



青錐体の出力と明るさの関係

田村 徹・池田 光男

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

(1989 年 4 月 28 日受理)

Relation between Blue Cone Response and Brightness

Tohru TAMURA and Mitsuo IKEDA

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

By using the direct brightness matching method, we measured brightness of the stimuli approximately along the tritanopic confusion lines which have same absorption to red and green cones but have different absorption to blue cones. Results show that brightness increases as blue cones are stimulated more strongly. If the results are plotted on the log B vs brightness diagram, the results can be explained by two straight lines.

1. 序 論

現在測光量として輝度が定められているが、交照法や MDB 法で求められた輝度が実際に人間が感じる明るさと一致しないことが指摘されている。そこで明るさを直接評価する直接比較法を用いて明るさ分光感度や複合光における B/L 比が色度図の広い範囲にわたって測定された¹⁻⁶⁾。また明るさ知覚のモデルも盛んに研究されてきている⁷⁻⁹⁾。しかし青領域の色光に関しては、この領域で B/L 比が急激に変化していることなどがあってモデルの構築が困難になっている。

人間の網膜上には、光受容器として赤、緑、青錐体が存在しているが、青領域の色光は他の領域の色光に対して青錐体を強く刺激しているものと考えられる。そこでこの領域の色光の明るさ知覚に青錐体が関与していると考えられるが、青錐体は他の赤錐体や緑錐体と時間特性や、空間特性をはじめとして多くの点で異なっていることが知られており¹⁰⁾、この青錐体の特異性が青領域における明るさ知覚の問題を複雑なものにしていると考えられる。そこで、本研究では、青錐体の出力に対して明るさがどのように変化するかを調べた。

2. 実験方法

2.1 トリタノピックペア

本研究では、青錐体の出力と明るさとの関係を調べることが目的であるので、赤錐体と緑錐体に対する吸収量が等しく青錐体に対する吸収量が異なる刺激を用意することが必要である。このような条件を満たす刺激として第 3 色覚異常の混同色線に添った刺激を用いることが考えられるが、本実験では予備実験として以下のような等色実験を行なうことにした。

Fig. 1 に示すような 2° の 2 分視野の左側にテスト刺激として二つの単色光 λ_1, λ_2 を混色する。一方右側には参照刺激として λ_{ref} を用意する。このような状態では、色度座標上で λ_1 と λ_2 を結ぶ直線上に λ_{ref} がないと λ_1 と λ_2 の強度をどのように調節しても式 (1) を満たし両者を等色することはできない。

$$\begin{aligned} R_{test} &= R_{ref} \\ G_{test} &= G_{ref} \\ B_{test} &= B_{ref} \end{aligned} \quad (1)$$

$R_{test}, G_{test}, B_{test}$ はテスト刺激の赤錐体、緑錐体、青錐体に対する吸収量を、 $R_{ref}, G_{ref}, B_{ref}$ は参照刺激の赤錐体、緑錐体、青錐体に対する吸収量を表わしている。ところでこれらの両刺激を含むように背景刺激をおいた場合を考えてみる。このような状態で再び両者の等色を

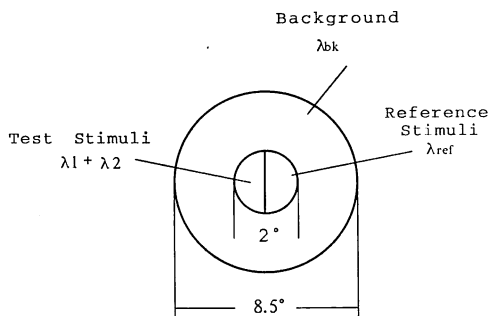


Fig. 1 Spatial configurations of the stimuli used in the experiments. Test field and reference field are superimposed on a background field in the color matching experiment. In the brightness matching experiment, the background field are removed and white light are presented in the right field of the bipartite field.

考えると、式(2)が成立すればよいことになるが、やはり両者の等色は成立しない。

$$\begin{aligned} R_{\text{test}} + R_{\text{bk}} &= R_{\text{ref}} + R_{\text{bk}} \\ G_{\text{test}} + G_{\text{bk}} &= G_{\text{ref}} + G_{\text{bk}} \\ B_{\text{test}} + B_{\text{bk}} &= B_{\text{ref}} + B_{\text{bk}} \end{aligned} \quad (2)$$

$R_{\text{bk}}, G_{\text{bk}}, B_{\text{bk}}$ は背景刺激の赤錐体, 緑錐体, 青錐体に対する吸収量を表すものとする。しかし、この背景刺激が3種の錐体の一つをとくに強く刺激するような場合、この錐体はテスト刺激と参照刺激の差を見分けることができなくなり式(2)のうちいずれか一つが成立しなくとも等色が成立するものと考えられる。そこで本実験では、背景刺激としてとくに青錐体を強く刺激するように440 nm, 200 Tdを用いることにした。つまり、非常に強く刺激された青錐体にとって $B_{\text{test}} + B_{\text{bk}}$ と $B_{\text{ref}} + B_{\text{bk}}$ との差を見分けることができず $R_{\text{test}} + R_{\text{bk}} = R_{\text{ref}} + R_{\text{bk}}, G_{\text{test}} + G_{\text{bk}} = G_{\text{ref}} + G_{\text{bk}}$, よって、 $R_{\text{test}} = R_{\text{ref}}, G_{\text{test}} = G_{\text{ref}}$, つまりテスト刺激と参照刺激が赤錐体と緑錐体に対して等しい吸収量をもつときに等色が成立することになる。そこで、参照刺激を固定し λ_1, λ_2 の組合せをいろいろ変えて実験すれば赤錐体と緑錐体が等しい吸収量もち、青錐体だけが異なる吸収量をもつようなテスト刺激のグループが得られる。

参照刺激は、520 nm と 610 nm の二つとし、いずれも100 Td に設定した。 λ_1 は、420, 430, 440, 450, 460, 470, 480, 490, 500 nm, とした。ただし参照光が520 nm のときは、420 nm は行っていない。 λ_2 は700 nm とした。

被験者は、背景刺激に3分間順応した後、 λ_1, λ_2 の強度を調節して等色を行なった。Fig. 2 に等色したテ

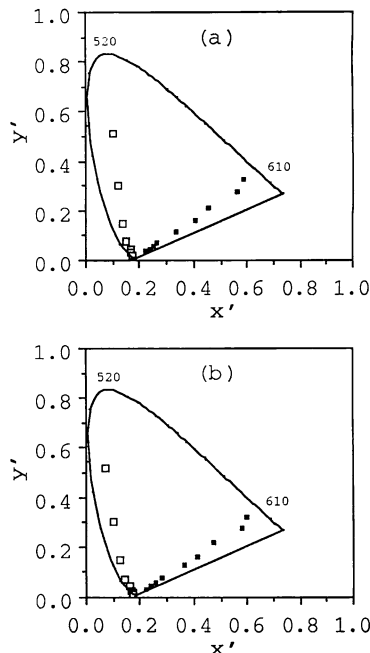


Fig. 2 The location of the stimuli used in the brightness matching experiment. We used the Judd's modified color matching function in calculation.

ト刺激の位置を色度座標上に示す。白四角が参照刺激として520 nmを用いたときで、黒四角が610 nmの場合である。(a)が、被験者 KU、(b)が、被験者 TTである。Fig.2を見れば明らかのようにこれらの刺激は第3色覚異常の混同色線の方向と一致している。また、テスト刺激と参照刺激の青錐体に対する吸収量の差を ΔB とし、背景光の青錐体へ吸収量 B_{bk} との比 $\Delta B/B_{\text{bk}}$ を計算したところ被験者 TT、参照刺激が520 nm, λ_1 が430, 440, 450 nm の条件を除いたすべての条件で0.08より小さくなっている。この値は、Boynton¹¹⁾ が波長弁別を説明するとき用いた青錐体のウィーバー比の値でこの値より小さいとき青錐体は弁別に寄与できないと考えられる。このことを考慮すると本実験における等色も青錐体の寄与がほとんどない状態で行なわれたものと考えられる。次に、これらのテスト刺激の明るさを評価することになるがその方法について述べることにする。

2.2 明るさの評価

明るさの評価は、Fig. 1 の背景刺激を取り除き参照刺激の代わりに白色の評価光を呈示した2°分視野を用いて行なった。左側に上に述べた予備実験で求めた刺激を適当な順番で呈示し、被験者は右側に呈示された白色評価光の強度を調節し両者が等明るさとなるようにした。

実験の手順であるが、被験者は暗黒のブースの中で3分間暗順応した後実験にはいる。コンピュータにあらかじめ入力されたデータによって Fig. 2 の刺激のうちの一つがランダムに呈示される。被験者は、コンピュータからの合図があった後、手元のボタンによって白色評価光の強度を呈示されたテスト刺激と等明るさとなるように調節する。一つのテスト刺激に対して3回の試行を行なうと、コンピュータが自動的に次の刺激を用意し被験者に合図を送り、同じことが繰り返される。Fig. 2 に白四角で示されたものと黒四角で示されたものをそれぞれ1グループとして、1セッションはいずれかのグループ内の刺激に対して行ない、グループ内の刺激がすべて呈示されたところで1セッションとした。

実験はそれぞれのグループに対して8から10セッション行なった。刺激の呈示持続時間は、1s とし 2s ごとに呈示される。この条件は、先に行なった予備実験と同じである。被験者は KU, TT の2名であり、いずれも色覚正常で心理物理学実験の経験が豊富である。

実験に用いた装置は、1kW のキセノンランプを光源とする4光路マクスウェル視光学系であり、各光路には光学濃度ウエッジと干渉フィルタが設置されており刺激の波長と強度を変えることができるようになっている。刺激の呈示は、各光路に設置された電磁シャッターを開閉することで行なった。

3. 結果および考察

Fig. 3(a), (b)に結果を示す。横軸はテスト刺激に番号をつけたもので、 (λ_1, λ_2) が (500 nm, 700 nm) のものを1番、(490 nm, 700 nm) を2番、と番号が大きくなるにつれて、 λ_1 が短くなるようになっている。これは、Fig. 2 で見ると番号が大きくなるにつれて色度座標の左隅に近い刺激になることになる。縦軸は、それらのテスト刺激と等明るさになったときの白色評価光の相対エネルギーである。白四角、黒四角は、それぞれ Fig. 2 の同じシンボルの刺激に対応する。(a)は被験者 KU, (b)は TT の結果である。縦軸の値が大きくなるということは、テスト刺激と等明るさになるための白色評価光のエネルギーが多く必要になることを示している。

それぞれの刺激は、各グループ内において赤錐体と緑錐体に対してほぼ同じ吸収量をもっているものと考えられる。青錐体が輝度チャンネルに入力していないとすれば¹²⁾、各刺激は、ほぼ等輝度となっていると考えられる。Fig. 3(a), (b)を見ると大まかな傾向として右上がりであり、刺激の番号が大きくなり、色度座標の左隅

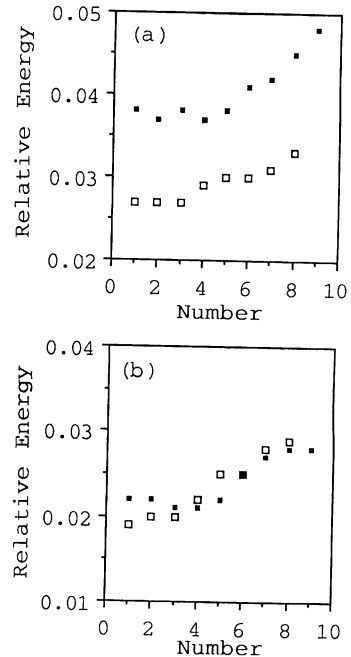


Fig. 3 The results of the brightness matching experiment. The ordinate represents the relative energy of the white light to get the equal brightness to the test stimuli, and the abscissa represents the data number. (See text in detail). (a) Subject KU, (b) Subject TT.

に近づくにつれて明るくなることを示している。しかし、刺激の番号が1~3の付近では必ずしも右上がりとはいえない。この点については以下に検討することにする。

次に、この結果を青錐体の出力と明るさの観点にたって検討することにする。そこで各テスト刺激の青錐体に対する吸収量を式(3)を用いて計算した。

$$B = L_{e\lambda_1} * S_{b\lambda_1} + L_{e\lambda_2} * S_{b\lambda_2} \quad (3)$$

$L_{e\lambda_1}$, $L_{e\lambda_2}$ はテスト刺激中の各単色光の相対エネルギーである。 $S_{b\lambda}$ は青錐体の分光感度であり、Smith ら¹³⁾ のものを用いた。さらに青錐体の入力と出力の関係を対数関数で近似し、 $\log B$ を青錐体の出力とした。明るさに関しては、白色評価光の相対エネルギーの対数を用いることにした。これは、白色評価光の輝度の対数と関連づけることができる。白色刺激の輝度と明るさを結ぶ関係には指数関数を用いることもあるがその関数形は互いに似ており、ここでは対数関数を用いることにした。

横軸に $\log B$ 、縦軸に白色評価光の相対エネルギーの対数をとって Fig. 3(a), (b) のデータをプロットしたものが Fig. 4(a), (b) である。白四角が参照刺激が

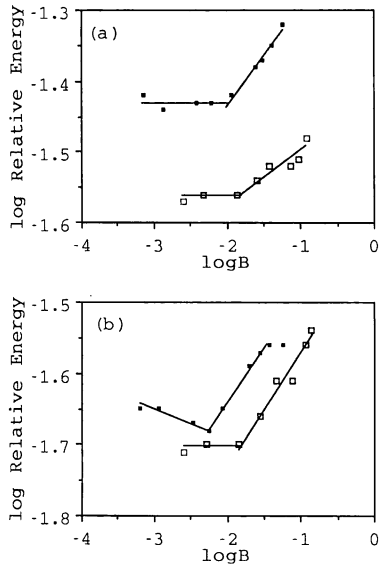


Fig. 4 The results plotted log relative energy of the white light vs log *B*. Straight lines were drawn to fit the data. (a) Subject KU, (b) Subject TT.

520 nm の結果であり、黒四角が参照刺激が 610 nm の結果を示したものである。図の中の直線は、データが複数の直線で表わせるものと仮定して引いたものである。この仮定は、最近中野らによって提案された明るさ知覚モデルが3種の錐体の線形結合で明るさを説明していることに注目したためである。本実験では、青錐体の出力だけが変化しているものと考えられ、このような場合、中野らのモデルによれば青錐体の出力と明るさの間に直線の関係が成立することが予想され、また青錐体の明るさへの寄与の仕方には、明るさを増加させるもの、減少させるもの、また明るさに対して寄与がない場合が考えられ複数の直線で表現されるものと考えたのである。

Fig.4(a), 被験者 KU の結果についてみると、log *B* が小さいところでは、白四角のデータも黒四角のデータも水平の直線に良く乗っており、明るさがほぼ一定となっている。log *B* がある量を越えると明るさが増加しているが、とくに黒四角のデータは直線に良く乗っており、青錐体の出力と明るさの関係が直線で表わされることを示している。白四角のデータのうちいくつかは、直線から外れているがほぼ直線で表わすことができるものと思われる。しかし、白四角のデータに関しては、青領域の明るさが複雑に変化すると言われていることもあり、さらに詳しい実験と検討が必要であると思われる。

白四角のデータのうちで明るさが変化しないのは、Fig.3(a)の刺激番号が1~3に対応し、Fig.2(a)では520 nm に近い側の三つに対応している。また、明るさが増加している刺激は Fig.2(a)の左隅に近い側の五つの刺激に対応している。同様に黒四角のデータに関しては610 nm に近い側の四つが明るさが変化しておらず、それらより青側の刺激で明るさの増加が見られている。これは、以前から行なわれている等 *B/L* 曲線の形から予想される明るさの変化と一致するものと考えられる。つまり、明るさの変化がないところでは *B/L* 曲線が刺激を結ぶ直線と平行になっており、明るさが増加する青領域においては両者が交わっていることと対応するものと考えられるのである。事実 *B/L* 曲線は Y-B の方向に延びる楕円となる傾向が見られ、上の説明と一致する。

Fig.4(b)被験者 TT の結果もほぼ同様の傾向を示しており、明るさの増加が見られる部分においてデータは直線に良く乗っている。黒四角のデータのうち log *B* が小さいほうから4点は log *B* の増加に伴って明るさが減少しているが、これらのデータは刺激番号が1~4、つまり Fig.2(b)の610 nm に近い側の四つの刺激に対応し、この領域において *B/L* 曲線が R-G の方向に膨らんで刺激を結ぶ直線と交わっているために生じるものと考えられる。また、log *B* が最も大きい刺激では明るさの増加が止り直線から外れている。これは、青錐体の明るさへの寄与が飽和したために現われた現象であると考えられる。しかし、白四角の場合にはこのような現象はなく、さらに検討する必要があるものと考えられる。

4. ま と め

赤錐体と緑錐体の出力が同じで、青錐体の出力だけが異なるような刺激に対して明るさを評価したところ、明るさの増加が見られるところでは青錐体の出力と明るさの関係が直線で記述された。色度座標の左隅の青領域における明るさの変化は急激であり、その記述が難しいとされているが、本実験の結果より青錐体の出力という観点から見ることでその記述ができる可能性を示唆したものと考えられる。今後は、トリタノピクラインの方向を変化させることで赤錐体と緑錐体の状態を変化させ、これが青錐体の明るさへの寄与の仕方をどのように変えるのかを検討する必要があるものと考えられる。

本研究を進めるに当たってさまざまな助言と被験者として協力していただいた東京工業大学の内川恵二助教授に深く感謝いたします。

文 献

- 1) M. Ikeda, H. Yaguchi and K. Sagawa: "Brightness luminous-efficiency functions for 2° and 10° fields," *J. Opt. Soc. Am.*, **72** (1982) 1660-1665.
- 2) D. A. Palmer: "Visibility curves by direct comparison in a 10° field at 1000 Td," *J. Opt. Soc. Am. A*, **2** (1985) 578-583.
- 3) K. Sagawa and K. Takeuchi: "Spectral luminous efficiency functions in mesopic range," *J. Opt. Soc. Am. A*, **3** (1986) 71-75.
- 4) K. Katori and M. Fuwa: "Relative spectral luminous efficiency function of 2° and 10° fields determined by flicker photometry and direct heterochromatic brightness matching," *Light Vision Environ.*, **9** (1985) 22-23.
- 5) T. Tamura, M. Ikeda and K. Uchikawa: "The effect of stimulus duration on the luminous efficiency functions for brightness," *Color Res. Appl.*, **13** (1988) 363-368.
- 6) K. Uchikawa, H. Uchikawa and P.K. Kaiser: "Luminance and saturation of equally bright colors," *Color Res. Appl.*, **9** (1984) 5-14.
- 7) S.L. Guth and H.R. Lodge: "Heterochromatic additivity, foveal spectral sensitivity, and a new color model," *J. Opt. Soc. Am.*, **63** (1973) 450-462.
- 8) H. Yaguchi and M. Ikeda: "Subadditivity and superadditivity in heterochromatic brightness matching," *Vision Res.*, **23** (1983) 1711-1718.
- 9) Y. Nakano, M. Ikeda and P.K. Kaiser: "Contributions of the opponent mechanisms to brightness and nonlinear models," *Vision Res.*, **28** (1988) 799-810.
- 10) E. Zrenner: "Properties of the B-cone system: Summary," *Studies of Brain Function* (Springer Verlag, Berlin, 1982).
- 11) R.M. Boynton: "Chromatic discrimination," *Human Color Vision* (Holt, Rinehart and Winston, 1979).
- 12) A. Eisner and D.I.A. Macleod: "Blue-sensitive cones do not contribute to luminance," *J. Opt. Soc. Am.*, **70** (1980) 121-123.
- 13) V.C. Smith and J. Pokorny: "Spectral sensitivity of the foveal cone photopigments between 400 nm and 500 nm," *Vision Res.*, **15** (1975) 161-176.