

論文

識別色差と許容色差に基づく色差式の性能比較

Performance Testing of Color-difference Formulas Based on the Relationship Between Perceptibility and Acceptability of Color-difference

小松原 仁 Hitoshi Komatsubara 財団法人日本色彩研究所 Japan Color Research Institute

Abstract

I reported perceptibility and acceptability datasets of color-difference for seven colors as popular colors at ceramics tile industry. With this color-difference dataset, I examined relation with perceptibility and acceptability of color-difference and clarified relation of both. Furthermore, performance of five kinds of color-difference formulas was tested using the practical color-difference predicting from an intersection with perception probability curve and an acceptance probability curve. As a result, it can be seen that CIEDE2000 is significantly better than another formula and suggest that revision between color-difference attributes were necessary.

Keywords: perceptibility, acceptability, color-difference formula, CIEDE₂₀₀₀

要 旨

筆者は、陶磁器タイル製造工業で多く利用されている低彩度領域の7色を基準色とする色差の識別閾及び色差の許容域の観測結果⁵⁾を報告した。この観測結果を用いて、識別色差と許容色差との関係を検討し、両者の関係を明らかにした。更に、識別確率曲線と許容確率曲線から求めた実用色差を用いて、5種類の色差式の性能試験を実施した。その結果、CIEDE₂₀₀₀は、色の違いによる変動が少ないこと及び色差属性間の補正が必要であることを明らかにした。

キーワード：識別色差、許容色差、色差式、CIEDE₂₀₀₀

1. まえがき

CIEが1976年に推奨したCIE色差式は、繊維業界、塗料業界をはじめ産業における製品色の色彩管理に広く利用されている。一方、1976年当時から、CIE色差式の抱える非均等性を改善する試みが続けられ、1995年にCIELAB色空間の色差式を修正したCIE94¹⁾が提案され、2001年にはCIEDE2000²⁾が提案されている。CIE94及びCIEDE2000は、色差の違いを識別できるかどうかの観測データ³⁾⁴⁾に基づいて開発されたものであるが、製品色の色彩管理では、識別閾上でどの程度の色差まで許容できるかどうかが問題になり、識別閾上での色差属性に対する判断基準の違いが指摘されている。CIE色差式でも、実地応用が異なると、色差属性 ΔL^* 、 ΔC^* 、 ΔH^* について異なる重みを用いることが必要になるとしている。しかし、色差の識別と許容とで、具体的にどのような重みを用いることが適当かについては言及していない。

筆者は、陶磁器タイル製造工業で多く利用されている低彩度領域の7色を基準色とする色差の識別閾（以下、識別色差という。）及び色差の許容域（以下、許容色差という。）の観測結果⁵⁾を報告した。本報では、この観測結果を用いて、識別色差と許容色差の関係を検討するとともに、両者の判断確率から求めた実用色差による5種類の色差式の性能試験を行った。

2. 色差観測データセット (ICD DATASET)

識別色差と許容色差の関係を検討するために用いた色差観測データは、陶磁器タイル製造工業で多く利用されている低彩度領域の基準色7色（A:5.0R 8/2、B:7.5YR 8/2、C:7.5YR 8/4、D:5.0YR6/2、E:5.0G 8/2、F:10.0B8/2及びG:N7.5）を中心色として、その周辺に基準色から $\Delta E^*_{ab} \leq 2$ の範囲で色相、明度及び彩度の何れかが単独に変化するように周辺色を作成し、無彩色背景（約N7）に中心色と周辺色を隣接配置して作成した247種類の色差対について、色比較用D₆₅蛍光灯の下（約1500lx）で、両者の色差を次のカテゴリで判定したものである。なお、色相、明度及び彩度がともに変化する色差対20種類を加えて評価を実施したが、ここでは、CIEDE2000などに採用されている色差属性に関する重み付け係数の影響を比較するために、比較対象から除外した。5.0R 8/2の色相又は彩度が異なる周辺色について、日立製分光光度計C-2000による波長範囲380nm～780nmに渡る5nm間隔の分光立体角反射率から、CIE1931測色標準

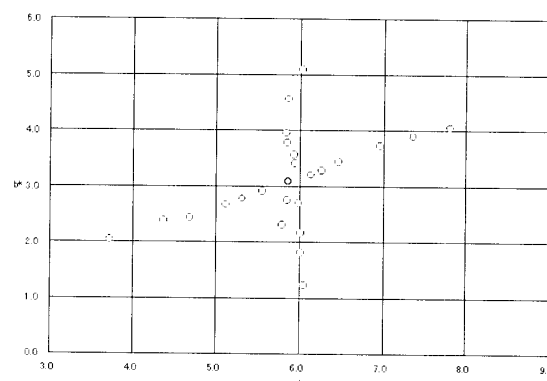


図1 5.0R8/2の基準色（●）及び周辺色（○）の測定結果

観測者及び標準イルミナントD₆₅を用いて計算した三刺激値から求めた基準色の平均値及び周辺色のa*b*色座標を図1に示す。

a) 色差を感じることができるかどうかの判定（識別色差）

- A：色差を感じることができない
- B：どちらでもない
- C：色差がはっきり感じられる

b) 製品として許容できる色差かどうかの判定（許容色差）

- A：製品として許容できる
- B：どちらでもない
- C：製品として許容できない

色差観測データは、247種類の色差対について48名の評価者（男性41名、女性7名）が判定した結果から、カテゴリBの判定結果をカテゴリA及びカテゴリCに等分に振り分け、識別色差についてはカテゴリCについて、許容色差についてはカテゴリAについて求めた判断確率である。5.0R 8/2について求めた識別色差及び許容色差の観測データを図2及び図3に示す。なお、解析には、色差属性別に整理されていないN7.5を除いた6色、222種類の色差観測データを用いた。

3. 識別色差と許容色差の関係

一般に識別できる判断確率が大きくなると、許容できる判断確率が小さくなることが予想される。識別色差の判断確率と製品として許容できない判断確率（100から許容色差の判断確率を引いた値）の関係を図4に示す。両者には相関関係が見られ、指数関数で表すことができる。回帰式から、横軸で、識別できるかどうかの閾値に相当する50%の判断確率にお

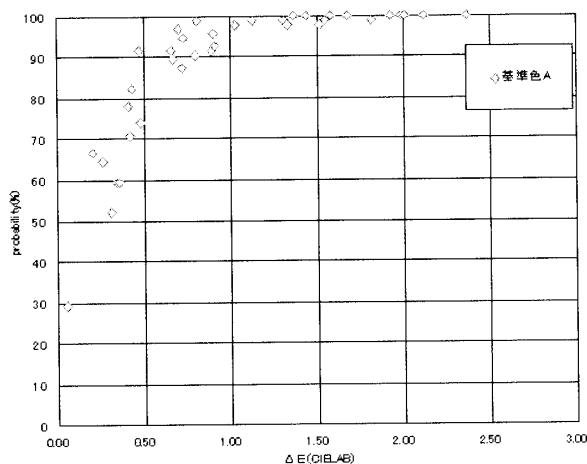


図2 識別色差の判断確率

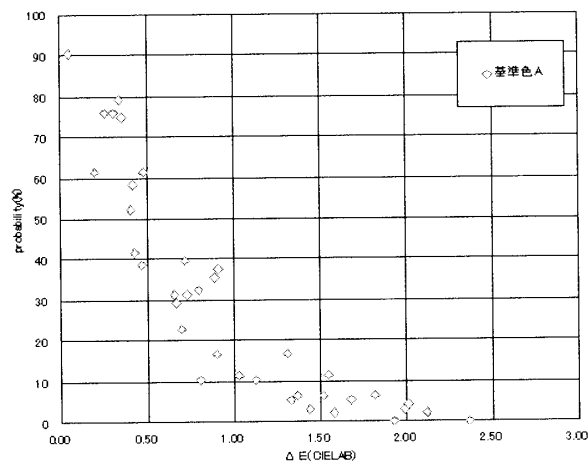


図3 許容色差の判断確率

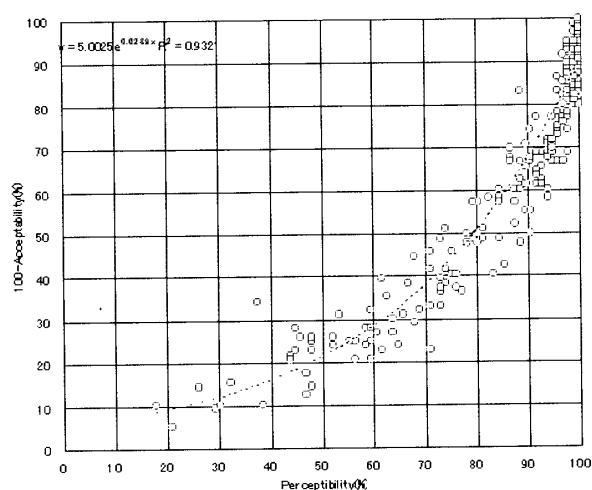


図4 識別確率と許容確率との関係

ける許容できない確率は約20%（許容できる確率は約80%）であり、縦軸で、許容できるかどうかの閾値に相当する50%の判断確率における識別できる確率は約80%である。製品として許容できるかどうか

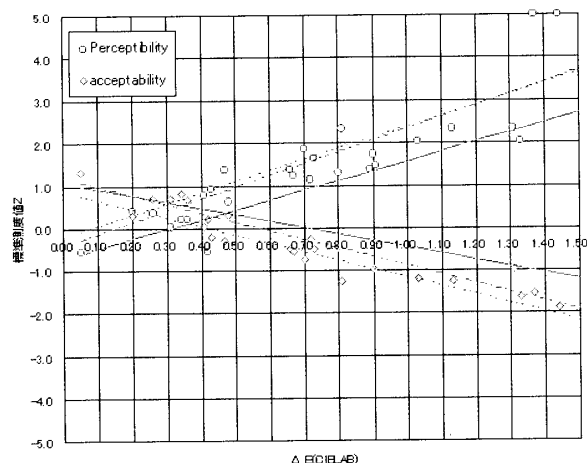


図5 正規補間法による色差属性別の識別色差と許容色差の関係

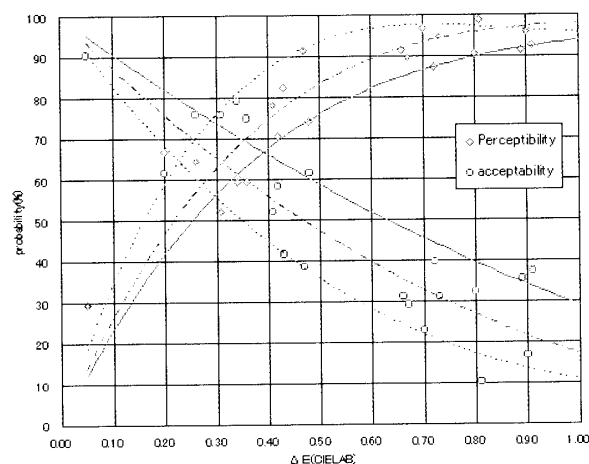


図6 色差属性別の識別確率曲線と許容確率曲線の平衡点

の確率は、色差を感じることができる閾値上で、色差が大きくなるに従って低下し、色差がはっきり感じられる程度の色差で急激に低下する傾向を示している。このことから、許容できるかどうかは、識別色差を基準として閾値上どの程度までなら許容できるかを判断していることが推定される。恒常法では、正規補間法や最小2乗法などを適用することによってメジアン又は平均値から閾値を推定⁶⁾する。このため、識別できるかどうかの閾値と許容できるかどうかの閾値が推定される。しかし、先に指摘したように識別色差と許容色差の間には、密接な関係があり、両者の関係から推定される色差判断の分岐点に、実用的な意味があると考えられる。すなわち、識別できるかどうかの判断確率と許容できるかどうかの判断確率が平衡する点、従って、図2と図3の判断確率曲線が交差する点から求められる色差を、色彩管理

の基準とすることである。

5.0R 8/2について、正規補間法で用いる標準測度値（Z値）と色差の関係を図5に示す。また、同様に、本報で用いる識別確率と許容確率の平衡点を図6に示す。図5及び図6の近似式で、実線は色相差、破線は明度差及び一点鎖線は彩度差の結果を示す。図6の回帰式は識別確率については、回帰式の近似の程度が良好であった4次の多項式で、許容確率については3次の多項式で求めたもので、6色及び5種類の色差式に対する決定係数は、すべての色差属性に対して $R^2=0.8\sim0.99$ の範囲にあり、良好な近似が得られている。

図5で $Z=0$ 及び図6で判断確率 $p=50\%$ に対応する色差値が、いわゆる閾値に相当する。両者の結果を比較すると、直線補間法に相当する図6の結果と比較して、正規補間法による推定値は識別色差で小さく、許容色差で大きくなる傾向を示している。この傾向は、色差を識別できず明らかに許容できる色差対が少なく、色差が感じられて許容できない色差対が多いという、評価に用いた色差対の色差分布の偏りに起因していることが推定される。これを避けるにはMuller-Urbanの解法やプロビット法などの変法⁶⁾を用いることができる。しかし、図5と図6の回帰式の平衡点を比較すると、 $p=50\%$ から求まる閾値は、 $Z=0$

を使う場合に比較して差がなく、色差対の色差分布による影響が軽減されていることがわかる。このことは、閾値上において、色差の識別が許容できるかどうかの判断に影響を与えていることを示唆している。識別確率と許容確率の定量的な関係については、あらためて後述する。

4. 色差式の性能試験

識別確率曲線と許容確率曲線の回帰式の交点から

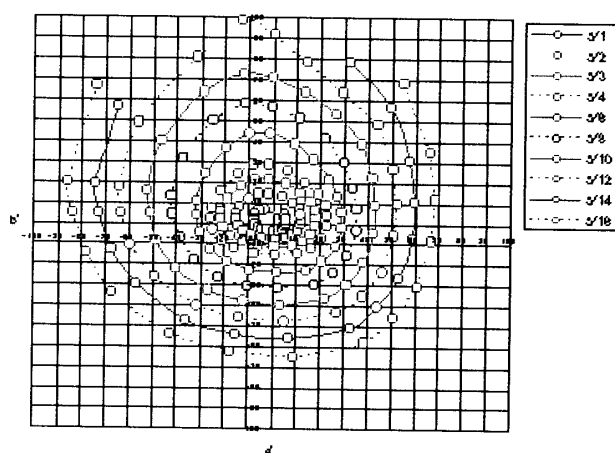


図7 CIEDE2000の色座標での明度5のマンセルグリッド

表1 色差式の性能比較結果

color	CIELAB			CIE94			CIEDE2000		
	H	V	C	H	V	C	H	V	C
A	0.39	0.23	0.31	0.34	0.23	0.24	0.33	0.16	0.31
B	0.28	0.26	0.33	0.23	0.23	0.24	0.26	0.19	0.24
C	0.32	0.32	0.40	0.26	0.26	0.29	0.24	0.21	0.26
D	0.32	0.18	0.38	0.26	0.18	0.29	0.32	0.16	0.28
E	0.38	0.34	0.42	0.31	0.33	0.33	0.28	0.23	0.31
F	0.30	0.22	0.37	0.27	0.22	0.29	0.36	0.17	0.31
AVERAGE	0.33	0.26	0.37	0.28	0.24	0.28	0.30	0.19	0.29
STDEV	0.044	0.061	0.042	0.040	0.050	0.035	0.046	0.029	0.030
RANGE	0.11	0.16	0.11	0.11	0.15	0.09	0.12	0.07	0.07
TOTAL	0.32			0.27			0.25		
H/V	1.28			1.15			1.60		
C/V	1.43			1.16			1.53		

color	MLAB			CMC		
	H	V	C	H	V	C
A	0.27	0.22	0.17	0.43	0.18	0.30
B	0.20	0.22	0.21	0.26	0.20	0.26
C	0.26	0.26	0.30	0.24	0.22	0.27
D	0.23	0.18	0.24	0.31	0.16	0.30
E	0.28	0.33	0.30	0.35	0.25	0.31
F	0.23	0.21	0.21	0.36	0.17	0.35
AVERAGE	0.25	0.24	0.24	0.33	0.20	0.30
STDEV	0.030	0.052	0.053	0.070	0.034	0.032
RANGE	0.08	0.15	0.13	0.19	0.09	0.09
TOTAL	0.24			0.26		
H/V	1.04			1.65		
C/V	1.01			1.52		

得られる色差値を閾値上の実用色差として色差式の性能試験を行った結果を次に示す。試験に用いた色差式は、CIELAB、CIE94、CIEDE₂₀₀₀、CMC(1:1)⁷⁾及びMLAB⁸⁾の5種類である。CIELABを除く4種類の色差式は、CIELAB色空間をベースに、色差を計算する際に、色差属性及び色差パラメータに関する重み付け係数を採用した修正色差式である。ただし、CIEDE₂₀₀₀は、低彩度領域における色差知覚データ⁷⁾から、CIELABのa*軸を修正した図7に示す色差計算のための修正a*b*色座標を採用している。

5種類の色差式を用いて、N7.5を除いた222種類の色差対の色差を計算し、識別確率曲線と許容確率曲線の回帰式を求め、両者の回帰式の交点（以下、実用色差という。）を求めた結果を表1に示す。色差式の性能として、色の種類及び色差属性別に色差値の変動や偏りが少ないことがあげられる。この指標として、表1には、色差式ごとに色差属性別の平均値（AVERAGE）、標準偏差（STDEV）、範囲（RANGE）、及び明度差の平均値と色相差並びに彩度差の平均値との比率（H/V及びC/V）を示した。また、全色差対の総合色差（TOTAL）を同様に求めて示した。表1の総合色差の大きさに若干の違いが見られることから、表1の結果を総合色差の大きさを基準として整理したものを表2に示す。

表1及び表2の標準偏差の値から色の違いによる色差の一致性を比較すると、色相差はMLAB<CIE94≒CIELAB<CIEDE₂₀₀₀<CMCの順に、明度差はCIEDE₂₀₀₀<CMC<CIE94<MLAB≒CIELABの順に、彩度差はCIEDE₂₀₀₀<CMC<CIE94<CIELAB<MLABの順に小さく、色の種類による変化が少なくなっている。また、CIE94とCIEDE₂₀₀₀の明度差の標準偏差の比較では、CIEDE₂₀₀₀が小さくなっている。このことから、色相差を除いて、色差対の平均明度及び平均彩度の関数としての重み係数を採用することの妥当性が推定される。特に、明度差についての効果が大きく、同様な傾向は、明度差に明度の関数として重み係数を採用しているCMCにも見ることができる。ただし、CIEDE₂₀₀₀の青領域だけに適用されるローテーション係数（RT）による重み効果がある基準色F（10B 8/2）について、色相差及び彩度差の色差値が他の色に比較して相対的に大きくなり、標準偏差を大きくしている原因になっている。この傾向は、CIE94とCIEDE₂₀₀₀の色票Fの実用色差の違いから推定できる。RTを除くと、CIEDE₂₀₀₀と概ね同じ構造を持つCMCは、明度差及び彩度差についてはCIEDE₂₀₀₀の結果と一致した傾向が得られているが、色相差について、色による変動が大きい結果になっている。これは、色相差の重

表2 色差式の性能比較結果（総合色差で規準化した場合）

color	CIELAB			CIE94			CIEDE2000		
	H	V	C	H	V	C	H	V	C
A	1.23	0.73	0.98	1.28	0.86	0.90	1.31	0.63	1.23
B	0.88	0.82	1.04	0.86	0.86	0.90	1.03	0.75	0.95
C	1.01	1.01	1.26	0.98	0.98	1.09	0.95	0.83	1.03
D	1.01	0.57	1.20	0.98	0.68	1.09	1.27	0.63	1.11
E	1.20	1.07	1.32	1.17	1.24	1.24	1.11	0.91	1.23
F	0.95	0.69	1.17	1.02	0.83	1.09	1.43	0.67	1.23
AVERAGE	1.05	0.81	1.16	1.05	0.91	1.05	1.18	0.74	1.13
STDEV	0.139	0.194	0.131	0.149	0.189	0.130	0.182	0.114	0.120
RANGE	0.35	0.50	0.35	0.41	0.56	0.34	0.48	0.28	0.28
TOTAL	0.32			0.27			0.25		
H/V	1.28			1.15			1.60		
C/V	1.43			1.16			1.53		

color	MLAB			CMC		
	H	V	C	H	V	C
A	1.14	0.93	0.72	1.63	0.68	1.14
B	0.85	0.93	0.89	0.98	0.76	0.98
C	1.10	1.10	1.27	0.91	0.83	1.02
D	0.97	0.76	1.02	1.17	0.61	1.14
E	1.19	1.40	1.27	1.33	0.95	1.17
F	0.97	0.89	0.89	1.36	0.64	1.33
AVERAGE	1.04	1.00	1.01	1.23	0.74	1.13
STDEV	0.128	0.222	0.223	0.265	0.128	0.121
RANGE	0.34	0.64	0.55	0.72	0.34	0.34
TOTAL	0.24			0.26		
H/V	1.04			1.65		
C/V	1.01			1.52		

み係数に用いられている色差対の平均彩度による影響が大きく、基準色C ($C^* \approx 23.9$) に比較して基準色A ($C^* \approx 6.6$) や基準色F ($C^* \approx 6.6$) のように低クロマの色差対の色差が大きくなることに起因している。

CIEDE₂₀₀₀は、色の違いによる色差の一致性にわずかに優れていることが明らかになったが、許容色差に着目して、プロビット法によって閾値を推定した結果⁹⁾と比較すると、両者の結果は必ずしも一致せず、色差式の順位に変動が見られる。この違いについては、公表されている色差観測データによる解析、閾値の推定方法の妥当性、推定された閾値の信頼区間及び視感による印象等を考慮して、更に、検討する必要があると考えられる。

色差属性間の一致性の目安と考えられるH/V及びC/Vの値を比較すると、MLABがほぼ1の値を示し、一致性に優れている。これは、MLABがCIE₉₄やCIEDE₂₀₀₀のように色空間全域での色差値を等しくするように開発されたものでなく、ある中心色に対して色差属性に関係なく同じ色差値が得られるように、色差属性間の重み係数を採用していることによる。MLABで用いられているデータセットは、CIEが1978年に提案した色差式検討用の物体色6R 4.8/8.9、10Y 8.4/6.0、4BG 5.3/6.5、7PB 3.3/8.0を用いたものであり、比較

的高彩度領域における観測データである。本報の低彩度領域における観測データについてもMLABの結果が良好であったことから、ほぼ色空間全域で、ある中心色に対するCIELABの色差属性の違いによる色差知覚の構造がほぼ同じ傾向を持っていることが推定される。CIE₉₄及びCIEDE₂₀₀₀は、CIELABと比較すると、色相差と彩度差の平均値がほぼ等しいことから改善が見られるものの、明度差との間に違いが見られる。CIEDE₂₀₀₀では、繊維工業での実地応用においては、CMCと同様に、明度差と色相差及び彩度差の色差知覚の重みは2:1:1とすることが備考に示されている。しかし、色差計算時には、このパラメータの逆数で重み付け計算を行うことになるため、逆に不一致性が大きくなるように働くことになり、不都合が生じる。このパラメータがどのような背景で導出されたかについては不明であるが、明度差と色度差の色差知覚における感度に基づくものであるかどうかを含めて、今後の課題と考えられる。

識別確率と許容確率の関係について前述したが、識別確率曲線と許容確率曲線との平衡点の確率を求めた結果を表3に示す。表3の結果は、色差式による違いは少なく、ほぼ一致しており、明度差の確率がやや低いものの、色差属性間の有意な差は認めら

表3 識別色差と許容色差の平衡点の判断確率

color	CIELAB			CIE94			CIEDE2000		
	H	V	C	H	V	C	H	V	C
A	66.70	64.30	64.08	66.86	64.43	63.90	66.77	63.94	63.82
B	68.40	60.37	68.36	68.01	61.38	67.63	68.33	59.67	68.28
C	66.38	61.68	67.65	65.74	62.39	65.76	66.65	61.52	66.83
D	64.39	63.56	66.28	65.17	63.42	65.10	65.28	63.33	65.51
E	64.16	60.69	64.72	64.44	60.81	64.04	64.34	60.68	64.62
F	64.33	62.23	62.22	64.35	62.45	62.00	64.44	60.31	62.00
AVERAGE	65.73	62.14	65.55	65.76	62.48	64.74	65.97	61.58	65.18
STDEV	1.715	1.558	2.314	1.439	1.319	1.909	1.559	1.715	2.223
Range	4.24	3.93	6.14	3.66	3.62	5.63	3.99	4.27	6.28
H/V	1.06			1.05			1.07		
C/V	1.05			1.04			1.06		

color	MLAB			CMC		
	H	V	C	H	V	C
A	66.88	64.52	63.79	66.93	64.14	64.12
B	68.04	62.12	67.26	68.90	59.98	68.34
C	65.87	62.35	65.82	66.36	61.62	66.74
D	65.08	63.41	64.88	65.48	63.00	66.04
E	64.60	60.88	64.18	64.29	60.70	64.64
F	63.92	62.62	61.41	64.62	61.20	62.26
AVERAGE	65.73	62.65	64.56	66.10	61.77	65.36
STDEV	1.527	1.231	1.982	1.700	1.538	2.141
Range	4.12	3.64	5.85	4.61	4.16	6.08
H/V	1.05			1.07		
C/V	1.03			1.06		

れない。平均値は約65%に相当し、識別確率が50%を超える識別閾上で許容できるかどうかの判断の分岐点があることがわかる。この確率（色差としては、表1の値）は、多くの人が色差を知覚するものの比較的許容できる値であり、厳しい色彩管理が求められる実地応用での、管理基準を設定する際の実用色差の目安として利用できると考えられる。

5. 結論

低彩度領域の中心色6色を用いた色差観測データを用いて、識別確率と許容確率との関係を検討した。また、識別確率と許容確率から求めた実用色差を用いて色差式の性能比較を行った。その結果を要約すると次のとおりである。

- 1) 色差の識別と許容するかどうかの判断には一定の関係があり、色差が識別できるかどうかの閾値上において、許容できるかどうかの分岐点が存在する。その許容確率は約65%である。
- 2) 識別確率曲線と許容確率曲線の交点から求めた実用色差を用いて、5種類の色差式の性能試験を行った結果、CIEDE₂₀₀₀が色の違いによる差違が少ないことが明らかになった。
- 3) しかし、CIEDE₂₀₀₀には、色差属性間の不一致があり、MLABのように色差属性間の重み補正をする必要がある。この補正の例としてあげられている文献²⁾の備考の値には、再考が必要である。

参考文献

- 1) CIE 116-1995 : Technical Report, Industrial colour-difference evaluation
- 2) CIE 142-2001 : Technical Report, Improvement to industrial colour-difference evaluation
- 3) Berns R.S. et al (1991) : Visual Determination of suprathreshold colour-difference tolerances using Probit analysis, Color Res. Appl., 16,297-316
- 4) Luo M.R. et al (2000) : The development of the CIE 2000 colour-difference formula: CIEDE₂₀₀₀, Color Res. Apply., 26, 340-350
- 5) 小松原仁, 後藤和昌, 景山弘一(1994) : 識別色差及び許容色差による色差式の性能評価 Part 1 - 低彩度領域における色差データ, 色彩研究, 41,2-12
- 6) J.P.ギルホード(1959), 秋重義治監訳: 精神測定法, 培風館
- 7) Clarke F.J.J. et al(1984) : Modification to the JPC79 colour-difference formula, J.Soc.Dyers Col., 100,128-132
- 8) Komatsubara H.(1985) : Evaluation of color difference, AIC Color 85,44
- 9) 小松原仁(2002) : 許容色差データによる色差式の性能比較, 照学誌 (投稿中)
(受付日: 2002年10月23日)

著者紹介



こまつばら ひとし
小松原 仁

1951年7月17日生

1971年長岡工業高等専門学校電気工学科卒業。同年4月財団法人日本色彩研究所。現在、同研究2部長。

日本色彩学会、照明学会、日本照明委員会、映像情報メディア学会、日本建築学会