

LED 照明の不快グレア評価方法の動向

東 洋 邦

Trend on the Methods of Evaluation for Discomfort Glare in LED Lighting

Hirokuni HIGASHI

With the improvement in luminous efficiency of LED light source, the general lighting begins to replace the LED luminaires with the existing ones. However, the performance of LED luminaires, including their luminance, area of luminous part, and so on, differs from that of existing luminaires. Therefore, the mere replacement of existing luminaires with LED ones sometimes causes difference in discomfort glare. Because of these factors, the studies of evaluations for discomfort glare in LED lighting have gotten a lot of attention recently. This paper shows the present evaluation and the problem, trend on the studies of evaluations, the activities of national and international organizations on discomfort glare.

Key words: LED, glare, discomfort, luminance, Unified Glare Rating (UGR)

1996年に実用化されてから年々発光効率が向上している白色LEDは¹⁾、既存光源から置き換わりつつある。現在、省エネルギーに対する取り組みが世界規模で行われているが、照明についても同様である。照明に使われる電力は、オフィスビルでは全消費電力の21.3%、住宅では16.1%を占めており²⁾、発光効率が高い白色LEDを照明に使うことで、省エネルギー効果が期待される。しかしその一方で、白色LEDは従来の光源とは異なる特徴をもつため、単純な置き換えには注意が必要との声もある³⁾。本解説では、白色LEDのネガティブなイメージとして比較的多くあげられる“まぶしさ”（不快グレア*1）について述べる。

発光効率の向上により、局所照明だけでなく、部屋全体を照らす全般照明の光源としても利用され始めている白色LEDであるが、その発光面積は小さく、光束が低いので、高い光束が必要な照明器具にするには、複数の白色LEDを器具発光面に並べなければならない。また、白色LEDは、小さい発光面積から光が照射されるので、一般的に全般照明の光源として利用されている蛍光灯より

も輝度が非常に高くなる。そのため、器具発光面の平均輝度が同じと仮定してLED照明器具（LED器具）と蛍光灯照明器具（FL器具）を比較した場合、拡散性の強いパネルを用いれば、どちらの器具発光面も最大輝度と平均輝度の差は同程度になるが、拡散性の弱いパネルを用いると、FL器具に比べLED器具の器具発光面のほうが最大輝度と平均輝度の差が大きくなる。そしてその差は、器具発光面に並べた白色LEDの個数によっても異なる。つまり、LED器具の登場により、器具発光面の最大輝度が高い照明器具といった、今までにはなかった機種が増えることになった。

省エネルギー効果が高いLED器具は普及が期待されているが、FL器具に代表される従来器具とは異なる特徴をもつので、単に照度を確保するために従来器具から置き換えると、不快グレアの感じ方が異なる場合がある。このような背景から現在、LED照明環境に対応した不快グレア評価方法の研究が注目されている。ここでは、現在使われている屋内照明の不快グレア評価方法とその問題点を解説するとともに、不快グレア評価方法に関する最新の研究や

(株)東芝 新照明システム事業統括部事業戦略推進室 (〒212-8582 川崎市小向東芝町1) E-mail: hirokuni1.higashi@toshiba.co.jp

*1 日本工業規格の定義⁴⁾によると、厳密に言えば不快グレアはまぶしさのことだけを指しているわけではない。しかし一般的に不快グレアとまぶしさとは同義で使われることが多いので、ここでは“不快グレア=まぶしさ”とした。

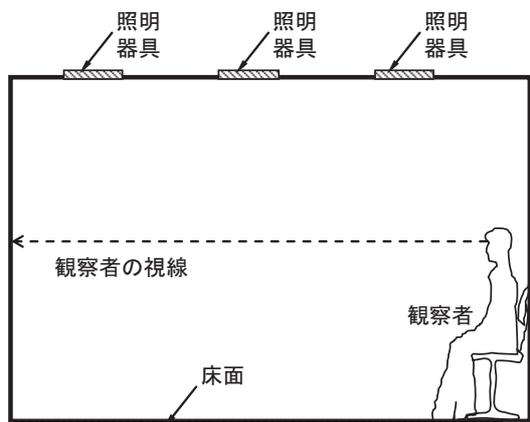


図1 一般的にUGRを計算するときの観察者の視線と照明器具の位置関係(一例)。

国内外の団体の取り組みについても紹介する。

1. 現在の不快グレア評価方法

不快グレア評価方法の歴史は古く、さかのぼると1920年代にはすでに不快グレア評価に必要な基本パラメータが示されており、1950年代には現在の評価方法の基礎となる研究が報告されている⁵⁾。その後も研究が盛んに行われ、国際照明委員会(CIE)でも活発に議論されるようになった。そして1995年、現在使われている屋内統一グレア評価方法(Unified Glare Rating, 以下UGR法とよぶ)がCIEでまとめられ⁶⁾、UGR法に基づく推奨基準値が2000年以降に国内外の規格に記載されるようになった^{7,8)}。

1.1 屋内統一グレア評価方法(UGR法)

現在、屋内照明の不快グレア評価方法にはUGR法が用いられている⁶⁻⁹⁾。計算方法はCIEから出版されている技術報告書(CIE 117-1995)に記載されており、計算式は式(1)のように表される。

$$UGR = 8 \log \left(\frac{0.25}{L_b} \sum \frac{L^2 \omega}{p^2} \right) \quad (1)$$

ここでの L [cd/m^2]と ω [sr]は観測者の目の方向に対する各照明器具の器具発光面の輝度と立体角、 p は各照明器具の視線からの隔たりに関するGuthの位置指数、 L_b [cd/m^2]は背景輝度である。位置指数 p とは照明器具の位置による不快グレアの影響度の重み付けを表す数値で、その値は表形式でCIE 117-1995に記載されている。また、UGRには器具発光面の大きさに適用範囲が定められており、器具発光面の立体角が $0.0003 \sim 0.1$ [sr]までの照明器具が計算対象となる。

一般的にUGRは、照明設計用のソフトウェアを用いて、照明器具の配光データ、照明器具を設置する環境の大きさと内装の反射率、視点の高さと位置を設定して求めら

表1 UGRと不快グレアの程度。

UGR	不快グレアの程度
31	ひど過ぎる
28	ひど過ぎると感じ始める
25	不快である
22	不快に感じ始める
19	気になる
16	気になり始める
13	感じられる
10	感じ始める
7	感じない

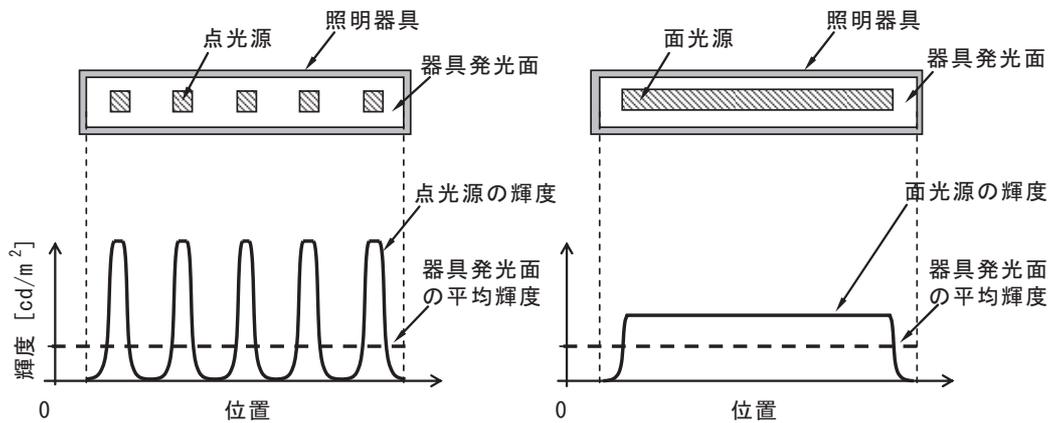
れる。UGRを求めるときは視線を照明環境の床面と水平にするのが一般的なので、計算されたUGRは周辺視野における不快グレアの程度を表すことになる(図1)。

UGRと不快グレアの程度は表1のような対応関係となっており、UGRを求めれば、照明環境の不快グレアの程度を把握することができる。ただし、実際に計算すると、表に記載されていない値と同じになることが少ないので、日本では実務上、計算したUGRから不快グレアの程度を判定する方法を一般的に使用している¹⁰⁾。たとえば、計算したUGRが17になった場合は16と判定され、計算したUGRが21になった場合は19と判定される。なお、この判定の考え方は、日本人を対象にした不快グレア評価とUGRに関する研究結果に基づくものとなっている¹¹⁻¹³⁾。

1.2 問題点

UGR法はオーソライズされた評価方法なので、これまでの照明環境同様、LED照明環境の不快グレアの程度を求めるときにはこれを用いることになる。しかし、UGR法にて求めたLED照明環境の不快グレアの程度を今までを同じように適用できるかどうかは、相反する見解があるため不明とされてきた。

適用が難しいといわれている見解の理由について、まず説明する。ポイントは、UGRを求めるときに使用する照明器具の器具発光面の輝度 L である。UGRを求めるときは一般的に照明器具の配光データを用いるため、UGRのパラメータである器具発光面の輝度 L には、光度を見かけの面積で除した輝度を使用する。そのため、器具発光面の輝度分布が異なっても器具発光面の平均輝度が同じであれば、UGRは同じ値となる。UGRが同じ値ということは、その照明環境の不快グレアの程度は数値的には同じものとして扱われるが、器具発光面の平均輝度が同じでも、図2に示すような輝度分布の状態によって、実際の不快グレアの程度は異なる可能性がある。過去の研究でも、この可能性を後押しするような知見が報告されている¹⁴⁻¹⁶⁾。そのため、現在のUGR法では、器具発光面のバ



(a) 点光源を並べた照明器具 (b) 面光源を用いた照明器具
 図2 点光源を並べた照明器具と面光源を用いた照明器具の器具発光面。

リエーションが多い LED 照明環境の不快グレアを適切に評価できないと考えられている。

一方、適用には問題ないという見解は、周辺視での空間分解能は中心視に比べ非常に低いという知見からきている¹⁷⁾。過去の研究では、周辺視での不快グレアには発光部の輝度分布はあまり影響を及ぼさないという知見^{18,19)}や、不快グレアは偏心度 10° 以内は発光部の輝度分布に依存するが 10° 以上は依存しないという知見が報告されている²⁰⁾。そのため、一般的に周辺視での不快グレアの程度を求める UGR 法には、器具発光面の輝度分布が無視された配光データから計算した輝度を用いても問題がないと考えられている。

これらの相反する見解があることから、LED 照明環境への UGR 法の適用性が問題視されるようになった。

2. LED 照明に対応した不快グレア評価方法

過去の研究報告から LED 照明環境への適用性が問題視されていた UGR 法であるが、LED 器具が全般照明として普及し始めてきた近年、過去の研究は LED 器具が普及する前に行われた実験報告だったことから、適用性について再度検討する必要があるとの声が大きくなり、UGR 法の適用性の検証を含めた LED 照明環境での不快グレア評価方法について検討されるようになった。

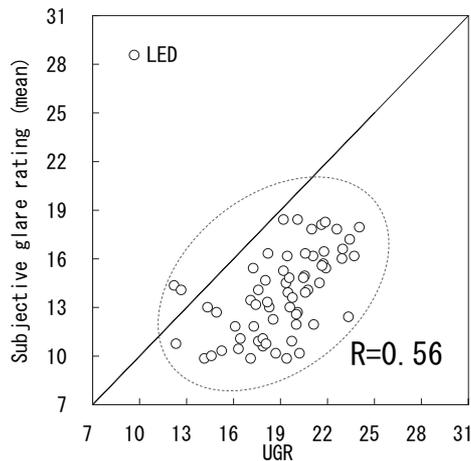
2.1 研究動向

LED 照明環境に対応した不快グレア評価方法の研究は、そのほとんどが日本で行われており、国外での研究事例はあまりない。その理由は定かではないが、少なくとも日本が評価方法に関して先行的に取り組んでいるとはいえるだろう。現在行われているおもな研究とその概要を以下に示す。

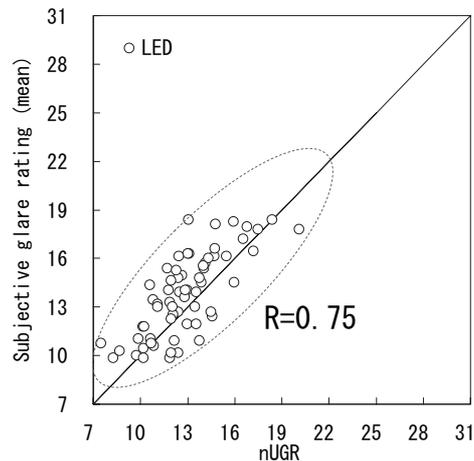
Tashiro らは、LED 器具 1 台を設置された照明環境にて、器具発光面の輝度分布と周辺視での不快グレアとの関係について主観評価を行い、評価結果から導いた UGR 法を修正した式を提案している。この式のポイントは、入力パラメーターである器具発光面の輝度 L に、器具発光面の輝度画像データから得られた各画素の輝度の積算値を入力しているところである²¹⁾。研究は現在も進行中であり、最新の研究によると、器具発光面の輝度 L には積算値ではなく、輝度レベルに応じて重み付けした積算値を入力したほうが、不快グレアの程度を良好に計算することができると報告している²²⁾。

原らは、LED 器具 1 台を設置された模型環境にて、器具発光面の輝度分布と周辺視での不快グレアとの関係について主観評価を行い、評価結果から導いた UGR 法を修正した式を提案している。この式のポイントは、UGR 法の係数は変更せずに、入力パラメーターである器具発光面の輝度 L に、評価結果を分析することによって得られる等価光源輝度を入力するところである。等価光源輝度とは、不均一な器具発光面と同じ主観評価となる均一な器具発光面の輝度のことである。等価光源輝度は、主観評価結果から導かれる値なので、現時点では器具発光面の輝度画像データから算出することはできない。この点を解決することが課題となっている²³⁾。

筆者らは、照明器具 3 台を設置された照明環境にて、器具発光面の輝度分布と、周辺視と中心視での不快グレアとの関係について主観評価を行い、評価結果から導いた UGR 法を修正した式を提案している^{24,25)}。この式は、式 (2) と (3) に示すように、UGR を算出する 4 つのパラメーターに器具発光面の輝度均斉度の関数 $f(U)$ を追加することを特徴としている。



(a) UGRと不快グレアの程度（主観評価）



(b) nUGRと不快グレアの程度（主観評価）

図3 LED照明環境での不快グレアの程度と評価結果²⁴⁾。

$$nUGR = 5.7 \log \left(\frac{0.25}{L_b} \sum \frac{L^2 f(U) \omega}{p^2} \right) \quad (2)$$

$$f(U) = -0.07(\log_e(U))^3 + 0.41 \quad (3)$$

ここでの輝度均斉度 U は、器具発光面の平均輝度を最大輝度で除した値である。器具発光面の最大輝度は、二次元色彩輝度計から計測した輝度画像データから得られた値を用いている。式(2)と(3)は周辺視での不快グレアの計算式になるが、係数を変えれば中心視での不快グレアの程度も計算することができる。この評価方法の課題は、主観評価の算出の精度を向上させる器具発光面の定量化である。式(2)と(3)は、UGR法の計算式と比べるとLED照明環境の不快グレアの程度を適切に計算することができるが、図3に示すように相関係数としては若干低い。今後は、より相関係数が高くなるような器具発光面の定量化方法について検討していく予定である。

菅野らは、上述の研究とは少し異なり、輝度画像をウェーブレット解析することでグレア画像を生成するという評価方法を提案している²⁶⁾。この方法はUGR法のように不快グレアの程度を1つの値で表すのではなく、画像として表すことを特徴としている。画像の各画素の値が、その点を見たときの不快グレアの程度を表す値となっているが、単純にその点を中心視で見たときの不快グレアの程度の値ではなく、周辺視の視覚特性が考慮された形の値となっている。そのため、輝度が同じでも周辺の輝度が異なると、不快グレアの程度が異なる値として評価される。この評価方法は輝度画像データがもとになっているので、現状一般的に行われている照明設計に利用することは難しいが、CGなどを利用した設計であれば活用することができる。

各研究ともに、LED照明環境でも従来の照明器具によ

る環境でも不快グレアを計算できるように基礎的な知見を積み重ねている状況である。ただし、多くの研究で器具発光面の輝度分布は周辺視での不快グレアに影響を及ぼすという知見が得られており、UGR法ではLED照明環境の不快グレアの程度を計算することは難しいといえる(図4)。

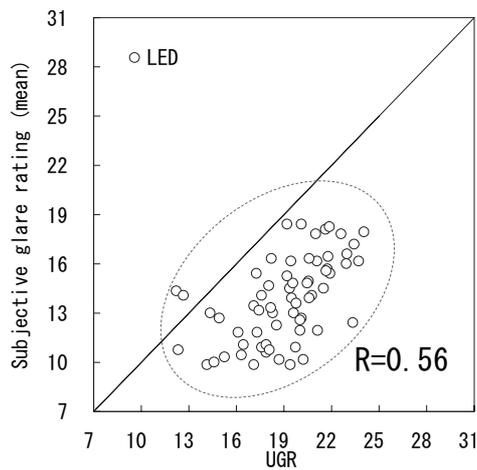
2.2 今後の課題

各研究それぞれに課題はあるが、共通の課題としては輝度の計測と解析があげられる。各研究ともに輝度画像データを計測する装置を用いているが、それらは同じ仕様の計測装置ではなく、さらに、同じ仕様の画像データを解析しているわけではない。そのため、各研究内での結果の比較を行うことは問題ないが、異なる研究間の結果を単純比較することには注意が必要である。現在は標準的な輝度画像データを計測する装置がないため、現状でこれを解決する方法はないが、器具発光面や光源の種類に依存しない不快グレアの評価方法について研究を進めるには、輝度画像データの計測と解析が今後の大きな課題といえる。

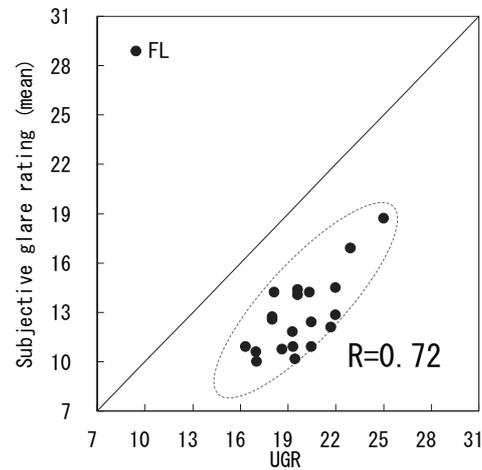
そのほか、UGR法には加味されていないが、不快グレアに影響を与えるといわれている光源の分光分布、年齢や虹彩、不均一な照度分布などについても、その影響を評価方法に組み込むべきかどうか検討していく必要がある。また、UGR法は一般的に周辺視の不快グレアの程度を計算する評価方法であるが、LED照明環境が主流になると、器具発光面の輝度が高くなる場合もあるので、中心視での不快グレアについても今後は検討する必要があるだろう。

3. 各種団体の取り組み

LED器具の普及に伴い、国内外の学会などでLED照明環境の不快グレアに関する指針などが検討され始めている。国際照明委員会(CIE)には現在、不快グレアに関し



(a) LED照明環境での結果



(b) FL照明環境での結果

図4 LED照明環境とFL照明環境での不快グレアの程度とUGR²⁴⁾。

て、昼光による不快グレア評価の課題の明確化とガイド作成を目的としたTC3-39「昼光による不快グレア」と、既存評価方法のLED照明への適用性について調査することを目的としたTC3-50「LED照明システムによる屋内照明の質の評価」の2つの技術委員会(TC)が設置されている。TC3-50の進捗報告では、LED照明環境の不快グレア評価方法にUGR法を適用することは検討の必要があることが日本での研究を例に述べられており²⁷⁾、この分野では日本が先行的に研究をしているといえる。CIEの日本支部である日本照明委員会(JCIE)には、不快グレア評価方法に関するTCの設置を目的としたワーキンググループが設置されており、日本で数多くなされている評価方法の研究を国際規格に繋げるための活動が行われている。また照明学会では、すでに完了している委員会もあるが、LED照明による不快グレア評価に関する問題点の整理を目的とした「LED照明の視覚的影響に関する研究調査委員会」(完了)、屋外でのLED照明による不快グレアに関する問題点を検討することを目的とした「屋外環境におけるLED照明器具のグレアに関する研究調査委員会」(活動中)が設置されており、LED照明環境の不快グレアについて、屋内だけでなく屋外についても検討されている。そのほか、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)が行っている戦略的国際標準化推進事業「LED照明利用技術に関わる評価技術開発」でも不快グレアに関する取り組みがなされており、LED照明環境に対応した不快グレア評価方法の基盤技術開発が行われている^{24, 25, 28)}。

通常、不快グレアと照明器具のエネルギー消費効率はトレードオフの関係にあるため、たとえば、不快グレアを軽

減するために器具発光面の最大輝度を下げると、その分エネルギー消費効率は悪くなる。そのためメーカーは、現在、不快グレアとエネルギー消費効率とのバランスを考えて適切な光学設計を行い、照明器具を開発している。しかし今後は、白色LEDの発光効率の向上に伴い今まで以上にLED器具の最大輝度が高くなるので、従来と同じような光学設計では、不快グレアを感じやすいLED器具や、必要以上にエネルギー消費効率が低いLED器具になってしまう可能性がある。白色LEDの発光効率が向上しても、その効率のよさを最大限に生かした状態で不快グレアを考慮した照明器具を開発するには、不快グレアの程度を適切に計算できる評価方法、つまり“ものさし”が必要になる。ものさしがあれば、効率と不快グレアのどちらも配慮した照明器具の設計が可能になる。今後は、LED照明になっても今までと同じように、もしくは今まで以上に、快適かつ省エネルギー性の高い照明環境を設計することができるように、不快グレア評価方法の研究開発の進展が期待される。

また、国内外の各種団体が取り組んでいる不快グレア評価方法の指針や規格化、評価基準策定の進展も合わせて期待される。規格化や基準策定は注意する必要があるが²⁹⁾、それらがあれば、基本的にどのようなメーカーでも評価技術を使用することができ、不快グレアに配慮した製品開発が可能になる。規格化や基準策定は、研究開発に比べ時間がかかる。そのため、研究開発が完了するのを待つのではなく、明らかになった有用な知見をいち早く取り込み、日進月歩のLED技術と足並みがそろそろように、規格化や基準策定を整備していくことが今後は重要であると考える。

文 献

- 1) LED 推進協議会：“白色 LED の技術ロードマップ”，LEDS Technical Report, **2** (2008) 1-9.
- 2) 日本照明器具工業会：“照明器具リニューアルのおすすめ”，日本照明器具工業会パンフレット (2009) 1-15.
- 3) 小谷朋子，東 洋邦：“LED を用いた快適照明空間を実現するための取組み”，東芝レビュー，**65**，No. 7 (2010) 20-23.
- 4) 日本規格協会：“照明用語”，日本工業規格，JIS Z 8113:1998 (1998)
- 5) 岩田利枝：“不快グレア評価法”，照明学会誌，**93** (2009) 897-901.
- 6) Commission Internationale de l'Eclairage：“Discomfort glare in interior lighting,” *CIE Technical Report*, No. 117 (1995).
- 7) The International Organization for Standardization：“Lighting of indoor work places,” *International Standard*, ISO/CIE 8995:2002 (E) (2002).
- 8) 日本規格協会：“照明基準総則”，日本工業規格，JIS Z 9110:2010 (2010)
- 9) 照明学会：“CIE グレア評価法 UGR の研究調査”，委員会報告書，JIER-060 (1999)
- 10) 日本照明委員会：“屋内作業場の照明基準設計ガイド”，JCIE-002 (JCIE, 2009)
- 11) 明石行生，村松陸雄，金谷末子：“UGR (Unified Glare Rating) と不快グレアの評価との関係”，照明学会誌，**78** (1994) 516-526.
- 12) Y. Akashi, R. Muramatsu and S. Kanaya：“Unified Glare Rating (UGR) and subjective appraisal of discomfort glare,” *Light. Res. Technol.*, **28** (1996) 199-206.
- 13) 森川宏之，高橋好正，一條 隆：“UGR と不快グレア評価結果との関係”，照明学会全国大会講演論文集，No. 31 (1994) p. 142
- 14) 高橋 宏，入倉 隆：“複数の点光源による不快グレア”，照明学会誌，**87** (2003) 584-588.
- 15) T. Kasahara, D. Aizawa, T. Irikura, T. Moriyama, M. Toda and M. Iwamoto：“Discomfort glare caused by white LED light sources,” *J. Light Visual. Environ.*, **30** (2006) 95-103.
- 16) C. Lee, H. Kim and D. Choi：“A study on the estimation of discomfort glare for led luminaires,” *The Proceedings of the 26th CIE* (2007) pp. 33-36.
- 17) J. Mandelbaum and L. L. Sloan：“Peripheral visual acuity,” *Amer. J. Ophthal.*, **30** (1947) 581-588.
- 18) C. E. Waters, R. G. Mistrick and C. A. Bernecker：“Discomfort glare from sources of nonuniform luminance,” *J. Illum. Eng. Soc.*, **24** (1995) 73-85.
- 19) M. L. Eble-Hankins and C. E. Waters：“Subjective impression of discomfort glare from sources of non-uniform luminance,” *Leukos*, **6** (2010) 51-77.
- 20) H. Takahashi, Y. Kobayashi, S. Onda and T. Irikura：“Position index for the matrix light source,” *J. Light Visual. Environ.*, **31** (2007) 128-133.
- 21) T. Tashiro, T. Kimura-Minoda, S. Kohko, T. Ishikawa and M. Ayama：“Discomfort glare evaluation to white LEDs with different spatial arrangement,” *The Proceedings of the 27th CIE* (2011) pp. 583-588.
- 22) 田代知範，木村能子，川野辺祥子，江湖俊介，石川智治，阿山みよし：“輝度分布の異なる白色 LED 光源の不快グレア評価”，照明学会全国大会講演論文集，No. 45 (2012) pp. 9-10.
- 23) 原 直也，長谷川早苗：“LED 素子を配列した光源の不快グレアに関する研究”，照明学会誌，**96** (2012) 81-88.
- 24) H. Higashi, S. Koga and T. Kotani：“The Development of evaluation for discomfort glare in LED lighting of indoor work place: Relationship between UGR and subjective evaluation,” *Proceedings of the CIE Hangzhou* (2012) pp. 706-712.
- 25) 東 洋邦，古賀翔大，小谷朋子：“屋内 LED 照明の不快グレア評価技術の開発—器具発光面の輝度均斉度が主観評価に与える影響—”，照明学会全国大会講演論文集，No. 45 (2012) pp. 9-26.
- 26) 菅野 普，中村芳樹：“シミュレーションによる UGR 評価の検討—明るさ画像から作成した UGR 画像の実用性検討—”，照明学会全国大会講演論文集，No. 43 (2010) pp. 93-94.
- 27) M. Knoop：“Lighting quality measures for interior lighting with LED lighting systems,” *Proceedings of the 27th CIE* (2011) pp. 219-225.
- 28) S. Koga, H. Higashi and T. Kotani：“The Development of Evaluation for Discomfort Glare in LED Lighting: Relationship between G-classification and subjective evaluation,” *Proceedings of the 5th Lighting Conference of China, Japan and Korea* (2012) pp. 115-116.
- 29) 原 直也：“LED 照明のグレア評価法の国際標準化に向けて”，照明学会誌，**96** (2012) 349-353.

(2012年11月2日受理)