IEC、青色光網膜傷害に対する評価方法を規定

レスリー・リヨン

LEDを含む製品の光生物学的安全性の評価について考察した過去の一連の記事の続編として、SSLの出現が懸念の一因となっている、青色光による網膜傷害を評価するために、照明業界で採用された新しい手法の概要を紹介する。

LED照明の安全性に対する懸念の声は、世界中の研究者から定期的に挙がっている。その対象は、青色光の影響から減能グレアなどの問題にいたるまでさまざまである。2012年2月号まで複数回に分けて連載した一連の記事では、SSL(Solid State Lighting:固体照明)やその他のレーザ以外の光放射源の光生物学的安全性について説明した(ledsmagazine.com/features/9/2/9)。本稿では、過去の記事を基に、青色光の問題をめぐって標準化団体や研究施設で行われている新しい取り組みについて紹介する。

GLS(general lighting service:一般照明用)の用途を対象とするランプや照明器具の光生物学的安全性に対する評価は現在、IEC/EN62471規格のGLS分類基準に従って行われている。具体的には、光源の照度(illuminance)が500lxとなる200mm以上の距離での報告が求められる(必ずしも測定する必要はない)。

照明業界はこの現状にまったく満足していない。それには、以下に示すいくつかの理由がある。

- どのようなランプがGLSに該当するとみなすべきかについて意見の相違がある(例えば、スポットライトや卓上ランプがこれに含まれるかなど)。
- 現実的な露光状態を表していないかもしれない500lxでの評価値について、疑問を感じる。
- ほとんどの光源が、免除リスクグループに分類されるため、500lxでの評価によって得られる情報は不十分である。
- IEC/TR 62471-2で規定されている、LEDメーカーのデータを最終製品に表示することを許可する方法の実施について問題がある。(LEDの使用状態を現実的に表すものではなく)最悪の条件下で評価を行うと、RG2(リスクグループ2)に分類されるという結果につながるケースが多く、警告ラベルの適用が必要になり、その分類を最終製品にどのようにして表示するかという問題が生じる。

IECの分科委員会(SC:sub-committee)であるSC34A: Lamps[電球類](IEC技術委員会(TC:technical committee)34: Lamps and related equipment[電球類及び関連機器]に含まれる)の光生物学的安全性パネルは、この疑問について調査し、その結果としてIEC/TR 62778 Edition 1: "Application of IEC 62471 for the assessment of blue light hazard to light sources and luminaires"(青色光網膜傷害の評価のための光源および照明器具へのIEC 62471の適用)を発行し、多様なランプおよび照明器具の規格を改正した。それらの規格の多くは既に、低電圧指令(Low Voltage Directive)の下に発行され更新されている。このやり方は、垂直的な製品固有の規格ではなく水平的な規格を目的とするIEC 62471の理念に合致している。

照明製品の安全性に関する懸念

IEC 62471では、200～3000nmのスペクトル範囲における、皮膚および目に対する紫外(UV:ultraviolet)放射傷害2項目、網膜傷害2項目、赤外(IR:infrared)放射傷害2項目について検討している。白熱光源、蛍光光源、放電源、LED光源という広い範囲を含むGLS製品からの光放射は、必ずしもスペクトルの全範囲を網羅せず、すべてが懸念を引き起こすレベルにあるわけではない。したがって、光生物学的安全性に対する考察は、ランプの種類に依存し、技術固有の基準に基づいて行われる。

紫外放射傷害については、特定の規格で検討されており、高いレベルの紫外線を放射するランプに対する照明器具保護シールドの提供に関するガイダンスも示されているが、青色光による網膜傷害についてはこれまで、取り上げられることがなかった。IEC/TR 62778が対象とするのはこの部分である。赤外放射傷害については、赤外放射の存在を警告するラベルを必要に応じて表示することによって対処される予定である。

IEC/TR 62778の適用範囲

IEC/TR 62778は、380～780nmの可視波長域の光を主に放射するすべての照明製品を対象とした青色光による網膜傷害の評価と、LED/ランプのデータを最終製品に表示する方法（どちらの場合においても、動作条件が同等であることに留意する）について、ガイダンスを示すことを目的としている。

CCT（Correlated Color Temperature：相関色温度）と青色光網膜傷害の間の関係についても議論されている。つまり、光源による青色波長域の放射が多いほど、青色光網膜傷害の度合いは大きくなる。光源の輝度（luminance）、照度、CCTを使用して、光源がRG1のしきい値未満になるかどうかを判断する方法について、ガイダンスが示されている。しきい値は、安全係数2を用いた計算によって規定されている。

青色光による網膜傷害

青色光による網膜傷害を有効に評価するには、目にした光源の網膜像の放射照度（irradiance）を考慮する必要がある。光源を一瞬見ただけの場合、網膜像は光源と同じ角度の範囲内に収まる（**図1**）。露光時間が増加するにつれ、網膜像は網膜のより大きな面積を占めるようになる。これは、目の動き（サッカード：衝動性眼球運動）と目的に依存する動きに起因しており、これによって網膜の放射照度は低下する。0.25秒（回避反応時間）～1万秒の露光時間に対する網膜像の視角（angular subtense）の時間依存関数が、1.7mrad（網膜上に形成される像の最小サイズとされる）～100mradの範囲で定義されている。

光源を見ることによって網膜上に生じる放射照度を求めるには、放射輝度（radiance）を測定する必要がある。これには、光源の立体放射角を表す値と、測定する光源の領域を表す値の測定が含まれる。

立体角を表す値は、目が瞳孔を通して集束する光に関連する。測定の観点からは単純に、平均開口（aperture）とみなすことができる。領域を表す値は、測定器の視野（FOV：field of view）によって決まり、対象とする網膜像の面積に直接関連するため、基本となるも

光産業技術マンスリーセミナー OITDA

Optoelectronics Industry and Technology Development Association

プログラム（4～5月）

No. / 開催日	講演テーマ / 講師
第 371 回 4月15日(火) 15:30-17:30	「超短パルスレーザプロセッシング — 基礎から最近の進展ならびに産業応用まで」 講師：杉岡　幸次 氏（理化学研究所　専任研究員）
第 372 回 5月20日(火) 15:30-17:30	「GPUを活用したホログラフィックディスプレイとディジタルホログラフィ計測」 講師：下馬場　朋禄 氏（千葉大学　准教授）

■場所　一般財団法人光産業技術振興協会
■定員　各６０名
■参加費　光協会賛助会員：1,500 円（税込み）　／　一般参加：3,000 円（税込み）
※支払いは、当日受付にて現金でお願いします。

■申込方法　オンライン申込フォーム　>>> http://www.oitda.or.jp/main/monthly/monthly_postmail.html
■申込締切　定員になり次第締め切ります。なお、締め切った場合には Web 上にその旨を掲載します。

問い合わせ先　一般財団法人光産業技術振興協会マンスリーセミナー担当　臼井、潮田
〒112-0014　東京都文京区関口 1-20-10 住友江戸川橋駅前ビル7F　TEL：03-5225-6431　FAX：03-5225-6435
E-mail：mly@oitda.or.jp　URL：http://www.oitda.or.jp/

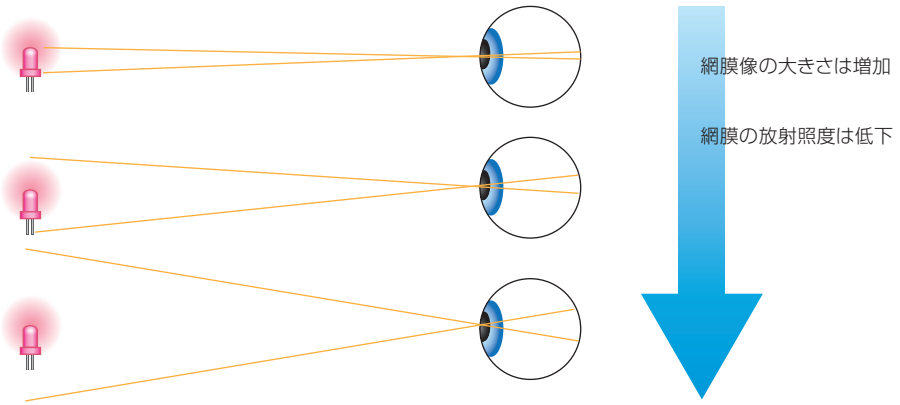

図1　網膜像の大きさと放射照度は、露光時間に依存する。

表1　青色光による網膜傷害の各リスクグループの値

リスクグループ	時間基準〔秒〕	受光角〔mrad〕	受光角放射限界〔W/m²sr〕
免除グループ	10,000	100	100
グループ1	100	11	10,000
グループ2	0.25	1.7	400,0000

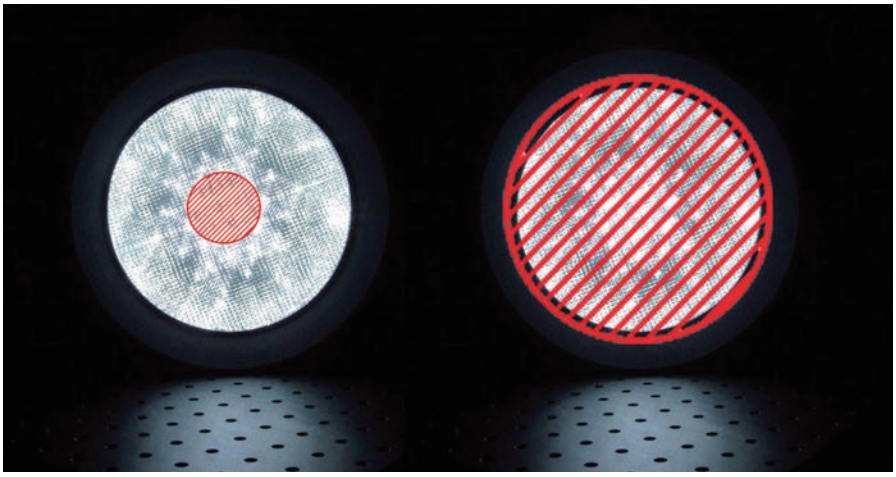

図2　斜線部分は、「実際」の放射輝度（左）と「生理学的」な放射輝度（右）の測定における視野の例を示している。

のである。青色光網膜傷害を評価するには、光源の領域ではなく、露光時間に依存する網膜上の露光面積を考慮する必要がある。視野は測定器で観測される立体角として定義されるが、一般的には平面的な受光角で表されることに注意してほしい。

IEC 62471の分類体系は、危険なレベルに達するまでの露光時間に基づいている。対応する視野における光源の放射輝度を測定し、この時間基準を用いて、各リスクグループの放射限界を超えているかどうかを判断することができる。免除グループ、リスクグループ1、リスクグループ2…の順に、放射限界を超えなくなるまで比較を行う（**表1**）。

青色光網膜傷害の評価において、測定値はより正確には「生理学的」な放射輝度であり、分光放射測定で一般的に得られる「実際の」放射輝度ではない。分光放射測定による放射輝度は、定義上、光源の放射領域のみをサンプリングする（**図2**）。一方、生理学的な放射輝度は、光源の範囲を表す角度よりも広い視野において測定されるため、光源の実際の放射輝度と暗い背景が平均されたものになる。放射輝度を光学システムによって増加させることはできないことを示す、放射輝度保存の法則は、実際の放射輝度の測定値に対してのみ適用される。

青色光による網膜傷害は、対象とするリスクグループの適切な視野において、光源の分光放射輝度を300～700nmの範囲で測定（青色光傷害の重み関数を適用）することによって求められる。測定範囲を780nmまでに拡大すると、輝度（cd/m²）が得られる。つまり、この情報はIEC/TR 62778の分析で必要になる可能性がある。

青色光の放射照度の限界値

光源の放射輝度は、光源の位置に開口を配置して視野を定義し、評価距離における放射照度を測定することによって間接的に測定できる。放射輝度は、放射照度と、開口の範囲を表す立体角（単位：ステラジアン[sr：steradian]）の積から計算できる。この方法により、リスクグループの視野に対応する立体角を用いて、表から放射照度に基づく放射限界を求めることができる。

この考え方に基づいて、IEC 62471では青色光の小型光源に対する放射照度の簡易化された限界値が定められている。表の中の放射限界と、11mradに対応する立体角（$9.50332.10^{-5}$sr）の積から求められる。この限界を基準として、視角が11mrad未満の光源の評価を行う必要がある。

ある距離における光源の視角は、光源の50%放射範囲と距離の比率から求

められる(**図3**)。報告する光源視角は、光源視角の最大値と最小値の幾何平均とする。平均をとる前に、限界を適用する(1.7mrad未満の場合は1.7mrad、100mrad以上の場合は100mradとする)。

IEC/TR 62778が定める手法

IEC/TR 62471−2に基づき、免除グループまたはRG1に分類される光源は、青色光傷害に関して安全であるとみなされ、ラベル表示やユーザーに対する情報提供は不要であることから、IEC/TR 62778は、200mmの距離(IEC 62471において、網膜に対する最悪の露光条件である人間の目の近点と定義される)において、対象光源がRG1の青色光放射限界を超えているかどうかを判断するために試験を適用する。この分析では、青色光小型光源の条件に該当する場合に対し、分光放射輝度または分光放射照度を測定する必要がある。

白色光源の(光源全体を含まない視野における)実際の輝度が10^4cd/m^{2}未満である場合、RG0(付帯条件なし)に直接分類することができる。このガイダンスは、このレベル(視覚的に快適に見ることができるとみなされる)では、放射限界を超えることはないという予測に基づいている。実際には、この輝度のしきい値はかなり低く、低電力の白色LEDにいたるまでの多くの光源がこの値を上回る。

光または熱の放射量が高く、200mmの距離に測定器を配置できない光源に対しては、別の測定距離を適用することができる。適切な測定距離または視野に関する明確なガイダンスは示されていない。ランプ/LEDに対する分析結果を最終製品に表示する場合には、距離200mm、視野11mradで測定された場合と同じ光源の領域が測定されるように、視野を選択する必要がある。

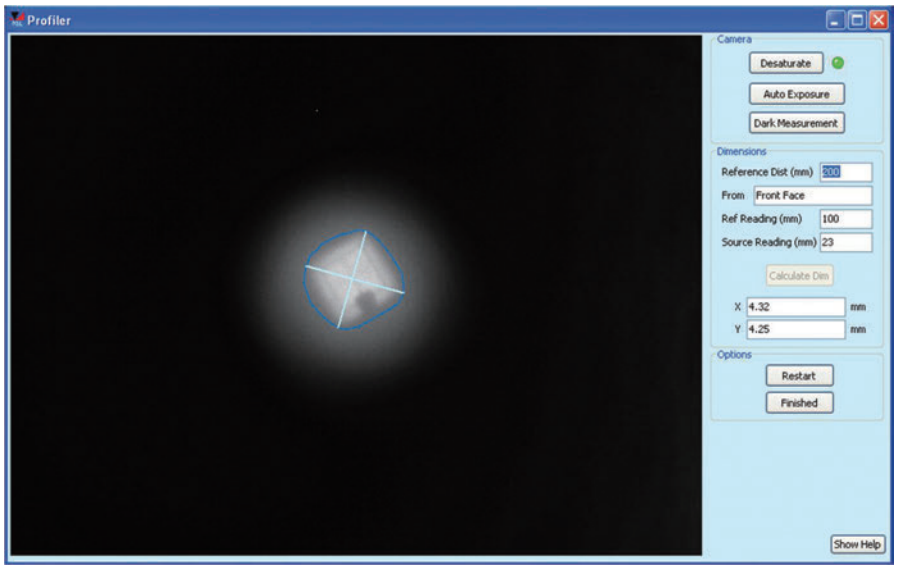

図3 視角を計算するために、光源の50%放射範囲を特定する。

光源視角が11mrad以上の場合

視角が11mrad以上である光源については、距離200mm、視野11mrad(光源から直径2.2mmの円形領域)における分光放射輝度を測定し、青色光の放射輝度をRG1の放射限界である10,000W/m^{2}srと比較する必要がある。

得られた結果がこの放射限界を下回る場合、構成要素であるランプ/LEDまたは最終製品は、「RG1(付帯条件なし)」に分類することができる。ランプ/LEDに対するRG1(付帯条件なし)という分類は、この光源を採用するすべての最終製品にそのまま表示することができる。実際の放射輝度が測定済みであり、放射輝度保存の法則に基づき、その値が増加することはないとみなされる。

RG1の限界を上回る場合、RG1とRG2の間の境界を求める必要がある。構成要素であるランプ/LEDの場合、この境界となる照度のしきい値Ethrをデータシートに記載し、最終製品に表示できるようにする必要がある。最終製品の場合は、照度のしきい値Ethrを距離のしきい値dthrに変換することができる。dthrは、Ethrの値が得られる距離である。

測定された青色光放射輝度が、RG0の放射限界である100 W/m^{2}sr未満の場合、光源は「RG0(付帯条件なし)」に分類することができる。免除リスクグループ分析を正しく行うには、視野として100mradを使用する必要がある。用途において求められるならば、この値を追加の測定値として含めてもよい。

光源視角が11mrad未満の場合

視角が11mrad未満である光源については、距離200mmにおける分光放射照度を測定することによって、青色光小型光源の場合を検討する必要がある。続いて、求めた青色光放射照度を、RG1の放射限界である1W/m^{2}と比較する。

得られた結果がこの放射限界を下回る場合、「RG1(付帯条件なし)」の分類は最終製品のみに適用することができる。実際の放射輝度は測定できないため、放射輝度保存の法則を適用することによって、構成要素であるランプ/LEDのデータを最終製品にそのまま表示することはできない。この場合、照度

のしきい値Ethrをデータシートに記載して、最終製品に表示できるようにする必要がある。RG1の限界を上回る場合は、最終製品に対するRG1とRG2の間の境界を求める必要がある。照度のしきい値Ethrを計算し、そこから距離のしきい値dthrを導く。dthrは、Ethrの値が得られる距離である。

Ethrの計算

RG1とRG2の間の境界となる照度のしきい値Ethrは、11mradの視野におけるこのRG1の測定に対する放射照度に基づく放射限界を考慮することにより、求めることができる。青色光傷害に関するRG1の放射輝度の限界値（10,000W/m^2sr）と、視野11mradに対応する立体角（9.50332.10^{-5}sr）から、青色光の放射照度の限界値である1W/m^2が得られる。この値は、視角が11mrad未満の光源に対して既に与えられている。

青色光網膜傷害の度合いは、対応するフォトメトリック値に比例し、比例定数は、絶対測定値ではなくスペクトル分布によって定義される。このパラメータは、IEC/TR 62778においてKB,vと定義されている。

青色光の輝度に対する放射輝度の比率（小型光源の場合は、青色光の照度に対する放射照度の比率）は、しきい値Ethr（単位：lux）となる照度に対する青色光の放射照度の限界値（1W/m^2）の比率に等しい。つまり、Ethrは、視角が11mrad以上の光源の視野11mradにおける青色光の放射輝度に対する輝度の比率と、視角が11mrad未満の光源の青色光の放射照度に対する照度の比率から計算できるということになる。

RG1とRG2の間の境界を表す照度のしきい値Ethrは、距離のしきい値dthrに変換することができる。このパラメータは、最終製品に対してのみ規定できる。dthrと光源の間の領域は、青色光網膜傷害のRG2と分類される。その他の領域は、RG1（付帯条件なし）と分類するのが正しい。

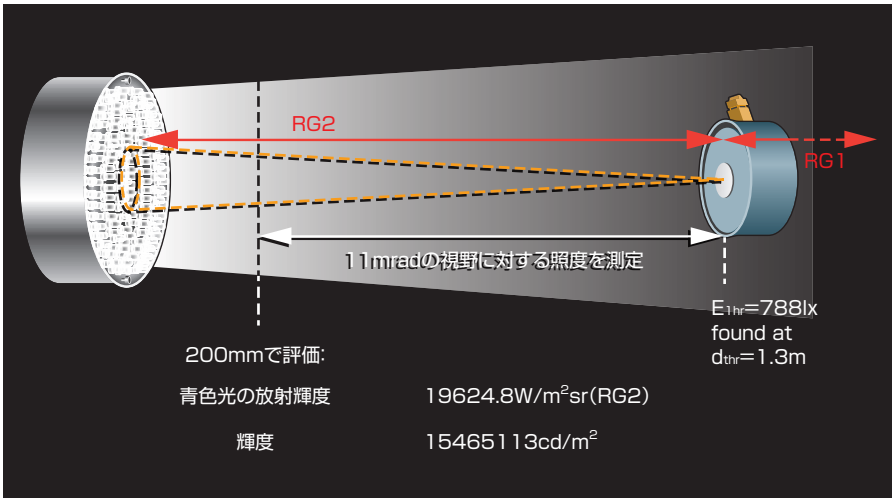

図4 IEC/TR 62778が定めるしきい値距離の算出方法。

距離のしきい値

IEC/TR 62778ではd_{thr}を求める方法として、試験製品のゴニオフォトメトリックデータが存在する場合はそれを使用することを推奨している（**図4**）。最大光度Imax（cd）がわかれば、逆2乗の法則を用いてE_{thr}からd_{thr}を計算することができる（$d_{thr}=\sqrt{(I_{max}/E_{thr})}$）。この方法では、多くの光源に対して逆2乗の法則は成立しないという事実が無視されている。特に指向性の光源（多くのGLS光源がこれに当たる）については、逆2乗の法則は適用できない。

ゴニオフォトメトリックデータが存在しない場合に対するガイダンスは示されていない。照度計を用いてdthrを求めるのが妥当な方法だろう。この方法ならば、逆2乗の法則を用いるという疑わしい手段に依存しないで済む。こちらの方が信頼性の高い方法だという意見もあるだろう。

どちらの場合でも、dthrで定められる位置における光源の視角が11mrad未満ならば、そのdthrの値は正しくないといえる。Ethrの算出方法から、それが視野11mradの範囲内になることはないからである。つまり、距離のしきい値として過度に控えめな値が得られることがわかる。より適切な評価方法が現在検討されており、標準報告書（TR：technical report）を将来改訂する際に導入される予定である。

IEC/TR 62778の策定により、GLS製品の青色光網膜傷害の評価は簡易化されたが、より現実的なdthrの値を求めるには、さらに詳しいガイダンスが必要かもしれない。SC34Aは短期間のうちにIEC/TR 62778を発行し、ランプと照明器具の規格を改正したことから、製品のドキュメントにEthrとdthrが記載され始める日はそう遠くないはずである。

著者紹介
レスリー・リヨン（LESLIE LYONS）は、英ベンサム・インスツルメンツ社（Bentham Instruments Limited）の技術サポートマネージャー。BSIに所属し、IECのTC76委員会（Optical Radiation and Laser Safety：光放射とレーザの安全性）のメンバーも務めている。

LEDJ