

## 特集：デジタル画像形成の最前線 2005 解説

## CIE 色の見えモデル (CIECAM02) の概要とその応用

## Outline of the CIE Color Appearance Model (CIECAM02) and Its Application

矢口 博久\*

Hirohisa YAGUCHI\*

**要 旨** 色の見えのモデル化は画像産業界におけるクロスメディア色再現に重要になってきている。1997 年に国際照明委員会 (CIE) は色の見えモデルの簡易版として CIECAM97s を推奨した。CIECAM97s は多くの実験データをよく予測するものであるが、いくつかの欠点も指摘された。最近、新しい色の見えモデルとして CIECAM02 が開発され、それは CIECAM97s に置き換わる。ここでは、CIECAM02 の概略と応用例について解説する。

**Abstract** Color appearance modeling is becoming important due to the requirement of cross-media color reproduction in imaging industry. In 1997, CIE recommended a simple version of the CIE color appearance model, CIECAM97s. Although CIECAM97s gives satisfactory predictions to the experimental data, some shortcomings were pointed out. Recently, a new model, CIECAM02 was developed to replace CIECAM97s. In this article, outline of the CIE Color Appearance model (CIECAM02) is reviewed. Then, examples of the application of the CIECAM are mentioned.

**キーワード** : 色の見えモデル, CIE 表色系, 色再現

**Key words**: color appearance model, CIE colorimetric system, color reproduction

## 1. はじめに

国際照明委員会 (CIE) の表色系は、人間の色覚情報処理過程の流れに沿って発展している。1931 年の CIE XYZ 表色系はヤング・ヘルムホルツの三色理論の基である錐体レベルの表色系であり、1976 年の CIELAB, CIELUV の均等色空間は色覚理論では、反対色レベルに対応する。色覚情報処理の最終出力は色の見えであり、それは色の 3 属性というかたちで表現される。CIE では、第 1 部会 (視覚と色) において標準的な色の見えのモデルの検討が行われ、1997 年の京都会議で、CIECAM97s<sup>1)</sup> が合意された。その後、色の見えのモデルの検討は、1998 年に設立された CIE 第 8 部会 (画像技術) に引き継がれ、CIECAM97s の改良を重ね、2002 年に CIECAM02 が合意され、2004 年始めに正式に CIE TC8-01 のテクニカルレポートが CIE Publication 159<sup>2)</sup> として発刊された。画像産業分野の技術者達が、色の見えモデルに注目した理由には、このモデルが画像システムの構築、設計、特に色再現の設計に大いに役立つであろうとの期待であった。ここでは、CIECAM02 について、CIECAM97s からの変更点、概要を述べ、最後に、その応用例を紹介する。

## 2. CIECAM97s から CIECAM02 への改良点

Fig. 1 に CIECAM の概略図を示す。入力対象とする色刺

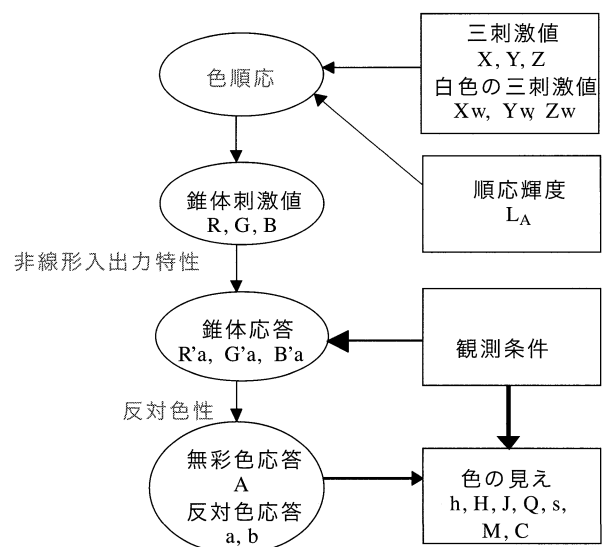


Fig. 1 CIECAM の概略図

激の三刺激値  $X, Y, Z$ , その環境の基準白色の三刺激値,  $X_w, Y_w, Z_w$ , その環境の順応輝度  $L_A$  と観察条件に依存する種々のパラメータである. これらの数値をモデルに入力することにより, 色順応, ダイナミックレンジ変換を経て, 無彩色応答, 反対色応答が得られ, 最終的な出力として, 色の属性が得られる. 出力である色の属性は, 色相の属性として, 色相角  $h$  と色相成分  $H$ , 明るさの属性として, 明るさ  $Q$ , 明度  $J$ , そして, 彩度の属性として, 飽和度  $s$ , クロマ  $C$ , カラフルネス  $M$  である. 明るさとカラフルネスは絶対的な感覚量であり, 明度, クロマは相対的な感覚量である. これらの感覚量を数式で表現すると以下のようになる<sup>3)</sup>.

$$\begin{aligned} \text{明度} &= \text{対象の明るさ} / \text{その環境の白の明るさ} \\ \text{クロマ} &= \text{対象のカラフルネス} / \text{その環境の白の明るさ} \\ \text{飽和度} &= \text{カラフルネス} / \text{明るさ} (= \text{クロマ} / \text{明度}) \end{aligned}$$

CIECAM97sからCIECAM02への改良点は以下の9つである<sup>4)</sup>.

- (1) 全ての観察条件において,  $Y=0$  の時, 明度  $J$  はゼロになる.
- (2) 薄暗い観察条件 (CRT ディスプレイ観察時など) の色誘導ファクタ  $N_c$  を 1.05 から 0.95 に修正する.
- (3) 青基本関数 (近似的には短波長感錐体, S 錐体) のレスポンスの指数関数を取り除き, 線形色順応変換式を採用する.
- (4) ある一定色度の色刺激の色相と飽和度は  $Y$  が変化しても一定になるような新しい非線形入出力応答関数 (ダイナミック応答関数) を導入する.
- (5) 無彩色付近のクロマ  $C$  のスケールの修正
- (6) 飽和度  $s$  のスケールの改良
- (7)  $c$  と  $N_c$  パラメータの関係について, 周囲条件の中間的な場合にも適用できるようにする.
- (8) 不完全順応ファクタ  $D$  の計算の簡略化
- (9) 離心率  $e$  の計算の簡略化

### 3. CIECAM02 の概要

CIECAM02 の概要について, 以下に紹介するが, 実際の使用, 引用にあたっては, CIE Publication 159<sup>2)</sup> を参考されたい.

まず, モデルを適用するにあたって, 順応白色の決定をする. モニターや自発光ディスプレイの場合は, そのデバイスの白色を分光放射輝度計で色度と輝度を測定する. その絶対輝度を 5 で割った値は順応輝度  $L_A$  ( $\text{cd}/\text{m}^2$ ) として用いられる. プリントやハードコピーでは, 照明ブースや観察照明で完全拡散白板あるいはメディアの白の色度, 輝度を測定する. また, 順応輝度  $L_A$  については, そのサンプルにおける照度 ( $\text{lx}$ ) を  $5\pi$  で割った値として計算しても得られる. 周囲条件については, 周囲比  $S_R$  を下式を用いて計算する.

$$S_R = L_{SW} / L_{DW} \quad (1)$$

$L_{SW}$  は周囲の白色輝度で, 周辺領域の白色から測定する.  $L_{DW}$  はデバイスの白色輝度で, 対象としているデバイスの白色を

測定する. 両方とも単位は  $\text{cd}/\text{m}^2$  である.  $S_R$  が 0 の場合は暗黒周辺, 0.2 未満の場合は薄暗い周辺, 0.2 以上の場合は平均的の周辺に相当する. この周囲条件により, 観察条件のパラメータが Table 1 のように与えられる. 中間的な周囲条件の場合は, 補間した値を用いてもよい.

Table 1 CIECAM02 の観察パラメータ

観察条件	$c$	$N_c$	$F$
平均的周囲 ( $S_R > 0.2$ )	0.69	1.0	1.0
薄暗い周囲 ( $S_R < 0.2$ )	0.59	0.9	0.9
暗黒周囲 ( $S_R = 0$ )	0.525	0.8	0.8

CIE 1931 三刺激値から長波長, 中波長, 短波長感錐体への変換は次式で与えられる. 三刺激値には相対値を用いる.  $Y_w$  はデバイスの白に依存するので, 100 より低い値でもよい.

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{\text{CAT02}} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{M}_{\text{CAT02}} = \begin{bmatrix} 0.7328 & 0.4296 & -0.1624 \\ -0.7036 & 1.6975 & 0.0061 \\ 0.0030 & 0.0136 & 0.9834 \end{bmatrix} \quad (3)$$

等エネルギー白色からデバイス白色への順応の度合いとなる順応ファクタ  $D$  は次式で計算され, 完全順応である 1 から順応なしの 0 の間の値をとる. 現実的な最小値は約 0.6 である.

$$D = F \left[ 1 - \left( \frac{1}{3.6} \right) e^{\left( \frac{-(L_A + 42)}{92} \right)} \right] \quad (4)$$

この  $D$  ファクタを次式のように色順応式に適用する.

$$R_c = \left[ \left( Y_w D / R_w \right) + (1 - D) \right] R \quad (5)$$

$$G_c = \left[ \left( Y_w D / G_w \right) + (1 - D) \right] G \quad (6)$$

$$B_c = \left[ \left( Y_w D / B_w \right) + (1 - D) \right] B \quad (7)$$

ここで,  $R_w, G_w, B_w$  は白色点の RGB 値である. 次に, 以下の式から観察条件に依存する係数を計算する.

$$k = 1 / (5L_A + 1) \quad (8)$$

$$F_L = 0.2k^4 (5L_A) + 0.1(1 - k^4)^2 (5L_A)^{1/3} \quad (9)$$

$$n = Y_b / Y_w \quad (10)$$

$$N_{bb} = N_{cb} = 0.725(1/n)^{0.2} \quad (11)$$

$$z = 1.48 + \sqrt{n} \quad (12)$$

順応後の非線形圧縮 (錐体応答の入出力特性に相当する) をする前の処理として, RGB 値を Hunt-Pointer-Estevéz の錐体

刺激空間に変換する.

$$\begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{\text{HPE}} \mathbf{M}_{\text{CAT02}}^{-1} \begin{bmatrix} R_c \\ G_c \\ B_c \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\mathbf{M}_{\text{HPE}} = \begin{bmatrix} 0.38971 & 0.68898 & -0.07868 \\ -0.22981 & 1.18340 & 0.04641 \\ 0.00000 & 0.00000 & 1.00000 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\mathbf{M}_{\text{CAT02}}^{-1} = \begin{bmatrix} 1.096124 & -0.278869 & 0.182745 \\ 0.454369 & 0.473533 & 0.072098 \\ -0.009628 & -0.005698 & 1.015326 \end{bmatrix} \quad (15)$$

ここで, 以下の錐体応答の非線形変換を適用する.

$$R'_a = \frac{400(F_L R'/100)^{0.42}}{27.13 + (F_L R'/100)^{0.42}} + 0.1 \quad (16)$$

$$G'_a = \frac{400(F_L G'/100)^{0.42}}{27.13 + (F_L G'/100)^{0.42}} + 0.1 \quad (17)$$

$$B'_a = \frac{400(F_L B'/100)^{0.42}}{27.13 + (F_L B'/100)^{0.42}} + 0.1 \quad (18)$$

もし,  $R'$ ,  $G'$ ,  $B'$  が負の値をとるなら, その絶対値で計算し,  $R'_a$ ,  $G'_a$ ,  $B'_a$  を負の値にする.

ここで, 離心率や知覚的属性を計算する前に, 一時的な表現としてデカルト座標系で  $a$  と  $b$ , および色相を計算する.

$$a = R'_a - 12G'_a/11 + B'_a/11 \quad (19)$$

$$b = (1/9)(R'_a + G'_a - 2B'_a) \quad (20)$$

$$h = \tan^{-1}(b/a) \quad (21)$$

色相角  $h$  は度で表す.

次に, 次式により離心率を計算する. ユニーク色のデータを Table 2 に示すが, ユニーク色の色相角で計算される  $e_t$  はこの表の  $e_i$  とは正確には一致しないが近い値となる.

Table 2 ユニーク色相のデータ

	赤	黄	緑	青	赤
i	1	2	3	4	5
$h_i$	20.14	90.00	164.25	237.53	380.14
$e_i$	0.8	0.7	1.0	1.2	0.8
H	0.0	100.0	200.0	300.0	400.0

$$e_t = \frac{1}{4} \left[ \cos \left( h \frac{\pi}{180} + 2 \right) + 3.8 \right] \quad (22)$$

色相成分 (hue quadrature)  $H$  は Table 2 のデータを線形補間して得られる.  $h < h_1$  の場合は  $h' = h + 360$ , その他は  $h' = h$  で,  $i$  は  $h_i \leq h' < h_{i+1}$  となるように選ぶ.

$$H = H_i + \frac{100(h' - h_i)/e_i}{(h' - h_i)/e_i + (h_{i+1} - h')/e_{i+1}} \quad (23)$$

無彩色応答  $A$  は次式で与えられる.

$$A = [2R'_a + G'_a + (1/20)B'_a - 0.305]N_{bb} \quad (24)$$

明度  $J$  を刺激の無彩色応答  $A$  と白の無彩色応答  $A_w$  から次式により求める.

$$J = 100(A/A_w)^{0.2} \quad (25)$$

明るさ  $Q$  を次式より求める.

$$Q = (4/c) \sqrt{J/100} (A_w + 4) F_L^{0.25} \quad (26)$$

一時的な値  $t$  を計算し, これを用いてクロマ  $C$ , カラフルネス  $M$  を以下の式で計算する.

$$t = \frac{(50000/13)N_c N_{cb} e_t (a^2 + b^2)^{1/2}}{R'_a + G'_a + (21/20)B'_a} \quad (27)$$

$$C = t^{0.9} \sqrt{J/100} (1.64 - 0.29^n)^{0.73} \quad (28)$$

$$M = C F_L^{0.25} \quad (29)$$

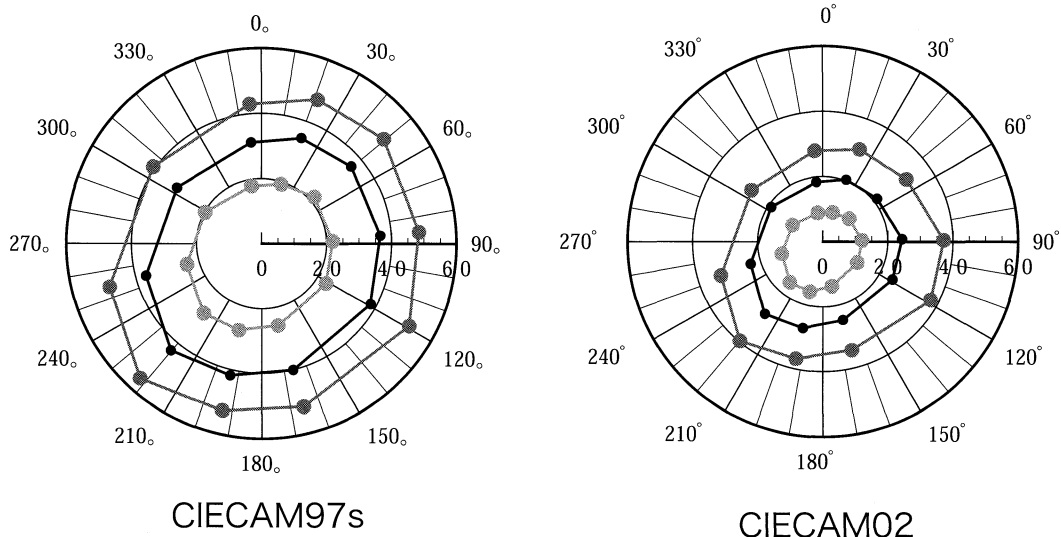


Fig. 2 CIECAM97s と CIECAM02 の比較. グラフの外側から RGB の順. (本誌 p. 83 カラー参照)

さらに、飽和度  $s$  は次式で与えられる。

$$s = 100 \sqrt{M/Q} \quad (30)$$

必要に応じて、以下のデカルト座標も計算できる。

$$a_C = C \cos(h) \quad (31)$$

$$b_C = C \sin(h) \quad (32)$$

$$a_M = M \cos(h) \quad (33)$$

$$b_M = M \sin(h) \quad (34)$$

$$a_s = s \cos(h) \quad (35)$$

$$b_s = s \sin(h) \quad (36)$$

以上が CIECAM02 の順方向の計算過程であるが、属性から三刺激値を得る逆方向の計算過程も CIE Publication 159 では示されている。また、計算例もあるので、CIECAM02 を実際に適用する際に参考になるであろう。

#### 4. CIECAM97s と CIECAM02 の比較

マンセル色票をイリミナント D65 で照明し、平均的な周囲条件、順応輝度  $20 \text{ cd/m}^2$  で観察した場合の、CIECAM97s と CIECAM02 での色の見えの予測結果を Fig. 2 に示す。マンセル色票には、色相 5R, 5YR, 5Y, 5YG, 5G, 5GB, 5B, 5PB, 5P, 5RP の 10 種類、バリューは  $V = 5$ 、クロマは  $C = 2, 4, 6$

の 3 種類の組み合わせで、合計 30 枚についての結果である。Fig. 2 の横軸、縦軸はそれぞれ  $C \cos h$ ,  $C \sin h$  をとっている。CIECAM97s (左図) と CIECAM02 (右図) で、クロマに大きな差が見られるが、マンセルクロマの間隔が CIECAM02 の方が等ステップになっており、改良の跡が見える。

#### 5. CIECAM の応用

CRT に表示された画像をプリントする場合などに、両者間での色の見えの一致が求められる。異なる画像メディアで色

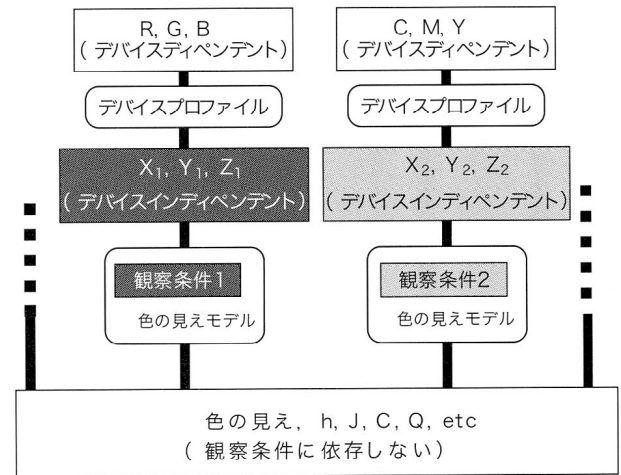


Fig. 3 異なる画像メディア間での色情報伝達

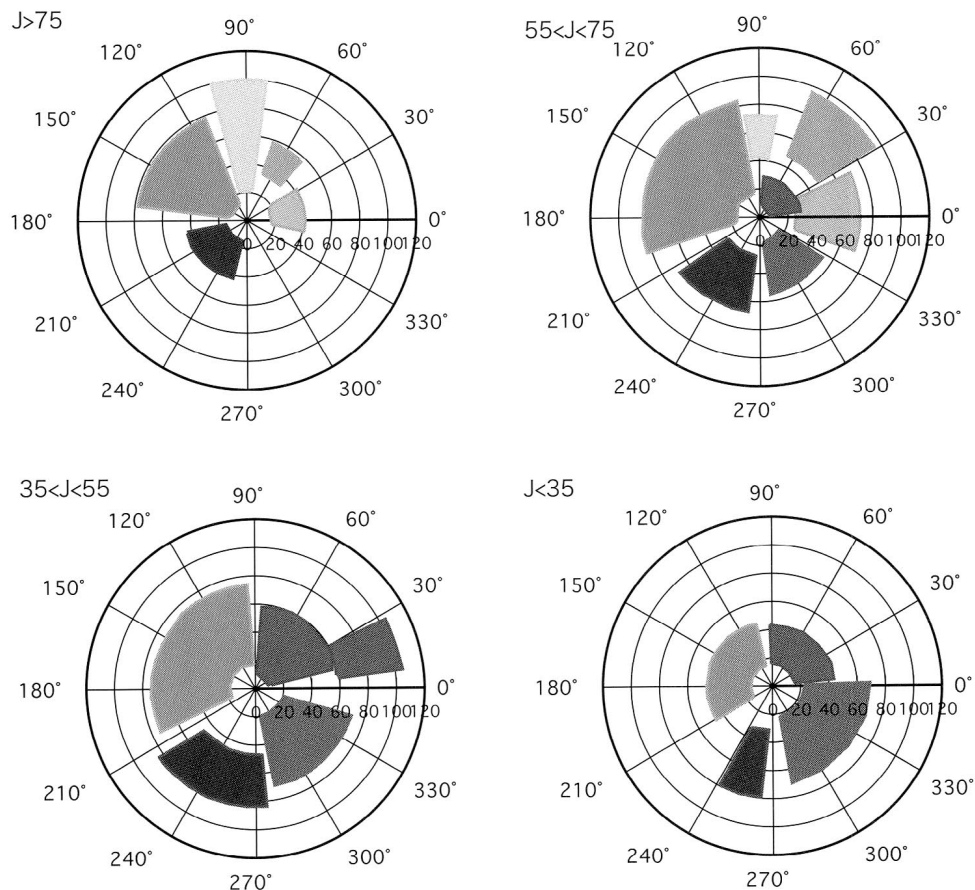


Fig. 4 CIECAM97s における色名領域 (本誌 p. 83 カラー参照)

を見る場合は、その観察条件も異なるので、X, Y, Z の三刺激値の一致を目標とした測色の色再現では、必ずしも色の見えは一致しない。このような場合、観察条件に依存しない色の三属性を数値で表わせる CIECAM が有効である。Fig. 3 は異なる画像メディアでの色情報伝達の流れを示したものである。

日常生活で物の色の見えを表現する方法は、色名を用いることであろう。Fig. 4 は色名の領域を CIECAM97s の色空間に表わしたものである<sup>5)</sup>。これは、約 300 枚の色票を分光エネルギー分布、相関色温度の異なる種々の光源下で見た時の色をカテゴリカルカラーネーミングにより応答された 8 つの有彩色基本色名を CIECAM97s 空間に表現したものである。色名は人間の脳内での表現であるので、観察環境に依存しないものである。CIECAM は基本的に観察条件に依存しない色の表現であるので、色名の領域を CIECAM 空間で表現するのは、妥当であろう。この色名マップは色名を重視する色再現に有用であろう。また、物の色の見えを重視した照明光源の演色評価法への適用も提案されている<sup>6)</sup>。

## 6. おわりに

CIE TC8-01 は CIECAM02 の完成で終了した。色の見えはその空間的配置に影響される。画像においては、画像のもつ輝度成分や色成分のパワースペクトルに影響される。CIE では、画像の見えにおける問題を検討するため、新たに TC8-08 「空間的な見えモデルのテスト」が設立された。今後のこの TC の動きを大いに注目したい。

## 参 考 文 献

- 1) CIE 131-1998, The CIE 1997 Interim Colour Appearance Model (Simple Version) CIECAM97s.
- 2) CIE 159-2004, A Colour Appearance Model for Colour Management Systems: CIECAM02.
- 3) M. Fairchild, Color Appearance Models, Addison Wesley, 1998.
- 4) M. R. Luo, Development of Colour Appearance Models, Proceedings of AIC Bangkok, pp. 156-160 (2003).
- 5) H. Yaguchi, Y. Takahashi and S. Shioiri, Basic categorical colors in the CIECAM97s space, Proceedings of AIC Midterm Meeting, Warsaw, pp. 49-52 (1999).
- 6) H. Yaguchi, Y. Takahashi and S. Shioiri, A proposal of color rendering index based on categorical color names, Proceedings of International Lighting Congress, Istanbul 2001, Vol. II, pp. 421-426 (2001).