高天井用LED照明器具の輝度分布測定に関する基礎研究

正会員 篠原 奈緒子 (東海大学大学院, 株式会社日建設計)

専門会員 岩田 利枝 (東海大学)

正会員 谷口 智子 (株式会社久米設計)

専門会員 望月 悦子 (千葉工業大学)

専門会員 海宝 幸一 (株式会社日建設計)

Pilot Study on Measurement of Luminance Distribution in LED Floodlights

Member Naoko Shinohara (Graduate School of Science and Technology, Tokai University, Nikken Sekkei Ltd.),

Fellow Member Toshie Iwata (Tokai University),

Member Tomoko Taniguchi (Kume Sekkei Co., Ltd.),

Fellow Member Etsuko Mochizuki (Chiba Institute of Technology) and

Fellow Member Koichi Kaiho (Nikken Sekkei Ltd.)

ABSTRACT

LED lighting technology has been advancing quite rapidly. The luminance distribution in LED floodlights is assumed to differ from that of high-intensity discharge (HID) floodlights. However, measuring the luminance of LED floodlights is difficult because of their high luminance and narrow beam. The purpose of this study was to clarify the problems with the luminance measurement of floodlights using digital cameras.

The modulation transfer function (MTF) characteristics of seven different camera systems were obtained, and the luminance distribution of different types of LED floodlights was measured using four different camera systems. The luminance distribution of the LED floodlights measured using by the camera systems with different MTFs showed different values of luminance. The results show that a higher resolution does not necessarily mean a better MTF is maintained. Identifying the MTF characteristics of the camera system is important to determine the accuracy of the luminance distribution measured with the system.

KEYWORDS : LED floodlight, luminance distribution, camera system, MTF characteristic

1. はじめに

照明のLED化が進み、スポーツ施設においてもLED照明器具の導入が増えている。LED照明器具は、小型、高効率、高い制御性、光源が長寿命（従来照明器具におけるランプ交換が不要）などの長所がある。一方で、発光部が小さくかつ指向性が強いいため、発光部輝度が従来照明器具に比べて高いと考えられる。また、LED照明器具は複数の素子を組み合わせて構成しているものがあり、従来照明器具と比べ発光部輝度が不均一となる照明器具もある。照明器具の発光部平均輝度が等しい場合、発光部輝度が均一の照明器具と不均一の照明器具とでは、最大輝度は不均一の照明器具の方が高くなる。

従来、輝度測定にはスポット輝度計が用いられてきた。スポット輝度計には国際的な基準はある¹⁾が、日本国内では基準がない（照度計についてはJISの基準がある²⁾）。日本国内で販売されているスポット輝度計の仕様には、測定角、測定距離、測定輝度範囲のほか、標準分光視感度曲線 $V(\lambda)$ からの外れ、確度や繰返し性について記載があり、ISOの基準¹⁾に則った記載がされているものがほとんどである。正確な輝

度をスポット輝度計で測定するには、測定角に対して測定対象が十分に大きい必要がある。スポット輝度計の視野角は小さいもので 0.2° であり、これは1m離れた位置で直径3mm程度の大きさに相当する。LED照明器具の発光部の大きさはその種類にもよるが、小さいものでは短辺方向の寸法が1mm以下のものもある。スポット輝度計では1mの測定距離でも発光部輝度の測定が難しい。また、発光部が小さく指向性が強いいため、発光部輝度が測定方向によっては従来照明器具に比べて高くなると考えられる。スポット輝度計の測定可能最大輝度は、高いもので $28 \times 10^6 \text{ cd/m}^2$ であるが機種が限られ、測定輝度範囲を超える可能性もある。竹下はスポット輝度計について、「従来の輝度測定はほぼ均一な輝度を測定することを前提にされており、発光部が極めて小さく鋭敏な輝度分布を持つLED照明の測定については、測定距離によって測定視野内の発光部の状況が異なるため、正確な輝度測定は難しい」と述べている³⁾。

一方で、近年はデジタルカメラによる輝度分布計測（以降、画像測光と記す）も行われている。画像測光は、アナログ画像だった1976年から検討されており^{4,5)}、デジタル画像となった1994年頃からは活発に開発報告がされてい

る⁶⁻⁹⁾など。これらの方法を基に、画像測光システムは現在各研究者、各メーカーが独自に開発している¹⁰⁻¹³⁾など。撮影画像から輝度分布を算出するためのフリーソフトもある¹⁴⁾。

画像測光システムに解像度の高いデジタルカメラを用いることで小さな発光部の輝度も測定可能であり、かつ、NDフィルターを装着することで高輝度の測定が可能である。しかし、画像測光システムに用いるデジタルカメラの性能やキャリブレーション法などの規定はない。画像測光システムには、いくつかの利用上の制限があることが明確になっている^{15,16)}など。これらを踏まえ、測定精度に関する研究が多数行われており、利用上の制限や想定される測定誤差を理解したうえで、ある条件もしくは照明環境において利用可能である、と多くの研究者が報告している¹⁷⁻²¹⁾など。販売されている多くの画像測光システムの仕様をスポット輝度計と比較すると、標準分光視感度曲線 $V(\lambda)$ からの外れには触れていない。画像測光システムの仕様には、測定輝度範囲や確度もしくは精度の記載はあるが、繰返し性の記載のあるものは少なく、示される特性が異なっている。

本研究では、スポーツ施設で用いられる高天井用LED照明器具の発光部輝度測定において、画像測光システムの性能の違いが測定結果に与える影響を検証することを目的とした。画像測光による輝度測定において示すべき画像測光システムの性能を検討し、性能の異なる複数の画像測光システムによって得られるLED照明器具の輝度測定値の違いについて考察した。

2. 照明器具の輝度分布測定の現状

照明器具の発光部輝度は、日本照明工業会の公共施設用照明器具の規格²²⁾および照明学会の技術基準²³⁾に算出方法が示されている。いずれも平均輝度による評価であるが、平均輝度の算出方法、測定角および発光部の取り扱い方が異なる。

日本照明工業会の公共施設用照明器具の規格²²⁾では、照明カバーの面積と照明器具直下の光度から平均輝度を算出することとなっている。LED照明器具の場合、小さな発光部に対して過大なカバーが装着される照明器具もあり、発光部の大きさと輝度が同じでも、照明カバーの面積により、平均輝度は異なる。

照明学会の技術基準²³⁾では、発光部輝度が均一の場合と不均一の場合とで平均輝度の算出方法を分けている。発光部輝度が均一の場合には、測定輝度（鉛直角 85° （仰角 5° ）からのスポット輝度計による測定）か、計算輝度（鉛直角 85° 方向の光度及び見かけの発光面積より算出）とされている。LED照明器具では、照明カバー等のかけ方が器具によって異なるため見かけの発光面積の求め方を定義する必要がある。日本照明工業会の公共施設用照明器具の規格²²⁾では、発光面積の求め方を示している。照明学会の技術基準²³⁾では、見かけの発光面積の求め方に明確な定義はなく、計算輝度で評価する場合には計算の仕方によって結果が異なる可能性がある。発光部輝度が不均一の場合は、視角 $3\text{分}/\text{pixel}$ 程度の解像度を持つ画像測光システムにより、鉛直角 85° にて測定した最大輝度の $1/10$ 以上のエリアを見かけの発光面積として、鉛直角 85° の光度より平均輝度を算出する。画像測光により輝度分布測定を行っているが、測定輝度値は最大輝度の $1/10$ 以上のエリアを求めるために用いており、測定輝度値による平均輝度の算出はしていない。「1. はじめに」で述べた通り、照明器具の発光部平均輝度が等しい場合、発光部輝度が均一の照明器具と不均一の照明器具とでは、不均

一の照明器具の方が最大輝度は高くなる。発光部の輝度分布の取得は重要と考えられるが、測定輝度値による平均輝度の算出はしていない。発光部輝度が不均一の場合は、正確な輝度測定が難しいためと考えられる。

いずれの方法も照明器具の発光部輝度は平均輝度で評価しているが、発光部輝度が均一の場合と不均一の場合では、上述の通り等しい平均輝度でも最大輝度が異なる。照明器具の平均輝度もしくは等価光幕輝度が等しい場合には、発光部輝度が均一の場合に比べて不均一の場合の方がグレアを感じやすく、輝度の不均一性がグレアに影響を与えていることが示されている^{24,25)}。

画像測光システムによるLED照明器具の輝度測定に関する研究では、Tyukuhova²⁶⁾は、精度の高い輝度測定のためのカメラの設定やキャリブレーション法などを検証しているが、さらに様々な条件下での検証が必要だと述べている。また、LED照明器具内のLED素子1つを対象とした検討結果であり、照明器具全体としての評価は調査が必要だとも述べている。Slominskiは視角約 $0.4\text{分}/\text{pixel}$ から $2\text{分}/\text{pixel}$ 程度の解像度の画像測光システムを使った実験で、LED素子の発光部輝度は、高い解像度のシステムで測定した方が得られる最大輝度が高く、低い解像度のシステムに比べてより正確に最大輝度を取得できることを示している²⁷⁾。一方、画像測光システムに必要な解像度については、山田らは、 $0.2\text{分}/\text{pixel}$ 前後の解像度が必要と述べている²⁸⁾。これは、視角 2分 の矩形視標を注視した場合の視認性に関する被験者実験結果より、ヒトが視対象を視認した時のコントラストと等しい結果を画像測光システムで得るには、矩形視標が 10pixel 程度あると視標のコントラストを再現できることによる。照明器具からのグレアを評価する際には照明器具の発光部輝度の情報が重要であり、ヒトが視対象を視認したときと等しい解像度の輝度分布を得られる必要があると考えられる。照明学会の技術基準²³⁾で示されている照明器具の発光部輝度算出のための測定に用いる画像測光システムの解像度は、山田ら²⁸⁾の研究結果である $0.2\text{分}/\text{pixel}$ 前後の解像度より低い。照明学会の技術基準²³⁾で示されている解像度の画像測光システムを使って照明器具の発光部輝度を測定した場合は、得られる最大輝度が実際より低いと考えられ、またヒトが視対象を視認した時のコントラストと等しい結果を得るのに必要な解像度より低い解像度の測定結果となる。

前述のように、画像測光システムに用いるデジタルカメラの解像度が測定最大輝度値に影響し²⁷⁾、測定輝度値はデジタルカメラの解像度の影響を受けると考えられる。一般的にはデジタルカメラの性能は、解像度（＝画角÷画素数）で判断している。しかし岡野は、解像度だけではデジタルカメラの性能は十分に示すことができず、鮮鋭度に関係する結像特性を最も表現できるMTF（Modulation Transfer Function）特性が、デジタルカメラ全体としての性能評価が可能で画像性能表現に最適な手段と述べている²⁹⁾。MTF特性に影響を与えるものとして、撮影レンズ系の収差、光の回折、光学ローパスフィルタ、CCD受光部の開口、電気回路の増幅特性、デジタル補間処理、デジタルフィルタ処理等数多くの要素がある。対象物を画像上に正確に再現することで、測定された対象物の正確な輝度値が取得できる。よって、画像性能表現に最適な手段と言われるMTF特性を把握する必要があると考えられる。

3. 画像測光システムの性能確認

3.1 システム性能の確認方法

画像測光システムは、国内で使用されているものでも様々ある。本研究では、市販のデジタルカメラとレンズで構成されたシステムと、工業用デジタルカメラと制御用コンピューターで構成されたシステムを対象に、表1に示す計7種の画像測光システムについて性能を検討した。この中には同一デジタルカメラでレンズが違うもの、同一デジタルカメラ・同一レンズでズームによる画角違いも含む。システムA～Fはカラー画像を取得し、システムGはモノクロ画像を取得するシステムである。システムA, B, CおよびFの撮像素子はCMOSで、このうちシステムA, B, Cは同一のカメラを用いている。システムDとEの撮像素子はCCDで同一のカメラを用いている。よって、システムA, B, CとシステムD, EとシステムFとでそれぞれカラー画像化の処理方法が異なる。各画像測光システムのキャリブレーション条件は、システムA, B, D, Eが同一で、その他は異なる。取得画像から輝度画像へは、カラー画像を取得するシステムA～Fは、全てモノクロ画像化（システムA～Eは同一の方法）してからピクセル毎の諧調値より輝度値を求めて変換した。シャッターを押す毎にデジタルカメラの視野が動く可能性があることから、PCもしくはレリーズによりシャッターを切る（システムA, B, C, D, E, G）か、シャッターボタンを1度押すと自動でシャッタースピードと絞りを変更してシャッターを切り、複数枚を自動撮影するシステム（システムF）を用いた。

解像度の異なる画像測光システムを用いることで得られる輝度値が変わる可能性がある²⁷⁾が、照明器具の輝度測定結果をグレア評価などの視環境評価に用いる場合には、ヒトが視対象を視認した時と等しい解像度の輝度分布を得られるシステムが必要と考えられる。本研究で用いた画像測光システムAとBは、山田らの実験で示された²⁸⁾ヒトが視対象を視認した時のコントラストと等しい結果を得るために必要な解像度0.2分/pixel程度のシステムである。表中に示したナイキスト周波数は、サンプリング（撮影された画像を画素の集合体に分ける）した時に再現できる最大の周波数を示しており、この周波数よりサンプリング対象の空間周波数が高い場合は、画像の再現が難しいことを意味する。

なお、画像測光システムには魚眼レンズが用いられることもあるが、この場合、例えばシステムAのようなピクセル数の多いカメラを用いた場合でも、解像度は1.8分/pixelと低くなるため、本測定では対象にできなかった。

「2. 照明器具の輝度分布測定の現状」で述べたように、画像測光システムに用いるデジタルカメラの性能評価に適した手段として、MTF特性がある。MTF特性は、画像性能表現の評価が行えるため、撮像素子の違いによるカラー画像化の処理の違いなどを含んだ評価が行える。MTF特性の解析方法はいくつかある²⁹⁾が、本研究では、図1に示す50種の矩形波を持つ解像度テストチャート（USAF 195 1X EDMUND）を用いた。図1中にある灰色の線分および①～⑥の番号は、実際の解像度テストチャートには記されていないが、解析に用いた部分を表すために著者らが追記したものである。暗室において均一輝度の発光面（ムトーエンジニアリング社製SLT-A4C）を背景においた解像度テストチャートを2m離れた位置より測定した。発光面は電流波計（Tektronix製、TDS5054B）によりフリッカーのないことを確認した。解像度テストチャート（図1）は全体で76.2mm角で、測定画像の中央に表示されるように設置し、収差の影響

表1 画像測光システムの仕様

Table 1 Specifications of the measurement systems.

システム	ピクセル数	画角 (deg)	解像度 (pixel/deg) / (分/pixel)	ナイキスト周波数 (cpd)	測定輝度範囲 (cd/m ²)	絞り f	シャッタースピード (s)
A	6000×4000	28.5	211 / 0.285	105.26	10 ~ 73,000	5.6	1/4000, 1/1000,
B	6000×4000	29	207 / 0.290	103.45	10 ~ 50,000	5.6	1/250, 1/60, 1/15, 1/4
C	6000×4000	76	79 / 0.760	39.47	6 ~ 43,000	5.6	
D	3872×2592	28.5	136 / 0.441	67.93	4 ~ 69,000	5.6	1/4000, 1/2000, 1/500, 1/60, 1/15, 1/2
E	3872×2592	76	51 / 1.177	25.47	3 ~ 71,000	5.6	
F	3648×2736	67.7	54 / 1.113	26.94	0.02 ~ 62,000	2.8, 5, 8	1/4000, 1/1000, 1/250, 1/60, 1/40, 1/10, 1/2.5, 1/2, 2, 8
G	1600×1200	26	62 / 0.975	4.26	0.2 ~ 23,500	4	1/8192, 1/4096, 1/2048, 1/1024, 1/512, 1/256, 1/128, 1/64, 1/32, 1/16, 1/8, 1/4, 1/2, 1

図1 解像度テストチャート（図中①～⑥の灰色の線分は輝度測定部）

Fig. 1 Resolution test slide (Along the lines ① to ⑥, luminance distribution was measured).

の少ない条件で撮影した。高輝度の照明器具の測定にはNDフィルターの装着が必要であり、MTF特性の解析もNDフィルターを含めての評価が適切であるが、均一な高輝度の発光面を作れなかったため、NDフィルターを装着せずに測定を行った。

MTF特性は、式(1)より空間周波数別のコントラストを算出することで示すことができる。

$$C = \frac{L_{max} - L_{min}}{L_{max} + L_{min}} \quad (1)$$

C：コントラスト

L_{max} ：最大輝度 (cd/m²)

L_{min} ：最小輝度 (cd/m²)

本研究では、19種類の空間周波数を用いて解析した。具体的には図1中①～⑥の灰色の線分部分の解像度テストチャートの輝度を用いた。解像度テストチャート（図1）のグループ数とライン数の対応表に記載の空間周波数（ペア/mm）と、それを2m離れた位置から測定した場合の空間周波数（cpd）を表2に示す。左側に示した「位置」とあるのが図1中の矩形視標の位置を示すもので、数字は解像度テストチャート（図1）に記載されているものである。例えば

表2 解像度テストチャート（図1）の空間周波数（ペア/mm）と測定距離2m時の空間周波数（cpd）

Table 2 The spatial frequency (line-pairs/mm) of the resolution test slide (Fig. 1) and the spatial frequency (cpd) measured from 2m away.

位置		空間周波数 (ペア/mm = cycle/mm) *	測定距離2m 時の 空間周波数 (cpd)
中央	図1中の①	0.01	0.35
-2	図1中の②	0.25	8.73
	2	0.28	9.77
	図1中の③ 上から	0.32	11.00
		0.35	12.32
		0.40	13.86
		0.45	15.53
-1	図1中の④ 上から	0.50	17.45
		0.56	19.58
		0.63	21.99
		0.71	24.68
		0.79	27.68
		0.89	31.10
0	図1中の⑤	1.00	34.91
	図1中の⑥ 上から	1.12	39.10
		1.26	43.98
		1.41	49.22
		1.59	55.50
		1.78	62.13

*解像度テストチャートではペアと表現されているが cycle と同義

表2の「中央」は、解像度テストチャート（図1）内で数字の記載のない上部右から2番目にある最も大きい正方形の矩形を示し、図1中の①の灰色の線分部分になる。同じように表2の「-2」の欄の「1」は、解像度テストチャート（図1）の右下にある3つの矩形を示し、図1中の②の灰色の線分部分を示す。表1に各画像測光システムのナイキスト周波数を示したが、これによるとシステムG（ナイキスト周波数4.26cpd）は、表2に示した空間周波数0.35cpdの矩形視標のみ画像再現が可能な性能と考えられる。システムA, B, Dは表2に示す空間周波数62.13cpd以下、システムCは空間周波数34.91cpd以下、システムE, Fは空間周波数24.68cpd以下の矩形視標の画像再現が可能な性能と考えられる。

3.2 各システムのMTF特性

解像度テストチャート（図1）の輝度分布測定結果のうち、図1中の①～④の灰色の線分で示した部分の解像度テストチャートの輝度を線分毎に折れ線グラフにした。代表として図2にシステムB、図3にシステムFの図1中の①～④の4つの灰色線分部分の結果を示す。図1中の①の灰色の線分で示した輝度が図2の4つのグラフのうち「図1の①」とある左のグラフの輝度になる。システムB（図2）、システムF（図3）ともに空間周波数が高くなると最大輝度と最小輝度の差が小さくなる。

図1に示したように④の灰色の線分には6種の異なる空間周波数の矩形視標が含まれているので、18ヵ所の低輝度部分が現れるはずである。システムB（図2）の④内の低輝度部分は18ヵ所全て現れたが、システムF（図3）の④内の低輝度部分は18ヵ所現れていない。システムF（ナイキスト周波数26.94cpd）は、表2に示す図1中の④の空間周波数17.45～24.68cpdよりナイキスト周波数が高く画像再現の可能範囲とみられるが、矩形視標部と背景となる白色部を識別することはできなかった。

全てのシステムについて同様なグラフを作成して確認し

図2 システムBによる解像度テストチャートの測定輝度

Fig. 2 Luminance of resolution test slide measured by system B.

図3 システムFによる解像度テストチャートの測定輝度

Fig. 3 Luminance of resolution test slide measured by system F.

た。システムE（ナイキスト周波数25.47cpd）は表2に示す空間周波数17.45～24.68cpdは画像再現の可能範囲とみられるが、矩形視標部と背景となる白色部の識別はできなかった。システムC（ナイキスト周波数39.47cpd）は表2に示す空間周波数34.91cpdまでの再現が可能範囲とみられたが、空間周波数62.13cpdまでの矩形視標部と背景となる白色部を識別していた。システムG（ナイキスト周波数4.26cpd）は表2に示す空間周波数0.35cpdのみの再現が可能範囲とみられたが、空間周波数12.32cpdまでの矩形視標部と背景となる白色部を識別していた。システムAとDは、ナイキスト周波数から予想した通り、表2に示す全ての矩形視標部と背景となる白色部を識別していた。なお、本解析は縦方向の輝度分布を用いたが、横方向の解析でも同様の結果となった。

MTF特性を確認するために、式(1)を用いて空間周波数毎のコントラストを算出した。コントラスト算出用の最大輝度、最小輝度は、解像度テストチャート（図1）の測定結果よりそれぞれ平均値を算出して求めた。図4にコントラスト算出用の最大輝度、最小輝度の求め方を示す。図1中の①の灰色の線分上の輝度は、矩形視標部上下にある背景となる白色部の輝度値を平均したものを最大輝度とした。最小輝度は矩形視標部の輝度を平均したものをを用いた。画像にする際に発生する矩形視標部と背景となる白色部の境界はエッジ効果（輪郭を強調する現象）およびエイリアス効果（ナイキスト周波数以上の信号が混入することで発生するノイズ、輪郭に現れるギザギザなど）の影響を受けるため、矩形視標部と背景となる白色部の境界の輝度値を確認し、エッジ効果、エイリアス効果の影響のない輝度値のエリアを選定して平均輝度

図4 コントラスト算出用 L_{max} と L_{min} の求め方

Fig. 4 Determination of L_{max} and L_{min} for calculating contrast.

を算出した。例えば解像度の低いシステムEやFでは、矩形視標部とその上下にある背景となる白色部の境界から2pixel分離れた白色部の各3ピクセル分の平均値を最大輝度とし、矩形視標部の中央5pixel分の平均値を最小輝度とした。図1中の①の灰色の線分以外は、矩形視標部間の背景となる白色部の輝度各1点（計2点）を平均したものを最大輝度、各矩形視標部の輝度各1点（計3点）を平均したものを最小輝度とした。

これらから、式(1)を用いて空間周波数40cpdまでの空間周波数毎のコントラストを算出した結果を図5に示す。表1に示すように解像度はシステムA>B>D>C>G>F>Eの順で、ナイキスト周波数はシステムA>B>D>C>F>E>Gの順で高かった。概ね解像度およびナイキスト周波数が高い方が高いコントラストを保持する傾向が見られた。システムF, Gは、空間周波数0.35cpdでもコントラスト0.9以下で、他のシステムに比べて低かった。システムEは空間周波数0.35cpdでは0.96のコントラストを保持していたが、それ以降はコントラストが急激に下がった。

使用した画像測光システムの中では高解像度のシステムAとBは、デジタルカメラは同じだが使用レンズが異なり、システムAの方が解像度、ナイキスト周波数は高い。しかし、システムAとシステムBのコントラストは空間周波数19.58cpd以下では等しく、空間周波数21.99cpd以上でシステムBがAより高くなっている。システムCは空間周波数12.32cpdを超えると、システムDは空間周波数13.86cpdを超えると急激にコントラストが低下する。システムCとDではシステムDの方が解像度、ナイキスト周波数が高いが、空間周波数15.53cpdを超えるとシステムCの方が高いコントラストを保持していた。これらからデジタルカメラの解像度だけでは輝度測定性能を判断できず、MTF特性の表示も必要だと言える。

各画像測光システムの解像度を考慮し、図5の横軸をpixel/cycleとした25pixel/cycleまでの結果を図6に示す。1サイクルあたりのピクセル数が等しくても、システムによって保持できるコントラストが異なる。システムE, F, Gを除いて10pixel/cycle（矩形視標部分5pixel）以上があれば0.8以上のコントラストを保持することができ、20pixel/cycle（矩形視標部分10pixel）以上があればコントラスト0.95以上を保持していた。

今後、照明器具の輝度分布測定結果をグレア評価などの視認性評価に用いる場合は、ヒトが視対象を視認した時と等しい解像度の輝度分布を得る必要があると考える。山田らは、

図5 各システムの空間周波数別のコントラスト

Fig. 5 Spatial frequency vs. contrast of each system.

図6 各システムの1サイクルあたりのピクセル数とコントラストの関係

Fig. 6 Pixel/cycle vs. contrast of each system.

屋内照度200lx程度および屋外照度15lx程度の環境で視角0.7以上の被験者による実験で、ヒトが視認できる視角寸法は2分程度までであり、視認性評価を画像測光で行う場合には、視角2分程度の矩形視標のコントラストを測定できる必要があると述べている²⁸⁾。この時に必要な矩形視標のピクセル数は10pixelで、測定されたコントラストは矩形視標の反射率及び照度より計算したコントラストに対して0.9以上であった。照度の他に測定対象とその背景の輝度比によっても結果は異なると推測されるが、画像測光システムで測定する際の測定対象のピクセル数（空間周波数）とその時の画像測光システムが保持するコントラストを示すことで、測定値の信頼性を説明できると考える。本研究および山田ら²⁸⁾の結果から、最大性能としては、測定対象の最小視角は2分程度で、この時の測定画像上の測定対象の大きさが10pixel以上となり、20pixel/cycle時のコントラストは0.9以上が必要と考える。

4. 照明器具の輝度分布測定

4.1 測定方法

画像測光システムA～Gのうち、同じ画角（28.5度）で性能の異なるシステムAとDおよびシステムAまたはDと異なるデジタルカメラとレンズの組み合わせであるシステムFとG（システムCおよびBはシステムAと同様のデジタルカメラ、システムEはシステムDと同様のデジタルカメラとレンズでズームによる画角違い）の4種を用いて、400W相当の高天井用LED照明器具の中心に正対して輝度分布を測定した。対象とした照明器具の仕様（カタログ値）を表3に示

表3 測定したLED照明器具
Table 3 LED floodlights used in the measurement.

LED 照明器具	(i)	(ii)	(iii)	(iv)
種類	COB	COB	SMD	SMD
配光	中角	広角	中角	超広角
消費電力 (W)	200	215	188	182
器具光束 (lm)	21,000	24,000	22,500	20,484
最大光度 (cd)	20,846	12,000	17,708	16,322

表4 NDフィルター装着時の各システムの測定輝度範囲
Table 4 Measurable luminance range of each system with ND filter.

システム	A	D	F	G
最小輝度 (cd/m ²)	13,230	5,000	28	174
最大輝度 (cd/m ²)	9.6×10^7	8.6×10^7	8.7×10^7	2.0×10^7

す。照明器具タイプによる差を確認するため、COB (Chip On Board) タイプ (多数のLEDチップを基盤に直接実装) で鏡面による配光制御を行っている器具 (i), (ii) と、SMD (Surface Mount Device) タイプ (セラミックや樹脂などで成形したキャビティの中にLEDを実装) でレンズによる配光制御を行っている器具 (iii), (iv) を用いた。暗室において照明器具を水平向きに設置し、各画像測光システムで正面から測定した。シャッターボタン押下時のカメラの視野のブレを防ぐため、「3.1システム性能の確認方法」と同様に、PCもしくはレリーズによりシャッターを切る (システムA, D, G) か、シャッターボタンを1度押すと自動でシャッタースピードと絞りを変更してシャッターを切り、複数枚を自動で撮影するシステム (システムF) を用いた。測定距離は5mと10mの2種類とした。照明器具の輝度は測定システムの測定レンジを超えるため、透過率0.1%のNDフィルターを各システムに装着した。測定システムA, D, GにはEdmund吸収型NDフィルター OD3.0 50mmを、システムFにはKENKO PRO-ND1000を用いた。各システムのNDフィルター装着時の輝度測定範囲を表4に示す。

4.2 解析方針

不均一な輝度分布を持つLED照明器具は、平均輝度だけでは照明器具の発光部の輝度の詳細を表すことができない。本研究では(1)輝度分布画像、(2)平均輝度、(3)最大輝度、(4)輝度値の出現範囲・頻度について解析し、画像測光システムの違いがこれらの結果に与える影響を考察した。

具体的には(1)では、照明器具を鮮明に撮影できるか (器具(i), (ii) は発光部とそれ以外が明確に区別できるか、器具 (iii), (iv) は各素子が発光部として固まらず一素子毎を発光部として区別できるか)、ゴースト (強い光がレンズ内で反射して写ったもの) などの発生が無いかを確認した。(2)では、各照明器具の理論平均輝度と測定により算出された平均輝度 (算術平均) との比較を行い、理論平均輝度との差や照明器具の種類やシステムによる差を確認した。(3)では、Slominskiの測定²⁷⁾ で示された解像度の違いが

最大輝度に与える影響を確認するため、各測定で得られる最大輝度の比較を行った。(4)では、照明器具の輝度の分布を確認するため、輝度分布画像から得られるピクセル毎の輝度よりヒストグラムを作成して検討した。

本測定では、測定距離10mにおける照明器具の発光部の視角は、小さいもので0.05°であった。システムAで測定距離5mの場合の発光部のピクセル数は21 pixel、測定距離10mで10 pixelとなる。システムAのMTF特性は、20 pixel/cycleで0.9以上のコントラストを保持していた。システムAの測定距離5mと10mの測定では、共に配光データから取得できる光度と発光面積から求めた理論値と同等の輝度値を取得できると考え解析した。

ここでは、山田ら²⁸⁾ の研究を参考に、システムの性能を明らかにするため、照明器具の発光部のピクセル数とそれを測定した際のシステムAのpixel/cycleにおけるコントラスト (MTF特性) を示した。一般的には空間周波数はcpdで示されるため、以降は、システムのMTF特性を述べる際にはcpdを用いて述べる。

4.3 測定結果

4.3.1 輝度分布画像

測定距離10mにおける画像測光システム別の照明器具の正面の輝度分布画像を図7に示す。輝度分布画像より、システムAとDは照明器具内の発光部とそれ以外の区別が明確にできるが、システムFとGは照明器具内の発光部とそれ以外の区別が難しいことがわかる。また、システムFとGはフレアが発生している。

システムDの器具 (iv) の輝度分布画像は、測定距離5mでゴーストが発生していた。図8に示すようにシャッタースピード1/2秒を含めると、発光部の存在しない画像右上に照明器具と同径の像の発生 (ゴースト) が見られる。システムDのNDフィルター装着時のシャッタースピード1/2秒の輝度測定範囲は $0.5 \times 10^3 \sim 5.3 \times 10^4$ cd/m²、1/15秒の輝度測定範囲は $2.9 \times 10^4 \sim 2.6 \times 10^5$ cd/m²である。ゴーストの影響の排除のため、シャッタースピード1/2秒の画像を含まない解析も検討したが、器具 (iv) の前面に装着されている照明カバー部分の輝度は、シャッタースピード1/2秒の輝度測定範囲のため必要と判断し、含めて解析した。

4.3.2 平均輝度

各照明器具の発光部の理論平均輝度と画像測光システムの距離別の測定結果より得られた平均輝度 (算術平均) を表5に示す。照明器具は表3と同じで、同じ順番に並べた。理論平均輝度は、配光図より得た照明器具正面方向の光度と照明器具の発光部面積より算出した。平均輝度算出のために発光部として定義したエリアを、表5中の照明器具写真内に斜線で示した。解析の結果、理論平均輝度は $0.3 \times 10^6 \sim 1.0 \times 10^6$ cd/m²程度、測定平均輝度は $0.1 \times 10^6 \sim 1.2 \times 10^6$ cd/m²程度であった。器具(i)のシステムFの測定結果は、解析ソフト上のエラーで輝度分布画像への変換が行えなかった (システムFは市販の画像測光システムで、エラーの原因は抽出できなかった) ため欠測となった。また器具 (iv) のシステムAの測定結果は、撮影し損ねた画像があったため欠測となった。

システムFとGの測定平均輝度の多くは、システムAとDに比べて低い。輝度分布画像 (図7) から分かるように、システムFとGは照明器具内の発光部とそれ以外の区別が難しい。本測定で用いた発光部の視角は小さいもので0.05°であり、この場合は視角3分の大きさとなる。ヒトが視認できる視角寸法である2分²⁸⁾ より大きいことから、発光部とそ

図7 測定距離10mにおける輝度分布画像

Fig. 7 Luminance distribution measured from 10m away.

シャッタースピード1/2を含む シャッタースピード1/2を含まない

図8 測定距離5mからシステムDで測定した器具 (iv) の輝度分布画像

Fig. 8 Luminance distribution in the floodlight (iv) measured by system D from 5m away.

れ以外の区別ができる必要があるが、そうならなかった。システムFとGのような画像測光システム（空間周波数10cpdでコントラスト0.8以下）では、本測定で用いたLED素子が明確に視認できるような照明器具の輝度分布測定は難しいことが明らかとなった。よって、以降の解析には、システムAとDの結果を用いた。

理論平均輝度と測定による平均輝度を比較した。システムAでは器具(i)の測定距離5m, 10mともに理論平均輝度との差は7%であった。器具(ii)の測定距離5m, 10mでは、ともに理論平均輝度と一致した。器具(iii)では測定距離5mでは理論平均輝度との差は24%, 10mでは17%, 器具(iv)

では測定距離10mでは31%であった。システムDでは、器具(i)の測定距離10mでは理論平均輝度との差は18%, 器具(iii)の測定距離5mでは16%, 10mでは6%であったが、器具(ii)と(iv)では、理論平均輝度との差は45~55%と大きい。

理論平均輝度と測定平均輝度の差の原因の一つに、光軸を正確に捉えていないことが考えられる。今回測定したLED照明器具の中心部に発光部はなく、測定時に光軸を正しく捉えていても測定画像の中心に発光部の中心部は捉えられない。照明器具の性能を示す配光データは、照明器具の中心位置を基準にしていることから、照明器具の輝度分布を測定する場合にも照明器具の中心位置に合わせるべきと考えた。しかし、照明器具の中心部に発光部がない場合もあり、発光部中心に合わせて測定するべきかなどの課題が残った。

システムAとDの測定結果について比較した。器具(i), (ii)のシステムAの測定平均輝度は理論平均輝度との差が10%未満であったが、システムDでは約20~50%の差が見られた。測定距離別では、システムAでは測定距離5mと10mの差は最大5%で、測定距離10m以内であれば測定距離の影響は十分小さいと考える。しかし、システムDでは測定距離5mと10mとの差は最大で27%であった。システムAとDは共に空間周波数10cpdでコントラスト0.9以上であったが、詳しく見ると、システムAではコントラスト0.95, システムDではコントラスト0.93であった。光軸のズレの影響なども考えられるが、ヒトが視認可能な照明器具の発光部の視角0.05°程度（空間周波数10cpd程度）の測定の場合、空間周波

表5 理論平均輝度と測定距離別の輝度分布測定結果より得られた平均輝度と最大輝度

Table 5 The average luminance calculated and the average luminance and the maximum luminance measured from 5m and 10m away.

照明器具		(i)		(ii)		(iii)		(iv)	
平均輝度算出用の 発光部と測定距離10m 時の 立体角			発光部立体角 0.22×10^{-3} sr		発光部立体角 0.43×10^{-3} sr		発光部立体角 0.21×10^{-3} sr		発光部立体角 0.17×10^{-3} sr
理論平均輝度 (cd/m ²)		0.97×10^6		0.28×10^6		0.86×10^6		0.94×10^6	
測定距離		5m	10m	5m	10m	5m	10m	5m	10m
算術 平均 輝度 (cd/m ²)	システム A	0.90×10^6	0.90×10^6	0.28×10^6	0.28×10^6	1.07×10^6	1.01×10^6	欠測	0.65×10^6
	システム D	0.59×10^6	0.80×10^6	0.17×10^6	0.15×10^6	1.00×10^6	0.92×10^6	0.50×10^6	0.43×10^6
	システム F	欠測	0.40×10^6	0.15×10^6	0.13×10^6	1.21×10^6	0.26×10^6	0.20×10^6	0.17×10^6
	システム G	0.48×10^6	0.63×10^6	0.21×10^6	0.18×10^6	0.86×10^6	0.58×10^6	0.30×10^6	0.22×10^6
最大 輝度 (cd/m ²)	システム A	1.53×10^6	1.53×10^6	1.65×10^6	1.73×10^6	15.92×10^6	15.20×10^6	欠測	24.11×10^6
	システム D	1.62×10^6	1.65×10^6	1.67×10^6	0.49×10^6	10.36×10^6	10.01×10^6	13.96×10^6	12.17×10^6
	システム F	欠測	0.80×10^6	0.56×10^6	0.47×10^6	12.44×10^6	1.08×10^6	1.19×10^6	0.55×10^6
	システム G	0.96×10^6	0.69×10^6	0.56×10^6	0.26×10^6	1.58×10^6	1.23×10^6	0.57×10^6	0.30×10^6

数10cpdでコントラスト0.95以上のMTF特性を持つシステムを用いる必要があると判断できる。

4.3.3 最大輝度

測定による照明器具の発光部の平均輝度の解析の結果、システムAでは測定距離による大きな差は見られなかった。最大輝度は、測定距離に近い方が単位立体角当たりのピクセル数が多くなり、測定距離5mは測定距離10mに比べて最大輝度が高くなると予想される²⁷⁾ため確認した。表5中に最大輝度の測定結果を示す。最大輝度はデータエラーの可能性を排除するため、最大輝度の検出されたピクセル周辺の輝度を確認し、画像上2つ以上のピクセルで等しい輝度が検出されているものを本研究では最大輝度とした。

解析の結果、7条件（2種のシステム（システムAとD）×4照明器具から欠測を除く）のうち測定距離10mの方が5mより高い最大輝度を示した場合が2条件となった。いずれもCOBタイプでかつ鏡面による配光制御を行っている照明器具であり、SMDタイプの照明器具ではなかった。COBタイプでかつ鏡面による配光制御の照明器具は、SMDタイプの照明器具に比べて光軸のズレの影響が大きくなると考える。今回測定したLED照明器具は照明器具の中心部に発光部が無いことから、測定距離が短くなることで光軸のずれが大きくなったと推測される。測定距離が短い方が高い輝度を検出したSlominskiの測定²⁷⁾では、LED素子1つを画像の中央となるように測定しており、光軸のずれは小さいと考えられる。

器具(ii)はCOBタイプで発光部がSMDタイプに比べて大きく、かつ前面カバーは拡散性の高いものが使用されていた。測定距離5mと10mで差が出ない照明器具と予想していたが、システムDの測定距離10mの最大輝度は、測定距離5mの30%であった。システムDの測定距離10mでは、正確に輝度を捉えていないと考える。

器具(iii)は、システムAとDで測定された平均輝度の差は測定距離5mでは7%、10mでは8%であったが、最大輝度の差は測定距離5mおよび10mともに35%であった。平均輝度に比べて最大輝度の差が大きく、最大輝度を用いる場合には注意が必要である。例えば、照明学会の技術基準²³⁾では、発光部輝度が不均一の場合には鉛直角85°（仰角5°）にて測定した最大輝度の1/10以上のエリアを見かけの発光面積と

しているが、最大輝度は「視角3分程度の解像度」の画像測光システムにより測定することとなっている。設置高さ3mとした場合の測定距離は34mにもなり、用いる画像測光システムの解像度によって見かけの発光面積として抽出される範囲が異なる可能性がある。

4.3.4 輝度値の出現範囲と頻度

輝度分布画像の 10^3 cd/m²以上のピクセル毎の輝度値(L)を、 $10^3 \leq L < 10^{3.1}$ 、 $10^{3.1} \leq L < 10^{3.2}$ 、 $\dots$ 、 $10^{7.5} \leq L < 10^{7.6}$ の輝度範囲で区切り、輝度範囲毎のピクセル数を集計した。集計されたピクセル数と1ピクセル当たりの立体角から、輝度範囲毎の立体角を算出し、ヒストグラムを作成した。

COBタイプの代表として、器具(i)のシステムAとDによる測定距離10mと5mの 10^4 cd/m²以上の輝度値の出現範囲・頻度を図9、図10に示す。立体角は $10^4 \leq L < 10^{4.1}$ 、 $10^{7.5} \leq L < 10^{7.6}$ の輝度範囲で示す。測定距離10m（図9）、5m（図10）ともにシステムAとDで検出された輝度は異なる。器具(i)の測定距離10mにおけるシステムAとDの平均輝度と最大輝度の差は8~12%と大きくなかったが、測定輝度の内訳は異なる。システムによりピクセル毎の測定輝度は異なることが明らかとなった。

上述の通り、同一測定距離において同一照明器具を異なるシステムで測定した場合に検出された輝度は異なった。測定距離5mと10mとで同一照明器具を同一システムで測定した場合に検出される輝度が異なるかを確認するため、システムAの器具(i)の測定距離5mと10mの輝度範囲毎の立体角のうち最大値を1とした場合の輝度値の出現範囲・頻度を図11に示す。検出された輝度出現頻度は、測定距離5mと10mで差はない。システムDでも同様の結果が得られ、器具(i)では、同一システムであれば測定距離による輝度出現頻度に差は見られなかった。なお、測定距離10mの輝度値の出現範囲・頻度の立体角を測定距離5mに相当するよう4倍としたところ、概ね結果は一致した。

SMDタイプの代表として、器具(iii)のシステムAとDによる測定距離10mと5mの 10^4 cd/m²以上の輝度値の出現範囲・頻度を図12、図13に示す。測定距離10m（図12）、5m（図13）ともにCOBタイプの器具(i)と同様にシステムAとDで検出された輝度が異なる。同一システムによる測定距離別の測定結果では、器具(i)と同様に測定距離によって検出

図9 器具(i)の測定距離10mの輝度ヒストグラム

Fig. 9 Luminance histogram in the floodlight (i) measured from 10m away.

図10 器具(i)の測定距離5mの輝度ヒストグラム

Fig. 10 Luminance histogram in the floodlight (i) measured from 5m away.

図11 器具(i)のシステムAの測定距離5mと10mの輝度ヒストグラム

Fig. 11 Luminance histogram in the floodlight (i) measured by system A from 5m and 10m away.

された輝度出現頻度に差は見られなかった。

輝度値の出現範囲・頻度では、画像測光システム毎に検出される輝度が異なることが明らかとなった。本測定に用いた照明器具においては、LED照明器具のタイプ(COBとSMD)で、また、配光や前面カバーの特徴によらず同じであった。

4.3.5 考察

照明器具の輝度分布測定では、測定条件を統一して測定できれば測定に用いる画像測光システムの仕様を決定しやすいが、フィールド実測においては、照明器具の大きさや設置高さは様々であり、用いる画像測光システムによって結果が異なることが懸念される。システムAのように空間周波数10cpdでコントラスト0.95以上を保持する画像測光システム

図12 器具(iii)の測定距離10mの輝度ヒストグラム

Fig. 12 Luminance histogram in the floodlight (iii) measured from 10m away.

図13 器具(iii)の測定距離5mの輝度ヒストグラム

Fig. 13 Luminance histogram in the floodlight (iii) measured from 5m away.

ムでは、平均輝度と最大輝度について測定距離5mと10mとで顕著な差は見られず、照明器具の発光部の視角が0.05°程度(空間周波数10cpd程度)のフィールド実測に適用可能と考える。空間周波数10cpdでコントラスト0.93のシステムDは、理論平均輝度と測定平均輝度との差が45%以上あるものがあり、また照明器具によっては平均輝度と最大輝度について測定距離5mと10mとで差がみられた。ヒトが視認可能な照明器具の発光部の視角0.05°程度(空間周波数10cpd程度)の測定の場合、空間周波数10cpdでコントラスト0.95以上のMTF特性を持つシステムを用いる必要があると判断できる。

輝度値の出現範囲・頻度を比較した結果、同じ照明器具を測定した時の平均輝度に大きな差がなくても、画像測光システムによって得られるピクセル毎の輝度値が異なった。輝度分布を詳細に把握するためには、平均輝度、輝度値の出現範囲・頻度を合わせて示す必要があると考える。

測定に用いた画像測光システムの仕様(MTF特性など)は、測定結果と共に示す必要がある。「3.2 各システムのMTF特性」で説明した通り、測定対象のピクセル数(空間周波数)とその時の画像測光システムの保持するコントラストを示すことで、測定値の信頼性を説明できると考える。本研究では、例えば、測定対象の空間周波数が10cpdの場合には、画像測光システムの空間周波数10cpdの時のコントラストが0.95以上を保持していれば信頼できる測定結果となると考える。

本研究では、スポーツ施設で用いられる高天井用LED照明器具の発光部輝度測定を中心に、画像測光による輝度測定において示すべき画像測光システムの性能を検討し、性能の異なる複数の画像測光システムによって得られるLED照明器具の輝度測定値の違いについて考察した。検討の結果、以下の知見を得た。

解像度0.285～1.177分/pixelの複数の画像測光システムについて、デジタルカメラの性能評価に適した手段としてMTF特性の解析を行った結果、解像度が高いほど優れたMTF特性を保持する傾向がみられたものの一部はそうならなかった。一般的なデジタルカメラの性能判断に用いる解像度だけでは輝度測定性能を判断できず、MTF特性の表示も必要であることが示された。画像測光システムで測定する際の測定対象のピクセル数（空間周波数）とその時の画像測光システムが保持するコントラストを示すことで、測定値の信頼性を説明できると考えた。最大性能としては、測定対象の最小視角は2分程度で、この時の測定画像上の測定対象の大きさが10pixel以上となり、20pixel/cycle時のコントラストは0.9以上が必要と考える。

MTF特性の異なる4種の画像測光システムを用いて測定距離5mと10mの2条件で高天井用LED照明器具の輝度分布測定を行った。その結果、空間周波数10cpdでコントラスト0.8以下のシステムは、照明器具内の発光部とそれ以外を区別する画像は撮影できない場合があり、本測定で用いたLED素子が明確に視認できるような照明器具の輝度分布測定は難しいことが明らかとなった。

空間周波数10cpdでコントラスト0.9以上のMTF特性を持つ画像測定システムを用いて、同一の高天井用LED照明器具を測定した場合に得られる平均輝度、最大輝度を比較した結果、視角0.05°程度（空間周波数10cpd程度）のLED照明器具の発光部の輝度分布測定では、空間周波数10cpdでコントラスト0.95以上のMTF特性を持つシステムを用いる必要があると判断した。また、輝度値の出現範囲・頻度を確認した結果、平均輝度に大きな差がなくても画像測光システムによって得られるピクセル毎の輝度値に差があり、輝度分布を詳細に把握するためには平均輝度、輝度値の出現範囲・頻度を合わせて示す必要があると考えた。

測定に用いた画像測光システムの仕様（MTF特性など）は、測定結果と共に示す必要がある。本研究では、例えば、測定対象の空間周波数が10cpdの場合には、画像測光システムの空間周波数10cpdの時のコントラストが0.95以上を保持していれば信頼できる測定結果となると考えた。

本論文の一部は、LEDスポーツ照明の直視グレアに関する研究調査委員会報告書³⁰⁾ および照明学会誌³¹⁾ で発表済みであるが、データや結果の信頼性を明確にするため論文にまとめた。

謝辞

本研究は、照明学会「LEDスポーツ照明の直視グレアに関する研究調査委員会」の活動の一部であり、また、JSPS科研費（基盤研究(B), 15H04087）の助成を受けた。記して感謝の意を表す。本実測にご尽力いただいた増田大地さん、南澤勇輝さん、斎藤駿介さん、二見賢さん、阪上恵理さん、新谷菜摘さん（以上、当時東海大学岩田研究室）及び秋山翼さん、松本大介さん、小幡信輔さん、伊藤雄翼さん（以上、当時千葉工業大学望月研究室）に深く感謝の意を表す。

- 1) Characterization of the Performance of Illuminance Meters and Luminance Meters, ISO/CIE 19476: 2014.
- 2) 照度計第1部：一般計量器, JIS C1609-1: 2006.
- 3) 竹下秀：青色照明光の評価：評価規格と計測上の課題, 照学誌, 97(9), pp. 638-641 (2013).
- 4) 中村洋：正射影カメラによる輝度および輝度分布の測定：その1写真測光法と正射影カメラ・感光材, 日本建築学会論文報告集, 第243号, pp. 73-79 (1976).
- 5) 中村洋：正射影カメラによる輝度および輝度分布の測定：その2写真濃度の測定・校正・測定手順など, 日本建築学会論文報告集, 第244号, pp. 81-87 (1976).
- 6) Halonen, L., Eloholma, M. and Palmi, P.: The Lighting Environment for Low Vision Older People-Effects of Daylight, Luminance Level and Luminance Distribution, Proc. of CIE 23rd Session, pp. 39-42 (1994).
- 7) 海宝幸一, 松縄堅：電子カメラを用いた輝度計測手法の予備的検討, 平成7年度照学全大, pp. 263-264 (1995).
- 8) 岩田利枝, 塚見史郎：CCDカメラの光環境計測への応用技術, 照学誌, 81(3), pp. 246-249 (1997).
- 9) Mitsunaga, T. and Nayar, S. K.: Radiometric Self Calibration, IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 1, pp. 374-380 (1999).
- 10) <https://www.konicaminolta.jp/instruments/products/light/ca2500/index.html>
- 11) <https://www.opteema.com/en/products/lmk-imaging-photo-meters/>
- 12) 山田哲司ほか：光環境評価システム「QUAPIX™」の研究開発, 建設電気技術技術集, pp. 70-75 (2009).
- 13) Yamaguchi, H., et al.: Development of Generic Colorimetry System for Lighting Environment by Using Ccd Camera, Proc. of CIE Centenary Conference, pp. 1235-1238 (2013).
- 14) <http://www.anyhere.com/>
- 15) Inanici, M. and Galvin, J.: Evaluation of High Dynamic Range Photography as a Luminance Mapping Technique, LBNL (2005).
- 16) Anaokar, S. and Moeck, M.: Validation of High Dynamic Range Imaging to Luminance Measurement, Leukos, 2-2, pp. 133-144 (2005).
- 17) Inanici, M.: Evaluation of High Dynamic Range Photography as a Luminance Data Acquisition System, Light. Res. Technol., 38-2, pp. 123-134 (2006).
- 18) Moeck, M. and Anaokar, S.: Illuminance Analysis from High Dynamic Range Images, Leukos, 2-3, pp. 211-228 (2006).
- 19) Moeck, M.: Accuracy of Luminance Maps Obtained from High Dynamic Range Images, Leukos, 4-2, pp. 99-112 (2007).
- 20) Konis, K., Lee, E. and Clear, R.: Visual Comfort Analysis of Innovative Interior and Exterior Shading Systems for Commercial Buildings Using High Resolution Luminance Images, Leukos, 7-3, pp. 167-188 (2011).
- 21) Anaokar, S. and Moeck, M.: Validation Of High Dynamic Range Imaging To Luminance Measurement, Leukos, 2-2, pp. 133-144 (2013).
- 22) 日本照明工業会, 公共施設用照明器具, JIL5004-2015.
- 23) 歩行者のための屋外公共照明基準, 照明学会, 照明学会・技術基準JIES-010 (2014).
- 24) 森星豪：屋外照明における不均一な発光部の不快グレア

評価, 平成23年度照学全大, p. 82 (2011).

- 25) 阿山みよしほか: 空間的布置の異なる白色LED光のグレア評価, 平成22年度照学全大, p. 210 (2010).
- 26) Tyukhova, Yulia I.: The Assessment of High Dynamic Range Luminance Measurements with LED Lighting, Architectural Engineering, Dissertations and Student Research, 17 (2012).
- 27) Slominski, S.: Identifying Problems with Luminaire Luminance Measurements for Discomfort Glare Analysis, Light. Res. Technol., 48-5, pp. 573-588 (2016).
- 28) 山田哲司, 門馬英一郎: 画像測光による視認性評価に関する共同実験, 平成28年度照学全大, p. 11-04 (2016).
- 29) 岡野幸夫: デジタルスチルカメラのMTF解析とその測定, 日本写真学会, pp. 232-240 (1997).
- 30) LEDスポーツ照明の直視グレアに関する研究調査委員会報告書照明学会, JIER-125 (2016).
- 31) 岩井彌: スポーツ照明のグレア評価における輝度分布測定の課題, 照学誌, 102(4), pp. 150-154 (2018).

(受付日2020年4月9日/採録日2020年10月19日)

篠原 奈緒子 (正会員)
(株)日建設計 エンジニアリング部門
〒102-8117 東京都千代田区飯田橋2-18-3
2003年東海大学大学院工学研究科建築学専攻博士課程前期修了. 2008年1月(株)日建設計に入社. 2016年4月東海大学総合理工学研究科総合理工学専攻博士課程後期入学. 現在, 光環境計画およびLED照明の視環境に関する研究に従事. 照明学会, 建築学会会員.

岩田 利枝 (専門会員)
東海大学工学部建築学科
〒259-1292 神奈川県平塚市北金目4-1-1
1992年早稲田大学大学院理工学研究科建設工学専攻博士課程単位取得, 博士(工学). 2000年4月東海大学第二工学部建設工学科教授. 現在, 昼光・人工光の併用照明による快適性や光の生体リズム影響等に関する研究に従事. 照明学会, 建築学会会員.

谷口 智子 (正会員)
(株)久米設計 環境技術本部
〒135-8567 東京都江東区潮見2-1-22
2017年東海大学大学院総合理工学研究科総合理工学専攻博士課程後期修了, 博士(工学). 同年4月(株)久米設計に入社. 現在, 電気設備設計に従事. 照明学会, 建築学会会員.

望月 悦子 (専門会員)
千葉工業大学創造工学部建築学科
〒275-0016 千葉県習志野市津田沼2-17-1
2004年東海大学工学研究科建築学専攻博士課程後期修了, 博士(工学). 2013年4月千葉工業大学工学部建築都市環境学科教授. 現在, 省エネルギーと居住者の快適・健康を両立する建築照明環境に関する研究に従事. 照明学会, 建築学会会員.

海宝 幸一 (専門会員)
(株)日建設計 エンジニアリング部門
〒102-8117 東京都千代田区飯田橋2-18-3
1979年千葉大学工学部電子工学科卒業. 同年4月(株)日建設計に入社. 現在, 光環境計画に従事. 照明学会, 建築学会会員.