

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 23 日現在

機関番号：84431

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K00807

研究課題名(和文) 疑似白色LED光源の新規な演色性評価法の開発とその応用

研究課題名(英文) Development of New Method of Measuring Color Rendering Properties for Pseudo-white LED and its Applications

研究代表者

吉村 由利香 (Yoshimura, Yurika)

地方独立行政法人大阪産業技術研究所・森之宮センター・研究室長

研究者番号：00416314

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：LEDの分光分布とその照明下の物体色の関係、演色性評価数の関係について調べた。その結果、物体色評価と演色性評価で使用される表色系は異なるため、両者の比較、解析は困難であり、LEDの分光分布波形の変化による光源の相関色温度や色順応の影響を考慮する必要があることがわかった。そこで、表色系の影響を受けない視細胞の刺激量(XYZ値)に着目して、基準太陽光源下のXYZ値との偏差から色順応の影響を見積り、その偏差と演色評価数との関係を調べた。その結果、分光分布波形によるXYZ値の偏差、相関色温度、演色評価数との関係が明らかとなり、高い演色性を持つLEDの分光分布波形について知見を得ることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

一般に使われている白色LED照明は青色光と黄色光を用いた二波長形の分光分布であり、従来の白熱球や蛍光灯などの連続型白色光や三波長形の白色光とは分光分布が異なっているため、LED照明下における物体色の見え方は特異的となる。しかし、LEDは標準光源の設定がないため色彩計測ができず、工業製品の色彩管理の観点から改善が求められている。

また、照明器具の分野では、照明ランプの色再現性は演色評価数で評価されるが、演色評価数は、LEDの場合、色彩に依存して演色評価数が変化し、視感との間にズレを生じるとの報告がある。本研究では、白色LED照明に適応可能な演色性の評価方法の構築とその応用について研究を行った。

研究成果の概要(英文)：The relationship between the spectral distribution of pseudo-white LED, the object colors under the LED and the color rendering property of the LED was studied. The color system for object colors is different from that for light source colors, and those color parameters could not compare. Additionally, the color adaptation effect on the object colors could not estimate, then, we focused on the tristimulus values of object colors, which are not affected by the color system. The effect of the color adaptation could be estimated from the linearity of the total deviation of the tristimulus values between the LED and D65 standard illuminant. It was clarified that the relationship between the spectral distribution of the LED, the correlated color temperature and the color rendering property of the LED. We found the new knowledge of the spectral distribution of LED to improve the color rendering property of the light from the results.

研究分野：色彩学

キーワード：白色LED 分光分布 分光反射率 演色評価数 色順応 三刺激値 偏差 色温度

様式 C - 19, F - 19 - 1, Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

日本の LED 技術は高く、青色ダイオードの発明と白色 LED 光の開発で、世界の LED 市場を牽引してきた。しかし、近年、欧米においても LED の技術開発が急速に進み、さらに、中国や韓国などの安価な LED 製品が急速に市場に出回り始めたことにより、日本の LED 産業は、これまでの右肩上がりの成長期から機能性を追求する成熟期への転換を余儀なくされている(1)。

このような状況の中で、近年の LED の研究動向は、「光の質」である光色や演色性（照明による色再現性）などを重視し、製品の差別化を目指す開発が増えている。近年、アメリカで行われた調査では、照明器具に求められる性能として、価格や消費電力よりも光の品質を重視するという結果が報告されており(2)、今後は、製品の色彩デザインや製造現場の色彩管理、店舗での色彩見え方などに影響を及ぼす LED 光源の演色性に関する研究が世界的に重要になると考えられる(3)。

この照明光源の光の質は、光源のスペクトル分布によって大きく変化する。近年、世界で主流となっている二波長型の白色 LED は、補色関係にある青色（ダイオード発光）と黄色（蛍光発光）の混色による疑似的な白色光である。このような光は、見かけ上は白色光であるが、赤緑青（RGB）に感度を持つヒトの視覚に対してはエネルギー分布的な不一致があり、演色性が低くなる。そのため、疑似白色 LED 光源下では、照明による色違いなどの問題が生じやすく、その演色性の改善が望まれている。

2. 研究の目的

これまでの研究で、LED の標準光源化について検討し、疑似白色 LED を光源として物体色の色彩パラメータ($L^*a^*b^*$)を算出するシステムを作製した。これを用いて、様々な色相・明度・彩度を持つ物体色の LED 照明下の色彩値を算出した。また、これらの色彩値と疑似白色 LED ランプの演色評価数 CRI 値との関係を検証した。(CRI 値：ランプの色再現性の指標で、太陽光との一致度を示す。CRI 値が 100 のとき、同じ相関色温度の太陽光と色味が一致する。代表的な物体色 8 色の CRI 値の平均値を平均演色評価数 Ra と呼び、ランプの色再現の性能評価に用いる。)その結果、色彩値と演色性の相関は、物体色の色相に依存して変化し、特に、赤と青の色相の物体色において、相関性が低くなることが明らかとなった(4)。この結果から、疑似白色 LED 光源下の物体色の見え方について、演色評価数と視覚の評価には差異があり、白色 LED 光源の演色性を正確に評価するには、LED 光源の分光分布の特徴を考慮した新しい演色性評価システムを開発することが必要と考えられた。

そこで、本研究では以下を目的として研究を行った。

疑似白色 LED に対応した演色性評価方法の開発

疑似白色 LED の演色性を正確に評価するために、従来の演色性評価法を修正し、疑似白色 LED に対応できる新規な演色評価方法を開発する。

高い演色性を持つ疑似白色 LED のスペクトルの検討

演色性の高い LED の設計を目的として、疑似白色 LED のスペクトル波形と演色性の関係を明らかにする。

3. 研究の方法

3.1 試料

疑似白色 LED ランプは、代表的な市販の疑似白色 LED ランプ 4 種類(LED1: 昼光色 Tcp6181K/ 7.2W/ 499 ルーメン, LED2: Tcp5059K 昼白色/ 6.0W/ 485 ルーメン, LED3: 昼光色 Tcp6463K/ 6.9W/ 649 ルーメン, LED4: 電球色 Tcp2808K/ 6.9W/ 576 ルーメン)を使用した。白色 LED として、RGB 三波長形白色 LED (LED5: 昼白色 Tcp4732K/ 4.0W/ 70 ルーメン)を用いた。比較の標準光源として、JIS Z 8719 の普通形蛍光灯 F6, 高演色形蛍光灯 F8, 三波長域発光形蛍光灯 F10 と、JIS Z 8720 の A, D65, CIE 昼光の相対分光分布を使用した。物体色試料として、JIS Z 8726 の演色評価数計算用の試験色データと、布製色見本 SCOTDIC 製 COLOR FINDER on polyester の赤, 黄, 緑, 青 (P05, P25, P45, P67)を用いた。

3.2 測定方法

試料光源の光学測定は、大塚電子(株)製 全光束測定システム FM-1000L0, Labsphere 製 積分球装置 LMS-650, コニカミノルタセンシング(株)製 分光放射照度計 CLK-500A を用いて、分光分布、相関色温度を測定した。物体色はコニカミノルタセンシング(株)製 CM-5 を用いて色見本の分光反射率を測定し色彩計算に用いた。

3.3 演色評価数 CRI 値と LED 照明下の $L^*a^*b^*$ および E^* の算出

疑似白色 LED (試料光源) のスペクトルと物体色サンプルの反射率をパラメータとして、LED 光源下の物体色の $L^*a^*b^*$ と色差 E^* 、および、試料光源の演色評価数 CRI 値を計算するプログラムを作成した。色彩パラメータの算出は、JIS Z 8701 (XYZ 系等色関数), JIS Z 8720 (標準光源), JIS Z 8722 (物体色の測定法), JIS Z 8781-4 (CIE 1976 $L^*a^*b^*$ 色空間)を参考に行った、

4. 研究成果

4.1 疑似白色 LED に対応した演色性評価方法

4.1.1 LED 照明下と同じ相関色温度の太陽光下の物体色の色彩値

疑似白色 LED 照明下の色彩の特徴を調べるため、代表的な分光分布を持つ昼光色疑似白色 LED3 (相関色温度 6463k) と、このランプと同じ相関色温度の太陽光 (CIE 昼光) について、各色相の物体色の L^* 値, a^* 値, b^* 値を比較した(5,6)。LED 照明下と太陽光の相関色温度を一致させることで、光色を合わせて色順応効果を減少させることができる。 L^* 値は、すべての色相において、LED と太陽光とで良好な一致を示した。 a^* 値, b^* 値は、同じ相関色温度の光源であっても、分光分布が異なる太陽光と LED では、物体色の色相に依存して、色彩に違いが認められた。LED 照明による物体色のズレ方向は、太陽光に対して赤の色彩は彩度が低下する方向へ、黄と緑の色相は黄緑方向へ、青の色相は赤味が増える方向にシフトした。また、彩度が高い色彩ほどズレ量が大きくなる傾向が認められた。相関色温度が 5000 k の三波長型蛍光灯 (F10) と太陽光では、両者の色の違いは比較的小さかった。これは F10 光源が RGB 三波長型であるため、ヒトの視覚の RGB 型の感度分布と合致しやすいことによると考えられる。

4.1.2 LED 照明の演色評価数と色相

一般に、照明ランプの色彩の再現性 (演色性) は CRI 値で評価される。疑似白色 LED では、赤に関する CRI 値が低くなる傾向が知られているが、実際の視感では CRI の値ほどの違いは認識されないことが多い(5)。そこで、代表的な色相 (赤, 黄, 青, 緑) について、LED3 下の色彩 (試験色) と CIE 昼光 (LED3 と同じ相関色温度 6463k) 下の色彩 (基準色) について色差 E^* を算出し、 E^* 値と LED3 の CRI 値の比較を行った。その結果、 E^* 値に対する CRI 値は色相によって傾向が異なり (Fig.1), 特に赤の色相では他の色相に比べて、CRI 値が低くなる傾向が示された。この E^* に対する CRI のプロットからその傾きを算出して、各色相における E^* 値と CRI 値の関係を調べた (Fig.2)。赤の色相ではプロットの傾きが 1 より小さく、その CRI 値は全般に低い値をとり、視覚による評価よりも厳しい結果となることが示された。逆に、青の色相などでは傾きが 1 より大きく、演色性評価は甘く見積もられる傾向があることが分かった。その要因としては、 E^* が $L^*a^*b^*$ 表色系を使用しているのに対し、CRI 値は $U^*V^*W^*$ 表色系を使用していることが考えられた。色相間で評価に均一性を持たせるには、Fig.2 の傾きの係数について、その逆数を CRI 値に乗じて補正する方法が考えられる。

4.2 高い演色性を持つ疑似白色 LED のスペクトルの開発

4.2.1 LED の分光分布と光源の色度座標の関係

LED の分光分布と物体色の色彩の見え方の関係を調べるため、デジタル的に LED のピーク波長とピーク幅を変化させ、それによる物体色の色彩値の変化を調べた(7)。まず、LED 光源の分光分布が変化すると光源の色度座標が変化することによって光源色 (ランプの色味) が変化して物体色の見え方に影響することから、分光分布の変化による LED 光源の色度座標 (白色点) の変化について調べた。LED3 の 460nm と 550nm のピークについて、そのピーク位置と半値幅を段階的に変化させると、その色度座標は変化し、それぞれのスペクトル波形と白色点の色度座標の関係が明らかとなった。460nm のピーク強度を変化させた場合は、光源の色度座標が大きく変化し、色度図上の黒体軌跡から外れ ($duv \pm 0.02$), 光源色が着色して白色光源ではなくなった。LED の色度座標に大きな変化を与えずに、白色光を維持した状態で分光分布を変化させるには、主に 550nm 付近のピーク半値幅および 485nm 付近の凹部の強度を変化させることが有効であることがわかった (Fig.3)。高い演色性を示す LED の分光分布の設計には、これらのピークの加工が有効であると考えられた。

4.2.2 LED の分光分布と三刺激値の関係

Fig.2 に示した同じ相関色温度の LED 光と太陽光下の演色評価数 CRI 値とヒトの視感 E^* 値の関係性について、その相関性が色相に依存する要因として、 E^* が $L^*a^*b^*$ 表色系を使用しているのに対し、CRI 値は $U^*V^*W^*$ 表色系を使用しているため、表色系の違いの影響が考えられた。そこで、表色系の影響を受けない評価方法として、物体色の三刺激値に着目した。色彩の知覚において人間の脳が受ける刺激は、光源の分光スペクトルと物体色の反射率曲線と 3 種類の視細胞の感度分布曲線の積算値である三刺激値 (X 刺激, Y 刺激, Z 刺激) で表すことができ、このプロセスでは表色系への変換は行われていない。そのため、三刺激値を用いることで、表色系の影響を受けず、物体色の見え方と光源の分光分布の関係を考察できる可能性がある。

そこで、検証のため、演色性を評価するための代表的な物体色 (演色評価用試験色 R9-R15) を用い、疑似白色 LED ($T_c: 6463K$) の分光分布波形が、物体色の三刺激値に及ぼす影響を調べた。赤及び青の物体色 (演色評価数色票 R9, R12) の結果を Fig.4 に示す。赤の物体色では LED の 550nm のピークに由来する X 刺激と Y 刺激のピーク波形 ($\lambda_{max}: 620nm$) が、基準の CIE 昼光に比べて短波長側にピークシフトし長波長のエネルギーが減少した。一方、LED の 460nm のピークに起因する X 刺激と Z 刺激のピーク強度 ($\lambda_{max}: 450nm$) は CIE 昼光よりも大幅に増大した。一方、R12 (青) の物体色では、450nm ピークの X 刺激・Z 刺激が増大するが、Y 刺激が大幅に低下するために基準光との差が生じることが推測された。これらの結果は、疑似白色 LED 光源に特有の赤と青の演色性の低さの要因になることが考えられた。また、色票の反射率曲線が比較的フラットな R13, R14, R15 (緑, 肌色系) の物体色では、LED と太陽光でズレが少なく、

LED と太陽光の三刺激値の面積比は 1 に近くなり、疑似白色 LED の演色評価数 CRI 値と傾向が一致した。

以上の結果から、各色相における LED の三刺激値ピーク面積の基準光に対する偏差を算出することで、三刺激値の偏差で疑似白色 LED の演色性を表色系（色空間）に変換せず簡易的に評価できる可能性が示唆された。

4.2.3 三刺激値偏差における色順応の影響

上記の三刺激値の偏差には色順応の影響が含まれる。そこで、色順応補正がされた CRI 値算出用パラメータ E_i 値を用いて、三刺激値の偏差が含む色順応の影響を以下の方法で調べた。

ピーク波形をデジタル的に変化させた LED の分光波形を作成し、その光源下と太陽光（同じ相関色温度の基準光）下の三刺激値との偏差を算出する。

三刺激値偏差と CRI 値算出用パラメータ E_i 値との相関関係を調べ、その直線性より色順応の影響を見積もる。

デジタル的に作成する LED の分光波形として、4.2.1 の結果を参考に、LED 光源の色度座標に大きな変化を与えず、その分光波形を変化させられる 550nm のピーク半値幅変化および 485nm の凹部の強度変化について、スペクトルの加工を行った。550nm のピーク半値幅を広げた場合（500nm*W2.1）、CRI 値が改善されると同時に三刺激値偏差が減少して、 E_i 値と三刺激値偏差の直線性を示す相関係数は 0.95 に改善された（Fig.5）。色順応補正を行っている E_i 値と色順応補正を行っていない三刺激値偏差との直線関係が保たれることから、これらの LED 光と基準光の間で色順応の影響は比較的小さいことが推測された。一方、LED の分光分布の 485nm の凹部分の強度を 3 倍（485nm*H3.0、 $T_c = 7313K$ 、 $duv = 0.0043$ ）に変化させた場合には、 E_i 値と偏差の直線性が消失した。試験光と基準光の三刺激値の比は、すべての試験色で Z 刺激の比率が減少した。これは 485nm の凹部分の強度が高くなったことにより試験光の相関色温度が上昇し、黒体軌線からの距離（ duv 値）も大きくなって色順応の影響が増大したためと考えられた。

4.2.4 LED の分光分布波形と演色性の向上

上記の結果から、三刺激値の偏差と E_i 値の直線性が保たれる場合において、色順応の影響を少なくして LED の分光分布波形が物体色見え方に及ぼす影響が評価できることが推測された。その際、三刺激値の偏差の構成成分である x 刺激、y 刺激、z 刺激のそれぞれの偏差の状態から、演色性低下の要因となっている刺激の種類または波長域について情報を得ることができた。この情報を基に、偏差が小さくなるよう LED の分光分布を変化させたところ、演色評価数を向上させることができた（Fig.6）

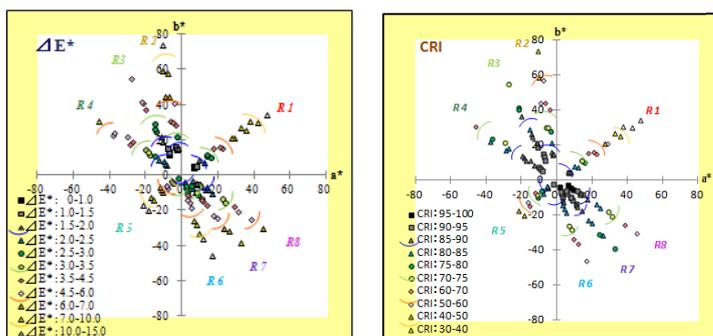


Fig.1 ΔE^* and CRI values of the object surface colors in a^*b^* chromaticity diagram.

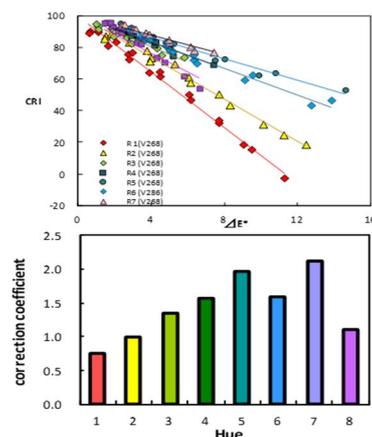


Fig.2 Effect of hue of the object surface colors on CRI and ΔE^* values under the pseudo-white LED.

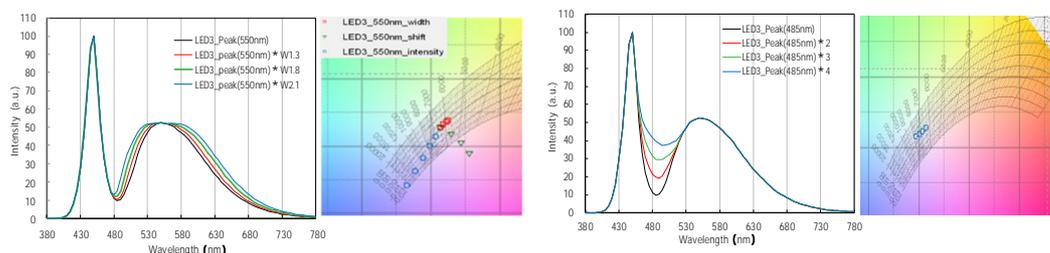


Fig.3 The modified relative spectral distribution curves of LED and the chromaticity coordinates.

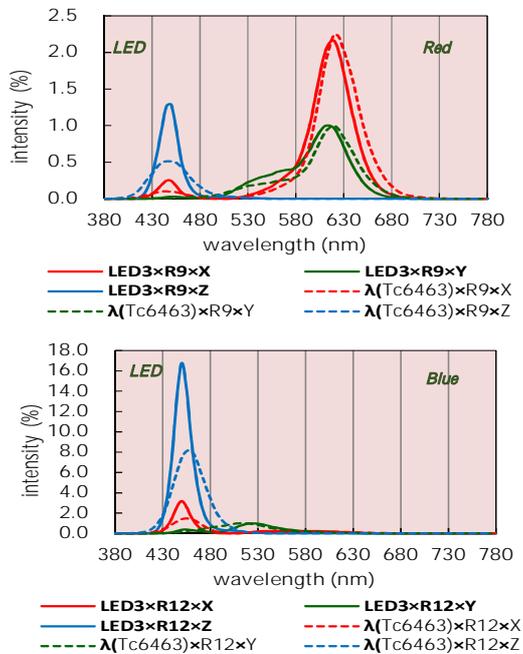


Fig.4 XYZ tri-stimulus curves of standard object color under the pseudo white-color LED lamp and CIE standard daylight.

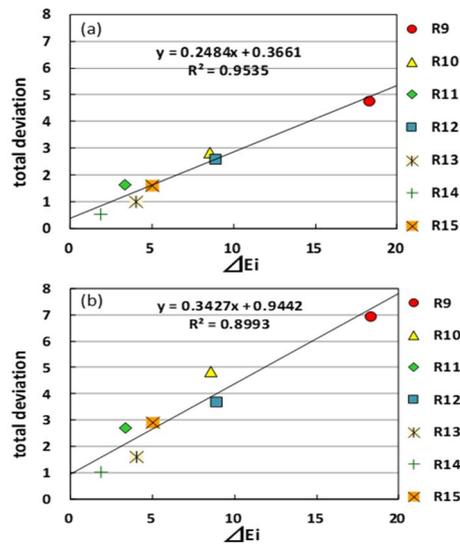


Fig.5 Relationship between ΔE_i and deviation of the tristimulus values of the colors under the digital processed LED (550nm peak width).
 (a) 550nm*W2.1: Tc5836K, duv=0.0017
 (b) 550nm*W1.0: Tc6443K, duv=0.0017

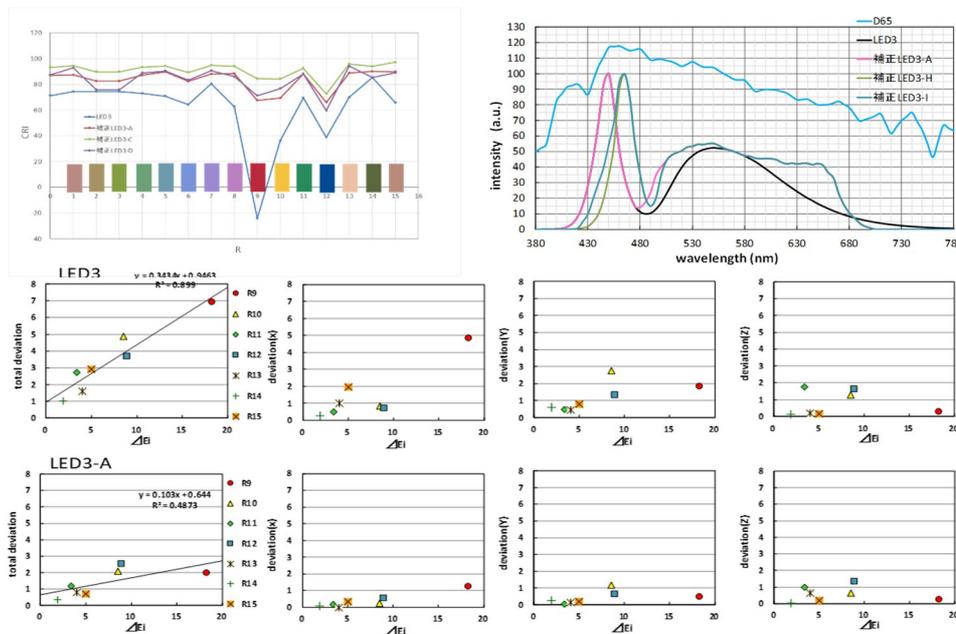


Fig.6 The modified relative spectral distribution curves of LED by the deviation of tristimulus values.

参考文献

- (1) 富士経済, <https://www.fuji-keizai.co.jp/market/14065.html>, 9/18/2014.
- (2) Laura Peters, LEDs Magazine Japan, (12), 18(2011).
- (3) W. Davis, Y. Ohno, Proc. of Fifth International Conference on Solid State Lighting, 2005 (SPIE 2005), 59411G-1 (2005, Bellingham).
- (4) 吉村由利香他, 「疑似白色 LED 光源の演色性と LED 照明下の物体色の関係」, 科学と工業, 89, 89(2015).
- (5) 吉村由利香他, 「疑似白色 LED 光源の演色性と物体色の色彩」, JCSAJ, Vol.41, No.3, 125(2017).
- (6) 吉村由利香他, 「疑似白色 LED の光源スペクトルと物体色の色彩」, JCSAJ, Vol.42, No.3, 185(2018).
- (7) 吉村由利香他, 「白色 LED の分光分布と物体色の三刺激値の関係」, JCSAJ, Vol.43, No.3, 151(2019).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 吉村 由利香, 大江 猛	4. 巻 41
2. 論文標題 疑似白色LED 光源の演色性と物体色の色彩	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 日本色彩学会誌	6. 最初と最後の頁 125-127
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.15048/jcsaj.41.3_125	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 吉村由利香, 大江 猛	4. 巻 42
2. 論文標題 疑似白色LED の光源スペクトルと物体色の色彩	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本色彩学会誌	6. 最初と最後の頁 185-187
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.15048/jcsaj.42.3_185	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 吉村 由利香, 大江 猛	4. 巻 43
2. 論文標題 白色LED の分光分布と物体色の三刺激値の関係	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本色彩学会誌	6. 最初と最後の頁 151-154
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.15048/jcsaj.43.3_151	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 吉村由利香, 大江 猛
2. 発表標題 LED光源の分光分布と物体色の関係
3. 学会等名 繊維学会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 吉村由利香, 大江 猛
2. 発表標題 LED照明下の物体色の見え方のシミュレーション
3. 学会等名 日本不織布協会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 吉村 由利香, 大江 猛
2. 発表標題 疑似白色LED 光源の演色性と物体色の色彩
3. 学会等名 日本色彩学会第48回全国大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 吉村由利香、大江猛
2. 発表標題 疑似白色LED照明による文化財の色彩と色ズレ
3. 学会等名 文化財保存修復学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉村由利香、大江猛
2. 発表標題 疑似白色LEDの光源スペクトルと物体色の色彩
3. 学会等名 日本色彩学会第49回全国大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉村由利香, 大江 猛
2. 発表標題 白色LED の分光分布と物体色の三刺激値の関係
3. 学会等名 日本色彩学会第50回全国大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	大江 猛 (Ohe Takeru) (10416315)	地方独立行政法人大阪産業技術研究所・森之宮センター・研究主任 (84431)	