■特集資料■青色照明光の心理・生理的效果とその評価

青色照明光の評価：評価規格と計測上の課題

Evaluation of Blue Light for Lighting Environment : Photobiological Safety Standard for Lamps and Lamp Systems, and Problems on the Optical Radiometry

専門会員 竹下 秀
Shu Takeshita1995年東海大学大学院工学
研究科工学専攻博士課程
後期修了。博士(工学)。
太陽放射の連続観測による
地球の光環境の変動評価お
よび光放射の絶対計測に関
する応用研究に従事してい
る。

◀キー・ワード：光源，光源組み込み装置，光生物学的安全性評価規格

◀KEYWORDS : lamp, lamp system, photobiological safety standard

ABSTRACT

The spread of Light Emitting Diode (LED) lamps and LED lamp systems has been promoting. Characteristics of LED are quite different from traditional lamps (i.e. incandescent lamp, fluorescent lamp etc.). Therefore, the requirement of the testing method development for LED lamps and LED lamp systems is increasing in the world wide. The international/regional/national photobiological safety standards for lamps and lamps systems were already published. Especially, European Union set a directive using these standards for guarantee of human photobiological safety. This directive has been valid since September 2009. All lamps and lamp systems sold in EU countries shall be tested using these photobiological safety standards. However, these standards have serious problems on the absolute optical radiometry. No one can make an accurate evaluation of photobiological safety using these safety standards except some evaluation items, some lamps and lamps systems. These problems of safety standards are reported in this paper.

1. はじめに

日本国内では、LED 照明への切り替えが特に東日本大震災後、急速に進められている。しかし、LED は、従来光源とその分光分布や配光特性が全く異なる。このため「光の質」と「光の量」の評価の重要性が認識されつつあり、これらの評価指標の1つである光生物学的安全性への関心が高まっている。光源の光生物学的安全性は、世間一般には「青色光障害（ブルーライトハザード）」と呼ばれている。この「青色光障害」は、実は「障害」と「傷害」の2つに大別される。照明の分野では、光放射の非視覚作用による生体リズム（概日リズム）に与える障害を「障害」、光放射による熱的・化学的な障害を「傷害」と使い分ける。本報では、特に後者の「傷害」に絞り、その評価規格および評価規格の課題について解説する。なお、「障害」については、その作用スペクトルが提案されているにすぎず、その閾値などが明確化されていない。このため、評価規格はドイツ規格協会による暫定 DIN 規格¹⁾の一例を除き存在しない。この評価規格および評価方法については、本学会誌2012年10月号で解説されているので参照してほしい。

2. 光生物学的安全性評価（傷害評価）の必要性とこの規格の概要

光放射による「傷害」評価は、光源業界および光源が組み込まれた製品を製造している業界において、現在、ホットな課題となっている。この理由は、EU 域内にお

いて、この光生物学的安全性評価がなされた光源および光源が組み込まれた製品以外は2011年9月以降 CE マークが取得不可能になり、EU 市場から排除されたことに端を発している²⁾。

LED および LED が組み込まれた製品の光生物学的安全性は、後述する現行の規格制定以前はレーザ製品の安全基準 IEC 60825-1 ed.1.1:1998で評価されていた³⁾。この理由は、従来の LED が信号素子としての利用が主流だったからである。しかし、白色 LED が開発され、照明分野への急速な展開が予想されるようになった。国際照明委員会（CIE）は、白色 LED の開発に合わせるかのように光源および光源が組み込まれた製品の光生物学的安全性評価規格の策定作業を開始し、2002年に CIE S009として制定した。この国際規格は、その後、国際電気会議(IEC)との共同作業によって2006年に IEC との共同規格 IEC 62471:2006/CIE S009:2002となった⁴⁾。この共同規格化に合わせて関連規格の適用範囲が見直され、LED および LED が組み込まれた装置の光生物学的安全性評価は IEC 60825-1 ed. 1.1:1998 から除外され、IEC 62471:2006/CIE S009: 2002 で評価することになった。IEC 60825-1 ed. 1.1:1998は改訂され、IEC 60825-1 ed. 2.0:2007となった。わが国では、この規格を翻訳し、国内の事情に合わせて一部修正した JIS C7550が2011年12月に制定された⁵⁾。また、EU では、IEC62471/CIE S009 を若干修正した EN62471:2008が使われている⁶⁾。現在使われている光生物学的安全性評価規格をまとめると、オリジナル規格である IEC62471/CIE S009, EU 規格である EN62471, JIS

規格である JIS C7550 が存在する。これらの規格の評価対象となる製品は、規格によって若干異なるが、基本的に特定用途を除く全ての光源および光源が組み込まれた製品であり、対象となる製品は多岐に渡る。このため、これらの規格は、一般消費者が安心して、光源および光源が組み込まれた製品を使うために極めて重要である。

これらの規格では、次の6つの光生物学的安全性評価項目について、評価するための重みづけ関数（作用スペクトル）が閾値とともに定められている。生物学的な安全性は、光源または光源が組み込まれた装置から放射される光の分光分布に作用スペクトルを乗じて実効放射スペクトルをもとめ、この波長積分値（実効放射量）で評価する。評価距離は、一般照明用光源の場合は光源から 500 lx の位置で、これ以外の光源の場合は、光源から 200 mm の位置での評価結果の報告が要求されている。

第1の評価項目は、紫外放射（波長 200 nm ～ 400 nm）による眼および皮膚に対する作用量である。作用スペクトル $S(\lambda)$ が規定されており、測定視野が制限された実効放射照度で評価する。この作用スペクトル $S(\lambda)$ は、JIS Z8812:1987 の相対分光有害作用曲線⁷⁾ の長波長側を拡張したものである。第2は、近紫外放射（波長 300 nm ～ 400 nm）による眼の角膜に対する作用量である。測定視野が制限された物理的な放射照度（作用スペクトルは乗じない）で評価する。第3は、青色光による網膜傷害である。作用スペクトル $B(\lambda)$ が規定されており、波長 300 nm ～ 700 nm の測定視野が規定された実効放射輝度または測定視野が制限された実効放射照度で評価する。第4は、網膜に対する熱的傷害である。作用スペクトル $R(\lambda)$ が規定されており、波長 380 nm ～ 1400 nm の測定視野が規定された実効放射輝度で評価する。第5は、眼（眼球）に対する熱的傷害であり、波長 780 nm ～ 3000 nm の測定視野が制限された実効放射照度で評価する。そして、第

6は、皮膚に対する熱的傷害であり、波長 380 nm ～ 3000 nm までの実効放射照度で評価する。なお、照度測定の場合の測定視野は、皮膚の熱傷害は 180 度であるが、この他は 80 度と規定されている。評価対象の光源に有孔遮光板を取り付けて測定する。評価に使用する作用スペクトルを図 1 に示す。

3. 光生物学的安全性評価（傷害評価）規格による青色光網膜傷害評価上の問題点

IEC62471/CIE S009 をはじめとする光生物学的安全性評価規格によって定められている性評価項目には、前述のように6つの評価項目があるが、実際の評価試験においてさまざまな問題があることが明らかになっている。特に、最も重要視されている第3の青色光網膜傷害の評価は、この規格原案作成開始時（CIE において 1996 年から開始）と比べて LED 化によって光源が組み込まれた製品が多様化したことなどの理由により、極めて問題が多い。

青色光網膜傷害の評価は、前述の通り実効放射輝度もしくは測定視野が制限された実効放射照度で評価する。実効放射輝度で評価するのか実効放射照度で評価するのかの判定は、規定された距離における評価対象の光源（放射源）の大きさ（視角）によって決定される。具体的には、視角が 0.011 rad 以上の場合は実効放射輝度で、0.011 rad 未満の場合は実効放射照度で評価する。一般照明用の多くの光源は 0.011 rad 以上であり、実効放射輝度測定が要求される。しかし、この実効放射輝度測定は物理的に困難である。

第1は測定波長域に伴う光学系の課題である。これらの規格では、波長 300 nm ～ 700 nm の分光放射輝度測定が要求されているため分光放射輝度計（以後輝度計と略）の使用が前提となる。この輝度計に組み込まれている対物レンズは紫外透過特性を有し、かつ、この波長域で色収差が良好に補正されていなければならない。最近市販されている対物レンズは小型軽量化のため、プラスチックレンズが多用されている。この結果、紫外放射を透過し、色収差が補正された対物レンズは世界的に探しても限定される。現在入手可能な国内製品は UV105 mm f4.5（栃木ニコン）しか存在しない。海外に目を向けても UV-VIS-IR 60mm 1:4 Apo Macro（JENOPTIK）しか存在しない。

さらに、仮に理想的な対物レンズが入手できたとしても、第2の課題として輝度計の距離原点位置をどこにするのか課題となる。輝度計の光学系の一例を図 2 に示す。

光源からの光放射は、対物レンズによって焦点面に結像される。焦点面には楕円形の視野絞りが配置される。この絞りは有孔全反射鏡になっており、測定視野部分の光放射のみが視野絞りを通過し、検出素子によって検出される。また、視野絞りで反射された光放射は、ファインダーに導かれ測定視野の決定に使用される。基本的にはカメラと全く同じ光学系であり、カメラの場合は、焦点面

図 1 紫外放射傷害および網膜傷害の重みづけ関数（作用スペクトル）

Fig.1 Spectral weighting functions for assessing optical radiation hazards.

照明学会技術指針 JIEG-006: 輝度計の性能評価方法ならびに使用方法 (1986)の図2.4に加筆

図2 市販されている輝度計の光学系の一例⁸⁾
Fig.2 A optics of a commercial luminance meter⁸⁾.

に CCD や C-MOS といった撮像素子が配置されている。

輝度測定の場合、光源と輝度計の距離が近くなると、光源が対物レンズに張る角度は大きくなり、この結果、計測値が大きくなる。すなわち、校正距離と測定距離が異なると、正確に測定できないことを意味する。これを避けるために輝度計の対物レンズには開口絞りが組み込まれ、受光素子に入射する光の立体角が一定になるよう設計されている。

従来の輝度測定では、大面積で比較的輝度が均等な平面のごく一部の輝度を測定するため、測定視野内の輝度は、ほぼ均一である。これら2つの理由により、従来の輝度測定では、測定距離は全く考慮する必要はない。

一方、LED 光源を評価する場合は、LED 発光部が極めて小さく、かつ、鋭敏な輝度分布を持つ。このため、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、測定距離は極めて重要である。

輝度計は、近年ではさまざまな分野での応用が進んでいる。しかし、輝度計の技術的な指針は照明学会から発行された1986年の技術指針⁸⁾程度しか存在しない。この技術指針によると輝度計の測定距離原点は、図2に示すように輝度計の最も光源側対物レンズの表面の光軸上（光源からのこの位置までの距離をワーキングディスタンスと呼ぶ）、もしくは、焦点面の光軸上（光源からここまでの距離を物像間距離と呼ぶ）とされているが規定されていない。この理由は、前述の通り従来の輝度測定の場合には測定距離を一切考慮する必要がないためである。すなわち、現状では照度測定によって500 lxの位置を決定しても、実際にその位置に輝度計を正確に設置できない。

これらの光生物学的光安全性評価規格では、輝度計測時の輝度計側の測定距離原点を、輝度計の対物レンズの開口瞳位置とするような図が提示されている。開口瞳は、対物レンズが薄レンズ 1 枚だけの場合は、レンズの主点と一致し、レンズの中心に位置する。しかし、通常の対

物レンズは複数のレンズより構成されており、開口瞳は対物レンズの内部に存在する。さらに、この位置情報は対物レンズメーカーより一切開示されていない。このため、実際に測定距離原点とすることはできない。

これらの課題を解決するために、また、測定を簡便にするために分光放射輝度を分光放射照度から決定する方法(照度法)も規定されている。この方法では、測定距離は規定の距離に設定する必要はなく、使用する有孔遮光板の穴の製作精度に注意すればよい。しかし、この方法では 2π 空間に一樣に光放射を放射している光源にのみ適用可能であり、指向性がある LED 光源やレンズ系が組み込まれた光源には適用できない。

国際電気会議 (IEC) の SC34A “Lamp” は、IEC62471/ CIE S009規格の測定上の煩わしさを解消するために新しい TR (Technical Report) を発行した⁹⁾。この TR では、全ての光源の測定距離は200 mm に規定され、測定距離を決定するために照度を測定する煩わしさから解放された。しかし、測定距離が200 mm では、前述の現在入手可能な対物レンズではレンズ長を考慮すると輝度計の距離原点を物体側レンズ表面 (すなわちワーキングディスタンス) としなれば測定は不可能である。また、開口瞳位置とした場合も、開口瞳はレンズ内部に位置するため、測定距離200 mm を確保するのは困難と考えられる。

照度法を使った場合は使用する有孔遮光板の穴の直径が2.20 mmφと極めて小さいため回折が発生する。このため、 2π 空間に一樣に光放射を放射している光源でも正確な測定は不可能である。

さらに、輝度測定か照度測定か判断するのに用いる光源の大きさの決定法にも課題がある。これらの規定において光源の大きさは光源の物理的な大きさで判定するのではない。光源からの光放射の最大値の50%の点を結ぶ包絡線を光源の大きさとして規定している^{*)}。すなわち、光源の発光素子が視認できるクリアパルプの製品の場合は、光源輝度の平面分布を測定する必要がある。この場合、CCDやC-MOSなどのイメージングデバイスを利用した撮像装置を利用することになるが、このダイナミックレンジや画素間の応答度の違い、すなわち、撮像面の応答度の均一性に注意する必要がある。

これらの規格策定後にクローズアップされた問題として評価対象の大型化が挙げられる。これらの規格や技術レポートでは、単純に機械的中心位置での測定ではなく、光放射が最も強くなる位置での測定を要求している。このため、特に測定距離200 mmの条件では、光源が組み込まれた装置との距離が近すぎ、かつ、これらの装置は必ず強度分布を持つため測定する場所の決定は極めて困難であり、測定の再現性は低下する。

さらに、大光量の光源を測定する場合、500 lx の距離をとる場合は、測定距離が非常に長くなる。また、この光

*) JIS C7550では附属書 JA「光源の大きさの測定法（規定）」において、光源の特定部位の寸法による方法が規定されている。

源を測定距離200 mm の条件で評価する場合は光源から発生する熱に計測器が耐え切れないという問題も発生する。

すなわち、これらの規格では、一般家庭でこれまで照明光源として使用してきた白熱電球、ハロゲン電球、蛍光灯程度しか正確に評価できないのである。現在、普及が始まったLED光源については、拡散グローブを取り付けた製品などを除いて物理的な制約で不可能なのである。ましてや、光源に光学系が組み込まれた光源が使われている懐中電灯やサーチライト類は、全く不可能である。

4. まとめ

LED照明の光生物学的安全性評価について、特に青色光網膜傷害の評価に絞り、その測定・評価上の問題をまとめた。この結果、測定・評価上のさまざまな問題を抱えており、現在の規格では、市場に流通する全ての製品を正確に評価することは極めて困難であると結論づけられる。

有効な解決策は、ベース規格であるIEC62471/CIE S009の改訂である。この規格の最大の問題点は、一般照明用光源のみならず光源が組み込まれた全ての装置の規格にも関わらず、測定距離が指定されている点である。光源や光源が組み込まれた装置は多岐に渡っており、使用条件などは全く異なる。このため、距離などの評価条件はこの規格から切り離し、作用スペクトルと閾値のみにすべきであろう。そして光源または光源が組み込まれた装置それぞれに評価規格を策定すべきである。例えば、わが国特有の照明器具であるシーリングライトなどはLED化に伴い器具と光源が一体化して大型化している。白熱電球の置き換え光源として普及しつつあるLED電球とは異なる規格を策定し、誰でもが測定・評価可能な規格とすべきである。CIEにおいて、この規格の改訂作業が2013年4月から開始された。この改訂作業には、筆者をはじめわが国から3名が委員として登録している。改訂作業には、関係者を納得させるための根拠として、実際の実験結果の提示も必要である。関係団体による全面的な支援をお願いしたい。

さらに、計測器の校正に使用する分光放射照度標準の不確かさの改善および同等性の確保が挙げられる。各国の分光放射照度標準値は、10年程度に1回、国際度量衡委員会(CIPM, Comité International des Poids et Mesures)傘下の国際度量衡局(BIPM, Bureau International des Poids et Mesures)による国際比較(Key Comparison)によって国際的なスケールの整合性が評価され、その結果を受けて必要に応じて各国の国家スケールが修正されている。直近では2000年から2003年にかけて国際比較(CCPR K1-a)が行われ、わが国からは独立行政法人産業技術総合研究所計量標準総合センター(NMIJ)がこの国際比較に参加し、国際的な同等性が確認されている¹⁰⁾。しかし、個々の機関が持つ分光放射照度標準の違いは、太

陽紫外放射の絶対計測が要求されるようになった1990年代から懸案事項となっている¹¹⁾。最近では、米国国立標準技術研究所(NIST)トレーサブルをうたう海外製分光放射照度標準電球とJCSS認定された分光放射照度標準ではその校正値が不確かさの範囲を超えて異なることが明らかになっている¹²⁾。

現在、分光感度特性が評価対象の作用スペクトルと等価な応答をしめす計測器も市販されている。計測の簡便さを考慮し、この計測器での測定も考慮すべきであろう。

本報では、実際の計測・評価結果は省略した。しかし、基本的に製造会社からの使用上の注意事項を守って使う限り、一般家庭で使用する照明用光源は光生物学的に安全である。安心して使用してほしい。

参考文献

- 1) DIN V5031-100 : Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik - Teil 100 : Über das Auge vermittelte, nichtvisuelle Wirkung des Lichts auf den Menschen - Größen, Formelzeichen und Wirkungsspektren (2009).
- 2) Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009 establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for energy-related products.
- 3) IEC60825-1 ed.1.1 : Safety of laser products - Part 1 : Equipment classification, requirements and user's guide (1998).
- 4) IEC62471 : 2006/CIE S009 : Photobiological safety of lamps and lamp systems (2002).
- 5) JIS C7550 : ランプ及びランプシステムの光生物学的安全性 (2011).
- 6) EN62471 : Photobiological safety of lamps and lamp systems (2008).
- 7) JIZ Z8812 : 有害紫外放射の測定方法 (1987).
- 8) JIEG-006 : 輝度計の性能評価方法ならびに使用方法, 照明学会 (1986).
- 9) IEC TR62778 : Application of IEC 62471 for the assessment of blue light hazard to light sources and luminaires (2012).
- 10) E.R.Woolliams et al. : Final report on CCPR K1-a : Spectral irradiance from 250 nm to 2500 nm, Metrologia, 43 (2006).
- 11) A.Thompson et al. : The 1994 North American interagency intercomparison of ultraviolet monitoring spectroradiometers, J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol., 102-3, 279 (1997).
- 12) 竹下秀 : 2012年4月に実施された分光放射照度標準電球の国家スケール変更量の推定, 東海大学紀要総合科学技術研究所, 32, 10-15 (2013).

連絡先

東海大学 総合科学技術研究所
〒259-1292 神奈川県平塚市北金目4-1-1
TEL : 0463-58-1211 FAX : 0463-58-1203
Research Institute of Science & Technology, Tokai University
4-1-1 Kitakaname, Hiratsuka, Kanagawa, 259-1292, Japan
TEL : 0463-58-1211 FAX : 0463-58-1203
E-mail : stake@keyaki.cc.u-tokai.ac.jp