実装密度が異なる白色 LED 光源の明るさ評価

正会員 田代 知範 (宇都宮大学) 専門会員 岩田 三千子 (摂南大学) 専門会員 阿山 みよし (宇都宮大学)

Brightness Evaluation for White LED Light Sources with Different Packaging Density

Member Tomonori Tashiro (Utsunomiya University), Fellow Member Michico Iwata (Setsunan University) and
Fellow Member Miyoshi Ayama (Utsunomiya University)

ABSTRACT

Light-emitting diode (LED) light sources are increasingly being used. One LED light source is composed of many small LED chips, so the luminance distribution varies depending on the number and arrangement of the LED chips. Quantitative relationships between non-uniform light sources, such as LEDs, and discomfort glare rating have been widely reported, but the relationship between the non-uniform light sources and the perception of brightness has not been clarified.

In this paper, a brightness matching experiment was performed to study the effects of non-uniform spatial luminance distribution on perception of brightness. The results show that non-uniform light sources are perceived to be brighter than uniform ones when they have the same average luminance. Brightness sensitivity and discomfort glare rating were also compared. The results show that both the brightness and discomfort glare for non-uniform and/or uniform light sources can be evaluated with the effective glare luminance, which is the index of the discomfort glare rating.

KEYWORDS : LED light source, perception of brightness, discomfort glare

1. まえがき

LED は、省エネルギー、長寿命、高い発光効率など照明光源として様々な利点を兼ね備えていることは広く知られている。また、近年の急速な技術発展も相まって、蛍光灯や白熱灯など既存光源からの置き換えも様々な場面で開始されている。LED 光源の特徴の1つに空間的デザインの自由度の高さが挙げられる。ほとんどの LED 光源は極めて高輝度な小さな LED 素子を多数配列した構成である。そのため1つの LED 光源の発光面は非常に不均一な輝度分布を持っている。このことから、明るさやグレア評価の測度としてこれまで用いられてきた発光面輝度や、その光源による眼前照度をそのままでは LED 光源に適用できない可能性が考えられる。

LED のような不均一な輝度分布を持つ光源の不快グレア評価に関する研究は、様々な研究者によって行われており、彼らの多くが、不均一光源と均一光源は異なる不快グレア感を持つことを指摘している^{1)~4)}。またいくつかの研究では、LED 素子の配置レイアウトを変更した光源を用いた不快グレアに対する主観評価実験により、不均一光源および均一光源が与える不快グレア感を統一的に説明可能な新しい測光量の検討や、既存の不快グレア評価指標の改良を実施している¹⁾³⁾。しかし一方で、不均一光源に対する明るさ評価に関する研究はほとんど報告されていない。光源の明るさ感が増加すると、最終的に使用者にグレアを与える。そのため、明るさ感とグレア感を同一の指標で評価できる可能性は高い。もし、明るさ評価と不快グレア評価を同じ指標で推定することができれば、LED 照明の設計に有益であると考えられる。

そこで本研究では、不均一光源と均一光源との明るさマッチング実験により、不均一光源の実装密度の変化が明るさ感知覚に与える影響を調査する。また、不均一光源に対応した不快グレア評価指標の1つである有効グレア輝度³⁾での比較により、光源の明るさ感評価を推定することができるかどうかを検討する。

2. 明るさマッチング実験

2.1 LED 刺激

LED 素子の実装密度が明るさ知覚に及ぼす影響を調査するために、実験光源 (不均一発光) と参照光源 (均一発光) の明るさマッチング実験を行った。図1に示す実験光源は、直径26.2 cm の円内に配光特性が均等拡散タイプの LED 素子 (3.5 × 2.8 mm, 豊田合成社製) を1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 cm 間隔で配置した LED パネルである。また、LED パネルの前に直径26.2 cm の開口を設けた黒色の遮光パネルを LED パネルからの光が遮光パネルの前面に当たらないように1 cm 程度の隙間を設けて設置した。本研究では、遮光パネルの開口部の内側を光源とみなしている。光源の外側周辺の上下左右を分光放射輝度計 (CS-2000, コニカミノルタ社製) によって測定を試みたが、測定することができなかった。これは常に光源外側の輝度が CS-2000 の最低測定輝度である 0.003 cd/m² 以下であったことを意味している。また、光源内部つまり開口部内側の輝度分布に関しては、後述するように二次

図1 実験光源
Fig.1 Experimental light sources.

元色彩輝度計（CA-2500，コニカミノルタ社製）を使用して取得する。実験中、被験者は電流値制御により自由に実験光源の明るさを調整できるため光源内部の輝度分布は常に変動する。著者の主観的にはあるが、常にほぼ0 cd/m²の光源外側に対し、ある程度出力が増えれば光源内部はLED素子間のスペースも含めて全体的に明るさを持つように思えた。そのため、一概にはいえないが、被験者は外形が同じ（直径26.2 cmの円形）で内部の輝度分布が異なる光源を観察していることになる。後述するように視距離は300 cmなので、光源の視野サイズは視角で約5 degである。また、光源内におけるLED素子の実装密度は各々1.10, 0.25, 0.13, 0.06, 0.04, 0.03, 0.02, 0.02 個/cm²である。LEDの光色は昼光色（6500 K）および電球色（3000 K）の2種類であり、実験光源は計16種類となる。また、参照光源には2 cm間隔の実験光源を使用し、LEDパネルと遮光パネルの間に拡散板を挿入し均一発光としたものを用いた。参照光源の明るさは電流値制御により5段階（平均輝度で4.30, 8.50, 17.2, 34.7, 58.2 cd/m²）で設定した。ただし、7 cmおよび8 cm間隔については58.2 cd/m²を除いた4段階に設定した。

2.2 光学測定

各光源の二次元輝度分布データの測定はCA-2500を使用して実施した。輝度分布データは、暗室内でCA-2500を約1 mの測定距離で各光源と正対させて取得したもので、980×980ピクセルのcsvデータである。解像度は0.06 deg/pixelに相当する。本研究で取り扱う測光量は輝度分布データ内の光源内部（直径26.2 cmの円）に相当するピクセルを対象とする。

2.3 実験環境および方法

図2に実験装置の(a)平面図および(b)断面図をそれぞれ示す。実験装置は暗室内に構築されており、中央を暗幕により遮光することで2つの小部屋に分けて使用している。評価刺激は向かって左側の小部屋に参照光源、右側の小部屋に実験光源を配置し、互いに独立して観察することができるようにした。視距離は共に300 cmで、被験者と正対させるためにそれぞれ角度を付けて設置している。背景輝度に関しては、各光源の後方に十分なスペースを取ることで、ほぼ0 cd/m²（CS-2000での測定不可）に設定した。実験は両眼観察で実施する。5分間の暗順応の後、被験者は5段階（平均輝度で4.30, 8.50, 17.2, 34.7, 58.2 cd/m²）のいずれかに設定された参照光源と下限値（平均輝度で0.1 cd/m²以下）に設定された実験光源をそれぞれ観察する。次に自由に参照光源および

図2 実験装置
Fig.2 Experimental apparatus.

実験光源を観察しながら、実験光源全体の明るさが表示された参照光源と同じとなるように手元のコントローラーで自由に調整する。実験光源の明るさは電流値によって制御されており、おおむね対数で線形に変化する。調節時の時間制限は設けておらず、各試行の間には暗黒下での3分程度のインターバルを設けている。

色覚正常な21~25歳の学生6名が被験者として実験に参加した。条件ごとに6回／人の測定を行い、個人別に最大値および最小値を除いた4回分のデータを採用し、6人分の計24回の輝度データの平均値を各実験光源のマッチング値とした。本研究では、断りのない限り平均は全て算術平均を用いている。各実験光源のマッチング値および標準偏差は表1に示すとおりである。

表1 マッチング値および標準偏差
Table 1 Summary table for all condition.

昼光色									[cd/m ²]			
参照光源 平均輝度	1cm 間隔		2cm 間隔		3cm 間隔		4cm 間隔					
	マッチング値	標準偏差	マッチング値	標準偏差	マッチング値	標準偏差	マッチング値	標準偏差				
4.30	0.839	0.907	0.595	0.867	0.434	0.548	0.383	0.602				
8.50	1.813	1.697	1.598	1.674	0.936	1.027	1.054	1.343				
17.2	4.088	2.840	3.133	2.596	2.346	1.741	1.796	2.091				
34.7	9.679	4.221	4.880	3.672	3.992	2.895	3.958	3.128				
58.2	17.795	7.826	8.363	5.771	8.223	5.222	6.842	5.555				
参照光源 平均輝度	5cm 間隔		6cm 間隔		7cm 間隔		8cm 間隔					
	マッチング値	標準偏差	マッチング値	標準偏差	マッチング値	標準偏差	マッチング値	標準偏差				
4.30	0.539	0.877	0.730	1.093	0.498	0.552	0.561	0.575				
8.50	1.089	1.537	1.117	1.581	0.787	0.888	0.825	1.099				
17.2	1.846	1.540	1.888	2.357	1.587	1.802	1.208	1.392				
34.7	3.259	2.344	3.068	2.939	2.373	2.931	2.196	2.573				
58.2	5.999	4.384	5.253	4.808								
電球色											[cd/m ²]	
参照光源 平均輝度	1cm 間隔		2cm 間隔		3cm 間隔		4cm 間隔					
	マッチング値	標準偏差	マッチング値	標準偏差	マッチング値	標準偏差	マッチング値	標準偏差				
4.30	0.685	0.461	0.381	0.340	0.505	0.351	0.479	0.288				
8.50	2.771	1.166	1.538	1.194	0.990	0.819	0.930	0.540				
17.2	6.017	2.440	3.464	1.912	2.127	1.334	1.731	1.619				
34.7	10.837	3.706	5.975	2.499	3.578	2.340	3.059	4.135				
58.2	17.411	6.434	10.739	5.510	6.535	4.490	5.790	5.993				
参照光源 平均輝度	5cm 間隔		6cm 間隔		7cm 間隔		8cm 間隔					
	マッチング値	標準偏差	マッチング値	標準偏差	マッチング値	標準偏差	マッチング値	標準偏差				
4.30	0.478	0.375	0.392	0.270	0.476	0.471	0.229	0.292				
8.50	0.806	0.532	0.771	0.541	0.800	0.664	0.701	1.008				
17.2	1.677	1.808	1.417	1.832	1.444	2.101	1.165	1.863				
34.7	3.023	3.827	2.906	3.990	2.812	4.024	2.327	3.302				
58.2	5.284	7.007	4.654	7.144								

2.4 結果

まず、図3に参照光源の平均輝度と実験光源のマッチング値との関係を示す。図3(a)は昼光色、図3(b)は電球色の結果である。図中の横軸は参照光源の平均輝度の対数表示[cd/m²]、縦軸は実験光源のマッチング値の対数表示[cd/m²]を示している。また、黒の点線は参照光源の平均輝度と実験光源のマッチング値が等しいことを示す線である。図3に示すように、昼光色および電球色の両条件において実験光源のマッチング値は、発光面が均一な参照光源の平均輝度に比べ、常に低い値を取ることが明らかとなった。これは、同じ平均輝度を取るとき、不均一光源は均一光源に比べより明るく知覚されていることを意味している。

次に、図4に実験光源のLED素子間隔とマッチング値との関係を示す。図4(a)~図4(e)はそれぞれ参照光源の平均輝度が4.30, 8.50, 17.2, 34.7, 58.2 cd/m²の結果である。図中の横軸は実験光源のLED素子間隔[cm]、縦軸は実験光源のマッチング値の対数表示[cd/m²]、黒の点線は参照光源の平均輝度をそれぞれ示している。図4に示すように、LED素子の配置間隔の増加に伴い実験光源のマッチング値は低下することがわかった。これは、LED光源の実装密度を増加させると、明るさ感を増加させることを意味している。またLEDの光色の違いによる結果の相違は見られなかった。

3. 有効グレア輝度での比較

光源の輝度を増やしていくと明るさが増していき、ついには不快グレアが生じることから、明るさ知覚と不快グレアが同様の指標で説明できる可能性はある。例えばKimuraらは、不快グレア感度と明るさ感度との間には正の相関があることを報告している⁴⁾。また中村らは、ある対象とその周辺との輝度の対比に着目して、現実の複雑な輝度分布を対象とした明るさ評価手法である

図3 参照光源の平均輝度と実験光源のマッチング値との関係
Fig.3 Relationship between average luminance of reference light source and matching value of experimental light sources.

コントラスト・プロファイル法を提案している⁵⁾。更に中村らはこの手法を不快グレア評価実験にも適用し、良好なグレア推定ができることを示している⁶⁾。Tashiro らは、計17種類の空間的レイアウトを有する白色LED光源を用いて不快グレアに関する主観評価実験を行い、不快グレア評価値と各種測光量との定量的関係の検討を行った。結果として、空間的レイアウトの違いに影響されない不快グレア評価の指標として有効グレア輝度を定義している³⁾。もし、発光面の輝度分布が不均一な光源の明るさとグレア評価を同じ指標で推定することができればLED照明の設計に有益である。

そこで本研究では、不均一光源の不快グレア評価指標としてTashiro らが提案した有効グレア輝度を用いて明るさマッチングの結果を検討することにした。

3.1 有効グレア輝度

通常1つのLED光源は、多数の小さなLED素子によって構成されているため、光源の輝度分布に着目すると、LED素子があるところでは非常に高い輝度を持つ一方で、LED素子がないところでは低い輝度を示す。また、LED素子は自由なレイアウトが可能のため、LED素子の配置によってはLEDマトリクス内部にほぼ輝度を持たない部分が生じる可能性がある。従来、不快グレア評価のための測光量として、しばしば発光面の平均輝度が用いられてきた。発光面の輝度がほぼ均一に分布する従来光源に対して平均輝度を算出することは容易である。しかし、LEDのような不均一光源に対しては、LEDマトリクス内部に生じた低輝度領域をどのように扱うかによって、算出値に違いが生じてしまうことがある。

そこでTashiro ら³⁾は、LEDのような不均一光源にも対応した不快グレア評価指標として有効グレア輝度を提案している。有効グレア輝度とは、低輝度領域を除き高輝度領域に重みづけをした平均輝度であり、式(1)で定義される。本研究では、彼らの論文にしたがい、明るさマッチング結果の有効グレア輝度の算出を行った。

図4 LED素子配置間隔とマッチング値との関係
Fig.4 Relationship between LED chip interval and matching value.

有効グレア輝度はCA-2500によって得られる光源の二次元輝度分布データから算出する。まず、ピクセル輝度値が0.05 cd/m²以下の低輝度領域を除外した有効領域を抽出する。有効グレア輝度は、この有効領域を対象に計算が行われる。次に、有効領域の各ピクセルに対して、輝度値に応じた重みづけを行う。本研究では明るさマッチング実験の実験環境を考慮して背景輝度0.1 cd/m²相当の式(2)に示す単調増加な関数を使用する。最後に、重みづけを行った各ピクセル輝度の合計値を有効領域のピクセル数で割ることで有効グレア輝度が算出される。表2に各条件における有効領域の相対的な大きさをそれぞれ示す。

$$L_{eff} = \frac{\sum(WF_{ij} \times L_{ij})}{N_{eff}} \dots\dots\dots(1)$$

$$WF_{ij} = 7.0 \times 10^{-4} \times L_{ij}^{0.605} \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 L_{eff} は有効グレア輝度[cd/m²]、 WF_{ij} は各ピクセルに対する重み付け関数、 L_{ij} は輝度分布データのピクセル輝度[cd/m²]、 N_{eff} は有効領域のピクセル数をそれぞれ示す。

表2 有効領域の相対立体角
Table 2 Size of effective area.

参照光源 平均輝度	昼光色								参照
	1cm	2cm	3cm	4cm	5cm	6cm	7cm	8cm	
4.30	0.003	0.002	0.001	0.001	0.001	0.002	0.003	0.002	0.006
8.50	0.005	0.004	0.004	0.003	0.002	0.003	0.004	0.003	0.006
17.2	0.006	0.006	0.005	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.006
34.7	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.005	0.005	0.006
58.2	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006

参照光源 平均輝度	電球色								参照
	1cm	2cm	3cm	4cm	5cm	6cm	7cm	8cm	
4.30	0.004	0.003	0.002	0.002	0.001	0.003	0.002	0.002	0.006
8.50	0.006	0.005	0.004	0.003	0.003	0.004	0.004	0.003	0.006
17.2	0.006	0.006	0.005	0.004	0.004	0.005	0.005	0.004	0.006
34.7	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006
58.2	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006

3.2 結果

マッチング条件における参照光源および実験光源の有効グレア輝度の関係を図5に示す。図5(a)に昼光色、図5(b)に電球色の結果を示す。図中の横軸は参照光源の有効グレア輝度の対数表示[cd/m²]、縦軸は実験光源の有効グレア輝度の対数表示[cd/m²]、黒の点線は参照光源と実験光源の有効グレア輝度が等しいことを示す線である。図5に示すように、マッチング条件において参照光源と実験光源の有効グレア輝度は同じ値を取ることがわかった。これは、有効グレア輝度によって様々な空間的輝度分布を有するLED光源の明るさの比較および推定が可能であることを示唆している。

4. 考察

本研究において、参照光源の有効グレア輝度と実験光源の有効グレア輝度はおおむね良好な一致を示した。しかしながら、図5に示すように、最も暗い条件(参照光源の有効グレア輝度が約0.01 cd/m²)で一致せず、データにばらつきが生じる結果となった。このことに関して少し考えてみることにする。

低輝度条件において、参照光源と実験光源の有効グレア輝度値に大きな差異が生じたのは、本実験が行われた暗い視環境に原因があると考えられる。人間の視覚系は、光の強度レベルに応じてその機能が変化することはよく知られている⁷⁾⁸⁾。本研究での個人結果を確認してみると、最も低いマッチング値は昼光色の素子間隔3 cm条件での0.05 cd/m²で、かつ被験者6人中3人のマッチング値は2 cd/m²以下であった。日本工業規格(JIS)によれば、明所視環境は輝度3 cd/m²以上、暗所視環境は輝度0.03 cd/m²以下であると定義されている。つまり本研究において半数の被験者は薄

図5 有効グレア輝度での比較
Fig.5 Relationship between effective glare luminance of reference and experimental light sources.

明視環境下での明るさ評価を行った可能性が高い。グレアを対象としたTashiroらの研究³⁾では、視対象に十分な明るさが必要であり、その中で定義された有効グレア輝度の関数(式(1)、式(2))は明所視環境での評価である。そのため、薄明視環境で行われた本研究の低輝度領域には適用不可であったと考えられる。もし、有効グレア輝度の低輝度領域での明るさ評価への対応を考えるのであれば、薄明視や暗所視環境での検討が必要である。

5. まとめ

本研究では、LED素子の空間密度を変化させた実験光源(不均一光源)と拡散カバーを取り付けた参照光源(均一光源)との明るさを比較した。また、マッチング条件において有効グレア輝度を算出し、その関係性についても検討を行った。結果は以下のようによまとめることができる。

参照光源の平均輝度と実験光源のマッチング値との比較に関して、実験光源のマッチング値は参照光源の平均輝度より低い値を取ることがわかった。また実験光源のみに着目した場合、LED素子の配置間隔の増加に伴い、実験光源のマッチング値はより低い値を示す傾向が見られた。

有効グレア輝度での比較に関して、マッチング条件時の参照光源と実験光源の有効グレア輝度値はおおむね同じ値を示すことがわかった。しかしながら、参照光源の平均輝度で4.30 cd/m²(有効グレア輝度で約0.01 cd/m²)では一致せず、実験光源の有効グレア輝度はより低い値を取ることとも明らかとした。

6. あとがき

本研究の結果から、有効グレア輝度の考え方が空間的レイアウトの異なるLED光源の不快グレアだけでなく、明るさ評価の推

定にも有効であることが示唆された。低い有効グレア輝度レベルでは、データ値がばらつくことに関して将来的に追加の実験や解析が必要であると考えられるが、本研究で得られた知見は、今後のLED光源の設計および開発において十分役に立つことが期待される。

謝 辞

本研究のデータ収集においては、2011年度摂南大学大学院修士課程修了の石上雄太君の多大なる協力を得ました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- (1) 原, 長谷川: LED素子を配列した光源の不快グレアに関する研究, 照学誌, 96-2, pp.81-88 (2012).
- (2) T.Kasahara and D.Aizawa et al.: Discomfort Glare caused by White LED Light Sources, J. Light. Vis. Env., 90-11, pp.95-103 (2003).
- (3) T.Tashiro and S.Kawanobe et al.: Discomfort glare for white LED light sources with different spatial arrangements, Light. Res. Technol., 47-3, pp.316-337 (2015).
- (4) T.Kimura-Minoda and M.Ayama: Evaluation of discomfort glare from color LEDs and its correlation with individual variations in brightness sensitivity, Color Res. Appl., 36-4, pp.286-294 (2010).
- (5) 中村芳樹: 光環境における輝度の対比の定量的検討法, 照学誌, 84-8A, pp.522-528 (2000).
- (6) S.Sugano and Y.Nakamura: Generation of discomfort glare image using wavelet transform, Proceedings of 27th Session of the CIE, Sun city/South Africa, pp.286-293 (2011).
- (7) M.Ikeda and H.Shimozono: Mesopic luminous-efficiency functions, J. Opt. Soc. Am., p.71, pp.280-284 (1981).
- (8) K.Sagawa and K.Takeichi: Spectral luminous efficiency functions in the mesopic range, J. Opt. Soc. Am., A3, pp.71-75 (1986).

(受付日2016年3月1日/採録日2017年4月26日)

田代 知範 (正会員)

宇都宮大学オプティクス教育研究センター
(現在は山形大学大学院理工学研究科)

〒992-8510 山形県米沢市城南4-3-16

2014年9月宇都宮大学大学院工学研究科システム創成工学専攻博士後期課程修了, 2016年3月 University of Eastern Finland, School of Computing 修了. 2014年11月より宇都宮大学オプティクス教育研究センター特任研究員, 2016年10月より山形大学大学院理工学研究科研究支援者. 現在, 有機EL照明の性能評価に関する研究および標準化活動に従事. 博士(工学). 照明学会, 日本照明委員会会員.

岩田 三千子 (専門会員)

摂南大学理工学部住環境デザイン学科

〒572-8508 大阪府寝屋川市池田中町17-8

日本女子大学家政学部住居学科卒業. 大阪市立大学大学院修了, 学術博士. 摂南大学工学部建築学科教授を経て, 2010年より摂南大学理工学部(名称変更)住環境デザイン学科教授. 建築・都市の光環境, 視環境の教育・研究に従事. 現在, 照明学会理事.

阿山 みよし (専門会員)

宇都宮大学大学院工学研究科

〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東7-1-2

1983年東京工業大学大学院総合理工学研究科物理情報工学専攻博士課程を修了. ヨーク大学, 東工大, 東京都神経研を経て1993年宇都宮大学工学部助教授. 2001年より同学部教授. 現在は, 大学院工学研究科学際研究部門教授. 工学博士. 視覚・色彩科学の研究と教育に従事. 照明学会, 日本照明委員会, 日本視覚学会, 応用物理学会, 日本光学会, 日本色彩学会, 映像情報メディア学会会員.