

肌の色を好ましく見せるLED光源の波長特性

Spectral Characteristics of LED Light Sources for Preferred Appearance of Facial Skin Color

山口 サヤカ 齋藤 孝 岩井 彌
Sayaka Yamaguchi Takashi Saito Wataru Iwai

要 旨

近年、LED (Light Emitting Diode) 光源は、その急激な技術進歩により、オフィスや住宅、店舗などの一般照明へと普及が進んでいる。LED光源は従来光源と比較して分光分布の制御が容易である。そこで、重要視対象物である人の肌の色に着目し、肌の色を好ましく見せるLED照明の開発を目的として、その波長特性を検討した。本稿では、その結果を報告する。肌の色の見えを評価するために、既往研究で有効とされたPS (Preference Index of Skin Color: 日本人女性の肌色の好ましき指数) と、相関色温度・ D_{UV} を指標として用いて、主観評価実験を行った。その結果、肌の色を好ましく見せるには、各色温度に最適なPSと D_{UV} の範囲が存在し、それは570 nm ~ 580 nmの波長域を中心に軽減させることで制御できることを明らかにした。

Abstract

This study aims to establish spectral characteristics in order to develop Light Emitting Diode (LED) light sources which improve the appearance of facial skin color, an important visual target for us. We conducted a subjective experiment with a novel index of the preference of facial skin color "PS" under various Correlated Color Temperature (CCT) and D_{UV} (the distance from the blackbody curve for the color temperature) conditions.

The results show the best ranges of PS and D_{UV} differ depending on CCT. It was also found that the key spectral component for preferred appearance of facial skin color is in the range between 570 and 580 nm.

1. はじめに

近年、LED光源はその急激な技術進歩により、オフィスや住宅、店舗などの一般照明へと普及が進んでいる。しかし、LED光源は、従来光源とは発光原理が異なることから、特異な分光分布を有しており、物体の色の見えに影響を与える可能性が高い。一方で、LED光源は従来光源と比較して分光分布の制御が容易であり、この特徴を生かした特有の分光分布をもつLED光源の開発が進んでいる。

従来、照明光源の演色性を評価する指標として、平均演色評価数 R_a が用いられてきた。これは、試験光下での色の見えが基準光下での色の見えに比べ、どれだけ一致しているか、つまり、色の見えの忠実性を評価する指標であり、 R_a の大小では色の見えの好ましさを論ずることはできない。一方、オフィスや住宅、店舗などの一般照明環境下では、本来の物体の色を正しく見せることよりも、どれだけ好ましい色に見せているかが重要になることが多い。特に、人の肌の色、とりわけ女性の肌の色については、照明分野に限らず、印刷、写真、テレビなどのさまざまな分野においても、物体色の好ましきとして重要な評価対象の1つとされてきた[1]-[6]。また、好ましい肌の色は、人種によって異なることが報告されており[7]-[10]、日本人女性の肌の色については、矢野らによって好ましきの評価方法が確立され、“日本人女性の肌の好ましき指数PS”として定量化されている[11]-

[14]。

LED光源の特性を活用し、重要視対象物である人の肌の色を好ましく見せるLED照明を開発することを目的として、肌の色の見えに関する主観評価実験を行った。本稿では、指標としてPSに着目し、肌の色を好ましく見せる波長特性を検討した結果を報告する。

2. 肌の色の好ましき評価方法に関する検討[15]

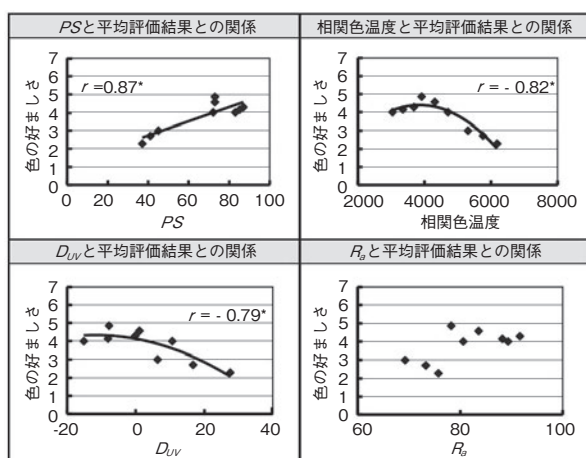
“日本人女性の肌の好ましき指数PS”は、赤色・緑色・青色の3種類の蛍光ランプの光出力を制御して任意の光色を再現した条件下で、各照明光により照射された日本人女性の肌の色の好ましきについて評価実験を行った結果から明らかにされた。しかし、前述のように、LED光源は従来光源とは異なる特性を有していることから、まずは、評価方法としてPSがLED光源にも適用できるかどうかを検討した。

実験では、平均演色評価数 R_a が70で相関色温度が5000 Kの白色LEDを搭載したダウンライト (当社製NDNN21940 LD1) 照明器具1台 (以下、LED_Wと記す) と、平均演色評価数 R_a が88で相関色温度が5000 Kの白色LEDを搭載したダウンライト (当社製NDNN21942 LD1) の前面にカラーフィルターを配して任意の波長のみを出力するようにした器具2台 (LED_R, LED_G) の計3台からの光を、半球形の白色発泡スチロールの内部に反射させて混色し、混色した光を被験者の顔に向けて

照明することのできる照明装置を用いた。そして、これら3種の光の混色比を変化させることで、第1表に示す9種類の照明条件を設定し、7名の被験者に対し、「肌の色の見えの好ましき」について7段階の言語評価尺度で評価させた。被験者は、前面に配置された鏡に映っている照明装置によって照明された自分の顔に対して評価した。第1図に、PS、相関色温度、 D_{UV} 、 R_a と評価値（全被験者の平均）との関係を示す。PSと評価値との間には、有意な正の相関関係（ $r=0.87$ 、 $p<0.05$ ）が存在することがわかった。また、相関色温度が4000 K付近までは、評価値が上昇する傾向にあるが、4000 Kを超えると評価値が下がることがわかった。 D_{UV} がマイナスのとき、つまり光源の色度座標が黒体放射軌跡の下側にあり光が赤みを帯びる条件では、評価値が高く、プラス方向のとき、つまり光源の色度座標が黒体放射軌跡の上側にあり光が緑みを帯びる条件では、評価値が低くなることがわかった。なお、 R_a と評価値との間には、高い相関関係は見られないことから、肌の色の好ましきについては、 R_a よりもPSの方が適切に評価できることがわかった。

第1表 3種の光の混色による9種の照明条件
Table 1 9 lighting conditions created by mixing light from 3 light sources

| 実験条件 | 相関色温度 | R_a | PS | D_{UV} |
|------|-------|-------|----|----------|
| 1 | 5312 | 69 | 45 | 6.39 |
| 2 | 5754 | 73 | 41 | 16.76 |
| 3 | 6185 | 76 | 37 | 27.56 |
| 4 | 3916 | 78 | 73 | -7.78 |
| 5 | 4308 | 84 | 73 | 1.08 |
| 6 | 4704 | 89 | 72 | 10.65 |
| 7 | 3042 | 81 | 83 | -15.17 |
| 8 | 3353 | 88 | 85 | -8.11 |
| 9 | 3689 | 92 | 87 | -0.16 |



第1図 PS / 相関色温度 / D_{UV} / R_a と色の好ましき評価との関係
Fig. 1 Relationships between PS/CCT/ D_{UV} / R_a and evaluations of preference of skin color

以上より、評価指標としてPSがLED光源にも適用できることが判明した。また、PS以外にも、相関色温度や D_{UV} において肌の色の好ましきと相関関係が見られたことから、PSに加え、相関色温度と D_{UV} を用いて検討を進めることとした。

3. 肌の色を好ましく見せる光色の検討[16]

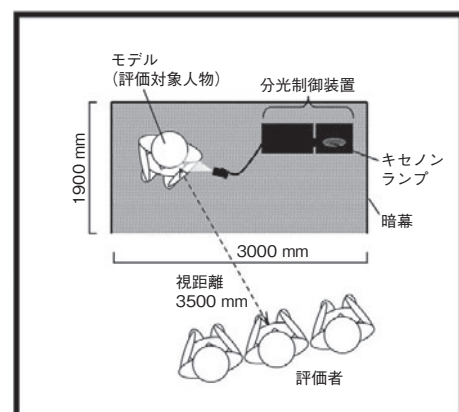
前章で明らかにした評価指標に着目し、肌の色を好ましく見せる光色を検討するために、主観評価実験を行った。

3.1 実験空間および実験条件

実験では、キセノンランプの光をグレーティングし、液晶フィルターによって強度を調整することで、任意の光色を再現できる装置（以下、分光制御装置と記す）を光源として用いた。消灯し暗室化された空間内において、化粧をした状態でグレーの服を着用した評価対象人物となるモデルの女性の頬辺りに対し、分光制御装置の光を照射することで、モデルの頬をさまざまな肌の色に再現することができる。第2図に実験空間を示す。

評価者は、第2表に示す実験条件を実現する光で照明されたモデルの肌の色を観察し、その見えについて評価した。

なお、実験条件については、相関色温度3000 K・4000 K・5000 Kの3条件、PS 80～100の5条件、 D_{UV} -10～10の5条件の組合せによる全75条件から、予備検証で評価が明らかに低いことが明確であった全色温度条件におけるPS 80～95の D_{UV} 10となる12条件を除いた計63条件に設定した。



第2図 実験空間
Fig. 2 Experimental space

第2表 実験条件

Table 2 Experimental conditions

| 実験条件 | 相関色温度 [K] | PS | D_{UV} | 実験条件 | 相関色温度 [K] | PS | D_{UV} | 実験条件 | 相関色温度 [K] | PS | D_{UV} | |
|------|-----------|----|----------|------|-----------|----|----------|------|-----------|----|----------|-----|
| 1 | 3000 | 80 | -10 | 22 | 4000 | 80 | -10 | 43 | 5000 | 80 | -10 | |
| 2 | | | -5 | 23 | | | -5 | 44 | | | -5 | |
| 3 | | | 0 | 24 | | | 0 | 45 | | | 0 | |
| 4 | | | 5 | 25 | | | 5 | 46 | | | 5 | |
| 5 | | | 85 | -10 | | | 26 | -10 | | | 47 | -10 |
| 6 | | | | -5 | | | 27 | -5 | | | 48 | -5 |
| 7 | | | | 0 | | | 28 | 0 | | | 49 | 0 |
| 8 | | | 5 | 29 | | | 5 | 50 | | | 5 | |
| 9 | | | 90 | -10 | | | 30 | -10 | | | 51 | -10 |
| 10 | | | | -5 | | | 31 | -5 | | | 52 | -5 |
| 11 | | | | 0 | | | 32 | 0 | | | 53 | 0 |
| 12 | | | 5 | 33 | | | 5 | 54 | | | 5 | |
| 13 | | | 95 | -10 | | | 34 | -10 | | | 55 | -10 |
| 14 | | | | -5 | | | 35 | -5 | | | 56 | -5 |
| 15 | | | | 0 | | | 36 | 0 | | | 57 | 0 |
| 16 | | | 5 | 37 | | | 5 | 58 | | | 5 | |
| 17 | | | 100 | -10 | | | 38 | -10 | | | 59 | -10 |
| 18 | | | | -5 | | | 39 | -5 | | | 60 | -5 |
| 19 | | | | 0 | | | 40 | 0 | | | 61 | 0 |
| 20 | | | 5 | 41 | | | 5 | 62 | | | 5 | |
| 21 | 10 | 42 | 10 | 63 | 10 | | | | | | | |

3.2 評価項目および実験手順

分光制御装置によって照明されたモデルの頬辺りの肌の色の見えに対し、評価者は「明るさ」、「健康さ」、「活気」、「自然さ」、「陽気さ」、「上品さ」、「美しさ」、「好ましさ」の計8項目を評価項目として、それぞれ7段階の言語評価尺度で評価を行った。実験に用いた評価項目および評価尺度を第3図に示す。

実験では、分光制御装置によって顔面鉛直面照度800 lxで照明されたモデルの頬辺りの肌の色を、視距離3500 mmの位置に着席した評価者が30秒間観察した後、前述した評価項目に従って評価した。評価終了後、次の照明条件に移る際には、分光制御装置をいったん消灯し、

| 評価項目 | 非常に | かなり | やや | どちらでもない | やや | かなり | 非常に |
|------|-------|-----|----|---------|----|-----|--------|
| 明るさ | 明るい | | | | | | 暗い |
| 健康さ | 健康そう | | | | | | 不健康そう |
| 活気 | 活気がある | | | | | | 活気のない |
| 自然さ | 自然 | | | | | | 不自然 |
| 陽気さ | 陽気 | | | | | | 陰気 |
| 上品さ | 上品 | | | | | | 下品 |
| 美しさ | 美しい | | | | | | 汚い |
| 好ましさ | 好ましい | | | | | | 好ましくない |

第3図 評価項目および評価尺度
Fig. 3 Categorical scales

同じ相関色温度の異なる次の条件でモデルを照明し、評価者は30秒間観察した後に、次の照明条件に対して評価した。この一連の流れを同じ相関色温度の条件内でランダムな順序で繰り返し、相関色温度の条件を変える場合には、モデルの頬を基準光である D_{65} の光を鉛直面照度800 lxで照明し、3分間の順応を行った後に、同様の流れで評価を繰り返した。第4図に実験手順を示す。なお、評価者は視覚色覚正常な20～40代の女性17名とした。

| モデルおよび実験者 | 評価者 |
|-----------------------------|---|
| ・インストラクション | ・インストラクション |
| ・モデルに D_{65} 照明-3分 | ・モデルに D_{65} 順応-3分 |
| ・照明シャットダウン (条件1照明準備) | ・モデル照明 条件1順応-30秒 ・モデル照明 条件1評価 |
| ・モデルに条件1を照明-30秒 | |
| ・照明シャットダウン (条件2照明準備) | ・モデル照明 条件2順応-30秒 ・モデル照明 条件2評価 |
| ・モデルに条件2を照明-30秒 | |
| ⋮ | ⋮ |
| ・照明シャットダウン (D_{65} 照明準備) | ・モデル照明 D_{65} 順応-3分 |
| ・モデルに D_{65} を照明-3分 | |
| ・照明シャットダウン (条件22照明準備) | ⋮ ・モデル照明 条件42順応-30秒 ・モデル照明 条件42評価 |
| ・モデルに条件22を照明-30秒 | |
| ⋮ | ⋮ |
| ・照明シャットダウン (D_{65} 照明準備) | ・モデル照明 D_{65} 順応-3分 |
| ・モデルに D_{65} を照明-3分 | |
| ・照明シャットダウン (条件22照明準備) | ⋮ ・モデル照明 条件42順応-30秒 ・モデル照明 条件42評価 |
| ・モデルに条件22を照明-30秒 | |
| ⋮ | ⋮ |

第4図 実験手順
Fig. 4 Experimental procedure

3.3 実験結果および考察

全評価者による平均値の結果より、全評価項目を通して、同じ相関色温度では、 D_{UV} が高い条件 ($D_{UV} 5 \sim 10$) ではすべての評価項目で評価が低く、 D_{UV} が低い条件 ($D_{UV} -5 \sim -10$) ではすべての評価項目で評価が高い傾向にあった。これは、 D_{UV} が高い条件 ($D_{UV} 5 \sim 10$)、つまり光源が緑みを帯びる条件では、肌の色が好ましくなく、一方で、 D_{UV} が低い条件 ($D_{UV} -5 \sim -10$)、つまり光源が赤みを帯びる条件では、肌の色が好ましいことを示している。特に、 D_{UV} が10の条件においては、PSが100であっても、すべての項目において非常に低い評価

結果が得られたことから、 D_{UV} は0以下の条件の方が、肌の色が好ましく見えることがわかった。第5図に、PSと評価者の「健康さ」、「自然さ」、「好ましき」に関する評価結果の平均値との関係を、相関色温度・ D_{UV} ごとに示す。 D_{UV} が0より低い条件 (D_{UV} -5 ~ -10) においては、「健康さ」の評価が特に高くなっている。これは、光が赤みを帯びることで、肌の色が赤みがかかり、評価者にとって健康そうに見えたためであると考えられる。一方で、 D_{UV} が-10の条件においては、PSの値が高くなると、評価値、特に、「自然さ」の評価が下がる傾向がある。また、評価者から、飲酒後を想像させるコメントが寄せられたことから、 D_{UV} が低い条件であっても、値が極端になり過ぎると、「不自然な」印象により、評価が下がると推測する。

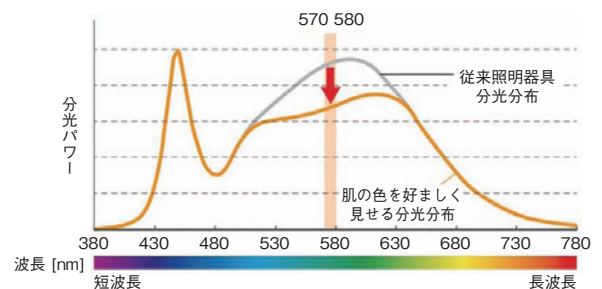
以上より、肌の色の好ましき評価は、PSの値に対して単調に増減するわけではなく、各色温度に最適なPS・ D_{UV} の範囲が存在することが判明した。

4. 肌の色を好ましく見せる波長特性の検討

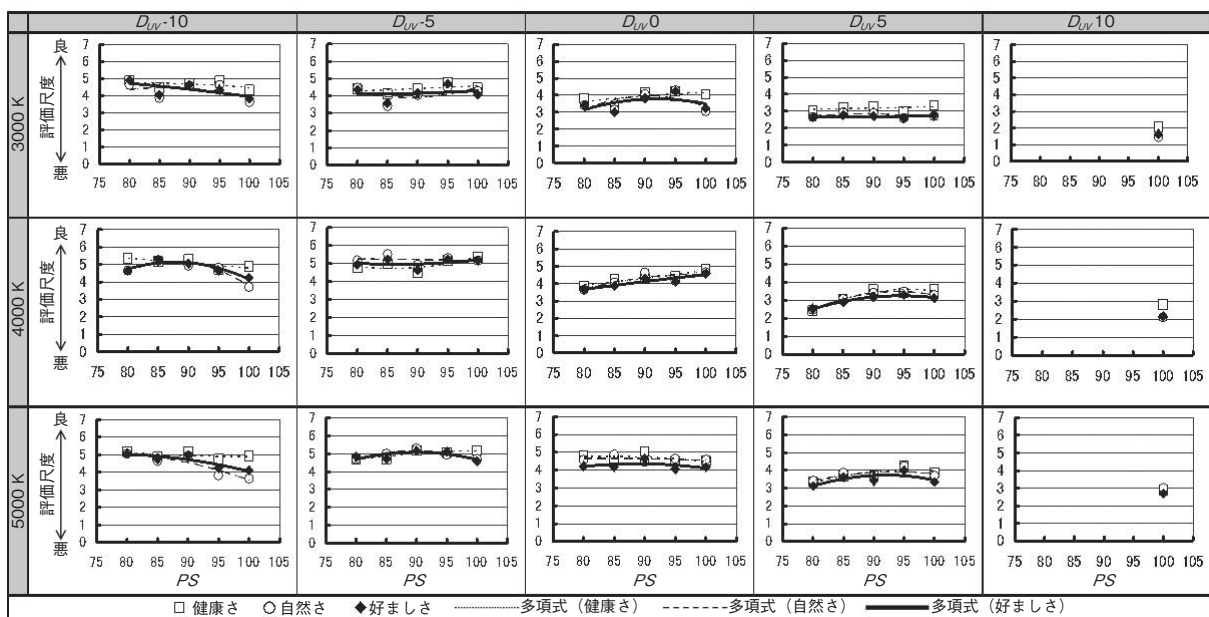
肌の色を好ましく見せるLED照明の開発に向けて、前章で述べた各色温度に最適なPS・ D_{UV} の範囲を満足する光色と波長特性を、人の肌の光学特性に基づきながら検討した。

人の肌の色を構成する色素として、メラニン、ヘモグロビン、カロテンなどが存在するが、既往研究[17]-[18]

から、肌の色に最も影響するのが、メラニンとヘモグロビンであることがわかっている。メラニンとは毛髪などに含まれる黒褐色の色素であり、ヘモグロビンとは血液の色の元になっている深赤色の色素である。肌の色は、メラニンが多いほど黒く見え、ヘモグロビンが多いほど赤みを帯びて見えるが、メラニンと血液の分光反射率の関係から、570 nm ~ 580 nmの波長域には、ヘモグロビンの吸収による反射率の低下が存在するため、メラニンの反射率の影響が顕著になる。したがって、黒褐色の色素を有するメラニンの反射率が高い570 nm ~ 580 nmの波長域を制御することで、肌の色の見えの好ましきが変化すると考え、従来のLED光源の分光分布から570 nm ~ 580 nmの波長域の光を制御した。第6図に分光分布のイメージを示す。導出した分光分布は、570 nm ~



第6図 分光分布のイメージ
Fig. 6 Concept of spectral design



第5図 平均評価結果
Fig. 5 Mean of each subjective estimation item

580 nmの波長の光を減らしたもので、この分光分布の光で照明することで各色温度に最適な $PS \cdot D_{UV}$ の範囲を満足することがわかった。この結果から、570 nm～580 nmは肌の色を好ましく見せる光色を実現するのに重要な波長域であることが明らかになった。

5. まとめ

人の肌の色を好ましく見せるLED照明を開発することを目的として、肌の色の見えを評価する主観評価実験を行い、肌の色を好ましく見せる分光分布を導出した。その結果、肌の色を好ましく見せるには、各色温度に最適な“日本人女性の肌の好ましき指数 PS ”と D_{UV} の範囲が存在し、その光色を実現するのに、570 nm～580 nmが重要な波長域であることがわかった。

物体色の好ましきとして最も重要な評価対象とされてきた人の肌の色は、オフィスや住宅、店舗など、あらゆる照明空間で必要とされ得る。今後は、これら種々の空間に対応した照明器具に適用するだけでなく、異なる人種の肌の色の好ましさを評価し、さまざまな人種の肌の色に対応したLED照明にも応用展開していきたい。

参考文献

- [1] 佐藤千穂 他, “素肌・化粧肌見えに及ぼす照明の影響,” 照明学会, vol.77, no.10, pp.37-45, 1994.
- [2] 鈴木恒男 他, “化粧肌色見えに基づく蛍光灯演色性評価への試み,” 日本色彩学会, vol.18, no.1, pp.116-117, 1994.
- [3] 西村武 他, “カラーテレビ画像の好ましい色再現,” テレビジョン, vol.28, no.8, pp.623-632, 1974.
- [4] 羽石秀昭 他, “ハードコピーにおける好ましい肌色再現(1) 好ましい肌色分布についての基礎的検討,” 日本写真学会, vol.56, no.2, pp.123-127, 1993.
- [5] 浅田卓哉 他, “ハードコピーにおける好ましい肌色再現(2) ポートレート画像の好ましい肌色,” 日本写真学会, vol.57, no.6, pp.399-402, 1994.
- [6] 小勝負正治 他, “印刷による女性の好ましい肌色再現: 特定画像と一般画像との比較,” 日本色彩学会, vol.27, Sup., pp.40-41, 2003.
- [7] 鈴木恒男 他, “好ましい肌色に関する人種間の比較,” 第6回色彩工学コンファレンス論文集, pp.57-60, 1989.
- [8] 鈴木恒男, “好ましい肌色再現に関する人種間の比較—白人の肌色に対する日本人と白人の好み,” 日本色彩学会, vol.14, no.3, pp.153-161, 1991.
- [9] Fan Ying 他, “日本人, 中国人, 韓国人の好ましい肌色～系列カテゴリー法およびSD法による調査～,” カラーフォーラムJAPAN2008予稿集, pp.51-54, 2008.
- [10] 蔡韻 他, “「色の白いは七難隠す」? —理想の肌の評価要素における日中女性の比較,” 日本色彩学会, vol.34, Sup., pp.92-93, 2010.
- [11] 矢野正 他, “照明光の色温度の違いによる顔色の評価,” 照明学会, vol.79, no.11, pp.55-61, 1995.
- [12] 矢野正 他, “照明光による顔色の見えと評価,” 照明学会, vol.79, no.5, pp.198-203, 1995.
- [13] T. Yano et al., “Preference for Japanese complexion color under illuminance,” Color Research & Application, vol.22, no.4, pp.269-274, 1997.
- [14] 矢野正 他, “照明光下での日本人女性の肌色に対する好ましき評価方法,” 照明学会, vol.82, no.11, pp.895-901, 1998.
- [15] 岩井彌 他, “日本人の肌の色を好ましく見せるLED照明の開発 その1: 評価方法の検討,” 日本色彩学会, vol.36, Sup., pp.28-29, 2012.
- [16] 山口サヤカ 他, “日本人の肌の色を好ましく見せるLED照明の開発 その2: 分光分布の検討,” 日本色彩学会, vol.36, Sup., pp.30-31, 2012.
- [17] E. A. Edwards et al., “The pigments and color of living human skin,” The American Journal of Anatomy, vol.65, no.1, pp.1-33, 1939.
- [18] 吉川拓伸, “肌色を科学する - 第1回 -, ” 日本色彩学会, vol.29, no.1, pp.31-34, 2005.

執筆者紹介



山口 サヤカ Sayaka Yamaguchi
エコソリューションズ社 ライティング事業グループ
Lighting Business Group, Eco Solutions Company



斎藤 孝 Takashi Saito
エコソリューションズ社 ライティング事業グループ
Lighting Business Group, Eco Solutions Company



岩井 彌 Wataru Iwai
エコソリューションズ社 ライティング事業グループ
Lighting Business Group, Eco Solutions Company