

特集 白

「白さ」の評価

Estimation of Whiteness

内田 洋子

Hiroko Uchida

倉敷市立短期大学

Kurashiki City College

1. はじめに

「砂糖と塩ではどちらが白いですか？」と尋ねたら、あなたはどちらと答えるだろうか。実際、実物を前にしたとしても、どちらがより白いか、迷うかも知れない。仕事の関係で白布や白毛糸を扱うことは多いけれども、メーカーによって白さが微妙に異なり、他社の製品で不足を補うことはできない。つまり、それ程さまざまな白があり、最も白という白さの頂点が確立していないことを示している。

表1は天然漂白剤について愛媛大学被服学研究室¹⁾で発表されたものの抜粋である。いにしへの時代から天然資源や自然現象を利用しながら、白を得るためにかなり苦勞をしてきたようである。より白いものに対する果てしない願望はごく最近まで続いていたと言っても過言ではない。

白さの度合いを白色度というが、白色度の飛躍的な進歩は2つの発見によるところが大きい。その1つは化学的漂白剤である。通称、晒し粉は1799年にグラスゴーのC.Tennantにより初めて作られた。今日の化学的漂白剤は酸化漂白剤と還元漂白剤に大別されるが、いずれも原料の着色を無くし、反射率を高めて無彩色に近づけようとするものである。図1の曲線1は自然白色物、曲線2は化学的漂白剤を用いた白色物質の分光放射輝度率分布である。この図からも判るように、漂白したものは短波長領域の放射輝度率がまだ低く、

表1 天然漂白剤の歴史 (田辺1より抜粋)

漂白物質	利用地	年代
漂白土	エジプト	B.C.3000
灰汁	メソポタミア	B.C.3000
硫黄	ローマ	A.D.100
鶯の糞	日本	A.D.900
硝石	日本	A.D.1600
レモン、タマリンド ライム、マンゴー	インド	A.D.1600
滑石、石膏	日本	A.D.1700
火山灰	日本	A.D.1800
カタバミ	日本	?
太陽光、海岸、水 草原、川岸、雪原	世界	

外観的に黄色っぽく感ずる。そこで、ごく少量の青色や紫色の染料を加えて白く見せようとした青み付けと呼ばれる加工処理が行われた。しかし、図1の曲線3にあるように、可視波長全域の分光放射輝度率が低下するため、全体的にくすんだ青白さになる。

2つ目は蛍光増白剤である。これは1929年にクライスによって報告され、1940年頃に実用化された。蛍光増白物質に光があたると、紫外線エネルギーの一部が吸収され、高いレベルに転移したエネルギーが再び定常のエネルギーレベルに落ちたとき、可視部の青い光を蛍光として放射する。これが物質の黄色っぽい反射

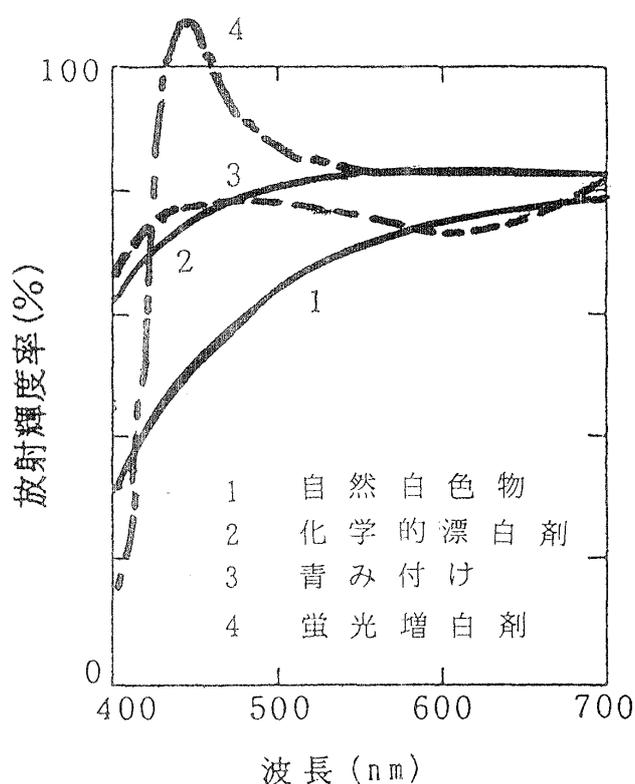


図1 白色物質の分光放射輝度率

光に加えられ、雪のような白を得ることができる。図1の曲線4は蛍光増白布の分光放射輝度率を表したものである。蛍光増白物質は酸化マグネシウムや硫酸バリウムの白色板より白く知覚され、それまでの完全拡散反射面を最も白いとす白色概念を覆すものとなった。

さて、白さの評価には視感評価方法と測色的評価方法がある。紙、布、塗料、小麦粉、砂糖等々、白さを重要視する産業界では長い年月の間、それぞれ独自の方法で白色度の評価を行ってきた。しかし、色を識別する専門家の減少、不織布のように産業間に跨った製品の登場、さらには測定機器の向上に伴い、白色度を容易に定量化し、業界問わずに利用できる白色度式の誕生が望まれていた。白色度式で最も重要なことは、得られた結果が視感評価と相対的に一致することである。1935年に紙や綿の白さを評価する白色度式が発表されて以来、沢山の研究者により多種の白色度式が誕生した。そこでそれらの特徴、白さの条件、評価方法の現状、新白色度式の提案などについて報告する。

2. 白色度式の種類

白色度式を分類すると次のタイプに分かれる。

2.1 Yによる評価

視感反射率Yが100%に近いほど白く見えることから、Y値をそのまま白色度指数としたものである²⁾。

$$W = Y \quad (式1)$$

2.2 分光放射輝度率による評価

2.2.1 一波長法

黄色っぽい白より青っぽい白の方がより白く知覚される。図1曲線2のように、化学的漂白物質の分光放射輝度率は青色領域の波長以外はほぼ平らである。特に主波長が類似しているときには、明度差より純度差の方が知覚されやすい。そこで、HunterのMultipurposeといった刺激値直読法の光電色彩計で測定し、B値を白色度指数としたものである。白色度式は^{3)~9)}、

$$W = B \quad (式2)$$

2.2.2 二波長法

分光放射輝度率が曲線3(図1)のような白色物質の場合には、光電色彩計の青系の測定値だけでは評価しにくい。そこで、他の受光器の測定値も含めて白色度を評価する方法である。代表的な白色度式は^{10)~12)}、

$$W = 4 B_{430} - 3 G_{560} \quad (式3)$$

2.2.3 三波長法

Hunterの光電色彩計の測定値B, G, Aを用いて白色度を評価する方法。例えば¹³⁾、

$$W = G - A + B \quad (式4)$$

2.3 明度と純度による評価

視感反射率が高く、純度が低い方が白という理由で作られた白色度評価方法である。例えば^{14), 15)}、

$$W = L - 3b + 3a \quad (式5)$$

ここで、L, a, bはHunter L A B色空間における明度関数と色度座標である。

2.4 色差による評価

完全拡散反射面に近いほど白という考えから、色差で評価しようとしたものである。1935年に考案されたJuddの白色度式はこのタイプのものである¹⁶⁾。

$$W = 1 - \Delta E_{ws} / \Delta E_{wb} \quad (式6)$$

ここで、 ΔE_{ws} はMgOの標準白色面と試料の色差、 ΔE_{wb} はMgO面と理想的な黒との色差である。

2.5 蛍光輝度による白色度式

蛍光増白物質ではわずかに青っぽい白や紫っぽい白のほうがより白く感ずる。つまり、純度が多少高い方が白く知覚される。そこで、ある試料のY値が同じ色度座標の最明色の Y_{MCA} を超えたとき、その差 ΔY_{MCA} (蛍光輝度)の働きが白色評価に大きく影響を及ぼすという考えに基づいて作られた式である¹⁷⁾。

$$W = 9.53 (\Delta Y_{MCA} + 19.19) \quad (式7)$$

ここで、 ΔY_{MCA} は $0.9 \{ [(1-x-y) / 1.089 y] Y - 100 \} / 100$ Y である。

2.6 色好みに対応する評価方法

2.6.1 Ganz の白色度式¹⁸⁾

白色物質の視感評価実験を行うと、被験者は僅かに青っぽい白を最も白と感じる（ニュートラル好み）、僅かに赤っぽい白を最も白とする（赤好み）、僅かに緑っぽい白を最も白とする（緑好み）にグループ分けされる。これを色好み（preferred white）と呼ぶ。ここで注意しておきたいのは、蛍光増白物質はいずれも、色度図上、完全拡散反射面より青色方向の色度点を持つ。従って、大ざっぱに言えばどれも青っぽい白であるが、その中で、少し赤っぽい（正確には赤紫といえる）ものや、緑っぽい（これも青緑の方が正確）ものを最も白と知覚する人が無視できないくらい存在するということである。Ganz はそこに注目し、それぞれの色好みに対応できる白色度式を提案した。まず、ニュートラル好みの被験者の白色度の順位付けが色度図上、 $\lambda_0 = 470\text{nm}$ の主波長と一致することから、これを基準線としてこの直線とのズレの角度 ϕ が色好みを特性づけるとした。赤好みは約 90° 、緑好みは約 -90° の方向へ角度 ϕ がズレる。白色度式は、

$$W = Y + a(x_n - x) + b(y_n - y) \quad (式8)$$

x , y , x_n , y_n は試料及び完全拡散版斜面の色度座標、 a , b は色好みの係数でニュートラル好みは $a = 800$, $b = 1700$ 、赤好みは $a = -800$, $b = 3000$ 、緑好みは $a = 1700$, $b = 900$ 。ただし、白色度指数 W が $40 < W < 5Y - 280$ 、Tint 指数 T の範囲が $T < \pm 6$ の適用制限があり、 T は次式で求める。

$$T = c(x_n - x) + d(y_n - y)$$

c , d は XYZ 表色系では $c = 1000$, $d = -700$ である ($X_{10} Y_{10} Z_{10}$ 表色系では $c = 900$, $d = -800$)。

この白色度式は a , b の係数を変えることで個々の被験者の色好みに適した白色度式を作ることができる。ちなみに、筆者が以前行った実験の結果、26名の被験者の平均の最適係数は $a = -2900$, $b = 2900$ の赤好みであった¹⁹⁾。

2.6.2 CIE 白色度式²⁰⁾

非常に多くの白色度式が提案されてきたが、いずれもユーザーを満足させることはできず、白さを容易に評価したいという産業界からの根強い要望が続いた。CIE 測色技術委員会では1967年にWhiteness Subcommitteeを組織し、白色度の共同研究を開始し

た。そして Ganz の白色度式 (式7) を修正したものを、CIE 白色度式として、1986年のCIE Publicationに勧告した。以下にCIE白色度式を示す。

$$W = Y + 800(x_n - x) + 1700(y_n - y)$$

$$W_{10} = Y_{10} + 800(x_{n,10} - x_{10}) + 1700(y_{n,10} - y_{10}) \quad (式9)$$

W , W_{10} , Y , Y_{10} , x, y , x_{10} , y_{10} , x_n , y_n , $x_{n,10}$, $y_{n,10}$: 試料の XYZ 表色系及び $X_{10} Y_{10} Z_{10}$ 表色系における白色度指数、三刺激値の Y 値、色度座標、完全拡散反射面の色度座標である。

Tint 指数 T_w または $T_{w,10}$ は次式で計算する。

$$T_w = 1000(x_n - x) - 650(y_n - y)$$

$$T_{w,10} = 900(x_{n,10} - x_{10}) - 650(y_{n,10} - y_{10})$$

但し、 $40 < W$ または $W_{10} < 5Y - 280$ または $5Y_{10} - 280$, T_w または $T_{w,10} < \pm 3.0$ の適用制限がある。

3. 白色度式と視感評価

3.1 各種白色度式と視感評価

前項の白色度式と視感評価の関係、白色度式間の関係などを調査すると、式1は可視波長全域の分光放射輝度率が平らな曲線を持つ白色物質に対してはよい結果が得られる。しかし僅かに色を有する白色物質には、その効果は無視するので、完全な方法とはいえない。とはいえ、1987年にCIE白色度式をJ1Sとして採用するにあたり、日本色彩学会が設置した白色度表示方法研究委員会（以下、白色度委）の実験結果では、白布試料における視感評価は式1に最も相関が良く²¹⁾、白さの評価に Y はかなり重要であることが判る。

式6の色差タイプは沢山提案されているが、いずれも完全拡散反射面を最高の白とするので、視感的に黄色っぽい白の評価が高く、視感評価と一致しない。

式2, 3, 4, 5, 7は互いに相関がよく、同タイプの白色度式である。より青っぽい白を高く評価するので、蛍光増白物質には適しているように思えるが、その止まるところが無いという欠点を持つ。また、他の色相を持つ白色物質を評価しないので、視感評価と一致しない。

式8, 9は係数がニュートラル好みの場合には、式2系と同じタイプといえる。しかし、 $5Y - 280$ という適用制限を設けているため、青色が強い物は白と見なさないように工夫されている。また式8において、係数が赤好み、緑好みの場合にはニュートラル好みと評価に差が無く、係数に工夫が必要である。

3.2 CIE白色度式と視感評価

図2の(1)～(2)は筆者¹⁹⁾と白色度委²¹⁾が視感評価実験に用いた試料の色度図である。図中、斜線は基準線(主波長 $\lambda_d = 466\text{nm}$)、破線はTint T_w の適用制限の範囲を示す。(1)は49白布試料で被験者26名であった。(2)の▲, △印は18白布試料(△は5Y-280の適用制限外試料), ●, ○印は29白紙試料(○も同上)で、被験者は74名であった。これらの視感評価とCIE白色度式の相関は(1)の場合、0.256(Spearman), (2)の18白布試料では $r = -0.768$ ($t_0 = -4.79 < t(16, 0.05) = 2.12$), 29白紙試料では $r = 0.399$ ($t_0 = 2.26 < t(27, 0.01) = 2.77$)で、いずれも相関していない。ところが白紙試料において○印の適用制限外の試料を除くと、視感評価との相関は $r = 0.909$ ($t_0 = 10.29 < t(22, 0.01) = 2.07$)となり高相関になる。従って、特定の試料群に対して、CIE白色度式は視感評価と一致するといえる。

(1)の試料の特徴は赤、青、緑、黄色の様々な色相を僅かに有する試料が、色度図上のかなり狭いところにひしめき合い、しかも2つの適用制限を越えたものも含んでいる。(2)の白布試料は5Y₁₀-280の適用制限を越える試料を含み、色度図上で比較的近い場所の色度点を有する試料群である。他方、白紙試料は基準線に沿い、しかも5Y₁₀-280の適用制限内の試料は基準線より赤側の試料群、制限外の試料は緑側の試料ときちり分かれている。そして制限外の試料を取り除くと視感評価との相関が良くなる。

以上のことから、CIE白色度式は試料間の色度座標によるTint T_w の幅が小さく、Wが5Y-280以内の試料群に対しては視感評価と良く一致するといえる。つまり、同系統の色や蛍光性を有する試料群に対しては有用であるが、様々な色相や白色度指数Wが5Y-280以上の試料群には用いられないということである。このCIE白色度式の考案者であるGanzがTint Tの適用制限を $T < \pm 6.0$ にしておいたものを、 $T_w < \pm 3.0$ にせざるをえなかったのは、ここに原因があるからに他ならない。このことはCIE白色度式が式2系と同じタイプであることを意味する。しかし、それでもなおかつこの式が国際的に認められているのは、それまでにない利点を持っているからに他ならない。

4. 白さの因子

前述した3つの視感実験の結果を主成分分析したところ、Tint T_w , Y, 純度, 蛍光性の4因子が抽出でき

た²²⁾。そこでそれぞれについて考えてみたい。

4.1 明度

まず、白色物質は必ず明度が高い。しかし、明度が高いだけでは黄色っぽい白に見える。明度の高い黄色っぽい白より、明度が少し低くても青っぽい白の方がより白く知覚される。従って、ヒトが最も白いと感ずる白は完全拡散反射面の色度点より青色領域の色度点を持つことになる。

4.2 頂点の白

さまざまな視感実験の結果、個人個人の最高白色色度点異なるわけであるから、最も白いとすると色度点を決定することは不可能である。しかし、一点ではないけれども色度図上、ある幅を持った領域を最高白色度領域と考えることができる。CIEが提唱した主波長 $\lambda_d = 466\text{nm}$ の基準線は、その最高白色領域の中を通る線といえる。

4.2 純度

純度が高くなれば、白から青に知覚される。ここでは同じ色度座標であっても明度が高ければ白に見えるが、明度が低くなると青に知覚されることを考慮する必要がある。CIEの適用制限 $40 < W < 5Y - 280$ は試料の視感反射率を制限するばかりでなく、色度図上の純度方向における白色領域の限界点も決める。これが他の白色度式と異なり、優れている点である。問題は、視感反射率が1高くなると最高白色度指数は5ポイント増加するため、低明度試料には厳しい制限となる。例えば、図2(1)の試料の視感実験で、適用制限外となった試料に視感順位1位をはじめとかなり上位の試料が含まれていることから、適用制限が厳しすぎるように思われる。さて、図3はYが81～89の場合の、基準線上における最高白色度指数の色度点を示したものである。CIEではこの色度点より一歩でも純度が高いものは、白として認めていない。最高白色度の隣の色度座標を持つ試料が白でないというのは極端で、段階的に白色度評価が減少していく方法が必要となる。

4.3 Tint

個々の被験者の色好みが生まれるのは、先天的かつ後天的な要因の両者によるものと推測される。図4はCIE白色度式の等白色度線を示したものである。Yが70～100までを10間隔にしている。等白色度線は基準線にほぼ垂直である。同じ垂直線上の色度点を持つ試料群はCIE白色度式ではすべて同じ白色度指数となる。ところが視感評価では、赤好みの被験者は赤側から緑側に、一方、緑好みの被験者はその逆の評価をす

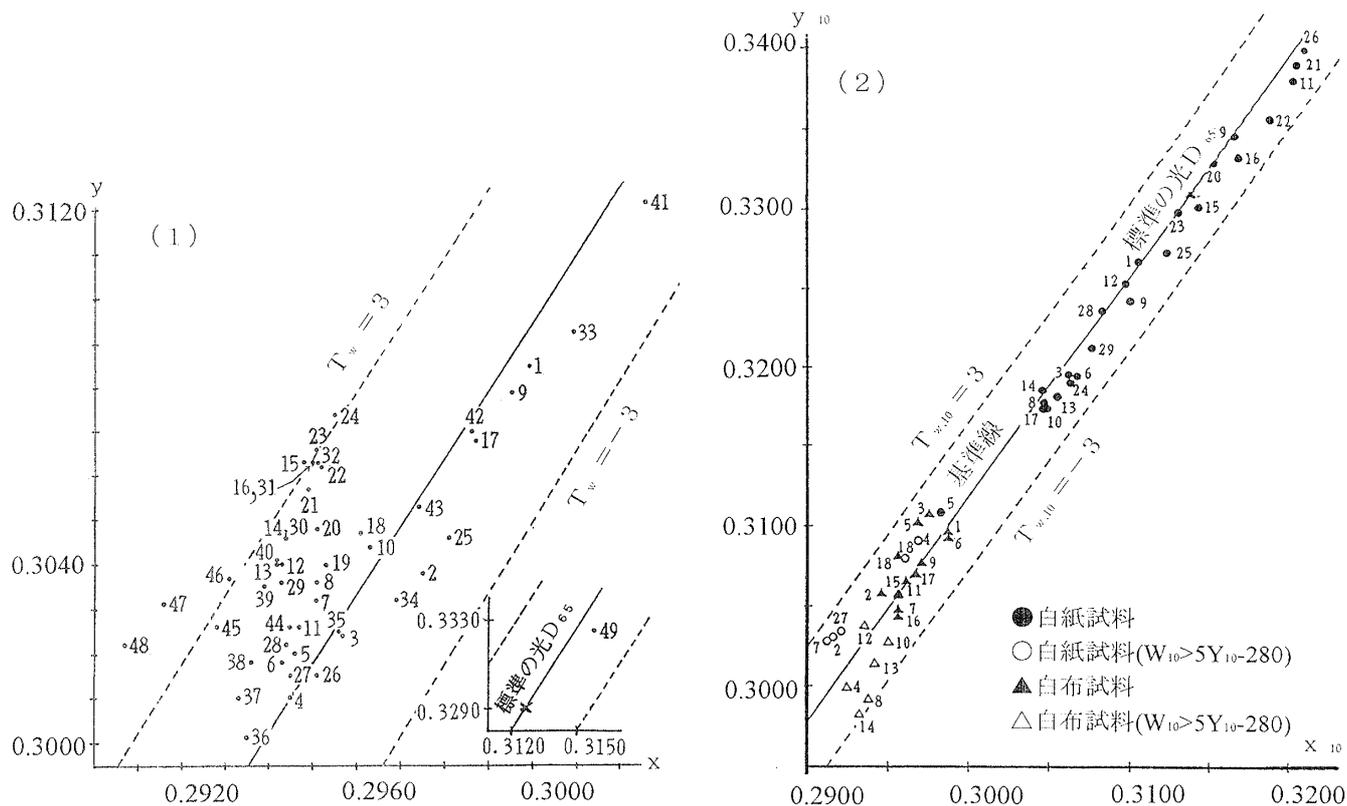


図2 試料の色度数

る。CIE 白色度式が視感評価と一致しない原因の多くは等白色度線がこのような形をしているためといえる。しかも $T_w = \pm 3$ (破線) より外にある試料を白色として認めないのも実用的でない。Tint 方向に対しても段階的に白色度評価が減少させる必要がある。

5. 修正CIE白色度式²³⁾

5.1 修正CIE白色度式の提案

CIE 白色度式はかなりよく考えられた式である。あとは Tint と純度方向に対して段階的に白色度評価が減少する方法を考えればよい。

われわれは Tint 方向に対してはごく小さい色差であっても識別できるのに対し、純度方向の方が識別能力はやや劣る。従って、基準線を長軸、Tint 方向に短軸を取る細長い楕円体が等白色度線になるような式を考えればよい。筆者が考えた白色度式を次に紹介する。

まず、CIE 白色度式において、 $5Y_{10} - 275$ で計算される最高白色度指数を基準点とし、CIE 白色度指数 $W_{CIE,10}$ が $5Y_{10} - 275$ より小さい場合を基準点内試料、大きい場合を基準点外試料とする。

(1) 基準点内試料

Tint $T_{w,10}$ が基準線から離れるほど白色度指数が減少するように重み付けをする。

$$W_{10} = W_{CIE,10} - 2 (T_{w,10})^2$$

(2) 基準点外試料

Y_{10} が 100 の場合、 $5Y_{10} - 275$ の最高白色度指数を持つ試料の色度座標は $x_{10} = 0.2742$, $y_{10} = 0.2762$ となる。この色度座標を基準点として、純度の高い方に行く程白色度指数が減少するように重み付けをする。さらに (1) と同様に Tint 方向の重み付けもする。

$$W_{10} = P_{w,10} - 2 (T_{w,10})^2$$

$$W_{CIE,10} = Y_{10} + 800(x_{n,10} - x_{10}) + 1700(y_{n,10} - y_{10})$$

$$P_{w,10} = (5Y_{10} - 275) - \{ 800 [0.2742$$

$$+ 0.00127 (100 - Y_{10}) - x_{10}]^{0.82}$$

$$+ 1700 [0.2762 + 0.00176 (100 - Y_{10}) - y_{10}]^{0.82} \}$$

$$T_{w,10} = 900 (x_{n,10} - x_{10}) - 650 (y_{n,10} - y_{10})$$

x_{10} , y_{10} と $x_{n,10}$, $y_{n,10}$ は試料および標準の光 D_{65} の色度座標である。

5.2 視感評価との関係

図 5 は上記の白色度式の等白色度線である。基準点を中心として、標準の光 D_{65} に近い方が基準点内試料、反対側が基準点外試料である。図 4 の CIE 白色度式の等白色度線に比べ、白色領域が広がり、外に行くにつれ白色度指数が減少する。また Y_{10} の減少により、最高白色度指数である基準点が標準の光 D_{65} の方へ移動すると同時に、白色度指数の減少の割合が大きく

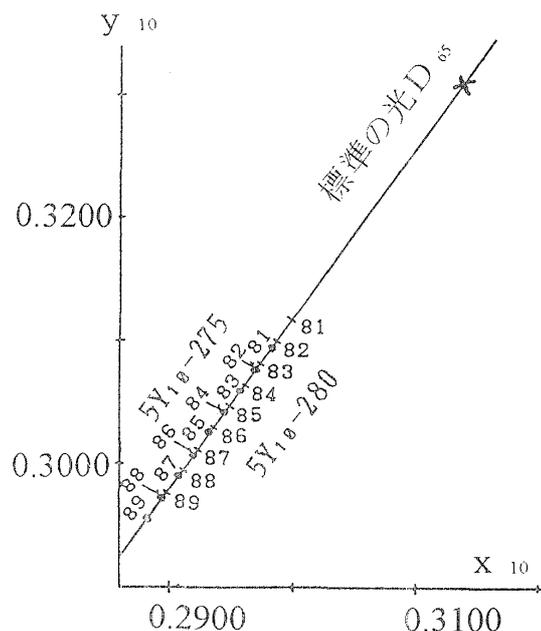


図3 Y_{10} が 81 - 89 における白色度領域

なっていることが特徴である。

また上記3つの視感実験との相関は、(1)の49白布試料に対しては $r_0 = 0.710 > r(49, 0.01) = 0.288$

(Spearman), (2)の18白布試料では $r_0 = 0.801, t_0 = 5.36 > t(16, 0.01) = 2.97$, (2)の29白紙試料では $r_0 = 0.784, t_0 = 6.56 > t(27, 0.01) = 2.83$ であった。CIE白色度式よりずっと相関がよいことが判る。

6. おわりに

CIE白色度式は1987年にISO²⁴⁾, 1989年にAATCC²⁵⁾, 1991年にはJIS²¹⁾に採用された。しかし、今もって各国、各業界では伝統的な方法で白色物質の白さを評価しているということは、この式が満足できるものではないということである。

白色度式が常に直面している難問は、感覚量を心理物理量として定量化するということにある。しかも色好みという嗜好性まで追求することは迷路に入り込

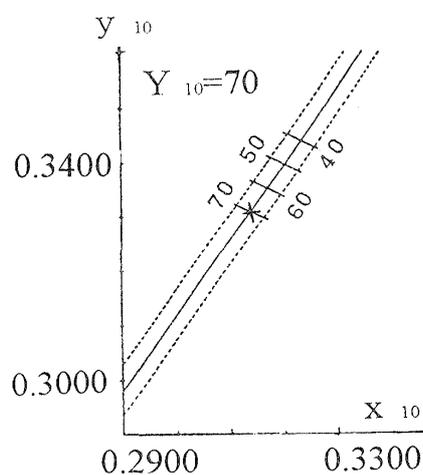
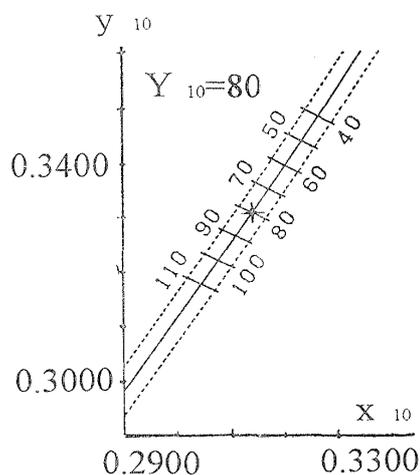
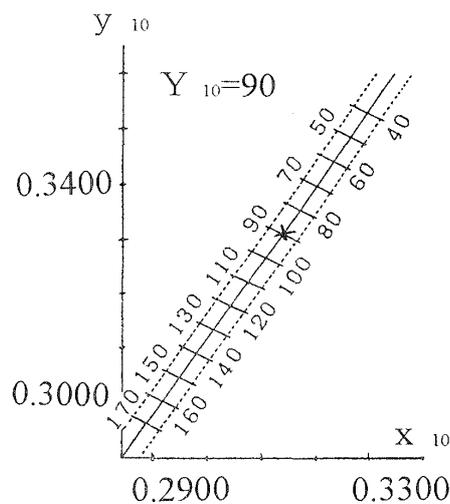
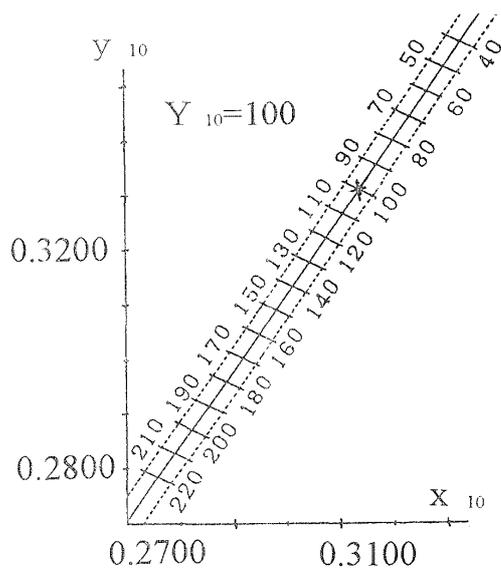


図4 CIE白色度式の等白色度線

んだに等しく、白さの評価は永遠の課題なのかも知れない。

参考文献

- 1) 田辺勝利: 年表 洗剤の歴史, p2, 愛媛大学教育学部被服研究室, (1990)
- 2) ASTM: Method E97 - 53T, (1953)
- 3) TAPPI: T 452_{OS-83} (1983)
- 4) DIN 53145: Prufung von Papier und Pappes Messung des Remissionsgrades Begriffe und MeBgrundlagen, (1968)
- 5) ISO 2470 - 1977: Paper and board - measurement of diffuse blue reflectance factor (ISO brightness), (1977)
- 6) SCAN C11: 75
- 7) BSI BS 4432: Part2, Measurement of diffuse blue reflectance factor (ISO brightness) of paper and board, (1995)
- 8) CPPA Standard E1
- 9) JIS P 8123: 紙およびパルプのハンター白色試験方法, (1961)
- 10) Taube, K: Part of Unpublished, Study of Home - Laundering Methods, Housing and Equipment Laboratory, Institute of Home Economics, U.S.D.A. Beltsville, Maryland, (1958)
- 11) ASTM E 313 - 73: Standard Test Method for Indexes of Whiteness and Yellowness of Near - White, Opaque Materials, (1993)
- 12) JIS L 1015: 化学繊維ステーブル試験方法, (1992)

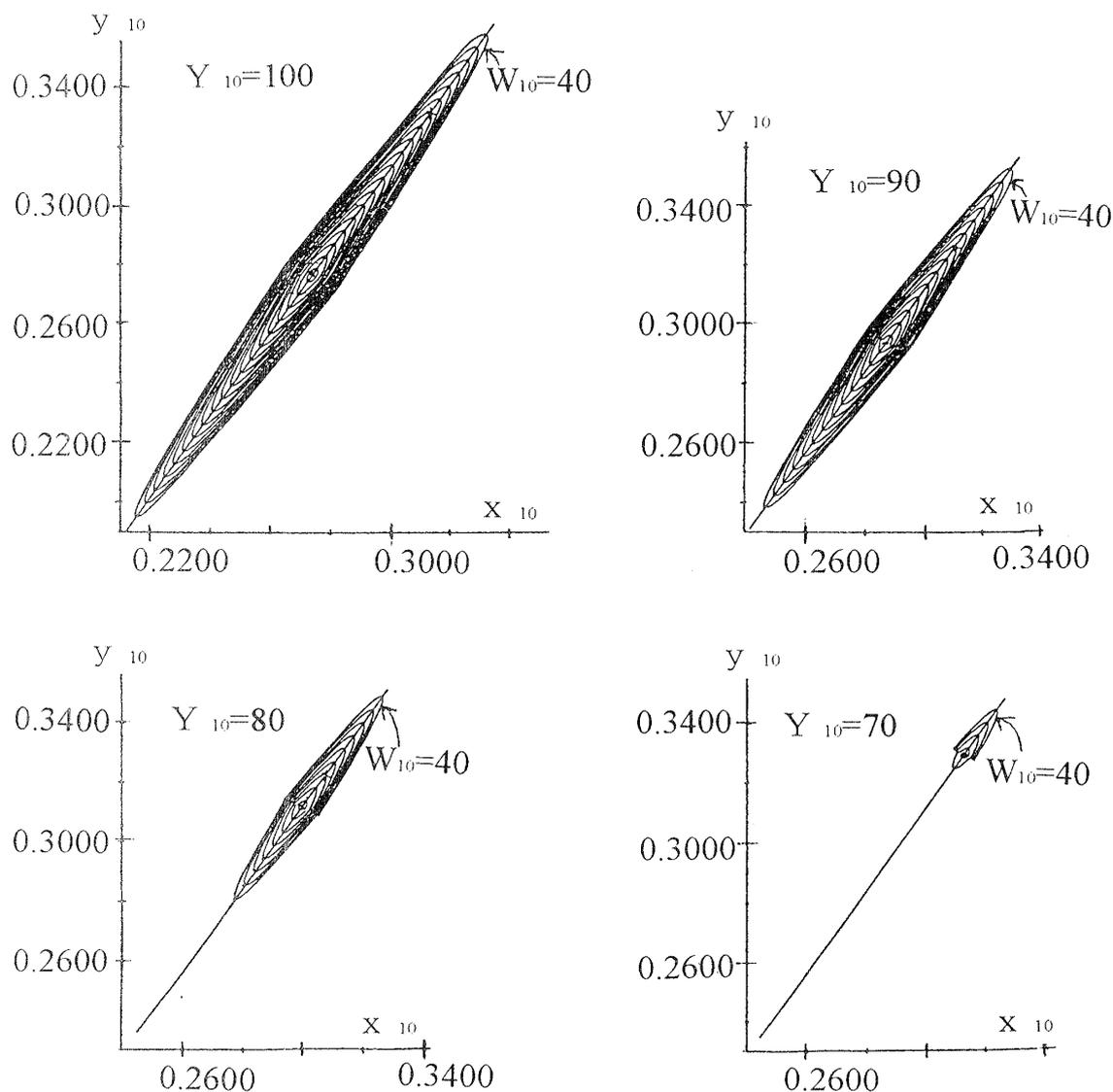


図5 新白色度式の等白色度線

- 13) Croes, A.W : Simple formula for calculating whiteness from photoelectric tristimulus data, J. Opt. Soc. Am., 49, (1959)
- 14) Stensby, P.S. : Optical brightness and their evaluation, Soap Chem. Specialities, 43, (1967)
- 15) ASTM D 5237-92 : Standard Guide for Evaluating Fabric Softeners, (1995)
- 16) Judd, D.B. : TAPPI, 18, (1935) ; A method for determining whiteness of paper II, Paper Trade J., 103, TS -154 (1936) ; TAPPI, 19, (1935 / 36)
- 17) Stenius, Å.S : Optimal colors, color blindness and luminous fluorescence of bluish whiteness, CIE TC -1.3 Subcommittee on Whiteness, Circular No. 74, (1974)
- 18) Ganz, E. : Whieness measurement, J. Color Appearance, 1, 5, (1972) ; Whiteness, photometric specification and colorimetric evaluation, Appl. Opt., 15, 9, (1976) ; Whiteness formulas, a selection, Appl. Opt, 18, (1979)
- 19) 内田, 福田 : 蛍光増白布の白色度評価について, 色学誌 11 - 2, 15, (1987)
- 20) CIE : Colorimetry, 2nd ed., Publ. CIE No. 15, 2, (1986)
- 21) JIS Z 8717 : 白色度の表示方法, (1991) ; 白色度表示方法研究委員会資料, (1986 - 1988)
- 22) 内田 : C I E 白色度式についての一考察, 色学誌, 14 - 2, (1990)
- 23) Uchida, H. : A New Whiteness Formula, Color Res. Appl., 23, 4, (1998)
- 24) ISO 105 - J 02 : Method for the instrumental assessment of whiteness, (1987)
- 25) AATCC Test Method 110 - 1989 : Whiteness of Textiles, (1989)