紫外・可視域の LED を利用した LED スペクトラルチューナブル光源による CIE 標準イルミナント実現に関する研究

正会員 神門 賢二 (産業技術総合研究所) 非会員 田村 裕 ((株) セルシステム)
非会員 渡 脩 ((株)セルシステム)

Study on Realization of CIE Standard Illuminant by LED Spectrally Tunable Light Source with UV-LED and Visible-LED

Member Kenji Godo (The National Institute of Advanced Industrial Science and Technology),

Non Member Yutaka Tamura (Cell System Co., Ltd) and

Non Member Osamu Watari (Cell System Co., Ltd)

ABSTRACT

Conventional lighting booths with custom standard fluorescent lights are used in industry for testing and quality control of color materials. In this study, we constructed a lighting booth based on an LED spectrally tunable light source (LSTL) that implemented a simple forced air-cooling system. The LSTL was composed of a UV-LED, single color LED, and quasi-yellow LED to cover the wavelength range from 340 to 800 nm. To compensate for the lack of appropriate green LEDs in the wavelength range from 520 to 625 nm, the LSTL used the quasi-yellow LED, which was made by cutting the blue spectrum of a white LED with a long-pass optical filter. The reconstructed spectrum was more approximate CIE standard illuminant than a D65 fluorescent lamp, and the fluctuation of optical intensity was of considerable well property. In addition, we also discussed advantages of and improvements enabled with LSTL through a comparison with D65 standard fluorescent lamps.

KEYWORDS : LED, 標準イルミナント, D65, 照度, 可視・蛍光条件等色対, D65標準蛍光ランプ

1. はじめに

各分野における国際・国内規格において、ある製品の性能評価やその関連規格の適合性判断のために、任意の基準スペクトルを規定し、その基準スペクトルに基づき、その製品の性能評価を行う場合がある。例えば、太陽電池セルの電気変換効率評価方法として利用されている IEC 60904-3:2019「Photovoltaic devices - Part 3: Measurement principles for terrestrial photovoltaic (PV) solar devices with reference spectral irradiance data」では、AM1.5G の基準太陽光スペクトルに基づき太陽電池セルの効率を評価することが規定されている¹⁾。また物体色の評価方法として、JIS Z 8723「表面色の視感比較方法」等があり、国際照明委員会(CIE)で規定された標準イルミナント A や標準イルミナント D65 のスペクトルにより、表面色の視感評価することも規定されている²⁾。

JIS 等で規定されている基準スペクトルを再現する装置および光源は重要であり、各分野において研究開発および実用化が行われてきた³⁾。例えば、標準イルミナント D65 の近似光源として色評価専用の蛍光ランプ (D65 標準蛍光ランプ) が販売されており、その型式や性能は、JIS Z 8716「表面色の比較に用いる常用光源蛍光ランプ D65-形式及び性能」で規定されている⁴⁾。

しかし、これら市販の D65 近似光源は、標準イルミナント

D65 への一致が悪く、更には LED 照明の登場により、照明光源のスペクトルが千差万別となったことから、標準イルミナントに基づく評価だけでは物体色評価が不十分であり、実際の照明環境下での照明光源を模擬した評価が必要とされている。このため、標準イルミナントだけでなく、様々な照明光源のスペクトルを忠実に再現する LED を光源とした LED スペクトラルチューナブル光源(LSTL: LED Spectrally Tunable Light Source)の研究開発が世界中で行われている⁵⁾⁷⁾。更に、近年では製品化され、イメージングセンサ評価等で既に使用され初めている。単色 LED の発光スペクトルは波長幅 20 nm 程度の光であり⁸⁾、また一般の白色 LED は青色 LED からの光と青色 LED により励起される YAG:Ce 等の蛍光体からの発光を組み合わせることで白色を実現しているが⁸⁾、発光していない波長領域が存在する。LSTL により紫外・可視に及ぶ基準スペクトルを実現する方法は、一般に発光波長が異なる数十種類の LED の発光強度を個別に制御し、任意のスペクトルを実現させる方法が用いられる。原理的には、発光スペクトルが異なる LED の数が多いほど標準イルミナント D65 への不一致度は改善する。また、各 LED の発光強度を精確に制御することにより、一台の装置で無限のスペクトル発生可能なチューナブル光源として用いることができる。しかし LED の個数を増やせば、コストの問題や LED 制御に関する問題が発生する。このため実装する LED の種類の最適化や LED の制御方法の高精度化が研究開発の課題となっている⁹⁾⁷⁾。更に紫外域で発光する適切な LED が存在しないことも、LSTL の大きな課題であったが、発光波長 300 nm までの UV-LED の実用化、更には高強度化が近年進んでいるため、この問題については解決されつつある。

本研究では、紫外・可視域の LED を利用した LSTL を実装

脚注：本論文の一部は、平成 29 年度照明学会全国大会で神門 賢二が講演した。神門 賢二、田村 裕、渡 脩：LED スペクトラルチューナブル光源による CIE 標準イルミナント実現に関する研究。

したライトブースを試作し、市販 D65 標準蛍光ランプとの比較を通して、LSTL の優位点や改善点等について検討を行ったので報告を行う。

2. LSTLを利用したライトブースの構築

2.1 LSTLを利用したライトブースの構築

図 1 で示した写真は、(株)セルシステムが、太陽電池セルの評価のために開発した LED ソーラシミュレータを改造し、試作製作した LSTL を組み込んだライトブースである。試作したライトブースの大きさは、LSTL や電源部等を除くと幅 600 mm、長さ 400 mm、高さ 600 mm となっている。LSTL からの測定位置（観測位置）までの距離は、約 400 mm - 500 mm である。本研究では、このライトブースを使用し、後述する市販 D65 標準蛍光ランプ等との比較を行った。また別に、D65 標準蛍光ランプを点灯させるためのライトブース（蛍光ランプ 2 本設置可能）も、ほぼ同じ大きさ(測定位置: 約 400 mm-500 mm)で製作を行った。

本 LSTL に実装される LED は、標準イルミナントを実現するために選択されており、340 nm - 800 nm の波長帯域における 23 種類の単色 LED および白色 LED から構築されている。各 LED の最大定格電流は LED 毎に異なっており（最大定格電流: 500 mA - 3,000 mA）、各 LED の個別定電流制御により、光強度を変化させ、任意スペクトルの再現が可能である。一般に、大電流駆動の LED (HP-LED) は温度上昇により、その光強度が安定するまでに 1 時間近く必要とする場合がある⁹⁾。このため、HP-LED を使用した LSTL では、パルス点灯制御や PWM 回路の実装により、温度上昇を抑える方法がある。パルス点灯制御や PWM 回路を用いた点灯方法では、連続光という照射条件から外れることになり、目的においては適さない場合がある。またペルチェ素子を利用して、LED 温度を制御する方法もあるが、回路設計・制御が複雑、更には高価になるという問題がある。

図1 構築した LSTL を利用したライトブースの写真
Fig.1 The lighting booth based on LSTL.

本研究の LSTL は、安価かつ、複雑な熱制御を行わないで連続点灯させるために、強制空冷システムを採用した。実装した強制空冷システムは、大小 2 段の空冷ファンから構築されている。1 段目の小型空冷ファンは、ヒートシンク付きの HP-LED 毎に取り付けてあり、各 HP-LED からの熱は、1 段目の小型空冷ファンから放熱され、そして 2 段目として LSTL の天井面に取り付けた 4 つの大型ファンにより、最終的に LSTL 外に放熱される。各段階で用いた空冷ファンの風量は、予め実装する HP-LED の発熱量をカタログスペックから計算し、1 段目のファンの風量 0.18 m³/min、2 段目は 風量 2.5 m³/min とした。上記の熱設計計算により最適化された強制空冷システムにより熱制御を行うことにより、温度フィードバック制御を行わない単純な熱制御機構でも、光強度が安定な連続光の放射が可能になっている。

LSTL から測定位置（観測位置）までの距離は、約 400 mm - 500 mm であり、観測位置にマルチチャンネル型分光放射計およびフォトダイオード(Si-PD)が自動 x-y ステージ上に実装される。これにより、LSTL により再現される各スペクトル測定だけでなく、スペクトル分布・照度の面内均一性評価等も可能である。設置するマルチチャンネル型分光放射計は、予め分光放射照度標準による校正、更には応答の直線性評価を行っている。

更に、LSTL の LED 光源部には、空間・面内均一性を向上させるために、拡散板を設置することも可能である。但し、拡散板設置時には、空間・面内均一性は向上するが、その放射照度は約 1/10 程度に大きく減少する。

図 2 に、LSTL の LED 光源部の写真を示す。図 2 の左の写真が示す通り、各 HP-LED はドーム状に設置され、集光効率・面内照度の均一度を向上させるために、一つ一つの HP-LED 個別に、集光光学部を装着しているのが、本 LSTL の大きな特徴である。集光光学部は、ライトパイプ (10 mm 角、長さ 135 mm) と集光レンズ($f=25$ mm)から構築されており、測定位置で均一な照度面が形成されるように光学設計されている。各 HP-LED の放射角度も、任意に調整することができるため、任意距離で均一照度面を形成することができる。右の写真は、配置を分かり易く理解するために LED 光源部に拡散板を挿入し撮影した写真である（カラー写真では、波長 340 nm - 400 nm、および 700 nm - 800 nm 領域の LED が明確に映っていないことに注意していただきたい）。21 種類の単色 LED および 2 種類の白色 LED の合計 23 波長バンド、1 波長バンドを 2-4 個の HP-LED で構築しており、HP-LED の平面配置においても、均一な照度面を形成できるように工夫を行っている。拡散板を挿入しない場合の最大放射照度(照度)は、約 15,000 μ W/cm² (35,000 lx) であり、均一面サイズとしては、約 150 mm 角程度となる。一般的な部屋の照度値が 500 lx - 1000 lx 程度であることを考えると、非常に高照度な光が実現できることが分かる。

図2 LSTL の LED 光源部: LED 光源部 (左)、 拡散板を導入して撮影した発光面 (右)

Fig.2 HP-LED source unit of LSTL: HP-LED sources (left), image of emitting area with diffuser (right).

2.2 LSTLに実装した各LEDの特徴

図3に、LSTLに実装した各単色 HP-LED の相対スペクトルを示す。340 nm - 800 nm の波長帯域で 21 種類の単色 HP-LED を使用している。近年の LED の技術進歩により、高強度化、波長拡大が進んでおり、深紫外域は 250 nm まで、長波長域は中赤外域である 4,600 nm (パルス点灯含む) までの LED が販売されており、容易に入手することができる。但し、例えば 20 nm 間隔等の等間隔で販売されているわけではなく、各目的に応じた特定の波長で販売されているため、連続的な波長間隔で LED をそろえることは難しい。このため、本 LSTL で使用している LED の一部 (700 nm - 800 nm) は、専用にカスタム開発した HP-LED を用いている。また、標準イルミナ

図3 実装した各 HP-LED のスペクトル

Fig.3 Spectrum of each HP-LEDs mounted to the LSTL.

ント D65 の紫外域部分を再現するために、中心波長 340 nm, 365 nm, 385 nm の UV-LED も実装している。更に、図3から分かる通り、緑域-黄色領域 (500 nm - 600 nm) は、光強度が強い単色の HP-LED を入手することが一般に困難である。これは "Green-Gap" と呼ばれる LED で使用される半導体材料特有の問題ある¹⁰⁾。この "Green-Gap" の改善については、現在も研究開発が進められているが、市販 LED の改善までには至っていない。このため、本 LSTL では色温度が異なる白色 LED (電球色: CCT = 約 3000 K, 昼光色: CCT = 約 6700 K) を利用し、青色部分の光をシャープカットフィルターで取り除くことにより、高強度な 2 種類の黄緑色 LED を作成し、緑域-黄色領域 (500 nm - 600 nm) の光を放射させている (図4)。

図4 白色 LED ベースの黄緑色スペクトル

(LED1: CCT=約6700 K, LED2: CCT = 約3000 K)

Fig.4 Yellow-green spectrums of the white LED-based.

3. D65標準蛍光ランプとの比較

3.1 標準イルミナントD65への不一致度の比較(可視域)

図5に、本 LSTL により再現された D65 近似スペクトル (可視域) を示す。このスペクトルは、可視域の一致度を最適化および照度値が最大になるように、各 LED の電流値の調整を行い再現したスペクトルである。照度値(放射照度値)は約 11,000 lx (5,300 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$) である。標準イルミナント D65 は、LSTL による D65 近似スペクトルの照度値と一致するように、計算・一般化を行い図5に図示した。標準イルミナント D65 への不一致度は、式(1)を利用して計算を行い、約 7.1 % の一致度 ($\Delta E_{e,v}(\%)$) と評価した。

$$\Delta E_{e,v}(\%) = \frac{\sum_{380}^{780} |E_{D65}(\lambda) - E_e(\lambda)| d\lambda}{E_e} * 100 \dots \dots \dots (1)$$

ここで、

$E_{D65}(\lambda)$: 測定値と照度値が一致するように一般化された標準イルミナント D65 の分光放射照度 ($\mu\text{W}/\text{cm}^2/\text{nm}$).

$E_e(\lambda)$: LSTL (または、D65 標準蛍光ランプ) により再現される D65 近似スペクトルの分光放射照度 ($\mu\text{W}/\text{cm}^2/\text{nm}$).

$d\lambda$: 測定波長間隔 (nm).

E_e : 可視全域 (380 nm - 780 nm) の放射照度値 ($\mu\text{W}/\text{cm}^2/\text{nm}$) である。

図5 LSTL により再現される D65 近似スペクトル(可視域)

Fig.5 Spectrum of CIE illuminant D65 reconstructed by the LSTL (visible range).

本 LSTL で再現される D65 近似スペクトルの照度値と一致度の限界を決定しているのは、650 nm - 800 nm 付近の LED の光強度である。近年の LED 照明の普及により、研究開発が進み青色 LED 単体の光強度が増加したことにより、650 nm - 800 nm 付近の LED の光強度が相対的に弱くなるという逆転現象が発生しているためである。これを改善するためにできるだけ、光強度が強い LED を選択し、更には複数個実装しているが、やはり 650 nm - 800 nm 付近の LED の光強度が限界値を決定している。これを改善するためには、実装する LED の個数を青色領域に比べて、赤色領域の個数を増やす必要がある。

図6に D65 標準蛍光ランプのスペクトルを示す。LSTL の照度値 (放射照度値) との単純な比較は難しいが、蛍光ランプ 2 本で作成したライトブースの照度値(放射照度値) は、約 760 lx (300 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$) であった。標準イルミナント D65 への不一致度は、式(1)から計算を行い、約 35 % の一致度 ($\Delta E_{e,v}(\%)$) と評価された。

図6 D65標準蛍光ランプのスペクトル
Fig.6 Spectrum of D65 standard fluorescent lamp.

2つの光源の比較結果より、LSTL に実装する LED の波長帯域は、可視全域に及んでいるため、高い一致度で標準イルミナント D65 を再現できることが分かる。更に標準イルミナント D65 のスペクトルの凹凸形状と単色 LED の組み合わせによりできる凹凸形状 (特に、650 nm - 750 nm) は、LED の中心波長の組合せを更に最適化すれば、より一致度を向上させることもできる。一方、D65 標準蛍光ランプの場合は、蛍光体の発光を利用しているため、滑らかなスペクトル形状になり、凹凸形状の再現は難しい。

更に、D65 標準蛍光ランプは、一致度が悪く、特に 400 nm - 450 nm, 650 nm - 800 nm 付近で一致度が特に悪いことが示された。これは、単純に D65 標準蛍光ランプ自身の標準イルミナント D65 への一致度が悪いことが原因だけでなく、ライトブースで用いた白色壁面の反射率や D65 標準蛍光ランプの取付で用いた照明器具の傘の反射率の影響があるためである。逆に言えば、LSTL は、周囲部材の影響があったとしても、測定位置でスペクトルを任意発生できるため、D65 標準蛍光ランプに比べて、標準イルミナント D65 に非常に良い一致を得ることができる。

次に JIS Z 8720「測色用の標準イルミナント(標準の光)及び標準光源」に従い、可視条件等色指数(メタメリズム) M_v の計算を行った¹¹⁾。JIS Z 8720 には、標準イルミナントと試験光源の条件等色対を決められた複数の標準試料に対して計算し、その差 (L, a, b 色空間における差) により、標準光源のクラス分けを行う方法が規定されており、その差の程度を示すのが、可視条件等色対指数 M_v 、および蛍光条件等色対指数 M_u である。

JIS Z 8720 に従い、2つの光源の M_v の計算を行うと、LSTL により再現された D65 近似スペクトルは $M_v = 0.38$ 、D65 標準蛍光ランプは、 $M_v = 0.61$ という結果をそれぞれ得た。ランクは、LSTL より再現されたスペクトルは、ランク B であり (0.25 超え、0.5 以下がランク B)、D65 標準蛍光ランプはランク C であった。図 5 で示したスペクトルは、可視域の一致度および照度値が最大になるように再現したスペクトルであるが、照度値を低くすれば、前述した 650 nm - 800 nm 付近の LED の光強度の問題が改善されるため、本 LSTL の LED の組合せで、 M_v がランク A (0.25 以下) を達成できることも確認した。

3.2 光強度の安定性

図 7 に、LSTL により再現された D65 近似スペクトルと D65 標準蛍光ランプ、それぞれの点灯直後からの光強度の安定性評価結果を示す。

図7 LSTL と D65標準蛍光ランプの点灯からの光安定性
Fig.7 Optical stability of LSTL and D65 standard fluorescent Lamp.

評価結果から、LSTL からの光は点灯後、約 10 分程度で安定することが分かる。安定後の光変動は、約 $\pm 0.4\%$ である。この結果は、前述した強制空冷システムが、精確に LED 温度を制御しているために達成できた光強度安定度である。一方、D65 標準蛍光ランプからの光は、安定するまで約 1h 程度必要とする。安定後の光変動は、約 $\pm 0.5\%$ である。2つの光源の比較結果より、LSTL は実装する LED の温度制御を工夫することにより、非常に高安定な光源として利用することができることが示された。

図 8 は、LSTL により再現された D65 近似スペクトルと D65 標準蛍光ランプの点灯時間に対する照度値の経時変化を示す。2つの光源の照度値は、24h 時間毎に計測を行った。評価結果から、LSTL からの光は 100 h で 0.6 % 程度の変動であった。これは、LED が長寿命光源であることを反映した結果であるが、分光分布の詳細な解析を行うと、実装した中心波長 430 nm の HP-LED が 100h で 5 % と他の LED に比べて大きく変動しており、必ずしも LED だからと言って長寿命というわけではなく、LSTL に実装する LED の一つ一つの選択が重要であることが分かる。一方 D65 標準蛍光ランプからの光は、100 h で 2 % 程度減少した。LSTL と違い、ある特定の波長域だけ変化するという傾向はみられなかったが、蛍光ランプの性質上、点灯時間を長くすれば、全体に変化する可能性はある。2つの光源の照度値の経時変化比較結果より、LSTL は非常に経時変化が少ない、光源であることが分かる。但し、最初

図8 LSTL と D65標準蛍光ランプの照度値の経時変化
Fig.8 Relative illuminance change of LSTL and D65 standard fluorescent Lamp.

に実装する LED の選択が重要であることも示された。

4. LSTL の課題に関する考察

本章では、前章で述べた LSTL の評価結果や D65 標準蛍光ランプ等との比較結果を通して、明確になった LSTL の課題やその改善方法の考察を行う。

4.1 各LEDのスペクトル校正と再現スペクトル予測

本研究では、**図 5** で示した D65 近似スペクトルを再現するために、最初に各 LED のスペクトル計測（分光放射照度値の絶対計測）を行い、その結果に基づき再現されるスペクトルの予測を行っている。

スペクトル計測では、最大電流値だけでなく、点灯電流値を変化させ、電流値と放射照度値の関係の評価を行っている（**図 9**）。これは、**図 9** の結果が示す通り、電流値と放射照度値の関係が必ずしも比例関係でないためである。更には、LED の温度変動によるスペクトルの中心波長変化や、白色 LED で発生する蛍光体スペクトルの励起波長強度依存性等によるスペクトル形状の変化もスペクトル予測において考慮するためである^{8,12)}。任意点灯電流値で再現される LED のスペクトル・放射照度値は、各 LED のスペクトル計測結果の内挿値を利用した。

図9 各 LED の点灯電流値と放射照度値の関係

Fig.9 Forward current dependence of irradiance of each LEDs.

次に、各 LED のスペクトル計測結果を利用し、目標とするスペクトル分布（本研究では、標準イルミナント D65）に一致し、かつ最大照度値になる点灯電流条件を導出した。導出方法は、本 LSTL で再現される D65 近似スペクトルの照度値と一致度の限界を決定するのは、650 nm - 800 nm 付近の LED の光強度であるため、650 nm - 800 nm 付近の LED の点灯電流値を、最初に最大値に固定し、その条件下で他の LED の点灯電流値を個別に変化させ、式(1)で示した一致度が最小になる条件を探索した。具体的には、最初に点灯電流値を変動させる LED を 1 つ選択し、そしてそれ以外の LED の点灯電流値は固定し、一致度が最小になるように変化させる。そして次の LED というように、順番に LED の点灯電流を変化させるという、半経験的な方法により導出した。今まで報告されている他の研究^{9,7)}や ISO/TS 17321-4:2016「Graphic technology and photography -- Colour characterization of digital still cameras (DSCs) -- Part 4: Programmable light emission system」¹³⁾等では、各 LED のスペクトル計算結果から、2 次元行列（波長 M 行と LED の中心波長 N 列）を作成し、任意スペクトル分布を再現するための各 LED の点灯条件を連立方程式の解により決定するという方法が提案されている。本研究においても、この方法での導出も試みており、上記述べた半経験的な方法と

予測結果において大差が無いことを確認している。

図 10 に、各 LED 計測値から予測されるスペクトルと実際に再現された D65 近似スペクトルを示す。LED の非線形性を考慮した各 LED のスペクトル計測に基づき点灯電流値を決定したことにより、ほぼ予測値と再現値を一致させることに成功した。しかし、計測点数は 115 点（各 LED で 5 点の点灯電流 $\times$ 23 波長 = 115 点）であり、事前計測だけでかなりの時間を有し、予測値と再現値を一致させるためには、できるだけ効率よく、事前の各 LED の計測を精確・詳細に行う必要がある。

また、比較結果が示す通り、波長 550 nm 周辺は、予測スペクトルとの一致度が他の波長帯域に比べて悪い。波長 550 nm 周辺は、白色 LED ベースの黄緑色スペクトルを利用しており、原因としては、各 LED のスペクトル計測時と安定になるまで時間が異なる、各 LED のスペクトル計測時と LED 温度が異なる等の LED の温度が関係する原因や、LED のスペクトルの経時変化などが考えられる。

図10 各 LED 計測値から予測されるスペクトルとの比較
Fig.10 Comparison with the predicted spectrum from LEDs measurement results.

4.2 空間・面内均一性の制御

今回の実験で用いた LSTL の特徴の一つは、実装した各 HP-LED の集光効率を向上させるために、個々の HP-LED に対して、それぞれの照明条件を調整する集光光学部を装着していることである（**図 2**）。これにより、最大で約 35,000 lx (15,000 μ W/cm²) の高照度な光を放射することができるが、集光しているため拡散板等の拡散素子を挿入しない場合、**図 11** で示した LSTL から放射される光の面内および空間分布評価結果より、測定位置（LSTL から約 500 mm）での均一面サイズは、約 150 mm 角（変動 10%以内）、同心円状の光分布となる（**図 11 (a)**）。**図 11 (a)**で示した面内部分布は、測定位置に取り付けた自動 x-y ステージ上を移動させることにより計測を行った。図の破線の交点が中心位置になる。均一な照度面である約 150 mm 角内ならば、相対分光分布はほとんど変化しない。

更に、**図 11 (b)** で示した空間分布は、デジタルカメラ撮影においてコントラスト等を調整することにより計測した空間分布写真である。写真から上部に設置された LSTL 光源部からの光が、効率よく集光され均一な照度面を形成していることが分かる。

一方、**図 12** は、LSTL 部にレンズ拡散板(LSD 80: Light Shaping Diffusers)を挿入して同様に評価した結果である。拡散板を挿入した場合は、拡散板の種類や挿入位置により異なるが、照度値は約 1/10 程度まで減少する。

図11 LSTL から放射される光の面内および空間分布（拡散板無）：(a) 面内照度分布, (b) 空間分布

Fig.11 In-plane and spatial distribution of light radiated from LSTL (no diffuser): (a) in-plane distribution, (b) spatial distribution.

図12 LSTL から放射される光の面内および空間分布（拡散板有）：(a) 面内照度分布, (b) 空間分布

Fig.12 In-plane and spatial distribution of light radiated from LSTL (with diffuser): (a) in-plane distribution, (b) spatial distribution.

また、使用する拡散板の種類によっては、紫外域 - 青色域の光（450 nm 以下の波長の光）が透過しない可能性があるため注意する必要がある。本研究では、複数種類の拡散板を試しており、図12で使用したレンズ拡散板は、可視域では、十分かつ一律な透過性を有していることを確認した（380 nm-780nm: 12%, 300 nm-380nm: 2% - 5%）。しかし、380 nm 以下の紫外域の透過特性は、悪くなっている。

図12(a)から、拡散板を挿入することにより、均一面サイズ（変動 10%以内）は、約 250 mm 角程度まで広がったことが分かる。また図12(b)で示した空間分布の写真から、拡散板を挿入することにより、LSTL から光が中心から同心円状に均等に拡散していることが分かる。これ以上に拡散させるためには、図2で示した LED の配置自身を変更させる必要があることも、拡散板の種類等を変更することにより検証した。図11, 図12の結果から、LSTL は LED に適切な集光光学または拡散光学系を実装することにより、様々な空間分布や光強度を実現できる非常に自由度が高い光源であることが分かる。一方で自由度が高いため、使用する目的に応じた光学系を実装する必要があるとも言える。

4.3 紫外領域への拡張

標準イルミナントは、D65 も含めて、その波長範囲は 300 nm - 780 nm の範囲で規定されている。可視域だけでなく、紫外域も規定されている一つの理由は、白色紙などの蛍光物体色の影響を評価するためである¹⁴⁾。この理由により、JIS Z 8720 では、蛍光標準試料の分光特性の影響を加味し、蛍光条件等色指数（メタメリズム） M_u を評価する方法が規定されている¹¹⁾。

本 LSTL に実装される中心波長 340 nm, 365 nm, 385 nm の UV-LED を用いて再現される紫外・可視全域の D65 近似スペクトルを図13に示す。暫定的に UV-LED を加えているため、照度値（放射照度値）は約 3,500 lx ($1,800 \mu\text{W}/\text{cm}^2$)であった。

JIS Z 8720 に従い M_v および M_u の計算を行うと、LSTL により再現された紫外・可視全域 D65 近似スペクトルは、 $M_v = 0.38$ (ランク B), $M_u = 0.91$ (ランク C) という結果を得た。実装前の事前検討では 3 つの UV-LED を加えることにより、 $M_u = 0.5$ (ランク B) 以下も可能であるという検討結果を得ていたが、UV-LED の波長、特に 385 nm が仕様通りの中心波長ではなく、実際に計測すると、中心波長 398 nm と、大きく長波長側にシフトしていたために、検討通りのスペックルには到達しなかった。一方、D65 標準蛍光ランプも同様に測定・計算

図13 UV-LED を利用し再現される CIE イルミナント D65 スペクトル（紫外・可視全域）

Fig.13 Spectrum of CIE illuminant D65 reconstructed with UV-LED by the LSTL (UV, Visible).

- 1) IEC 60904-3:2019 : Photovoltaic devices - Part 3: Measurement principles for terrestrial photovoltaic (PV) solar devices with reference spectral irradiance data, IEC (2019).
- 2) JIS Z 8723:2000 : 表面色の視感比較方法, 日本規格協会 (2000).
- 3) JIS C 8912:2011 : 結晶系太陽電池測定用ソーラシミュレータ, 日本規格協会 (2011).
- 4) JIS Z 8716:1991 : 表面色の比較に用いる常用光源蛍光ランプ D65-形式及び性能, 日本規格協会 (1991).
- 5) Fryc, I., Brown, S.W., Eppeldauer, G.P., Ohno, Y.: LED-based spectrally tunable source for radiometric, photometric, and colorimetric applications, Opt. Eng. 44, 11, 111309 (2005).
- 6) Bizjak, G., Kobav, M.: OPTIMIZATION OF SPECTRUM OF TUNABLE LED COLOUR LIGHT SOURCE, Proc of 28th CIE Session 2015, CIE 216, pp.1331-1337(2015).
- 7) Chun, Y. S., Kim, J. C., LEE, C.S.: OPTIMIZATION FOR SPECTRALLY TUNABLE LIGHTING CONTROL, Proc of 28th CIE Session 2015, CIE 216 , pp.2046-2055 (2015).
- 8) Schubert, E. F.: Light-Emitting Diodes sec, 2nd Ed., CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS (2006).
- 9) IES LM-85-14: Electrical and Photometric Measurements of High-Power LEDs, Illuminating Engineering Society (2014).
- 10) Usman, M., Kim, H., Shim, J.I., Shin, D.S.: Measurement of piezoelectric field in single-and double-quantum-well green LEDs using electroreflectance spectroscopy, Jpn. J. Appl. Phys., 53, 098002 (2014).
- 11) JIS Z 8720:2012 : 測色用の標準イルミナント (標準の光) 及び標準光源, 日本規格協会 (2012).
- 12) Talukder, A., Totsuka, K., Matsumo, M., Tomita, M.: Excitation-power-dependent spectral shift in photoluminescence in dye molecules in strongly scattering optical media, Phys. Rev B, 59, pp.50-53 (1999).
- 13) ISO/TS 17321-4:2016:Graphic technology and photography -- Colour characterization of digital still cameras (DSCs) -- Part 4: Programmable light emission system , ISO (2016).
- 14) JIS Z 8717:1989 : 蛍光物体色の測定方法, 日本規格協会 (1989).
- 15) CIE 192:2010, Practical Daylight Sources for Colorimetry, CIE (2010).

(受付日 2019 年 3 月 25 日/採録日 2019 年 8 月 27 日)

神門 賢二 (正会員)
 国立研究開発法人 産業技術総合研究所
 〒305-8563 茨城県つくば市梅園 1-1-1
 平成 15 年 3 月 東北大学大学院 博士後期課程修了。同年 4 月(独) 産業技術総合研究所に入所。法人類型変更を経て現在に至る。現在、LED の測光・放射量計測および標準光源を含む光計測装置の開発に従事。照明学会, 日本照明委員会, 応用物理学会会員。

田村 裕 (非会員)
 株式会社セルシステム 上席取締役
 〒225-00012 神奈川県横浜市青葉区あざみ野南 1-2-8
 熱電素子駆動, レーザー素子駆動, 光射出装置の研究に従事。
 日本化学会, 光化学会に所属

渡 脩 (非会員)
 株式会社セルシステム 代表取締役
 〒225-00012 神奈川県横浜市青葉区あざみ野南 1-2-8
 熱電素子駆動, レーザー素子駆動, 光射出装置の研究に従事。
 日本化学会, 光化学会に所属。

すると, $M_v = 0.61$ (ランク C) , $M_u = 1.6$ (ランク D) であった。D65 標準蛍光ランプが, カタログ値より悪かった原因は, 前述した通り, ライトブースで用いた白色壁面の反射率や D65 標準蛍光ランプの取付で用いた照明器具の傘部分の反射率の影響と考えるが, 直接蛍光ランプに分光放射計の入射ヘッドを近づけても大きく改善されなかったことから, 個体差・寿命等の他の原因があると考えられる¹⁵⁾。

評価結果から, UV-LED を上手く利用すれば, 蛍光条件等色指数についても非常に高い一致度を達成できることが分かる。しかしながら, UV-LED の高強度化, 波長拡大が進んでいるが, まだやはり光強度が足りないため, 十分な光強度を得るためには, 複数の LED を実装する必要がある。また, 紫外放射を透過する適切な拡散板が少ないという問題もある。即ち, UV-LED からの光を拡散させるためには, その配置や光学系を工夫する必要がある。

5. まとめ

本研究では, 紫外・可視域の LED を利用した実用的な LSTL を開発するために, LSTL を実装したライトブースを試作し, その評価を D65 標準蛍光ランプとの比較を通して行った。表 1 に, 本研究で得られた比較結果を纏める。

比較結果から, D65 標準蛍光ランプに比べて, 標準イルミナント D65 への不一致度だけでなく, 精確に LED 温度を制御することにより, 非常に高い光強度安定度が実現できることを示した。また, 経時変化などについても, LED を利用しているため非常に少ない安定な光源であることを示した。

表 1 LSTL により再現される D65 近似スペクトルと D65 標準蛍光ランプの比較結果纏め

Table 1 Comparison of CIE illuminant D65 reconstructed by LSTL and D65 standard fluorescent lamp.

比較項目	LSTL	D65標準蛍光ランプ
不一致度(可視域)	7.1 %	35 %
M_v	0.38	0.61
M_u	0.91	1.6

加えて, 本研究を通して明らかになった LSTL の課題である各 LED のスペクトル校正と再現スペクトル予測, 空間・面内均一性の制御の課題, 更には紫外領域への拡張などについては, その改善方法等について考察を行った。

LSTL を利用すれば, 原理的には標準イルミナント D65 以外のスペクトルの再現も容易に行うことができる。しかし, JIS 等の規格で規定されている基準スペクトルは, LSTL を加味した規定には至っていないというのが現実である。蛍光灯照明器具の生産中止が進む現在, 標準蛍光ランプの入手も困難になりつつある。このため, 今後は, LSTL に限らず各社から販売され始めている標準イルミナントを再現する白色 LED 等をどのように, 物体色などの製品の性能評価に有効利用していくかを検討する必要があると考える。

我々は, 本研究の成果を生かし, 照明分野においても使用できる, より良い LSTL の開発やその応用についての研究を今後も進める予定である。