

色合わせにおけるロバストな光源選択方法

Selection Method of Robust Light Source in Color-Matching

一谷 修司*
Ichitani, Shuji

中澤 利彦*
Nakazawa, Toshihiko

要旨

カラー複写機やプリンタにおいて、その色合わせ時の光源と異なる光源下でも色再現が崩れにくい光源選択方法を検討した。16種類の各光源下で無彩色に色合わせしたサンプルを作成し、これらのサンプルの色の見えを各光源下で主観評価し、 ΔE^*_{ab} との相関性を調査した結果、色合わせに対するロバストな光源がF9であることがわかった。また、色相ごとに解析した場合、黄-青方向への色変化を許容し、赤-緑方向への色変化を許容しにくいという許容楕円が得られた。

Abstract

In color printers and copiers, we have searched for a robust light source for color matching to keep colorimetric reproduction under different light sources. We prepared color-matched samples to be achromatic under the 16 kinds of light sources. We have studied differences in human vision under those light sources in order to investigate the correlation between $CIE\Delta E^*_{ab}$ and subjective rating. As a result, the F9 light source was found to be robust for color matching. We sorted these results by hue for analysis. It was found that the tolerant ellipse for the process gray is the largest in the yellow-blue direction and the smallest in the red-green direction in CIELAB color space.

1 はじめに

カラー複写機やプリンタの色合わせは、三次元Look Up Table (以後、3D-LUT) を使ったテーブル参照法¹⁾を用いることで高い色再現性を実現している。色合わせは、プリンタの色特性を把握するためのカラーパッチを、1つの光源を設定して測色し、それを参照することで3D-LUTを作成しているが、測色的色再現が保証されるのは色合わせ時の光源下のみである。例えば、印刷物の色評価で標準的なD₅₀²⁾で色合わせを行った場合、D₅₀下ではターゲットとする色票と等しい三刺激値となるプリントが作成できたとしても、D₅₀と異なる光源下ではターゲット色票とプリントがそれぞれ異なる三刺激値となってしまう。

この現象は、ある光源下でのみ色再現が保証される条

* コニカミノルタビジネステクノロジーズ(株)
機器開発本部 機器第1開発センター 第13開発部

本稿はカラーフォーラム JAPAN2004 発表原稿に補足したものである。

件等色と呼ばれており、特に、普段見慣れている無彩色領域で敏感と考えられている³⁾。そこで我々は、様々な光源下でグレーに色合わせしたサンプルの他の光源下での条件等色の崩れにくさを調査することで、色合わせ時と異なる光源下でも条件等色が比較的崩れにくい光源選択の手法を検討した。



Fig.1 Light booth

2 実験方法

2.1 光源の種類

検討に用いた光源は、Table 1 に示す東芝ライテック社製の12種類の蛍光灯(高演色形、三波長形、普通形から色温度別に4種類ずつ)と、標準的な光源としてJIS^{2),4)}から選択した4種類(D₅₀、D₆₅、F2、F9)の合計16種類である。上記12種類の蛍光灯は実際にFig.1のようなライトブースに取り付け、主観評価時の観察光源に用いた。プリントサンプル作成用の色合わせ光源は、上記16種類すべての光源を用いた。本稿では、実際にライトブースに取り付けた蛍光灯を型名、色合わせ用に追加した4種類のJIS記載の光源をJIS区分名で呼ぶ。

Table 1 Light sources

形式	メーカーの分類	型名	色温度(K)	JIS区分
高演色形	色比較・検査用	D_EDL	6500(昼光)	F7
	色評価用	N_EDL	5000(昼白)	F8
	美術・博物館用	W_EDL	4200(白色)	F9
	美術・博物館用	L_EDL	3000(電球色)	-
三波長形	メロウ5	EX_D	6700(昼光)	-
	メロウZ	EX_N	5000(昼白)	F10
	メロウ5	EX_W	4200(白色)	F11
	メロウ5	EX_WW	3500(温白色)	F12
普通形	メロウホワイト	D	6500(昼光)	F1
	メロウホワイト	N	5000(昼白)	-
	メロウホワイト	W	4200(白色)	F2
	メロウホワイト	WW	3500(温白色)	F3

Fig. 2 に昼光色（6500K）4種類の分光特性を示す。自然光であるD₆₅は急峻なピークをもたず、他は複数のピークをもつ。また、D_EDLとDは、ピーク以外は比較的滑らかだが、EX_Dでは、ピーク以外の強度が0に近い特性である。この傾向は他の色温度でも同様であった。

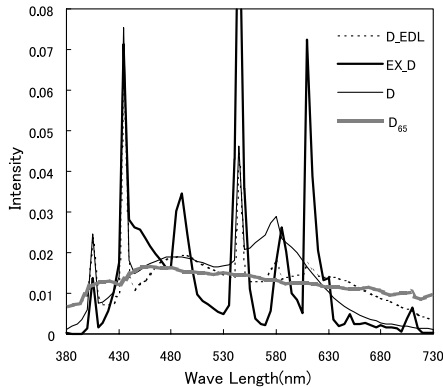


Fig.2 Spectral intensity distributions of daylight sources

2. 2 ターゲット色票

主観評価時にターゲットとして用いる色票は、日本色彩研究所製PCCSハーモニックカード201の中から、L*≒57のカード名Gry-5.5を用いた。Fig. 3 にターゲット色票を上記16種類の光源で照明した場合のCIELAB, a*-b*色空間上の色度点を示す。目盛り幅が非常に小さく、光源の変化による影響がほとんど目視識別できないことがわかる。

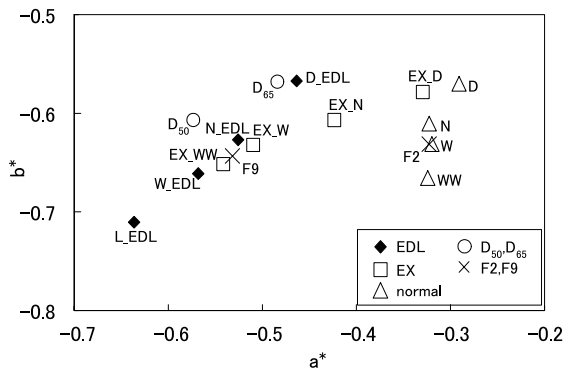


Fig.3 Chromaticity diagram of the target under each light source

2. 3 サンプル作成

サンプルは弊社のハイエンドオフィス用電子写真プリンタで、CMY 3色の重合トナーを用いて作成した。Kトナー色を加えた場合、分光特性がフラットに近づき光源による依存が少なくなるが、粒状性を悪化させるため今回は用いなかった。16種類の各光源下でターゲット色票と条件等色するサンプルは、各光源下でのプリンタ特性を参照して、ターゲット色票のL*a*b*値にマッチするCMY値を算出し¹⁾、それをプリントしたものを30×60mmにカットし、70×100mmのグレー（L*≒50）のアートボードに貼り付けて作成した。

Fig. 4 にプリントサンプルの色再現精度として、各光源

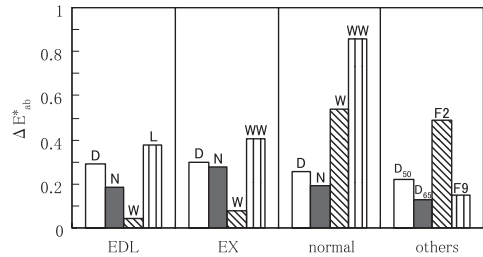


Fig.4 CIEΔE*ab of each print sample

下でのターゲット色票とのΔE*_{ab}を示す。WW用プリントサンプルのΔE*_{ab}が0.86と最も大きい、全サンプルの平均ではΔE*_{ab}=0.30である。また、D_EDLとD₆₅用のプリントサンプルは同じものとなったため、一種類として取り扱った。

Fig. 5 にGry-5.5の分光特性と、D₆₅光源下で電子写真プリンタのCMY 3色でターゲット色票に色合わせしたプリントサンプルの分光特性を示す。Fig. 5 から、ターゲット色票の分光特性はほぼフラットであるのに対し、CMY 3色での分光特性はフラットではないことがわかる。

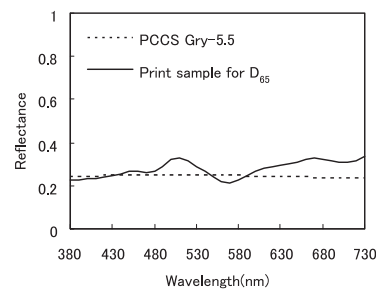


Fig.5 Spectral reflectance distributions

Fig. 6 にD₆₅光源下でターゲット色票と条件等色するD₆₅用サンプルの各光源下での色度を示す。D₆₅光源下のサンプルの色度はターゲット色票に非常に近いが、他の光源の場合、図中に示すターゲット色票の変化幅より大きく変化し、特にa*のプラス側、赤の方向にずれているのがわかる。以上のように色度図によるシミュレーションから、様々な光源で照明した場合に、ターゲットとの距離が小さいサンプルが光源依存性が少ないと予測でき、今回我々は更にこの予測を主観評価実験により検証した。

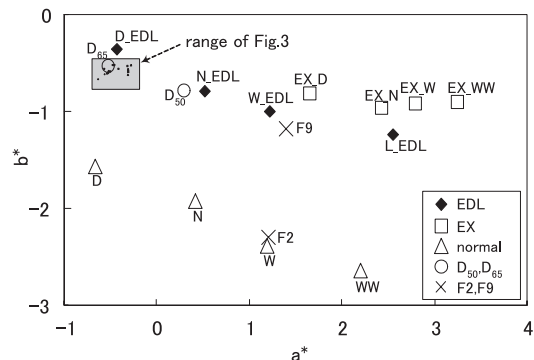


Fig.6 Chromaticity diagram of the print sample for D₆₅ under each light source

3 主観評価実験と解析

評価実験は、下記の実験条件のように各蛍光灯に順応後、ターゲット色票と15種類のサンプルを自由に比較し、 ΔE^*_{ab} を5段階のカテゴリに分類した。蛍光灯の点灯順序はランダムで、各カテゴリーの枚数はゼロ枚でも複数枚でもよいとした。

実験条件

- 蛍光灯種 : 12種類 (Table 1 記載)
- ターゲット : PCCSハーモニックカードGry-5.5
- サンプル : 15種類 (2.3項サンプル作成参考)
- 順応 : 約10分
- 照度 : 約1300~2300lx
- 被験者 : 9名 (男8, 女1)
- 5段階カテゴリー評価:
 - 0 = 最も近い, 1 = 近い, 2 = 許容
 - 3 = 離れている, 4 = 最も離れている

3. 1 ΔE^*_{ab} と評価値の相関性

1つの条件をある光源下で、あるサンプルを評価したものとし、被験者9人の評価結果を平均したものを1つの条件での評価点とした。光源は12種類、サンプルは16種類であるので、組み合わせで $12 \times 16 = 192$ 個の評価結果が得られ、Fig. 7に、その192個全条件での評価点と ΔE^*_{ab} を、それぞれ縦軸、横軸にプロットした相関図を示す。相関係数は0.76であり、全体として、 ΔE^*_{ab} と評価値の間には相関関係が成り立っている。

3. 2 光源依存性

Fig. 8-a~hにプリントサンプルごとの相関図を示す。例えば、Fig. 8-aに示すD_EDL用サンプルの ΔE^*_{ab} と評価点の相関が高く、これはD_EDL光源下で同じ色に見えていても他の光源下では色が異なる、すなわちグレーバラ

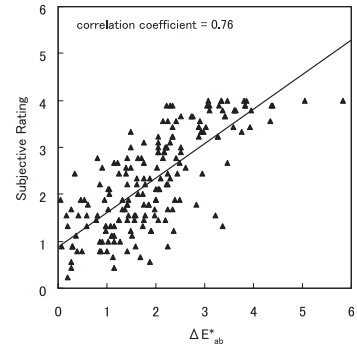


Fig.7 Correlation diagram of all samples between CIE ΔE^*_{ab} and subjective rating

ンスが崩れやすいことを意味している。逆にFig. 8-bに示すW_EDL用サンプルの結果は相関が低く、これは計算上は他の光源下で色が異なっても、実際にはあまり異なる色に見えない、すなわち判断に迷うということを示している。また、高演色形用と普通形用サンプルではそれぞれW_EDL用、W用サンプルの相関が低く、三波長形ではEX_D用、EX_N用サンプルの相関が低くなっている。三波長形用サンプルは、3種類ある蛍光灯形の中で、異なる色温度で相関が低くなっており、これは、2. 1項で記述した特徴的な三波長形蛍光灯の分光特性が起因している可能性がある。

Fig. 9にFig. 8の各サンプルのプロットを平均したデータを示す。このプロットが原点に近いことが計算上の ΔE^*_{ab} 、評価点ともに良好である、言い換えれば、このプリントサンプルを作成した時の光源で色合わせを行えば、他の光源下でも評価が悪くならないことになる。Fig. 9から、F9、EX_N、EX_D、W_EDL、F2用サンプルの評価が高いことがわかる。EX_N、EX_Dは、分光特性がフラットなグレーでは良好だが、有彩色の場合に、2. 1項で記述した凹凸の大きい分光特性が影響しやすいと予

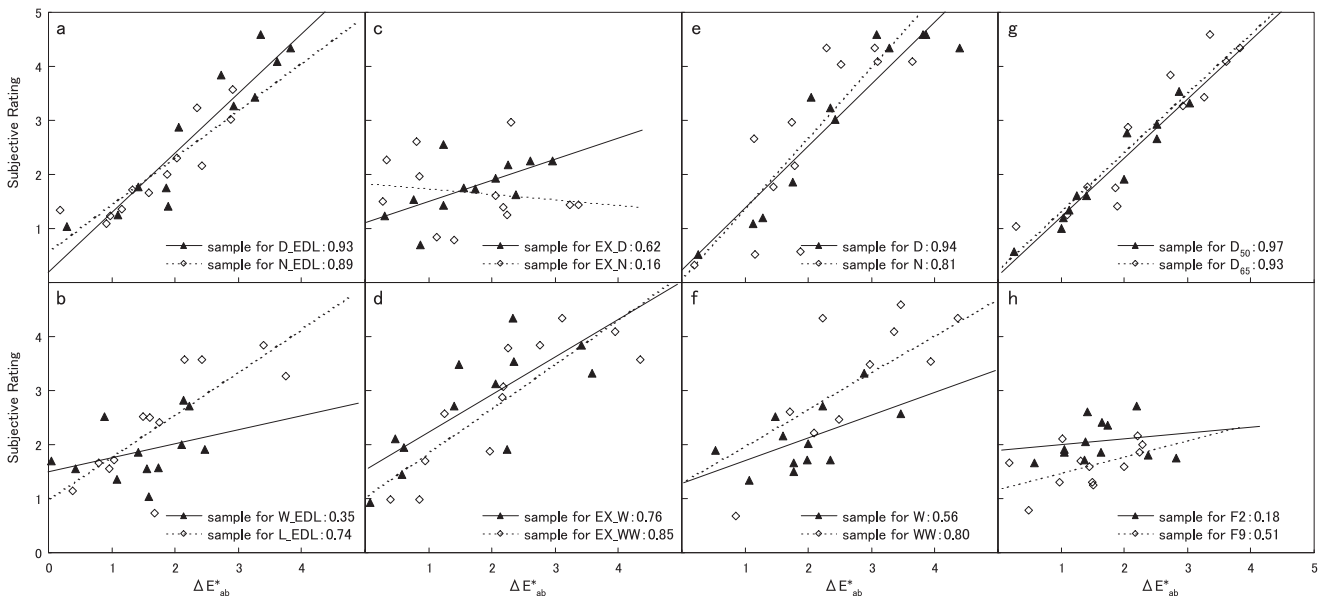


Fig.8 Correlation diagram of each sample between CIE ΔE^*_{ab} and subjective rating (value indicates correlation coefficient)

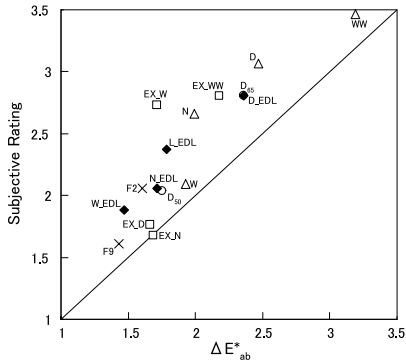


Fig.9 Correlation diagram between CIE ΔE^*_{ab} and subjective rating (average)

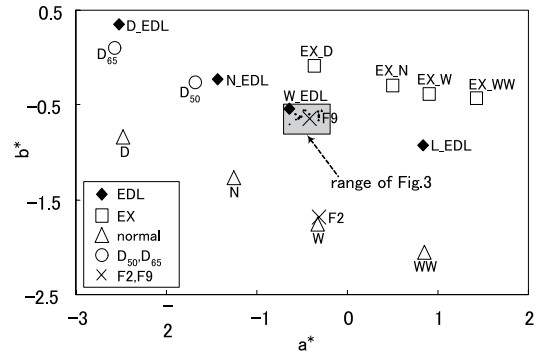


Fig.10 Chromaticity diagram of the print sample for F9 under each light source

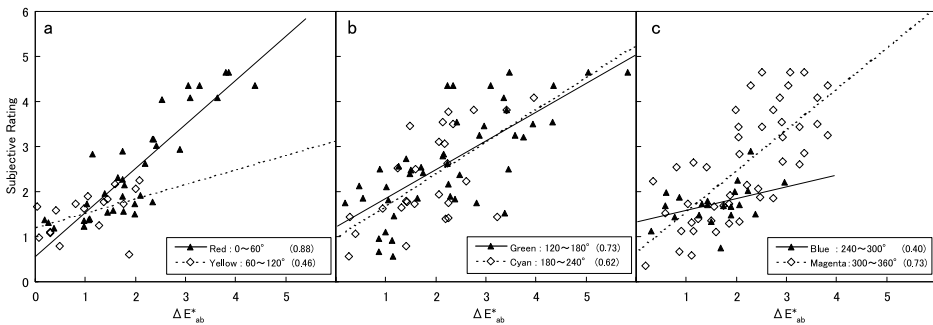


Fig.11 Correlation diagram of hue per 60° between CIE ΔE^*_{ab} and subjective rating (value indicates correlation coefficient)

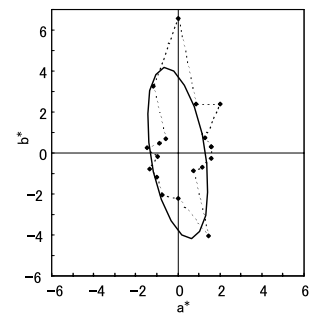


Fig.12 Tolerant ellipse for CIE ΔE^*_{ab}

測でき、本稿では示していないが、肌色 ($L^*=71$, $a^*=14$, $b^*=37$) のターゲットで同様の検討を行った際に、結果が悪いことがわかっている。またこのとき、F9用サンプルの結果は良好であった。F9とW_EDLはどちらも高演色形白色の蛍光灯で、F9はJIS記載⁴⁾の代表的蛍光灯である。

Fig.10にF9用プリントサンプルを各光源で照明した場合の色度図を示す。F9用サンプルのF9光源下での色度点は他の光源下での色度点の中央に位置しており、Fig.6のD_EDL用サンプルのように、 a^* 、 b^* 軸ともに分布の隅に位置するものと比べて、他の光源下であってもターゲットとの ΔE^*_{ab} が生じにくくなっていることがわかる。他の光源下であっても ΔE^*_{ab} が生じにくいことが、主観評価として判断をばらつかせ、相関性が低くなったと考えられる。図示していないが、F2用サンプルの他の光源下での色度は a^* 軸では中央に位置するものの、 b^* 軸ではマイナス側に位置し、F9よりも中央に位置していない。以上のことから本稿では、F9が最も良いと判断した。

3.3 色相依存性

次に、今回行った評価実験データを用いて、ターゲット色票に対しサンプルがどの色相にずれた場合に評価が下がるか解析した。Fig.11-a~cに、ターゲット色票と各サンプルの色相差を60°間隔で分類した結果を示す。図からおおよそ黄色や青の領域にずれた場合の相関が低く、その他の領域での相関が高いことがわかる。これは被験者

の感想とも一致していた。この結果は、CIELAB色空間がグレー付近の ΔE^*_{ab} を正確に表現できていないか、または領域により許容が異なることを示していると考えられる。更に、色相を20°間隔に分類した場合の ΔE^*_{ab} と評価点の相関図(図略)を求め、その色相ごとの相関図から計算した回帰直線(図略)から、評価点=2(許容)となる ΔE^*_{ab} を求めるとFig.12のような許容楕円が得られた。

4 まとめ

カラー複写機やプリンタの色合わせに用いる光源として、色合わせ時の光源と異なる光源下でも、プリントの色再現性が崩れにくい光源選択の手法を検討した。16種類の光源で色合わせしたプリントを12種類の光源下で主観評価し、その ΔE^*_{ab} と主観評価値の相関関係から、今回用いたトナーの組み合わせでは、色合わせにおけるロバストな光源がF9であることがわかった。

●参考文献

- 1) P.Hung, "Colorimetric calibration in electronic imaging devices using a look-up-table model and interpolations", J. Electron. Imaging 2(1), 53-61 (1993)
- 2) JIS Z 8723, 表面色の視感比較方法
- 3) Yamaya and P.Hung, "A Proposal of Medium-Illuminant Dependency Evaluation", ICIS2002, 431-432
- 4) JIS Z 8719, 条件等色指数-照明光条件等色度の評価方法