

色度の異なる刺激の色の見えのモードの移行輝度と オプティマルカラーの輝度の類似性

福屋 貴之*・内川 恵二*・山内 泰樹**

* 東京工業大学 大学院総合理工学研究科 物理情報システム専攻

〒 226-8502 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259

** 富士ゼロックス株式会社基盤技術開発部

〒 259-0157 神奈川県足柄上郡中井町境 430 グリーンテクなかい

(受付：2007年7月7日；改訂稿受付：2008年2月1日，6月22日；受理：2008年7月10日)

Similarity between luminance for mode transition and that of the optimal color for stimuli with different chromaticities

Takayuki FUKUYA*, Keiji UCHIKAWA* and Yasuki YAMAUCHI**

*Department of Information Processing, Tokyo Institute of Technology

**Key Technologies Development, Fuji Xerox Co., Ltd.

(Received 7 July 2007; Received in revised form 1 February 2008, 22 June 2008; Accepted 10 July 2008)

Color appearance can be classified into two modes, the surface-color mode and the illuminant-color mode. These modes of color appearance are determined depending on luminance of the stimulus. It has been reported that transition luminance between the two modes varies according to the chromaticity of the stimulus. We hypothesize that the visual system somehow knows the luminance of the optimal color and uses it to determine the transition luminance. The rationale for this hypothesis is that a stimulus with luminance higher than that of the optimal color is physically luminous. To confirm this hypothesis we compared the transition luminance with the optimal color luminance for various color surfaces under D65 illuminant. We found that the transition luminances between the two modes were not perfectly coincident with the luminances of the optimal color. However the transition of luminances varied in the manner of luminance of the optimal color varied. This suggests that the visual system might determine the transition luminance between the two modes using the luminance of the optimal color.

1. はじめに

我々の色の見えには，大別すると色が物体の表面の属性のように知覚される表面色モードと光の属性のように知覚される発光色（開口色）モードの2種類のモードがある¹⁾．これらの見えのモードは眼に入射する光が物体表面からの反射光であるか光源からの直接光であるかによらず，観察条件に応じて視覚系によって決定される²⁾．そこで視覚系が何を基準として色の見えのモードを決定するのかに関してこれまでに

多くの研究がなされている¹⁻¹³⁾．

表面色モードで知覚されている刺激の輝度を増大させていくと，表面色モードと発光色モードが混在するような見えの状態を経て，完全に発光色モードの見えとなる．このモードの移行が起こる輝度を測定してモード決定の特性を調べた研究がいくつかあり⁵⁻¹³⁾，その結果，視野内の白の輝度⁸⁾，刺激の大きさや形⁹⁾，刺激と照明光の色度¹⁰⁾といった比較的低次の要因から図地反転¹¹⁾といった認知レベルの高次の要因までの様々な要因によってモードの移行輝度は影

響を受けることが報告されている。

Uchikawa et al.¹²⁾ と Yamauchi and Uchikawa¹³⁾ は異なる色度を持つ刺激のモードの移行輝度を測定し、モードの移行輝度は刺激の色度によって異なること、さらに色度の変化によるモードの移行輝度の変化と等明るさ (brightness) 刺激の輝度の変化は一致することを明らかにした。彼らの結果から刺激の明るさ知覚とモードの移行知覚が関連した現象であることが示された。

ある色度を持つ物体表面には任意の波長でその分光反射率が1以下であるという制限から、その色度の表面が取り得る最大明度が存在し、この最大明度を持つ表面の色をオプティマルカラーと呼ぶ^{14,15)}。つまり、オプティマルカラーを持つ表面はその色度で最も明るい表面であると言える。したがって刺激が表面色モードを保ったままその色度のオプティマルカラー以上に明るくなることはなく、もし刺激がさらに明るくなるとその刺激の見えは表面色モードから発光色モードへと移行すると考えられる。色度図内のオプティマルカラーの等明度軌跡は等B/L軌跡と類似している¹⁶⁾ことから、Uchikawa et al.¹²⁾ は、視覚系は何らかの方法でオプティマ

ルカラーの明るさを知り、それと物体表面の明るさを比較して、モードの移行輝度を決定しているという仮説を提案している。

本論文では、上記の仮説を検証するために、まず刺激の見えのモード移行輝度を測定し、次に刺激と等色度の表面がオプティマルカラーであるときの輝度を計算によって求め、モードの移行輝度とオプティマルカラー表面の輝度とを直接比較することを目的とする。

2. 実験方法

2.1 装置と刺激

実験装置はテスト刺激呈示用 CRT モニタ、中央に開口のある灰色の背景紙、周辺刺激として用いられる8枚のOSA色票と白紙、および照明として用いられるプロジェクターにより構成された。CRT モニタは被験者の前方135.5 cmのところに置かれ、背景紙は被験者側に視距離114 cmでCRT モニタ面を覆うように置かれた。実験ブースは暗幕で覆われていた。

被験者が見る刺激の全体図を図1に示す。刺激は背景紙（視角 $23.5^{\circ} \times 17.5^{\circ}$ ）上の白枠、8個の周辺色票、および中央のテスト刺激で構成された。背景紙の背後にあるCRT モニタに表示

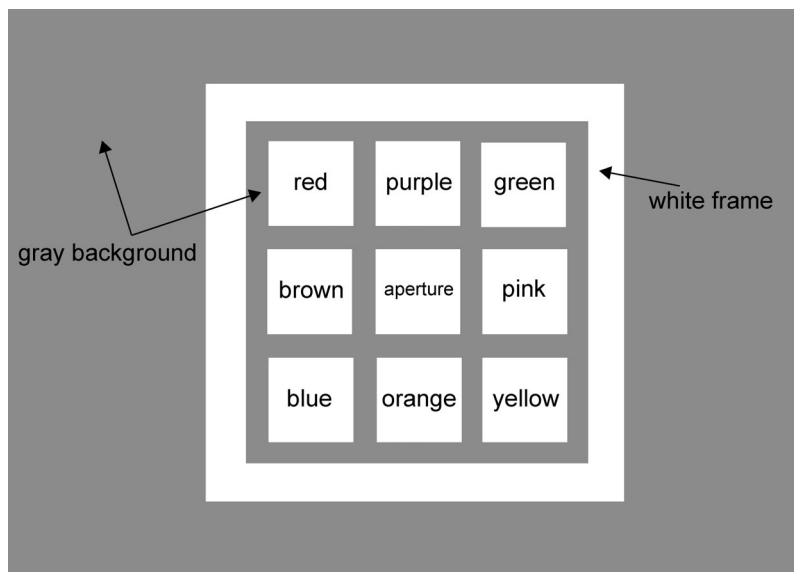


図1 刺激の概略図

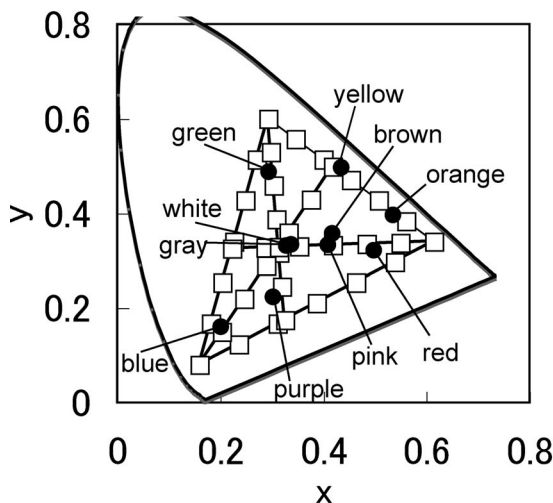
される刺激が背景紙の中央の開口を通して被験者に呈示され、これがテスト刺激となる。刺激のサイズは、テスト刺激と周辺色票が視角 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 、白枠の長さが $12^{\circ} \times 12^{\circ}$ 、幅が 1° であった。プロジェクターは被験者の頭上から背景紙上を一様に照明した。照明光の色度はD65の色度と等しくした。被験者の中央のテスト刺激の見えは、その輝度が十分小さいときは表面色モードで、その輝度が十分大きいときは発光色モードであった。

テスト刺激の色度には、CRTモニタのR、G、B蛍光体の各xy色度点を結んだ3本の線分（それぞれR-G線、G-B線、B-R線とする）をそれぞれ6等分してできる18色度点と、R、G、B蛍光体のいずれかの色度点と照明光（D65）の色度点を結んだ線分をR-G線、G-B線、B-R線のいずれかと交差するまで延長した3本の線分（R、G、B各蛍光体の色度を通る線分をそれぞれR-D65線、G-D65線、B-D65線とする）をそれぞれ6等分してできる18色度点、さらに照明光D65の色度点を含んだ計37点を用いた。

このようにしてCRTモニタで再現可能な色度範囲から偏りなくテスト刺激を選んだ。テスト刺激の色度および周辺刺激（OSA色票、白枠、背景紙）の輝度と色度を図2に示す。

2.2 手続き

被験者は実験ブース内に入り3分間ブース内の明るさに順応した。このときプロジェクターは実験時と同様に刺激全体を一様に照明し、CRTモニタは全面黒（ $R=G=B=0$ ）になっていた。順応が終了すると1つ目のテスト刺激が呈示された。各テスト刺激の輝度の初期値は実験環境下で表面色モードにしか知覚できない十分低い値に設定した。被験者は呈示されたテスト刺激の輝度を調整して、テスト刺激が表面色モードから発光色モードへの移行の見えになった時にボタンを押した。ボタンが押されるとCRTモニタは再び黒になり、被験者がもう一度ボタンを押すと次のテスト刺激が呈示された。この後は同様の操作を繰り返し、全37色のテスト刺激のそれぞれに対して1回ずつの計37試行を行った。これを1セッションとして合計10



(a)

周辺刺激	輝度 [cd/m^2]
red	2.76
purple	3.10
green	4.66
brown	2.00
pink	12.6
blue	1.53
orange	7.83
yellow	18.6
white	23.6
gray	8.77

(b)

図2 (a) テスト刺激の色度（□）と周辺刺激（8個のOSA色票、白枠、灰色背景）の色度（●）。周辺刺激は“white”が白枠の色度，“gray”が灰色背景の色度を表し、他の色は8個のOSA色票の色度を表す。(b) 周辺刺激の輝度。

セッションを行い、その平均を各被験者の実験結果とした。各セッションにおいて呈示されるテスト刺激の順序はランダムであった。

上記の通り実験は調整法で行われ、被験者は調整が終了するまで常に刺激を見続けなくてはならないので、調整結果が色順応等の影響を受ける可能性が考えられる。しかし、モードの移行輝度の測定を行った過去の研究において、表面色モードで知覚されたか発光色モードで知覚されたかを二者強制選択による階段法を用いて測定した結果と調整法を用いて測定した結果の間に系統的な違いはなかったということが報告されている¹⁰⁾。今回は測定するテスト刺激の色度数が多いことを考慮して時間のかからない調整法を用いることにした。

2.3 モード移行の判断基準

今回の実験は上記の通り表面色モードと発光色モードの移行が起こる輝度を測定するものだが、一般にこれらのモード間の移行は連続的である。実際に表面色モード知覚が生じる輝度領域と発光色モード知覚が生じる輝度領域の間には両モードの混在するような知覚が生じる輝度領域が存在する。予備実験として両モードの混在する輝度領域の両端、つまり表面色モードの輝度の上限（条件1とする）と発光色モードの輝度の下限（条件2とする）の両方をモードの移行の判断基準とした実験を行った結果、条件1では被験者間で結果にほとんど差がなかったのに対し、条件2では被験者間で結果は大きく異なった。また条件2の方が基準がわかりにくいという内観報告も得られた。これらの結果から、表面色モードの輝度の上限の方が発光色モードの輝度の下限よりも基準として安定していると考えられるので、今回の実験では表面色モードの輝度の上限をモードの移行の判断基準として用いた。

2.4 被験者

被験者はTF（24歳、男性）、MM（22歳、男性）、SN（23歳、男性）の3名で、全員色覚正常、TF以外は実験目的にナイブであった。

2.5 オプティマルカラーの輝度の計算方法

ある表面をある照明光下で観察する状況を考える。照明光の分光放射輝度を $I(\lambda)$ 、表面の分光反射率を、 $R(\lambda)$ 、CIE1931表色系の等色関数を $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ 、最大視感度を $K_m=683$ [lm/W]とする。このとき表面からの反射光の輝度 L は輝度の定義から次式で表される。

$$L = K_m \int I(\lambda) R(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

これを $\Delta\lambda=5$ [nm]として離散化すると、

$$L = K_m \sum I_\lambda R_\lambda \bar{y}_\lambda \Delta\lambda$$

また表面の xy 色度（CIE1931表色系）は次式で表される。

$$\begin{aligned} x &= \frac{X}{X+Y+Z} \\ &= \frac{\sum I_\lambda R_\lambda \bar{x}_\lambda \Delta\lambda}{\sum I_\lambda R_\lambda \bar{x}_\lambda \Delta\lambda + \sum I_\lambda R_\lambda \bar{y}_\lambda \Delta\lambda + \sum I_\lambda R_\lambda \bar{z}_\lambda \Delta\lambda} \\ &= \frac{\sum I_\lambda R_\lambda \bar{x}_\lambda}{\sum I_\lambda R_\lambda (\bar{x}_\lambda + \bar{y}_\lambda + \bar{z}_\lambda)} \\ \therefore \sum I_\lambda R_\lambda \{(1-1/x)\bar{x}_\lambda + \bar{y}_\lambda + \bar{z}_\lambda\} &= 0 \quad (2) \end{aligned}$$

同様に、

$$\therefore \sum I_\lambda R_\lambda \{\bar{x}_\lambda + (1-1/y)\bar{y}_\lambda + \bar{z}_\lambda\} = 0 \quad (3)$$

$I(\lambda)$, x , y に実験に用いた照明光の分光放射輝度、テスト刺激の色度を代入して、②、③式を満たし、かつ①式より計算される輝度を最大にするような分光反射率 $R(\lambda)$ を求める。このようにして各テスト刺激に対して実験条件下における同一色度の刺激がオプティマルカラーとなったときの輝度を求める。

3. 結果と考察

図3に被験者1名の結果を示す。グラフの横軸はテスト刺激の xy 色度の x の値、縦軸は輝度を表す。各シンボルはモードの移行輝度（◇）と実験条件下での同一色度の刺激がオプティマルカラーになったときの輝度（□）を表す。△シンボルについては後述する。図3より、テス

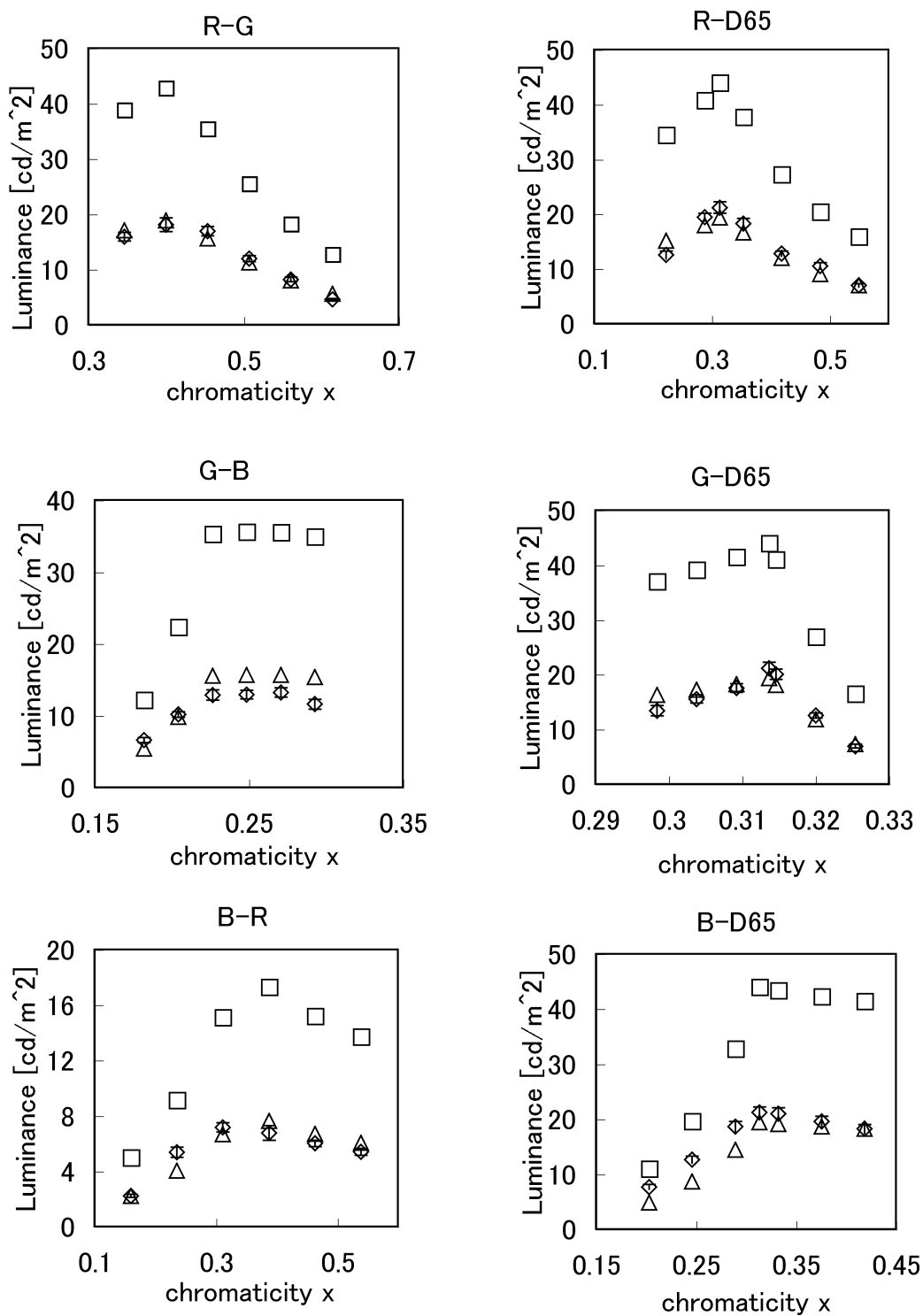


図3 被験者TFのモードの移行輝度 (○), オプティマルカラーの輝度 (□), オプティマルカラーの輝度と係数Cとの積 (△). R-D65の左から3個目の結果, G-D65の左から4個目の結果, B-D65の左から4個目の結果はすべてテスト刺激の色度がD65の色度であったときの結果を表す (つまり3個の点が1個の結果を表している).

ト刺激の色度によらずモードの移行輝度はオブティマルカラーの輝度より小さいこと、またモードの移行輝度とオブティマルカラーの輝度を示す曲線の形状が類似していることがわかる。他の2名の被験者にも同様の傾向が見られた。

ここでモードの移行輝度とオブティマルカラーの輝度のテスト刺激の色度による変化の仕方（図3の曲線の形状）がほぼ一致していることを定量的に確かめるために、モードの移行輝度（ L_{TM} ）とオブティマルカラーの輝度（ L_{OC} ）の定数倍との平均二乗誤差（RMSE）が最小になるための L_{OC} の係数Cを被験者ごとに求めた。各被験者のCの値、 L_{TM} と CL_{OC} のRMSEおよび L_{TM} の標準誤差の最大値 SE_{max} を表1に、 CL_{OC} の値を図3に△で示す。 L_{TM} と L_{OC} のグラフの形状の一致度を示す統計的に有効な指標が見つからないので、ここでは L_{TM} の標準誤差の最大値 SE_{max} を指標とした。表1より、 L_{TM} と CL_{OC} のRMSEは各被験者の L_{TM} の標準誤差の最大値 SE_{max} と同程度であることがわかる。 L_{TM} と L_{OC} のグラフの形状が高い類似性を持つが完全一致はしなかったこと、つまり L_{TM} と CL_{OC} のRMSEが小さいがゼロにはならなかったことは、視覚系は厳密にオブティマルカラーの輝度を知っているとは言えないが、かなり正確にオブティマルカラーの輝度を推定し、それをモードの移行輝度としていることを示唆している。

定義に従ったオブティマルカラーの輝度の計算は、ある色度の表面の輝度がある分光強度分布を持つ照明光下で最大となるときの表面の分

光反射率の最適化計算である（2.5 オプティマルカラーの輝度の計算方法を参照）ので、その実行には照明光成分と表面反射率の分光レベルでの分離が必要となる。しかし視覚系の処理メカニズムが3錐体の応答を元に行っていることから視覚系がこのような計算をそのまま行っているとは考えられない。そこで視覚系はオブティマルカラーの定義に従った計算とは異なる何らかの方法でオブティマルカラーの輝度を推定し、それをモードの移行輝度としていと考えられる。 L_{TM} と CL_{OC} のRMSEはこの推定方法の誤差を表していると考えられる。

無彩色のテスト刺激を用いた表面色モードと発光色モードに関する過去の研究より、「モードの移行輝度はシーン内の白い表面（反射率90%）の輝度の1.7倍であり、それは実際に白い表面がシーン内に存在するかどうかによらない」という報告がある⁸⁾。一方今回の我々の実験では白色のテスト刺激に対するモードの移行輝度は図3から22~23 cd/m²であり、これは白桦の輝度（図2の周辺刺激 white の輝度を参照）と同程度である。この白桦は反射率70%程度の紙であるので、上記の過去の研究結果と比べて我々の実験の白色のテスト刺激のモードの移行輝度はかなり小さい。これはおそらく過去の研究では発光色モードの下限の方へ判断基準がシフトしていたのではないかと考えられる。

「はじめに」で述べたように、モードの移行輝度を明るさに変換したモードの移行明るさはテスト刺激の色度によらずほぼ一定である。これを考慮すると、モードの移行を決定するために視覚系が明るさ知覚を持っているとも考えられる。「はじめに」で述べた通りオブティマルカラーの輝度はその定義からそれをモードの移行輝度として用いることには妥当性があり、今回の我々の実験からモードの移行輝度とオブティマルカラーの輝度はテスト刺激の色度による変化の仕方がほぼ一致することがわかった。したがって、モードの移行はオブティマルカラーの輝度で決まるが、オブティマルカラーの輝度値は刺激の色度によって異なるので、色度によ

表1 各被験者の係数C、モードの移行輝度とオブティマルカラーの輝度と係数Cの積との平均二乗誤差、モードの移行輝度の標準誤差の最大値

observer	TF	MM	SN
C	0.440	0.308	0.445
RMSE (L_{TM} , CL_{OC})	1.844	1.510	1.397
$SE_{max}(L_{TM})$	1.229	2.010	1.940

て不変の量として明るさを定義して、刺激の明るさがある明るさを超えるかどうかでどちらのモードで知覚するかを決定していると考えてもいいだろう。そうすると、この研究は表面の明るさがなぜ単純に輝度で決まらないのかという疑問の解明にもつながるだろう。

テスト刺激の色度によるモードの移行輝度とオプティマルカラーの輝度の変化の仕方がほぼ一致することが本実験で示されたが、両者の輝度の絶対値が異なっているのならば、我々の仮説、すなわち、視覚系が何らかの方法でオプティマルカラーの輝度を知ってモードの移行輝度を決定するという仮説が支持されたとは言えないという考えもある。確かに、必要条件が実験的に示されてもそれは十分条件にはならず、その点仮説の証明にはなっていない。しかし、我々の実験結果は少なくとも仮説を否定するものではない。今後の研究により多くの実験事実が積み重なっていけば、我々の仮説が妥当かどうかにより確実になると考えられる。

4. ま と め

本研究では、モードの移行輝度とオプティマルカラーの輝度との関係を定量的に調べることを目的として、色度の異なる刺激に対するモードの移行輝度を測定した。測定結果をオプティマルカラーの輝度と比較し、両者の絶対値は異なるがテスト刺激の変化による両者の変化の仕方はほぼ一致していることを明らかにした。オプティマルカラーの定義に従った計算アルゴリズムと同等なことを視覚系が行うことは考えられないため、視覚系がどのようなメカニズムによってモードの移行輝度を決定しているかについてはまだ不明である。しかし、モードの移行点における視覚系の応答はオプティマルカラーを用いればわかるということを明らかにした点で、今回の結果には意味があると言える。

オプティマルカラーの輝度を定数倍するとモードの移行輝度とほぼ一致したが、色度によってはあまり良く一致していないものもある。これは上述のように視覚系がオプティマルカ

ラーの定義に従った計算とは異なるメカニズムでモードの移行輝度を決定しているであろうことに起因していると考えられる。したがってこのような色度について詳しく調べることで、視覚系のモードの移行輝度の色度特性メカニズムに関する情報が得られるかもしれない。これに関しては今後の課題である。ただし、一致していない場合でもそのずれは小さいことから、モードの移行輝度の色度特性メカニズムについて考える際にオプティマルカラーの計算アルゴリズムを参考にすることは有意義であるだろう。

文 献

- 1) D. Katz: The world of colour. Kegan Paul, London, 1935.
- 2) H. Uchikawa, K. Uchikawa and R. M. Boynton: Influence of achromatic surround on categorical perception of surface colors. *Vision Research*, **29**, 881–890, 1989.
- 3) R. M. Evans: The Perception of Color. A Wiley-Interscience Publication, New York, 83–98, 1974.
- 4) A. L. Gilchrist: Lightness, Brightness, and Transparency. Lawrence Erlbaum Associates Publishers, New Jersey, 1994.
- 5) S. Ullman: On visual detection of light sources. *Biological Cybernetics*, **21**, 205–212, 1976.
- 6) R. M. Evans: Fluorescence and gray content of surface colors. *Journal of the Optical Society of America*, **49**, 1049–1059, 1959.
- 7) R. M. Evans and B. K. Swenholz: Chromatic strength of colors: dominant wavelength and purity. *Journal of the Optical Society of America*, **57**, 1319–1324, 1967.
- 8) F. Bonato and A. L. Gilchrist: The perception of luminosity on different backgrounds and in different illuminations. *Perception*, **23**, 991–1006, 1994.
- 9) A. L. Gilchrist, C. Kossyfidis, F. Bonato, T. Agostini, J. Cataliotti, X. Li, B. Spehar, V. Annan and E. Economou: An anchoring theory of lightness perception. *Psychological Review*, **106**, 795–834, 1999.

- 10) J. M. Speigle and D. H. Brainard: Luminosity thresholds: effects of test chromaticity and ambient illumination. *Journal of the Optical Society of America A*, **13**, 436–451, 1996.
- 11) F. Bonato and J. Cataliotti: The effect of figure/ground, perceived area, and target saliency on the luminosity threshold. *Perception and Psychophysics*, **62**(2), 341–349, 2000.
- 12) K. Uchikawa, K. Koida, T. Meguro, Y. Yamauchi and I. Kuriki: Brightness, not luminance, determines transition from the surface-color to the aperture-color mode for colored lights. *Journal of the Optical Society of America A*, **18**, 737–746, 2001.
- 13) Y. Yamauchi and K. Uchikawa: Upper-limit luminance for the surface-color mode appearance. *Journal of the Optical Society of America A*, **17**, 1933–1941, 2000.
- 14) 大田 登：色彩工学. 東京電機大学出版局, 179–208, 1993.
- 15) N. Ohta; A simplified method for formulating pseudo-object colors. *Color Research and Application*, **7**, 78–81, 1982.
- 16) G. Wyszecki and W. S. Stiles: Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae, 2nd ed. A Wiley-Interscience Publication, 411–414, 1982.