

解 説

色空間の発展

小寺 宏曄*

(2004.2.23 受理)

Development of Color Space

Hiroaki KOTERA*

This paper comments a recent progress in the development of color system. Since a color is a common language to communicate the real world image, a color system plays an important role to jointly exchange a correct color. The major activities of CIE have been devoted to find the better uniform color space. The wide spread of internet has promoted a standardization of CMS (Color Management System). A strong demand for high-precision color control in industry stimulated a development of reliable color difference formula referred to as CIEDE 2000 and a request for color appearance reproduction under the different environments in digital image application brought an introduction of CAM (Color Appearance Model) referred to as CIECAM 02. CIE Technical Committees are working actively on the standardization of Imaging Technology under Div. 8. Now, the newest TC 8-08 is going to step into Spatial Color Appearance model. An excellent perceptual color system will be hopefully developed based on human color vision mechanism.

Key word: Color Order System, Uniform Color Space, CMS, CAM, Color Difference Formulas, Standardization

本稿では表色系の開発経緯を概観し、最近の動向について解説する。色彩は一種の共通言語であり、表色空間は、色彩を相互に正しく交換し共有する場として重要な役割を担っている。CIE の活動の中心は均等色空間の探索にあったと言ってもよい。画像通信の普及と共に色管理システムの標準化が進んでいるが、産業界ではさらに高精度の色管理が求められると共に、画像応用の分野では異なる観察環境の下での色の見えを反映した再現が要望されている。前者は新しい色差式 CIEDE 2000 の提案、後者は色の見えモデル CIECAM 02 の開発へと発展してきている。CIE Division 8 では Imaging Technology に関連する標準化を扱う 8 つの TC (Technical Committee) が活動しているが、新設の TC 8-08 では、Spatial Color Appearance を取上げており、空間的な色の見えに踏み込もうとしている。視覚モデルの導入が、さらに優れた知覚的色空間の提唱に繋がっていくものと期待される。

キーワード: 表色系, 均等色空間, 色管理, 色の見えモデル, 色差式, 標準化

1. はじめに

インターネットの発達により、居ながらにして世界旅行や電子ショッピング等、さまざまな仮想体験が可能となった。画像通信の発展の中で色彩は重要な商品要素であり、色管理システムの普及が進んでいる。色の定量化と、その表色系の統一、色彩を共通言語として正確かつ迅速に交換するための必須条件

である。CIE が果たしてきた貢献もこの二つに集約される。前者は 1931 年の xyz 等色関数の制定、後者は均等知覚色空間の提供であり、さらに優れた表色系の探索が今日まで営々と続けられている。本稿では、表色系の開発経緯と最近の動向を概観する。

2. 表色系の成立

表色系には、大別して心理物理量を表す「混色系」と知覚色を表す「顕色系」がある¹⁾。前者は心網膜レベルでの心理物理量として測色される三刺激値による直交座標系で表色を行い、後者は心理的概念から、大脳中枢での色知覚の三属性に基づく 3 次元色立体として色を表示する。色彩応用の多くは人の色知覚に対応した顕色系に依っているが、均等性に優れた色空間の

* 千葉大学 工学部 情報画像工学科
〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33

* Faculty of Engineering, Department of Information and Image Sciences, Chiba University
1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba, 263-8522 Japan
E-mail: kotera@faculty.chiba-u.jp

探索は、CIEの中心的な活動として継続されてきている。色知覚の均等性を目指した均等知覚色空間（以下、均等色空間と呼ぶ）の成立には、次の2つの流れがある。

- [1] 物体標準としての色票 (Color Atlas) による均等色空間の構成
- [2] CIE-XYZ 表色系からの数学的変換による均等色空間の構成

これに基づいて表色系の成立を纏めると Fig. 1 のようになる。

2.1 顕色系の開発経緯

古代ギリシャの哲学者は、色は黒(夜)と白(昼)の中間に位置すると考えた。日の出と日没の太陽の赤は夜の黒と昼の白の中間にあり、明るい黄は赤と白の間、また青は赤より暗く赤と黒の間に位置する。さらに太陽光が黄色と青のガラスを透過するとき緑光を生ずるので緑は黄と青の中間に位置すると考え、黒と白を結ぶ直線上に色を配置していった。このような1次元の色配列法は紀元前600年から紀元1600年まで続いた。

秩序立った色の配列法はダビンチの基本6色相：黄、赤、青、緑、白、黒の導入に始まる。ニュートンはプリズムによる分光から古代ギリシャの1次元の色配列の誤りを発見しスペクトルを円環状に並べ、以降2次元配列へと進む。3次元の色立体を最初に描いたのはスウェーデンの Forsius (1611)、具体的な色を割り付けたのは Lambert (1722) であり、以後様々な色立体が構想されていった。その背景には、テキスタイルの色見本を系統的に配列したいという強いニーズがあり、Chevreulらは色立体見本を考案した(1889)。また一方で、心理学者 Wundt らが色知覚のメカニズムを解明することを目的に色立体を展開したといういきさつがある。

色知覚に基づく均等かつ系統的な色票の配列には多大の努力がなされたが、実用的な色票集は Munsell に始まる¹⁸⁾。代表的なシステムの例を以下に掲げる²¹⁾。

2.2 色票による代表的な表色系

● Munsell System (Fig. 2(a))

マンセルシステムは物体標準として考えられた最も古い色票集で、1905年に Hue (色相), Value (明度), Chroma (彩度) からなる色立体の表記法が発表され、1915年に第1版が刊行された。第2版の後、OSA (Optical Society of America: 米国光学学会) が数万人に上る観測を基に改良を加え、1943年に第3版の修正マンセルシステムを完成した。均等性の評価には最も信頼のおける色票として今日まで広く実用に供されてきている。

● Ostwald System

Munsell に少し遅れて1917年、ドイツのノーベル賞学者 Ostwald は複円錐体の色立体モデルを構築した。Munsell と異なり、心理物理的に表面色をある色相の純色の色量 C 、白色量 W 、黒色量 B の混合で表し、色相環は Hering の反対色を基に配列している。この表色系は米国で1940~1950年代に、Color Harmony Manual としてデザイナーや美術家に活用された。

● DIN System¹⁹⁾

ドイツ工業規格として1938年に M. Richer の指揮で開発が進められた。色相環の配列は Ostwald を受継いでいるが、明度軸には Weber 則を考慮した暗度 (Darkness) を導入している。初期版の600色以下の無光沢版、1000色の光沢版を経て、無光沢と光沢を含む DIN 6164 が認定されている。

● OSA-UCS System¹²⁻¹⁴⁾ (Fig. 2(b))

米国では1947年、OSAによる均等色空間に関する委員会が結成された。立方体の8つの角を切り落とした基本斜方格子を3次元空間に展開していくことにより、全方位で格子点が等間隔となる幾何学的な美しい数学モデルに色票を配置していくことを目論んだ。しかし色知覚の非線形性はユークリッド空間では対応し切れず、条件付の近似格子を見出すことに変更して1976年に558色票からなる OSA-UCS が完成した。XYZ から均等色空間座標 L, j, g への変換式をもち、数学モデルと色票とを対応付けた点で特徴的なシステムである。マンセルシステムと共に均等性の評価用色票として広く活用されている。

● Coloroid System^{11,12)} (Fig. 2(c))

1962年に A. Nemncics によって創始されハンガリーのブタペスト大学で開発された。A (Hue), T (Saturation), V (Lightness) の円筒座標により、全空間での平均的な均等性を目標に7000人に及ぶ観察実験データを基に構築している。Ostwald に類似したスペクトル色の色量 p 、白色量 w 、黒色量 s の混合で表す。

● NCS (Natural Color System)¹⁶⁾

1964年にスウェーデンで開発がスタート、1979年に1412色からなる標準色票 SS 019102 が完成している。Hering の反対色モデルを基に色相環を配列し、各色相面内の色を白色量 W 、色量 C 、黒色量 S がつくる三角形内の一点で表している。長期間に亘る観察評価が続けられており、スウェーデン及びスカ

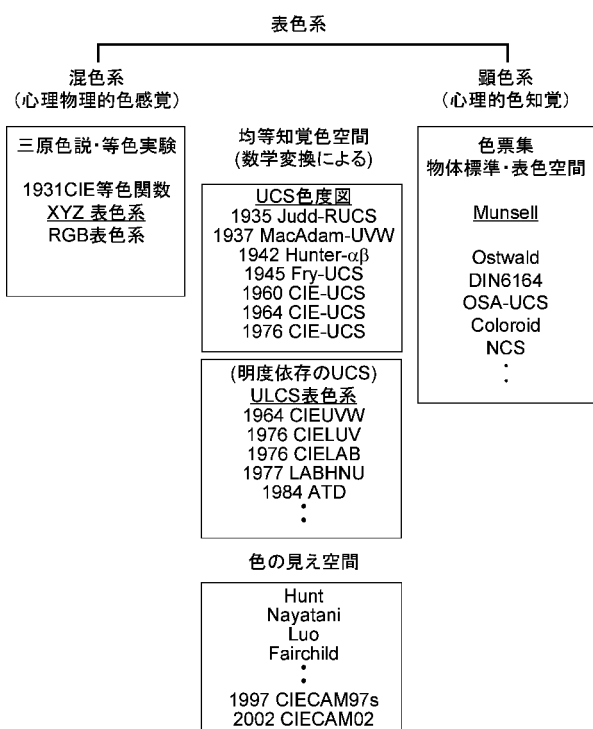


Fig. 1 Development of Color Space.

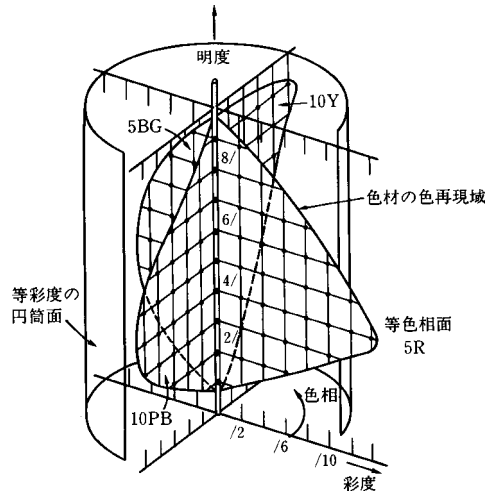
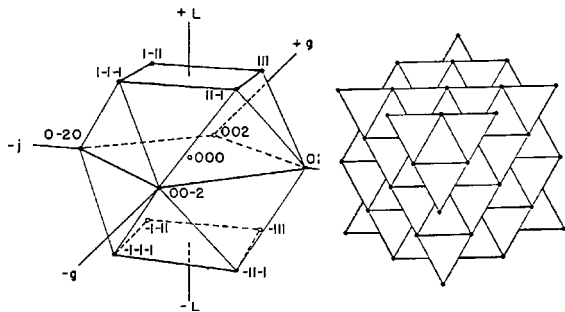
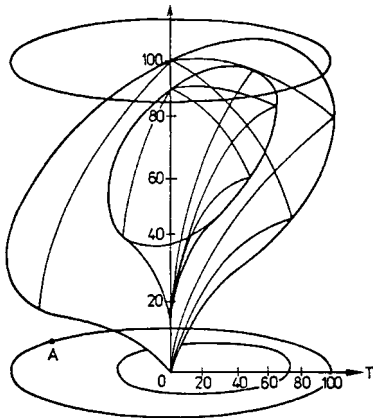
(a) Munsell Color Order System³⁾.(b) OSA-UCS unit lattice and its extension in 3D¹²⁻¹⁴⁾.(c) Coloroid Uniform Color Space^{11,20)}.

Fig. 2 Examples of Color Order System.

ンジナビア圏内で専ら利用されている。

この他、利用は限定されているが、欧州圏で Eurocolor System や Acout System 等が開発されている。

3. 均等色空間

3.1 均等色空間の開発経緯

物体標準としての色票集とは別に、1931年の測色値に基づく XYZ 表色系から数学的変換によって均等色空間を得ようとする試みは、XYZ からの射影変換により感覚的な色度差を均

Table 1 What formula are you using?²⁷⁾

色空間	%
CIELAB	92.3
Hunter Lab	33.3
FMC 2	36.8
CMC	19.3
CIELUV	4.4
Marks & Spencer	0.9
XYZ	1.8

等にする Judd (1935) の UCS (Uniform Chromaticity Scale) 色度図の開発に始まる。多数の提案があったが、CIE は 1960 年になって変換係数が最も単純であった MacAdam (1937) の UVW を CIE 1960 UCS 色度図として採用した。UCS は当初、心理物理色の均等性を意図して混色系から出発した表色系であったが、その後心理的色知覚に基づく顕色系の均等色空間の構築への気運が高まり、ULCS (Uniform Lightness-Chromaticness Scale) 表色系の開発が進められた。UCS の色度が明度に無関係であったのに対し、ULCS では明度に関与した知覚量で与えられる。CIE は 1964 年の $U^*V^*W^*$ を経て、1976 年に $L^*u^*v^*$ (CIELUV) と $L^*a^*b^*$ (CIELAB) の 2 つの均等色空間を推奨し、現在まで広く普及してきた。CIELUV は CRT 等の発光色の表示、CIELAB は塗装や染色等の表面色の表示に適するとされたが、現在では CIELAB の勢力が圧倒的に強い。Table 1 は少し古いデータであるが、米国産業界で色差を品質基準にしているユーザが利用している主な色空間の比率の調査例である²⁷⁾。

3.2 均等色空間 CIELUV と CIELAB

● CIELUV 均等色空間

1975 年の CIE 総会で G. Wyszecki により提案され、1976 年に国際標準として推奨された。CIE 1964 $U^*V^*W^*$ の修正版で、明度関数に輝度 Y の 3 乗根式を採用、次式により変換する。

$$L^* = 116f(Y/Y_n) - 16$$

$$u^* = 13(u' - u_n), \quad u' = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z}$$

$$v^* = 13(v' - v_n), \quad v' = \frac{9Y}{X + 15Y + 3Z} \quad (1)$$

$$f(t) = \begin{cases} t^{1/3}, & \text{if } t > 0.008856 \\ 903.3t, & \text{otherwise} \end{cases}$$

u_n, v_n は標準光源の三刺激値 (X_n, Y_n, Z_n) の (u', v') 座標 CIELUV は (u', v') 色度が xy 座標の射影変換となっているので 2 色を混色したときの色度が u^*, v^* 2 点を結ぶ直線上に求められるので、加法混色系の CRT ディスプレイ等の表示に適している。

● CIELAB 均等色空間

CIELUV と同じく G. Wyszecki により提案され、1976 年に国際標準として推奨された。Adams-Nickerson の 3 乗根の色

差式を基に導出された、物体表面色に適した空間で、次式で変換する。

$$\begin{aligned} L^* &= 116f(Y/Y_n) - 16 \\ a^* &= 500[f(X/X_n) - f(Y/Y_n)] \\ b^* &= 200[f(Y/Y_n) - f(Z/Z_n)] \end{aligned} \quad (2)$$

$$f(t) = \begin{cases} t^{1/3}, & \text{if } t > 0.008856 \\ 7.7871t + 16/116, & \text{otherwise} \end{cases}$$

ここで、明度 L^* と次の彩度、色相を用いてマンセル表色系に対応した円筒座標を形成することができる。

$$\begin{aligned} C_{ab}^* &= (a^{*2} + b^{*2})^{1/2} : \text{metric chroma} \\ H_{ab}^* &= \tan^{-1}(a^*/b^*) : \text{metric hue-angle} \end{aligned} \quad (3)$$

CIELAB 空間の諸量を座標軸と対応付けて Fig. 3 に示す⁹⁾。

(a^*, b^*) を (u^*, v^*) に置換えれば CIELUV もこれと同様に表せる。

Fig. 4 は MacAdam の偏差楕円とマンセル色票による CIELUV と CIELAB の均等性の比較である。それぞれに得失があり、楕円の均一性、色相の直線性や同心性を同時に満足できていない¹⁵⁾。

3.3 その他の均等色空間

CIELUV および CIELAB の後にも、様々な均等色空間が提案されてきているが²⁹⁾、均等性の評価には、古くからのマンセ

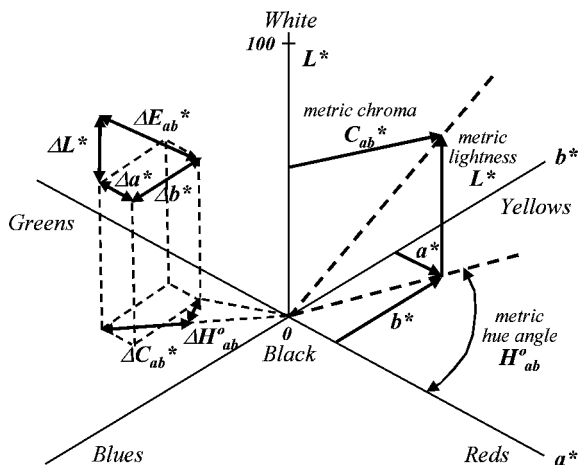


Fig. 3 CIELAB coordinate system and major metric values.

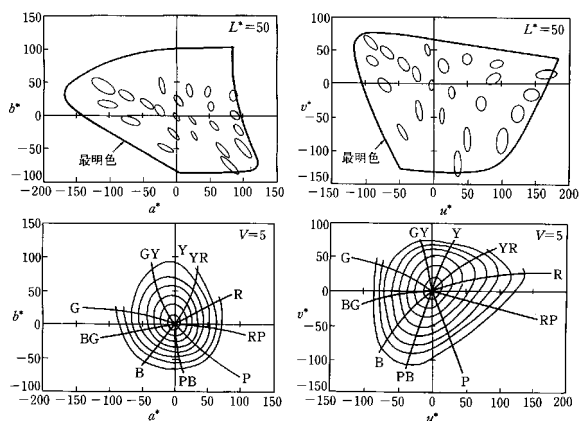


Fig. 4 Uniformity for CIELAB (left) and CIELUV (right)³⁾.

ルと OSA-UCS 色票が用いられることが多い。

● Hunter Lab

1942 年に R. Hunter により提案され、反対色座標軸 Lab における色差の均等化を図ったもので、現在もなお産業界で利用されている。CIE 標準光源 C の下で 2° 視野の XYZ 値から次式で計算される。

$$\begin{aligned} L &= 10 Y^{1/2} \\ a &= 1.75(1.02X - Y) Y^{1/2} \\ b &= 7.0(Y - 0.847Z) Y^{1/2} \end{aligned} \quad (4)$$

● LABHNU¹⁰⁾

CIELUV および CIELAB 両者の欠点を改善するモデルとして 1979 年に K. Richter により提案された。CIELAB の変形で、 L^* は同一であるが、 a^*, b^* の代わりに次式の A^*, B^* を用いる。

$$\begin{aligned} A^* &= 500(A' - A_n) Y^{1/3}, \quad A' = \frac{1}{4}(X/Y + 1/6) \\ B^* &= 500(B' - B_n) Y^{1/3}, \quad B' = \frac{1}{12}(Z/Y + 1/6) \end{aligned} \quad (5)$$

● ATD¹⁷⁾

1981 年の OSA の年次大会で T. Benzshawel と S. L. Guth により提案された視覚のベクトルモデルに基づく均等色空間。第 1 段階で XYZ を視覚の錐体応答 LMS に変換し、第 2 段階で反対色の輝度 A と 2 つの色差 T (Red-Green) 及び D (Yellow-Blue) 応答に変換する。

$$\begin{bmatrix} A \\ T \\ D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5967 C_a & 0.3654 C_a & 0 \\ 0.9553 C_t & -1.2836 C_t & k_s C_t \\ -0.0248 C_d & 0 & 0.0483 C_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix} \quad (6)$$

C_a, C_b, C_d は輝度依存性、 k_s は色順応度を表す係数である。その後もこのモデルの発展的改編が続けられている。

● Frei²³⁾

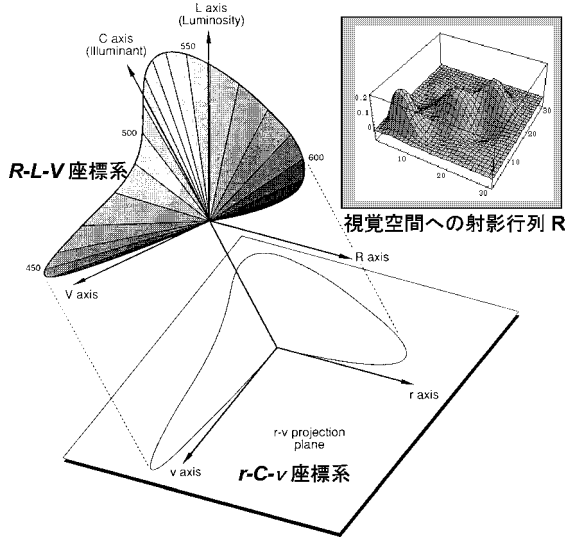
1945 年に提案の uv 均等色度図に遡る 1965 年の視覚のゾーンモデルに基づく。CIE 1931 xy 色度からの RGB 原色に対する色覚異常の混同色線への射影変換による uv 色度を経て、次式の均等色度図 $u''v''$ へ変換する。

$$\begin{aligned} u &= 0.2597[1.70 + (x - 0.173)/y] \\ v &= 0.058(1 - x - y)/y \\ u'' &= 240 + 183 \tan^{-1}[6.4(u - 0.58)] \\ v'' &= 243/[1 + 0.0133(1 - v)/v] \end{aligned} \quad (7)$$

以上の他にも多数の均等色空間の提案があるが、その良否の判断には、MacAdam の偏差楕円の均一性、マンセル色票または OSA 色票を用いた等彩度線、等色相線の均等性と直線性等の主観評価に依ることが多い。

3.4 Fundamental Color Space

色は分光スペクトルに対する視覚系の応答から生ずる現象である。均等色空間からは外れるが、J. B. Cohen らはスペクトル応答から形成される基本色空間を論じている。人の視覚には分光分布が異なっても同一に見える色 (メタマー) は無数に存在する。これは n 次元の分光ベクトル C を 3 次元の視覚空間に射影する際に、基本分光成分 C^* (基本メタマーという) を取出す視覚の機能と解釈される。この機能は射影行列 R で表され、いかなる C も R を介して C^* と残差成分 B の二つに

Fig. 5 FCS coordinate system based on Matrix R .

分解される。

$$\begin{aligned} C &= C^* + B, \quad C^* = RC \\ R &= A(A^t A)^{-1} A^t \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、人が見ているのは C^* であり、残差 B (メタメリックブラックという) は3刺激値が零で、人には感知されない²²⁾。ここで、 R は等色行列 A から導かれる $n \times n$ の正方行列で、各行には、波長 λ の単色光に対する基本メタマー C_λ^* が短波長から順に配列されている。 R は対称行列で各列も行の転置で同一内容を示す。すなわち、 R の列から任意の3列を取出すとそれらはいずれも等色関数の組となる。Cohen らは、 R 行列から取出した n 行 \times 3 列の行列 F を用いて、FCS (Fundamental Color Space) と呼ぶ色空間を定義している。FCS は、3つの単色光の基本メタマーが張るベクトル空間で、ある色 C の射影 $P = F^T C$ (T は転置) はFCSでの3次元色ベクトルを表す。 $\lambda = 380$ nm と $\lambda = 770$ nm の両端での基本メタマー C_{380}^* (Violet) と C_{770}^* (Red) はFCSで直交する2軸をなす。また $\lambda = 563$ nm に対する C_{563}^* は輝度 (Luminosity) の視感度曲線とほぼ一致する。そこで、これら3つを直交座標軸として構成した R - L - V 空間を、 C 光源の軸およびスペクトル軌跡のFCSへの射影と共に Fig. 5 に示す²⁴⁾。

FCS は、異種光源下でのメタメリズムやセンサーに対するデバイスメタメリズム等を扱うのに有効な色空間であると考えられ今後の応用が期待される⁵⁾。

4. 色差式の改良

4.1 色差式の変遷^{25,26)}

信頼できる色差式を追及して、1964 年以来、様々な方式が提案されてきた。CIELAB は均等色空間として広く普及したが、近年、色差の不均等性が指摘された。CIELAB より優れた候補として、CMC, CIE94, BFD, LCD, M2b が比較検討され、CIE TC 1-47 は M2b を最良として CIEDE 2000 の呼称で推奨するに至った³⁵⁾。基本的には CIELAB をベースとした BFD 式の変形であるが、改良の重点は、信頼できる評価用デ

Table 2 Math. Procedure of CIEDE 2000.

【Step 1】XYZ to CIELAB 変換

$$\text{彩度} : C_{ab}^* = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2}$$

【Step 2】 a' , C' , h' の計算

$$L' = L^*, \quad b' = b^*, \quad a' = (1 + G)a^*$$

$$C' = (a'^2 + b'^2)^{1/2}, \quad h' = \tan^{-1}(b'/a')$$

$$G = 0.5 \left(1 - \sqrt{\frac{\bar{C}_{ab}^{*7}}{\bar{C}_{ab}^{*7} + 25^7}} \right)$$

【Step 3】 $\Delta L'$, $\Delta C'$, $\Delta H'$ の計算

$$\Delta L' = L'_b - L'_s, \quad \Delta C' = C'_b - C'_s$$

$$\Delta H' = 2(C'_b C'_s)^{1/2} \sin(\Delta h'/2)$$

$$\Delta h' = h'_b - h'_s$$

【Step 4】CIEDE 2000 ΔE_{00} の計算

$$\Delta E_{00} =$$

$$\sqrt{\left(\frac{\Delta L'}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C'}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H'}{k_H S_H}\right)^2 + R_T \left(\frac{\Delta C'}{k_C S_C}\right) \left(\frac{\Delta H'}{k_H S_H}\right)}$$

$$S_L = 1 + \frac{0.015(L' - 50)^2}{\sqrt{20 + L' - 50}^2}$$

$$S_C = 1 + 0.045 \bar{C}'$$

$$S_H = 1 + 0.015 \bar{C}' T$$

$$T = 1 - 0.17 \cos(\bar{h}' - 30^\circ) + 0.24 \cos(2\bar{h}')$$

$$+ 0.32 \cos(3\bar{h}' + 6^\circ)$$

$$- 0.20 \cos(4\bar{h}' - 63^\circ)$$

$$R_T = -\sin(2\Delta\theta) R_C$$

$$\Delta\theta = 30 \exp\{ - [(\bar{h}' - 275^\circ)/25]^2 \}$$

$$R_C = 2 \sqrt{\frac{\bar{C}'^7}{\bar{C}'^7 + 25^7}}$$

ータセットの確保にあるといってもよい。評価には RIT-Dupont, Witt, Leeds, BFD の4種のセットとそれらの混合が使われているが、全てのデータセットに対して首尾一貫してベストのスコアを確保できた色差式は未だ存在しない。CIEDE 2000 が決定版か否かはなお疑問である³⁷⁾。

CIE は過去 30 年に亘り、主に表面色を扱う繊維や塗装等の産業界で小~中色差の評価に適した色差式を探索してきた³¹⁻³³⁾。CIEDE 2000 に至る改良の経緯の概略を以下に纏める。

- [1] マンセル色票に適合する色空間 ANLAB が提案 (1944) され、繊維分野の ISO 標準に制定 (1971)。
- [2] ANLAB の簡略版として CIELAB が開発され、均等知覚色空間として CIE より推奨 (1976)。
- [3] BFD-P データセットを基に、CIELAB の小色差及び青色相での歪の改良として BFD ($l : c$) を導出 (1987)。
- [4] RIT-DuPont のデータセットを基に、簡略化した色差式 CIE 94 が開発され、CIE が試用を推奨。
- [5] McDonald²⁸⁾ のデータセットを基に、英国染色学会の測色委員会 (CMC) が JPC を改良した CMC ($l : c$) を繊維分野の ISO 標準に制定 (1995)。
- [6] Leeds データセットを基に、LCD 色差式を提案 (1997)。

[7] 以上の経過を基に, CIE TC 1-47 が CIEDE 2000 に纏め, 勧告.

上記の各色差式はいずれも CIELAB の修正であり, CIE 94 では

$$\Delta E_{94} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L^*}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C^*}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H^*}{k_H S_H}\right)^2} \quad (9)$$

のように, 重み係数 S_L, S_C, S_H と, 観察条件によって調整されるパラメータ k_L, k_C, k_H を用いて, これまで主に大色差に適した CIELAB の欠陥を補っていた. これに彩度差と色相差の相互作用を表す補正項 ΔR を加えた一般形として, 次式を用いる.

$$\Delta E = \sqrt{\left(\frac{\Delta L^*}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C^*}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H^*}{k_H S_H}\right)^2} + \Delta R \quad (10)$$

ここで

$$\Delta R = R_{tf}(\Delta C^*, \Delta H^*) \quad (11)$$

ΔR は各色差式モデルにより異なる.

4.2 CIEDE 2000 色差式

CIEDE 2000 は XYZ 三刺激値から Table 2 の手順で計算される.

5. インターネット用標準色空間 sRGB

ICC (International Color Consortium) の主導により色管理システム (CMS) が普及し, 異種メディア間での機器独立

の色情報交換が可能となった. しかし, これには各機器固有の入出力特性を定義するプロファイルを必要とし, PC のディスプレイで Web を利用する一般のユーザには, 一々プロファイルを添付することは面倒で使い難い. そこで HP 社と Microsoft は, Web でのモニタの RGB を統一する測色的な standard-RGB (sRGB) 空間を提案した. 現在, 液晶やプラズマ等の新しい表示デバイスが台頭しつつあるが, 代表はやはり CRT である. CRT の発光は 2.2 乗の γ 特性を持つが, 1993 年までの PC は $\gamma \approx 1.8$ で使われており問題があった. sRGB は NTSC テレビの放送規格 ITU-R BT. 709 に準拠して, Table 3 のようにモニタの 3 原色を規定している³⁸⁾.

モニタの観察環境は Table 4 に従う.

画面の白色基準には D 65 を用い, XYZ から表示 RGB への変換は次式に従う.

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.2406 & -1.5372 & -0.4986 \\ -0.9689 & 1.8758 & 0.0415 \\ 0.0557 & -0.2040 & 1.0570 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{D65} \quad (12)$$

この RGB はリニアな変換値であるから, $P=R, G, B$ に対して γ 補正 (カメラガンマ) を加えた非線形の $P'=R', G', B'$ で CRT を駆動しなければならない. sRGB では, CRT のオフセット特性を考慮して, この γ 補正値を次式で計算する.

$$P' = \begin{cases} 12.92P & \text{if } P \leq 0.0031308 \\ 1.055P^{1/2.4} - 0.055 & \text{if } P > 0.0031308 \end{cases} \quad (13)$$

これにより, ほぼ (1/2.2) 乗に近似した補正がなされる.

6. 色の見えモデルの導入

6.1 CIECAM 97 s

実用的な色再現系は, これまで測色値の一致を目標としてきたが, 観察環境や照明光によっては測色値が同じでも色の見えは異なる. これに対処すべく色の見えモデル (CAM) の研究が盛んに行われてきたが, 1997 年の京都での CIE TC 1-34 にて, Hunt, 納谷, Fairchild, Luo らの代表的なモデルを単一のモデルに纏めた CIECAM 97 s が発表された. Fig. 6 に色の見え空間への変換過程を示す³⁰⁾. 実際にこのモデルを画像の見えるの予測に利用する際には, 画像入力における観察条件を考慮して RGB から JCh への順方向変換を行った後, 出力デバイスにおける観察条件の相違を反映した色知覚空間での見えるの変化を加えて $J'C'h'$ を求め, $J'C'h'$ から $R'G'B'$ への逆変換を行って環境変化に対応した出力画像を得る⁴⁾.

6.2 CIECAM 02 へ^{34,36)}

CIECAM 97 s の性能は多数の研究者によって評価され, カラー画像の見えるの予測に一応の成果を収めたが, 実用化に当たっては変換式の複雑さと解析的な逆変換式が求められない等の問題点が指摘され, CIE TC 8-01 で簡略化が進められ, 2002 年の会議で, CIECAM 02 が発表された. 主な修正点は以下の通りである³⁹⁾.

- [1] 輝度 $Y=0$ に対して変換後の明度も $J=0$ に修正
- [2] 薄暗い観察条件の色誘導係数 N_c を 0.95 から 1.05 に修正
- [3] S 錐体 (青色) 応答の非線形性を除去し, 線形色順応

Table 3 CIE chromaticities for ITU-R BT. 709.

	Red	Green	Blue	D 65 White
x	0.6400	0.3000	0.1500	0.3127
y	0.3300	0.6000	0.0600	0.3290
z	0.0300	0.1000	0.7900	0.3583

Table 4 sRGB viewing environment Parameters.

Condition	sRGB
Luminance Level	80 cd/m ²
Illuminant White	x=0.3127, y=0.3291 (D 65)
Image surround	20% reflectance
Encoding Ambient Illuminance Level	64 lux
Encoding Ambient White Point	x=0.3457, y=0.3585 (D 50)
Encoding Viewing Flare	1.0%
Typical Ambient Illuminance Level	200 lux
Typical Ambient White Point	x=0.3457, y=0.3585 (D 50)
Typical Viewing Flare	5.0%

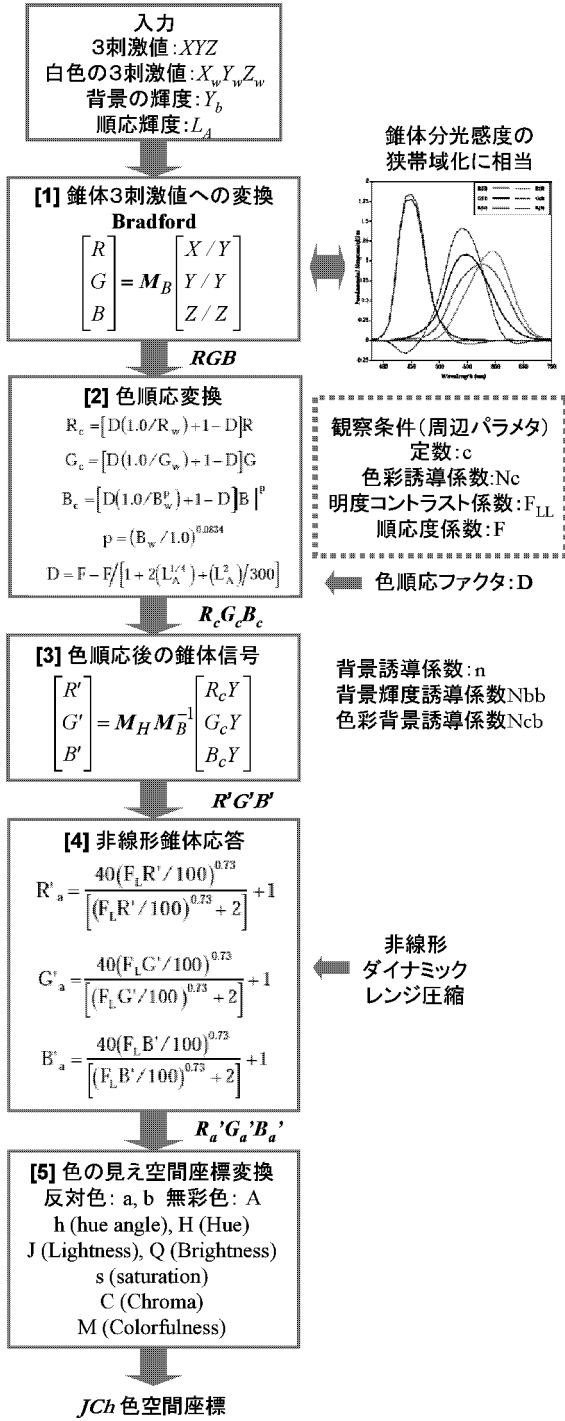


Fig. 6 Color transformation procedure for CIECAM 97 s.

変換式で近似する。この部分の非線形応答が逆変換を不可能にしていた CIECAM 97 s の重大な欠陥でもあった。

- [4] 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を導入する。
- [5] 無彩色付近のクロマ C のスケールを修正
- [6] 飽和度 s のスケールを改良
- [7] c と Nc パラメータの関係を周囲条件が中間的な場合

にも適用できるように改良

[8] 色順応ファクタ D の計算式の簡略化

[9] 離心率 e の計算式の簡略化

CIECAM 02 は CIECAM 97 s に比べて計算式が大幅に簡略化されかつ逆変換も容易になったが、実際の画像への応用はこれからである。マンセル色票を用いた色の見えの予測テストでは CIECAM 97 s よりクロマの等歩度性が改善されている。

7. 空間的要素の導入 S-CIELAB

均等知覚色空間として、1976 年に推奨された CIELAB が広く普及してきたが、これまでの色空間は 3 次元の点座標として色差を扱ってきており、視覚の空間的相互作用は考慮されていない。視覚系は画像の高空間周波数成分に対してはローパスフィルタ特性をもち、輝度と色差チャンネルでは異なった空間周波数応答を示すので、従来の画素対画素の色差計算は不適当である。そこで、視覚系の空間周波数応答を考慮した新色空間として S-CIELAB (Spatial CIELAB) が提案されている⁴⁰⁾。

以下の手順で視覚系を通して見た画像の評価を行う。

- [1] 3 刺激値 $[X, Y, Z]$ から反対色信号 $[O_1, O_2, O_3]$ への線形変換

O_1 は輝度信号, O_2 は Red-Green, O_3 は Yellow-Blue に対応した反対色信号を表す。

$$\begin{bmatrix} O_1 \\ O_2 \\ O_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.279 & 0.72 & -0.107 \\ -0.449 & 0.29 & -0.077 \\ 0.086 & 0.59 & -0.501 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (14)$$

- [2] 反対色信号 $[O_1, O_2, O_3]$ に対する空間フィルタリング

$[O_1, O_2, O_3]$ に視覚特性を反映した空間フィルタリングを施し, $[O'_1, O'_2, O'_3]$ に変換する。 O_1 には広帯域, O_2 には中帯域, 視覚系の空間分解能が低い O_3 チャンネルには狭帯域フィルタを適用する。各チャンネルの視覚特性は、分散の異なる複数のガウス関数を合成した以下の空間フィルタでモデル化されている。

$$O'_j(x, y) = O_j(x, y) \otimes f^j(x, y); j=1, 2, 3 \quad (15)$$

\otimes denotes convolution

$$f^j(x, y) = k^j \sum_i w_i^j E_i^j(x, y) \quad (16)$$

$$E_i^j(x, y) = k_i^j \exp\left(-\frac{(x^2 + y^2)}{(\sigma_i^j)^2}\right) \quad (17)$$

- [3] 空間フィルタ後の $[O'_1, O'_2, O'_3]$ から $[X', Y', Z']$ への逆変換

- [4] 3 刺激値 $[X', Y', Z']$ の CIELAB への変換による色再現性評価

人の視覚を通して観察される画像の評価には、当然、視距離を考慮しなければならない。S-CIELAB Model のガウスフィルタの標準偏差は、sample/deg (画素/deg) で規格化されている。たとえば、72 dpi の代表的なモニタ画像を 18 インチ離れて観るときは、標本点/インチ=23 となるので、これを換算して空間フィルタリングを施す必要がある。

Fig. 7 は S-CIELAB を通して見た脳内での画像の見えへの変換例である。

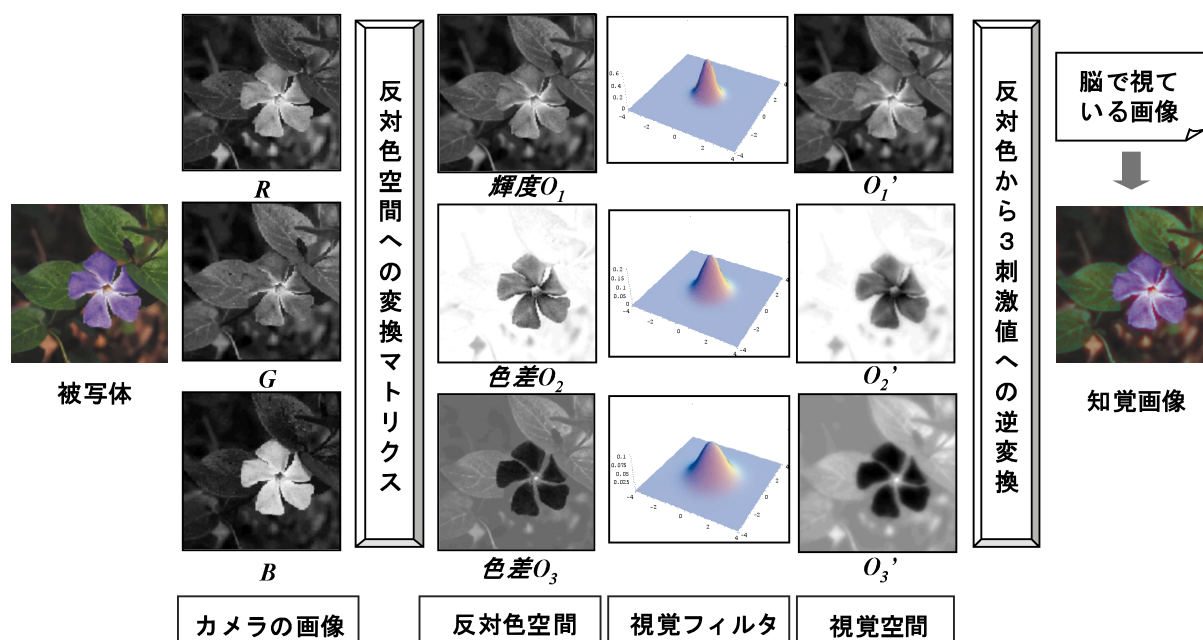


Fig. 7 Image transformation into spatial vision space by S-CIELAB.

8. おわりに

我々は豊かな色彩の世界に住んでおり、画像通信を介してあるがままの色彩を伝えたいという要求は一層高まっている。色彩は一種の共通言語であり、表色空間は、これを相互に正しく交換し共有するために重要な役割を担っている。CIEのこれまでの活動の中心はよりよい均等色空間の探索にあったと言っても過言ではない。本稿ではその流れを概観したが、相互の関連性や色の測定・評価等については殆ど触れていない。

CIEでは多数の委員会が活動しているが、1999年には画像技術に関連する標準化を扱う Division 8 (Imaging Technology) がスタートした。その傘下には現在8つの TC (Technical Committee) が活動しているが、新設の TC 8-08 では、Spatial Color Appearance を取上げており、空間的な色の見えに踏み込もうとしている。色は脳内でおきる視覚の現象であり、視覚系のメカニズムのさらなる解明とその工学的応用を期待したい。

参考文献

- 1) 日本色彩学会編：新編色彩科学ハンドブック，東京大学出版会 (1980)。
- 2) 池田光男：色彩工学の基礎，朝倉書店 (1986)。
- 3) 太田登：色彩工学，東京電機大学出版局 (1993)。
- 4) 岩本明人・小寺宏嘩（責任編集）：デジタルハードコピー技術，共立出版，33-64 頁 (2000)。
- 5) 小寺宏嘩：視覚空間への射影によるカラー入力系の測色的評価，画像電子学会誌，**23**, 5, 490-498 (1994)。
- 6) G. Wyszecki and W. Stiles: Color Science, John Wiley (1967)。
- 7) L. M. Hurvich: Color Vision, Sinuauer Association Inc. (1981)。
- 8) M. D. Fairchild: Color Appearance Model, Addison-Wesley (1998)。
- 9) R. W. G. Hunt: The Specification of Color Appearance I, Col. Res. Appl., **2**, 2, 55 (1977)。
- 10) K. Richer: Cube-Root Color Spaces and Chromatic Adaptation, Col. Res. Appl., **5**, 1, 25 (1980)。
- 11) A. Nemcsics: Coloroid Color System, Col. Res. Appl., **5**, 2, 113 (1980)。
- 12) D. Nickerson: OSA Uniform Color Scale Samples: A Unique Set, Col. Res. Appl., **6**, 1, 7 (1981)。
- 13) F. W. Billmeyer: On the Geometry of the OSA Uniform Color Scales Committee Space, Col. Res. Appl., **6**, 1, 34 (1981)。
- 14) H. R. Davidson: Formulation of the OSA Uniform Color Scales Committee Sample, Col. Res. Appl., **6**, 1, 38 (1981)。
- 15) M. R. Pointer: A Comparison of the CIE 1976 Colour Spaces, Col. Res. Appl., **6**, 2, 108 (1981)。
- 16) A. Hard and L. Sivik: NCS-Natural Color System: a Swedish standard for color notation, Col. Res. Appl., **6**, 2, pp. 128 (1981)。
- 17) T. Benzchawel and S. L. Guth: ATDN: Toward a Uniform Color Space, Col. Res. Appl., **9**, 3, 133 (1984)。
- 18) W. D. Wright: The Basic Concepts and Attributes of Colour Order Systems, Col. Res. Appl., **9**, 4, 229 (1984)。
- 19) M. Richer and K. Witt: The story of the DIN color system, Col. Res. Appl., **11**, 2, 138 (1986)。
- 20) A. Nemcsics: The color space of the Coloroid color system, Col. Res. Appl., **12**, 2, 135 (1987)。
- 21) F. W. Billmeyer: Survey of Color Order System, Col. Res. Appl., **12**, 4, 174 (1987)。
- 22) J. B. Cohen: Color and color mixture: Scalar and vector fundamentals, Col. Res. Appl., **13**, 1, 5 (1988)。
- 23) G. A. Fry: The Fry Uniform Chromaticity Diagram, Col. Res. Appl., **13**, 3, 153 (1988)。
- 24) S. A. Burns, J. B. Cohen, E. N. Kuznetsov: The Munsell Color System in Fundamental Color Space Col. Res. Appl., **15**, 1, 29 (1990)。
- 25) A. R. Robertson: Historical Development of CIE Recommended Color Difference Equations, Col. Res. Appl., **15**, 3,

- 167 (1990).
- 26) W. Billmeyer, Jr. and H. K. Hammond : ASTM Standards on Color Difference Measurement, Col. Res. Appl., **15**, 4, 206 (1990).
 - 27) R. G. Kuehni : Industrial Color Difference Progress and Problems, Col. Res. Appl., **15**, 5, 261 (1990).
 - 28) R. McDonald : European Practices and Philosophy in Industrial Colour-difference Evaluation, Col. Res. Appl., **15**, 5, 249 (1990).
 - 29) M. Mahy, L. V. Eycken, and A. Oosterlinck : Evaluation of Uniform Color Spaces Developed after the Adoption of CIELAB and CIELUV, Col. Res. Appl., **19**, 2, 105 (1994).
 - 30) M. R. Luo and R. W. G. Hunt : The Structure of the CIE 1997 Colour Appearance Model (CIECAM 97 s), Col. Res. Appl., **23**, 3, 138 (1998).
 - 31) R. G. Kuehni : Hue Uniformity and the CIELAB Space and Color Difference Formula, Col. Res. Appl., **23**, 5, 314 (1998).
 - 32) Shing-Sheng Guan and M. R. Luo : A Colour-Difference Formul for Assessing Large Colour Differences, Col. Res. Appl., **24**, 5, 344 (1999).
 - 33) M. Melgosa : Testing CIELAB-Based Color-Difference Formulas, Col. Res. Appl., **25**, 1, 49 (2000).
 - 34) C. J. Li, M. R. Luo and R. W. G. Hunt : A Revision of the CIECAM 97 s Model, Col. Res. Appl., **25**, 4, 260 (2000).
 - 35) M. R. Luo, G. Cui and B. Rigg : The Development of the CIE 2000 Colour-Difference Formula : CIEDE 2000, Col. Res. Appl., **26**, 5, 340 (2001).
 - 36) M. D. Fairchild : A Revision of the CIECAM 97 s for Practical Applications, Col. Res. Appl., **26**, 6, 418 (2001).
 - 37) R. G. Kuehni : CIEDE 2000, Milestone or Final Answer?, COMMUNICATIONS AND COMMENTS, Col. Res. Appl., **27**, 2, 126 (2002).
 - 38) <http://www.w3.org/Graphics/Color/sRGB.html>
 - 39) 矢口博久：色の見えモデルー CIECAM 02 の概要と課題ー, カラーフォーラム JAPAN 2003, 4-1 (2003).
 - 40) Zhang, et al : Application of a special extension to CIELAB, Proc. SID Int. Conf. (1997)



小寺 宏嘩

昭38名工大電気卒。同年、松下電器産業(株)入社、昭48ー平8の間、松下技研(株)にてカラー画像処理、ハードコピーの色再現、色変換プロセッサ等の研究開発に従事。平8より千葉大学工学部情報画像工学科教授。工博。平2及び平12年画像電子学会論文賞、平5年IS & T論文賞、平7年SIDグーテンベルグ賞、H15年IS & Tフェロー。電子情報通信学会、映像情報メディア学会、画像電子学会、日本画像学会、IS & T、SID会員。