明るさの分光視感効率と視力

専門会員 佐 川 賢 (生命工学工業技術研究所)

Spectral Luminous Efficiency Function and Visual Acuity

Fellow Member Ken Sagawa

(National Institute of Bioscience and Human-Technology)

ABSTRACT

In order to investigate the effect of visual acuity on the luminous efficiency function determined by heterochromatic brightness matching (HBM), the spectral luminous efficiency function and visual acuity were measured for 15 observers including 8 high-acuity and 7 low-acuity observers under three artificially corrected conditions: high acuity, low acuity and no correction. It was found that the shape of the spectral luminous efficiency function did not differ between the two groups with high-acuity and low-acuity nor among the three artificially corrected acuity conditions. These findings were confirmed by principal component analysis of the data. It is concluded that it is difficult to classify the type of luminous efficiency function for brightness by considering the visual acuity of an observer.

KEYWORDS: Luminous efficiency function, Brightness, Visual acuity, individual variation

1. はじめに

明るさに基づく測光システムの開発は CIE を中心として現在盛んに検討されている。その重要な問題点の一つは、基礎となる明るさマッチングデータの個人差が非常に大きいことである^{1)~2)}。国際照明委員会 CIE がまとめた明るさの分光視感効率によると、この差は短波長端や長波長端ほど大きく、最大で約1.5対数単位すなわち30倍にもなるところがある。こうした差があるため、例えば新しく開発されたランプの明るさなどを主観的に判定する場合など、観測者によって明るく判定されたり暗く判定されたりする。観測者の分類や適切な評価者の基準確立が必要とされる。

CIE はこの個人差の問題に対して技術委員会 TC1-26を設けて検討を続けている。すでに幾つかの研究があり^{3)~6)}、これらの実験的検討から、観測者のばらつきの原因の一つは視覚系の色応答の寄与の違いであると推定された^{4)~6)}。またこの結果に基づいて観測者の分光視感効率の型を分類すると、以下のような2つの特徴的な型が存在することも明らかとなった。

- (1) CIE $V(\lambda)$ に類似し、滑らかで比較的中の狭い感度曲線を示す型、
- (2) CIE $V(\lambda)$ に比べて短波長と長波長領域の効率が高く、およそ530nm と600nm 近傍の2カ所に視感効率の極大を示す型、

前者は色応答の寄与が少ない観測者で「輝度強調タイプ」の観測者、後者は色の寄与が大きい「色強調タイプ」の観測者と呼ばれる。こうした色応答の寄与のばらつきがなぜ、どのようにして起こるかについては解明されておらず、また、他の視機能との関連等についての研究も殆どない。本研究では明るさ視感効率のば

らつきを視機能との関連について検討し、視感効率の個人の型を分類する新しい方法の可能性を検討する。

さて、明るさの分光視感効率に影響を及ぼすと考えられる視機能の中で、特に重要と考えられるものが視力である。例えば、最小輪郭法(MDB)などで2つの視野の境界の見えに注目すると、いわゆる $V(\lambda)$ に近い輝度強調タイプの視感効率曲線が得られる⁷⁾。また、輪郭の情報は主として輝度チャンネルから得ているという考えもある⁸⁾。こうした考えによれば、視力の良い観測者は多くの境界や輪郭情報を取得できるため、明るさの分光視感効率において輝度強調タイプが期待される。逆に、視力の悪い観測者は輪郭情報が少なくなり、結果として色の寄与がより大きくなる。いわゆる色強調型の視感効率となることが予想される。こうした予測がありながら、これまでの明るさの視感効率に関する研究では視力との関連性は殆ど検討されおらず、前述した予測の信憑性や視力の影響についてはまだ未知の部分が多い。簡便で信頼性のある観測者の分類法を開発する上でも一つの重要な課題である。

そこで、本研究では特にこの視力と分光視感効率の係に焦点をあて、視力が明るさの分光視感効率にどのような影響を及ぼすかについて実験的検討を加え、観測者の分類の可能性を検討することにした。

2. 実験

2.1 装置

本実験では分光視感効率の計測と視力の計測を同一観測者について行い、その関連性を検討する。そのため、分光視感効率の計測装置と視力計測装置を同一の実験装置内に配備し、迅速に両測定が行えるようにした。

図1 実験装置図及び視力測定用モアレパタンの拡大図。

図1は装置図である。キセノンランプ(500W)からの光を3光路に分け、その2つの光路を直接比較法の参照光及びテスト光として用いる。両光路とも濃度フィルタ、ウェッジ、干渉フィルタ等を通して最終的に積分球に入射し、その出口口に視角にして2度の半円形の開口部を設け、その開口部を観測者はミラーを通して併置して見る。すなわち自然視である。2つの併置した半円形視野の間隔は25分で、これは低視力条件のばけによる2つのフィールドの重なりを避けるように設定した。参照光は白色、その輝度は10cd/m²で定常提示である。テスト光は干渉フィルタによる単色光で、450から670nmの間の約20nmステップの12色である。それぞれのピーク波長は、450, 468, 488, 508, 530, 550, 568, 590, 615, 630, 649, 669nmである。その光強度は光学ウェッジによって連続可変できる。これら参照光とテスト光によって観測者は明るさマッチングを行う。視距離は50cm。分光視感効率率は各波長5回のマッチングを行い、これを短波長から長波長側への系列、及びその逆の系列の合計2系列に分けて行うので、1波長につき計10回のマッチングデータが得られ、その平均をとってデータとする。

視力の測定は、図1の中央の光路にある mirror box の手前にグレーティングパターンを2枚密着したモアレパターンを提示する。この時、明るさマッチング用の観測者の前のミラーは取り外されるので、明るさマッチング用の視野はもはや見え、観測者に見えるものはモアレパターンのみである。視距離は50cmで、視野は2度、明るさマッチングと同様である。観測者は、手元のスイッチでグレーティング間の角度 θ を変えることによって連続的にモアレパタンの粗さを変え、縞が認識できる最小の粗さ、すなわち縞の検出閾を決定する。モアレ縞の粗さと角度は相関があるので、観測者が縞の粗さではなく縞の角度で判定することも可能である。これを避けるため、モアレ縞全体の角度を毎回ランダムにセットして、角度による手がかりをなくした。視力データは明るさマッチングのセッションの直前に10回の連続測定を行い、その平

表1 観測者15名の年齢、性別、視力、及びグループ分け

観測者	年齢	性別	視力*	分類
KS	43.0	男性	1.038	高視力者
HI	20.0	男性	0.602	低視力者
KK	20.0	女性	1.126	高視力者
AN	17.0	女性	1.008	高視力者
KM	21.0	女性	0.726	低視力者
MH	20.0	女性	1.776	高視力者
SC	20.0	男性	1.204	高視力者
SI	20.0	女性	1.364	高視力者
SO	26.0	女性	1.450	高視力者
TS	20.0	男性	1.047	高視力者
NK	25.0	女性	0.437	低視力者
SA	29.0	女性	0.553	低視力者
OB	24.0	男性	0.774	低視力者
MN	48.0	女性	0.911	低視力者
AT	24.0	男性	0.657	低視力者

* 今回の装置で計測した値

均をとってデータとした。

2.2 観測者

観測者は全体で15名。各観測者の性別、年齢、裸眼視力、を表1に示す。なお、裸眼視力は本実験で新たに測定した値である。後の検討のため、今回の視力データを基に、表に示すように観測者15名を高視力者8名、低視力者7名に分類した。色覚は全員正常であることを石原式色盲検査表にて確認した。

2.3 手順

実験手順は、各観測者について以下の3条件を作成してそれぞれの条件について、まず視力測定(10試行)と次に分光視感効率率測定(各波長5試行、12波長)の組み合わせを1セッションとして測定する。このセッションを日を変えて2回繰り返して、1つの条件の測定を完了する。なお、2セッション目は波長の呈示順を逆転する。

被験者へのインストラクションは視力測定に関しては「(モアレによる)縞模様がちょうど見えなくなるところに設定すること」、また、明るさマッチングに関しては「左右の2つの半円がちょうど同じ明るさに見えるところに設定すること」というようにきわめて単純なインストラクション用い、他の手がかりとなるようなインストラクションは与えなかった。また、視力と明るさマッチングの2つの測定の関連についても、特にインストラクションを与えなかった。

各条件は以下の通りである。

- A. 裸眼視力 (矯正レンズなしの視力)
- B. 矯正高視力条件 (視力検査表において視力1.5が得られるよう矯正した視力条件)
- C. 矯正低視力条件 (視力検査表において視力0.1が得られるよう矯正した視力条件)

一般にBの矯正高視力条件はマイナス(凹)レンズを用いて矯正する。ただし、高い裸眼視力を有する観測者がCの低視力条件を得るためにはプラス(凸)レンズを使用して視力を低下させて実現する。また0.1以下の低い裸眼視力を有する観測者がCの低視力条件を得るためには、弱いマイナスのレンズによって矯正を弱めて実現する。

3. 結果と考察

図2は裸眼条件にて15名の観測者の分光視感効率率を測定し、高視力グループ8名と低視力グループ7名に分類して、それぞれの

図2 裸眼条件における高視力者グループ(○)と低視力者グループ(●)の分光視感効率(上図)と標準偏差(下図)。上図の実線及び破線はそれぞれ高視力者グループと低視力者グループの平均値。

グループの観測者の個々のデータ及びグループ平均(幾何平均)と標準偏差を示したものである。各観測者のデータはすべて570 nm(実際は干渉フィルタのピーク値である568nm)で規格化した。ここで、低視力者グループの1名は極端に感度が低く、450nmと670(669) nmでは光量不足でデータが得られなかったため、図2では平均値の母集団を変化させないように、低視力者グループ7名のデータを推定してプロットした。

高視力者(白丸), 低視力者(黒丸)とも、ともにばらついたデータになっているが、平均値どうしを比較すると、やや長波長領域で低視力者グループの効率が低下しているものの、全体として高視力者グループと低視力者グループにはあまり顕著な差は見られない。標準偏差でも、低視力者グループの偏差がやや大きくなっているものの、全体として高視力者、低視力者のグループ間の差は見られない。

今回のデータを570nmで規格化した意味は、あくまで分光視感効率の相対的な形状の変化に注目したためである。すなわち、今回の標準偏差は570nmを中心として短波長領域や長波長領域の形の変化がどのくらいのばらつきをもっているかを知る手がかりとなる。特に色の寄与は長波長端や単波長端に現れるので、そこでは大きなばらつきを生ずることが期待されたが、今回のデータを見る限り、どちらの視力グループも同様なばらつきの程度となり、低視力グループに特別に色の寄与があることを示唆するデータとはならなかった。

前述したように、低視力グループは明るさの判断において輝度情報よりもむしろ色情報を多く用いることが予測され、その結果、分光視感効率の形状は波長両端で高い効率を示すことが期待されたが、今回の結果を見る限り、そのような傾向はない。一方標準偏差を見ても、長波長領域でばらつきがやや大きいことが示されており、この点に関しては色情報を用いることによる個人差と考えられなくもないが、前述したように低視力者グループには極端に効率の低い観測者がいることを考えると、ここでも両グループ間で差があるとは言い難い。

すなわち図2の結果を見る限り、低視力者がより色情報を用いる色強調型の視感効率を示したり、逆に高視力者が輝度強調型の観測者であるという予測は成り立たなかった。これは、高視力者グループの中にもはっきりとした色強調型の分光視感効率を示す観測者もいれば、また逆に低視力者グループの中にも輝度強調型の分光視感効率を示す観測者が見られたことからわかる。図3にそのような典型的な観測者を示した。白丸(○)で示されたデータは表1の観測者KKであり、高視力者の一人であるが、この観測者は長短波長両端にふくらみを持つ典型的な色強調型の観測者である。また黒丸(●)点線で結ばれたデータは低視力者の一人SAであり、この観測者は輝度強調型の視感効率を示した。なお、細い実線は今回の15名全体の平均である。

次に、視力の影響をより明確にするために、各個人に矯正レンズをかけ、人工的に高視力条件(視力1.5に対応)と低視力条件を(視力0.1に対応)設定して、各条件において分光視感効率を測定

図3 高視力で色強調型の観測者(○), 及び低視力で輝度強調型の観測者(●)の典型的な例。細い実線は15名の観測者の平均値。

図4 矯正高視力条件(□), 矯正低視力条件(△), 裸眼条件(○)における15名の観測者の平均分光視感効率(上図)と標準偏差(下図)。

した。その結果が図4である。

図4では、矯正高視力条件、矯正低視力条件、および比較としての裸眼条件の3条件における15名の全観測者の平均値及び標準偏差が示されている。矯正高視力条件(□), 矯正低視力条件(△), さらに裸眼条件(○)の全15名の平均を比較すると、ここでも、各条件間で殆ど有意な差はなく、相互のデータは良く一致している。このことは標準偏差にも表れており、各条件間でデータのばらつきにも殆ど差がないことがわかる。低視力条件では、マッチングの視野の輪郭は大きくぼけるので輝度の輪郭情報よりも、むしろ色情報を優位に用いて明るさを判断し、そのため長短波長両端の高彩度刺激では視感効率が上昇すると考えられたが、実験結果からはその影響は全く見られなかった。この結果から、少なくとも分光視感効率の形状から見る限り、視力条件は矯正的に変化させた場合においても明るさの分光視感効率に影響を与えないことが明らかとなった。

さて、分光視感効率の形状に関しては、 $V(\lambda)$ に近似した輝度強調型と2つの極大を持つ色強調型の2つの特徴的な型があることが報告されており、それを分類する手法として主成分分析が有力であることが報告されている^{4)~5)}。そこで本研究においても15名の観測者のデータを主成分分析にかけ、ばらつきの成分分析及び観測者の分類を行って、その結果を視力と対応させて検討してみることにした。

図5(a), (b), 裸眼条件における15名の観測者の分光視感効率の主成分分析結果。(a)因子負荷量。(b)第1主成分得点及び第2主成分得点平面上にプロットした高視力者8名(○)及び低視力者7名(●)の布置。

まず、図5(a), (b)は裸眼条件における15名の観測者のデータを主成分分析した結果を示す。図5(a)は第1, 第2主成分の因子負荷量を表し、図5(b)は各観測者について因子得点を計算し、第1, 第2因子得点の平面上にプロットしたものである。図5(a)の因子負荷量については、これまでの主成分分析の結果とはほぼ同様に、第1因子として長、短波長両端に高い因子負荷を持つ特性が得られ、これが色情報の寄与を示す因子と考えられる。一方、第2因子は長波長と短波長領域で寄与の極性が異なる特性が得られ、これも従来の結果と一致する。そこで図5(b)で、色の寄与を表す第1因子に注目して各観測者の布置を見てみると、白丸と黒丸で表された観測者の(裸眼)視力の差が、第1軸上では特に表れていない。もし、低視力観測者が色情報をより多く取り入れて明るさを判定しているとしたら、黒丸の点は全体として第1軸上の正方向へ偏るはずである。しかし、この結果ではそのような傾向はなく、すなわち、視感効率関数の類型と視力とは互いに独立であることがこの分析からわかる。

観測者の視力と分光視感効率の型の独立性をさらに確認するために、図4に示された矯正高視力条件、矯正低視力条件、裸眼条件の3条件のデータを同時に対象として主成分分析を行って検討

図6(a), (b), 矯正高視力条件(□, ■), 矯正低視力条件(△, ▲), 及び裸眼条件(○, ●)における15名の観測者の分光視感効率全体の主成分分析結果。(a)因子負荷量。(b)第1主成分得点及び第2主成分得点平面上にプロットした各条件の観測者15名の布置。(□△○)は高視力者、(■▲●)は低視力者を表す。点線、破線、実線は各矯正視力条件の観測者群を囲んだもの。

した。3条件を同時に分析することの意味は、各条件間の相関が明確になり、従って視力の影響をよりの確に分析できることである。すなわち、15名の観測者の3条件による延べ45名の観測者の主成分得点を計算し、図5(b)同様に、第1主成分得点、第2主成分得点を軸とする2次元平面にプロットすると、各条件のグループの布置によって視力条件の影響が正確に把握できる。

結果を図6(a)、(b)に示す。図6(a)は3条件同時に分析した時の第1、第2因子負荷量であり、これはこれまでの結果とほぼ同様である。図6(b)は因子得点の平面(第1因子得点 vs 第2因子得点)上に、15名の観測者の得点を条件ごとにシンボルを変えてプロットしたものである。図2と同様に裸眼における高、低視力観測者の別をそれぞれ白抜き、黒抜きの別で表している。各条件ごとの15名の観測者群を実線または点線、破線で結んでみると、視力条件に従って全体のグループが第1軸方向で移動する傾向は全く見られず、この解析からも、視力と分光視感効率は互いに独立な関係、すなわち無相関であることが確認できた。

4. まとめ

今回の結果から、当初予測した結果、すなわち視力によって分光視感効率関数の輝度強調型と色強調型が分類できるという考え方は、実験的に否定された。すなわち、高視力であっても色強調型の観測者が見られ、また逆に低視力であっても輝度強調型の観測者が見られる。また、そうした観測者のタイプは矯正的に視力を変えても変わらないことが判明した。

明るさ決定の生理的なメカニズムはまだ十分明らかではないが、視覚系の中に存在する輝度チャンネルと色度チャンネルの合成として明るさが決定されると考えると、観測者の類別に係わると考えられる色度チャンネルの寄与が視力とは独立したメカニズムであることが推測される。少なくとも空間の解像力とは独立した働きであると言えよう。色情報の明るさへの寄与がどのように行われているか、またその寄与の程度が観測者によってなぜ異なるかは、さらに高次の明るさ知覚の解明によらねばならない。今回の結果は網膜レベルでは、その解明が難しいことを示したものと言えよう。

参考文献

- (1) M. Ikeda and Y. Nakano: "Spectral luminous-efficiency functions obtained by direct heterochromatic brightness matching for point sources and 2° and 10° fields," J. Opt. Soc. Am., A3, pp.2105-2108 (1986)
- (2) K. Sagawa and K. Takeichi: "Mesopic spectral luminous efficiency functions: Final experimental report," J.

Light Vis. Env., 11, pp.22-29 (1987)

- (3) D. A. Palmer: "Visibility curves by direct comparison in a 10° field at 1000Td", J. Opt. Soc. Am., A2, pp.578-583 (1985)
- (4) M. Ikeda, J. Ikeda and M. Ayama: "Specification of individual variation in luminous efficiency for brightness", Color Res. Appl., 17, pp.31-44 (1992)
- (5) H. Yaguchi, A. Kawada, S. Shioiri and Y. Miyake: "Individual differences of the contribution of chromatic channels to brightness", J. Opt. Soc. Am., 10, pp.1373-1379 (1993)
- (6) 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, 21-10, pp.705-713 (1992)
- (7) R. M. Boynton and P. K. Kaiser: "Vision: The additivity law made to work for heterochromatic photometry with bipartite field", Science, 161, pp.366-368 (1968)
- (8) M. S. Livingstone and D. H. Hubel: "Psychophysical evidence for separate channels for the Perception of Form, Color, Movement, and Depth", J. Neuroscience, Nov., 7-11, pp.3416-3468 (1987)

(受付日1995年10月9日/採録日1996年3月12日)

きがわ けん 佐川 賢 (専門会員)

通産省工業技術院生命工学工業技術研究所人間情報部、感覚知覚研究室、室長
〒

昭和24年7月9日生まれ、昭和50年東京工業大学大学院物理情報工学専攻修士課程卒。同年4月通産省工業技術院製品科学研究所入所。平成5年同省、同院生命工学工業技術研究所人間情報部勤務。現在同所感覚知覚研究室長。工学博士、昭和57年取得、東京工業大学。

視覚の心理物理学的手法を用いて、特に色覚に関する研究全般に従事。これまで、両眼視の色融合限界に関する研究、薄明視に関する視感効率計測と測光システムの開発、さらに、色彩を中心とした視環境評価の研究を行う。昭和59年～昭和60年、オランダアイントホーヘン工科大学知覚研究所客員研究員として勤務。昭和59年、照明学会研究奨励賞、平成元年、科学技術庁長官賞受賞。日本光学会、日本視覚学会、日本色彩学会、照明学会会員。日本照明委員会副会長、国際照明委員会第1部会長、TC1-21, TC1-37委員長。