資料

色知覚モデルの開発動向[†]

専門会員 納谷 嘉信*

1. まえがき

ここ約10年間、色の見え (Color Appearance) の研究が各国で活発に実施されるようになった。1991年のC I Eメルボルン大会でも、これに関係する委員会が少なからず新設されている。一方、この分野の研究にファミリーでない方々にとっては、「色は昔から誰でも見えている。何故そんな研究が必要なの。」と思われるかも知れない。

本報では、これらの疑問に答えることを目的として、色の見えの研究の中心である、色知覚モデルの開発について次の4項目を述べる。

- 1) 色知覚モデル研究の狙い。
- 2) 色知覚モデルの開発状況とその適用分野。
- 3) 色知覚モデルの評価の考え方。
- 4) 今後への期待。

2. 色知覚モデル研究の狙い

現在の色知覚モデル研究の狙いは次のように要約される。"種々の照明光および照度で、照明された無彩色背景上の任意の物体色について、正常色覚観測者によるその知覚色相、知覚明度、知覚クロマの評価と、それぞれ良好な相関を与える諸量を予測する方式を与えること"。主として物体色を対象とし、光源色を直接扱わない。また背景色の対比効果や物体色の材質感の差の色の見えへの影響も考えない。主として、照明条件の変化による物体色の見えの変化を予測する。

次に、その測色研究上の歴史的な位置づけを示す。

a) C I Eの測色システム。1931年勧告された現行の測色システムは、"同一背景上で同一照明下の2物体色について、それぞれの三刺激値が等しい場合、色覚正常観測者は両色が等色と判断する"ことを予測する。はなわちこの方式は、同一照明下 (同一順応下) の物体色の見えの一致を予測することが出来る。この方式は有用であるが、異なる順応下の2物体色の色の見えの一致を予測することは出来ない。昼光下の物体色と自然電球下の今1つの物体色が、それぞれ同一の三刺激値を有する場合、両者の色の見えは異なる。様々な光源の開発によって、各光源下の物体色の見えが昼光下の見えと、どの程度一致するか異なるかが問

題となった。

b) 異順応下の等色予測システム、いわゆる色順応予測式 (色順応変換) である。本特集では側垣博明氏が紹介している。これは、基準光下の物体色の三刺激値 X_r, Y_r, Z_r に対し、基準光と異なる試験照明下で同一の色の見えを与える物体色の三刺激値 X_t, Y_t, Z_t を定める。一般に両物体色および三刺激値は異なるが、色の見えは一致する。これについては、C I EでもTC1—06色順応委員会が1971年設立され、1985年筆者らの色順応変換式⁽¹⁾⁽²⁾がC I Eで用いる候補として承認された⁽³⁾。

c) 色知覚モデルによる予測システム。前述のように、色知覚モデルは任意の照明光下で知覚される色相、明度、クロマを直接予測する。これは必然的に、異なる順応下の異なる2物体色の色相、明度、クロマの一致または不一致を予測する。この場合はb)項の色順応変換に一致する。異なる三刺激値の対を与えるのではなく、色の見えの知覚に相関する量を与える所に広範な適用分野がある。

また、同一順応照明下の色の見えの一致の予測も可能であり、a)項目のC I Eの測色システムをも包括する。すなわち、色の見えの予測システムはa), b), c)を含む膨大なシステムであることが判明する。

3. 色知覚モデルの開発の状況

色知覚モデルの研究は、1983年以来C I EのTC1—13色の見え解析委員会で研究が進められて来た。その活動の成果として現在2つのモデルが国際的に有名である。1つは英国のR. W. G. Huntによるモデル (Model H) であり、今1つは筆者とその協力者により開発されたモデル (Model N) である。以下その開発の経緯を述べよう。

最初のモデルは1982年、(Model H-82)⁽⁴⁾がHuntにより提案された。これは、Estévezによる錐状体感度曲線⁽⁵⁾を用いる方式である。これは秀れたモデルであり等色相線、等クロマ線を与え、スウェーデンのNC S表色系の色相やマンセル・クロマともよく相関する量を与える。三色段階と後続の反対色段階から構成されている。そのモデルは、その後C I E 1931標準観測者に適合するよう改定され (Model H-85)⁽⁶⁾が提案された。しかし、この段階ではModel Hの適用条件は一定照度、昼光照明、たとえばD₆₅光に限定されていた。

(Model H-82)より、多くの示唆を受け、(Model N-86)⁽⁷⁾が筆者およびその協力者により提案された。これは、既述

[†] Development of Color Appearance Models

* 大阪電気通信大学工学部教授・工博 Yoshinobu Nayatani
〒572 寝屋川市初町18-8

の筆者らによる色順応変換を発展させたものである。1981年に提案されたその非線形色順応変換は、任意の照明光および任意の照明レベルにおける色順応効果の予測を与えるので、必然的に (Model N-86) は色知覚モデルの適用範囲を大きく拡張した。その後 (Model H-85) の基本原色を導入して (Model N-87) ⁽⁸⁾ が報告された。これにおいては、無彩色の白味—黒味応答が導入されている。その後、(Model N-90) ⁽⁹⁾ において任意の無彩色背景 ($Y_o \geq 20$) に拡張すると共に、色知覚モデルと色順応変換との関連も明確にされた。

(Model N-86) の色順応効果の導入に対応して、Hunt は (Model H-85) を発展させ、(Model H-87) ⁽¹⁰⁾ を提案して色および明るさ順応効果を予測可能としている。さらに、その後のモデルの実地テストに基づいて、(Model H-89) ⁽¹¹⁾、(Model H-91) ⁽¹²⁾ へと発展させてもいる。

以上のように、2つのモデルは相互に密接に関連しながら発展して来た。両モデルはクロマとカラフルネス、色味—黒味、明るさと明度の概念において若干の差はあるものの、種々の色の見えに関する現象を両者とも等しく良く予測する。しかしながら、両モデルは順応効果の扱い方について、全くメカニズムを用いている。このため、現在の所両モデルは1つの形式に統合することは困難である。表1に両モデルの発表年度の一覧を示す。

表1 2つの色知覚モデルの研究報告

Model H	Model N
1982 ⁽⁴⁾	1986 ⁽⁷⁾
1985 ⁽⁶⁾	1987 ⁽⁸⁾
1987 ⁽¹⁰⁾	1990 ⁽⁹⁾
1989 ⁽¹¹⁾	
1991 ⁽¹²⁾	

注 年度の右上の番号は文献番号に対応

以上のように、両モデルは異なる部分もあるが、次の共通点を有している。

- (1) 受容器段階の3色応答と、それに続く反対色応答からなる。
- (2) 入射光と受容器出力の間の非線形性が取り入れられている。
- (3) 色および明るさ順応の機構が受容器段階で考慮されている。
- (4) 種々の色の見えの現象を予測し、予測結果は物体色の色の見えの主観評価結果と直接比較することができる。

表2には、(Model N—90)により、予測可能な物体色の色知覚属性を示す。

4. 色知覚モデルの適用

色知覚モデルの適用分野を述べ、興味ある話題の1例を紹介しよう。次のよく知られた7つの効果はすべて予測可能であり、予測結果も報じられている。

- (1) 任意の試験光下の物体色の見えの予測。たとえばA光下の物体色の見えは、その物体色の昼光下の見えと異なる。

表2 Model N-90で予測可能な物体色の色知覚特性

Whiteness-blackness of achromatic colors	Q
Redness-greenness component of chroma	T
Yellowness-Blueness component of chroma	P
Chroma	$C = (T^2 + P^2)^{1/2}$
Brightness of achromatic color	$B_a = Q + \frac{50}{\beta_1(L_o)} \left[\frac{2}{3}\beta_1(R_o) + \frac{1}{3}\beta_1(G_o) \right]$
Normalized lightness of achromatic color	$L^*_{an} = (B_a/B_{aw}) * 100$
Perceived lightness of achromatic color	$L^*_{ap} = Q + 50$
Colorfulness	$M = C \cdot B_{aw}/B_{aw}(D_{65}, E_{0r})$
Brightness of chromatic color	$B_c = B_a + \alpha_1 \Delta Q_c + \alpha_2 M$
Normalized brightness of chromatic color	$L^*_{cn} = (B_c/B_{aw}) \cdot 100$
Perceived lightness of chromatic color	$L^*_{cp} = L^*_{ap} + \alpha_1 \Delta Q_c + \alpha_2 M$

[注]

- 1) B_{aw} は試験条件下の規準白色の明るさ。
- 2) $B_{aw}(D_{65}, E_{0r})$ は規準条件下の規準白色の明るさ。
- 3) ΔQ_c は同一のY値を有する有彩色と無彩色の白味量 (または黒味量) の差。

る。いわゆる光源の演色性評価である。

- (2) Helson-Judd 効果。灰色背景上の無彩色系列を高彩度の黄色光で照明すると、背景より明るい色味の無彩色は黄色 (照明と同色相) 味をおび、背景より暗い無彩色は青紫色 (照明と補色の色相) 味をおびる現象。

- (3) 照度増加による知覚クロマの増加。同一照明光下の有彩色物体の知覚クロマやカラフルネスが、照度レベルを増大することにより増大する現象。高演色ランプでも、その効果を発揮するには、1000lx 以上の照度レベルが必要なことに対応。

- (4) 白味—黒味と明るさの照度依存性。無彩色スケールを白色光で照明し、その照度を低から高へ増大すると、白色サンプルはより白く、黒色サンプルはより黒く知覚される。一方、サンプルの明るさはサンプルの明度に無関係に、照度の増加と共に増加する。

- (5) 表色系の予測のマンセル表色系のみでなく、スウェーデンのNCS表色系の白味 (w)、黒味 (s)、クロマティックネス (Cr) なども予測することができる⁽¹³⁾。

- (6) Helmholtz-Kohlrausch (H. K. と略) 効果。昼光照明下の有彩色は無彩色に比べ同一のY値であっても、一般に有彩色の知覚明度が無彩色のそれよりも高い。図1にその効果を示す。図中等高線の数値は Y_N/Y_c 、ただし、 $Y_c=20$ 、を示す。 $Y_c=20$ は有彩色のY値、 Y_N はそれと等知覚明度の無彩色のY値である。一般に有彩色のクロマの増大する程知覚明度が高く、黄色相に比べ他の色相で知覚明度の高いことが判る。この現象は、色知覚モデルに加え "2物体色の色味、黒味、クロマの等しい場合、両色の知覚明度は等しい。" という筆者の法則⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾により説明で

図1 マンセル明度5／8を有する有彩色群の等L／Y比軌跡の予測。
図中のパラメータは Y_N/Y_C 、
ただし $Y_C=20$

図2 5主要色相で5／8を有するマンセル色について順応照度16lxから1600lxに増加する時のカラフルネスの増加

って増加することが判る。図2は5／8のサンプル群についてのみ示す。

背景と各照度のサンプルの明るさの差 ΔB 、カラフルネスの差 ΔM_{R-G} とすると、色知覚モデルにおける色差 ΔE は次式で表わされる。

$$\Delta E = [(\Delta B)^2 + (\Delta M_{R-G})^2 + (\Delta M_{Y-B})^2]^{\frac{1}{2}}$$

10色、3照度の30点について、対比感と ΔE の関係を示すと図3のように良好な関係を示した。一方、知覚明度、知覚クロマの照度変化に対応する色差では、相関は悪かった。以上のように、対比感と測色値の間に色の見えの推定値を導入することによって、対比感の構造や成因が明らかとなる。

図3 対比感(縦軸)の評価値と色差(横軸)の関係

きる。

(7) Visual Clarity の予測。一般に、蛍光灯の演色評価数の高い方が Visual Clarity (V. C. と略) または明るさ感が高いと報じられている。この現象は、(b)のH-K効果でなく、配色の目立ち感情に関係することが橋本ら⁽¹⁶⁾によって報じられている。彼等は、特定の4色配色を用い、色知覚空間内で、各照明下の4色配色の占める面積がV.C.の評価とよく相関することを報じている⁽¹⁷⁾。この際、明度-クロマ空間を用いるよりは、明るさ-カラフルネス空間を用いる方が、V.C.の評価とよく一致することが判明した。

以上のように、色知覚モデルは広範な適用分野を有する他、様々な色彩心理現象の成因を与える。その1例を述べる。大野らは“対比感と色差”の研究において次の実験を行った⁽¹⁸⁾。マンセル主要5色相、明度／クロマが5／4、5／8の10色を選定し、明度3水準(16lx, 160lx, 1600lx)において、無彩色背景(N 5／)上に各色サンプルを置いた時の背景との対比感を評価している。

彼等はその対比感の評価結果を、背景と有彩色の間のCIE L A B色差と関係づけようとした。しかし、1つの有彩色の背景との対比感は、照度の増加と共に増加する。これに対し、対応するCIE L A B色差は、照度変化に無関係である。このため両者の関係を一義的に定めることが出来なかった。

筆者らは、これに対し次の解析を行った⁽¹⁹⁾。各サンプルごとにカラフルネスが照度の変化によってどのように変わるかを、色知覚モデルで計算した。その結果を図2に示す。図において、原点 $M_{R-G} = 0$ 、 $M_{Y-B} = 0$ が無彩色背景に対応する。図2より各有彩色のカラフルネスは照度の増加によ

5. 色知覚モデルの評価

2つの色知覚モデルを含め、最良の色知覚モデルを1つ選定して、CIEとして勧告することは重要である。最近これを目的とする技術委員会が設立されている。それらはTC1-27反射材料とカラーモニタの色の見えの仕様、TC1-33演色、TC1-34色知覚モデルの試験などの委員会である。この他、CIE Division 1の既設の委員会の研究でも色知覚モデルの活用が勧められるものが多い。以下、モデルの良さの評価において注意すべき点を述べる。

- (1) モデルの構造。1つのモデルは当然その生理的、心理物理的構造を内在している。モデルの評価に当っては、その内在構造が人の色覚について既に判明している生理学、心理物理学の情報にどの程度適合しているかの評価が大切である。さらにモデル構造の単純性も重要条件である。
- (2) モデルの適用性。1つの色知覚モデルの有用性は、出来るだけその適用可能な色の見えの現象の数の多いことにより定まる。さらに良いモデルとは、既に判明している色の見えの効果を予測するのみでなく、これから研究されるべき新しい現象に対しても、1つの洞察を与えることが期待される。なお、そのモデルを新しい現象に適用する場合、モデルに追加のパラメータを次から次へ付加することは望ましくない。
- (3) 実地試験に対する適合性。モデルの評価は、当然実際の物体色の見えの評価実験データと、モデルによる予測データとの一致の良さにより評価される。既に多くの実地試験も行われているが結論に至らない。その詳細は本報では述べない。注意すべきことは、色の見えの評価実験の難かしさである。両眼隔壁法、主観評価法の何れを用いても誤差要因は誠に多い。新人が始めて実験して直ちに世界に通る正しいデータを得ることは一般に困難である。

6. おわりに—今後の期待をこめて

Model HおよびModel Nは殆んど完成しているといつてよい。二三のマイナーな点は将来変更の可能性はある。これは将来のモデル評価の結果を見て考えたいと思っている。

強調したいことは、今後の色彩研究において色知覚モデルの習得活用は不可欠であるということである。電磁気学の知識がなくて電気工学の研究が進まないように、色知覚モデルという指導理念なくして色彩研究は行えない。丁度、海図なしに大海を航行するようなものである。若い研究者の方々が研鑽されることを望みたい。そのために本報が役立つことを期待したい。

詳細は、筆者のCIEメルボルン大会の招待講演⁽²⁰⁾を参照されたい。

参 考 文 献

- (1) Nayatani, T., Takahama, K., and Sobagaki, H.: Formulation of a nonlinear model of chromatic adaptation. Color Res. Appl. 6 (1981) pp.161-171.

- (2) Takahama, K., Sobagaki, H., and Nayatani, Y.: Formulation of a nonlinear model of chromatic adaptation to a light-gray background. Color Res. Appl. 9 (1984) pp.165-115.
- (3) CIE Research Note: Method for predicting corresponding colors with a change in chromatic adaptation to illumination proposed for testing. CIE Journal 5-1 (1986) pp.16-18.
- (4) Hunt, R.W.G.: A model of colour vision for predicting colour appearance. Color Res. Appl. 7 (1982) pp.95-112.
- (5) Estévez, O.: On the fundamental data-base of normal and dichromatic colour vision. Ph. D. thesis, University of Amsterdam. (1979)
- (6) Hunt, R.W.G. and Pointer, M.R.: A colour appearance transform for the CIE 1931 standard colorimetric observer. Color Res. Appl. 10 (1985) pp.165-179.
- (7) Nayatani, Y., Takahama, K., and Sobagaki, H.: Prediction of color appearance under various adapting conditions. Color Res. Appl. 11 (1986) pp.62-71.
- (8) Nayatani, Y., Hashimoto, K., Takahama, K., and Sobagaki, H.: A nonlinear color appearance using Estévez-Hunt-Pointer primaries. Color Res. Appl. 12 (1987) pp.231-242.
- (9) Nayatani, Y., Takahama, K., Sobagaki, H., and Hashimoto, K.: Color-appearance model and chromatic adaptation transform. Color Res. Appl. 10 (1990) pp.210-221.
- (10) Hunt, R.W.G.: A model of colour vision for predicting colour appearance in various viewing conditions. Color Res. Appl. 12 (1987) pp.297-314.
- (11) Hunt, R.W.G.: Procedures for using a revised colour appearance model. (1989, Sep. 18-22) Presented at the conference of the Quantification of Images.
- (12) Hunt, R.W.G.: Revised colour-appearance model for related and unrelated colours. Color Res. Appl. 16 (1991) pp.146-163.
- (13) Nayatani, Y., Umemura, Y., Hashimoto, K., Takahama, K., and Sobagaki, H.: Analyzing the Natural Color Systems color-order system by using a nonlinear color-appearance model. Color Res. Appl. 14 (1989) pp.59-78.
- (14) Nayatani, Y., Umemura, Y., Sobagaki, M., Takahama, K., and Hashimoto, K.: Lightness perception of chromatic object colors. Color Res. Appl. 16 (1991) pp.16-25.
- (15) Nayatani, Y., Gomi, Y., Kamei, M., Sobagaki, H., and Hashimoto, K.: Perceived lightness of chromatic object colors including highly saturated colors. Color Res. Appl. 17 (1992) pp.127-141.
- (16) 橋本健次郎, 納谷嘉信: 演色性の異なる照明下での配色の目立ち感情の評価と予測, 照学誌, 74 (平成2) pp.96-101.
- (17) 橋本健次郎, 納谷嘉信: 4色配色の目立ち感情に基づく明るさ感の評価と予測, 照学誌, 74 (平成2) pp.674-680.
- (18) 大野, 佐藤, 檜崎: 有彩色視対象と背景との対比感と色差についての検討, 照学全大 (昭62) pp.69-70.
- (19) 納谷, 森, 橋本, 側垣, 高浜: 対比感の非線形配色知覚モデルによる予測, 色彩工学コンファレンス (昭63) pp.33-36.
- (20) Nayatani, Y.: Color appearance and its application to illuminating engineering, CIE Proc. 22nd Session Melbourne, 1-1 (1991) pp. Division 1, 73-82.

(受付1992年6月27日)