

薄明視における色の見えのシミュレーション

Color Appearance and Color Reproduction for Mesopic Vision

菊地久美子	Kumiko Kikuchi	千葉大学	Chiba University
申 宰哲	Shin Jaechul	千葉大学	Chiba University
松木 直紀	Naoki Matsuki	千葉大学	Chiba University
矢口 博久	Hirohisa Yaguchi	千葉大学	Chiba University
塩入 諭	Satoshi Shioiri	千葉大学	Chiba University

キーワード：薄明視，錐体，桿体，色の見え

Keywords: mesopic vision, cone, rod, color appearance

1. 目的

我々人間は非常に広い照度範囲に対応して物を見ることができる。直射日光下では約 10 万ルクス (lx)，星明かりだけの夜間なら約 0.001 lx と考えると、これだけの広い照度レベルに対して眼を順応させて物を見ているということになる。この調節機能は眼の網膜にある錐体と桿体の 2 種の光受容細胞の働きによるものである。錐体には長・中・短波長のそれぞれに感度のピークをもつ L 錐体・M 錐体・S 錐体があり、これらの応答の比率に基づき我々は多彩な色を知覚することができる。これに対して桿体は 1 種類であり色知覚を生じ得ないが、非常に高感度であり、光子数個で反応するといわれている。人間の知覚可能な照度範囲は順応レベルの違いにより、10 lx 以上を明所視、0.01 lx 以下を暗所視、その中間を薄明視と分けられる。薄明視領域ではこれら錐体・桿体という性質の異なる視細胞が混在し、その寄与が照度に依存して変化するため、その視覚メカニズムは複雑となると同時に色の見え方も複雑になる。近年、画像のデジタル化が進み、環境のデザインなど様々な分野で、異なる視環境での画像によるシミュレーションが行われている。薄暮時など、低照度下での見えをシミュレーションが必要となることも多い。このような場合、様々な照度条件における見え方を明所視状態における見えへ変換できるようにする事は非常に必要である。本研究は様々な照度における色の見えについて調べ、その結果から薄明視、暗所視領域の色の見えを予測するモデルを作成することを目的としている。そのためにまず、様々な照度レベルでの色の見えを標準条件（通常、明所視条件）での色の見えに等色することで評価を行った、それをもとに、照度に依存した錐体と桿体の寄与の変化を検討し、薄明視、暗所視での色の見えを予測するモデルを作成し、自然画像を用いたシミュレーションを行った。

2. 実験

本研究では Fig.1 のような実験ブースを作成し两眼隔壁等色法を用いて色票の見えを定量的に評価する実験を行った。

background (It is equivalent to N5 color chip.)

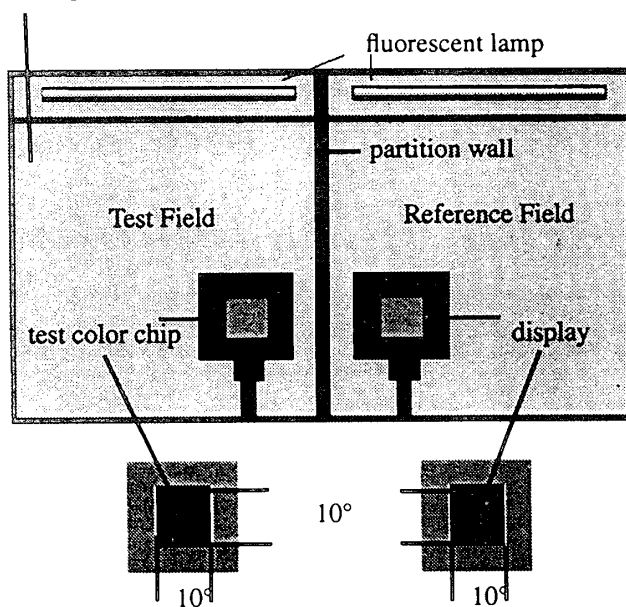


Fig.1 Observing booth

3. 実験結果

等色点のデータを CIE L*a*b* 空間に表わし、解析を行った。

Fig.2 に、照度低下に伴う等色結果の輝度値を示す。

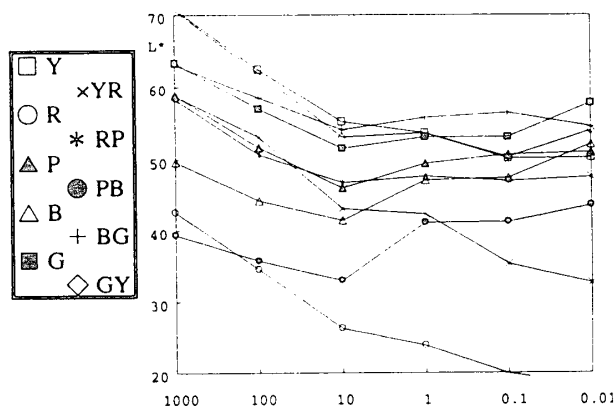


Fig.2 Change of perceived luminance as a function of illuminance

Fig.3 に照度低下に伴うマッチング点の変化を CIE L*a*b* 空間 a*b* 平面上にプロットしたものを示す。

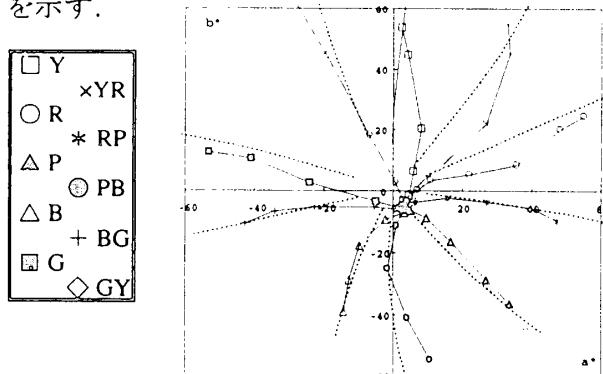


Fig.3 Change of received hue in the(a*,b*) diagram with illuminance change

4. 薄明視の色の予測モデル

1000 lx における色の見えの LMS 錐体及び桿体の刺激値をそれぞれ L_p , M_p , S_p , R_p , 反対色の輝度成分, 赤緑成分, 黄青成分の量をそれぞれ $(L+M)_p$, $(L-2M)_p$, $(L+M-S)_p$ とする。これらを用いて, 照度 $E(\text{lx})$ における色の見えの, 輝度 $Lum(E)$, 赤緑成分の量 $rg(E)$, 黄青成分の量 $y_b(E)$ を予測する式とする。

$$\begin{aligned} Lum(E) &= k(L+M)_p + (1-k) \cdot n \\ &\quad (L_p/L_w) - (R_p/R_w) > 0 : k = k_1(E) \\ &\quad (L_p/L_w) - (R_p/R_w) < 0 : k = k_2(E) \\ rg(E) &= l(L-2M)_p + a(E) R_p \\ y_b(E) &= m(L+M-S)_p + b(E) R_p \end{aligned}$$

ここで, 係数 $k_1(E)$, $k_2(E)$, $l(E)$, $m(E)$, $a(E)$, $b(E)$ は照度 $E(\text{lx})$ の関数である。係数 n は定数であり, 桿体刺激値を, 明所視のものから暗所視のものへと変換する。 LW , RW , $(L-2M)_w$, $(L+M-S)_w$ は, 白色の各刺激値を表している。結果を基に得られた係数を Fig.4 に示す。

$n = 0.24$

	1000 lx	100 lx	10 lx	1 lx	0.1 lx	0.01 lx
k_1	1.000	0.742	0.178	0.182	0.052	0.080
k_2	1.000	0.674	0.000	0.000	0.000	0.000
l	1.000	0.745	0.408	0.189	0.051	0.023
m	1.000	0.691	0.310	0.134	0.044	0.018
a	0.000	0.003	0.001	-0.003	-0.007	-0.008
b	0.000	0.017	0.025	0.023	0.015	0.018

Fig.4 Coefficient value of each models

実験で得られた等色値の相関をみた。相関係数と回帰直線の傾きを Fig.5 に示す。

	L+M		L-2M		L+M-S	
100 lx	0.99	1.03	0.99	1.00	0.99	1.01
10 lx	0.95	0.94	0.98	1.00	0.96	1.02
1 lx	0.95	0.80	0.99	0.99	0.93	0.92
0.1 lx	0.95	0.85	0.97	1.04	0.75	0.66
0.01 lx	0.94	0.91	0.94	1.01	0.87	0.74

left : coefficient of correlation right : slope

Fig.5 Coefficient of correlation and slope

Fig.6 に 予測値と実験値の色差を示す。

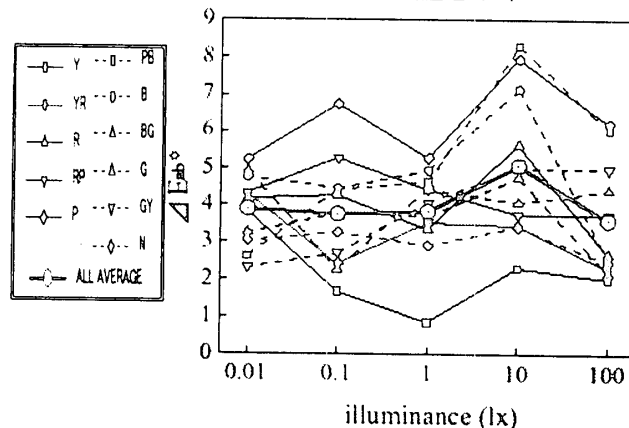


Fig.6 Color difference between predicted value and matching value

5. 考察

実験結果 Fig.2 からは, 明るさに対する桿体の寄与を示すプルキンエ現象が見られ, 照度の低下に伴う桿体の寄与の増加が示唆された。また, Fig.3 のように完全な暗所視状態においても色が見えているという結果から, 桿体は明るさだけでなく色の見えにも関わっていると考えることができる。色の見えは照度低下に伴い彩度が低下するが, その変化の仕方は単純な直線ではなく, 100, 10 lx で短波長側に方向を変えながら彩度が低下している。提案したモデルは, 錐体と桿体の明るさや色の見えへの寄与の仕方を簡単に数式化したものである。Fig.5 のモデルの予測値と実験値の間の相関係数, 回帰直線を見ると, ほぼ正しく実験結果を予測できていると言える。また, Fig.4 のモデルの各係数を見ると, 桿体は明るさだけでなく, 色の見えに対しても影響を与えていることを表している。これは,

- ・実験結果において, 100, 10 lx で色の見えが短波長側にシフトしながら変化している点。
- ・モデルにおいて, 明るさに対する錐体と桿体の寄与の大きさが 500 ~ 10 lx の間で逆転している点。

という2点からも考えられる。すなわち, 桿体が色に対して感度を持っているとすると, 桿体と錐体の寄与の大きさが入れ替われば, 色の見えが短波長側にシフトする。しかし, その影響はわずかである。Fig.4 のモデルの予測値と実験値の間の色差の平均は 4 ~ 5 であり, 完全な予測が出来ているとは言えない。この色差には, 色相 P の輝度方向の差が大きく影響しており, この色相の色の見えを完全に予測できることが, モデル作成にあたっての課題のひとつであると言える。