

ファジィ理論の色彩システムへの応用

Application of fuzzy set theory to color systems

菅野直敏

Naotoshi Sugano

玉川大学工学部知能情報システム学科, 194-8610 東京都町田市玉川学園 6-1-1

Department of Intelligent Information Systems, Tamagawa University,

6-1-1 Tamagawagakuen Machida-shi Tokyo 194-8610

Abstract

The present study considers a fuzzy color system in which three membership functions are constructed on the color triangle and the tone triangle. These systems can process a fuzzy input to a color triangular system and to a tone triangular system and output the center of gravity of three weights associated with respective grades. Three membership functions are applied to the color triangle and the tone triangle relationship, respectively. By treating three coordinates of redness, greenness, and blueness on the color triangle and of chromaticness, whiteness, and blackness on the tone triangle, a target color can be easily obtained as the center of gravity of the output fuzzy set. The differences between fuzzy input and inference output are described, and the relationship between inference outputs for crisp inputs and inference outputs for fuzzy inputs are shown in this paper.

Keywords: fuzzy set theoretical approach, three primary colors, additive color mixture, color triangle, vague color, triangular pyramid membership function, conical membership function, tone triangle, projection, mapping

1. はじめに

ファジィ理論 (Fuzzy set theory) を用いたあいまいさを表現する方法およびあいまいさを計算する方法¹⁾として, ファジィ理論の色彩への応用について詳しく述べる.

本稿では, 加法混色を用いたカラートライアングル (Color triangle) 上でのファジィ表現手法について紹介する. ここでは, カラートライアングル上の三角錐台のような入力ファジィ集合 (前件部) と円錐形のファジィ入力との関係を調べてみる^{7),8)}. カラートライアングルは色相と彩度の関係を示している⁴⁾. 主要色と白は同じカラートライアングル上に表現でき, ここではカラートライアングル上のあいまいな色の集合を明らかにするものである. このようなシステムはあいまいな色の属性情報の近似推論値を決めることができる. このファジィ理論的なアプローチはあいまいな色彩の情報処

理やカラーネーミングシステムなどの応用に有効である.

2. カラートライアングルと加法混色

加法混色は異なる2色あるいは3色の光を混ぜるときに起こる. 赤 (Red), 緑 (Green), 青 (Blue) の3色の加法混色ですべての色彩 C をつくることができる. 一般に色ベクトルは三刺激値 (R : 赤成分, G : 緑成分, B : 青成分) と呼ばれる量と方向により次のように示される.

$$\vec{C} = \vec{R} + \vec{G} + \vec{B} \quad (1)$$

これは RGB カラーモデル (Color model) と呼ばれる. このコンセプトは平面図 (図 1) によって表すことができる.

このカラートライアングル平面 (ドット部分) の座標 (r, g, b) はさまざまな色彩を指定することができる. 座標により与えられる位置は色

をつくる R (赤成分), G (緑成分), B (青成分) の量に対応している. カラー三角形の中央を指定する座標は3原色を等量に混合した場合を表し, 各成分が最大するとき白 (W) になる. このような表記は色度図 (Chromaticity diagram) と呼ばれる. これは色相と彩度で表され, 明度はない^{2),4)}. カラー三角形上で, R (赤成分), G (緑成分), B (青成分) の比率が色彩を指定し, 3つの属性の和は100%に等しい.

ここで, 色ベクトルの方向のみを表すために色度 r, g, b は以下のようになる.

$$r = \frac{R}{R+G+B} \quad (2)$$

$$g = \frac{G}{R+G+B} \quad (3)$$

$$b = \frac{B}{R+G+B} \quad (4)$$

$$r+g+b=1 \quad (5)$$

方向であるから三刺激値の比で示され, 式 (5) に示されるように和が1となる¹²⁾.

図1で赤 (Red) の成分 (R, G, B) は $(1, 0, 0)$ であり, 三角座標 (r, g, b) も同じ $(1, 0, 0)$ である. また緑 (Green) と青 (Blue) も成分と座標が同じになる. たとえば, 黄 (Yellow) の成分 (R, G, B) は $(1, 1, 0)$ であり, カラー三角形上の三角座標 (r, g, b) は $(0.5, 0.5, 0)$ となる. このようにほぼ全ての色は正三角形 RGB の中に示すことができる.

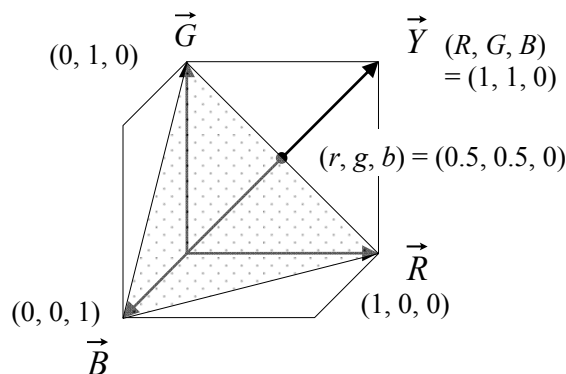


図1 カラー三角形と加法混色

3. 色相のファジィシステム

ここでは, カラー三角形上の RGB システムを考える. 図2のように主要色として

の赤 (Red), 黄 (Yellow), 緑 (Green), 青緑 (Cyan), 青 (Blue), 赤紫 (Magenta), 白 (White) は R, Y, G, C, B, M, W のように省略する. 図3において主要色は No.1: B , No.6: C , No.11: G , No.46: M , No.51: Y , No.66: R である. これらの座標は $(r_1, g_1, b_1), (r_6, g_6, b_6), (r_{11}, g_{11}, b_{11}), \dots$ が選ばれ, r_n, g_n, b_n は n 番目の色の各座標である (n は No.). 中心部分をみると, No.34, No.35, No.42 があり, これらの中に右上の詳細図にあるような7色 (No.101-107) が含まれて, 中央に No.104: W がある. つまり, 3.3%区切りに色座標をとり, 加法混色を用いて各色成分を合成すると白を含んだ三角形ができる. ただし, 白を含むものを示すには496色が必要となる (付録の図21参照).

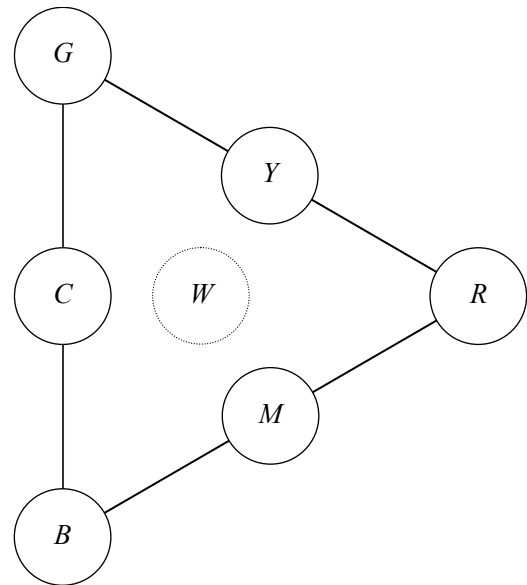


図2 カラー三角形と主要色

図4はファジィシステムを表しており, カラー三角形 ($R_i G_i B_i$) の中線方向に平行な軸上に赤み (Redness) r_i , 緑み (Greenness) g_i , 青み (Blueness) b_i がある. 図4aでは, 赤みが増すと赤成分の度合い μ_k が縦方向に増加することを意味している. これが赤のファジィ集合を形成する.

また, このファジィシステムでは入力ファジィ集合 (Fuzzy set) A_k (前件部), ファジィ入力 I_n , 出クリスプ集合 (Crisp set) O_k (後件部), およびファジィ出力 O' を示している. 図4aは三角座標 (r_i, g_i, b_i) で, 図4bは三角座標 (r_o, g_o, b_o) で, 図4cは座標 (r_o, u_k) で表されている.

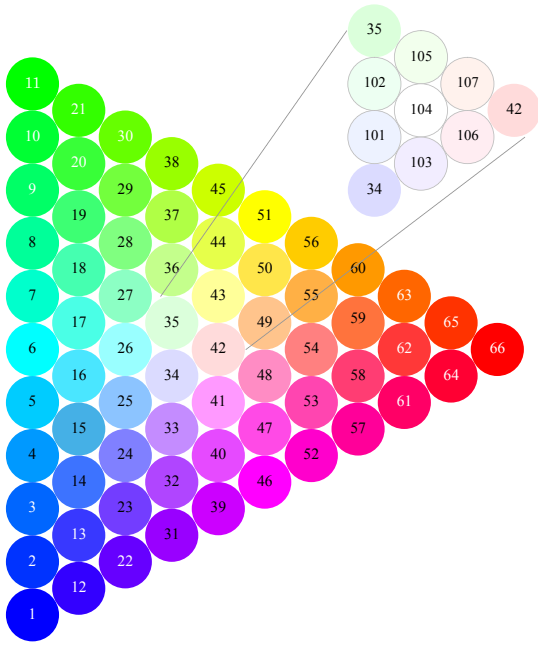


図3 66色のカラートライアングル

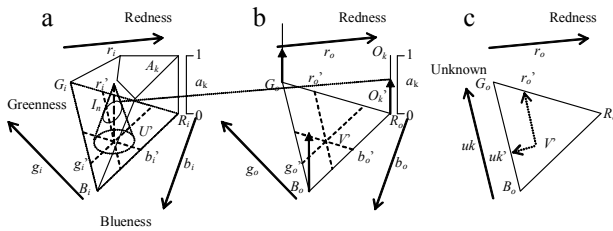


図4 色相のファジィシステム

ファジィルール (Fuzzy rule) は次のように示される.

$$R^1 : \text{if } U \text{ is } A_1 \text{ then } V \text{ is } O_1 \quad (6)$$

$$R^2 : \text{if } U \text{ is } A_2 \text{ then } V \text{ is } O_2 \quad (7)$$

$$R^3 : \text{if } U \text{ is } A_3 \text{ then } V \text{ is } O_3 \quad (8)$$

ルール R^k : *if U is A_k then V is O_k* ($k=1, 2, 3$), ここで k はルール番号である. $U=(r_i, g_i, b_i)$ は入力座標, $V=(r_o, g_o, b_o)$ は出力座標である. 入力ファジィ集合 A_k (前件部) は頂点 R_i, G_i , あるいは B_i における三角錐台のような形状であり, ファジィ入力 I_n は円錐, 出力クリस्प集合 O_k (後件部) は頂点 R_o, G_o , あるいは B_o におけるシングルトン (Singleton) である. ファジィ集合 O_k は縦矢印で示されている. もし入力が A_k であれば, 出力は O_k である.

ファジィ推論 (Fuzzy inference) の方法は次の

ようである. ここで入力を $r_i=r_i', g_i=g_i', b_i=b_i'$ とすると $U=(r_i', g_i', b_i')$ となる.

1) ルール R^k の入力で, $\alpha_k=A_k(U)$, ここで $k=1, 2, 3$ である.

2) ルール R^k の出力で, 出力クリस्प集合 O_k はシングルトン (縦棒) である.

3) $O_k'=\alpha_k O_k$, ここで O_k' はファジィ集合 (縦矢印), また O_k はクリस्प集合 (縦棒) である. ルール R^1, R^2, R^3 の最終推論結果は O' である.

$$O' = \alpha_1 O_1 \cup \alpha_2 O_2 \cup \alpha_3 O_3 = O_1' \cup O_2' \cup O_3' \quad (9)$$

出力座標 $V=(r_o', g_o', b_o')$ は三角座標上のファジィ集合 O' の重心 (Center of gravity) で, $V=(r_o', uk')$ はグラフィカルな座標上のファジィ集合 O' の重心である. uk' は線分 BG 上の値 (B からの距離) である.

赤の入力ファジィ集合 A_1 (前件部) は次のメンバーシップ関数 (Membership function) により特徴付けられる.

$$\mu_1(r_i, uk) = r_i s; \quad r_i < \frac{1}{s} \quad (10)$$

$$\mu_1(r_i, uk) = 1; \quad r_i \geq \frac{1}{s} \quad (11)$$

ここで, s は射影 (Projection) の傾斜であり, 0.02 から 0.03 の範囲とする. 図7上の右上がりの2つの斜線の傾きを示す. uk は次のように制限される.

$$50 \geq uk \geq \frac{r_i}{2} \quad (12)$$

$$50 < uk \leq -\frac{r_i}{2} + 100 \quad (13)$$

表1 主要色のメンバーシップ値 $\mu_k(r_i', g_i', b_i')$

Color	Color coordinate			Membership value μ_k		
	r_i'	g_i'	b_i'	$k=1$	$k=2$	$k=3$
B_i	0.0	0.0	100.0	0.00	0.00	1.00
C_i	0.0	50.0	50.0	0.00	1.00	1.00
G_i	0.0	100.0	0.0	0.00	1.00	0.00
M_i	50.0	0.0	50.0	1.00	0.00	1.00
Y_i	50.0	50.0	0.0	1.00	1.00	0.00
R_i	100.0	0.0	0.0	1.00	0.00	0.00
W_i	33.3	33.3	33.3	1.00	1.00	1.00

また, 緑と青のメンバーシップ関数は図5のファジィ集合を W_i 中心に 120 度ずつ回転したものであり (付録の図22参照), 同様な式によ

り記述される。

図 6 a は B, C, M を含むカラートライアングル上の 21 色のファジィ入力 ($I_1-I_6, I_{12}-I_{16}, I_{22}-I_{25}, I_{31}-I_{33}, I_{39}-I_{40}, I_{46}$) を示している (他の 45 色は描かれていない)。ファジィ入力は円錐形ファジィ集合で形づくられ、ファジィ集合は互いに重なり合っている。円錐形ファジィ集合の底面 (円形) は隣の底面の中心を通るように作られている。図 6 b は a の円錐形ファジィ集合に付けられた番号を示し、この番号は 0.5 レベル集合の上部に示されている。色名は No.1: B , No.6: C , No.46: M である。

表 1 はカラートライアングル上の色の三角座標 (Color coordinate) における入力ファジィ集合 A_k のメンバーシップ値 (Membership value) μ_k (r_i', g_i', b_i') を示している。 $\mu_k(r_i', g_i', b_i')$ は $\mu_k(r_i', uk')$ に等しい。このメンバーシップ関数 μ_k は 7 色 (R, Y, G, C, B, M, W) のメンバーシップ値に基づいている。この値はグレード (Grade) として図 5 に示す。

図 5 は W_i を含んだ形のファジィ集合で示されている。ここで、上部の平面は菱形のような形状をしている (表 1 と図 7 参照)。斜面は式 (10) で、平面は式 (11) で表される。

図 7 は入力ファジィ集合 A_k (前件部) の底面としてカラートライアングル (下半分) を示し、あいまいな 66 色の円錐形ファジィ入力 (I_1-I_{66}) の 1 色が示されている。 $k=1$ (Redness) で、射影 $\text{Proj}(A_k)$ の台形斜線部分は式 (10) で示される。傾きが大きい直線 ($s=0.03$) は C_i ($\mu_k=0$) と W_i ($\mu_k=1$) 間の射影を、傾きの小さい直線 ($s=0.02$) は B_i ($\mu_k=0$) と M_i ($\mu_k=1$) (あるいは G_i と Y_i) 間の射影を表している (表 1 と図 5 参照)。Redness 軸上の $\text{Proj}(I_{24})$ は下から投影することによりできる円錐形ファジィ入力 (I_1-I_{66}) の射影の 1 つである。

ファジィ入力 I_n と前件部のファジィ集合 A_k の積集合は $A_k \cap I_n$ である (図 7 右下参照)。一致度 $\alpha_k' = \text{Height}(A_k \cap I_n)$ で決まる。Height は高さを求める関数である。もし入力がクリスプであれば、 α_k' はダッシュのない α_k と書くことにする。 $\text{Proj}(O_k)$ は頂点 R_o における後件部のクリスプ集合 O_k の射影である (図 4b 参照)。 $O_k' = \alpha_k O_k$ は後件部の R_o, G_o, B_o における各重み (Weight) と考えることができる。

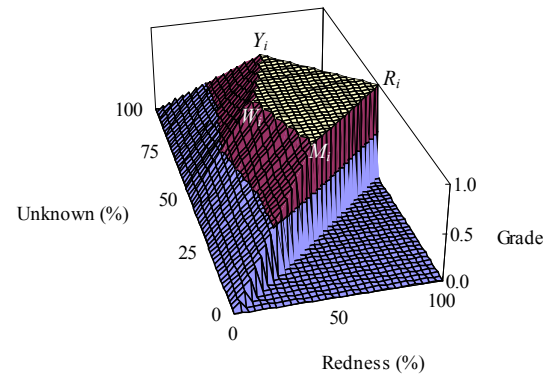


図 5 赤のファジィ集合

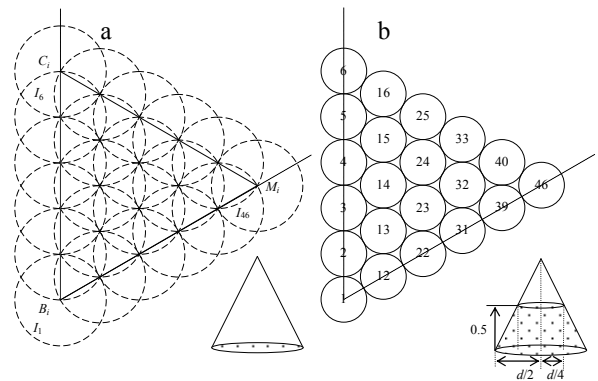


図 6 カラートライアングル上の円錐形ファジィ入力の配置と 0.5 レベル集合

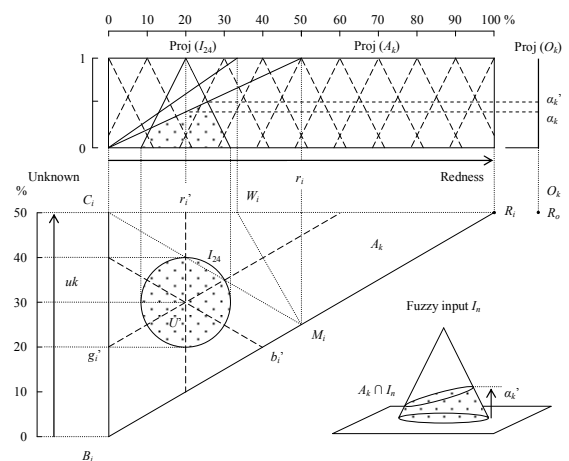


図 7 カラートライアングル上のファジィ集合 (前件部) と円錐形ファジィ入力のトップビューと射影

表 2 クリスプ入力の推論結果

No.	Crisp input			Grade for crisp input			Inference output			Graphic output	
	r_i'	g_i'	b_i'	α_1	α_2	α_3	r_o'	g_o'	b_o'	r_o'	uk'
1	0	0	100	0.00	0.00	1.00	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0
2	0	10	90	0.00	0.20	1.00	0.0	16.7	83.3	0.0	16.7
3	0	20	80	0.00	0.40	1.00	0.0	28.6	71.4	0.0	28.6
4	0	30	70	0.00	0.60	1.00	0.0	37.5	62.5	0.0	37.5
5	0	40	60	0.00	0.80	1.00	0.0	44.4	55.6	0.0	44.4
6	0	50	50	0.00	1.00	1.00	0.0	50.0	50.0	0.0	50.0
7	0	60	40	0.00	1.00	0.80	0.0	55.6	44.4	0.0	55.6
8	0	70	30	0.00	1.00	0.60	0.0	62.5	37.5	0.0	62.5
9	0	80	20	0.00	1.00	0.40	0.0	71.4	28.6	0.0	71.4
10	0	90	10	0.00	1.00	0.20	0.0	83.3	16.7	0.0	83.3
11	0	100	0	0.00	1.00	0.00	0.0	100.0	0.0	0.0	100.0
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
46	50	0	50	1.00	0.00	1.00	50.0	0.0	50.0	50.0	25.0
47	50	10	40	1.00	0.29	0.90	45.7	13.2	41.1	45.7	36.1
48	50	20	30	1.00	0.55	0.77	43.1	23.7	33.2	43.1	45.3
49	50	30	20	1.00	0.77	0.55	43.1	33.2	23.7	43.1	54.7
50	50	40	10	1.00	0.90	0.29	45.7	41.1	13.2	45.7	63.9
51	50	50	0	1.00	1.00	0.00	50.0	50.0	0.0	50.0	75.0
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
66	100	0	0	1.00	0.00	0.00	100.0	0.0	0.0	100.0	50.0

表 3 ファジィ入力の推論結果

No.	Fuzzy input			Grade for fuzzy input			Inference output			Graphic output	
	r_i'	g_i'	b_i'	α_1'	α_2'	α_3'	r_o'	g_o'	b_o'	r_o'	uk'
1	0	0	100	0.19	0.19	1.00	13.6	13.6	72.7	13.6	20.5
2	0	10	90	0.20	0.35	1.00	12.8	22.6	64.6	12.8	29.0
3	0	20	80	0.21	0.51	1.00	12.2	29.8	58.0	12.2	35.9
4	0	30	70	0.22	0.68	1.00	11.8	35.5	52.7	11.8	41.4
5	0	40	60	0.24	0.84	1.00	11.5	40.3	48.1	11.5	46.1
6	0	50	50	0.26	1.00	1.00	11.4	44.3	44.3	11.4	50.0
7	0	60	40	0.24	1.00	0.84	11.5	48.1	40.3	11.5	53.9
8	0	70	30	0.22	1.00	0.68	11.8	52.7	35.5	11.8	58.6
9	0	80	20	0.21	1.00	0.51	12.2	58.0	29.8	12.2	64.1
10	0	90	10	0.20	1.00	0.35	12.8	64.6	22.6	12.8	71.0
11	0	100	0	0.19	1.00	0.19	13.6	72.7	13.6	13.6	79.5
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
46	50	0	50	1.00	0.26	1.00	44.3	11.4	44.3	44.3	33.5
47	50	10	40	1.00	0.48	0.89	42.3	20.3	37.4	42.3	41.4
48	50	20	30	1.00	0.61	0.76	42.2	25.8	32.0	42.2	46.9
49	50	30	20	1.00	0.72	0.61	42.9	30.8	26.3	42.9	52.3
50	50	40	10	1.00	0.89	0.45	42.9	38.0	19.2	42.9	59.4
51	50	50	0	1.00	1.00	0.26	44.3	44.3	11.4	44.3	66.5
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
66	100	0	0	1.00	0.19	0.19	72.7	13.6	13.6	72.7	50.0

これら三角形の頂点にある3本の矢印をファジィ集合とみなし脱ファジィ化（あるいは非ファジィ化）（De-fuzzification）することになる。

4. 色相ファジィシステムの出力

あいまいな色がファジィシステムに入ると何が起こるか見てみよう。このシステムはあいまいな色彩の入力データを単一色の出力データに変換することができる。たとえば、図7でNo.24の円錐形ファジィ入力を中心座標が $U=(r_i', g_i', b_i')=(20, 20, 60)$ あるいは $U=(r_i', uk')=(20, 30)$ で、単位は%である。円錐底面の直径は $d=23.0\%$ であり、あいまいさを表す。この大きさは可変である。

表2は66色のクリस्प入力 $U=(r_i', g_i', b_i')$ に対するファジィ推論 (Fuzzy inference) の結果の一部である。ここに、主要色の結果が含まれている。グレード $(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$ 、推論出力 $V=(r_o', g_o', b_o')$ 、グラフィック出力 $V=(r_o', uk')$ が計算されている。入力、グレード、および出力の関係は非線形である。色名は No.1: B, No.6: C, No.11: G, No.46: M, No.51: Y, No.66: R である。ファジィ入力 I_n の添字 n は番号を示している。

一方、表3は66色のファジィ入力に対するファジィ推論結果の一部である。ファジィ入力は表2のクリस्प入力と同様の方法で中心座標 (r_i', g_i', b_i') を基に作られる。円錐底面の直径は $d=23.0\%$ であり、あいまいさを表している (図6, 図7 参照)。グレード $(\alpha_1', \alpha_2', \alpha_3')$ 、推論出力 $V=(r_o', g_o', b_o')$ 、グラフィック出力 $V=(r_o', uk')$ が計算できる。このファジィシステムで入力と出力は非線形な情報処理を示す。

以前の研究^{5),6)}で、ファジィ入力 I_n と前件部のファジィ集合 A_k との積集合 (一致度) は前件部 A_k のエッジを含んでいるかどうかによって異なる。このエッジは非線形な情報処理に影響するが、ここではエッジ効果を考慮しない結果を示す。

図8aは表2のデータ (r_o', uk') から得られる横軸: 赤み Redness の値 r_o と縦軸: 不明 Unknown の値 uk の関係を示している (図4c 参照)。●はクリस्प入力に対する出力を示している。○はクリस्प入力の位置を示している。ほとんどのクリस्प入力○の座標とこのクリस्प入力に対する推論出力●は異なることが分かる。ところが、R, Y, G, C, B, Mの位置は変化しない。クリस्प入力に対する他の推論結果●はカラー

トライアングルの中央に集まる。この効果はファジィ集合の (三角錐台のような) 形状や重心の計算に依存する。この結果は以前の研究結果^{5),6)}と異なる。すなわち、三角錐台のようなファジィ集合 (前件部) を使うことによるクリस्प入力の集中効果は以前の研究^{5),6)}の三角錐のファジィ集合 (前件部) を使った結果では現れなかった。

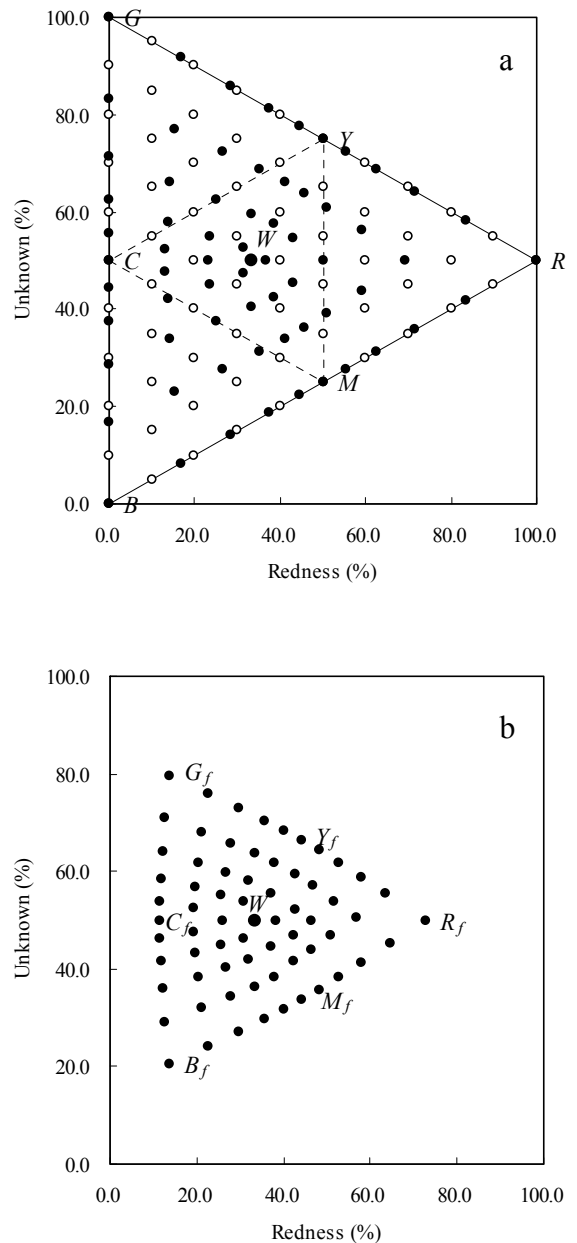


図8 クリस्प入力とファジィ入力の推論結果

図8bは表3のデータ (r_o', uk') から得られる横軸: 赤み Redness の値 r_o と縦軸: 不明 Unknown

の値 uk の関係を示している (図 4c 参照). ● はファジィ入力に対する出力を示している. ファジィ入力に対する推論出力●はカラートライアングルの中央に集まる (添字 f はファジィ入力を示す). クリस्प入力の推論結果とは明らかに異なり, ファジィ入力に対する結果が自然な変化をしている. このファジィシステムにおいて (図 4), カラートライアングルにあいまいな色彩を入れることで (a), システムはクリस्पな色彩情報 (平均された単一色) を出し (b), またグラフィカルな平面に色彩情報を表すことができる (c).

表 4 クリस्प入力とファジィ入力の推論結果間の距離

	Distance 1	Distance 2	Distance 3	Ratio
$B-G$	100.0	$B-B_f$ 24.6	$B-W$ 60.1	0.409
		$C-C_f$ 11.4	$C-W$ 33.3	0.342
$G-R$	111.8	$G-G_f$ 24.6	$G-W$ 60.1	0.409
		$M-M_f$ 10.3	$M-W$ 30.0	0.342
		$Y-Y_f$ 10.3	$Y-W$ 30.0	0.342
$R-B$	111.8	$R-R_f$ 27.3	$R-W$ 66.7	0.409

表 4 において, 主要色のクリस्प入力とファジィ入力に対する推論結果の差異はグラフィカルな平面上で計算できる. 距離 1 (Distance 1) は R, G, B の座標間距離を示し, 距離 2 (Distance 2) は各主要色に対するクリस्पとファジィの推論結果間距離を示し, また距離 3 (Distance 3) は白からの各主要色までの距離を計算したものである. 正規化された距離 (Ratio) は距離 3 (Distance 3) に対する距離 2 (Distance 2) の比率である. この比は 2 つのグループに分けられ, 0.41 の R, G, B のグループ 1 と 0.34 の Y, M, C のグループ 2 となる. 点 R, G, B におけるファジィ入力に対する推論出力は大きな正規化距離 (Ratio) をもち, 主要色から白までの距離 3 (Distance 3) が大きければ, 集中効果は強い. 他の場合のそれは弱い.

これまでは, カラートライアングル (前件部) から新しいカラートライアングル (後件部) へ写像をすることで入出力関係を調べた (前件部と後件部は同じ三角形上にある). 次に示すファジィシステムでは, トーントライアングル (前件部) から前述したカラートライアングル (後件部) への写像を考える¹⁰⁾.

5. トーントライアングルとカラートライアングル

ここでは, 図 9a のような色立体中のトーントライアングルと図 9b のようなカラートライアングルを考える. これらは同じ色立体中にある (ドット部分). たとえば, 色相を赤 R とすると図のトライアングルが決まり, 前述したカラートライアングルとの交線 (共通部分) があり, 図 10b の線分 $W-R$ にあたる. つまり, 三角形 CWS 上で起こったことを線分 $W-R$ 上に写像することになる. 図 10a の C は最大クロマ (各色相) であり, 10b の C は青緑を示す (図 11 参照). 2 つのトライアングルで C は違った意味であることに注意してほしい. 図 11a でクロマ C は No.66 の赤 R であるが図 11b で C は No.6 の青緑 Cyan である.

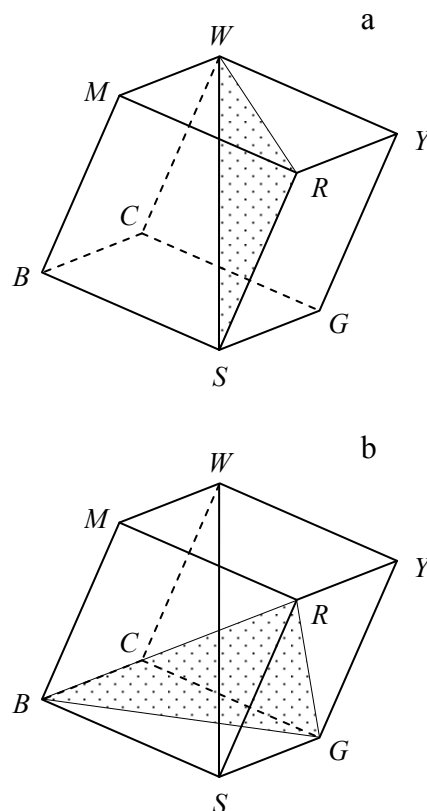


図 9 色立体中のトーントライアングルとカラートライアングル

図 9b のカラートライアングルは正三角形であるが, 図 9a のトーントライアングルは赤 R であれば直角三角形である. 黄赤 O であれば二等辺三角形である. これを正三角形に変えることで図 10a のようになる.

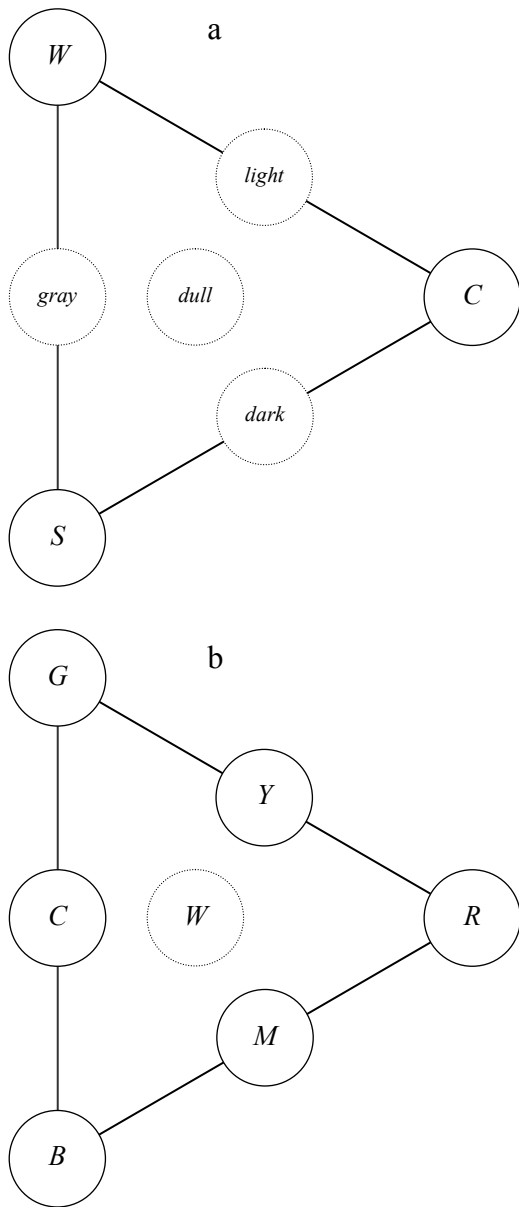


図 10 トーントライアングルと
カラートライアングル

6. トーンのファジィシステム

ここでは、カラートライアングル上のトーンシステムを考える。図 10 a のように彩度の高い有彩色、クロマ (Chroma), 白 (White), 黒 (Schwarz) は C, W, S のように省略する。他には灰 (Gray) 暗い (Dark) (あるいは深い (Deep)), 明るい (Light) (あるいは薄い (Pale)), くすんだ (Dull) がある。図 10 b において主要色としての赤 (Red), 黄 (Yellow), 緑 (Green), 青緑 (Cyan), 青 (Blue), 赤紫 (Magenta), 白 (White) は R, Y, G, C, B, M, W のように省略する。これらの座標は $(r_1, g_1, b_1), (r_6, g_6, b_6), (r_{11}, g_{11}, b_{11}), \dots$ が選ばれ, r_n, g_n, b_n

は n 番目の色の各座標である (n は No.). 図 10 b のカラートライアングル上で赤 (Red), 緑 (Green), 青 (Blue) のようなある色相が決まると図 10 a のトーントライアングル上に彩度と明度の関係 (トーン) が決まる。

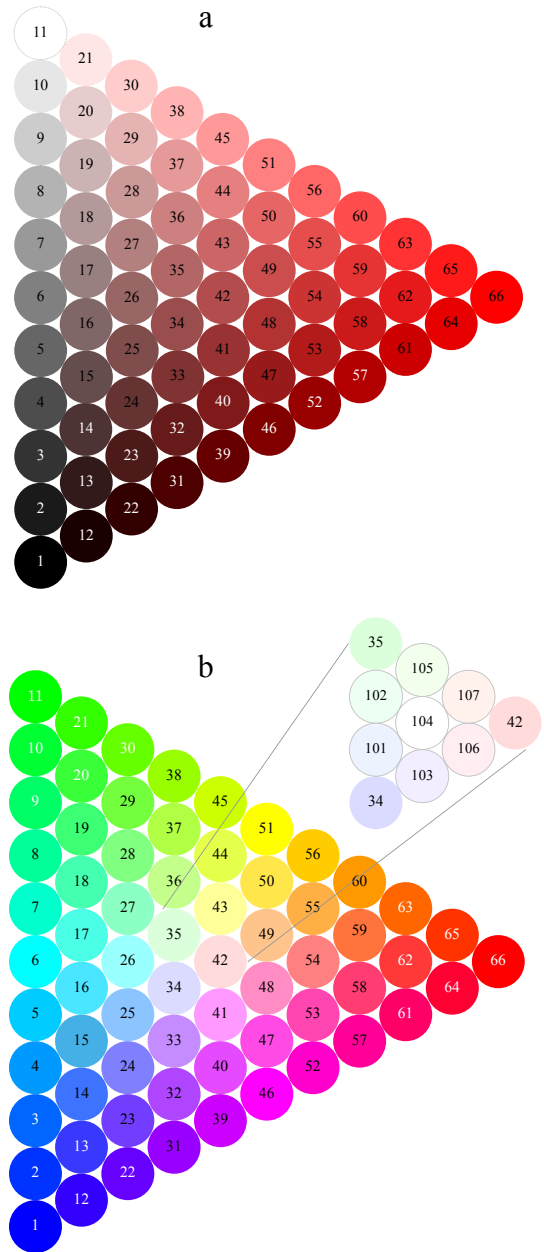


図 11 66 色のトーントライアングルと
カラートライアングル

図 11 は図 10 の概要図に対応している。図 11 a の色名は No.1: Black, No.6: gray, No.11: White, No.46: dark (or deep), No.51: light (or pale), No.66: Maximum chroma (Maximal color) である。特に dull は指定していない (図 10 a)。ここでは

No.66 は R である. また, 図 11b の色名は No.1: B , No.6: C , No.11: G , No.46: M , No.51: Y , No.66: R である. さらに, 中心部分を詳しくみると, 右上にある No.104 は W となる.

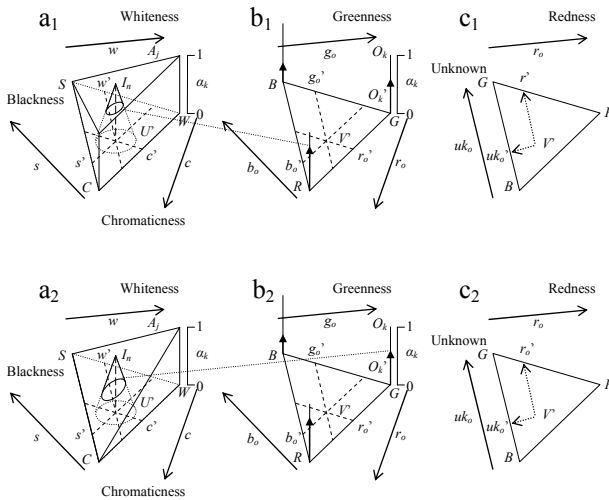


図 12 トーンのパジシステム

図 12 はパジシステムを表しており, CWS トーントライアングルの中線方向に平行な軸上に色み (Chromaticness) c , 白み (Whiteness) w , 黒み (Blackness) s がある. 図 12a₁ (上段) では, 黒みが増えると黒成分の度合い μ_j が縦方向に減少することを意味している. これが非黒 (Anti-black) のパジ集合を形成する. 図 12a₂ (下段) では, 白みが増すと白成分の度合い μ_j が増加することを意味している. これが白 (White) のパジ集合を形成する.

また, このパジシステムでは入力パジ集合 A_j (前件部), パジ入力 I_n , 出力クリस्प集合 O_k (後件部), およびパジ出力 O' を示している. ここでは, 図 12a は三角座標 (c, w, s) で, 色み c , 白み w , 黒み s の関係は以下ようになる.

$$c + w + s = 1 \quad (14)$$

図 12b は三角座標 (r_o, g_o, b_o) で, 図 12c は座標 (r_o, uk_o) で表されている. 上段, 下段にある入力パジ集合を用いることで, 主要色に関係したあいまいさを処理 (推論) することができる. 色み (Chromaticness) は彩度 (Saturation) に相当する.

パジルールは次のように示される.

$$R^k : \text{if } U \text{ is } A_j \text{ then } V \text{ is } O_k \quad (15)$$

ここで k はルール番号 ($k=1, 2, 3$) であり, r, g, b の各成分に対応している. A_j は入力パジ集合 (前件部) で ($j=1, 2$), O_k は出力クリस्प集合 (後件部) である. この k は j に対応していない (表 5). $U=(c, w, s)$ は入力座標, $V=(r_o, g_o, b_o)$ は出力座標である. 入力 U はトーンのトライアングル平面上に, 出力 V は色相のトライアングル平面上にある. 入力パジ集合 A_j (前件部) は頂点 C, W , あるいは S における三角錐の形状であり, パジ入力 I_n は円錐, 出力クリस्प集合 O_k (後件部) は頂点 R, G , あるいは B におけるシングルトン (縦棒) である. パジ集合 O_k' は縦矢印で示されている. もし, 入力 A_j であれば, 出力は O_k である. A_j と O_k の主な関係は表 5 に示されている.

表 5 主要色のパジルール

Hue color	Input fuzzy set			Output crisp set		
	R^1	R^2	R^3	R^1	R^2	R^3
Red	A_1	A_0	A_0	O_1	O_2	O_3
Green	A_0	A_1	A_0	O_1	O_2	O_3
Blue	A_0	A_0	A_1	O_1	O_2	O_3
Yellow	A_1	A_1	A_0	O_1	O_2	O_3
Cyan	A_0	A_1	A_1	O_1	O_2	O_3
Magenta	A_1	A_0	A_1	O_1	O_2	O_3

表 5 は主要色のパジルールを示している. ここで, 3 つのルール (R^1, R^2, R^3) は 2 つのパジ集合で構成されている (図 12, 図 13).

表 5 の赤 (Red) では $(1, 0, 0)$ の成分をもち, パジルールの前件部 (A_1, A_0, A_0) に対応している. 赤成分 R はパジ集合 A_1 (Anti-black) で, 緑成分 G はパジ集合 A_0 (White) で, 青成分 B もパジ集合 A_0 (White) で表せばよいことを示している.

パジ推論の方法は次のようである. 入力を $c=c', w=w', s=s'$ とすると, $U'=(c', w', s')$ となる.

- 1) ルール R^k の入力で, $\alpha_k = A_j(U')$, ここで k と j の主な関係は表 5 に示される.
- 2) ルール R^k の出力で, α_k レベル集合は縦矢印で示される.
- 3) $O_k' = \alpha_k O_k$, ここで O_k' はパジ集合 (縦矢印), また O_k は出力クリस्प集合 (縦棒) である (図 12b). ルール R^1, R^2, R^3 の最終推論結果は O' である.

$$O' = \alpha_1 O_1 \cup \alpha_2 O_2 \cup \alpha_3 O_3 = O_1' \cup O_2' \cup O_3' \quad (16)$$

出力座標 $V = (r_o', g_o', b_o')$ は三角座標上のファジィ集合 O' の重心で, $V = (r_o', uk_o')$ はグラフィカルな座標上のファジィ集合 O' の重心である. uk_o' は線分 BG 上の値 (B からの距離) である.

表 6 はトーントライアングル上の入力ファジィ集合 A_j (前件部) のメンバーシップ値 $\mu_j(c', w', s')$ を示している. $\mu_j(c', w', s')$ は図 13 の $\mu_j(c', uk_3')$ に等しい. uk_3' は明度 (Lightness) である. ここで, メンバーシップ関数 μ_j は加法混色に基づいている. 図 13 ($j=1, 2$) と次に示す図 19 ($j=3, 4$) においてメンバーシップ関数 μ_j はファジィ集合 A_j に対応している.

表 6 入力ファジィ集合のメンバーシップ値

Color	Color coordinate			Membership value μ_j			
	c	w	s	μ_1	$\mu_{0.5}$	$\mu_{0.25}$	μ_0
C	100	0	0	1.00	0.50	0.25	0.00
W	0	100	0	1.00	1.00	1.00	1.00
S	0	0	100	0.00	0.00	0.00	0.00

表 6 に示すように三角形の頂点 C 上のメンバーシップ値がファジィ集合の形状を決めている. たとえば, 表 5 で色相を赤としたとき, 赤 (Red) の成分 (R, G, B) は $(1, 0, 0)$ であり, この値がファジィルールの前件部 (A_1, A_0, A_0) に対応している. つまり, A_1 は C 上のメンバーシップ値が 1 であり, A_0 は 0 となる. ここでは, A_0 を 2 つ使うことになる.

図 13a は入力ファジィ集合 A_1 (Anti-black) の, 図 13b は A_0 (White) のファジィ集合を示している (表 5, 図 12, 図 15 参照). ここで, 非黒 (Anti-black) のファジィ集合は黒み (Blackness) の増加に対してグレード (Grade) が下がることを意味している. また, 白 (White) のファジィ集合は白み (Whiteness) の増加に対してグレードが上がることを示している. クロマティックネス (Chromaticness) は色みである.

表 5 の赤 (Red) では $(1, 0, 0)$ の RGB 成分をもち, ファジィルールの前件部 (A_1, A_0, A_0) に対応している. 表 6 の A_1 において, C 上でメンバーシップ値が 1 であれば, W 上でも 1 であり, S 上では 0 でなくてはならない. つまり, ファジィ集合 A_1 において (c, w, s) は $(1, 1, 0)$,

A_0 において $(1, 0, 0)$ となる. なぜならば, 3 つのファジィ集合 (A_1, A_0, A_0) の W 上でメンバーシップ値が $(1, 1, 1)$ であり, S 上では $(0, 0, 0)$ でなくてはならない. つまり, 赤成分 R はファジィ集合 A_1 (Anti-black) で, 緑成分 G はファジィ集合 A_0 (White) で, 青成分 B もファジィ集合 A_0 (White) で表せばよいことになる.

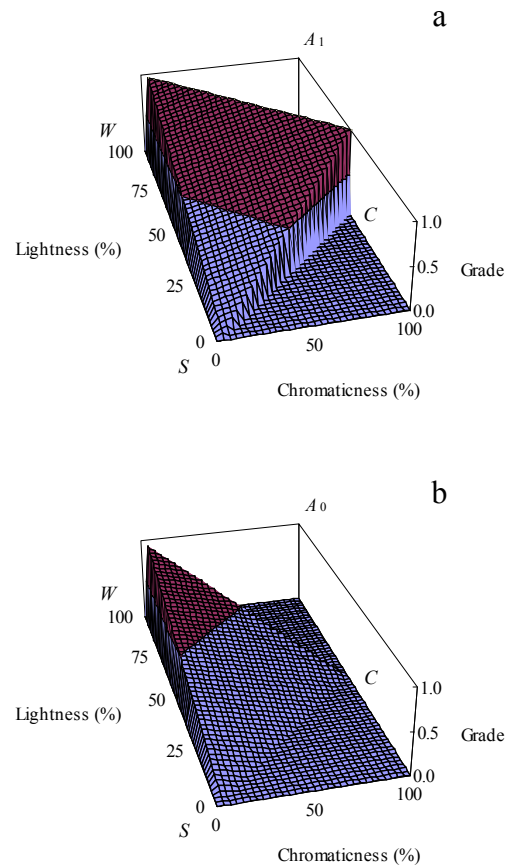


図 13 主要色に用いる非黒と白のファジィ集合

図 14a はトーントライアングル上の 21 色のファジィ入力 ($I_{46} - I_{66}$) を示している. 色名は暗い (Dark) (あるいは深い (Deep)), 明るい (Light) (あるいは薄い (Pale)), およびクロマ C (Chroma), ファジィ入力は円錐形ファジィ集合で形づくられ, そして, ファジィ集合は互いに重なり合っている. 円錐形ファジィ集合の底面 (円形) は隣の底面の中心を通るように作られている. 縦横等間隔に配置することで推論出力がどのように変化するか一目で分かるようにした.

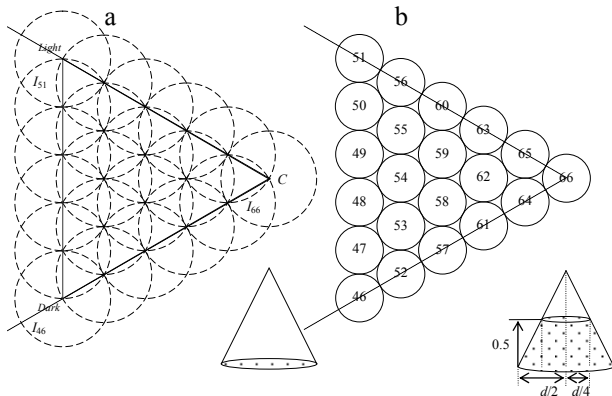


図 14 トーントライアングル上の円錐形ファジィ入力配置と 0.5 レベル集合

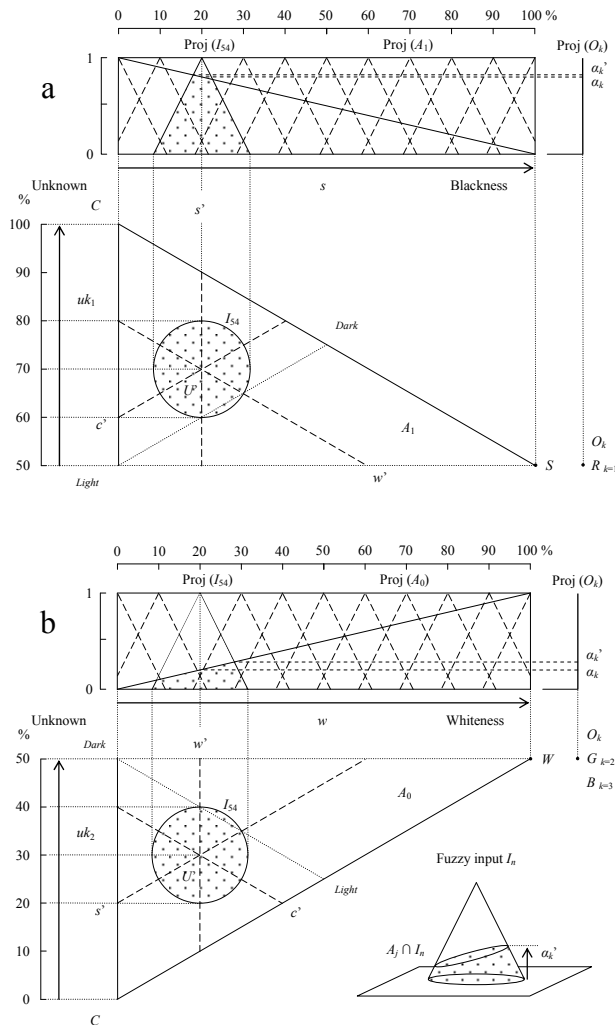


図 15 トーントライアングル上のファジィ集合（前件部）と円錐形ファジィ入力のトップビューと射影

図 14 b は a の円錐形ファジィ集合に付けられた番号を示し、この番号は 0.5 レベル集合の上

部に示されている。色名と修飾語は No.46: Dark (or Deep), No.51: Light (or Pale), No.66: C (Chroma) である²⁾。

図 15 は入力ファジィ集合 A_j (前件部) の底面をトーントライアングル (上半分あるいは下半分) として示し、66 色の円錐形ファジィ入力 (I_1 - I_{66}) の 1 色 I_{54} (No.54) が示されている。入力ファジィ集合 A_1 (Anti-black) において (図 15a 上), 右下がりの斜線は S ($\mu_1=0$) と C ($\mu_1=1$) (あるいは S ($\mu_1=0$) と W ($\mu_1=1$)) 間の射影 (直角三角形) を、 A_0 (White) において (図 15b 上), 右上がりの斜線は W ($\mu_0=1$) と C ($\mu_0=0$) (あるいは W ($\mu_0=1$) と S ($\mu_0=0$)) 間の射影を表している (表 6 と図 13 参照)。黒み Blackness 軸上 (a) の射影 $\text{Proj}(I_{54})$ は下から投影することによりできる円錐形ファジィ入力 (I_1 - I_{66}) の射影 (二等辺三角形) の 1 つである。白み Whiteness 軸上 (b) の $\text{Proj}(I_{54})$ は円錐形ファジィ入力 (I_1 - I_{66}) の射影の 1 つである。ここで、不明 Unknown 軸上 (uk_1 と uk_2) の三角形の射影 $\text{Proj}(I_{54})$ は使用しない。主要色は以下のような式となる。

非黒 (Anti-black) の入力ファジィ集合 A_1 (前件部) は次のメンバーシップ関数により特徴付けられる。

$$\mu_1(s, uk_1) = -0.01s + 1 \quad (17)$$

ここで、0.01 は射影の傾斜である (図 15a)。 uk_1 (C-W 側) は次のように制限される。

$$50 \geq uk_1 \geq \frac{S}{2} \quad (18)$$

$$50 < uk_1 \leq -\frac{S}{2} + 100 \quad (19)$$

白 (White) の入力ファジィ集合 A_0 (前件部) は次のメンバーシップ関数により特徴付けられる。

$$\mu_0(w, uk_2) = 0.01w \quad (20)$$

ここで、0.01 は射影の傾斜である (図 15b)。 uk_2 (S-C 側) は次のように制限される。

$$50 \geq uk_2 \geq \frac{W}{2} \quad (21)$$

$$50 < uk_2 \leq -\frac{W}{2} + 100 \quad (22)$$

主要色以外は以下のような式となる。

明るさ (Light) の入力ファジィ集合 $A_{0.5}$ (前件部) は次のメンバーシップ関数により特徴付けられる。

$$\mu_{0.5}(c, uk_3) = 0.01uk_3 \quad (23)$$

ここで、0.01 は射影の傾斜である。 uk_3 (W - S 側) は次のように制限される。

$$50 \geq uk_3 \geq \frac{c}{2} \quad (24)$$

$$50 < uk_3 \leq -\frac{c}{2} + 100 \quad (25)$$

明るさ (15 degrees light) の入力ファジィ集合 $A_{0.25}$ (前件部) は次のメンバーシップ関数により特徴付けられる。

$$\mu_{0.25}(uk_5, uk_4) = 0.01uk_4 \quad (26)$$

ここで、 uk_5 と uk_4 は c と uk_3 に対して S を中心に 15 度回転している (図 24d 参照)。 0.01 は uk_4 上の射影の傾斜である。 uk_3 (W - S 側) は次のように制限される。

$$50 \geq uk_3 \geq \frac{c}{2} \quad (27)$$

$$50 < uk_3 \leq -\frac{c}{2} + 100 \quad (28)$$

$$c \geq 0 \quad (29)$$

図 15a の後件部では $R_{k=1}$ であり、図 15b の後件部では $G_{k=2}$, $B_{k=3}$ であるのは色相が赤のときの一例である。

7. トーンファジィシステムの出力

あいまいな色がファジィシステムに入ると何が起ころうか。このシステムはあいまいな色彩の入力データを単一色の出力データに変換することができる。

ファジィ入力 I_n と前件部のファジィ集合 A_j の積集合は $A_j \cap I_n$ である (図 15 b 右下参照)。一致度 $\alpha_k' = \text{Height}(A_j \cap I_n)$ は積集合の高さで決まる。もし入力がかリブであれば、 α_k' はダッシュのない α_k と書くことにする。図 15a の R は赤 ($k=1$) であり、図 15b の G あるいは B は緑 ($k=2$) あるいは青 ($k=3$) である。射影 $\text{Proj}(O_k)$ は頂点 R , G , あるいは B における後件部のクリブ集合 O_k の射影である (図 12b 参照)。たとえば、No.54 の円錐形ファジィ入力は中心座標が $U' = (c', w', s') = (60, 20, 20)$, ここで単位は%である。円錐底面の直径は $d=23.0\%$ であり、あいまいさを表している。

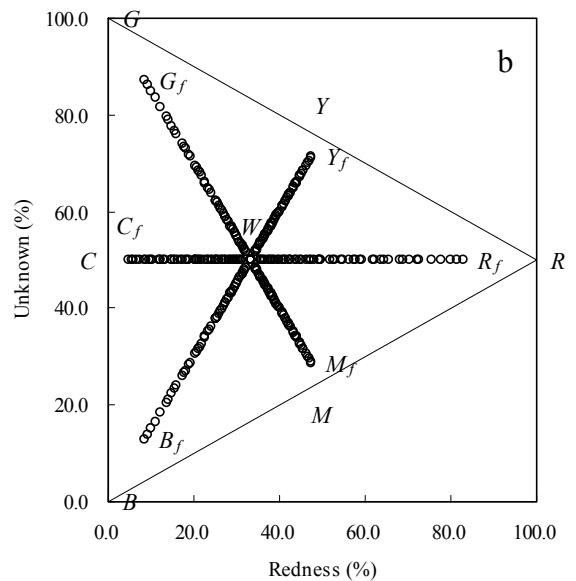
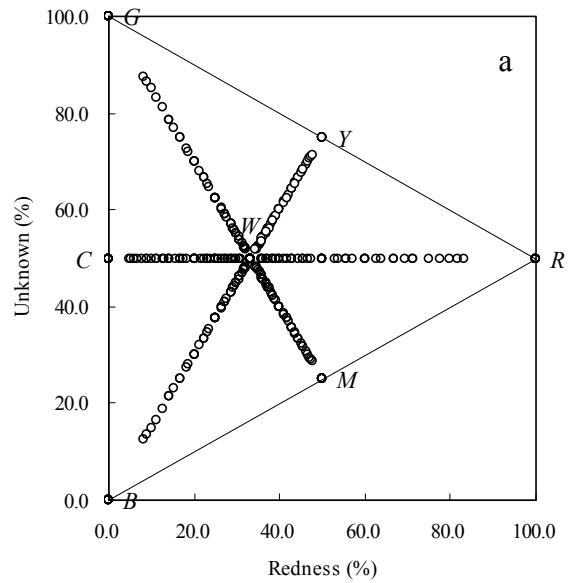


図 16 主要色のファジィ推論結果

図 16 の推論結果が三角形の中線上にできるのは表 5 で示すように 3 つの要素を 2 つのメンバーシップ関数で算出し、2 つの要素を 1 つのメンバーシップ関数で受けもっているため、2 つの矢印 (後件部) は高さが必ず同じになるのである。

図 16 はデータ (r_o', uk_o') から得られる赤み Redness 軸上 r_o と不明 Unknown 軸上 uk_o の関係を示している。図 16a の \circ はクリブ入力に対する出力を示している。図 16a は図 12c に対応している。クリブ入力に対する推論結果は

RGB カラートライアングルの中央に集中する。この集中効果はファジィ集合の形状（三角錐）と重心の計算に依存することが分かる。すなわち、三角錐のファジィ集合（前件部）へのクリस्प入力に対する集中効果は以前の研究結果と同じである⁵⁾。

図 16b は赤み Redness 軸上 r_0 と不明 Unknown 軸上 uk_0 の関係を示している。○は図 12c に対応したファジィ入力に対する出力を示している。ファジィ入力に対する推論結果も同様に RGB カラートライアングルの中央に集中している。ただし、図 16a と異なり三角形の各頂点、各辺上に○は存在しない。図 16a のクリस्प入力に対する推論結果は図 16b のファジィ入力の座標と異なる。あいまいな色彩を入力することで、このシステムはクリस्पな色彩をカラートライアングル上に表すことができる。

図 17 と図 18 は入力としての色み (Chromatic-ness), 白み (Whiteness), 黒み (Blackness) の関係と出力としての赤み (Redness) を示している。これはクリस्प入力 (図 17) とファジィ入力 (図 18) に対する出力である (入出力関係)。ここで、2つの形状を比較してみることにする。

図 17a と図 18a は色み (Chromaticness, ここでは Redness の入力) と赤み (Redness の推論出力) の関係で、色み (Chromaticness) の増加にともない赤み (Redness) はクリस्प入力に対して 100%まで増えている (図 17a 括弧部分)。しかし、ファジィ入力に対しては約 83%まで増加し葉形となっている (図 18a)。逆に色み (Chromaticness) が減少すると赤み (Redness) は約 33% (無彩色 $W-S$) に収束する。図 17b と図 18b は白み (Whiteness) と赤み (Redness) の関係を示し、白み (Whiteness) の増加にともない赤み (Redness) は約 33% (W) に収束する。

図 17b のクリस्प入力において $w=0$ のとき括弧の付いた 9色はおもしろい出力を示す。図 18b のように横軸上に並びそうであるが、暗い Dark などは軸上中程に存在せず、この 9色は“R” (100%) の座標に重なっている。“R”の座標 (○) は他の 9色を含んでいるのである。

図 17c と図 18c は黒み (Blackness) と赤み (Redness) の関係を示している。クリस्प入力に対する出力は最大 100%を示すが、ファジィ入力に対しては 83%である。

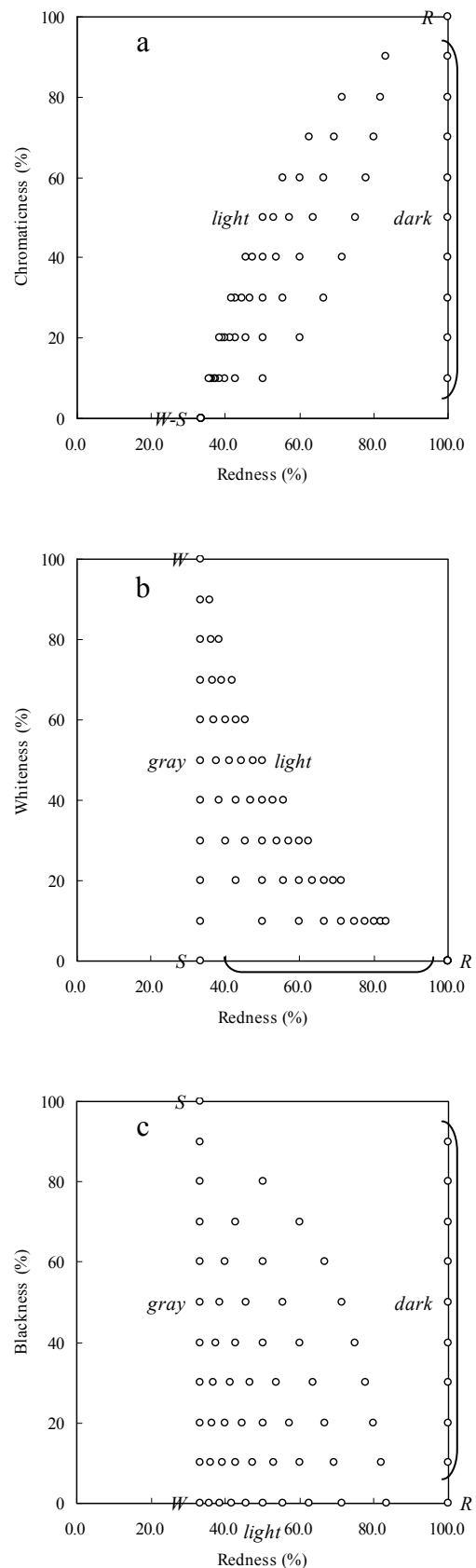


図 17 クリस्प入力による入出力関係

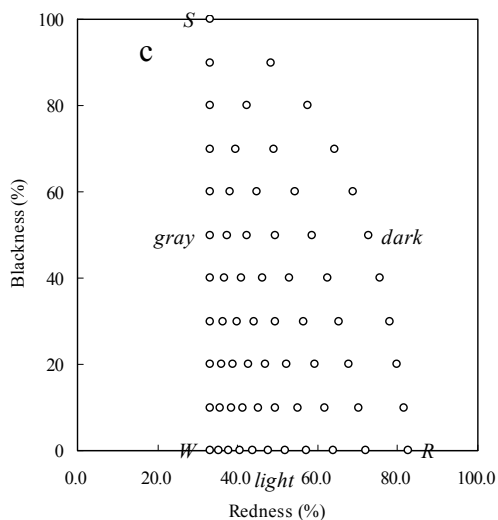
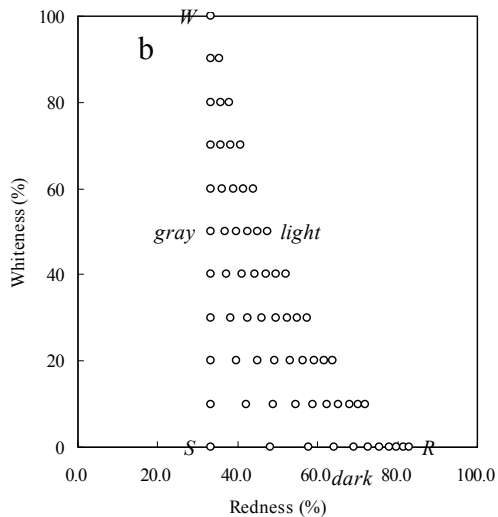
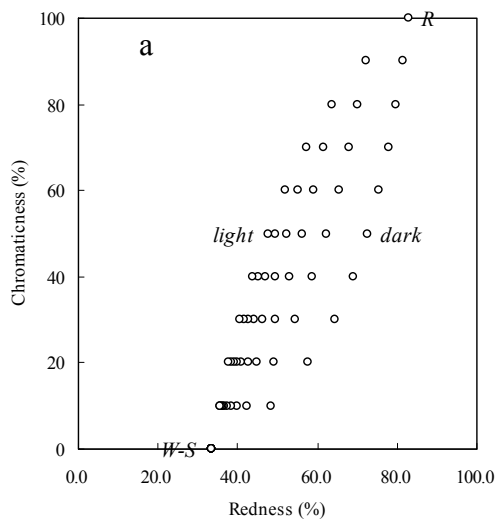


図 18 ファジィ入力による入出力関係

図 18 の包絡曲線 (a: *R-dark-W-S*, *R-light-W-S*, b: *W-light-R*, c: *S-dark-R*) は良く似ている. ここで, 白み (Whiteness) (b) と黒み (Blackness) (c) が異なった特徴を示すのは, ファジィ集合の形状によっているためである.

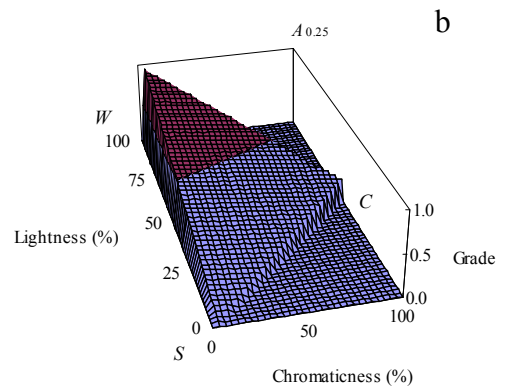
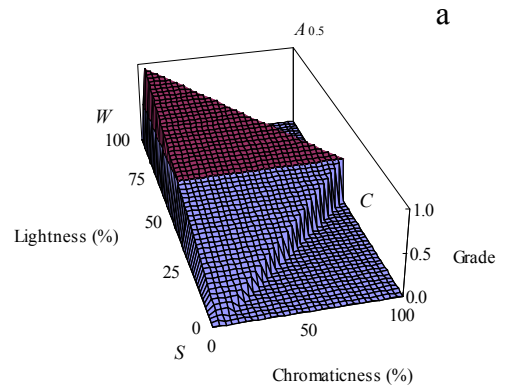


図 19 主要色以外に用いる明るさのファジィ集合

ファジィ入力による赤み (Redness) の出力は自然な形を示す (図 18). しかし, これらとは対照的にクリップ入力による出力, 特に 9 色だけは不自然な形を示している (図 17). これは *S* から *C* までのメンバーシップ値 $\mu_0=0$ が原因である (図 13 b の A_0 参照).

図 19 は入力ファジィ集合 $A_{0.5}$ (Light) と $A_{0.25}$ (15 degrees light) を示している. 明るさ (Light) のファジィ集合は明るみの増加に依存してグレードが上がることを意味している. また, 明るさ (15 degrees light) は三角形を *S* 中心に 15 度回転することによりできる明るみの増加によってグレードが上がることを意味している.

表 7 は主要色以外のファジィルールを示している. ここで 3 つのルールは 2 つあるいは 3 つのファジィ集合で構成されている. 表 5 と異なる

ることに注意してほしい。

表6で最大クロマ C 上のメンバーシップ値は色相の RGB 成分によっているので、たとえば、表7の黄赤 (Orange) では (1, 0.5, 0) の成分をもち (付録の図23参照)、ファジィルールの前件部 ($A_1, A_{0.5}, A_0$) に対応している。赤成分 R はファジィ集合 A_1 (Anti-black) で、緑成分 G はファジィ集合 $A_{0.5}$ (Light) で、青成分 B はファジィ集合 A_0 (White) で表せばよいことになる。また、黄緑 (Lime) では (0.5, 1, 0) の成分をもち、赤成分 R と緑成分 G が逆になる。

表7 主要色以外のファジィルール

Hue color	Input fuzzy set			Output crisp set		
	R^1	R^2	R^3	R^1	R^2	R^3
Orange	A_1	$A_{0.5}$	A_0	O_1	O_2	O_3
Lime	$A_{0.5}$	A_1	A_0	O_1	O_2	O_3
Brown	A_1	$A_{0.25}$	$A_{0.25}$	O_1	O_2	O_3

図20のように模式的に表すと、ファジィ集合 A_1 (Anti-black) は主な色彩、つまり頂点 C においてメンバーシップ値 μ_1 は必ず1であり、それ以外の補助的な色彩のファジィ集合 A_0 (White) は頂点 C においてメンバーシップ値 μ_0 は0である (表6)。また、 $A_{0.5}$ (Light) は0.5, $A_{0.25}$ (15 degrees light) は0.25である (表7)。いくつかの入力ファジィ集合 ($A_1, A_{0.5}, A_{0.25}, A_0$) を図20aのように重ねて表すと、最大クロマ C 上のメンバーシップ値の大きさにより、入力ファジィ集合の形が決まる。

付録の図24は入力ファジィ集合のトップビューと射影の関係を示している。ファジィ集合 ($A_1, A_0, A_{0.5}, A_{0.25}$) と色み (Chromaticness) と明るみ (Lightness) との関係が明らかとなる。入力ファジィ集合 (斜面) の最急降下傾斜を射影として見るができる。これを一致度の計算に用いている。図20bのように直接積集合を計算することもできる。

一致度に差がでるのは頂点 C に近いところであり、色みが増すと RGB カラー三角形上で各重みのバランスが崩れ三角形の頂点あるいは辺に寄るのである。

8. おわりに

スウェーデンのナチュラルカラーシステム (NCS: Natural Color System) で、色相を指定す

るのにファジィ集合 (Fuzzy set) に似た表現が使われている³⁾。また、NCS カラー三角形上でファジィ理論的な手法を用いることによりあいまいさをもつトーン表現 (Tone expression) を示す手法が報告されている。前の研究^{5),6)}の問題点は加法混色の考え方が使われていないので、主観によるクロマ、白、および黒のファジィ集合を用いたファジィシステムとなっていることにある。

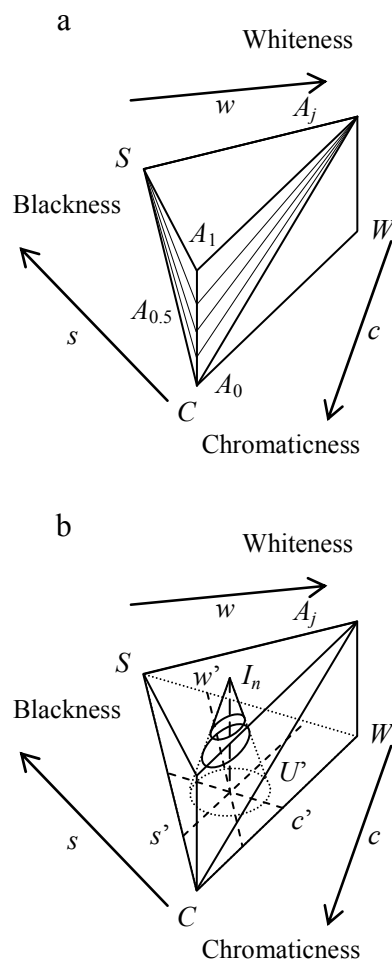


図20 入力ファジィ集合の差異

本稿では、色彩への応用としてカラー三角形上のクリスプ出力を引き出すファジィシステムを提案した。このようなファジィシステムはあいまいな色彩入力としての円錐形ファジィ集合の射影からメンバーシップのグレードを簡単に示すことができる。RGB カラー三角形は不明 Unknown 軸方向に属性をもっていないが、各々のグレードをもつ3つのパラメータ (重み) があいまいな色彩を示し、

単一色としての重心で示すことができる。

ここで紹介したファジィシステムは、カラートライアングル（前件部）から新しいカラートライアングル（後件部）へ写像をすることを考え、入出力関係を調べた。また、トーントライアングル（前件部）からカラートライアングル（後件部）への写像を考えることで新しい結果を示した。特にトーンシステムでクリップ入力に対してより、ファジィ入力に対して自然な出力をする。つまり、突然の変異がないのである。

現在、あいまいさを処理することができるのはファジィ理論だけである。主観でシステムを構築することができる点にファジィ理論のよさがあるといえる。ここで取り扱ったシステムは加法混色に基づくことにより、前半で述べたRGBカラートライアングル上の三角錐台のような入力ファジィ集合の斜面（式（10））に使用されている。しかし、主観的な部分はほんの僅かである。本来の特徴がファジィシステムに表現できれば主観を用いることもなく誰もが使える客観的なシステムとなるのである。

将来、これらのシステムは建物、芸術作品、被服、工業製品などの重要な色彩情報（たとえば、人が受ける色彩のあいまいさ^{9), 11)}や色彩のわずかな変化）を確かめるのに役立つことになると考えている。

付録

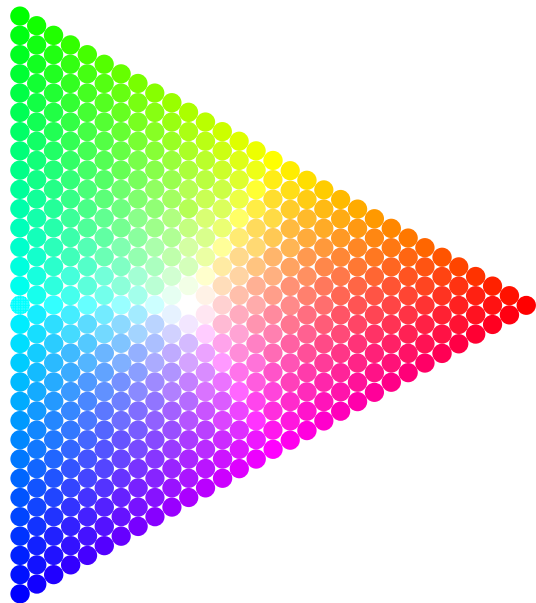


図21 496色のカラートライアングル
（詳細図）

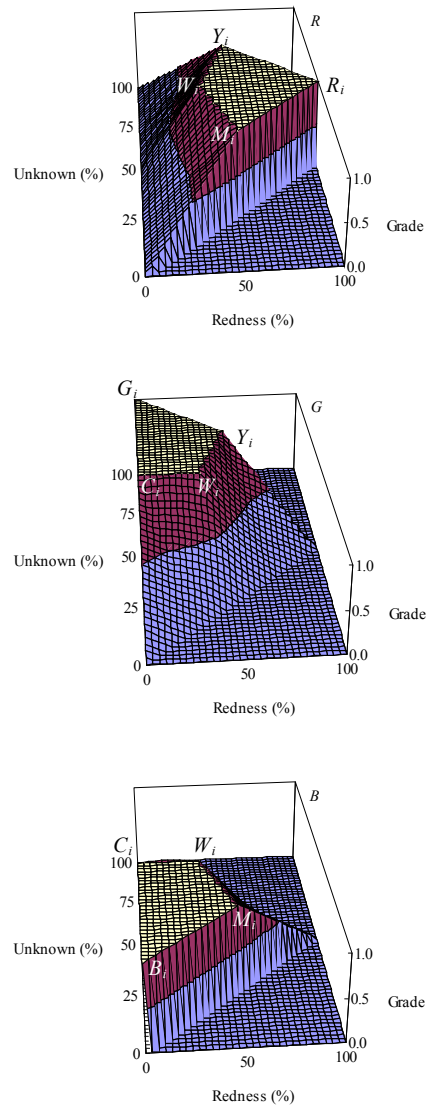


図22 赤と緑と青の各ファジィ集合



図23 黄赤の各成分

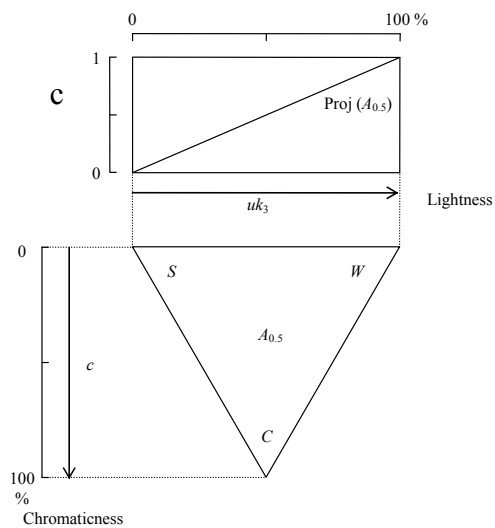
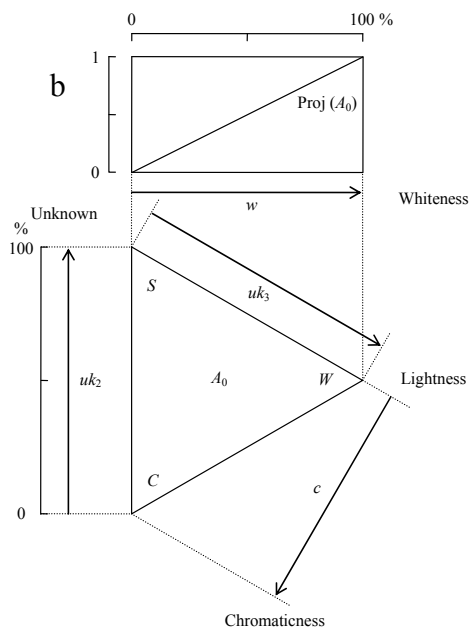
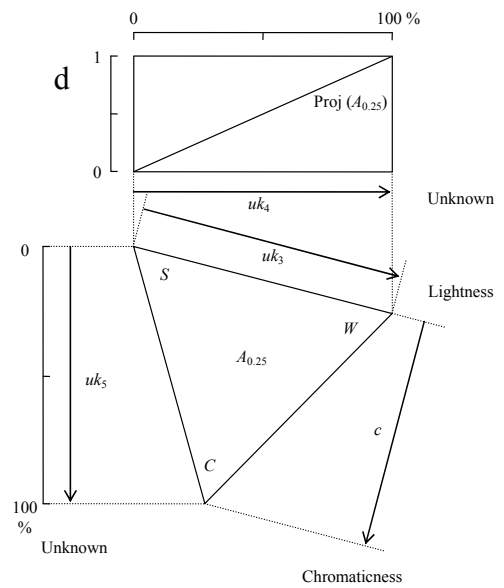
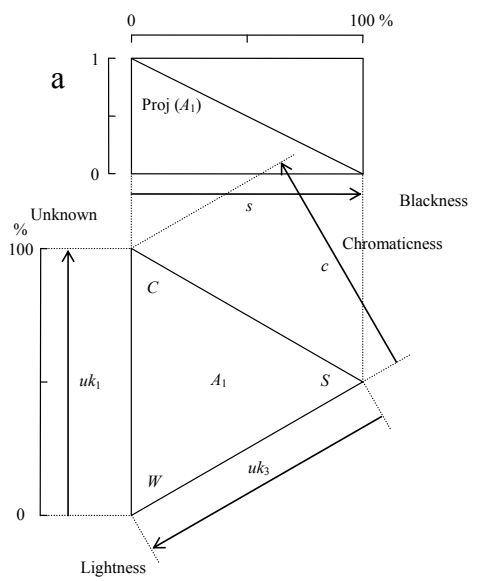
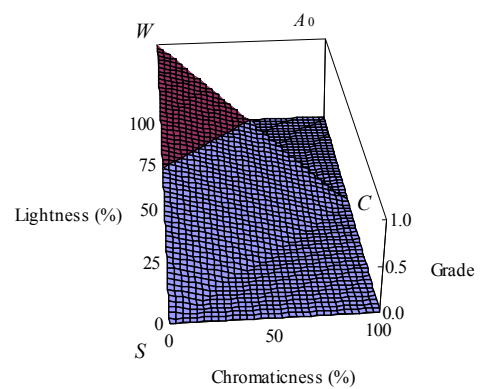
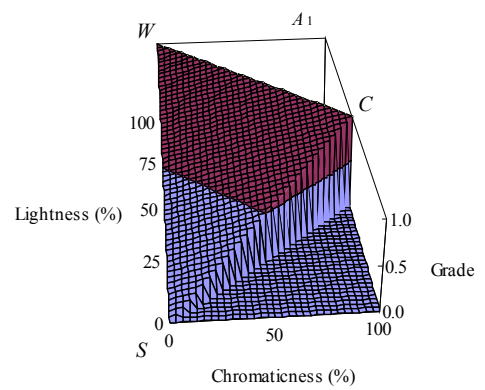


図 24 トーントライアングル上のファジィ集合（前件部）のトップビューと射影



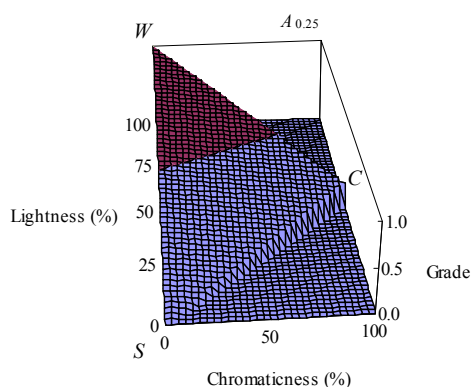
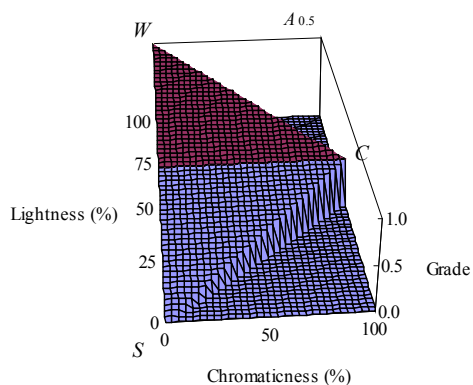


図25 トーンの各ファジィ集合

参考文献

- 1) 向殿政男, ファジィのはなし, 日刊工業新聞社, 1994.
- 2) 川上元郎, 色のおはなし, 日本規格協会, 1992.
- 3) L. Sivik, Color systems for cognitive research. In: C. L Hardin, and L Maffi, (eds.): Color categories in thought and language. Cambridge University Press, New York, pp.163-193, 1997.
- 4) R. J. D. Tilley, Colour and optical properties of materials, An exploration of the relationship between light, the optical properties of materials and colour, John Wiley & Sons, New York, 1999.
- 5) N. Sugano, Fuzzy natural color system using membership function of triangular pyramid on color triangle. Biomedical Soft Computing and Human Sciences, Vol. 10, No. 1, pp.1-10, Dec. 2004.

- 6) N. Sugano, Fuzzy set theoretical approach to achromatic relevant color on the natural color system. International Journal of Innovative Computing, Information and Control, Vol. 2, No. 1, pp.193-203, Feb. 2006.
- 7) N. Sugano, Fuzzy set theoretical approach to the RGB color triangle, In: Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems (B. Gabrys, R. J. Howlett, and L. C. Jain, Eds.), Lecture Notes in Computer Science, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, Part III, LNAI Vol.4253, pp.948-955, Oct. 2006.
- 8) N. Sugano, Fuzzy set theoretical approach to the RGB triangular system, Journal of Japan Society for Fuzzy Theory and Intelligent Informatics, Vol.19, No.1, pp.31-40, Feb. 2007.
- 9) N. Sugano, Y. Chiba, Fuzzy set theoretical analysis of the membership values on the RGB color triangle, Proc. of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, pp.841-846, Oct. 2007.
- 10) N. Sugano, Fuzzy set theoretical approach to the RGB tone triangular system, Proc. of the IEEE Conference on Soft Computing in Industrial Applications, pp.72-77, Jun. 2008.
- 11) N. Sugano, N. Ashizawa, and H. Ono, Fuzzy set theoretical analysis of human membership values on the RGB tone triangle, Proc. of Joint 4th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 9th International Symposium on advanced Intelligent Systems, pp.1921-1926, Sep. 2008.
- 12) 篠田博之, 藤枝一郎, 色彩工学入門, 定量的な色の理解と活用, 森北出版, 2007.

2009年2月12日原稿受付
Received, February 12, 2009