物体色および光源色の Helmholtz-Kohlrausch 効果の予測— I . 無彩色可変法の場合の推定

専門会員 納 谷 嘉 信 (大阪電気通信大学) 非会員 田 中 力 (大阪電気通信大学)
非会員 田 中 憲 孝 (大阪電気通信大学)

Prediction of the Helmholtz-Kohlrausch Effect on Object and Luminous Colors- I . Estimation in case of the Variable-Achromatic-Color Method

Fellow Member Yoshinobu Nayatani, Non Member Chikara Tanaka, and Non Member Noritaka Tanaka
(Osaka Electro-Communication University, Faculty of Engineering)

ABSTRACT

A prediction method of the Helmholtz-Kohlrausch effect is developed by using the CIELUV formula, and it can predict the effect for object and luminous colors in the whole chromaticity gamut including spectral colors. The method gives equivalent lightness values to chromatic object colors with a constant luminance factor, and equivalent luminance values to chromatic luminous colors with a constant luminance. This condition of prediction is called the Variable-Achromatic-Color method. The predicted results by the developed method agree well with the corresponding experimental results reported so far.

KEYWORDS : the Helmholtz-Kohlrausch effect, the VAC method, brightness, lightness, chromatic colors.

1. ま え が き

同一輝度率 (Y 値) を有する無彩色と有彩色が、常に同一の知覚明度を有することを現在の CIE の測光システムは期待する。しかし、一般に直接比較の場合両者の知覚明度は異なる。特に高彩度の青、紫、赤紫、赤等の色相を有する有彩色では同一 Y 値を有しても無彩色にくらべ知覚明度はかなり大きく異なる。この事実は既に1930年代より報告されており、Helmholtz-Kohlrausch 効果(以下 H-K 効果と略)とも呼ばれている。これは現在の CIE における測光・測色の基礎をゆるがす重要問題でありその解決が古くから望まれている。最近迄の研究の詳細は Wyszecki-Stiles の Color Science¹⁾およびそれに示される文献を参照されたい。

ここで H-K 効果は一般に次のように推定される。同一 Y 値の無彩色と有彩色それぞれの知覚明度 (心理量) の直接推定は一般に困難である。このため同一知覚明度を有する無彩色の Y_w と有彩色の Y_c の値を、異色明度マッチの実験で定め、H-K 効果を Y_w と Y_c の比として与えることが一般に採用されている。

その後 CIE では1970年代より数種の TC^{*1} (技術委員会) を設定、それらの活動のすべて又は1部の重要課題として H-K 効果が取り上げられ研究が行われてきている。これに対する我が国の研究者、特に池田光男教授とその門下の方々の実験的研究による寄与が顕著である。

本号掲載の「物体色および光源色の Helmholtz-Kohlrausch 効果の予測 I, II」および「Helmholtz-Kohlrausch 効果における VAC 法と VCC 法の関係」の3報文は密接に関連している。

*1 TC1-02 Luminous efficiency functions, TC1-21 Testing of supplementary system of photometry, TC1-37 Supplementary system of photometry.

筆者も共同研究者とともに色の見えに関する研究の1つの重要課題として、次の諸研究を1990年頃から報告してきた。

- 1) 非線形色知覚モデルを用いる色度全域の H-K 効果の推定²⁾。
- 2) H-K 効果の順応照度依存性に関する研究³⁾。
- 3) H-K 効果の表現に無彩色可変表示法 (VAC 法と呼ぶ) と有彩色可変表示法 (VCC 法) の2種のあることを示した。さらに実用的には VCC 法の方が有効であること、および両方法の推定式を非線形色知覚モデルで与え、それらの予測と対応実験を比較した⁴⁾⁵⁾。なお VAC 法と VCC 法の説明は付録に示す。
- 4) 一般技術者にとって計算が複雑な非線形色知覚モデルを用いる代わりに、CIELUV 式を用いてほぼ前者と同等の適用範囲と精度で H-K 効果を予測しうる方式を開発した⁶⁾⁷⁾。

しかし以上の結果は、すべて物体色および疑似物体色を対象とするものであった。これらを光源色にまで適用範囲を広めることは極めて実用上の意義が高い。本報および続報の2報で VAC 法と VCC 法のそれぞれを用い、光源色に関する H-K 効果を CIELUV 式を用いて推定する方式を与え実験結果との比較を示す。本報ではそのうち VAC 法について両モード (物体色および光源色) に対する推定を与える。

2. 基本式の導出

本章では VAC 法および VCC 法に共用しうる光源色の H-K 効果の推定式を導く。VAC 法と VCC 法の差については付録を参照されたい。

2.1 光源色の H-K 効果の一般式

既に物体色の場合の H-K 効果の予測式として次式を与える

た⁶⁾。

$$L_N^* = L^* + \alpha_1 [q_1, q_2, C^*] + \alpha_2 C^* K_{Br} \tag{1}$$

ここで L^* , C^* は試験有彩色のメトリック明度とクロマ, L_N^* はその有彩色と等知覚明度を有する無彩色のメトリック明度である。この L_N^* は試験有彩色の等価明度と呼ばれる。(1)式において K_{Br} は基準順応輝度と異なる順応輝度を用いる場合の補正項である。さらに $[q_1, q_2, C^*]$ は一定マンセル明度の有彩色間の白味・黒味量の偏差量で(2)式で与えられる。

$$[q_1, q_2, C^*] = q_1(\theta) C^* + q_2(\theta) C^{*2} \times 10^{-4} \tag{2}$$

なお, $q_1(\theta)$, $q_2(\theta)$ はそれぞれメトリック色相角 θ に関するフーリエ級数で与えられている⁶⁾。

(1)式はスウェーデンのNCS表色系⁸⁾において、黒味量 s , 白味量 W , 色味量 Cr の同一値を有する有彩色群は、色相の如何にかかわらずほぼ同一の知覚明度を有するという研究⁷⁾に基づいている。なお(1)式は有彩色の知覚明度が、次の3項より構成されることを示している。

- 1) 有彩色のメトリック明度 L^*
- 2) 一定メトリック明度の有彩色間に存在する白味・黒味量の差違が知覚明度に及ぼす影響, $\alpha_1 [q_1, q_2, C^*]$ 。
- 3) 有彩色のクロマの知覚明度へ及ぼす影響, $\alpha_2 C^*$ 。

これらの3項の和が、その有彩色と等知覚明度を与える無彩色のメトリック明度 L_N^* を示す。一般に L^* と L_N^* は異なる。これがH-K効果である。 α_1 , α_2 は実験条件に対応する係数である。さらに(2)式は次の1次式で十分よく近似できることが別途行った解析で判明している。

$$[q_1, q_2, C^*] \cong q(\theta) C^* \tag{3}$$

ここで $q(\theta)$ はメトリック色相角 θ の関数であり、この関数形については次節で述べる。(2)式と(3)式を組み合わせると次式を得る。

$$L_N^* = L^* + \alpha_1 q(\theta) C^* + \alpha_2 C^* K_{Br} \\ = L^* + \alpha_1 q(\theta) L^* S_{uv} + \alpha_2 L^* S_{uv} K_{Br} \tag{4}$$

ここでは S_{uv} メトリック彩度で $C^* = L^* S_{uv}$ の関係にある。(4)式は、メトリック明度比の形に整理され(5-a)式を得る。さらに物体色の場合のメトリック明度比 (L_N^*/L^*) は光源色の場合のメトリック明るさ比 (B_r/B_r) に対応し、(5-b)式で表される。

$$\frac{L_N^*}{L^*} = 1 + \{ \alpha_1 q(\theta) + \alpha_2 K_{Br} \} S_{uv} \tag{a)}$$

$$\frac{L_N^*}{L^*} = \frac{B_{rN}}{B_r} \tag{b)}$$

ここで、 B_r は試験有彩色光のメトリック明るさ、 B_{rN} はこれと同一明るさ知覚を与える規準白色光のメトリック明るさである。(5-a)式の右辺は試験色および規準色のメトリック明度およびメトリック明るさに無関係であるので、物体色および光源色の両モードに共通に用いることができる。Bodmannの研究⁹⁾によれば色光のメトリック明るさ B_r は $B_r = aL^{0.31} - b$ と与えられる。ここで L はその色光の輝度 (cd/m^2)、 a , b は定数で2度視野・暗黒背景の場合の値を用いる。これについては、次節で述べる。

これらの関係を用いて、メトリック明るさ比を示す(5)式は、輝度値を用い次のように変換される。

$$\frac{aL_N^{0.31} - b}{aL^{0.31} - b} = 1 + \{ \alpha_1 q(\theta) + \alpha_2 K_{Br} \} S_{uv} \tag{6}$$

ここで L は試験有彩色光の輝度、 L_N はそれと同一知覚明るさを与える規準白色光の輝度に対応する。

2.2 前節の各種パラメーターについて

本節では $q(\theta)$, K_{Br} , およびメトリック明るさ式のパラメーター a , b について説明する。

1) $q(\theta)$

まずNCS表色系⁸⁾の灰色 ($s=50$, $C_r=0$) と純色 ($s=0$, $C_r=100$) を結ぶ線上の色群をCIELUV空間内に各色相ごとに表現する。ここで s はNCS黒味量, C_r はNCSクロマチックネスである。これらの色群は灰色味 (白味量=黒味量) の存在という意味で共通性はある。しかしそれらのメトリック明度 L^* は一定でなく、色相によって彩度によって様々に変化する。それらの L^* は無彩色灰色のメトリック明度 L^*_{Gray} とは様々にずれる。 $q(\theta)$ は L^* と L^*_{Gray} のずれが色相ごとに変化する状況を定める係数で、次式で与えられる。この $q(\theta)$ は等灰色面と等メトリック明度面のずれを与える。

表1 色相角 θ (度) と $q(\theta)$ の値。色相角はほぼ左端のNCS色相に対応する。
Table 1 Values of metric hue angle θ (deg.) and $q(\theta)$. Each metric hue angle θ corresponds to each of NCS hues in the first column.

NCS hue	θ	$q(\theta)$
Y	70.2	0.21831
Y10R	60.7	0.19925
Y20R	51.2	0.15972
Y30R	42.6	0.11052
Y40R	36.5	0.07115
Y50R	31.4	0.03732
Y60R	26.5	0.00536
Y70R	22.0	-0.02257
Y80R	17.7	-0.04731
Y90R	14.0	-0.06670
R	9.9	-0.08585
R10B	4.6	-0.10671
R20B	356.5	-0.13009
R30B	342.6	-0.14991
R40B	320.7	-0.15551
R50B	301.5	-0.15702
R60B	279.8	-0.14948
R70B	267.3	-0.13407
R80B	258.7	-0.11872
R90B	251.0	-0.10280
B	242.2	-0.08364
B10G	232.3	-0.06294
B20G	224.6	-0.04868
B30G	216.3	-0.03563
B40G	208.4	-0.02577
B50G	199.8	-0.01771
B60G	192.5	-0.01280
B70G	186.1	-0.00970
B80G	178.3	-0.00701
B90G	168.7	-0.00439
G	154.3	0.00200
G10Y	140.6	0.01766
G20Y	129.2	0.04293
G30Y	118.0	0.07998
G40Y	107.0	0.12491
G50Y	99.8	0.15530
G60Y	94.3	0.17687
G70Y	89.5	0.19326
G80Y	84.3	0.20731
G90Y	77.9	0.21776

図1 θ と $q(\theta)$ の関係
Fig. 1 Relation between θ and $q(\theta)$.

$$\begin{aligned}
 q(\theta) = & -0.01585 \\
 & -0.03017\cos\theta - 0.04556\cos2\theta \\
 & -0.02667\cos3\theta - 0.00295\cos4\theta \\
 & +0.14592\sin\theta + 0.05084\sin2\theta \\
 & -0.01900\sin3\theta - 0.00764\sin4\theta
 \end{aligned} \quad (7)$$

表1に色相角 θ と $q(\theta)$ の値を示す。図1の実線は(7)式による $q(\theta)$ の値、黒丸はNCS表色系における各色相ごとの $q(\theta)$ の値を示す。一般に等マンセル明度を有する有彩色群は色相によって白味量、黒味量の存在の割合が異なる。 $q(\theta)$ はこれらの差違が有彩色の知覚明度あるいは知覚明るさに与える影響を推定するためのものである。

2) K_{Br}

H-K効果は順応輝度(又は照度) L_a の増大とともに、増大する。物体色の場合は順応背景の輝度を L_a とする。光源色の場合は暗黒背景を考え、提示刺激の輝度を L とする。

K_{Br} はこの順応輝度変化の影響の補正項であって、非線形色知覚モデル¹⁰⁾の対応項を用いた。次式に示す。

$$K_{Br} = 0.2717 \frac{6.469 + 6.362L_a^{0.4495}}{6.469 + L_a^{0.4495}} \quad (8)$$

L_a の値は物体色の場合は左右両視野ともに同一照度のため同一である。しかし、光源色の場合、有彩色光の輝度 L と無彩色光(白色光)の輝度 L_N は、両者の等明さ条件において一般に異なる値を有する。順応輝度については両者の平均を用いることが期待されるが、これについては第2報で検討する。(8)式は既に $L_a = 63.66 \text{ cd/m}^2$ で1となるよう規準化されている。これは灰色背景 $Y_a = 20$ 、順応照度 1000 lx に対応する輝度である。

3) 定数 a, b について

メトリック明るさと輝度の関係を与える Bodmann らの論文⁹⁾では次の関係式を示している。

$$B = C_T(\varphi) L_T^n - C_T(\varphi) [S_0(\varphi) + S_1(\varphi) L_u^n] \quad (9)$$

ここで φ は色刺激の視角(分)、 L_u は背景輝度、 L_T は試験色刺激の輝度(本報の L と同じ)、 $C_T(\varphi)$ 、 $S(\varphi)$ は φ の関数であり Bodmann らの論文に計算値が表で示されている。

それらの表より $\varphi = 120'(2^\circ)$ 、暗黒背景 $L_u = 0$ に対し、 $C_T(120') = 22.969$ 、 $S_0(120') = 0.07186$ を得る。これらを(9)式に代入すると(10)式となる。

$$\begin{aligned}
 B &= 22.969 [L_T^{0.31} - 0.07186] \\
 &= 22.969 L_T^{0.31} - 1.650
 \end{aligned} \quad (10)$$

これにより既述の式 $B = aL^{0.31} - b$ の定数に対して $a = 22.97$ 、 $b = 1.65$ と値を定めることができる。

2.3 光源色(VAC法)の場合の推定式の導出

光源色(VAC法)の場合のH-K効果の推定式を求める。この場合は、有彩試験色光の色度 x, y および輝度 L (一定)を与えてそれと等明さとなる白色光(C光)の輝度 L_N (可変)を求める。このため(6)式を変形して(11)式を用いると便利である。 k は光源色の場合のH-K効果の調整項である。これは物体色の L^* と光源色の B_T 式の構造差を補正するための係数である。これについては後述する。

$$L_N^{0.31} = \frac{1}{a} [b + (aL^{0.31} - b) [1 + k\{\alpha_1 q(\theta) + \alpha_2 K_{Br}\} S_{uv}]] \quad (11)$$

k を定め、有彩試験色の色度 x, y および輝度 L を与えて、それらより $u', v', \theta, S_{uv}, q(\theta), K_{Br}$ を求める。既述のように $L = 63.66 \text{ cd/m}^2$ において $K_{Br} = 1$ が成立するように基準化されている。以上の値を(11)式に代入すると、 L_N を求めることが出来る。この場合H-K効果は(12)式で求められる。この計算過程で、試験有彩色の輝度 L を順応輝度 L_a と定めて用いた。

$$\delta = \log_{10} \frac{L_N}{L} \quad (12)$$

詳細な計算手順は4章で述べる。

3. 物体色(VAC法)の場合のH-K効果の推定

3.1 推定式の確定

先ず物体色(VAC法)の場合のH-K効果について、(4)式における係数 α_1, α_2 の値を実験結果に対応させて定めよう。

実験データはVAC法に基づく Wyszecki の実験¹¹⁾に基礎をおく。既に非線形色知覚モデルを用いて Wyszecki 実験データを精度よく予測する式を与えた²⁾。それを用い $Y = 20$ (一定)で様々な色度を有する305の有彩色群のそれぞれと知覚明度の等しい無彩色の Y_N 値を推定した。

使用データはスペクトル色度を含む305色の物体色(疑似物体色を含む)の $x, y, Y = 20$ およびそれに対応する Y_N である。これらの情報をもとに(4)式の α_1, α_2 を最小二乗法で推定した。その結果を(13)式で示す。

$$L_N^* = L^* - 0.1340 q(\theta) C^* + 0.0872 C^* \cdot K_{Br} \quad (13)$$

(13)式で推定した Y_N 値と、元の Y_N 値の相関は相関係数0.931と良好であった。

3.2 スペクトル色度を有する疑似物体色のH-K効果の推定

(13)式により、次の手順で推定する。ただし、順応輝度 $L_a = 63.66 \text{ cd/m}^2$ 、 $K_{Br} = 1$ の場合について計算する。

- 1) スペクトル色度 $x_\lambda, y_\lambda, Y = 20$; $\lambda = 400 \text{ nm} \sim 700 \text{ nm}$, 10 nm おきの各色に対し、各波長ごとに、 $\theta_\lambda, C_\lambda^*, L^*, q(\theta_\lambda)$ を計算する。
 - 2) (13)式により $L_{N\lambda}^*$ を求める。
 - 3) $L_{N\lambda}^*$ から逆変換により $Y_{N\lambda}$ を求める。
 - 4) $\log_{10} Y_{N\lambda}/20$ を求める。
- さらに(14)式により、 $Y_{N \cdot 570}$ に対して基準化する。

$$\delta_\lambda = \log_{10} \frac{Y_{N\lambda}}{20} - \log_{10} \frac{Y_{N \cdot 570}}{20} = \log_{10} Y_{N\lambda} / Y_{N \cdot 570} \quad (14)$$

図2に δ_λ の計算結果を実線で示す。同図点線はCIE技術報告 No.75¹²⁾の $V_{\lambda,2}(\lambda)$ およびCIE技術報告 No.86¹³⁾の $V_M(\lambda)$ より次式で計算したものである。

図2 スペクトル色度を有する擬似物体色の H-K 効果。
Fig.2 The H-K effect on pseudo-object colors with spectral chromaticities.

$$\delta'_\lambda = \log_{10} \frac{V_{b,2}(\lambda)}{V_M(\lambda)} - \log_{10} \frac{V_{b,2}(570)}{V_M(570)} \quad (15)$$

これらの $V_{b,2}(\lambda)$ と $V_M(\lambda)$ は何れもスペクトル色光を用いる実験に基礎をおく。(15)式は異色直接色あわせ輝度とフリッカー法に基づく輝度との比率を与え、これは(14)式の最初の式に対応する。

図2の(14)式の δ_λ と(15)式の δ'_λ 、両者の一致はほぼ良好であり、(1)式を(4)式に変化しても大差の無いことが判明した。

なお図2において存在する δ_λ , δ'_λ の差の存在は前者の推定に用いた順応輝度が 63.66 cd/m^2 であり、後者の実験順応輝度は約 10 cd/m^2 であることによる。推定に用いる順応輝度を 10 cd/m^2 に設定すると、さらに両者の一致は良好となることが判明している⁶⁾。

3.3 色度図内の H-K 効果の等高線の推定

種々の等明度有彩色 x , y , $Y=20$ に対し、それぞれと等知覚明度を有する無彩色の Y_N 値が存在する。それらは(13)式で関係づけられる。(13)式に基づいて $\log_{10} Y_N/20 = \text{一定}$ の軌跡を色度図内全域で推定した。ただし順応輝度 $L_a = 63.66 \text{ cd/m}^2$, $K_{Br} = 1$ の条件で計算する。

計算手順を以下に示す。

- 1) $Y=20$ とする。 $\log_{10} Y_N/20 = 0.00, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20$ の5条件に対する Y_N を求める。
- 2) 前項の5条件それぞれの Y_N に対応して L_N^* , および $Y=20$ に対応する L^* を求める。各条件に対し、(1)式を用いた手順で C^* を求める。
 - $\theta = 0^\circ \sim 350^\circ$ (10° 間隔) に対し、(7)式により $q(\theta)$ を求める。
 - L_N^* , L^* , $q(\theta)$ を(13)式に代入し C^* を求める。各 θ ごとに C^* が異なる。
- 3) $u_\theta^* = C^* \cos \theta$, $v_\theta^* = C^* \sin \theta$ の関係式に C^* , θ を代入して、 u_θ^* , v_θ^* を求める。つぎに $u_\theta^* = 13L^*(u_\theta' - u_c')$, $v_\theta^* = 13L^*(v_\theta' - v_c')$ に、 u_θ^* , v_θ^* , L^* , u_c' , v_c' を代入し、 u_θ' , v_θ' を求める。ただし u_c' , v_c' は C 光の色度に対応する u' , v' 座標である。
- 4) u_θ' , v_θ' を x_θ , y_θ に変換する。
- 5) $\theta = 0^\circ \sim 350^\circ$ の x_θ , y_θ を定め、各等高線を描く。

ここで各等高線は $\log_{10} Y_N/20 = 0.00, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20$ に対応する。ただし $\log_{10} Y_N/20$ の特定値に対応する軌跡とスペクトル軌跡との交点については、3.2節の情報を参照した。求めた軌跡は図3に示す。この結果も2次式の $q(\theta)$ を用いた場合の推定結果⁶⁾に極めて近い。VAC法では(4)式で示す簡易式が十分な精度で使用出来ることが判明した。

図3 全色度図にわたる $Y=20$ を有する物体色 (擬似物体色を含む) の H-K 効果。各等高線は $\log_{10} Y_N/20 = 0.05 \sim 0.20$ (0.05 間隔) の値に対応。

Fig.3 The H-K effect on object colors (including pseudo-object colors) with $Y=20$ in the whole chromaticity gamut. Each locus corresponds to each of $\log_{10} Y_N/20 = 0.05$ to 0.20 (equal interval of 0.05).

4. 光源色 (VAC 法) の場合の H-K 効果の計算

4.1 推定式の確定

光源色の場合の VAC 法の式(11)式を再び次に示す。

$$L_N^{0.31} = \frac{1}{a} \left[b + (aL^{0.31} - b) [1 + k(\alpha_1 q(\theta) + \alpha_2 K_{Br}) S_{uv}] \right] \quad (16)$$

ここで暗黒背景中の色光提示に対して、既述の次の値を用いる。

$a = 22.97$, $b = 1.65$ および $\alpha_1 = -0.1340$, $\alpha_2 = 0.0872$ 。

さらに L : 試験有彩色光の輝度 (cd/m^2), 一定値。

L_N : 試験有彩色と等明さを与える白色光の輝度 (cd/m^2), 可変値。

$q(\theta)$: (7)式の Fourier 級数で定まる値。

K_{Br} は(8)式に示す。ただし順応輝度 L_a として L を用いる。

なお(16)式において $k=0.75$ を用いた。物体色を用いる場合の H-K 効果の特性と光源色を用いる場合の H-K 効果の特性は、両条件において順応輝度を同一に保つ限りほぼ等しいとする実験的証拠がある。それは図2のように、物体色を用いる Wyszecki 実験に基づき順応輝度 63.66 cd/m^2 に対するスペクトル色に対する δ_λ と (同図実線), 順応輝度・約 10 cd/m^2 で光源色を用いて実験的に定められた $V_{b,2}(\lambda)$ および $V_M(\lambda)$ から求めた δ'_λ (同図点線) の間にほぼ良好な一致が見られること、さらに推定の順応輝度を 10 cd/m^2 にすればさらに両者の一致が改善されることから明らかである。

CIE のメトリック明度 L^* の式と Bodmann の明るさ B_r の式の構造の差から、(16)式において $k=1$ と設定した場合、順応輝度が同一の場合、物体色の場合の δ_λ に対し、光源色の場合の対応値はやや大きくなる。 k はその補正のための係数である。 k を様々に変化して検討の結果、 $k=0.75$ を採用した。以下その値を用いた結果を報告する。

4.2 スペクトル色光の場合の H-K 効果の推定

$L = 63.66 \text{ cd/m}^2$, $k=0.75$, $\lambda = 400 \sim 700 \text{ nm}$ (10 nm 間隔) に対し次の手順で H-K 効果を推定する。

- 1) x_λ, y_λ を与え, u'_λ, v'_λ を与える.
- 2) $\theta_\lambda = \tan^{-1} \frac{v'_\lambda - v'_c}{u'_\lambda - u'_c}$, および $q(\theta_\lambda)$ を計算する.

ここで u'_c, v'_c は C 光の u', v' 色度の値である.

θ_λ の計算は $(v'_\lambda - v'_c)$ および $(u'_\lambda - u'_c)$ の符号により象現を考慮する.

- 3) $S_{uv} = 13 [(u'_\lambda - u'_c)^2 + (v'_\lambda - v'_c)^2]^{1/2}$ を求める.
- 4) (16)式に $L, q(\theta_\lambda), K_{Br}, S_{uv}$ を代入し, $L_{N\lambda}$ を求める.
- 5) $\log_{10} L_{N\lambda}/L$ を求める. さらに(17)式の δ_λ を求め, その波長特性を画く.

$$\delta_\lambda = \log_{10} \frac{L_{N\lambda}}{L} - \log_{10} \frac{L_{N570}}{L} \quad (17)$$

図4に上記の光源色の場合の δ_λ を実線で示す. 同図点線は, 物体色の同一順応輝度 63.66 cd/m^2 に対する(14)式および図2実線に示す δ_λ の値である. 両者の一致は極めて良好である.

4.3 色度図内の H-K 効果の等高線の推定

光源色の場合について, 全色度図内の VAC 法による H-K 効果の推定を行う. 一定輝度 L を有する種々の有彩色光 x, y, L に対し, それぞれと等知覚明度を有する白色光 L_N が存在する. それらは(6)式および(16)式で関係づけられる. $\log_{10} L_N/L = \text{一定}$ の軌跡を色度図内全域で推定した.

$L = 63.66 \text{ cd/m}^2$ の輝度について次の手順で求める.

- 1) $\log_{10} L_N/L = 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25$ のそれぞれの L_N を定める.
- 2) $\theta = 0^\circ \sim 350^\circ$ (10° おき) に対し, $q(\theta)$ を定める. K_{Br} の値も L に対して定める. $L_a = L$ と定めることに対応する.
- 3) (6)式より, 次式で S_{uv} を定める.

$$S_{uv} = \left(\frac{aL_N^{0.31} - b}{aL^{0.31} - b} - 1 \right) / (\alpha_1 q(\theta) + \alpha_2 K_{Br}) \quad (18)$$

- 4) S_{uv} より次式で u', v' を求める.

$$u' - u'_c = \frac{S_{uv} \cos \theta}{13}$$

$$v' - v'_c = \frac{S_{uv} \sin \theta}{13} \quad (19)$$

- 5) u', v' を x, y に変換する.
- 6) $\log_{10} L_N/L = \text{一定}$ に対応する等高線を作成する. 各 L ごとに, $\log_{10} L_N/L = \text{一定}$ となる色度 x, y を結んで軌跡を画く.

図4 輝度 $L = 63.66 \text{ cd/m}^2$ のスペクトル色光の H-K 効果. (17)式の計算結果.
Fig. 4 The H-K effect on spectral colors with $L = 63.66 \text{ cd/m}^2$ predicted by using Eq. (17).

図5 輝度 $L = 63.66 \text{ cd/m}^2$ の色光の H-K 効果. 各等高線は $\log_{10} L_N/L = 0.05 \sim 0.25$ (0.05間隔) に対応.

Fig. 5 The H-K effect on chromatic lights with $L = 63.66 \text{ cd/m}^2$ in the whole chromaticity gamut. Each locus corresponds to each of $\log_{10} L_N/L = 0.05$ to 0.25 (equal interval of 0.05).

図5に $L = 63.66 \text{ cd/m}^2$, $k = 0.75$ に対し, $\log_{10} L_N/L$ の値が $0.05 \sim 0.25$ の5水準に対する等高線を示す. この結果は図5との同一順応輝度に対する物体色の場合の同様の等高線図3に極めて類似している.

5. まとめ

本報では, 等明度あるいは等輝度の有彩物体色又は有彩色光に対し, それらと等知覚明度または等明るさとなる無彩色物体又は白色光を定める方法 (無彩色可変表示法, VAC 法) を与えた. 本報での結論をまとめると, 次のようになる.

- 1) CIELUV 式を用い, 光源色および物体色の両モードに対する H-K 効果を推定する方法を定めた. 光源色では輝度 L を用い, 物体色では三刺激値の Y 値を用いる構造となっている.
- 2) 本報の予測式は, 既報の非線形色知覚モデルを用いる H-K 効果の予測式²⁾および CIELUV 式を用いる既報の予測式⁶⁾にくらべ計算が簡易化されている. しかしその H-K 効果の予測精度は, それらに劣らず良好である.
- 3) スペクトル色に対する本報の予測式は, 実験に基礎を置き CIE で定めた $V_{b,2}(\lambda), V_m(\lambda)$ から推定した H-K 効果の結果と, 同一順応輝度において極めて良好な一致を示した.
- 4) 従来の H-K 効果の推定は Y 値の比または輝度の比で示されてきた. 本報の結果の表示もそれに従って示した. しかし, (5)式に見るように本報の予測式は, H-K 効果をメトリック明度 L^* の比, または明るさ B_r の比としても求める構造となっていることに注意したい.
- 5) 一定無彩色と等知覚明度または等明るさとなる有彩色を定める今1つの H-K 効果の推定法 (可変有彩色法, VCC 法) については続報で述べる.

付録 VAC 法と VCC 法の説明

H-K 効果に対する実験方法には原理的に次の2方法がある. 物体色についてその原理を示す.

1) 一定 Y 値 (マンセル明度一定) を有し、種々の色度 x, y を有する試験有彩色のそれぞれに対し、無彩色スケールを用い、その Y_N 値を変化して、各有彩色と異色明るさ比較で等明るさとなる Y_N 値を定める方法。一定 Y 値の有彩色の知覚明度の変化を無彩色の Y_N の変化で表現する方法。

2) 一定 Y_N 値を有する規準無彩色に対し、種々の試験有彩色の 1 つを選定し、その色度 x, y を一定に保ちながら、その Y 値を変化して異色明るさ合わせを行う。等明るさ条件におけるその有彩色の Y 値を定める方法。一定の知覚明度 (一定 Y_N の無彩色に対応する知覚明度) に対応して、種々の色度 x, y における Y 値の変化で H-K 効果を表現する方法。

前者は無彩色の Y_N 値を変化して、H-K 効果を示す方法であり、無彩色可変表示法 (Variable-Achromatic-Color Method, VAC 法) と命名された⁴⁾。後者は有彩色の Y 値を変化して H-K 効果を表示する方法であり、有彩色可変表示法 (Variable-Chromatic-Color Method, VCC 法) と命名された⁴⁾。

両方法は H-K 効果に対し、表と裏の関係にあり、古くより同一の実験結果を与えると思定されて来た。しかも物体色を用いる H-K 効果推定の実験では、VAC 法の実施が簡単で VCC 法の実施は極めて困難である。このため従来 VAC 法が主として実験に用いられてきた。筆者らの 1 人は両方法について理論的、実験的両面からの深い検討の結果両方法の間に大きな差の存在することを発見した⁴⁾⁵⁾。さらに色光の明るさの視感測光の目的には VCC 法が有効であることを示した。一方本報で述べた VAC 法の推定式は 1) 項の VAC 法に対応する実験結果の推定に有効である。

参 考 文 献

- (1) G. Wyszecki and W. S. Stiles: Color Science, Second Edition (1987) 410-420, John Wiley & Sons.
- (2) Y. Nayatani, Y. Gomi, M. Kamei, H. Sobagaki, and K. Hashimoto: Perceived lightness of chromatic object colors including highly saturated colors, Color Res. Appl. 17, 127-141 (1992).
- (3) Y. Nayatani, H. Sobagaki, and K. Hashimoto: Illuminance dependency of L/Y (lightness/luminance-factor)-ratio effect, Color Res. Appl. 18, 171-177 (1993).
- (4) Y. Nayatani, H. Sobagaki, and K. Hashimoto: Existence of two kinds of representations of the Helmholtz-Kohlrausch effect. I. The experimental confirmation, Color Res. Appl. 19, 246-261 (1994).
- (5) Y. Nayatani, H. Sobagaki, and K. Hashimoto: Existence of two kinds of representations of the Helmholtz-Kohlrausch effect. II. The models, Color Res. Appl. 19, 262-272 (1994).
- (6) Y. Nayatani and M. Nakajima: Estimation of Helmholtz-Kohlrausch effect using the CIELUV formula, Color Res. Appl. 21, 252-268 (1996).
- (7) Y. Nayatani and M. Nakajima: Prediction of the Helmholtz-Kohlrausch effect (VCC method) using the Swedish NCS system, Color Res. Appl. 21, 269-276 (1996).
- (8) (a) Swedish Standard SS 01 91 02, Color Atlas, Swedish Standards Institution, Stockholm, 1979.
(b) Swedish Standard SS 01 91 03, CIE tristimulus values

and chromaticity coordinates for the color samples in SS 01 91 02, Swedish Standards Institution, Stockholm, 1979.

- (9) H. W. Bodmann, P. Haubner, and A. M. Marsden: A unified relationship between brightness and luminance, Proc. 19th session, Kyoto 1979, Publ. CIE No.50, 99-102 (1980).
- (10) (a) Y. Nayatani: Revision of chroma and hue scales of a nonlinear color-appearance model, Color Res. & Appl. 20, 143-155 (1995).
(b) Y. Nayatani, H. Sobagaki, K. Hashimoto, and T. Yano: Lightness dependency of chroma scales of a nonlinear color-appearance model and its latest formulation, Color Res. & Appl. 20, 156-169 (1995).
- (11) G. Wyszecki, Correlate for brightness in terms of CIE chromaticity coordinates and luminous reflectance, J. Opt. Soc. Am. 57, 254-257 (1967), および(1)参照.
- (12) Publication CIE No.75, Spectral luminous efficiency functions based upon brightness matching for monochromatic sources, Central Bureau of CIE, Vienna, 1988.
- (13) Publication CIE No.86, CIE 1988 2° spectral luminous efficiency function for photopic vision, Central Bureau of CIE, Vienna, 1990.

(受付日1996年12月9日/採録日1997年11月6日)

なやたに よしのぶ
納谷 嘉信 (専門会員)

大阪電気通信大学

昭和2年5月25日生まれ。昭和26年大阪大学工学部電気工学科卒業。昭和26年4月電気試験所(現、電子技術総合研究所)に入所。大阪支所に配属され、色彩計測および色彩感覚に関する研究に従事。大阪支所長を経て、現在、大阪電気通信大学工学部経営工学科教授。昭和41年5月照明学会賞を受賞。昭和63年照明学会副会長。電気学会、日本光学会、心理学会、日本色彩学会、日本人間工学会、日本照明委員会、OR学会、品質管理学会、行動計量学会各会員。

たなか ちから
田中 力 (非会員)

昭和47年10月24日生まれ。平成8年3月大阪電気通信大学工学部経営工学科卒業。現在、株式会社大商勤務。

たなか のりたか
田中 憲孝 (非会員)

昭和48年8月10日生まれ。平成8年3月大阪電気通信大学工学部経営工学科卒業。現在、日本生命保険相互株式会社御堂筋支社勤務。