ラゴリオ色票による薄明視感度の測定

正会員 矢口 博久* 結城 浜美* 三宅 洋一* 久保 走一*

Mesopic Luminous Efficiency Functions Measured with a Lagorio's Color Chart

Hirohisa Yaguchi (Member), Hamami Yuki, Yoichi Miyake
and Souichi Kubo

(Faculty of Engineering, Chiba University)

ABSTRACT

Change of spectral sensitivities for mesopic vision was investigated under both the fluorescent illuminant and the natural twilight using a Lagorio's color chart made up of 24 different color strips inserted in between 29 step gray scales. On each color strip of the Lagorio's color chart, there is a minimally distinct border (MDB) between the color strip and the adjacent gray scale. The MDBs appeared in 24 color strips make up an envelope curve, which we call the MDB curve, on the Lagorio's color chart. The MDB curves were determined at the various illuminance levels by three observers. The experimental results from all observers showed that the luminous efficiencies for red color decreased with the decreasing of illuminance. The dependence of the luminous efficiencies for the other color on the illuminance change was different from observer to observer. Finally, an algorithm to estimate the spectral luminous efficiency function from the MDB curves observed on the Lagorio's color chart was discussed.

1. はじめに

人間の明るさに対する分光感度は照度レベルに応じて変化する。これは暗くなるに従って赤の感度が低下し、青の感度が上昇する現象、いわゆるブルキンエ現象として知られている。自然環境下で照度レベルが最も変化するのは夕刻時で、約1時間半の間に1,000 lxから0.1 lxと1万分の1に低下する¹⁾。この時間帯において、人間の視覚の分光感度も急激に変化しているはずである。このような薄暮時における照明視環境の整備は重要な課題であり、自然環境下での視覚の分光感度の変化を知ることは大切である。薄明視における明るさの分光感度の測定はこれまでも数多く行なわれ、その標準的なものも報告されている²⁾。しかし、明るさの分光感度の測定には単色光が必要なため、これらのデータはすべて分光器を用いた暗室での測定データである。

そこで本研究では写真フィルムやテレビジョン撮像系の疑似的な分光特性を調べるときに用いられるラゴリオ色票を視感度の測定に応用し、自然環境下における視感度の迅速な測定を試みた。さらにその測定結果をもとに分光感度の推定を行なった。

2. 実験

2.1 ラゴリオ色票による視感度の測定法

ラゴリオ色票（本実験では村上色彩技術研究所製を使用した）とは図1に示すように主波長の異なる24種の短冊型の色票と29段階（濃度差約0.05）の灰色色票を交互に配置したものである。表1にその色票の標準照明Cによる視感反射率、色度座標および主波長を示す。また表2に灰色色票の視感反射率を示す。ラゴリオ色票を観察すると、各色票の帯とそれと隣接した灰色色票の帯のどこかに境界の明確さが最小になるところ（Minimally

図1 ラゴリオ色票

* 千葉大学工学部画像工学科

昭和62年春期 応用物理学関係連合講演会にて発表。

表1 ラゴリオ色票の純色色票の調色データ

資料番号	Y	x	y	λ_d
1	7.29	0.325	0.181	553 C
2	7.12	0.380	0.202	536 C
3	7.09	0.410	0.222	506 C
4	9.10	0.485	0.270	495 C
5	10.80	0.530	0.321	630
6	17.04	0.551	0.347	616
7	23.87	0.555	0.359	602
8	26.96	0.540	0.385	595
9	44.37	0.496	0.424	585
10	61.64	0.457	0.468	577
11	73.91	0.435	0.480	574
12	70.71	0.406	0.484	571
13	46.69	0.351	0.496	563
14	28.51	0.287	0.486	550
15	16.28	0.227	0.442	516
16	12.57	0.209	0.360	495
17	9.30	0.191	0.302	489
18	7.72	0.189	0.262	484
19	7.10	0.184	0.236	481
20	7.02	0.181	0.293	477
21	5.16	0.187	0.179	473
22	4.23	0.193	0.142	467
23	4.21	0.205	0.132	458
24	4.79	0.269	0.140	561 C

(注) Cは補色主波長を表わす。

表2 ラゴリオ色票の灰色色票の視覚反射率

灰色番号	反射率	灰色番号	反射率	灰色番号	反射率
1	89.0	11	28.0	21	8.8
2	79.3	12	25.0	22	7.9
3	70.6	13	22.0	23	7.0
4	62.9	14	19.8	24	6.2
5	56.1	15	17.7	25	5.6
6	49.9	16	15.7	26	5.0
7	44.5	17	14.0	27	4.4
8	39.6	18	12.5	28	3.9
9	35.3	19	11.1	29	3.5
10	31.5	20	10.0		

distinct border, MDB) が存在する。そして、ラゴリオ色票を全体的にみると、各色票における MDB が連なって曲線(これを MDB 曲線と呼ぶことにする)が現われる。MDB を狭む色票と灰色色票とが同じ明るさを示すとは限らないが³⁾、この灰色色票の反射率あるいは明度(これを等価明度と呼ぶことにする)でその色票の色に対する視感度を表わすことにする。もちろん、色票からの反射光は単色光ではないので、この各色票の MDB を連ねた曲線は疑似的な分光感度でしかない。

被験者はこのようにして観測される MDB 曲線をパンタグラフ(製図用伸縮器)を用いてトレースし、別紙に記録した。

ラゴリオ色票全体のサイズは 25cm × 18cm、帯色票の幅および灰色色票の幅はともに 5 mm である。これを 40cm の距離から観測したので、視角にすると全体のサイズは 35° × 25°、色票の幅は 0.7° である。両眼自然視で実験を行なった。

2.2 実験条件

測定は観察ブースおよび自然環境下で行なった。

2.2.1 観察ブース

自然環境下の実験にはいる前に、照明条件の再現性のある観察ブースを作成しラゴリオ色票による視感度の測定を行なった。また、これは観察者が測定に慣れる練習の意味もある。ブースは光源に東芝 FL20 S-W-EDL 色評価用純正色蛍光灯を用い、照度が 0.01~800 lx まで可変の装置である。図 2 はこの蛍光灯の相対分光放射分布である。蛍光灯は 12 本で、その内 3 本にスリット幅を調節できる黒紙が巻かれている。高照度における照度調節は

図 2 観測ブースの光源に用いた蛍光灯 FL20 S-W-EDL の相対分光放射分布

蛍光灯の点灯本数を変えることにより、また低照度における調節はスリット幅を調節することにより行なった。ラゴリオ色票面での照度の均一性は、色票中心部と周辺部で約 1 % の差がある。眼の順応状態を安定させるため、人間の視覚系は暗順応より明順応の方が進行速度が速いこと⁴⁾を利用して、低照度から高照度へ照度レベルを変化させて測定を行なった。観測者は約 20 分の完全暗黒での暗順応の後に測定を始めた。測定照度は 0.01 から 700 lx まで、0.5 log 間隔である。ある照度レベルから次の照度レベルへ移行する際は、約 1 分間その照度レベルに眼を順応させてから測定を行なった。各照度レベルにおいて 2 回の MDB 曲線を求めた。各観測者について、このような測定を日を変えて 5 回行なった。

2.2.2 自然光

自然環境下の実験は千葉大学工学部 B 棟 2 階の西向きの部屋で行なった。当然ながら室内灯はすべて消灯した。西側のドアを開けるため太陽光が直接当たることもあるが、ほとんどはベランダ、校舎の陰になる。南側に他の校舎からの蛍光灯があり、西側には街路の高圧水銀灯がある。しかし壁などの障害物によりこれ

図 3 自然照明光の分光放射分布の変化

図 4 自然照明光による照度の変化

らの光が目にはいったり、ラゴリオ色票を照らすことはなかった。測定は約 700 lx の照度から始め、0.21log 間隔で 0.011x まで行なった。観測者の眼は常に周囲の環境に順応させておいた。実験期間は 1986 年 11 月から 1987 年 2 月で、各観測者 5 日以上の測定を行なった。

また 1987 年 1 月 9 日には、視感度の測定と同時に分光放射輝度計 (TOPCON SR-1) により、自然光による完全白色板の分光放射輝度を測定した。図 3 はその測定結果である。また、そのときラゴリオ色票上での照度変化を図 4 に示す。

2.3 被験者

被験者は HYU (女, 22 歳), MF (男, 24 歳), HYA (男, 36 歳) の 3 人で全員色覚正常である。HYA は視覚の心理物理学実験の経験が豊富であるが、他の 2 人は今回が初めてであった。

3. 結果および考察

3.1 観測ブースでの測定結果

蛍光灯照明下におけるラゴリオ色票上での MDB 曲線の照度レベルによる変化を図 5 に示す。3 人の観測者について、3 セッションから 5 セッションの平均値を示している。横軸は色票の主波長を、縦軸は灰色色票の番号を示す。3 人の被験者に共通して、主波長が約 580 nm より長波長側では照度が高くなるにつれて MDB 感度が高くなっており、いわゆるブルキンエ移行を示している。しかし、短波長域において、HYA は高照度になるにつれて感度の低下がみられるが、他の 2 人については系統的变化はみられなかった。

図 5 ラゴリオ色票上での MDB 曲線の照度レベルによる変化 (蛍光灯照明下)。(a)観測者 HYA, (b) HYU, (c) MF。

図 6 は主波長の異なる 4 色に対する等価明度の照度レベルによる変化を明所視レベルを基準にして表わしたものである。ここでは CIE 1976 $L^*u^*v^*$ の L^* を明度としている。縦軸の値 ΔL^* は各照度における L^* の明所視レベルの L^* から差を示している。明所視レベルの L^* は 100 lx 以上の平均値を用いた。なお

図 6 等価明度の照度レベルによる変化 (蛍光灯照明下) (a) 主波長 473 nm, (b) 516 nm, (c) 577 nm, (d) 630 nm

破線は暗所視明度と明所視明度の差を表わしている。3 人の観測者に共通の傾向を示したのは赤の色票の結果 (図(d), 主波長 630 nm) だけであった。青の色票の結果 (図(a), 主波長 473 nm) においては 3 観測者で全く異なる傾向を示している。観測者 HYA の結果は、10 lx 付近から照度が低下するに従って等価明度が上昇し破線で示した暗所視明度に近づいていく。MF の結果は照度レベルによる変化が少なく、また HYU の結果は照度の低下に伴って青の等価明度が低くなる逆ブルキンエ効果を示している。

3.2 自然環境下での測定結果

自然環境下においては日々によって天候状態が異なるので、同一の照明条件は再現されにくい。したがって、ここではある一日における代表的な測定結果を示す。図 7 は自然環境下における 3 人の被験者の測定結果である。測定日は被験者によって異なる。明所視レベルを基準にした等価明度の照度レベルによる変化

図 7 ラゴリオ色票上での MDB 曲線の照度レベルによる変化 (自然環境下) (a)観測者 HYA, (b) HYU, (c) MF

図 8 等価明度の照度レベルによる変化 (自然環境下)
(a) 主波長 473 nm, (b) 516 nm, (c) 577 nm, (d) 630 nm

を図 8 に示す。観測者 HYA, MF は蛍光灯下における図 6 と同様の傾向を示している。HYU の蛍光灯下での測定で見られた青の色票における逆ブルキンエ効果はここでは見られなかった。

図 7, 8 を総合的に見ると、自然環境下では 10 lx から 0.1 lx において視感度の変化が著しいことが判明した。この変化は約 20 分という短い間に起きることが図 4 からわかる。本実験では明るさだけに注目したが、この 20 分間は色票の色の見えも変化が著しいと観測者から報告があった。

3.3 CIE 標準観測者との比較

CIE 明所視標準観測者がラゴリオ色票を観察したとすると、ある色票の帯と隣接する灰色色票の内、MDB はその色票と等しい明度の灰色色票の所に現われる。そして各色票と明度の等しい灰色色票の位置を連ねた曲線が現われる。CIE 標準観測者により観測されるラゴリオ色票上での MDB 曲線の理論値を本実験で用いた蛍光灯照明条件で求めた。図 9 の太い実線、図 10 の太い破線はそれぞれ明所視標準観測者、暗所視標準観測者によるもので

図 9 明所視におけるラゴリオ色票上での MDB 曲線の観測者間の差

図 10 暗所視におけるラゴリオ色票上での MDB 曲線の観測者間の差

ある。

3 人の被験者の MDB 曲線を明所視および暗所視標準観測者のものと比較をそれぞれ図 9, 図 10 に示す。明所視は 100 lx, 暗所視は 0.01 lx の実験結果を用いた。暗所視の結果は観測者間に大きな差はみられず、標準観測者とも赤の領域を除いてよい一致を示している。赤の領域において 3 観測者とも標準観測者より高い感度を示している。この原因は、0.01 lx でも赤の色が見えることから赤錐体が介入しているためと考えられる。この暗所視レベルでの長波長域における赤錐体の介入は単色光を用いた分光比視感度の測定においても観測されている^{2), 4)}。

明所視について言えば、HYA の結果は標準観測者による予測値に近い曲線を示しているが、他の 2 観測者は特に青の領域で標準観測者より高い感度を示している。この原因として、明所視レベルでは色がはっきりと見えるため MDB の判断が困難になり、直接比較法的な明るさの判断をしたためと考えられる。標準比視感度関数のもとなった交照法や MDB 法の場合は色みの強さは判断に影響しないが、直接比較法の場合は色みの強さが明るさ感覚に介入すると考えられている⁵⁾。色覚のメカニズムの観点から言えば、交照法や MDB 法の判断は輝度チャンネルに依存し、直接比較法での明るさの判断には輝度チャンネルに加え反対色チャンネルの介入があると解釈される。つまり青のような彩度の高い色は無彩色の灰色より明るく感じられ、青の明度が高く評価されたと考えられる。このことが HYU の測定結果で観測された逆ブルキンエ効果の原因にもなっていると考えられる。薄明視および暗所視においては色の見えが弱くなり、反対色チャンネルの介入が少なくなり、MDB の判断が容易になると考えられる。

4. 分光感度の推定

色票からの反射光は複合放射であるので、ラゴリオ色票上での MDB 曲線はいくまでも疑似的な分光感度である。そこで次のようなアルゴリズムにより分光感度の推定を試みた。

分光放射照度 $E(\lambda)$ の照明下において、分光反射率 $\rho(\lambda)$ の色票が分光反射率 $\rho_n(\lambda)$ の灰色色票と MDB となる関係は異色間を加法則が成立すれば、次式で表わされる。

$$k \int \rho(\lambda) E(\lambda) V_m(\lambda) d\lambda = k \int \rho_n(\lambda) E(\lambda) V_m(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

ここで、 $V_m(\lambda)$ は MDB に対する分光感度である。灰色色票の分光反射率は近似的にニュートラル（波長に依存しない）であるので、反射率 R で置きかえられ、

$$\rho_n(\lambda) = R \quad (2)$$

となる。また、 $E(\lambda)$ および $V_m(\lambda)$ は照明あるいは照度レベルに依存するので、ある照明下においては一定である。そこで、

$$\int \rho(\lambda) V_m(\lambda) d\lambda = a \quad (3)$$

とすると、(1), (2), (3) 式より次式が得られる。

$$\int \rho(\lambda) E(\lambda) V_m(\lambda) d\lambda = R a \quad (4)$$

また、色票からの分光放射束発散度を $\beta(\lambda)$ とすると、

$$\beta(\lambda) = \rho(\lambda) E(\lambda) \quad (5)$$

となり、(4) 式は最終的に (6) 式で表わされる。

$$\int \beta(\lambda) V_m(\lambda) d\lambda = a R \quad (6)$$

(6) 式を色票 i , j 番目の波長について行列で表わすと、

$$[\beta(i, j)][V_m(j)] = a[R(i)] \quad (7)$$

$$1 \leq i \leq 24, 1 \leq j \leq N$$

となる。ここで、 N は波長サンプル数である。色票の分光反射率は既知（村上色彩研究所からの提供データを使用した。これは日

立 307 型分光光度計による測定値である。)であり、照明の分光放射照度を測定すれば $[\beta(i, j)]$ が得られる。i 番目の色票と MDB をなす灰色色票の反射率 $[R(i)]$ は実験により得られるので、次式から分光視感度 $[V_m(j)]$ が得られる。

$$[V_m(j)] = [\beta(i, j)]^{-1} [R(i)] \dots\dots\dots (8)$$

(8)式の逆行列を解くには、波長サンプル数を色票数と等しくすればよい。しかし、ラゴリオ色票では分光反射分布が互いに似ている色票が数種あり、 $N=24$ とすると行列 β が正則でなくなるので正確な解が得られない。そこで実際の計算では、適切な解が得られる N の最大値 5 を用いて、最小 2 乗解を求めた (ハウスホルダ変換により一般連立方程式の最小 2 乗解を解く方法を用いた)。まず、420 nm から 50 nm 間隔で 5 波長を選び、その 5 波長における V_m を得る。次に、サンプリング波長をそれぞれ 10 nm 長波長側にずらして、新たな 5 波長について V_m を得る。このような操作をさらに 3 回繰り返して、最終的に 420 nm から 670 nm まで 10 nm 間隔の $V_m(\lambda)$ を得た。ここでは $V_m(\lambda)$ を最大値で正規化して表わした。

このアルゴリズムによる分光感度推定法の精度を調べるために、標準観測者による MDB 曲線から逆に分光感度を推定した。その結果を図 11 に示す。 $V(\lambda)$ 、 $V'(\lambda)$ とも推定値に誤差がみられる。この原因には、実際の灰色色票が連続的でないためにそこからの誤差が伝搬されたこと、またサンプル波長が少ないことが考えられる。

図 11 標準観測者によるラゴリオ色票上での MDB 曲線から推定される分光感度
●、○はそれぞれ明所視、暗所視の推定値。

図 12 観測者 HYA の観測ブースでの MDB 曲線から推定された分光感度。

図 12 は観測ブースでの観測者 HYA の測定結果より推定した分光感度曲線である。ブルキンエ移行の傾向はみられるが、1 lx 以上の照度においては 2 つのピークがみられ、適切な分光感度が得られなかった。図の煩雑を避けるため 100 lx までの結果しか示していないが、これ以上のレベルでも 2 つのピークが見ら

図 13 観測者 HYA の自然環境下での MDB 曲線から推定された分光感度。

れた。図 13 は自然環境下での分光感度の推定結果の一例である。ここでは、単一ピークの分光感度が得られたものを示した。しかし、自然環境下での全測定に対しこのような単一ピークの分光感度が推定される比率は少なく、HYA については 34.2 %、HYU では 12.2 %、MF では 11.8 %であった。

実験により得られた MDB 曲線から適切な分光感度が推定されなかった原因としては、MDB 判断の難しさによる測定誤差の他、異色間の加法則の不軌が考えられる。MDB 法の場合、加法則は成立するとされているが、これは明所視の場合である。薄明視の場合桿体と錐体の異なるメカニズムが MDB の判断に関わり、加法則が崩れると考えられる。これは特に薄明視レベルにおいて単一ピークの分光感度を得る確率が低かったことから推測されることである。また、観測者は MDB の判断を試みようとしたにもかかわらず直接比較法的な明るさの判断になったため加法則が崩れた可能性もある。明るさの加法則不軌については、明所視⁵⁾でも薄明視^{6), 7)}でも観測されている。

5. 結 論

自然環境下における視感度の変化の測定にラゴリオ色票が有効に使えることが示された。しかし、この測定結果から分光感度を推定することはラゴリオ色票の精度、測定精度、薄明視における加法則の不軌などから問題があることがわかった。

謝 辞

この研究を遂行するにあたり、分光放射輝度計を貸与して下さった東京工業大学の池田光男教授、蛍光灯の分光測色データを提供いただいた東芝総合研究所の淵田隆義氏に感謝の意を表します。この研究の一部は (財) 佐川交通社会財団「交通安全対策振興助成」のための研究助成金の援助による。

参 考 文 献

- (1) 池田光男, 永田吉明, 矢口博久, 芦澤昌子: 照学誌 67-10 (昭 58) 9~14
- (2) Sagawa, K. and Takeichi K.: J. Opt. Soc. Am.(A) 3 (1986) 71~75
- (3) Wagner, G. and Boynton R. M.: J. Opt. Soc. Am. 62 (1972) 1508~1515
- (4) Yaguchi, H. and Ikeda, M.: J. Opt. Soc. Am.(A) 1 (1984) 120~123
- (5) Yaguchi, H. and Ikeda, M.: Vision Res. 23 (1983) 1711~1718
- (6) 中野靖久, 池田光男: 光学 15 (1986) 295~302
- (7) Yaguchi, H.: J. Light & Vis.Env. 10 (1986) 27~31

(受付 1987 年 5 月 27 日)