

明るさ分光感度の個人差

矢 口 博 久

Individual Differences in Spectral Luminous Efficiency Functions

Hirohisa YAGUCHI

Individual difference in heterochromatic brightness matching is discussed. Various factors of individual differences in brightness sensation are introduced among with the optical density of the ocular media in eye, the physiological mechanism of brightness and the psychological attitudes of the observers. Experimental data of the spectral luminous efficiency functions for brightness are reviewed in terms of the individual difference.

Key words: heterochromatic brightness matching, flicker photometry, luminance, Helmholtz-Kohlrausch effect, spectral luminous efficiency function

人間が眼にする光の単位として使っている光度，光束，輝度，照度などは，平均的な人間の眼の光に対する分光感度*に基づいて定義づけられている。例えば，輝度は次式のように，物理量である分光放射輝度に $V(\lambda)$ の重みをかけて定義される。

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

$V(\lambda)$ は標準的な人間の眼の分光感度を表すもので，国際照明委員会 (CIE) により 1924 年に定められ，標準分光視感効率関数 (比視感度) とよばれる。その後，Judd ら^{1,2)}により，実際の平均的な人間の分光感度は $V(\lambda)$ より，短波長域において感度が高いと指摘され，Judd 修正 $V(\lambda)$ も提案されたが，一度国際的に定義された輝度などの単位を変更することは種々の混乱をまねくことになるので，現在も測光量の定義には CIE $V(\lambda)$ が用いられている。CIE は Judd 修正 $V(\lambda)$ を $V_M(\lambda)$ として，技術報告³⁾で 1 nm 間隔のデータを発表した³⁾が，これは補助的なもので，CIE $V(\lambda)$ に置き換わるものでないと明言している。 $V(\lambda)$ あるいは $V_M(\lambda)$ にしても，これらはあくまでも平均的な分光感度である。分光感度の個人差があることは，

色の異なるものの明るさが人によって異なって見えることを意味する。輝度でコントロールされた各種の標識や画像の見え方が，あるいは照度でコントロールされた部屋の明るさなどが，人によって異なることになる。したがって，個人差がどのくらいあるのかを知ることは，カラーディスプレイなどの色再現の設計，照明の設計などにも重要なことである。

本稿では，明るさ知覚に至るまでの生理学的過程のどこに個人差の要因があるのか，どの程度の個人差なのか，実験データを交えながら解説する。

1. 明るさ知覚のメカニズムと個人差の要因

図 1 は，光が眼に入って明るさ知覚が生じるまでの過程を示している。眼に入射した光はまず，眼光学系で屈折され，網膜に結像する。この間に，角膜，前房，水晶体，硝子体を通過する。ここでは，これら光学媒体の分光透過率の個人差が考えられる。特に，水晶体は加齢とともに，単波長域での吸収が増加するため，年齢による個人差の大きな要因となる。網膜に到達すると，網膜中心窩では光受容細胞に吸収される前に黄斑色素を通過する。黄斑色素の分

千葉大学工学部情報画像工学科 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33) E-mail: yaguchi@faculty.chiba-u.jp

* 正しくは分光視感効率というが，ここでは一般的な用語の分光感度を用いる。

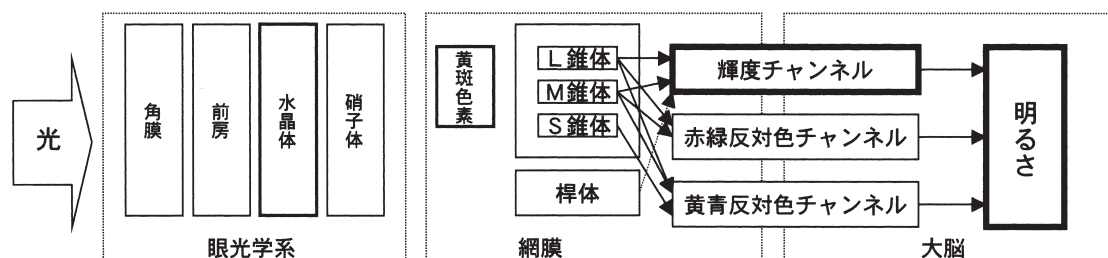


図1 明るさのメカニズムと個人差の要因。

光透過率も個人差の原因となる。網膜の光受容細胞には錐体と桿体があるが、これらの光受容細胞の分光吸収も個人差となる。また、錐体には長波長感錐体 (L 錐体)、中波長感錐体 (M 錐体)、短波長感錐体 (S 錐体) の3種類があるが、この密度分布の個人差^{4,5)}も考えられる。眼光学系、光受容細胞の個人差については、本号の解説記事を参照されたい。

錐体に吸収された後、錐体応答が水平細胞、双極細胞、神経節細胞に信号が伝達され、脳に到達し、明るさが知覚される。この過程において、「輝度」と「明るさ」を区別して使う必要がある。「輝度」は式(1)で定義されるものであるが、「明るさ」は光の強弱の見え方のもとになる視感覚の属性である。「輝度」と「明るさ」の違いはこの定義からくる。式(1)で用いられている $V(\lambda)$ は、おもに交照法により測定されたデータに基づいている。これに対して、「明るさ」を直接的に評価する測定方法は直接比較法である。交照法では、同一視野に基準となる参照光（通常は白色光を用いる）と評価対象のテスト光（分光視感効率を求める場合は単色光を用いる）を時間的に交互に呈示し、ちらつき（フリッカー）感が最小になるようにテスト光の強度を調節し、このときテスト光は参照光との視感覚が等しくなったとする。それに対して、直接比較法では、参照光とテスト光を併置した視野に呈示し、両視野の明るさの見えを直接比較し、その明るさが一致するようにテスト光の強度を調節する。この2つの方法の大きな違いは、テスト光の色が判断にかかわるかどうかである。交照法の場合、明暗のちらつきと色のちらつきは時間周波数特性の違いを利用している。明暗のちらつきは色のちらつきより高い時間周波数までちらつきを知覚することができるので、交照法の場合は、適切な時間周波数を用いることによって、色のちらつきが消えた後の明暗のちらつきだけが判断基準となる。つまり、色の違いは最小ちらつきの判断には影響しない。直接比較法の場合は、刺激をそのまま観察するので、明るさ判断に色が影響する可能性がある。一般に、交照法で等しくした（式(1)の定義に従えば、輝度を等しくし

たとえ）2つの刺激の明るさを比較した場合、色の鮮やかな刺激ほど明るく見える。この効果は、ヘルムホルツ・コールラウシュ効果として知られている。また、異なる色の色光を混色した場合の加法性についても違いがあり、交照法は加法則が成立するが、直接比較法で評価される明るさは加法則が成立しない。式(1)の波長積分は、加法則の成立を意味している。ヘルムホルツ・コールラウシュ効果と明るさの加法則不軌は、軌を一にするものである^{6,7)}。この「輝度」と「明るさ」の違いは、色覚メカニズムから、以下のように考えられている。L 錐体と M 錐体の応答の和の信号 (L+M) が輝度チャンネルに伝達され、L 錐体と M 錐体の差の信号 (L-M) は赤-緑反対色チャンネルへ、L 錐体と M 錐体の和と S 錐体の差の信号 (L+M-S) は黄-青反対色チャンネルへ伝達される。「輝度」を決定する交照法での視感度は反対色チャンネルの介入のない輝度チャンネルで行われ、直接比較法での「明るさ」の判断は輝度チャンネルに加え、2つの反対色チャンネルの介入がある。反対色チャンネルの介入の分、明るさが増し、ヘルムホルツ・コールラウシュ効果が起こり、異なる色の混色により反対色チャンネル内での色成分の打ち消しにより、明るさの加法則不軌が起こると考えられている。つまり、図1の太枠で示したように、「明るさ」は「輝度」に色成分が加わっていると考えられる。

交照法で評価される視感覚の個人差は、L 錐体と M 錐体の輝度チャンネルへの寄与の違いにより生じると考えられるが、L 錐体と M 錐体の分光感度が似ていることもあり、交照法による分光視感度の差としては現れにくいと考えられる。一方、直接比較法による明るさの判断における色の影響は個人差が大きいとの報告が数多くある。次に、明るさの個人差に関して、これまで報告されている実験データを紹介する。

2. 明るさ感覚の個人差

直接比較法による明るさマッチングの分光感度の個人データを最初にまとめたのは、CIE 技術委員会 TC 1.4 で、

技術報告⁸⁾として発行されている。2°視野を用いた7研究グループによる被験者総数31人のデータである。570 nmで正規化されたデータをみると、すべてのデータがCIE $V(\lambda)$ より、短波長側、長波長側で高い感度を示すブロードな形状を示している。これは、等輝度条件では彩度の高い波長の色光ほど明るく見えること、つまりヘルムホルツ・コールラウシュ効果を明確に示した。

IkedaとNakano⁹⁾は、点光源、2°、10°視野についてのデータをさらに集めた。6名の点光源を用いた明るさ分光感度は、Judd修正 $V(\lambda)$ と非常によく一致することを示した。2°、10°視野について、それぞれ63人、76人のデータをまとめ、それらの平均の分光感度の差は短波長域にみられ、その差は黄斑色素の分光吸収により説明した。570 nmで正規化したデータから個人差をみると、2°視野では短波長域において常用対数スケールでの σ (標準偏差)は0.34、長波長側で0.29を示し、10°視野では、それぞれ0.41、0.27であった。最大感度を示す人と最小感度を示す人の差は、大きいところで対数スケールで1.5もあり、数十倍の感度差があることを示している。これらのデータの一部は後に、CIE Publication No. 75¹⁰⁾として発刊され、2°、10°視野の明るさ分光感度の平均値は、それぞれCIE $V_{b,2}(\lambda)$ 、 $V_{b,10}(\lambda)$ として発表された。

Palmer¹¹⁾は、24の被験者について、10°視野、網膜照度1000 Tdで直接比較法により明るさ分光感度を測定した。実験データは3つのタイプに分けられ、12人はタイプ1で、CIE 10°視野の等色関数 $\bar{y}_{10}(\lambda)$ によく似た分光感度曲線を示し、明るさの加法則も成立する。8人がタイプ2で、分光感度曲線に2つの山が現れ、明らかなヘルムホルツ・コールラウシュ効果を示し、加法則も成立しない。残りの4人はタイプ3で、加法則は成立するが $\bar{y}_{10}(\lambda)$ よりブロードな分光感度曲線を示した。すなわち、ヘルムホルツ・コールラウシュ効果の度合いによって個人の明るさ知覚の特性が分類された。

多くの明るさ分光感度のデータを主成分分析することによって、個人差の要因を探ろうとする試みもなされた。Ikedaら¹²⁾は、CIE $V_{b,2}(\lambda)$ 、 $V_{b,10}(\lambda)$ のもとになった、それぞれ51人、70人の個人データについて主成分分析を行い、4つの主成分で個人差が説明できることを示した。さらに、第1、第2主成分をもとにした2つの偏差指数を用いることによって個人のデータを表現できることを示した。この結果は、明るさ分光感度の個人差が何らかの2つの要因で説明できることを意味している。

「輝度」と「明るさ」の差を反対色チャンネルの明るさへの介入というモデルに基づけば、直接比較法による明るさ分

光感度と交照法による分光感度の差が反対色チャンネルの介入と考えられる。Yaguchiら¹³⁾は、16人の被験者について直接比較法と交照法の2方法で分光感度を測定した。図2は、4人の実験結果である。●は直接比較法、□は交照法の結果で、実線はCIE $V(\lambda)$ 、破線はJudd修正 $V(\lambda)$ を示している。交照法では反対色チャンネルの介入はないので、短波長域における被験者間の差は眼光学系の吸収によるものと考えられる。各被験者の下の図の○は、直接比較法と交照法の分光感度の差を示している。眼光学系の吸収は直接比較法、交照法の両者に起こるものである。直接比較法と交照法の分光感度の差が反対色チャンネルの介入の個人差と考えられる。この差を主成分分析した結果、この分光感度の差の個人データは2つの主成分で表せることが示された。第1主成分の寄与率は約92%で、その分光特性は反対色成分の強さを表す純度弁別曲線に非常に似ていることを示した。この結果から、反対色チャンネルの寄与の大小が個人差となって現れることが示唆された。第2主成分の寄与率は5.4%と少ないが、この因子は、長波長の赤味あるいは短波長の青味のどちらが強く明るさに寄与するかを示すものである。

反対色メカニズムが明るさに寄与するという明るさモデルによって、個人データを説明する試みもなされている。中野¹⁴⁾は、3種類の錐体応答に対数型の非線形を導入し、さらにその3錐体応答に重み関数をつけて結合した(L-M)と(M-L)の2つの反対色メカニズムを考えた。そして、この2つの反対色チャンネルの応答の最大値が明るさ分光感度を決定するというモデルを立てた。この錐体応答の重み関数の違いにより個人差を説明した。

加齢による明るさ分光感度の個人差は、KraftとWerner¹⁵⁾およびSagawaとTakeichi¹⁶⁾により報告されている。前者は19~85歳の50名、後者は11~78歳の91名という膨大なデータである。両者とも交照法、直接比較法の2方法により実験を行っているが、どちらの方法でも、短波長域による加齢に伴う感度低下は水晶体、黄斑色素の光学濃度の増加で説明している。また、Sagawaらは、直接比較法と交照法の分光感度の差が短波長および長波長域で、加齢に伴って低下することを指摘している。これは、反対色チャンネルの明るさへの介入が加齢とともに弱まるとも考えられ、興味深い結果である。

明るさ分光感度の個人差の要因について、おもに生理学的な観点から述べてきた。一方、明るさマッチングの判断に、心理学的な気持ちのもちよう、心構え、意識が大きくかかわっているという見方¹⁷⁾もある。つまり、色のついた

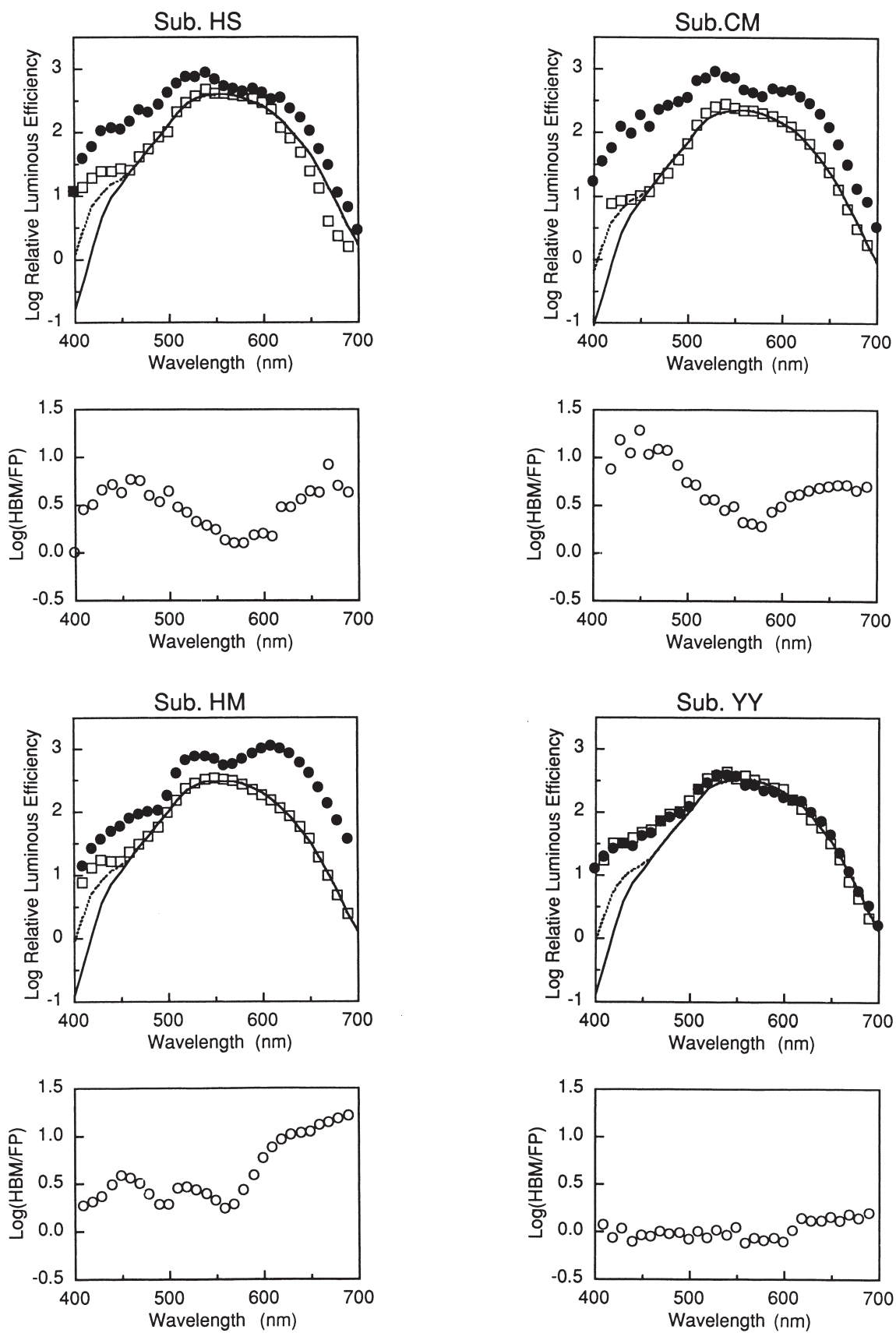


図2 直接比較法と交照法による分光視感曲線の差。

ものを明るく感じるか、色は明るさに関係ないとするかの意識である。しかし、心理学的な意識の違いに何らかの生理学的な要因が働くとも考えられる。いずれにしても、人間の明るさの判断は、視覚情報処理過程の最終的な高次レベルでなされていることは間違いないといえよう。

最後に、明るさの個人差に関する標準化の話題を紹介したい。CIE では、明るさの個人差を知ることは照明の開発等に重要なことであるととらえ、明るさに対する個人の特性を簡単に調べる方法を調査するため、技術委員会 TC1-26 を設立し検討したが、結論は得られず、引き続きレポーターとして調査を継続している。一方、国内では、年齢による明るさの個人差については、水晶体の黄濁によるものであると原因もはっきりしていることから、JIS 規格、JIS S 0031「高齢者・障害者配慮設計指針—視覚標示物—年代別相対輝度の求め方及び光の評価方法」が制定されている。

文 献

- 1) D. B. Judd: "Report of U.S. Secretariat Committee on Colorimetry and Artificial Daylight," *CIE Proceedings* (Bureau Central CIE, Paris, 1951) Vol. 1, Part 7, p. 11.
- 2) G. Wyszecki and W. S. Stiles: *Color Science, Concepts and Methods, Quantitative and Formulae* (Wiley, New York, 1982) p. 330-333.
- 3) CIE TC1-200: "CIE 1988 2° spectral luminous efficiency function for photopic vision," *CIE Publication*, No. 86 (1988).
- 4) D. R. Williams and H. Hofer: *The Visual Neurosciences*, eds. L. M. Chalupa and J. S. Werner (MIT Press, Cambridge, Mass., 2004) pp. 795-810.
- 5) J. Carroll, D. C. Gray, A. Roorda and D. Williams: "Recent advances in retinal imaging with adaptive optics," *Opt. Photonics News*, **16** (2005) 36-42.
- 6) 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.
- 7) Y. Nayatani and H. Sobagaki: "A relationship between brightness/luminance ratio and additivity-law failure," *Color Res. Appl.*, **27** (2002) 185-190.
- 8) CIE TC1.4: "Light as a true visual quantity: Principles of measurement," *CIE Publication*, No. 41 (1978).
- 9) M. Ikeda and Y. Nakano: "Spectral luminous-efficiency functions obtained by direct heterochromatic brightness matching for point sources and for 2° and 10° fields," *J. Opt. Soc. Am. A*, **3** (1986) 2105-2108.
- 10) CIE TC1-02: "Spectral luminous efficiency functions based upon brightness matching for monochromatic point sources 2° and 10° fields," *CIE Publication*, No. 75 (1988).
- 11) D. A. Palmer: "Visibility curves by direct brightness comparison in a 10° field at 1000 Td," *J. Opt. Soc. Am. A*, **2** (1985) 578-583.
- 12) M. Ikeda, J. Ikeda and M. Ayama: "Specification of individual variation in luminous efficiency for brightness," *Color Res. Appl.*, **17** (1992) 31-44.
- 13) H. Yaguchi, A. Kawada, S. Shioiri and Y. Miyake: "Individual differences of the contribution of chromatic channels to brightness," *J. Opt. Soc. Am. A*, **10** (1993) 1373-1379.
- 14) 中野靖久: "明るさ知覚モデルとその個人データへの適用", *光学*, **21** (1992) 705-713.
- 15) J. M. Kraft and J. S. Werner: "Spectral efficiency across the life span: Flicker photometry and brightness matching," *J. Opt. Soc. Am. A*, **11** (1994) 1213-1221.
- 16) K. Sagawa and K. Takeichi: "Spectral luminous efficiency as a function of age," *J. Opt. Soc. Am. A*, **18** (2001) 2659-2667.
- 17) Y. Nayatani and H. Sobagaki: "Causes of individual differences on brightness/luminance (B/L) ratios," *J. Light Vis. Env.*, **27** (2003) 160-164.

(2005 年 2 月 2 日受理)