

研究

高輝度レベルの分光視感効率

山田 誠^{*,**}・佐川 賢^{***}・矢口 博久^{*}・三宅 洋一^{*}

^{*} 千葉大学工学部情報工学科 〒260 千葉市弥生町 1-33

^{***} 製品科学研究所基礎人間工学部 〒305 つくば市東 1-1-4

(1991年2月28日受付, 1991年5月31日受理)

Spectral Luminous Efficiency Functions at High Luminance Levels

Makoto YAMADA,^{*,**} Ken SAGAWA,^{***} Hirohisa YAGUCHI^{*} and Yoichi MIYAKE^{*}

^{*} Department of Information and Computer Sciences, Faculty of Engineering, Chiba University, 1-33, Yayoicho, Chiba 260

^{***} Human Informatics Division, Industrial Products Research Institute, 1-1-4, Higashi, Tsukuba 305

(Received February 28, 1991; Accepted May 31, 1991)

Spectral luminous efficiency functions were measured at 7 retinal illuminance levels from 100 Td to 100,000 Td in 0.5 log unit steps by the direct brightness matching method and the minimum flicker method. The field size subtended 2°, and a total of 10 subjects participated in the experiments. Results showed that luminous efficiency functions by the direct matching method exhibited relative increases in short and long wavelength regions as the retinal illuminance increased, while the functions by the flicker method showed slightly decrease in the long wavelength region with relatively small individual differences throughout the spectrum. From an analysis of the difference data between the luminous efficiency functions by the direct matching method and those by the flicker method, it was found that the contribution of chromatic response to brightness gradually increased with retinal illuminance until it saturated at about 3,000 Td, which was also confirmed by the factor scores in the principal component analysis applied to the present data.

1. はじめに

人間がある色光や物体を見たときの明るさ感覚は、その色光や物体の輝度とは必ずしも一致しない。例えば、輝度が等しい二つの色光があった場合、一般的に彩度の高い色光のほうが明るく見える。これはヘルムホルツ・コールラウシュ効果と呼ばれ、このことから人間の明るさ感覚には色みからの寄与があることが推測される。

輝度などの測光量を計算する際に用いられる標準分光視感効率 [CIE $V(\lambda)$] は主に交照法のデータをもとにしているが、交照法は時間的なちらつき感を基準にした測

定のため人間の明るさ感を忠実に表しておらず、このため上記のような輝度と明るさの不一致が生じると考えられている。すなわち、輝度には色みの明るさへの寄与が考慮されていないのである。そこで、これらの効果を考慮にいれた測光システムが現在ではいくつか提案されている¹⁻⁴⁾。

こうした色みの寄与が輝度レベルによって変化するかどうかについては、たとえば CIE が最近確立した直接比較法による分光視感効率のデータ⁵⁾は明所視の比較的低いレベルにおいて測定されており、一般的には明所視の範囲内ではこれは変化しないと考えられている。しかし、視覚系はおよそ数万 cd/m² という非常に高い輝度レベルまで応答し、こうした高輝度レベルでは色みの寄与や分光視感効率は変化するとも考えられる。

^{**} 現在: 富士写真フイルム(株) 〒250-01 南足柄市中沼 210
Present address: Fuji Photo Film Co., Ltd., 210, Nakanuma, Minamiashigara 250-01

実際、芦澤⁶⁾、Ikedaら⁷⁾、湯尻⁸⁾は色票を用いた実験で、照度レベルが高くなると色の見えがより強く鮮明になり、それによって彩度の高い色票は彩度の低い色票に比べてより明るくなると報告している。さらに、色相や彩度によってもこの効果の度合は異なる⁸⁾。このように色票を用いた物体色モードでは、明所視内での輝度レベルの変化にともなって色票の相対的な明るさが変化するという報告はいくつかある。しかし、視覚系の基本的特性である分光視感効率に関する報告はほとんどなく、これに関する検討も非常に重要なものと思われる。

本研究では明所視の比較的高い輝度レベルにおける視覚系の明るさ知覚の特性を明らかにするため、直接比較法および交照法を用いて分光視感効率を測定し、これらがどのように変化するかを調べた。さらに直接比較法と交照法の分光視感効率の差のデータを、Yaguchiら⁹⁾の主成分分析の結果を用いて検討し、色みの明るさへの寄与の定量化を試みた。これらのデータはあらゆるレベルにおいて有効な測光システムを開発するために重要なデータになるものと考えられる。

2. 実 験

2.1 実験装置および校正

■実験は3光路よりなるマックスウェル視光学系を用いて行った。テスト視野用の光源は回転楕円体ミラーを備えた800 Wのキセノンランプで従来のランプに比べて非常に高輝度を得ることができる。この光源から出た光はモノクロメーターにより単色光となり、濃度ウエッジを通して被験者の目に届く。被験者はこの濃度ウエッジを動かすことによりテスト光の明るさを調節することができる。一方、他のキセノン光源(500 W)から出た光はビームスプリッターによってふたつに分けられ、ひとつは参照光、もうひとつは周辺光となる。ただし、今回の実験では周辺光は使用しなかった。参照光は色度 $x=0.323$, $y=0.390$ の白色、その網膜照度は光路中の濃度ウエッジ、および ND フィルターにより調節した。

テスト光の分光放射量分布の測定には電子技術総合研究所で校正した EG & G 社製ラジオメーターを用い、参照光の網膜照度の測定には市販のデジタル照度計を用いた。

2.2 実験手順

分光視感効率の測定は直接比較法と交照法の2種類の方法を用いて行った。直接比較法では、視角2度の円形上下二分視野の上側に単色光からなるテスト視野、下側に白色の参照視野を呈示する。被験者はテスト視野の光

量を調節して参照視野と明るさ合わせを行う。一方、交照法では円形2度視野にテスト光と参照光とを交互にある時間周波数で呈示し、被験者は視野内のちらつき感が最小となるようにテスト光の光量を調節する。

両方法とも調節を終えた時点のテスト光の放射量(相対値)の逆数で分光視感効率を定義した。参照光の網膜照度は、明所視の比較的低いレベルである100 Tdから、かなり高いレベルである100,000 Tdまで、0.5 log Td ステップの7段階に設定した。交照法の呈示周波数は、100 Tdから3,200 Tdまでは20 Hz、10,000 Tdから100,000 Tdまでは25 Hzで行った。測定波長は400~700 nmの範囲を10 nm間隔で採用したが、高いレベルでは光量不足のため測定範囲は狭められた。被験者はすべて右眼の単眼視による中心固視である。各レベルにおいて各波長5回の繰り返し試行を行い、これを2度繰り返し1点につき計10回の試行から平均をとって一つのデータとした。被験者は男性6名、女性4名の計10名で、いずれも色覚正常である。

3. 結 果

直接比較法による分光視感効率データを Fig. 1 に示す。7枚の図はそれぞれ100 Tdから100,000 Tdまでの結果を表している。横軸は波長、縦軸は分光視感効率の対数値である。縦軸の値は各被験者とも交照法100 Tdのレベルにおいて570 nmの値が4.0になるように規格化したものである。値そのものは任意であるが、異なるレベル間の差や交照法と直接比較法の差などは互いに比較できる量である。各プロット点はそれぞれの被験者の結果を表し、実線は、100,000 Tdのレベルでデータが得られなかった1名を除いた9名の被験者の平均値(幾何平均)を示す。直接比較法による分光視感効率は測定したレベル全体にわたって被験者によって大きなばらつきが見られ、短・長両波長域で高い感度を示す被験者と、そうでない被験者とが見られた。

さらに網膜照度が高くなっていき、10,000 Tdを越える頃になってくると、被験者間の分光視感効率関数全体の差、すなわち曲線全体における図の縦軸方向のシフト量が大きくなっていく。そのため、一人の被験者については光量不足のため100,000 Tdの測定値が得られなかった。

この大きなばらつきは、一つには交照法570 nmのデータ点による正規化の影響とも考えられる。しかし例えば、直接比較法570 nmのデータそのもので正規化しても、もちろん100 Tdの正規化点の近傍ではややばら

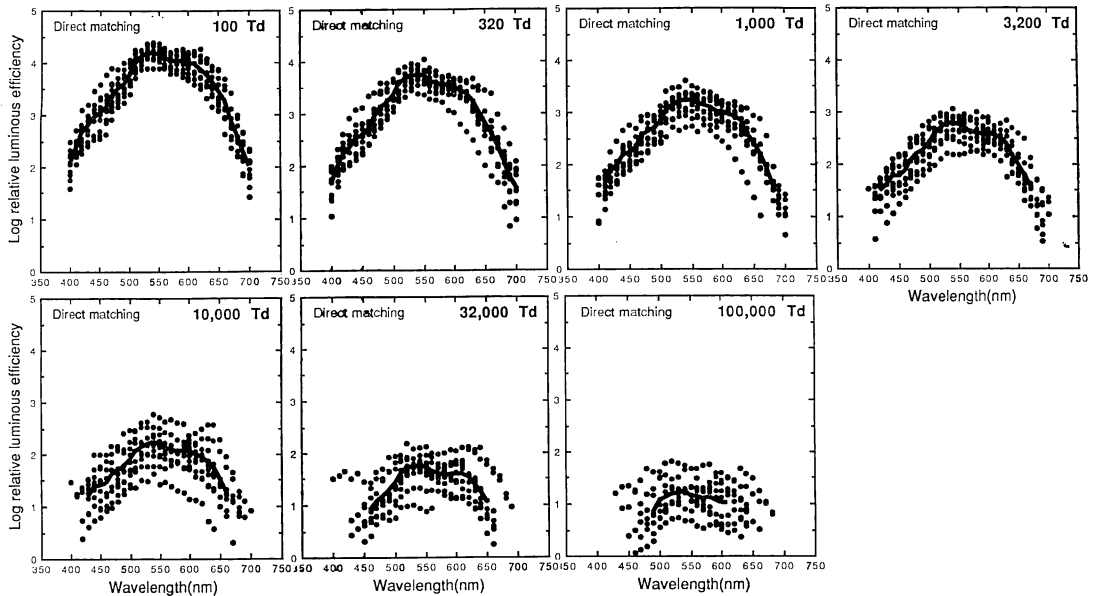


Fig. 1 Spectral luminous efficiency functions obtained by the direct brightness matching method for 7 photopic levels covering a range from 100 to 100,000 Td in 0.5 log unit steps. Closed symbols represent individual data of 10 subjects except for the 100,000 Td where one subject's data are missing because of a lack of test light energy. The solid lines represent averaged functions over 9 subjects.

つきは小さくなるものの、他の短・長波長領域や 100 Td より高いレベルではほぼ同じように見られた。また一般的にも、交照法のデータは直接比較法のデータに比べばらつきが少ないことが知られていることから¹⁰⁾、今回、交照法 100 Td の 570 nm のデータで正規化したことによるデータのばらつきに本質的な差はないものと考えられる。

一方、網膜照度変化にともなう曲線の形状の変化について見てみると、一番低い 100 Td のデータでは短・長波長にふくらみを持つ形で、これは CIE 技術報告にある $V_{b,2}(\lambda)$ 関数⁵⁾ とほぼ一致する。この短・長波長域にふくらみを持つという基本的な形状はレベルが変化しても変わらないが、網膜照度が高くなるにしたがって短・長波長域で曲線が相対的に徐々に盛り上がっていく様子が見られる。

こうした形状の変化を見やすくするために、各レベルの結果を 570 nm で規格化したものが **Fig. 2** である。これを見ると、明らかに短波長領域ではレベルとともに徐々に視感効率が相対的に上昇していくことがよくわかる。長波長領域では、この傾向はそれほど顕著ともいえない。しかし長波長領域でも 1,000 Td 以下とそれ以上のデータとを比較すると、後者の方が明らかに視感効率

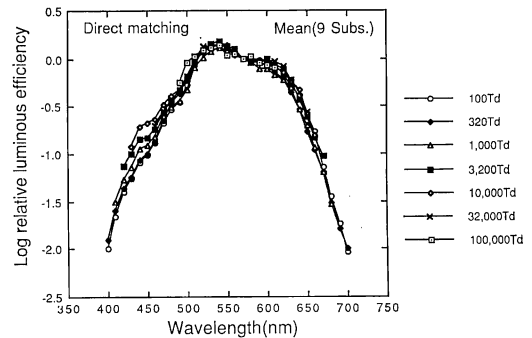


Fig. 2 Averaged spectral luminous efficiency functions by the direct matching method at 7 photopic levels from 100 to 100,000 Td in 0.5 log unit steps. Data are normalized at 570 nm for each level to see the relative change of the function clearly.

が上昇しているので、可視域の波長全体として見る限り、レベルと共に視感効率は上昇すると結論づけてよいと思われる。

次に、交照法による分光視感効率データを **Fig. 3** に示す。各図は直接比較法の時と同様に 100 Td から 100,000 Td のそれぞれの結果を示している。ただし交照法に関しては、100 Td から 100,000 Td まで実験

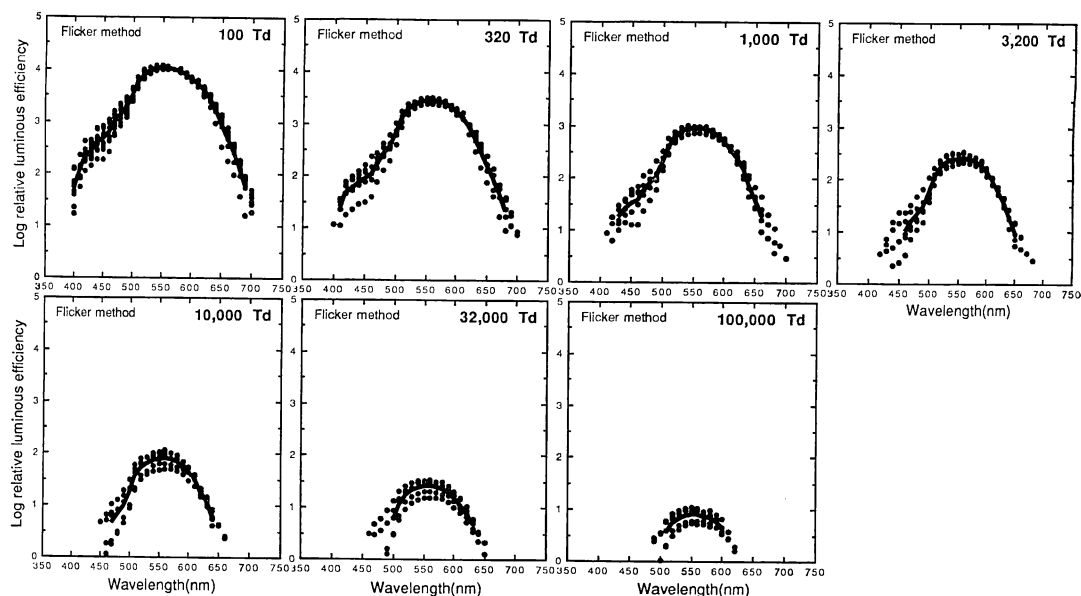


Fig. 3 Spectral luminous efficiency functions obtained by the minimum flicker method for 7 photopic levels covering a range from 100 to 100,000 Td in 0.5 log unit steps. Closed symbols represent individual data of 5 subjects except for the 100 Td where a total of 10 subjects' data are plotted. The solid lines represent averaged functions over 5 subjects.

を行ったのは 10 名中 5 名の被験者で、残りの 5 名は 100 Td のみを行った。さて、100 Td の結果に注目すると、交照法による分光視感効率関数は被験者によるばらつきが比較的少ないことがわかる。さらに網膜照度が高くなってこの傾向は続き、また曲線の形状はスムーズなままで直接比較法のデータに比べるとあまり変化しないことがわかる。

直接比較法と同様にレベルによる形状の変化を見るた

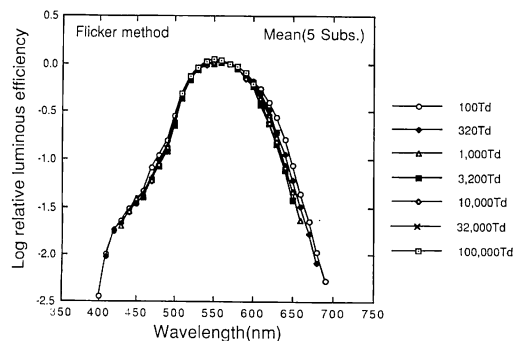


Fig. 4 Averaged spectral luminous efficiency functions by the flicker method at 7 photopic levels from 100 to 100,000 Td in 0.5 log unit steps. Data are normalized at 570 nm for each level to see the relative change of the function clearly.

めに、各レベルの結果を 570 nm で規格化したのが **Fig. 4** である。短波長領域や中波長領域ではほとんど変化が見られないが、長波長側ではレベルが上昇するとやや効率が低下するという傾向がみられる。交照法の結果は、波長域全体として見るかぎり、長波長領域で一部直接比較法の変化よりも大きいところが認められるものの、レベルによる分光視感効率関数の形状の変化は比較的少なく、安定したものといえよう。

4. 考 察

現在の色覚モデルによれば、交照法の分光視感効率は輝度チャンネルの出力のみで決定されており、それに色チャンネルからの寄与が加わって直接比較法の分光視感効率が決定される、と考えられている。したがって直接比較法の分光視感効率から交照法のそれを引くことによって色チャンネルの明るさへの寄与を調べることができ、同時に水晶体や黄斑色素の個人差を取り除くことができる。直接比較法と交照法の分光視感効率の差を、それぞれの平均データについて調べたものが **Fig. 5** である。七つの曲線は 7 段階の網膜照度それぞれの結果を表しているが、これらは見やすいように 1 log 単位ずつずらして表示されている。一番上が 100 Td、一番下が 100,000 Td の結果である。縦軸の値はいわゆる B/L

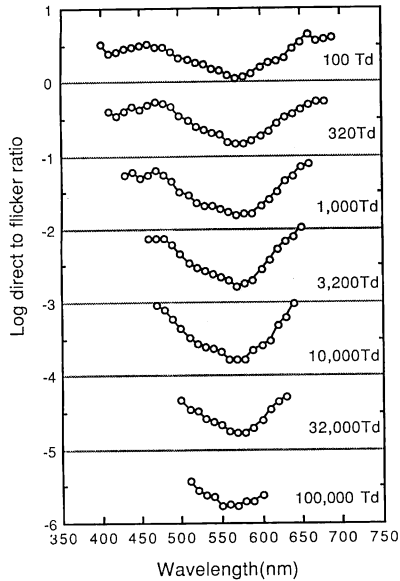


Fig. 5 Difference data between the averaged luminous efficiency functions by the direct matching method and those by the flicker method for 7 photopic levels from 100 to 100,000 Td. The data are shifted by a log unit for each level to see the functions clearly.

比に対応するものであり、この値が大きくなるほど色みの明るさへの寄与が大きくなると考えられる。

そこで Fig. 5 の曲線について見てみると、どのレベルでも 570 nm 付近に極小値を持つ形状は一致しているが、網膜照度が高くなるにつれて 570 nm 付近を中心としてその両側で勾配が大きくなっていく。すなわち、網膜照度が高くなるほど色チャンネルの明るさへの寄与が大きくなるといえる。

Fig. 6 は 480, 500, 570, 600, 620 nm の五つの波長について直接比較法と交照法の差のデータを網膜照度の関数として示したものである。これを見ると、明らかにどの波長でも網膜照度が上がるにつれて差のデータが増加し、いわゆる B/L 比と呼ばれる色の寄与を示す量が網膜照度の増加に伴って増えていく様子がよくわかる。 B/L 比が光強度のレベルとともに上昇するという現象は物体色に関してすでに報告されているが⁶⁻⁸⁾、今回の結果は光源色モードにおいてもレベルが上がると B/L 比が大きくなることを示すものである。

物体色においては、特に赤色系の色票の B/L 比の増加が著しいという報告がある。そこで、Ikeda⁷⁾、および湯尻⁹⁾らの赤の物体色の実験結果と本実験の長波長の結果を比較してみた。その結果が Fig. 7 である。横

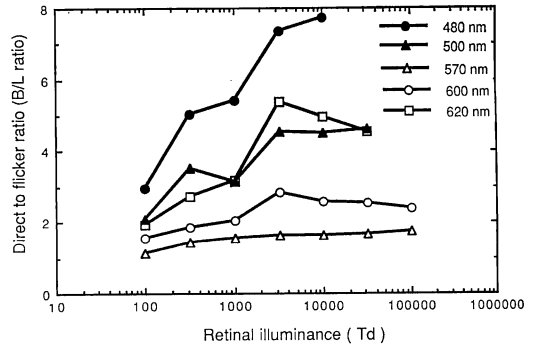


Fig. 6 The direct to flicker ratio (B/L ratio) data for 5 wavelengths, 480 nm (●), 500 nm (▲), 570 nm (△), 600 nm (○) and 620 nm (□) as a function of retinal illuminance.

軸は輝度となっているが、Ikeda⁷⁾ら、および湯尻⁹⁾らのデータについては、照度 E (lx) を式、 $L = \rho E / \pi$ によって輝度 L (cd/m^2) に変換した。ここで、 ρ は輝度率と呼ばれるもので、色票や物体の輝度と、これらと同じ条件で照明された完全拡散反射面の比を表す。また本実験のデータに関しては、Le Grand の瞳孔径と輝度の関係式¹¹⁾を用いて網膜照度 (Td) を輝度に変換した。Ikeda⁷⁾らの用いた赤の色票は色度座標が $x=0.435$, $y=0.347$ の色票、湯尻はマンセル表色系の 5R4/14 の色票を用いた結果である。Fig. 7 における本実験データでは、これらと主波長を合わせるために 600 nm の結果を用いている。本実験と Ikeda⁷⁾ら、湯尻⁹⁾らの実験では測定した輝度レベル範囲が異なり、本実験は比較的高い輝度レベル範囲で行われたことがわかる。Ikeda⁷⁾ら、湯尻⁹⁾らの結果はともに明所視レベル内で輝度、または照度の増加にともない B/L 比が上昇していくことが示されている

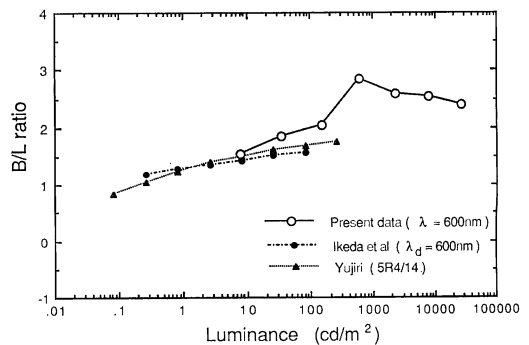


Fig. 7 Comparison of the present direct to flicker ratio data for the 600 nm stimulus (○) with the same kind of data obtained for object colors by Ikeda *et al.*⁷⁾ (●) and Yujiri⁹⁾ (▲) as a function of luminance.

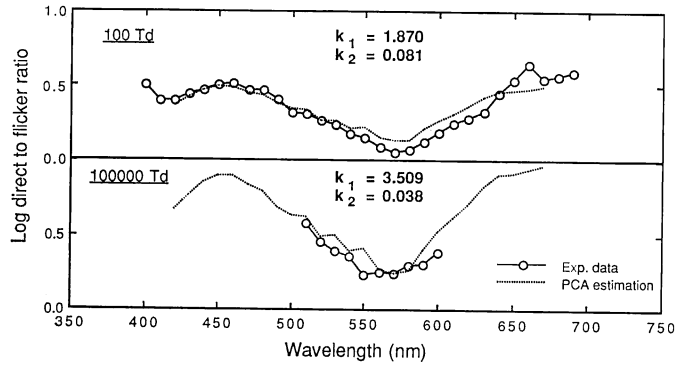


Fig. 8 Two examples of the estimations for the direct to flicker difference data by the Principal Component Analysis (PCA) by Yaguchi *et al.*⁹⁾ The k_1 and k_2 values are the 1st and the 2nd factor scores in the PCA analysis respectively calculated by a sum of the present direct to flicker ratio data weighted by the eigen vectors by Yaguchi *et al.* The dotted lines represent the PCA estimations and the open circles are the present experimental data. Top: 100 Td. Bottom: 100,000 Td.

が、本実験の結果でもほぼ同じような傾向が見られ、今回はさらに高い輝度レベルにおいても B/L 比が上昇し続けることが明確に示されている。しかし同時に、非常に高い、例えば $1,000 \text{ cd/m}^2$ を越すレベルになると、Fig. 6 や Fig. 7 にも示されるように B/L 比の上昇が飽和するという傾向も見られる。したがって、今回の結果から一般に輝度レベルが上がると色光の B/L 比は増加することがわかり、さらにこの増加はあるレベルで飽和することも明らかとなった。

B/L 比増加の傾向を波長全体にわたって定量的に表すため、ここでは以下に示すように分光視感効率における主成分分析の結果を利用した。Yaguchi ら⁹⁾は、多数の観測者から得た直接比較法と分光視感効率の差のデータの主成分分析を行い、この差は二つの主成分によってほぼ表現されることを明らかにした。すなわち、第一主成分のアイゲンベクター $E_1(\lambda)$ と第2主成分のアイゲンベクター $E_2(\lambda)$ を用いて、直接比較法と交照法の差の個人データ $D_i(\lambda)$ を以下の式(1)のように表した⁹⁾。

$$D_i(\lambda) = k_{1,i}E_1(\lambda) + k_{2,i}E_2(\lambda) \quad (1)$$

ここで係数 $k_{1,i}$ および $k_{2,i}$ は各個人の主成分得点で、実験値とアイゲンベクターの積和で求められる。

われわれは Yaguchi らの求めたアイゲンベクター $E_1(\lambda)$, $E_2(\lambda)$ を用いて、今回の平均観測者データ (7レベル) に対して、主成分得点 k_1 , k_2 を求めそれを用いて式(1)による推定を試みた。Fig. 8 は例として 100 Td と 100,000 Td の2レベルの結果である。主成分得点の

計算の際、例えば 100,000 Td レベルのように測定波長範囲 (サンプル点) が制限された場合があるが、この場合は比例配分を行って全波長域に対する主成分得点の値を算出した。図を見ると、どちらのレベルにおいても主成分分析による推定値 (点線) は実験値 (白丸) を非常によく表現していることがわかる。図にはその時に計算された主成分得点 k_1 , k_2 の値が示されている。特に k_1 の値は 100 Td より 100,000 Td の方が約2倍もの大きな値となっていることがわかる。同様な推定値と実験値の一致は他のレベルでも見られた。

Yaguchi らによれば、第一主成分のアイゲンベクター $E_1(\lambda)$ は色みの明るさへの寄与を示し、その得点 $k_{1,i}$ は各個人の波長域全体にわたる色みの寄与の大きさを示すと報告している。そこでわれわれは、Fig. 8 において計算した k_1 の値を7レベルすべてについて集計し、この第一主成分得点の値によって色みの明るさへの寄与が網膜照度によってどのように変化するかを検討した。その結果が Fig. 9 である。横軸が網膜照度、縦軸が主成分得点を表す。第1主成分得点 (○) はおよそ3,000 Td までは増加し、その後はほぼ一定の値に落ち着く。このことは色みの寄与は単調に増加し、やがて飽和することを示している。一方、長波長と短波長の相反的な増減の関係を示すとされる第2主成分の得点 (●) は特にこうした網膜照度の依存性は見られない。

こうした結果から、可視域の波長全体の関数として見た場合、色の寄与は網膜照度レベルとともに単調に増加

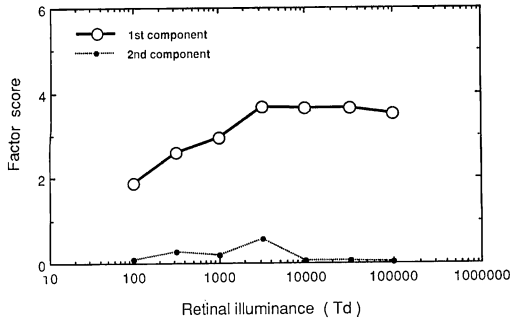


Fig. 9 The 1st (○) and the 2nd (●) factor scores in the principal component analysis as a function of retinal illuminance using the eigen vectors by Yaguchi *et al.*⁹⁾ The first factor scores are regarded to show the overall chromatic contribution in the spectral luminous efficiency function in the visible range.

し続け、およそ 3,000 Td レベルになるとこの色の寄与は飽和する、ということが定量的にもはっきりと確認された。Fig. 9 に示された第 1 主成分の得点は、今後明るさに基づく測光システム的设计において色の寄与を定量化する際の重要なデータになると考えられる。

5. 結 論

今回の結果をまとめると以下ようになる。

- (1) 直接比較法による分光視感効率曲線は網膜照度が高くなるにつれて、短波長および長波長領域の効率が相対的に上昇するという形状の変化を示す。
- (2) 交照法による分光視感効率曲線は、網膜照度が高くなるにつれて、短波長や中波長領域ではほとんど変化しないが、長波長領域ではやや効率が低下するという傾向がみられる。
- (3) 直接比較法と交照法の差、すなわち B/L 比の変化から推定された色みの明るさへの寄与は、可視

域の波長全体として見るかぎりおよそ 3,000 Td 付近までは増加し、その後飽和する。この変化の定量的な関数は主成分分析の第 1 主成分得点によって表すことができた。

文 献

- 1) S. L. Guth, R. W. Massof and T. Benzschawel: "Vector model for normal and dichromatic color vision," *J. Opt. Soc. Am.*, **70** (1980) 450-462.
- 2) H. Yaguchi and M. Ikeda: "Subadditivity and superadditivity in heterochromatic brightness matching," *Vision Res.*, **23** (1983) 1711-1718.
- 3) C. Ware and W. Cowan: "Specification of heterochromatic brightness matches: A conversion factor for calculating luminances of stimuli that are equal in brightness," NRC Publ. No. 26055 (NRC, Ottawa, 1983).
- 4) Y. Nakano, M. Ikeda and P. K. Kaiser: "Contributions of the opponent mechanisms to brightness and nonlinear model," *Vision Res.*, **28** (1988) 799-810.
- 5) CIE TC1-02: "Spectral luminous efficiency functions based upon heterochromatic brightness matching for monochromatic point sources, 2° and 10° fields," CIE Publ. No. 75 (CIE Central Bureau, Vienna, 1988).
- 6) 芦澤昌子, 池田光男, 中野靖久, "照度レベルによる色布地の明るさの実験と解析", *照学誌*, **69** (1985) 274-280.
- 7) M. Ikeda, C. C. Huang and S. Ashizawa: "Equivalent lightness of colored objects at illuminances from scotopic to photopic level," *Col. Res. Appl.*, **14** (1989) 198-206.
- 8) 湯尻 照: "照度レベルによる表面色の明るさ知覚", *照学誌*, **73** (1989) 295-302.
- 9) H. Yaguchi, M. Yamada, A. Kawada and Y. Miyake: "Individual variations of contribution of opponent color channels to brightness," *Proceedings of the CIE 22nd Session (CIE Central Bureau, 1991) in press.*
- 10) CIE TC 1.4: "Light as a true visual quantity: Principles of measurement," CIE Publ. No. 41 (CIE Central Bureau, Paris, 1978).
- 11) P. Trezona: "Luminance level conversions to assist lighting engineers use fundamental visual data," *Lighting Res. Tech.*, **15** (1983) 83-88.