



## 色度図全域における明るさ効率比の測定

阿山みよし・黄 江 青・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3月30日受理)

***B/L Ratios in the Whole Area of the Chromaticity Diagram***

Miyoshi AYAMA,\* Chiang Ching HUANG and Mitsuo IKEDA

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

*B/L* ratio, i. e., the ratio of the luminance of the reference white (*B*) to the luminance of the equally bright test stimulus (*L*), was measured for each of 177 test stimuli in the whole area of the chromaticity diagram at retinal illuminance levels of 1 td and 100 td for one observer. *B/L* ratio shows the minimum near the white of the reference stimulus and increases with the stimulus purity especially near the violet end of the spectrum. Equal *B/L* contours extend over the yellow-blue region in the chromaticity diagram at both 1 td and 100 td levels. The results in this study are qualitatively consistent with the experimental results in previous studies. The *B/L* ratios at 1 td level are larger than those at 100 td level particularly in the bluish region. It is suggested that relative *B*-cones contribution to brightness perception at 1 td increases compared with that at 100 td in this observer.

## 1. はじめに

色光の明るさ (brightness) を評価する量として、現在の測光システムにおいては次式により定義される輝度 (luminance) を用いている。

$$L = K_m \int L_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

ここで  $L$  は輝度、 $K_m$  は最大視感度、 $L_{e,\lambda}$  は分光放射輝度、 $V(\lambda)$  は国際照明委員会 (CIE) で勧告されている標準比視感度関数である。

(1) 式で表わされる輝度が人間の知覚する明るさを正しく評価している量であれば問題はないが、等輝度の白色光と色あざやかな色光を比べて見ると、後者のほうが明るく見える現象は古くからよく知られている。この「輝度と明るさの不一致」の問題は視覚・照明工学の重要課題として長年にわたり議論されてきた。この現象

が生じるのは(1)式の  $V(\lambda)$  が、おもに「最小ちらつき感」を判断基準とする交照法による分光感度に基づいており、それが「等しい明るさ」を判断基準とする分光感度と特性を異にすることが一つの原因である。

スペクトル光に対しては、Ikeda ら<sup>1)</sup>により「等しい明るさ」を判断基準とする分光感度  $V_b(\lambda)$  がまとめられ、関連分野ではすでに活用され始めている。では(1)式の  $V(\lambda)$  に代えて  $V_b(\lambda)$  を用いれば、複合光を含めて全ての光の明るさを正しく評価できるのだろうか。残念ながら答えは否である。「等しい明るさ」を判断基準とした場合には、異なる色光間で加法則不軌が生じることが多くの研究者により実験的に確かめられており<sup>2-5)</sup>、複合光の明るさを評価する量を(1)式のように分光成分の積分で表わすことができない。しかしながらわれわれを取り巻く日常生活に存在する光は複合光がほとんどであり、複合光における明るさ関数の確立こそが強く要望されている。「輝度と明るさの不一致」の問題をなんとかして解決していかなければならない。そこで以下に定義される明るさ効率比が複合光における明るさを評価する一つの指標として用いられている。

\* 現在：東京都神経科学総合研究所 医学心理学研究室  
〒183 府中市武蔵台 2-6  
Present address: Tokyo Metropolitan Institute for  
Neurosciences, 2-6, Musashidai, Fuchu, 183

ある一定の明るさ  $H$  を与える刺激の輝度を  $L$  とし、その明るさ効率を  $E_b$  とすると、

$$L \cdot E_b = H \quad (2)$$

すなわち

$$E_b = H/L \quad (3)$$

である。ここでは明るさ効率  $E_b$  を輝度と明るさを関係づける量として定義する。一定輝度  $L_{ref}$  の参照光と等しい明るさのテスト光の輝度を  $L_{test}$  とすると両者の明るさ  $H$  は等しい。したがって(2)式より

$$L_{ref} \cdot E_{b,ref} = L_{test} \cdot E_{b,test} \quad (4)$$

そこでテスト光と参照光の明るさ効率の比をとると

$$\begin{aligned} E_{b,test}/E_{b,ref} &= L_{ref}/L_{test} \\ &= (B/L) \end{aligned} \quad (5)$$

となる。本研究ではこれを明るさ効率比と定義し  $B/L$  と呼ぶ。

標準的な条件下でこの値が決定されたならば、その条件の適用範囲内では、ある輝度の参照光と等しい明るさにするための複合光の輝度を  $B/L$  値を用いて算出できる。では実際に活用するためにはどのような範囲の色光に対して  $B/L$  値を測定する必要があるだろうか。前述したように「等しい明るさ」を判断基準とした場合には(1)式のような積分が成立しない。すなわち  $B/L$  値は複合光の色度により不規則に変化するので、あらゆる複合光に対応するためには色度図全域にわたり  $B/L$  を測定しなくてはならない。これまでも色度図の広い領域における  $B/L$  値の分布特性を測定した研究がいくつかなされているが<sup>6-9)</sup>、まだ十分なデータとはいえない。

現在国際照明委員会 (CIE) では、人間の明るさ知覚を正確に反映することを目標とする新しい測光システムの確立を検討しており、すでにいくつかのモデルが提案されている<sup>10)</sup>。さまざまな分野における活用性を考慮すれば、明るさ知覚モデルは簡潔でしかも色覚メカニズムに基づいているものが望ましい。しかし、第1段階としては色度図全域における  $B/L$  値の分布特性をよく近似できることが重要である。現在提案されているモデルの特徴を評価するためには、一人でも多くの被験者についての、色度図全域における実験的に求められた明るさ効率比  $B/L$  の分布特性が必要なのである。

また人間の視覚系は輝度レベルの変化に伴い明るさ知覚に寄与するメカニズムが変化すると考えられている。順応レベルの変化による明るさ知覚特性の変化をできるだけ正確に記述することも新しい測光システムの重要な課題である。そこで本研究においては、おのおの明所視および薄明視と考えられる二つの順応レベルにおいて、

色度図上で均等に分布する多数の色度点の明るさ効率比  $B/L$  を測定した。

## 2. 実 験

### 2.1 刺 激

刺激視野は直径  $2^\circ$  の円形二分視野で、左半分が複合光が呈示されるテスト視野、右半分が白色参照視野である。白色参照光の色度座標  $(x, y)$  は  $(0.34, 0.38)$ 、網膜照度は  $100 \text{ td}$  および  $1 \text{ td}$  で一定である。テスト光としては CIE 1976  $u'/v'$  色度図上ではほぼ均等に分布する色度座標を有する 177 個の色光を採用した。そのうち単色光は 32 個である。

### 2.2 装 置

実験装置としては 500 W キセノンランプを光源とする 3 光路マックスウェル視光学系を用いた。3 光路のうち、1 光路は白色参照光用で、あとの 2 光路はテスト複合光用である。この 2 光路にはおのおのモノクロメータと光学ウエッジ ( $W1, W2$  と呼ぶ) があり、おのおの単色光の波長と強度を自由に調節できる。テスト複合光はこの 2 光路の光を重ねた光路で作られ、二つの単色光  $\lambda_0$  と  $\lambda_1$  の波長およびそれらの混色比を変えることにより、任意の色度座標の色光を実現することができる。単色光  $\lambda_0$  と  $\lambda_1$  を重ねた後の光路にも光学ウエッジ ( $W3$  と呼ぶ) があり、これを用いて  $\lambda_0$  と  $\lambda_1$  の混色比をほぼ一定に保ちつつテスト複合光全体の強度を調節できる。

### 2.3 手 順

各セッションの初めに被験者は約 10 分間暗順応する。次に実験者はテスト複合光の色度座標が  $(x_i, y_i)$  になるように、 $\lambda_0, \lambda_1$  の波長および  $W1, W2$  の目盛りを設定する。このとき  $W3$  は固定されている。次に被験者が  $W3$  を調整して、テスト視野の明るさを参照視野の明るさに揃える操作を 1 回行なう。  $W3$  の回転角と光学濃度変化の関係は単色光の波長によって若干異なるので、テスト光の色度が  $(x_i, y_i)$  からずれてしまう。そこで実験者は  $W1, W2, W3$  おのおの波長別の回転角-光学濃度に関する測光データをもとに  $W1$  または  $W2$  の目盛りを初期設定値から若干変更して色度ずれの補正を行なう。この設定補正の後に被験者は再びテスト視野と参照視野の明るさマッチングを、  $W3$  を調整することにより行なう。一つのテスト複合光に対して、明るさマッチングを少なくとも 3 回繰り返してその平均値を 1 セッションの値とする。刺激視野は連続的に呈示されている。

一つのテスト複合光の測定が終了すると被験者は視

野から目を離して1~2分暗順応する。1セッションでは20~30個の異なる色度座標の色光について測定し、各色度座標点について100 tdでは10回、1 tdでは3回ずつ行なった。各セッションにおける測定点の選択は、100 tdの初めの3回は $\lambda_s$ と $\lambda_l$ の波長を固定して行なったが、結果の一部に色順応の影響と思われる傾向が現われたので、以後の7回、および1 tdの3回の測定では1セッションの測定点はランダムに選んで行なった。

#### 2.4 被験者

被験者は心理物理学実験の経験のある29歳の男性1名で、色覚正常者である。

現在までのところ、スペクトル軌跡まで含む色度図全域における $B/L$ 値の分布特性に関するデータはわずかであり<sup>7,8)</sup>、また二つの順応レベルにおいて、同一被験者により色度図全域の $B/L$ 値を測定した実験結果は報告されていない。したがって、被験者は1名であるが本研究は明るさ知覚に関する基礎的データを提供するものと考えられる。

#### 2.5 測 光

本研究ではテスト複合光の強度を調整して一定網膜照度の白色参照光と等しい明るさにする。明るさ効率 $B/L$ は等明るさにおける参照光とテスト光の輝度比であるが、本研究の実験装置においては刺激視野の輝度を直接測定するのは困難である。そこで参照光網膜照度と、明るさマッチング点における各テスト複合光の網膜照度の比を $B/L$ 値とする。複合光網膜照度は $\lambda_s$ と $\lambda_l$ として採用した波長おのこの分光放射照度、各光路の550

nmでの網膜照度、および $V(\lambda)$ から求めた $W1$ 、 $W2$ 、 $W3$ の回転角-光学濃度、 $\lambda_s$ と $\lambda_l$ の分光放射照度、および白色参照光と550 nmの網膜照度は、EG & G社製のModel 550 Spectroradiometer/photometer systemを用いて測定した。

### 3. 結果および考察

本研究の目的は色度図全域における $B/L$ 値の分布特性を明らかにすることであり、その全体的な傾向を把握するためには等しい $B/L$ 値の点を結んで得られる等 $B/L$ 曲線のグラフが最も適している。ローデータには近接する測定点間の $B/L$ 値が滑らかに変化せず各所に小さな凹凸が見られた。これらの小さな凹凸は個々のマッチングにおける誤差範囲等を考慮すると本質的な変動とは考えにくい。そこでローデータにおける近接色度点間の $B/L$ 値の微小な変動を除去するために、測定点の重みを1/2、隣接する4点の重みを各1/8とする平滑処理を施した後に等 $B/L$ 曲線を引いた。

Fig. 1 および Fig. 2 におおの CIE 1976  $u'v'$  色度図および CIE 1931  $xy$  色度図上の 100 td と 1 td の等 $B/L$ 曲線の分布を示す。●印は白色参照光の色度点である。Table 1 には測定点の色度座標 $(u', v')$ 、 $(x, y)$ と各点における $B/L$ の測定値を示す。100 td, 1 tdの結果とも複合光の純度が高くなるにつれて $B/L$ 値が増大し、とくに青領域でその傾向が著しい。等 $B/L$ 曲線は黄領域から青領域に伸びる形状を示し、内川ら<sup>11)</sup>がまとめた過去のいくつかの研究結果と定性的には一致している。彼

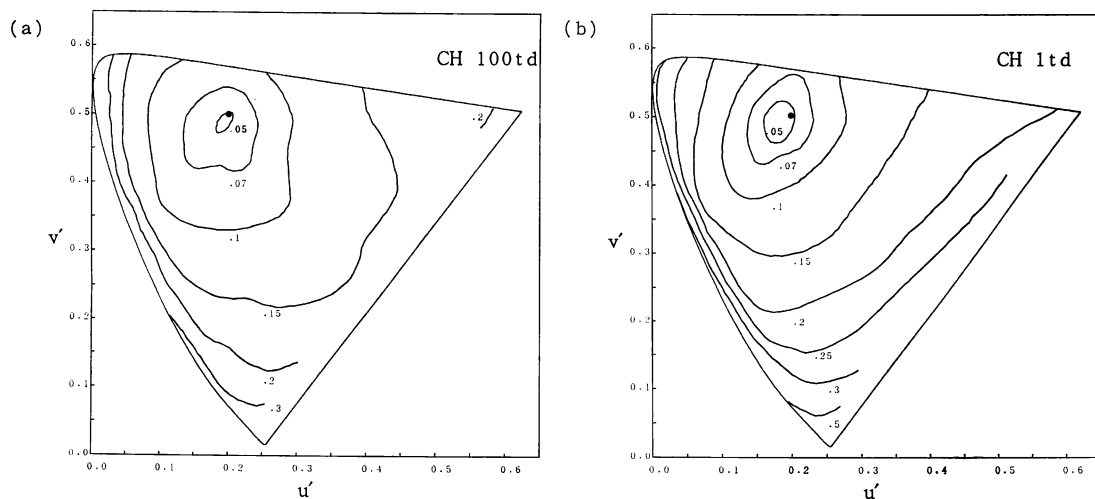
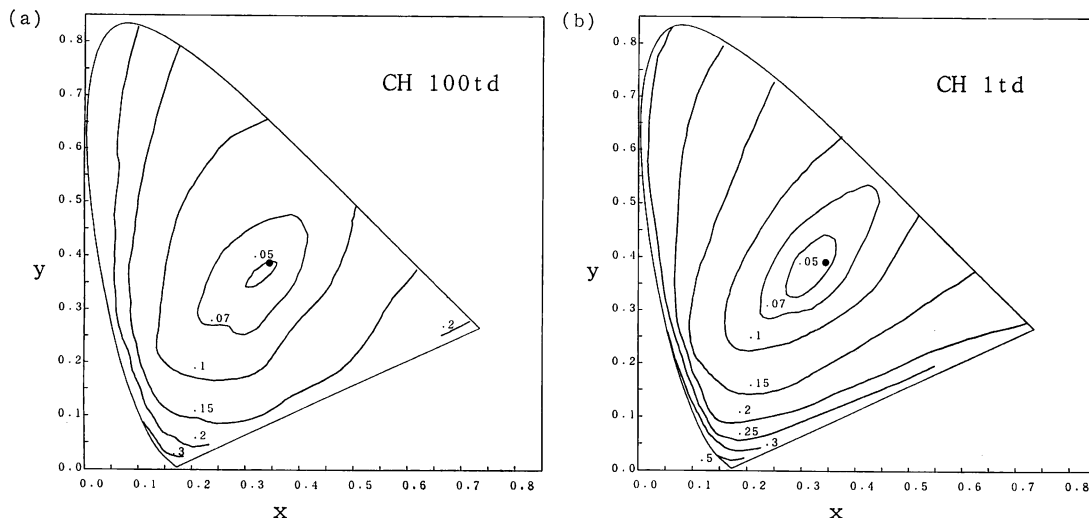


Fig. 1 Equal  $B/L$  ratio contours on the CIE 1976  $u'v'$  chromaticity diagram. The retinal illuminances of the reference white are (a) 100 td and (b) 1 td. The figures indicated on the contours are  $\log(B/L)$  values. ● indicates the reference white. Observer: CH.



**Fig. 2** Equal  $B/L$  ratio contours on the CIE 1931  $xy$  chromaticity diagram. The retinal illuminances of the reference white are (a) 100 td and (b) 1 td. The figures indicated on the contours are  $\log(B/L)$  values. ● indicates the reference white. Observer: CH.

らの報告では、等  $B/L$  曲線の分布特性には実験条件等の相違により大きなばらつきがあることが指摘されている。本研究の被験者 CH の 100 td の結果は、Uchikawa ら<sup>8)</sup> の測定した 2 人の被験者の平均値と定性的にも定量的にも類似している。しかし彼らの実験ではテスト複合光の輝度は  $V(\lambda)$  に基づいているのではなく各被験者のフリッカー感度を用いている。フリッカー法による分光感度はほぼ  $V(\lambda)$  に近似しているが、とくに短波長領域で  $V(\lambda)$  より感度がよいので、厳密に言えば本研究の測定値と内川らの結果を直接比較することには問題がある。

明るさ効率比  $B/L$  は、複合光の輝度を  $V(\lambda)$  または各被験者のフリッカー分光感度に基づいて表わすかにより変化する値である。新しい測光システムは、現在広く使用されている標準比視感度  $V(\lambda)$  および暗所視の比視感度  $V'(\lambda)$  を基盤とし、それに補正を加える形で検討されている。そのような新システムにおける活用を第一の目的とする場合には、 $V(\lambda)$  に基づいた輝度を用いた  $B/L$  値がより妥当であろう。また本研究においては測定点として色度図上に均等に分布する多数の点をとっているが、色度図は標準観測者の等色関数に基づいた図である。測定点の選択および明るさ効率の算出に、ともに標準観測者の等色関数を用いている点で一貫性が保たれている。しかし本研究で得られた  $B/L$  値をもとにして、被験者 CH の明るさ知覚メカニズムにおける色チャンネルと輝度チャンネルの関係等を論ずることはできない。輝度チャンネルの分光感度を表わすと考えられているフ

リッカー分光感度にも個人差が存在するからである。特定被験者における明るさ知覚メカニズムに関する詳細な検討を目的とする場合には、その被験者のフリッカー分光感度に基づいた輝度を用いるほうがより適切だと考えられる。ただし得られた  $B/L$  値を標準観測者の色度図上にプロットするのではなく、その被験者の等色関数に基づく色空間上での議論が必要なのではないだろうか。

Ware ら<sup>12)</sup> は多数の研究の直接比較法による明るさマッチングデータをもとに、色度図全域における明るさ効率を色度座標  $(x, y)$  の関数として表わす次式を提唱した。

$$C(x, y) = 0.256 - 0.184y - 2.527xy + 4.656x^3y + 4.657xy^4 \quad (6)$$

ただしこの式の適用条件は次のとおりである。刺激光輝度  $2 \text{ cd/m}^2$  以上、視野サイズ直径  $0.5^\circ$  以上  $4^\circ$  以下で、比較される刺激光の周辺条件が類似しており、さらに周辺光は中性色であるという条件をつけている<sup>12,13)</sup>。彼らはこの値を conversion factor と呼んでいるが、本研究における  $B/L$  値の常用対数値と比較できる値である。Fig. 3 に (6) 式による等高線図を示す。図中の数値は conversion factor の値で、標準光源  $D_{65}(0.313, 0.329)$  を基準光として採用しているのでその点では  $C=0$  となる。

Fig. 3 の等高線は赤-緑の方向に伸びる楕円状で、本研究の結果とは定性的に一致しない。また、本研究の白色参照光と  $D_{65}$  の相違を考慮しても、同じ色度領域で

**Table 1** Chromaticity coordinates of 177 light stimuli and  $\log(B/L)$  of these lights for observer CH. Wavelengths of the monochromatic stimuli are indicated in the most right column.

$u'$	$v'$	$x$	$y$	$\log(B/L)$		$\lambda$ (nm)
				100 td	1 td	
0.23	0.04	0.16	0.01	0.59	0.70	(442)
0.25	0.06	0.18	0.02	0.24	0.54	
0.27	0.09	0.20	0.03	0.25	0.33	
0.29	0.12	0.22	0.04	0.21	0.30	
0.31	0.15	0.25	0.05	0.19	0.29	
0.34	0.18	0.27	0.06	0.17	0.29	
0.36	0.21	0.30	0.08	0.17	0.29	
0.38	0.24	0.33	0.09	0.16	0.28	
0.40	0.27	0.36	0.10	0.16	0.28	
0.42	0.29	0.39	0.12	0.17	0.27	
0.44	0.32	0.42	0.14	0.17	0.26	
0.47	0.35	0.46	0.15	0.17	0.25	
0.49	0.38	0.50	0.17	0.17	0.25	
0.51	0.41	0.54	0.19	0.17	0.25	
0.53	0.44	0.59	0.21	0.17	0.24	
0.55	0.47	0.64	0.24	0.19	0.21	
0.57	0.50	0.69	0.26	0.20	0.20	
0.59	0.51	0.72	0.28	0.20	0.19	(641)
0.21	0.06	0.15	0.02	0.45	0.56	(453)
0.22	0.08	0.17	0.03	0.21	0.30	
0.24	0.11	0.19	0.04	0.20	0.28	
0.27	0.14	0.21	0.05	0.18	0.26	
0.29	0.17	0.24	0.06	0.17	0.26	
0.31	0.20	0.26	0.07	0.16	0.25	
0.33	0.23	0.29	0.09	0.15	0.25	
0.35	0.26	0.32	0.10	0.14	0.24	
0.38	0.29	0.35	0.12	0.14	0.23	
0.40	0.31	0.38	0.13	0.15	0.22	
0.42	0.34	0.42	0.15	0.15	0.22	
0.44	0.37	0.46	0.17	0.15	0.21	
0.46	0.40	0.50	0.19	0.15	0.21	
0.48	0.43	0.54	0.21	0.16	0.21	
0.50	0.46	0.59	0.24	0.17	0.20	
0.53	0.49	0.64	0.27	0.18	0.19	
0.55	0.52	0.70	0.30	0.19	0.18	(627)
0.19	0.09	0.14	0.03	0.33	0.43	(460)
0.20	0.10	0.15	0.04	0.20	0.28	
0.22	0.13	0.18	0.05	0.20	0.27	
0.24	0.16	0.20	0.06	0.18	0.24	
0.26	0.19	0.22	0.07	0.17	0.23	
0.28	0.22	0.25	0.09	0.15	0.21	
0.30	0.25	0.28	0.10	0.13	0.20	
0.33	0.28	0.31	0.12	0.12	0.20	
0.35	0.31	0.34	0.13	0.13	0.19	
0.37	0.33	0.38	0.15	0.14	0.19	
0.39	0.36	0.41	0.17	0.13	0.19	
0.41	0.39	0.45	0.19	0.13	0.18	
0.43	0.42	0.50	0.21	0.15	0.19	
0.46	0.45	0.55	0.24	0.16	0.19	
0.48	0.48	0.60	0.27	0.16	0.19	
0.50	0.51	0.65	0.30	0.18	0.19	
0.51	0.52	0.69	0.31	0.18	0.17	(618)
0.17	0.11	0.14	0.04	0.33	0.40	(465)
0.19	0.15	0.16	0.06	0.20	0.24	
0.21	0.18	0.18	0.07	0.18	0.24	
0.23	0.21	0.21	0.08	0.16	0.22	
0.26	0.24	0.24	0.10	0.14	0.19	
0.28	0.27	0.27	0.11	0.13	0.19	
0.30	0.30	0.30	0.13	0.12	0.19	
0.32	0.33	0.33	0.15	0.12	0.19	
0.34	0.35	0.37	0.17	0.12	0.19	
0.36	0.38	0.41	0.19	0.13	0.19	
0.39	0.41	0.45	0.21	0.13	0.18	
0.41	0.44	0.50	0.24	0.15	0.19	
0.43	0.47	0.55	0.27	0.16	0.18	
0.45	0.50	0.60	0.30	0.16	0.18	
0.47	0.53	0.67	0.33	0.18	0.17	(611)
0.15	0.15	0.12	0.06	0.33	0.38	(470)
0.17	0.17	0.15	0.07	0.19	0.22	
0.19	0.20	0.17	0.08	0.17	0.20	
0.21	0.23	0.20	0.10	0.15	0.20	
0.23	0.26	0.22	0.11	0.14	0.18	
0.25	0.29	0.25	0.13	0.12	0.18	
0.27	0.32	0.29	0.15	0.12	0.16	
0.29	0.35	0.32	0.17	0.11	0.16	
0.32	0.38	0.36	0.19	0.12	0.16	
0.34	0.40	0.40	0.21	0.12	0.16	
0.36	0.43	0.45	0.24	0.13	0.17	
0.38	0.46	0.50	0.27	0.14	0.17	
0.40	0.49	0.55	0.30	0.15	0.18	
0.42	0.52	0.61	0.33	0.16	0.17	
0.44	0.53	0.65	0.35	0.17	0.17	(605)
0.13	0.18	0.12	0.07	0.33	0.37	(473)
0.14	0.19	0.13	0.08	0.18	0.20	
0.16	0.22	0.15	0.09	0.17	0.19	
0.18	0.25	0.18	0.11	0.14	0.18	
0.20	0.28	0.21	0.13	0.13	0.16	
0.22	0.31	0.24	0.15	0.12	0.14	
0.25	0.34	0.27	0.17	0.10	0.14	
0.27	0.37	0.31	0.19	0.09	0.14	
0.29	0.39	0.35	0.21	0.10	0.14	
0.31	0.42	0.40	0.24	0.11	0.13	
0.33	0.45	0.44	0.27	0.12	0.14	
0.35	0.48	0.50	0.30	0.13	0.14	
0.38	0.51	0.56	0.33	0.15	0.15	
0.40	0.54	0.62	0.38	0.15	0.15	(599)
0.11	0.21	0.11	0.09	0.30	0.36	(475)
0.13	0.24	0.13	0.11	0.15	0.17	
0.16	0.27	0.16	0.13	0.13	0.16	
0.18	0.30	0.19	0.14	0.12	0.15	
0.20	0.33	0.23	0.16	0.09	0.13	
0.22	0.36	0.26	0.19	0.08	0.13	
0.24	0.39	0.30	0.21	0.08	0.13	
0.26	0.41	0.34	0.24	0.09	0.13	
0.28	0.44	0.39	0.27	0.10	0.13	
0.31	0.47	0.44	0.30	0.11	0.13	
0.33	0.50	0.50	0.34	0.12	0.13	
0.35	0.53	0.56	0.38	0.12	0.13	
0.36	0.54	0.60	0.40	0.13	0.13	(594)
0.09	0.24	0.10	0.11	0.29	0.35	(478)
0.11	0.26	0.11	0.12	0.15	0.17	
0.13	0.29	0.14	0.14	0.13	0.16	
0.15	0.32	0.17	0.16	0.10	0.15	
0.17	0.35	0.21	0.19	0.09	0.11	
0.19	0.38	0.24	0.21	0.08	0.10	
0.22	0.41	0.29	0.24	0.08	0.10	

0.24	0.43	0.33	0.27	0.07	0.09	
0.26	0.46	0.38	0.30	0.08	0.09	
0.28	0.49	0.43	0.34	0.09	0.10	
0.30	0.52	0.50	0.38	0.12	0.11	(589)
0.32	0.55	0.57	0.43	0.13	0.13	(480)
0.08	0.27	0.09	0.13	0.28	0.34	
0.10	0.31	0.12	0.16	0.14	0.16	
0.12	0.34	0.15	0.18	0.10	0.13	
0.15	0.37	0.19	0.21	0.08	0.10	
0.17	0.40	0.23	0.24	0.08	0.10	
0.19	0.43	0.27	0.27	0.07	0.09	
0.21	0.45	0.32	0.30	0.06	0.07	
0.23	0.48	0.37	0.34	0.05	0.06	
0.25	0.51	0.43	0.38	0.08	0.09	
0.27	0.54	0.50	0.43	0.09	0.10	
0.29	0.56	0.54	0.46	0.11	0.11	(584)
0.06	0.31	0.08	0.17	0.26	0.32	(483)
0.08	0.33	0.09	0.18	0.15	0.16	
0.10	0.36	0.13	0.21	0.08	0.11	
0.12	0.39	0.16	0.24	0.09	0.10	
0.14	0.42	0.20	0.27	0.08	0.08	
0.16	0.44	0.25	0.30	0.06	0.06	
0.18	0.47	0.30	0.34	0.04	0.03	
0.21	0.50	0.36	0.39	0.05	0.04	
0.23	0.53	0.42	0.44	0.06	0.08	
0.25	0.56	0.50	0.50	0.10	0.10	(578)
0.05	0.34	0.07	0.20	0.26	0.32	(485)
0.07	0.38	0.10	0.24	0.13	0.11	
0.09	0.41	0.14	0.27	0.09	0.11	
0.11	0.44	0.18	0.31	0.08	0.08	
0.14	0.46	0.23	0.35	0.07	0.07	
0.16	0.49	0.28	0.39	0.06	0.05	
0.18	0.52	0.34	0.44	0.07	0.05	
0.20	0.55	0.41	0.50	0.08	0.06	
0.21	0.57	0.46	0.54	0.08	0.08	(572)
0.04	0.39	0.05	0.25	0.26	0.31	(488)
0.04	0.40	0.07	0.27	0.15	0.16	
0.07	0.43	0.11	0.31	0.12	0.13	
0.09	0.46	0.15	0.35	0.10	0.11	
0.11	0.48	0.20	0.40	0.08	0.10	
0.13	0.51	0.26	0.45	0.08	0.07	
0.15	0.54	0.33	0.51	0.08	0.08	
0.18	0.59	0.40	0.60	0.08	0.08	(564)
0.02	0.43	0.04	0.32	0.25	0.29	(491)
0.04	0.45	0.07	0.35	0.15	0.16	
0.06	0.48	0.12	0.40	0.12	0.16	
0.08	0.50	0.17	0.46	0.10	0.13	
0.10	0.53	0.23	0.52	0.09	0.12	
0.13	0.56	0.30	0.60	0.09	0.11	
0.14	0.58	0.34	0.65	0.09	0.11	(556)
0.01	0.47	0.02	0.41	0.26	0.29	(495)
0.03	0.50	0.07	0.47	0.14	0.18	
0.06	0.52	0.13	0.53	0.13	0.17	
0.08	0.55	0.19	0.62	0.11	0.15	
0.10	0.58	0.27	0.72	0.12	0.14	(546)
0.00	0.51	0.01	0.54	0.30	0.25	(500)
0.03	0.54	0.08	0.63	0.16	0.19	
0.05	0.57	0.15	0.74	0.14	0.18	
0.06	0.59	0.18	0.79	0.15	0.18	(533)
0.01	0.57	0.03	0.80	0.23	0.27	(514)
0.03	0.59	0.11	0.83	0.20	0.26	(524)

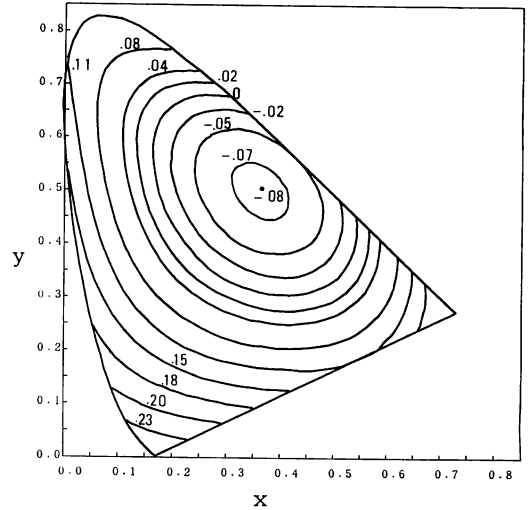


Fig. 3 Equal conversion factor contours on the CIE 1931 chromaticity diagram calculated from the conversion function given in Eq. (6) replotted from Ware and Cowan<sup>12)</sup>. The figures indicated on the contours are conversion factors which are comparable with  $\log(B/L)$  values in this study.

$B/L$  値の定量的な相違があるといえよう。Fig. 2(a) は1名の被験者の結果であるが、内川ら<sup>11)</sup>の報告においても、色度図内部の点を多数測定した実験結果では黄-青領域に伸びる形状の等高線が多い。このような等高線の分布形状の相違の一つの原因として、Ware らが採用した実験結果のうち半数以上がスペクトル光のみにおける測定なので、スペクトル軌跡上の測定値に比重がかかりすぎていることが考えられる。(6)式は、膨大な量の研究報告を調査し、取捨選択し、数学的検討を施して導入された式であり、確かに  $(x, y)$  の関数として  $B/L$  値を得ることができればたいへん便利ではある。しかし、実験的に測定された  $B/L$  値の色度図上における変化の傾向を、ある程度良好に近似する式でなくてはならない。また人間の視覚メカニズムを全く考慮せずに構築されたモデルは、順応レベルの変化等モデルの応用範囲を拡張していく場合に、補正または修正を加えていくのが困難ではないだろうか。

次に 100 td と 1 td の結果を比較してみる。各測定点における二つのレベルの  $B/L$  値の対数の差をとり ( $\log([B/L]_{1td}/[B/L]_{100td})$ ) 図示したのが Fig. 4 である(ただし色度図全域における傾向を把握するために Fig. 4 は平滑処理後のデータをもとにしている。また円が重ならないよう円の中心を測定点からずらしてプロットし

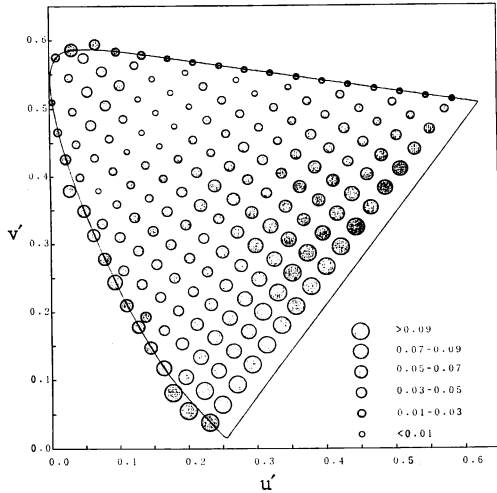


Fig. 4 Differences of  $\log(B/L)$  between the results at 1 td and 100 td ( $\log([B/L]_{1td}/[B/L]_{100td})$ ).

ている場合がある)。スペクトル光についていえば、570 nm より長波長側は二つの輝度レベルにおいて  $B/L$  値はほとんど変化していないが、それより短波長側では 1 td の  $B/L$  値が大きい値をとり、短波長になるほどその傾向は顕著である。色度図内部では広い領域にわたり 1 td のほうが  $B/L$  値が大きく、青領域でその傾向が著しい。

1 td では明るさ知覚メカニズムにおける桿体の寄与が R, G, B 錐体に比べて相対的に増大していることが考えられるが、もしそうであれば桿体の分光感度のピークである 505 nm 付近を中心とした領域で 1 td における  $B/L$  値の上昇が相対的に大きく現われることが予測される。青領域、とくに  $\lambda_s$  に 442, 453, 460 nm を用いた複合光でしかも  $\lambda_s$  の混色比が大きい場合に 2 レベル間の差が増大する Fig. 4 の結果は、桿体の寄与増大では説明しにくい。桿体以外の、この色度領域の光に対して相対的に感度が高いメカニズムは、分光感度のピークを 440 nm 付近にもつ B 錐体である。Fig. 4 に示される 2 レベル間の  $B/L$  値の差の分布から、定性的にはあるが、1 td での  $B/L$  値の上昇には明るさ知覚における B 錐体の寄与の相対的増大が関係していることが示唆される。

薄明視レベルの複合光の明るさ効率比に関するデータは少ないが<sup>10)</sup>、スペクトル光については明るさ分光感度に関する多くの研究報告がある<sup>14-17)</sup>。本研究における  $B/L$  値のなかでスペクトル軌跡上の測定値は明るさ分光感度と  $V(\lambda)$  の差に相当するので、直ちに被験者 CH

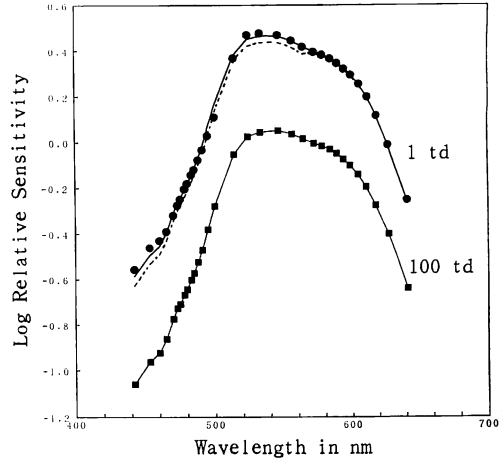


Fig. 5 The luminous efficiency functions for brightness of the observer CH. ● and ■ denote the results at 1 td and 100 td, respectively. Dashed line at 1 td result is the curve fitted using Sagawa *et al.*'s Model. Solid line at 1 td is the curve fitted using the equation which is a linear summation of  $\log V_{b,CH,100td}(\lambda)$  and  $S_B(\lambda)$ . See detail in the text.

の 100 td と 1 td の明るさ分光感度  $V_{b,CH,100td}(\lambda)$  および  $V_{b,CH,1td}(\lambda)$  が得られる。Fig. 5 におのおの ■印および ●印でプロットした。これを従来までの研究結果と比較検討してみる。

Ikeda ら<sup>16)</sup> は薄明視の明るさ分光感度  $V_m(\lambda)$  を明所視と暗所視の明るさ分光感度 (おのおの  $V_p(\lambda)$  と  $V_s(\lambda)$  とする) の対数の線形結合式で近似できることを示した。Sagawa らは多数の被験者における測定を基にそれを補正した次式を提唱している<sup>10,17,18)</sup>。

$$\log V_m(\lambda) = a \cdot \log V_s(\lambda) + (1-a) \cdot \log V_p(\lambda) \quad (7)$$

$$\text{ただし, } a = a_1 \quad \lambda < 570 \text{ nm}$$

$$a = a_2 \quad \lambda > 570 \text{ nm}$$

Sagawa ら<sup>18)</sup> によれば  $V_s(\lambda)$  はほぼ暗所視の標準比視感度  $V'(\lambda)$  に等しいという。したがって係数  $a$  は明るさ知覚における桿体系の寄与の程度を示す指標と考えることができる。彼らの 24 名の被験者の平均値においては参照光 1 td では  $a_1 = 0.45$ ,  $a_2 = 0.35$  で、桿体系の介入がかなり進んでいるといえよう。ここで  $V_{b,CH,1td}(\lambda)$  を (7) 式で近似し被験者 CH における 1 td での桿体系の寄与の程度を推定してみた。  $V_b(\lambda)$ ,  $V_s(\lambda)$  としてはおのおの 570 nm で正規化した  $V_{b,CH,100td}(\lambda)$  および  $V'(\lambda)$  を用い、最小自乗法により  $a$  を求めた。  $a_1 = 0.049$ ,  $a_2 = 0.008$  となり、  $V'(\lambda)$  の寄与が非常に小さい。この

被験者では、1 td ではまだ桿体系の介入がほとんど始まっていないことが示唆される。

Fig. 5 の破線はこのモデルによる近似曲線である。Sagawa ら<sup>18)</sup>は順応レベルによる明るさ分光感度の変化には大きな個人差が存在することを指摘しており、1 td では  $a_1=1.0$  と  $a_1=0$  の被験者がいると述べている。また Ikeda ら<sup>16)</sup>の研究における被験者 TG の 1 td の結果は  $V_s(\lambda)$  と  $V_p(\lambda)$  (彼らの論文ではおのおの  $S_R(\lambda)$  と  $S_C(\lambda)$ ) の相対寄与率を表わす係数の比がほぼ 1:4 で  $V_s(\lambda)$  の寄与が小さい。したがって 1 td でまだ桿体系の介入が始まらないと考えられる本研究の被験者 CH の特性は、従来までに報告されている被験者間のばらつきの範囲から外れるものではない。

Fig. 5 の破線は 570 nm より短波長側全域で測定点より低い値となっている。Fig. 4 で 100 td と 1 td における明るさ知覚特性の変化は B 錐体の相対出力と関係があることが示唆されたので、(7)式の  $V_s(\lambda)$  の代わりに Smith ら<sup>19)</sup>により提唱された B 錐体の分光感度  $S_B(\lambda)$  を用いて 1 td の明るさ分光感度を近似してみた。Fig. 5 の実線がその結果であるが、570 nm より短波長側においても良く測定値を近似している。すなわち、ここではスペクトル光に限定されるが、1 td の明るさ知覚には 100 td に比べて B 錐体の出力が対数関数の形でより多く寄与していることが示唆される。

Nakano ら<sup>5)</sup>は、明所視の明るさ知覚メカニズムを R, G, B 錐体出力の対数の線形和で表わす Nakano-Ikeda-Kaiser モデルを提唱している。彼らの実験は明所視の 1 レベルについてのみなので、1 被験者における 3 種の錐体の重み係数の順応レベルによる変化については言及していない。しかし 3 種の錐体の相対的な寄与の比が、順応レベルにより変化することは考えられる。

芦澤ら<sup>20)</sup>は「色の目立ち」を判定基準として用い、色相環を一巡する 12 枚の色票について、目立ち順位の照度レベルによる変化を調べた。本研究の被験者 CH は彼女らの報告における CH と同一被験者である。芦澤らの報告において被験者 CH は 5 人の被験者中最も暗いレベルでプルキンエ移行が起こる特性を示している。他の被験者に比べてより暗い順応レベルにならないと「色の目立ち」を判断する視覚過程で桿体系の介入が起こらないのである。この結果は、本報告の 1 td で桿体系の介入がほとんど見られない結果と符合している。暗黒周辺の 2° 円形二分視野を用いて測定した色光の明るさ効率比  $B/L$  の結果と、さまざまな色票を自由に観察できる条件で、より高次の中枢レベルが関与していると思わ

れる「目立ち」順位の結果が、同一被験者内の順応レベルによる変化においては類似した特性を示しているのは興味深い。

#### 4. おわりに

色度図全域における色光の明るさ効率比 ( $B/L$  値) を、参照光網膜照度 100 td と 1 td の二つの順応レベルにおいて 1 名の被験者で測定した。二つのレベルにおける  $B/L$  値は、白色領域で最も小さく、複合光の純度が高くなるにつれて増大した。また等  $B/L$  曲線の分布特性は色度図上で黄-青領域に伸びる形状となり、従来までの報告と定性的には一致する結果となった。1 td の  $B/L$  値はとくに青領域で 100 td の結果に比べて増大し、その原因として、本研究の被験者においては、桿体系の介入ではなく青錐体の寄与が相対的に増大していることが示唆された。

時間と労力を要する実験ではあるが、今後さらに多くの被験者において色度図全域における  $B/L$  値の分布特性を測定し、新測光システムに活用できるデータを集積していくことが期待される。

#### 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) R. M. Boynton and P. K. Kaiser: "Vision: the additivity law made to work for heterochromatic photometry with bipartite fields," *Science*, **161** (1968) 366-368.
- 3) P. K. Kaiser and G. Wyszecki: "Additivity failures in heterochromatic brightness matching," *Color Res. Appl.*, **3** (1978) 177-182.
- 4) H. Yaguchi and M. Ikeda: "Subadditivity and superadditivity in heterochromatic brightness matching," *Vision Res.*, **23** (1983) 1711-1718.
- 5) Y. Nakano, M. Ikeda and P. K. Kaiser: "Contributions of the opponent mechanisms to brightness and nonlinear models," *Vision Res.*, **7** (1988) 799-810.
- 6) C. L. Sanders and G. Wyszecki: "Correlate for brightness in terms of CIE color matching data," *Compte Rendu CIE 1963*, Vol. B (Bureau Central de la CIE, Paris, 1964) pp. 221-230.
- 7) S. A. Burns, V. C. Smith, J. Pokorny and A. E. Elsner: "Brightness of equal-luminance lights," *J. Opt. Soc. Am.*, **72** (1982) 1225-1231.
- 8) K. Uchikawa, H. Uchikawa and P. K. Kaiser: "Luminance and saturation of equally bright colors," *Color Res. Appl.*, **9** (1984) 5-14.
- 9) 矢口博久, 池田光男: "明るさの加法性による Helmholtz-Kohlrausch 効果の検討", *照明学会誌*, **64** (1980) 566-570.
- 10) K. Sagawa and K. Takeichi: "Mesopic photometry system based on brightness perception," *CIE, Vene-*



- zia (1987).
- 11) 内川恵二, 内川弘美, P. K. Kaiser: “色光の‘明るさ-輝度差’の色度の違いによる変化”, 照明学会誌, **68** (1984) 259-264.
  - 12) C. Ware and W. B. Cowan: “Specification of heterochromatic brightness matches: A conversion factor for calculating luminances of stimuli that are equal in brightness,” *NRC Report* (NRC, Ottawa, 1984).
  - 13) P. K. Kaiser: “Models of heterochromatic brightness matching,” *CIE J.*, **5** (1986) 57-59.
  - 14) J. A. Kinney: “Comparison of scotopic, mesopic, and photopic sensitivity curves,” *J. Opt. Soc. Am.*, **48** (1958) 185-190.
  - 15) D. A. Palmer: “The definition of a standard observer for mesopic photometry,” *Vision Res.*, **7** (1967) 619-628.
  - 16) M. Ikeda and H. Shimozone: “Mesopic luminous efficiency functions,” *J. Opt. Soc. Am.*, **71** (1981) 280-284.
  - 17) K. Sagawa and K. Takeichi: “Spectral luminous efficiency functions in the mesopic range,” *J. Opt. Soc. Am. A*, **3** (1986) 71-75.
  - 18) K. Sagawa and K. Takeichi: “Mesopic spectral luminous efficiency functions: Final experimental report,” *J. Light Vision Environ.*, **11** (1987) 22-29.
  - 19) V. C. Smith and J. Pokorny: “Spectral sensitivity of the foveal cone photopigments between 400 nm and 500 nm,” *Vision Res.*, **15** (1975) 161-171.
  - 20) 芦澤昌子, 池田光男: “色の目立ちの照度レベルによる変化—プルキンエ移行の影響—”, 照明学会誌, **71** (1987) 612-617.