

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 19 日現在

機関番号：84421

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24500937

研究課題名(和文)LED光源の標準化による物体色計算・演色性評価システムの開発

研究課題名(英文)Development of Color Measurement System by LED Standard Illuminant and Color Rendering Property System for LED Lamp

研究代表者

吉村 由利香(YOSHIMURA, YURIKA)

地方独立行政法人大阪市立工業研究所・生物・生活材料研究部・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) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：擬似白色LED照明に特有の「物体色の色違い」の問題を解決するため、LED照明下の物体色の色彩シミュレーションシステムについて研究した。まず、LED光源による物体色の色ズレを定量するため、擬似白色LEDの演色評価数(太陽光下の色彩の見え方との一致性を示す)と人間の視感によるLED下の物体色の色彩値の関係について検討した。その結果、擬似白色LEDではその特殊な分光分布他によって、他の白色照明には認められない特異なズレが生じることがわかった。これらの結果から、LED光源下の色彩を計算するために必要となるLED標準光源について有用な知見を得ることができた。

研究成果の概要(英文)：A pseudo-white LED is composed of a blue light emission diode and a yellow fluorescent material, and the spectrum is different from the other general white light sources. It causes the problem of color shift of object surface color under the LED illumination. In order to solve the problem, the new color simulation system for LED illuminant was studied. We calculate the color rendering properties of pseudo-white LED lamps with various kinds of hue, value and chroma of object surface colors, and investigate the relationship between the color rendering properties of pseudo-white LED and the colorimetry  $L^*a^*b^*$  values which match with human visual sense. From the results, the pseudo-white LED has a large amount of special color shift, depending on the hue of the surface color. It arises from the peak strength and wavelength of the spectral distribution of the pseudo-white LED.

研究分野：繊維、繊維加工、染色、色彩工学

キーワード：LED光源 演色性 分光分布 色差 標準光源

## 1. 研究開始当初の背景

### (1) 社会的背景

近年、LED は高い発光効率で白色光をつくる技術が確立され、LED 照明の利用が急速に進んでいる。LED は、従来の照明器具に比べ、消費電力が小さく、寿命も非常に長い。そのため、LED の利用推進は、CO<sub>2</sub>削減や、東日本大震災以来の電力不足対策に期待されている。

### (2) 技術的背景

LED 照明の研究開発は、国内・国外とも非常に活発に行われている。現在、日本は LED の世界シェア・特許出願数とも一位であり、日本の LED 技術が世界を牽引している。特許の内容においては、LED モジュールの設計、反射板・ヒートシーリング材料、基板関係など、LED の材料・設計に関するものが主である。白色 LED の発光技術は、現在、発展途上であるため、青色 LED + YAG 系蛍光体、青色 LED + ZnSe 単結晶基板の発光、紫外 LED + RGB 蛍光体など多くの方式があり、分光分布・演色性（物体色の見え方）は様々である。また、LED は光の拡散性が低いため、今後、拡散板の技術開発が不可欠である。

### (3) LED 白色照明の課題

LED の光学特性は、演色性や光の拡散性など、従来光源と異なる点が多い。そのため、今後 LED 照明の普及に伴って、LED による色彩の見え方が問題になることが予想される。特に、デザイン性の高い商品やテキスタイル製品などでは、厳しい色彩管理が要求されるため、LED の演色性の問題が製品の製造工程や品質管理、製品の取引において、トラブルとなることが懸念されている。通常、このような照明による色違いのトラブルを避けるため、国際照明委員会 (CIE) では、様々な光源について標準光源 (太陽光: D65 光源、蛍光灯: F 光源、電球: A 光源など) を定めている (JIS Z 8720)。これら標準光源のスペクトルと着色物の反射率のデータから色彩の見え方を計算し、製品の色彩管理が行われている。しかし、LED については、標準光源化が行われていないため、LED 照明下での製品の色彩を計算で予測することが出来ない。LED で照明された物体の色彩を測色計算するためには、LED 白色光源の標準化が不可欠であり、その研究が急務と考えられる。

## 2. 研究の目的

近年、急速に普及が進む LED は演色性に問題があり、テキスタイルなど厳しい色彩管理が要求される製品では、製品の製造工程や品質管理、製品取引においてトラブルとなることが懸念される。このような照明による色違いの問題を避けるため、標準光となる LED 光源の検討を行い、LED 照明下での製品の色彩を計算で予測するためのシステムを開発する。これにより、LED 照明の演色性評価、

LED 光源による物体色の色彩計算を可能にする。

## 3. 研究の方法

本研究では、光源光学特性の測定、LED 照明下での物体色の反射スペクトルの実測、視感度曲線による計算システムの作成を行う。この計算システムを用いて、LED 照明による物体色の見え方について検討し、以下の様に、LED 照明下での物体色を計算するための標準 LED 光源を検討する。

### (1) LED 標準光源の検討と LED 照明による物体色の計算システムの開発

#### 光源の光学特性の測定

代表的な各種白色 LED 光源 (青色 LED + YAG 系蛍光体、RGB 3 波長型白色 LED)、従来光源 (白熱電球) の分光分布、全光束、色温度など光学データを測定する。

#### 物体色の反射スペクトルの測定

物体色を測定するための試料として、厳しい色彩管理が必要とされるテキスタイル (染色布) を用いる。種々の色相・明度・彩度を有する染色布試料について、その反射スペクトルを計測する。

#### 解析用プログラムの作成

まず、上記で測定した試料光源の分光分布をパラメータとして、各試料光源の演色評価数 R 値を算出する計算プログラムを作成する。これを基に、上述の試料光源の分光分布および上記で測定した物体色の反射スペクトルをパラメータとして、演色評価数 R 値を算出するプログラムを作成する。

#### 物体色の色彩パラメータの算出

上記の反射スペクトルから、色温度 6500K の CIE 昼光 (D65 光源) を基準光とする  $L^*a^*b^*$  などの視感に適合した色彩パラメータを算出する。

#### 物体色の色彩ズレの評価及び標準 LED 光源の検討

上記と の色彩パラメータについて、その相関を調べ、LED 光源の分光分布に由来する色ズレについて解析し、LED 光源の演色性について詳細な知見を得ると共に、LED 光源の標準化について検討する。

### (2) LED 光源の配光及び光束の拡散が色彩に及ぼす影響

LED 光源は配光性が小さく、直下をまぶしく照らす性質がある。そのため、光沢を持つ物体などでは LED 照明との角度によって、ギラツキなどが生じて通常の光源とは著しく異なった見え方になる。この問題の解決には、LED 光源の光を拡散させ配光性を高める拡散透過板が重要となる。しかし、LED 照明器具は軽量化のためにアクリルなどの高分子樹脂材料の拡散板が使用されるため、長寿命の LED においては、これらの樹脂の熱・光による白化や黄変などの経時変化が問題になる。このような拡散板の劣化が光源の性

能や物体色の見え方に及ぼす影響について以下の方法で検討を行った。

#### 高分子樹脂の促進劣化試験

LED 拡散板の材料であるアクリルなどの樹脂に紫外線フェードメーターを用いて光と熱を照射し、拡散板を加速的に劣化させる。

#### 劣化による樹脂の透過率の変化

上記の実験により劣化させた拡散透過板について、その紫外・可視・近赤外領域の透過率の変化を調べる。

#### 劣化が演色性に及ぼす影響

拡散透過板の劣化が演色性など色彩の見え方に及ぼす影響を調べる。白化・黄変などによる拡散板の透過率の変化を測定し、演色性への影響を調べる。

## 4. 研究成果

### (1) LED 標準光源の検討と LED 照明による物体色の計算システムの開発

#### 光源の光学特性の測定

現在、白色 LED の主流である青色発光ダイオードと黄色蛍光体による 4 種類の疑似白色 LED、および赤・緑・青の発光ダイオードの組み合わせによる 3 色方式の白色 LED について、全光束測定によって、その分光スペクトルを測定した(図 1)。

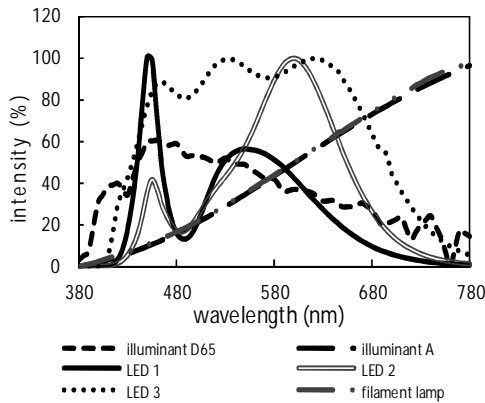


図 1 代表的な LED 光源の分光分布

#### LED 照明下での物体色の色彩算出システムの作成

物体色の基準サンプルとして、JIS Z 8726 の演色評価数計算用の試験色 R9~R12 および R15 の基準色(赤, 黄, 緑, 青, 肌色), および様々な色相・明度・彩度の染色布を用い、上述の LED 光源の分光分布と物体色の反射率データ、人間の視細胞の感度曲線(JIS Z 8701, XYZ 系等色関数)を用いて、LED 照明下での色彩パラメータ  $L^*a^*b^*$  を算出するためのプログラム、および試料光源下における物体色試料を用いた演色評価数  $R$  値を算出するプログラムを試作した(図 2)。通常、色彩パラメータは国際照明委員会で定められた基準光源(太陽光, 蛍光灯, 白熱球)の照明下でしか算出できないが、このプログラムによって、LED 光源下での色彩計算が可能となり、

LED 照明による物体色の色ズレ方向, 色ズレ量を人間の視覚に合わせて定量化することができた。このプログラムは、色彩測定だけでなく、照明器具メーカーが LED を設計する際、LED 光を太陽光のような自然な色合いに近づけたいなど、LED 光源の演色性を高めるための分光分布設計に利用することができた。

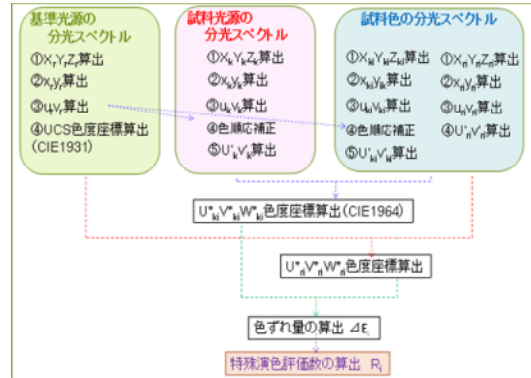


図 2 LED 照明による物体色の計算システム

#### LED 光源による物体色の色彩の見え方

このプログラムを用いて、LED 照明下の色彩計測を行った結果、図 3 に示すように、青色ダイオードと黄色蛍光体による疑似白色 LED 光源では、青系の色相を持つ物体色について、色彩パラメータ  $b^*$  値(黄~青)に大きなばらつきが認められた。これは LED の分光分布が極めて特異的で、450nm 付近に非常に強く急峻なピークを持ち、かつ 650nm 以上のエネルギーが低いと考えられる。この結果は、青色に着色された工業製品を LED 照明下で見た場合、LED の分光分布に応じて、色彩が赤紫から青緑まで変化して見えることを示している。この結果から、本システムによって、LED 光源下での色彩計算が可能となり、LED 照明による物体色の色ズレ方向, 色ズレ量を定量化することが可能であることがわかった。これを用い、LED 光源の演色性の評価や改良に役立てることができる。

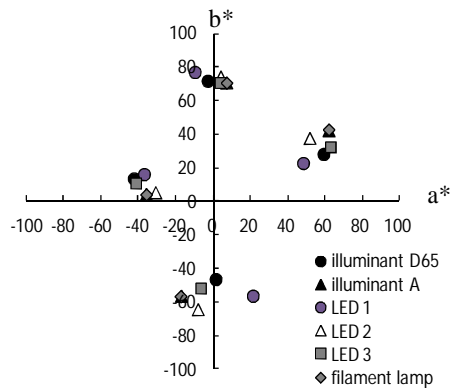


図 3 LED 照明による物体色の色彩パラメータのばらつき

LED 光源の分光分布と演色性の関係 代表的な色相について、LED 照明下での色

相ズレと R 値の関係を調べた。その結果、R 値は物体色の色相や彩度でズレる方向・量が異なり、特に赤系の場合は LED のスペクトルに依存して主に物体色の彩度（原点からの距離）が変化し、色彩の鮮やかさに影響が出ることが分かった（図 4）。一方、青系の色相では物体色の色相（ $a^*$ 軸からの角度）が主に変化することから、物体色の色味そのものが変わり、LED の分光分布に応じて青緑～青～赤紫まで色彩ズレが生じることが示された（図 5）。これらのズレは LED の青色ダイオードのピーク波長、黄色蛍光発光のピーク波長およびピーク強度に依存して変化した。また、LED 照明器具の演色性を示す R 値は、赤色の物体色の場合は実際の目視による評価よりも色ズレが大きく見積もられ、逆に、青色の色相の場合には小さく見積もられる結果となり、視感との整合性を得るには色相毎の R 値補正が必要であることがわかった（図 6,7）。これは演色性を表す R 値が RGB 三波長型蛍光灯や分光分布がフラットな白熱電球用に作られた評価値であり、LED 光源の様にスペクトルピークが急峻でかつエネルギー分布に偏りがある分光分布を想定していないことが要因と考えられた。

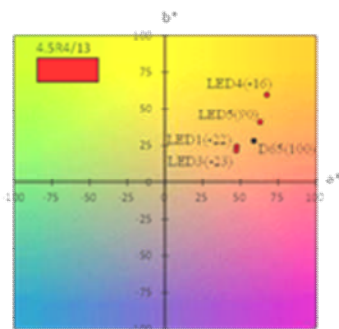


図 4 代表的な LED 照明下における赤色系物体色の  $a^*b^*$ 値

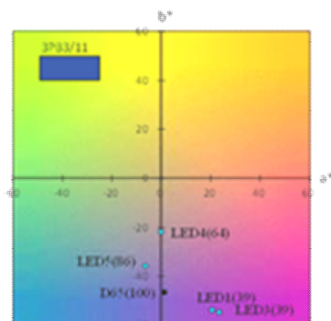


図 5 代表的な LED 照明下における青色系物体色の  $a^*b^*$ 値

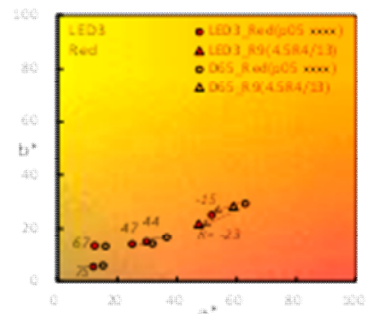


図 6 代表的な LED 照明下における赤色物体色の見え方と演色評価数 R 値

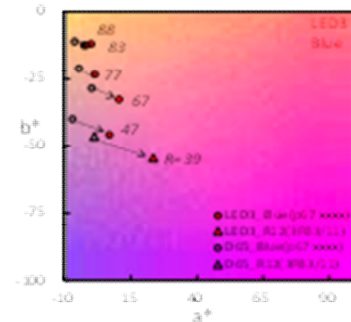


図 7 代表的な LED 照明下における青色物体色の見え方と演色評価数 R 値

#### 物体色の色彩ズレの評価及び標準 LED 光源の検討

以上の結果より、赤の色相における彩度の低下については、光源スペクトル（図 1）と物体色反射率の関係から以下の様に説明される。各光源で赤の物体色を照明した場合、目に入る光のスペクトルは光源のスペクトルと物体色の反射率曲線を掛け合わせたものになる。疑似白色 LED では、光源の蛍光発光ピーク（480nm-600nm 付近）によって、積算された反射光スペクトルの 480-600nm 領域にショルダーが発生する。物体色の彩度は、この積算した反射光のスペクトルの勾配がなだらかになるほど低下するため、赤色の見え方の彩度が変化したと考えられる。そのため、分光分布のわずかな違いで大幅な色彩のズレが生じる LED 光源で標準光源を設定するには、LED の青色領域のピーク強度が小さく、赤色領域の 580nm 付近の発光がより長波長側にシフトしている場合に、この影響が抑えられると考えられる。

一方、青色の物体色は 400nm～580nm に反射のピークを持ち、LED 光源もこの領域に急峻な発光ピークを持つため、この LED 光源のピークと反射率のピークを積算した場合、光源の分光分布に応じて積算された反射光スペクトルの最大ピーク波長が変化するため、色相が変化することが考えられる。したがって、LED の青領域のピークの半値幅が大きくなれば、青の色相変化を抑制する条件と考えられる。

#### (2) LED 光源の配光及び光束の拡散が色彩に

## 及ぼす影響

### 高分子樹脂の促進劣化試験

LED 照明器具の拡散透過板の劣化による透過率・拡散率の変化は LED 照明器具の性能に大きな影響を及ぼすため、アクリル、ポリカーボネート、ポリスチレンの3種類の代表的な樹脂材料について、キセノンフェードメーターを用いた紫外線と熱による促進劣化試験を行った。紫外線照射は、 $42\text{W}/\text{m}^2$ の放射強度で、最大 1456 時間（一年間の屋外太陽露光に相当する紫外線量）とした。熱は樹脂表面温度が  $60\sim 65$  とした。

### 劣化による樹脂の透過率の変化

上記の実験により劣化させた拡散透過板について、その紫外・可視・近赤外領域の透過率の変化を調べた。その結果、アクリル樹脂では、樹脂の劣化によって紫外部の吸収が若干低下するが、可視及び近赤外領域では全光線透過率・拡散透過率ともほとんど変化しなかった。一方、ポリカーボネートやポリスチレンでは紫外～可視の全光線透過率が変化し、拡散透過率では紫外～近赤外領域の広範囲にわたって変化が認められた。(図8)また、拡散率にも変化が認められた。

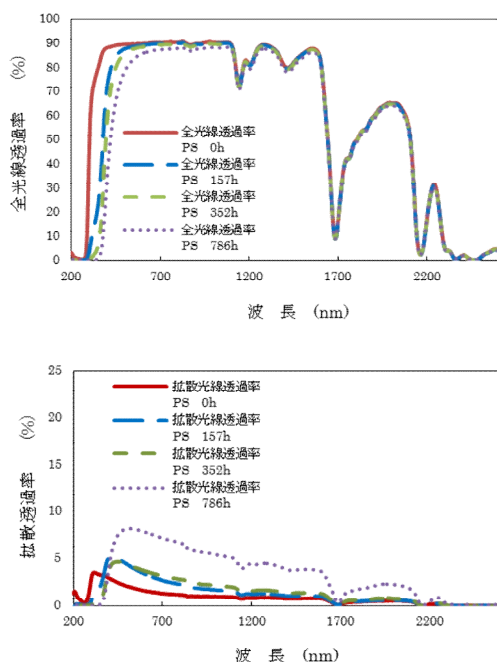


図8 ポリスチレン樹脂の劣化による全光線透過率・拡散透過率の変化

### 劣化が演色性に及ぼす影響

ポリカーボネートやポリスチレン樹脂では、劣化による透過拡散板の可視部透過率に変化あり、黄変が認められた。これにより、可視領域では LED の青色ダイオード発光が吸収され LED 疑似白色光の光源色が変化し、ランプの演色性に影響が出ることが分かった。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

吉村 由利香, 大江 猛, 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, 査読有, vol. 89, 2015, 89-94

〔学会発表〕(計 6 件)

吉村 由利香, 大江 猛, LED 光源の分光分布と演色性の関係, 平成 26 年度繊維学会年次大会, 2014/6/11, タワーホール船橋(東京都江戸川区)

吉村 由利香, 大江 猛, LED 照明の光学特性が物体色に及ぼす影響, 平成 25 年度繊維学会年次大会, 2013/6/13, タワーホール船橋(東京都江戸川区)

吉村 由利香, 大江 猛, LED 光源の光学特性が物体色の測色値に及ぼす影響, 平成 24 年度繊維学夏季セミナー, 2012/8/9, 奈良県新公会堂(奈良市)

吉村 由利香, 大江 猛, LED 光源下における染色物の色彩, 平成 24 年度繊維学会年次大会, 2012/6/7, タワーホール船橋(東京都江戸川区)

〔その他〕

吉村 由利香, 変角光度計による LED 照明用拡散・反射板の光拡散性評価, 大阪市立工業研究所・大阪府立産業技術総合研究所合同発表会, 2013/11/28, クリエーション・コア東大阪(東大阪市)

吉村 由利香, LED 照明下における物体色の色ズレの定量, 大阪市立工業研究所・大阪府立産業技術総合研究所研究発表会, 2013/2/5, 大阪府立産業技術総合研究所(大阪府和泉市)

吉村 由利香, LED 照明下における物体の色彩計測システムと色ズレの定量化, 大阪市立工業研究所・大阪府立産業技術総合研究所合同発表会, 2012/11/1, 大阪産業創造館(大阪市)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

吉村 由利香 (YOSHIMURA, Yurika)  
地方独立行政法人大阪市立工業研究所・生物・生活材料研究部・研究室長  
研究者番号: 00416314

### (2) 研究分担者

大江 猛 (OHE, Takeru)  
地方独立行政法人大阪市立工業研究所・生物・生活材料研究部・研究員  
研究者番号: 10416315

齋藤 守 (SAITO, Mamoru)  
地方独立行政法人大阪市立工業研究所・環境技術部・研究室長  
研究者番号: 20416358

北口 勝久 (KITAGUCHI, Katsuhisa)  
地方独立行政法人大阪市立工業研究所・環

境技術部・研究員  
研究者番号：30416359

(3)連携研究者  
なし

(4)研究協力者  
なし