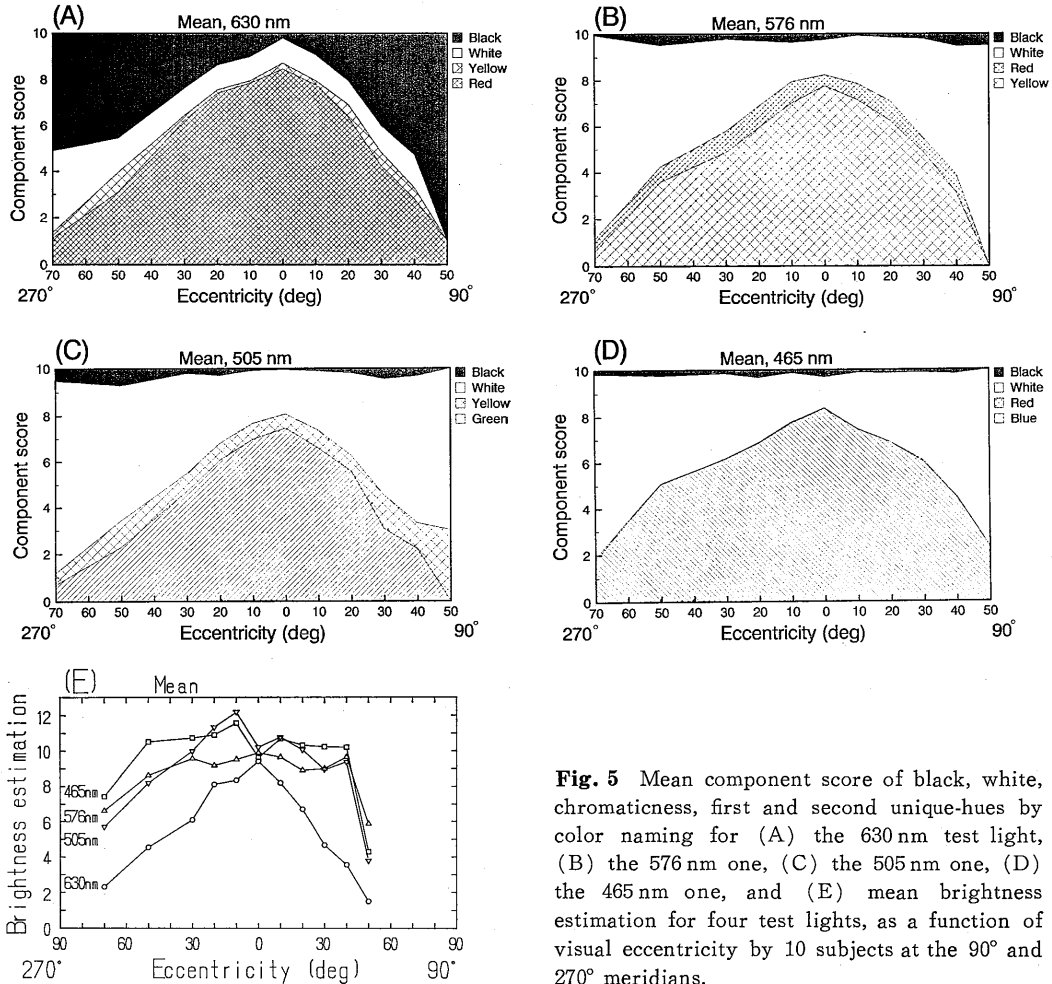


Fig. 5 Mean component score of black, white, chromaticness, first and second unique-hues by color naming for (A) the 630 nm test light, (B) the 576 nm one, (C) the 505 nm one, (D) the 465 nm one, and (E) mean brightness estimation for four test lights, as a function of visual eccentricity by 10 subjects at the 90° and 270° meridians.

の増加がよく一致している。中心窩での明るさの評価が10点からずれているのは、明るさマッチング時と明るさ評価時のセッションの違いによるものと思われる。

90°方位と270°方位(上下方位)でのカラーネーミングの実験結果をFig. 5 (A)~(D)、明るさ評価の結果をFig. 5 (E)に示す。Fig. 5を見ると、色の見えは、中心窩近くの部位での急激な彩度の低下はないが、幾分非対称で、かつFig. 4に比べて見える範囲が狭くなっている。彩度の低下の傾向は、Fig. 4と同様に色光による違いが少ない。また、Fig. 5 (A)の630 nm単色光についての黒みの誘導はFig. 4 (A)と同様に大きかった。Fig. 5 (E)の明るさの評価の色光による違いは左右方位についてのFig. 4 (E)と同じ傾向を示した。

4. 考 察

まず、色み、色相の離心角に対する変化をテスト色光

間で比較する。Fig. 4とFig. 5では各色光の中心窩における彩度が多少異なるので、両図の中の色み成分と第一ユニーク色成分について中心窩の値で正規化した。その結果の色み成分をFig. 6 (A), (B)に、第一ユニーク色成分をFig. 7 (A), (B)に示す。Fig. 6を見ると、正規化した色み成分は左右、上下方位ともに各色光で多少の値の差があるが、個人差の幅を考慮に入れるとすべて同じ一つの特性曲線で表されるといえる。Fig. 7を見ると、正規化した第一ユニーク色成分は、離心角の大きいいくつかの網膜部位において差が生じているが、個人差よりもその差は小さい。それらの部位においてユニーク色成分間で差があり、テスト色光に実際に色相変化が生じてくるかどうかはさらに詳細な検討が必要である。従来の色視野の範囲では、黄、青は広く、赤、緑では狭いという傾向が示されているが、今回得られた特性はこの傾向と明らかに異なり、黄青赤緑についてほ

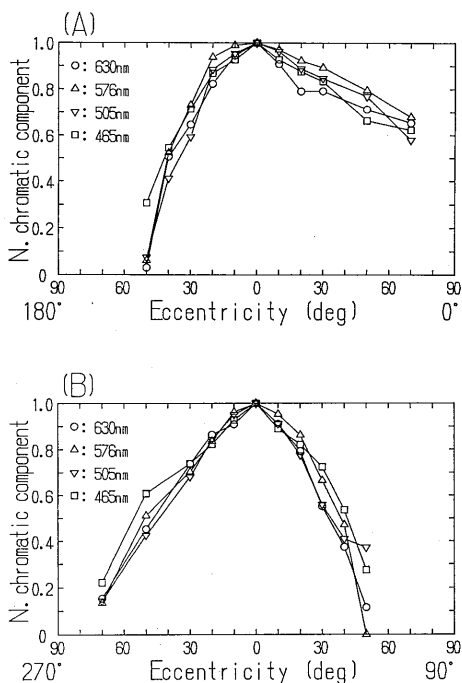


Fig. 6 N. (normalized at the fovea) chromatic component for four test lights as a function of visual eccentricity at (A) the 0° and 180° meridians, and (B) the 90° and 270° ones.

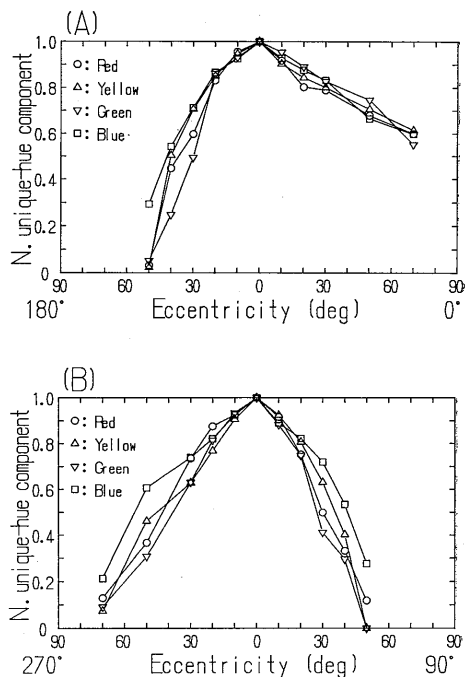


Fig. 7 N. (normalized at the fovea) unique-hue component for four test lights as a function of visual eccentricity at (A) the 0° and 180° meridians, and (B) the 90° and 270° ones.

とんどの特性を示している。また、中心窩に近い部位での急激な彩度の低下もなかった。

以上をまとめると、周辺網膜で色み成分が従来の研究結果ほど劣化しなかった、および各テスト色光の正規化した色み成分間に差がないという二つの結果が得られた。これらの特性は本研究で初めて求めたものであり、従来の研究結果との相違について考察する必要がある。

まず指摘しなければならないのは、前述のように、実験条件が従来の研究と異なっている。すなわち、従来の研究においては、暗黒背景中に明所視レベルの刺激を暗順応した周辺網膜に呈示する方法を用いているのに対し、本研究では、桿体がほぼ飽和するほどの強い背景光に明順応した周辺網膜に、高い明所視レベルのテスト光を呈示している。これらの条件のうち、まず、背景(周辺)光は、Uchikawa ら⁹⁾の色票を用いた色弁別の研究で用いているだけで、他の研究では背景は暗黒である。したがって、背景光は彩度の低下を小さくする点で関与している可能性が強い。

次に、本研究では桿体はほぼ飽和状態にあったと考えられるが、従来の研究ではほとんど暗順応条件を用いて

いるのでかなりの桿体の寄与があったものと考えられる。桿体の寄与がある場合は色みは減少し、色相も変化するという報告があるので、本研究と従来の研究との違いが説明できる。しかし、桿体の出力がなくなったわけではないので、色見えへの何らかの関与があるものと推測される。また、錐体についての明順応条件の色みに及ぼす効果がどのようなものか周辺網膜での研究が少ない¹⁴⁾ために明白でないが、何らかの効果があるものと考えられる。

本研究のテスト光の輝度レベルは、輝度 250 cd/m² (約 1,400 Td に相当)の参照光に明るさマッチングしたものである。このレベルは従来の研究と比べて高い方とはいえ、Gordon ら²⁾の 1,200 Td と同程度である。しかしながら、Stabell らの研究¹⁵⁾では、テスト光の輝度レベルを cone plateau 中でさらに高くし、闕上 3.5 log ユニットまで段階的に変化させると、方位 0° 離心角 70° の色光の見えは、テスト光レベルが低い間は黄青の 2 色性であるが、レベルが高くなるとかなり回復し、中心窩の見えに近づく結果が示されている。本研究の結果は、テスト光のレベルを cone plateau 闕上に換算しておよそ 4 log ユニットであることから、この

Stabell らの結果とはよく一致している。今回のテスト光の輝度は、晴れた昼間の戸外の例えば芝生の値 $1,800 \text{ cd/m}^2$ に比べればまだかなり低い。したがって、より高い輝度のテスト光を用いれば、各ユニーク色間に見られた差異はさらに小さくなるように変化することが期待できる。

一方、明るさの評価において 465 nm と 505 nm 単色光について中心窩より高い評価が得られている。これは、桿体がほぼ飽和していることを仮定すると、中心窩近傍に分布する黄斑色素の効果とも考えられる。しかし、桿体の出力が飽和するといっても閾値が非常に高くなることであって、依然として高いレベルの出力があると考えるのが妥当であろう。さらにそれは、短波長光についての明るさ評価対離心角関数が桿体の分布密度関数に大まかに似ていることから推測される。したがって、明るさへの寄与は黄斑色素とともに桿体の効果も考えられる。

さらに、従来見られなかった特性として、赤のスペクトル光に対する黒み誘導が離心角の増大とともに増加する現象が見られた。他のスペクトル光については離心角の増大とともに白み成分が増加しており、これは従来の研究結果^{1,2)}と一致している。この黒み誘導の現象は、周辺背景光と赤のスペクトル光の間の対比効果と考えられるが、なぜ赤のスペクトル光にだけ顕著に現れるのか明らかでない。しかし、桿体は飽和していても出力があると考えられしかも 630 nm 単色光に対する感度がほとんどないことを考慮すると、桿体の何らかの関与の結果と考えることもできる。さらに推測するならば、白み成分の増加についても桿体の同様の関与の可能性もある。しかしながら、Fig. 4, 5に見られるように、黒み成分および白み成分の離心角に対する増加の傾向は桿体の分布密度関数とは傾向が異なる。したがって、周辺背景光を持つ刺激についての周辺網膜における白みおよび黒みの増加は、視細胞レベルだけでなくさらに高次レベルの特性にも依存しているものと考えられる。

今回の結果から、周辺網膜での色の見えの分布が、周辺にいくと急激に減少する錐体の分布密度¹⁶⁾に対応しているとは考えにくい。むしろ、錐体以降の高次レベルの色チャンネルの特性が現れていると考えた方がよさそうである。また、この特性は従来の研究の結果から求めた暗順応時の特性とは全く異なるので、明るい視環境に近い条件時には本研究のような条件で求めた結果を応用しなければならない。

5. おわりに

昼間の明るい視環境に近い条件での周辺網膜における色の見えを知ることを目的として、蛍光灯照明の 120 cd/m^2 の灰色半球視野を用いて、等明るさテスト色光 ($465, 505, 576, 630 \text{ nm}$) を周辺網膜に1秒間表示するときの色の見えをカラーネーミング法で調べた。網膜部位は水平方位と上下方位の離心角 $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ (50^\circ)$ および 70° 、被験者は10名とした。

その結果、従来得られていた、周辺網膜では彩度は急激に低下するという特性および赤緑の色視野は狭く黄青の色視野は広いという特性とは異なり、各色み成分の離心角に対する低下は緩やかでしかもテスト色光間で差がほとんどない特性が得られた。この新しい特性が得られた実験条件と従来の研究の条件の比較から、従来の研究結果は周辺網膜における色光の見えを限られた条件の下でしか求めていないことを明らかにした。また、赤のスペクトル光に対して黒み誘導が顕著にみられた。

網膜部位による色の見えの変化は、これから、各錐体の分布密度、色の受容野特性、色チャンネルの特性および桿体の関与などに関してのより詳細な色覚メカニズムの研究によって説明されなければならないが、応用面に関しては今回得られた特性を昼間の平均的な色光の見えとして利用できるものとする。

最後に、本研究を遂行するにあたり多くのご支援とご指導をいただいた東京工業大学大学院総合理工学研究科教授池田光男先生に感謝いたします。また、被験者として協力いただいた内川研究室の皆様にも感謝します。

文 献

- 1) R. M. Boynton, W. Schafer and M. A. Neun: "Hue-wavelength relationship measured by color-naming method for three retinal locations," *Science*, **146** (1964) 666-668.
- 2) J. Gordon and I. Abramov: "Color vision in the peripheral retina. II. Hue and saturation," *J. Opt. Soc. Am.*, **67** (1977) 202-207.
- 3) Committee on Colorimetry Optical Society of America: *The Science of Color* (Thomas Y. Crowell Company, New York, 1953) pp. 101-105.
- 4) 関口修利, 池田光男: "色の見えに基づく色視野の測定," *日本眼光学誌*, **4** (1983) 122-127.
- 5) H. Uchikawa, P. K. Kaiser and K. Uchikawa: "Color-discrimination perimetry," *Color Res. Appl.*, **7** (1982) 264-272.
- 6) G. S. Wasserman: *Color Vision: An Historical Introduction* (John Wiley & Sons, New York, 1978) pp. 86-111.
- 7) B. Stabell and U. Stabell: "Rod and cone contributions to peripheral color vision," *Vision Res.*

- 16 (1976) 1099-1104.
- 8) U. Stabell and B. Stabell: "Color vision in the peripheral retina under photopic conditions," *Vision Res.*, **22** (1982) 839-844.
- 9) U. Stabell and B. Stabell: "Spectral sensitivity of the dark-adapted extrafoveal retina at photopic intensities," *J. Opt. Soc. Am.*, **71** (1981) 841-844.
- 10) 岡嶋克典, 阿山みよし, 内川恵二, 池田光男: "光源色モードと表面色モードにおける明るさ効率の比較", *光学*, **17** (1988) 582-592.
- 11) H. Uchikawa, K. Uchikawa and R. M. Boynton: "Influence of achromatic surrounds on categorical color perception of surface colors," *Vision Res.*, **29** (1989) 881-890.
- 12) G. Wyszecki and W.S. Stiles: *Color Science* (John Wiley & Sons, New York, 1967) pp. 580-582.
- 13) J. Gordon and I. Abramov: "Scaling procedures for specifying color appearance," *Color Res. Appl.*, **13** (1988) 146-152.
- 14) J.D. Moreland: "Peripheral color vision," *Handbook of Sensory Physiology*, **7/4**, eds. D. Jameson and L. M. Hurvich (Springer-Verlag, Berlin, 1972) pp. 517-536.
- 15) B. Stabell and U. Stabell: "Bezold-Brucke phenomenon of the far peripheral retina," *Vision Res.*, **22** (1982) 845-849.
- 16) 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.