

## 研究

## 明るさ効率の視野サイズによる影響

矢口 博久\*・中村 千穂\*\*、\*\*\*・三宅 洋一\*・久保 走一\*\*

千葉大学工学部 \*情報工学科, \*\*画像工学科 〒260 千葉市弥生町 1-33

(1989年11月27日受付, 1990年2月28日受理)

## Variation of Brightness Efficiency with Visual Field Size

Hirohisa YAGUCHI,\* Chiho NAKAMURA,\*\*、\*\*\* Yoichi MIYAKE\* and Souichi KUBO\*\*

\*Department of Information and Computer Sciences, \*\*Department of Image Science and Engineering,  
Faculty of Engineering, Chiba University, 1-33, Yayoicho, Chiba 260

(Received Nov. 27, 1989; Accepted Feb. 28, 1990)

Heterochromatic brightness matches with bipartite fields made up of a white reference stimulus and a chromatic test stimulus for various field sizes from  $3'$  to  $2^\circ$  were carried out with a computer controlled cathode-ray tube. The brightness-to-luminance ( $B/L$ ) ratios of six chromatic stimuli were obtained, and the brightness additivity for the mixture of red and green was tested. When the test stimulus was juxtaposed to the reference stimulus without gap, the  $B/L$  ratio of the test chromatic stimulus decreased with decreasing field size. When the test stimulus was separated to the reference stimulus with a gap of  $3'$  in width, the  $B/L$  ratios were generally greater than unity regardless of field size. Additivity failed by brightness reduction for all field sizes whether a gap exists or not, although the degree of brightness reduction decreased with decreasing field size. From these results, it is suggested that the contribution of chromatic channels to the brightness should decrease with decreasing field size.

## 1. はじめに

彩度の異なる二つの色光は輝度が等しくともその明るさが異なって見える場合がある。一般に彩度の高いほうが明るく見え、この現象はヘルムホルツ・コールラウシュ効果と呼ばれている。このような明るさと輝度の不一致の問題はこれまでも数多くの実験報告があり、以下のように理論的にもその原因はほぼ解明されている。

輝度は標準比視感度関数 (CIE  $V(\lambda)$ ) に基づいて定義されており、これは主に交照法による実験データを基に定められている。一方、明るさを直接的に評価する方法として直接比較法があるが、これにより得られる比視感度関数は交照法によるものと異なる。交照法と直接比較法による比視感度を比較してみると、短波長域および長波長域の彩度の高い波長域で直接比較法が高い感度を示

す。また、赤と緑など反対色の関係にある色光を混合した場合に明るさ減少型の加法則不軌が起こる。これらは明るさ感に輝度の他に色味の成分が寄与していることで説明される。色覚モデルから言えば輝度チャンネルに加え反対色チャンネルの出力が明るさの判断に介入していることになる。すなわち、輝度が等しくても色味の成分の差だけ明るさ感にも差が生じることになり、反対色どうしの混合の場合は色味が打ち消されて、加法則で予測されるより明るさが減少することになる。

以上のような明るさと輝度の差は単純で比較的大きな視野を用いた場合の現象であるが、Yaguchi<sup>1)</sup> は複雑なパターンの場合はその空間周波数が高い刺激では輝度と明るさは一致することを示した。また、Bedford<sup>2)</sup>、Ikeda<sup>3)</sup> は視野を小さくすると交照法と直接比較法による比視感度関数が一致する結果を得ている。これらの結果から、高い空間周波数成分をもつ複雑なパターンや小視野において反対色チャンネルの介入が少なくなり、明るさと輝度が一致する傾向にあると解釈できる。しかし、たとえ小視野になっても長波長の刺激などは赤の色

\*\*\* 現在: (株)写研研メディア研究所 〒351-01 和光市新倉 2-27-63  
Present address: SHA-KEN Co., Ltd., 2-27-63, Niikura, Wako 351-01

が見えている。これは反対色チャンネルの出力が低くなるという考え方と矛盾しており、この点に関しての検討が必要である。

本研究では視野サイズを変化させた場合の明るさ知覚への影響を調べるために視野サイズをパラメータにとって直接比較法による明るさマッチングの実験を行った。実験は二つに分かれ、実験1では6色のテスト色に対して明るさと輝度の関係を直接表す明るさ-輝度比 ( $B/L$ ) の視野サイズによる変化を調べ、実験2では三つの視野サイズに対して明るさの加法性を調べた。明るさの加法性を調べることは、明るさが視覚系における単一のチャンネルで決定されているのか、あるいは複数のチャンネルで決定されているのかを調べるのに有効な方法である。

## 2. 実験

### 2.1 実験装置とその較正

実験はコンピュータ・グラフィック・システム (Nexus-6410) を使用して、カラービデオモニター (SONY PVM-137 Q) 上に刺激を呈示することによって行った。モニターには  $512 \times 400$  画素を呈示できる。CRT の赤、緑、青蛍光体の刺激強度レベルは各 256 段階である。各蛍光体を単独で発光させ、その入出力特性および色度座標を分光放射輝度計で測定した。CRT の入出力特性は通常  $\gamma$  で近似されるが、本実験ではさらに精度を高めるため以下のような Cowan<sup>4)</sup> の方法による 2 次式で表した。

$$L(R) = 66.5 \exp [2.01 \ln (R/255) - 0.174 \{\ln (R/255)\}^2] \quad (1)$$

$$L(G) = 254.0 \exp [1.89 \ln (G/255) - 0.222 \{\ln (G/255)\}^2] \quad (2)$$

$$L(B) = 20.5 \exp [1.57 \ln (B/255) - 0.266 \{\ln (B/255)\}^2] \quad (3)$$

ここで、 $L(R)$ 、 $L(G)$ 、 $L(B)$  は各蛍光体の入力レベルがそれぞれ  $R$ 、 $G$ 、 $B$  のときの輝度である。 $R$ 、 $G$ 、 $B$  は 0 から 255 の自然数の値をとり、CRT の電子銃の印加電圧に比例する値である。上式における係数はモニターを移動したときなどに若干の変化が生じるので測定により随時係数を決定した。CRT 上の任意の画素の 3 刺激値は次式で与えられる。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_R/y_R & x_G/y_G & x_B/y_B \\ 1 & 1 & 1 \\ z_R/y_R & z_G/y_G & z_B/y_B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L(R) \\ L(G) \\ L(B) \end{bmatrix} \quad (4)$$

ここで  $(x_R, y_R)$ 、 $(x_G, y_G)$ 、 $(x_B, y_B)$  は赤、緑、青各蛍

光体の色度座標である。各蛍光体の色度座標は、赤 (0.644, 0.328)、緑 (0.283, 0.597)、青 (0.151, 0.053) である。これらを (4) 式に代入すると、

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.963 & 0.474 & 2.849 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0.085 & 0.201 & 15.02 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L(R) \\ L(G) \\ L(B) \end{bmatrix} \quad (5)$$

が得られる。(1)、(2)、(5) 式より任意の CRT 入力 ( $R, G, B$ ) に対応する色光の 3 刺激値を得ることができ。また、(5) 式の係数行列の逆行列から次式のように任意の ( $X, Y, Z$ ) の色刺激を呈示するための各蛍光体の輝度が得られる。

$$\begin{bmatrix} L(R) \\ L(G) \\ L(B) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.663 & -0.292 & -0.106 \\ -0.668 & 1.309 & 0.040 \\ -0.005 & -0.016 & 0.067 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (6)$$

### 2.2 刺激

直接比較法のための刺激として、2 種類の呈示方法を用いた。Fig. 1 に示すように、(a) 参照刺激とテスト刺激を隙間なく隣接させたものと、(b) 参照刺激とテスト刺激の間に  $3'$  (画素数 4 に相当する) の間隔の隙間 (以後これをギャップと呼ぶ) を置いて呈示したものである。背景およびギャップは CRT 入力 ( $R, G, B$ ) = (0, 0, 0) の暗黒である。参照視野とテスト視野の形状は縦:横が 2:1 の長方形でこれらを左右に併置して正方形の 2 分視野を形成した。実験 1 のパラメータとなる視野サイズはギャップなしの 2 分視野の場合、 $3'$ 、 $6'$ 、 $11'$ 、 $18'$ 、 $30'$ 、 $1^\circ$ 、 $2^\circ$  の 7 種類を用いた。実験 2 では  $3'$ 、 $11'$ 、 $2^\circ$  の 3 種類の視野サイズを用いた。ギャップのある場合は横サイズに関してはこれらの値に  $3'$  を加えた値となる。

実験 1、実験 2 を通して参照刺激には色度座標 (0.313, 0.329)、輝度  $10 \text{ cd/m}^2$  の D 65 の白色を用いた。実験 1 のテスト刺激の色度座標は赤 (0.644, 0.328)、緑 (0.283, 0.597)、青 (0.151, 0.053) の CRT 原色と

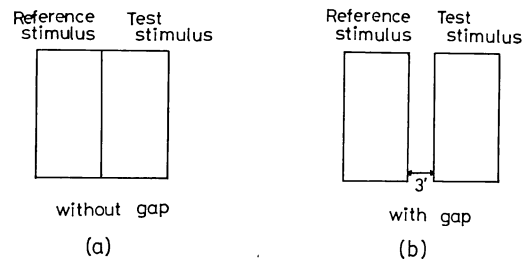


Fig. 1 A sketch of bipartite fields presented on a CRT screen: (a) the reference stimulus and the test stimulus were juxtaposed without a gap; (b) reference and test stimuli were separated with a gap whose width is  $3'$ .

それら二つの組合せであるシアン (0.226, 0.364), マゼンタ (0.334, 0.155), 黄 (0.416, 0.498) の計 6 色である. 実験 2 では赤と緑の CRT 原色を混色し, その混色比を 7 種類変化させて加法性を調べた.

### 2.3 被験者

被験者は CN (女性 22 歳), HT (男性 23 歳), HY (男性 36 歳) の 3 人で, 全員石原式色盲検査表で正常と判定された. また, CN, HT については本実験が初めての明るさマッチングの経験であった.

### 2.4 方法

$B/L$  の測定に関しては, 同一視野サイズについて 6 テスト色のおのおのに対して 5 回の明るさマッチングを行い, 順次視野サイズを変化させて同様の測定を繰り返した. これを 1 セッションとした. 視野サイズは 7 種類であるので, 1 セッションで 210 回の明るさマッチングを行うことになる. 1 セッションの所要時間は被験者によっても異なるが 30 分から 1 時間で終了した. 各被験者についてギャップありとギャップなしの場合でそれぞれ 5 セッションの測定を行った.

$B/L$  は参照刺激 (白色刺激) の輝度とそれと明るさマッチングしたときのテスト刺激の輝度の比で定義される. しかし, この定義における輝度として CIE 輝度 (CIE- $V(\lambda)$  に基づく輝度) を用いると, 本実験における被験者と標準観測者の間の個人差も結果の中に含まれてしまうことになる. そこで, 本実験では各被験者の交照法による比視感度関数を用いて輝度を計算した. この輝度をここでは個人輝度と呼ぶ. これを用いて  $B/L$  を次式で定義した.

$$B/L = L_{\text{ref}}/L_{\text{test}} \quad (7)$$

ここで,  $L_{\text{ref}}$  は参照刺激の個人輝度,  $L_{\text{test}}$  は参照刺激と明るさマッチングしたときのテスト刺激の個人輝度を表す.

明るさの加法性の検討に関しては, 赤原色と緑原色のあらかじめ決められた 7 種類の混色比からなるテスト色について  $B/L$  の測定同様に 5 回の明るさマッチングを行った. この操作を順次三つの視野サイズについて行った. ここでは, ギャップありとギャップなしについて同一のセッションで行ったので, 1 セッションで合計 210 回の明るさマッチングを行った.

明るさの加法性を以下の方法により定量的に表した. ある原色が単独で参照光と明るさマッチングしたときの輝度を  $L_{10}$  とし, もう一つの原色が同じ参照光と明るさマッチングしたときの輝度を  $L_{20}$  とする. 次にこれらの原色を適当な割合で混合して, また同じ参照光と明るさ

マッチングしたときのそれぞれの原色の輝度を  $L_{1m}$ ,  $L_{2m}$  とする. ここで,  $\rho_1$ ,  $\rho_2$  なる量を以下のように定義する.

$$\rho_1 = L_{1m}/L_{10} \quad (8)$$

$$\rho_2 = L_{2m}/L_{20} \quad (9)$$

明るさの加法性は  $\rho_1 + \rho_2$  の量で表すことができる.  $\rho_1 + \rho_2 = 1$  のときは明るさの加法則が成立していることを意味し,  $\rho_1 + \rho_2 > 1$  のときは明るさマッチングのために明るさの加法則で予測される輝度より余計の輝度が必要であることになるので明るさ減少型の加法則不軌, 逆に  $\rho_1 + \rho_2 < 1$  のときは明るさの増加型の加法則不軌となる.  $\rho_1$ ,  $\rho_2$  はそれぞれの原色の強度比であるので, (8), (9) 式における輝度は CIE 輝度でも個人輝度, あるいは放射輝度のいずれでも同じ値を示す.

## 3. 結果

### 3.1 実験 1: $B/L$

Fig. 2 (a), (b) にそれぞれ被験者 CN, HY の結果を示す. HT の結果は HY とよく一致した結果を示しているので図は省略した. 上からテスト刺激が赤, 黄, 緑, シアン, 青, マゼンタの場合の結果である. ○ はギャップがない場合, ● はギャップがある場合の結果である. 破線は  $B/L = 1$ , つまり個人輝度と明るさの一致を意味している.

被験者に共通して, (1) どのテスト色についてもギャップの存在により  $B/L$  は高い値を示す. (2) 青, シアン, 緑のテスト色の  $B/L$  はギャップの存在にかかわらず視野サイズが小さくなるにつれて低下する, (3) 赤, マゼンタのギャップがある場合の  $B/L$  は視野サイズに依存せずほぼ一定である結果が得られた. 被験者 CN に関しては, ギャップのない場合の  $B/L$  は黄以外の全てのテスト色で視野サイズの縮小とともに低下する傾向を示し, 青以外では視野サイズ 3' で  $B/L = 1$  に近づくという結果を得た. 青のテスト色では両被験者とも  $B/L$  が 1 より小さくなっている. この原因の一つに眼光学系の色収差が考えられる. すなわち, 青のテスト光は参照光に比べ網膜上で色収差のため広がり, それが原因で明るさが低く感じられたと考えられる. これに対し, 比較的大きなサイズのテスト光では, 明るさを中心部分で判断することができるので, 色収差の影響が現れなかったと思われる.

### 3.2 実験 2: 明るさの加法性

Fig. 3 (a), (b) にそれぞれ被験者 CN, HY の明るさの加法性を表す  $\rho_1 - \rho_2$  曲線を示す. ここでも HT は

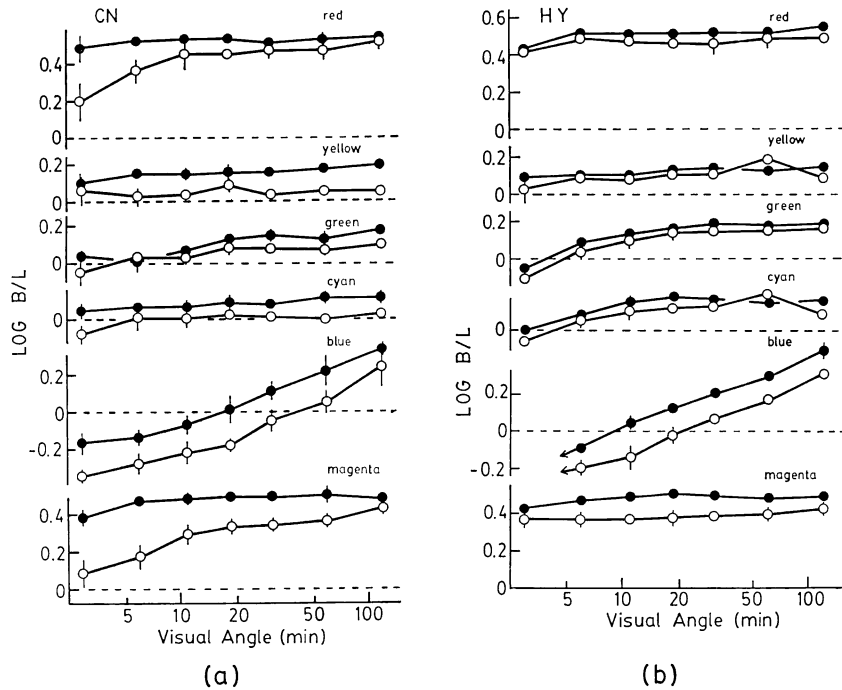


Fig. 2. The  $B/L$  ratios for six test chromatic stimuli as a function of field size from observers CN (a) and HY (b). Filled circles, bipartite fields with a gap; open circles, bipartite field without a gap. Error bars indicate  $\pm 1$  standard deviation.

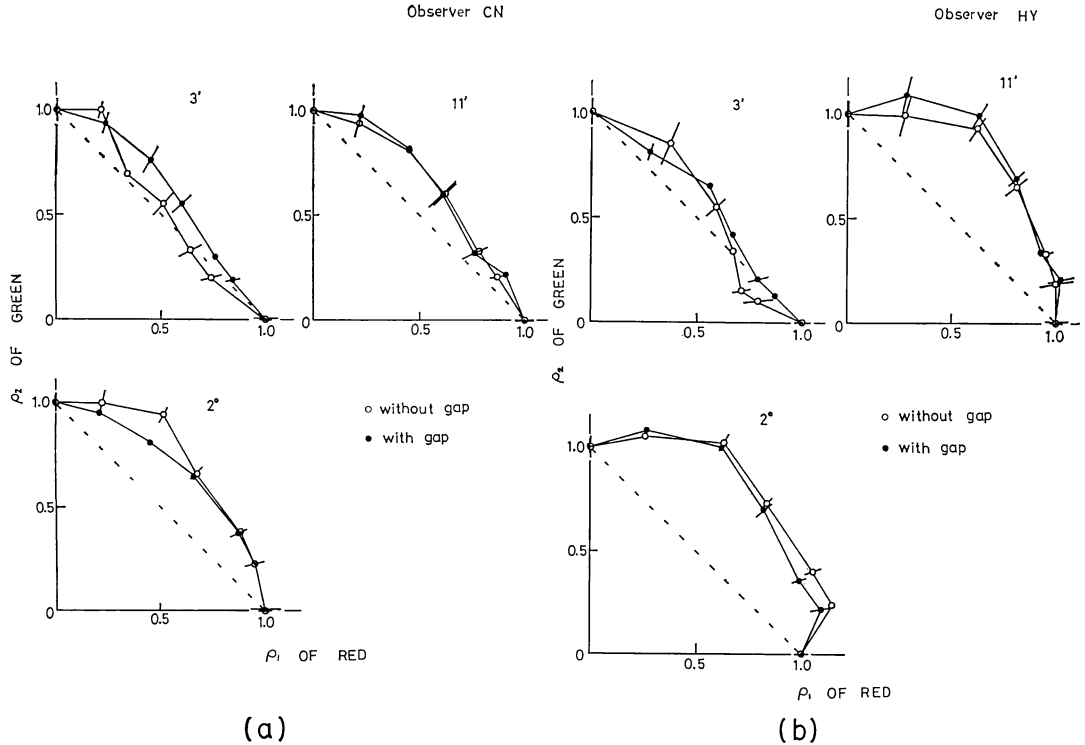


Fig. 3.  $\rho_1$ - $\rho_2$  plots for the heterochromatic brightness matching with bipartite fields with a gap (closed circles) and without a gap (open circles) for various field sizes from two observers CN (a) and HY (b). Error bars indicate  $\pm 1$  standard deviation.

HY と同様の結果を示したので図は省略した。左上, 右上, 左下のグラフはそれぞれ視野サイズ 3', 11', 2° の結果である。○はギャップがない場合, ●はギャップがある場合の結果である。破線は  $\rho_1 + \rho_2 = 1$  の直線で, 測定点がこの直線上にのれば, それは加法則が成立していることを意味する。全体的な傾向としてギャップの有無にかかわらず視野サイズが小さくなると  $\rho_1 - \rho_2$  曲線の膨らみが小さくなる。これは視野サイズの縮小によって明るさ減少型の加法則不軌の度合いが弱くなったことを意味している。しかし, 3人の被験者ともギャップのある場合は最小の 3' の視野サイズでも明るさ減少型の加法則不軌を示した。ギャップのない場合は被験者 CN は 3' でほぼ加法則成立の結果を示した。

#### 4. 考 察

$B/L$  の実験において, もし明るさと輝度が一致するならば結果は  $\log B/L = 0$  の破線上にのる。したがって,  $\log B/L > 0$  の範囲は反対色チャンネルの寄与と考えられる。そこで赤緑, 黄青二つの反対色チャンネルの明るさへの寄与を視野サイズの関数として表し, これを基に  $B/L$  の視野サイズ依存性の高いギャップなしの場合の実験結果の理論的予測を試みた。まず  $\log B/L$  をそのまま反対色チャンネルの明るさへの寄与量  $C$  と仮定し, これを視野サイズ  $x$  の関数として次式で表した。

$$C(x) = -\exp(-x+a)+b \quad (10)$$

ここで  $x$  は視野角を  $\theta'$  とした場合,  $x = \log \theta$  であり,  $a, b$  は係数である。テスト刺激が赤の場合は黄青反対色チャンネルの寄与は無視できると仮定し, Fig. 2 の赤

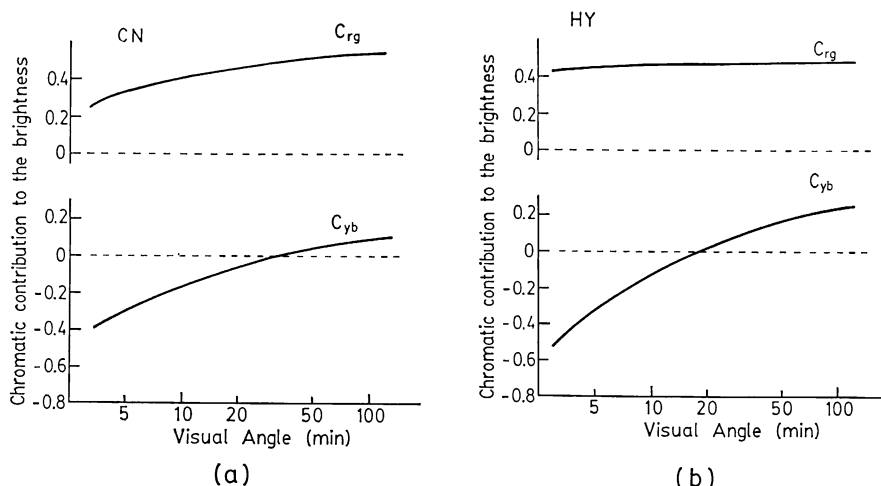
**Table 1** Coefficients in the formuluses of the chromatic contribution as a function of field size.

Obs.	Channel	$a$	$b$
CN	$C_{rg}$	-0.498	0.622
	$C_{yb}$	0.072	0.229
HY	$C_{rg}$	-2.278	0.489
	$C_{yb}$	0.421	0.441

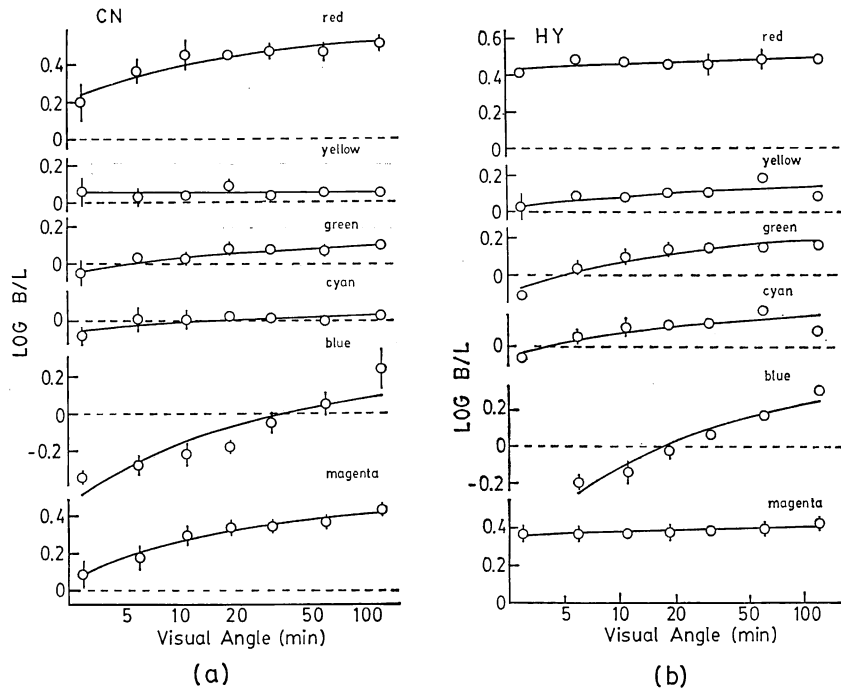
の  $\log B/L-x$  曲線の結果を用いて(10)式における係数  $a, b$  を最小 2 乗法で求め, これを近似的に赤緑反対色チャンネルの寄与量の視野サイズの関数  $C_{rg}(x)$  とした。同様に黄青反対色チャンネルについては青の  $\log B/L-x$  曲線から  $C_{yb}(x)$  を求めた。当然, 赤のテスト刺激でも黄青反対チャンネルの寄与が, また, 青のテスト刺激でも赤緑反対色チャンネルの寄与が全くないわけではないが, ここでは簡単のために, これらの寄与を近似的に無視して解析を行った。各被験者から求めた赤緑, 黄青反対色チャンネル寄与関数における係数  $a, b$  の値を **Table 1** に示す。Fig. 4 (a), (b) はそれぞれ被験者 CN, HY の  $C_{rg}(x)$  曲線および  $C_{yb}(x)$  曲線である。どちらの被験者も視野サイズの縮小に対する寄与量の変化は赤緑反対色チャンネルより黄青反対色チャンネルのほうが大きいことがわかる。とくに HY の場合は, 赤緑反対色寄与量は視野サイズにほとんど依存せず一定であることがわかる。次に二つの反対色チャンネル寄与関数  $C_{rg}(x), C_{yb}(x)$  を用いてテスト刺激 6 色に対する反対色チャンネル寄与量を次式で表した。

$$C(x) = pC_{rg}(x) + qC_{yb}(x) \quad (11)$$

この式における係数  $p, q$  はそれぞれ赤緑, 黄青反対色



**Fig. 4** The contribution of the chromatic channels to the brightness as a function of field size for two observers CN (a) and HY (b).



**Fig. 5** The  $B/L$  ratios for six test chromatic stimuli as a function of field size from observers CN (a) and HY (b). The experimental data (open circles) were obtained using bipartite fields without gap. Continuous curves show the  $B/L$  ratio predicted by the assumption of contribution of chromatic channels to the brightness.

チャンネルの寄与の重み係数で、テスト刺激により異なる値をもち、各被験者の  $\log B/L-x$  曲線から最小2乗法により求めた。これを **Table 2** に示す。また、このようにして得られた理論式による  $C(x)$  曲線を **Fig. 5** の実線で示す。理論式と測定値はよく一致している。

赤と緑の  $\rho_1-\rho_2$  曲線は参照光と等しい明るさの軌跡を意味しており、この曲線上には  $B/L$  の実験の黄と同

条件のものが含まれる。これに着目し、 $B/L$  と  $\rho_1-\rho_2$  曲線の関係を被験者 HY の  $2^\circ$ 、ギャップなしの実験データを用いて定量的に調べてみる。赤と緑の混色における  $\rho_1$  の単位は(8)式で示すように混色光の赤の輝度  $L_{1m}$  と赤単独で明るさマッチングした時の輝度  $L_{10}$  との関係である。同様に緑に対して  $\rho_2$  が定義される。また、(7)式より次式の関係が得られる。

$$L_{10} = L_{ref}/(B/L)_R \tag{12}$$

$$L_{20} = L_{ref}/(B/L)_G \tag{13}$$

ここで、 $(B/L)_R$ 、 $(B/L)_G$  はそれぞれ赤、緑のテスト光における  $B/L$  である。さらに、 $\rho_1-\rho_2$  曲線において  $B/L$  の実験の黄と同条件にある場合の赤、緑の輝度をそれぞれ  $L_{1Y}$ 、 $L_{2Y}$  とすると、黄に対する  $B/L$  の関係から次式が得られる。

$$L_{1Y} + L_{2Y} = L_{ref}/(B/L)_Y \tag{14}$$

また、赤、緑、黄の色度座標から黄を作り出している赤と緑の輝度比  $\alpha = L_{1Y}/L_{2Y} = 0.32$  が得られる。以上の関係から赤と緑の混色で  $B/L$  の実験と同条件の黄における  $\rho_1$  と  $\rho_2$  は次式で得られる。

$$\rho_1 = L_{1Y}/L_{10} = \alpha(B/L)_R / \{(B/L)_Y(1+\alpha)\} \tag{15}$$

$$\rho_2 = L_{2Y}/L_{20} = (B/L)_G / \{(B/L)_Y(1+\alpha)\} \tag{16}$$

**Table 2** Weighting coefficients of red-green and yellow-blue chromatic contributions to the brightness.

Obs.	Color	$p$	$q$
CN	Red	1.00	-0.01
	Yellow	0.13	-0.06
	Green	0.12	0.19
	Cyan	0.06	0.14
	Blue	0.00	1.01
	Magenta	0.75	0.21
HY	Red	1.02	0.00
	Yellow	0.24	0.11
	Green	0.26	0.33
	Cyan	0.24	0.24
	Blue	0.00	0.99
	Magenta	0.84	0.01

(15), (16)式に実験結果からの値

$$(B/L)_R=3.09, (B/L)_G=1.45, (B/L)_Y=1.23$$

を代入して,  $\rho_1=0.61$ ,  $\rho_2=0.89$  が得られる. 実験から得られた  $\rho_1$ - $\rho_2$  曲線 (Fig. 3 (b) の  $2^\circ$  の  $\circ$ ) はこの点の近傍を通っている.

以上のことから,  $B/L$  が高い値をもつことは反対色チャンネルの明るさへの介入が大きいことを意味し, 反対色の関係にあるそのような二つの刺激を混色すると, 反対色チャンネルでの色みの打消しが生じ,  $\rho_1$ - $\rho_2$  曲線が膨らむという明るさ減少型の加法則不軌が起こる原因となっている. また,  $\rho_1$ - $\rho_2$  曲線の膨らんでいる部分の色は  $B/L$  は単独刺激に比べ  $B/L$  が低いという関係にあることが明らかになった.

## 5. 結 論

以上の結果から以下のことが判明した. 視野サイズが小さくなるにつれて反対色チャンネル, とくに黄青反対

色チャンネルの寄与が減少し, 明るさは輝度チャンネルにより決定される. この結果,  $B/L$  は 1 に近づき, 明るさの加法性は成立する傾向を表す. しかし, 視野サイズを小さくしても刺激間にギャップを入れた場合などのように色が識別できる場合は明るさにも反対色チャンネルの寄与は残り, 明るさと輝度の不一致が起こる.

## 文 献

- 1) H. Yaguchi: "Heterochromatic brightness matching with checkerboard patterns," J. Opt. Soc. Am. A, **4** (1987) 540-544.
- 2) R.E. Bedford and G. Wyszecki: "Luminosity functions for various field sizes and levels of retinal illuminance," J. Opt. Soc. Am., **48** (1958) 406-411.
- 3) M. Ikeda, H. Yaguchi, K. Yoshimatsu and M. Ohmi: "Luminous-efficiency functions for point sources," J. Opt. Soc. Am., **72** (1982) 68-73.
- 4) W.B. Cowan: "An inexpensive scheme for calibration of a color monitor in terms of CIE standard coordinates," Comput. Graph., **17** (1983) 315-321.