

光源データの配光測定方式の違いがヘッドアップディスプレイの 表示シミュレーションに与える影響

— ファーフィールド配光データとニアフィールド配光データの比較 —

照明音響科 豊田敏裕

Influence of nature of light source data originated from method of Goniophotometry on lighting simulation of HUD

— A comparison of far-field light distribution data and near-field light distribution data —

TOYOTA Toshihiro

Characteristics of the light source such as intensity distribution and total flux are one of the crucial factors for estimating lighting performance by lighting simulation in optical design and prediction of in-vehicle lighting products performed by CAE (Computer Aided Engineering). In this report, the influence of measurement method of light source on luminance distribution of virtual image formed by Head-Up display (HUD) is investigated.

Both data on far-field lighting distribution and data on near-field lighting distribution have been generated according to a series of 2-dimensional luminance images measured from light source modules built in commercialized HUD products.

The results of lighting simulation for HUD models including such data of lighting distribution showed that luminance range on virtual images formed by HUD model depends on the total flux of the light source rather than the nature of the intensity distribution of the light source. However, the uniformity of luminance on virtual images was influenced by property of intensity distribution. This tendency suggests that variations of the origin of rays, which can be represented by a near-field lighting distribution, are important for evaluating luminance variance on virtual images.

Keywords : Near-field goniophotometric Measurement, Lighting Simulation, Head-Up Display, HUD

キーワード : ニアフィールド配光測定、照明シミュレーション、ヘッドアップディスプレイ

1 はじめに

車載光学機器にも普及が進む LED 光源は、小型で光線に熱線を含まない利点を生かし、製品の小型化、部品の樹脂化が進んでいる。しかしながら、微小光源からの光を正確に制御することが求められる。そのため、迷光などの予期しない光の発生など、設計段階では予測が難しい性能上の課題が生じている。

CAE (Computer Aided Engineering) は、設計段階で性能や不具合を予測する有効な手段であるが、実際の性能を理論的に予測するには、光源の配光や全光束などの物理特性を正確に把握する必要がある。

光源の配光特性を測定するためによく用いられているファーフィールド配光測定では、測定対象を点光源とみなせる距離で、ある方向からの明るさをスポット測定

する。そのため、ファーフィールド配光特性には発光の不均一性の情報は含まれないが、光の広がりを客観的にとらえる上では有効な技術である。

一方、ニアフィールド配光測定では、光源の発光状態をイメージング測定し、発光の不均一性を捉えることができる。映像光学系のような、光源における発光の不均一性が最終性能に伝搬しやすい機器を扱うためには必要不可欠な技術である。

配光測定方法の違いは、照明シミュレーションで利用できる情報量に反映される。ファーフィールド配光測定では、測定した情報を配光特性として記録する。ファーフィールド配光データは、光の広がりの傾向を客観的に記述しており、光の出発点は共通で、その発光方向（極角及び方位角）と強度（光度）が記録され

ている。一方、ニアフィールド配光測定から直接得られる情報は、光源をさまざまな角度から捉えた輝度画像の集合に過ぎない。そのため、輝度画像群から光の広がりや予測し、有限の本数の光線をニアフィールド配光データとして直接記述する。生成された光線データには、光線の原点、発光方向、強度が光線ごとに記録されている。

本報告では、異なる配光測定方法を模擬して生成した配光データを用いた照明シミュレーションを行い、予測される照明性能にどのような差異が表れるのか調査した。特に、輝度むら等の発光状態の不均一性の解消を重要視する映像光学系では、光源の正確な再現が照明シミュレーションでは重要となる。本報告では、安全な運転を支援するための新しい情報提供装置として国内でも急速に普及が進んでいる HUD をシミュレーション対象とした。

2 方法

照明シミュレーションで使用した光源データは、ニアフィールド配光データとファーフィールド配光データの2種類とした。まず、ニアフィールド配光データは、ニアフィールド配光測定装置で光源を実測したデータに基づき、専用ソフトウェアを用いて生成した(2.1節及び2.2節)。測定装置の違いや光源の取り付けの再現性の影響を排除するため、本報告では、ファーフィールド配光データには、ニアフィールド配光データを光源として用いてファーフィールド配光測定を模擬した照明シミュレーションにより予測したファーフィールド配光特性を用いた(2.3節)。そして、生成した2種類の光源データを用いた光源モデルを後述するHUDの光学モデルに組み込んだ。作成したモデルを用いた照明シミュレーションにより、虚像の輝度分布を比較した(2.4節)。

2.1 光源モジュールのニアフィールド配光測定

測定対象は市販車の HUD の映像ユニットとした。映像ユニットから、開口部部品と LCD (Liquid Crystal Display) を取り外し、LED、拡散板、レンズから構成される光源モジュールを測定に用いた。光源モジュールに直流電圧 13.5V を印加して点灯させ、その発光状態を2次元の輝度画像として測定した。測定距離は 1,000mm とし、測定範囲は θ ϕ 座標系¹⁾における鉛直角 θ が 0.0deg ~ 85.0deg を 5.0deg 間隔、水平角 ϕ が 0.0deg ~ 360.0deg の範囲を 22.5deg 間隔とした。

測定にはニアフィールド配光測定装置(米国・Radiant Vision Systems 社 PM-NFMS®400+ProMetric I16-XBND 3)を使用した。なお、本測定では、輝度や測定視野によるクリッピングは行わず、測定視野内のすべての輝度データを記録した。

2.2 ニアフィールド配光データの生成

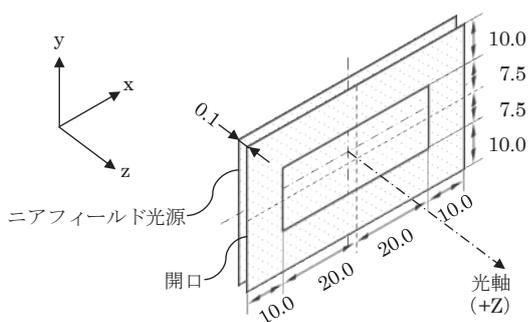
ニアフィールド配光測定で得られた輝度データ群を用いて、ニアフィールド配光データを生成した。意図しない光線を排除するため、全ての光線の原点が光軸(Z軸)を法線とする平面(XY平面、Z=0)上となるように本来の光線の原点をXY平面上に投影した。光線本数は 1,000,000,000 本とし、国際照明委員会(CIE)が定めた方法で色を数値化した CIE 三刺激値(X, Y, Z)のうち、輝度(Y)のみを対象とした。光線の生成には、ニアフィールド配光測定装置に付属する専用のソフトウェア(米国・Radiant Vision System 社 ProSource® Version.10.2.9)を使用した。

2.3 照明シミュレーションによるファーフィールド配光データの生成

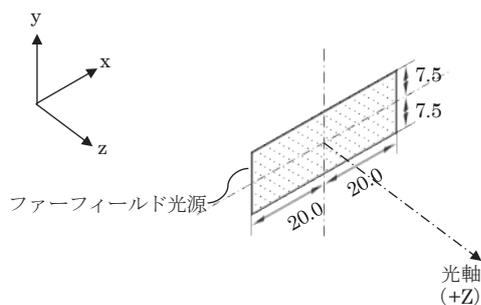
ファーフィールド配光データは、ニアフィールド配光データを光源データとし、ファーフィールド配光測定を模擬した照明シミュレーションにより予測したファーフィールド配光特性に基づき生成した。ニアフィールド光源モデルは、図1(ア)に示す通り、ニアフィールド配光データと、HUDの映像ユニットに取り付けられているものと同様の開口形状モデルで構成した。開口形状モデルは、横 60.0mm、縦 35mm の長方形の中心に横 40.0mm、縦 15.0mm の開口を設けた平面形状とし、その反射特性は裏面ともに黒色の吸収体(反射率と透過率ともに 0%)とした。また、ファーフィールド配光測定を模擬するモデルを設置し、 θ ϕ 座標系¹⁾における鉛直角 θ が 0.0deg ~ 180.0deg を 1.0deg 間隔、水平角 ϕ が 0.0deg ~ 360.0deg の範囲を 1.0deg 間隔での配光特性(光度)を2次元画像として取得した。照明シミュレーションには、視認性評価 CG システム(日本・Integra 社 Lumicept Version.10.73 x64)を使用した。照明シミュレーションの方法は順光線追跡(Ray Tracing)とし、その収束条件は、精度 0.5% 以下とした。なお、照明シミュレーションは未知の真値を予測することが目的であり、それ自身は真値に対する精度を評価できない。そこで、視認性評価 CG システムは、照明シミュレーションの収束を判定する指標としての精度を独自に定義している。具体的には、照明シ

ミュレーションに使用した光線に通し番号を付し、奇数番号と偶数番号に分けた光線グループでの照明シミュレーション結果の差異を評価している。

また、配光特性を取得した2次元画像を視認性評価CGシステムに付属の処理ソフトウェア（日本・Integra社 LumiVue Version.4.73 x64）を用いて、IES形式²⁾で記述されたファーフールド配光データに変換した。



(ア) ニアフィールド光源モデル



(イ) ファーフールド光源モデル

図1 照明シミュレーションで使用した光源モデル
図の単位はmm。開口の反射率は表裏ともに0%（完全吸収体）とした。

2.4 HUDの虚像の照明シミュレーション

(1) 照明シミュレーションモデルの構成

図2示す通り、照明シミュレーションモデルは、光学設計支援システム（米国・Zemax社 OpticStudio® Ver.19.8）を用いて設計した、虚像距離が2,200mm、虚像の拡大倍率が約3倍のHUD光学モデルと、2.1節～2.3節で生成した配光データを組み込んだ光源モデルで構成した。HUD光学モデルは、映像ユニット、平面鏡、凹面鏡、ウインドウシールドで構成されている。平面鏡及び凹面鏡の反射面は拡散反射のない鏡面反射（反射率100%）、裏面は黒色の吸収体（拡散反射率、鏡面反射率ともに0%）とした。ウインドウシールドに吸収特性はなく、反射特性および透過特性はフレネルの公式に従うものとし、屈折率は1.510とした。

照明シミュレーションモデル内のHUD光学モデルの映像ユニットは、後述の光源モデルに置き換えた。

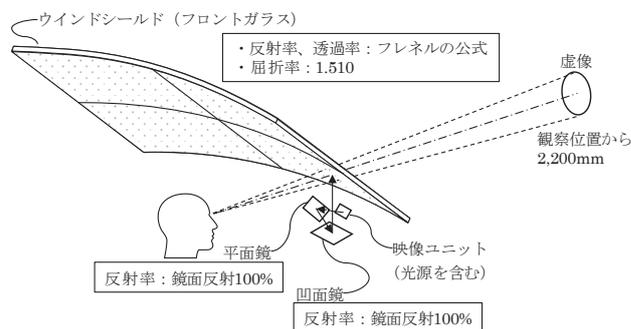


図2 HUDの照明シミュレーションモデル

(2) 光源モデルの構成

ニアフィールド光源モデルは、2.3節で作成した照明シミュレーションモデル（図1（ア））とした。

ファーフールド光源モデルは、発光部に面積のないファーフールド配光データを用いるため、光源を直視するような構成となるHUD光学モデルでは可視化できない。そこで、図1（イ）に示すような、ニアフィールド光源モデルに含まれる開口と同じ大きさの横40.0mm、縦15.0mmの自発光面で代替した。自発光面は、その面内が均一に発光するように構成されており、面内の任意の位置を原点とする配光特性はすべて一致する。自発光面の配光特性と全光束は2.4節で生成したファーフールド配光データに一致させた。

(3) 虚像の照明シミュレーション

光源モデルの異なる2種類の照明シミュレーションモデルに対し、HUD光学モデルが形成する虚像を照明シミュレーションの対象とした。

照明シミュレーションには視認性評価CGシステムを用いた。照明シミュレーションの方法は逆光線追跡(Path Tracing)とし、収束条件は精度0.1%とした。

照明シミュレーション結果は、輝度画像として取得した。HUDが形成する虚像は観察距離に依存するため、輝度画像を取得する仮想カメラ（イメージング輝度計）には、歪曲収差などの光学劣化のない理想的なレンズ（焦点距離35mm、F1.8）を与えた。仮想カメラのレンズの主点をHUD光学モデルが定めたアイボックスの中心に一致させ、観察方向はHUDモデルの光軸に一致させて配置した。仮想カメラで取得した輝度画像は、HUD光学モデルの光軸を中心とし、視野角で水平方向±2.5deg、垂直方向±2.5degの範

囲の輝度画像として取得した。輝度画像の画素数は水平方向 1,001px、垂直方向 1,001pxとした。これは、虚像距離 2,200mm では、水平方向は約± 96.0mm、垂直方向は約± 96.0mm の範囲に相当する。

3 結果

3.1 光源モジュールのニアフィールド配光測定結果

測定範囲とした鉛直角 θ と水平角 ϕ の組み合わせについて合計 72 枚の輝度画像を測定した。図3にその一部の輝度画像を示す。また、表1にそれぞれの輝度画像における発光部の輝度の解析結果を示す。光源モジュールの光軸に一致する方向（図3の $\theta = 0.0\text{deg}$ 、 $\phi = 0.0\text{deg}$ ）では輝度が高い（平均輝度:29,640.4 cd/m^2 ）が、輝度分布が不均一（標準偏差: 6351 cd/m^2 ）である傾向が見られた。一方、光源モジュールの光軸から鉛直角 θ が 15.0deg 離れた方向（図3の $\theta = 15.0\text{deg}$ 、 $\phi = 0.0\text{deg} \sim 315.0\text{deg}$ ）では、光軸方向と比較して輝度が低い（平均輝度で1/4程度）が、輝度の不均一

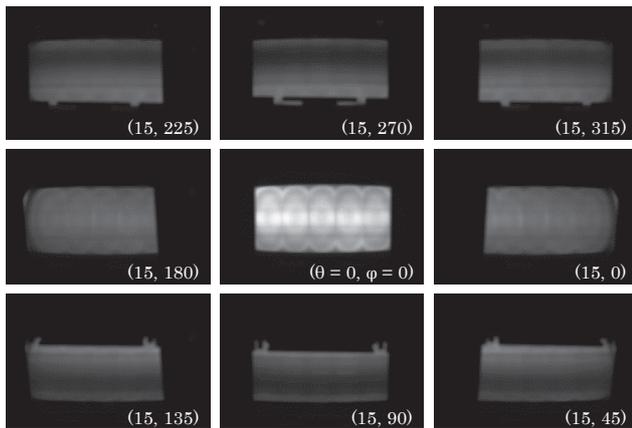


図3 ニアフィールド配光測定結果（抜粋）

測定された輝度の疑似カラー表示。図中の数値は測定角を θ ϕ 座標系¹⁾で表している。

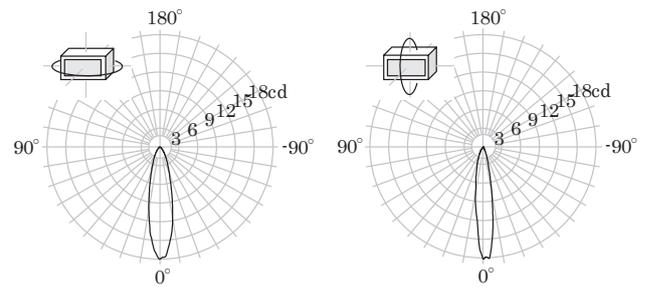
表1 HUD用光源モジュールの輝度解析結果

測定角 (deg)		統計量 (cd/m^2)			
鉛直角 θ	水平角 ϕ	最小	最大	平均	標準偏差
0.0	0.0	11285.7	44362.8	29640.4	6351.2
15.0	0.0	292.7	17351.2	9889.7	3345.1
15.0	45.0	2159.1	18553.2	7085.1	3587.6
15.0	90.0	1835.1	14024.7	5384.5	2810.7
15.0	135.0	1788.5	17283.3	6899.5	3471.2
15.0	180.0	629.9	14678.9	9803.3	2177.9
15.0	225.0	1892.6	13910.0	7246.8	3122.7
15.0	270.0	1282.4	14493.4	6821.2	3846.8
15.0	315.0	1391.3	14538.7	7531.4	3342.1

性は小さくなる（標準偏差が1/2程度）傾向がみられた。このことは、光源モジュールは指向性を持たせた設計であることを示している。なお、測定データに基づき計算された全光束は 6.58lm となった。

3.2 照明シミュレーションによるファーフィールド配光データの生成

予測したファーフィールド配光特性のうち、光源の水平方向（水平角 $\phi = 0\text{deg}$ 及び 180deg の断面）と垂直方向（水平角 $\phi = 90\text{deg}$ 及び 270deg の断面）での配光特性をそれぞれ図4（ア）及び図4（イ）に示す。図4に示す通り、光源の水平方向と垂直方向では、光の広がり方（開き）が異なっていることが分かった。この傾向は、3.1節で示した輝度分布の解析結果を客観的にとらえていることがわかる。なお、この照明シミュレーションで予測された全光束は 3.54lm となった。3.1節で述べ通り、実測の全光束（6.58lm）と比較すると、HUDの虚像の生成に寄与する光束（光源モジュールの効率）は50%程度であることが分かった。



(ア) 0deg-180deg の断面 (イ) 90deg-270deg の断面

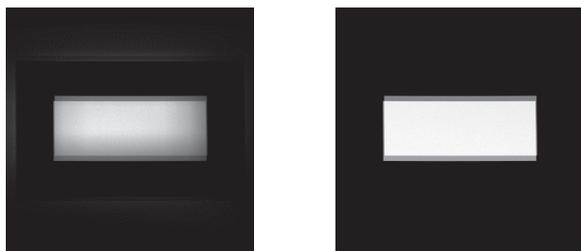
図4 ファーフィールド配光特性

±10degの範囲に光が集中しており、指向性が強いことがわかる。また、長方形の発光面に対し、長軸方向（図（ア））に比べて、単軸方向（図（イ））では、光の広がり方がやや狭いことがわかる。

3.3 虚像の照明シミュレーション結果

図5（ア）にニアフィールド光源モデルを用いた照明シミュレーションモデルに対する照明シミュレーション結果、図5（イ）にファーフィールド光源モデルを用いた照明シミュレーションに結果を示す。いずれの光源モデルを使用した照明シミュレーションモデルにおいても、その光源モデルが形成する矩形状の虚像及びウインドウシールドによる多重反射の様子を再現した。

図5の輝度画像では、所望の虚像である表面反射の輝度分布のみを解析することが困難なため、表面反射

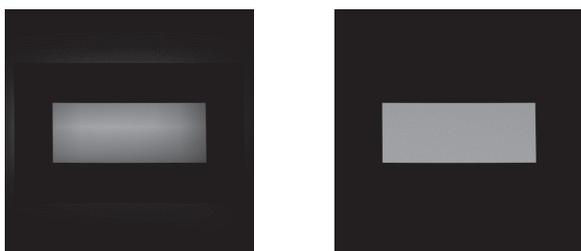


(ア) ニアフィールド光源モデル使用 (イ) ファーフィールド光源モデル使用

図5 照明シミュレーション結果（多重反射あり）
ウインドウシールドでの表面と裏面での多重反射による虚像の重なりを再現した。

の光線のみを独立に輝度画像として取得する照明シミュレーションを新たに行った。図6（ア）及び図6（イ）に表面反射で形成された虚像の輝度画像を示す。いずれの結果も見目の輝度は低くなったが、虚像が形成する輝度エッジが形成する境界は1つとなった。

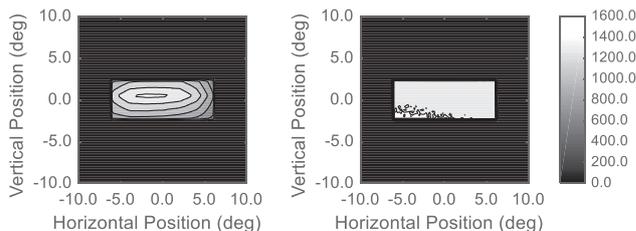
表面反射で形成された虚像（図6（ア）及び図6（イ））の輝度分布解析結果を図7および表2に示す。



(ア) ニアフィールド光源モデル使用 (イ) ファーフィールド光源モデル使用

図6 照明シミュレーション結果（表面反射のみ）
照明シミュレーション結果では約60%の光線がウインドウシールドを透過した。画像の輝度スケールは一致させている。

図7は、輝度分布を等輝度線図として示したもので、使用した光源モデルによって分布が大きく異なっていることがわかる。ニアフィールド光源モデルを使用した場合（図7（ア））、虚像の輝度分布が不均一になるのに対し、ファーフィールド光源を使用した場合は輝度の不均一性がほとんど見られなかった（図7（イ））。また、虚像の輝度分布の解析結果（表2）から、虚像の最大輝度はほぼ同程度であったが、ニアフィールド光源モデルが形成した虚像に対して、ファーフィールド光源モデルが形成した虚像の不均一性（標準偏差）は1/2程度となることがわかった。



(ア) ニアフィールド光源を使用 (イ) ファーフィールド光源を使用

図7 ウインドウシールドを表面反射した光線により形成された虚像の輝度分布

予測された輝度分布を等輝度線図として示している。ニアフィールド光源を使うことで光源由来の輝度ムラが再現された。

表2 虚像の輝度の解析結果

光源の種類	統計量 (cd/m ²)			
	最小	最大	平均	標準偏差
ニアフィールド光源	0.347	1,596.612	987.609	255.783
ファーフィールド光源	0.874	1,684.803	1,363.723	112.281

4 考察

光源データ（配光測定方式）の違いが傾向の異なる照明シミュレーション結果をもたらしたことは、それぞれの光源が持つ情報量の違い、具体的には、配光データに光源の大きさの情報が含まれているか否かということに由来すると考えられる。また、本報告では、本来は点光源であるファーフィールド配光データを並置した自発光面をファーフィールド光源モデルとしている。このことは、虚像の観察位置（方向）に依存する輝度の変化は再現できるが、虚像の局所的な輝度むらを正確に再現することは困難である。しかしながら、前述の通り、ファーフィールド配光データは、物理的には有限の面積を持つ光源を点光源として表現していることから、それ自身に面積を持たないため、可視化することができない。代替の手段として、たとえば、HUD光源の開口の中央に微小面積の自発光面を設置したとしても、光源の中央部から偏心した位置を原点とする光は再現できないため、自発光面の使用は適切な方法と考える。

しかしながら、ニアフィールド配光データの利用にはデータ容量や光線本数などのデメリットがある。今回使用したニアフィールド配光データの容量は約70GBであった。このデータは光線1本につき、光線の原点と光線ベクトル、輝度情報の7次元で構成されているが、色情報を再現するためにはさらに2次元の情報が必要

になり、輝度のみの輝度データと比較して約 1.4 倍のデータ容量となる。ニアフィールド配光データは光線の情報を1本ずつ直接記述する。したがって、発光面の見かけの光線密度はニアフィールド配光データに含まれる光線本数に依存する。HUD の虚像を例に取れば、面積 S の光源を n 倍に拡大すると、虚像上の光線密度は S/n^2 となり、拡大率の2乗に反比例する。言い換えれば、空間解像度の高い輝度画像を照明シミュレーションで予測するためには適切な光線本数を決める必要があるが、参考となる指針等がない。また、ファーフィールド配光データはその特性が関数として記述されるため、無限通りの光線を生成できるのに対し、 N 本の光線が記述されたニアフィールド配光データからは N 通りの光線しか生成できない。そのため、ニアフィールド配光データは事前に光線本数を十分多く用意するか、複数のデータセットを用いて、複数回の照明シミュレーションを行い、それらの結果を比較することが望ましいと考えられる。また、生成される光線は測定データに基づく予測であることから、その予測方法にも課題があるとの指摘もある³⁾。

5 まとめ

本報告では、HUD が形成する虚像を対象に、光源の配光データの測定方式の違いが、HUD が形成する虚像の輝度分布に与える影響を調査した。まず、HUD 用光源モジュールの実測データに基づき、ニアフィールド配光データとファーフィールド配光データをシミュレー

ションにより生成した。そして、各配光データを用いた照明シミュレーションで HUD の虚像の輝度分布を予測した結果、予測された虚像が取りうる輝度範囲は光源データの測定方法によらない傾向がみられたが、虚像内の輝度の不均一性が大きく異なることが分かった。

ファーフィールド配光データとニアフィールド配光データの使い分けは、上述の通り、メリットとデメリットを踏まえたうえで使い分ける必要がある。例えば、指向性のある光源や発光輝度の不均一性のある光源を用いて、意図した、あるいは、意図しない局所的な明るさや色の変化を考慮すべき照明シミュレーションにおいては、ニアフィールド配光データの利用は必要不可欠であると考えられる。

今後は、照明シミュレーションで利用する配光データを得るための配光測定方式の使い分けや、照明シミュレーションにおける光線本数が照明シミュレーション結果に与える影響などの検討を進める。

参考文献

- 1) JIS C 8105-5:2014 照明器具—第5部：配光測定方法.
- 2) ANSI/IES LM-63-19 Approved Method: IES Standard File Format for the Electronic Transfer of Photometric Data and Related Information.
- 3) 薮洋司：固体照明の測光・放射測定における課題. 光学, 42 (3), 114-120 (2013).