

LEDと3Dプリント技術を活用した、持続可能なSSLパラダイム—パート1

ドナルド・パイファー

2部構成シリーズの前編である本稿では、業務用照明器具において直管蛍光灯技術の複製を続ける状態から、照明の製造とサプライチェーンを刷新する3Dプリント製品への置き換えを行う状態に、どうすれば業界を移行できるかについて解説する。

デバイス効率が向上したことで、蛍光灯、白熱灯、メタルハライドランプの各照明技術をLEDに置き換えることが可能になったが、メーカー各社は、従来の光源に基づく照明器具を設計し続けている。この2部構成シリーズでは、業務用照明分野（オフィス、教育、ヘルスケア）において最も多く見られる照明器具である、半間接形のリニア型照明器具に絞って議論を進める。この形の照明器具は、1つ前のパラダイムにおいて、直管蛍光灯ランプが収容されていたものである。

直管蛍光灯に基づくLED半間接照明器具の設計に加えて、確立された多くのメーカーが、従来の製造モデルとサプライチェーンモデルに固執しており、それによって、より循環型のデザインを誘発する可能性のある形状が制限されている。積層造形（または3Dプリント）は、使用材料を低減し、分解できるデザイン（Design for Disassembly：DfD）を推進し、業務用照明では現在実現されていない方法でのリサイクルを可能にする、新しい形状体系を促進することができる。

L-Prize Concept Phaseを受賞した「Sparkle」の設計は、思考実験として行われたものだった。従来の製造方法では現在実現されていない、積層造形の多くの形状メリットを取り入れつつ、業務用照明分野のシステム上の問題を解消する製品を開発することが、その目的だった。

以前の技術の代わりに固体照明（SSL）技術の強みを生かした設計を行うことで、間隔基準とアプリケーション効率における飛躍的な進歩を達成し、照明出力密度を低下させることが

できる。それによって照明器具の数を減らすことが可能となり、それは、使用材料と廃棄材料の減少につながる。

この2部構成シリーズのパート1では、一般的なりニア型の照明器具における蛍光灯とLED照明の性能の違いをおさらいし、熱設計と光学設計における性能改善を目指して、LED照明器具の機能性を追求するために開始された、Sparkleのコンセプトについて解説する。パート2では、従来の照明製造および配光モデルを覆す可能性を秘めた、この照明器具コンセプトに寄与する、コンポーネントのモジュール性、カスタマイズの柔軟性、分解できるデザインという3つの項目の交差点について解説する。

照明製品設計に覆い被さる 蛍光灯パラダイムの影響

半間接形の直管蛍光灯照明器具という過去のパラダイムでは、ランプと「照明器具」が厳格に分類されていた。ランプは、蘭フィリップス社 (Philips)、米GE社、米オスラム・シルバニア社 (Osram Sylvania) によって市場が占有されるコモディティ製品で、限られた数のSKUが流通を通して市場に提供されていた。照明器具(照明器具の筐体)には、無数のSKUとグレード(用途、構造、仕様)があった。照明器具は、地域の代理店ネットワークを通じて主に販売される、ハイコモディティ製品である傾向にあった。ランプと照明器具という2つのコンポーネントは、設置場所で初めて統合されていた。

何十年もの間、直管蛍光灯ランプを収容する業務用蛍光灯照明器具は、直接配光のみを提供していた。直管蛍光灯ランプは、垂直軸の全方向に光を放射する(図1上)。直接配光のみの照明器具の上にリフレクタを使用すること

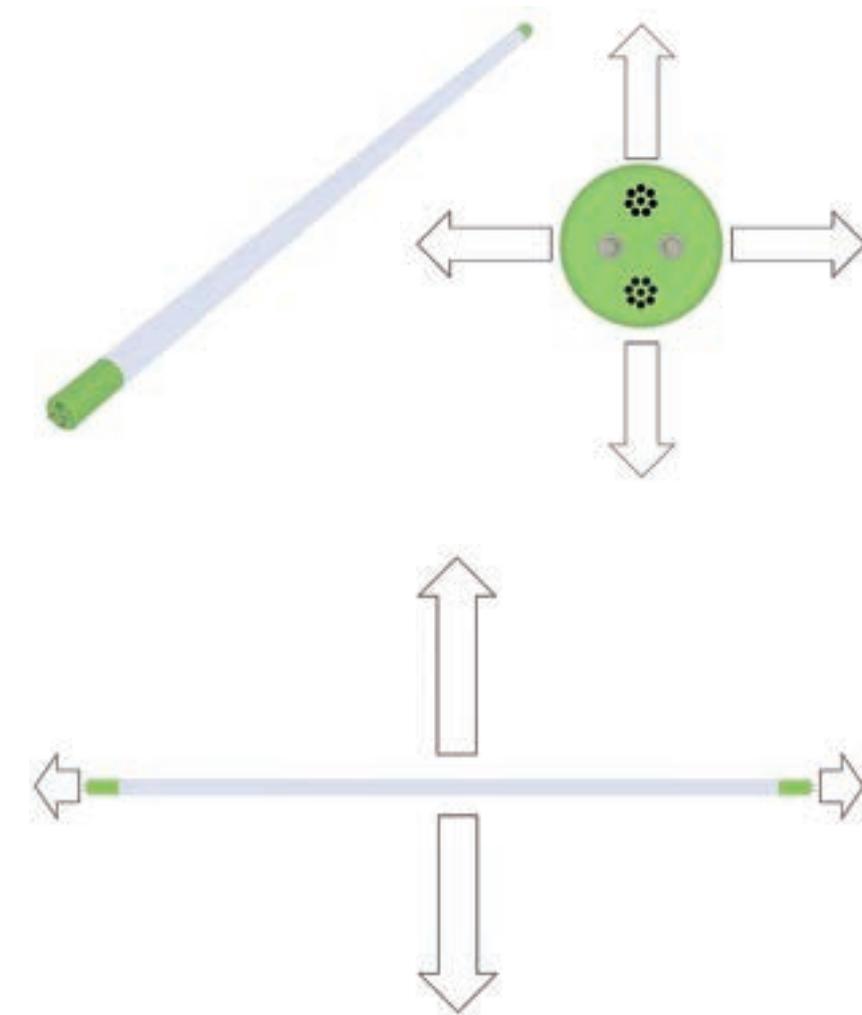


図1 直管蛍光灯の立体図と、全方向性の配光を示す断面図(上)。直管蛍光灯の非対称な水平光強度分布(下)。本稿の図はすべて、Smash the Bulbのドン・パイパー氏提供

により、間接光を作業面に向けて下方に再配光することが行われていたが、それは多くの場合で、不快なグレア(まぶしさ)を引き起こしていた。そこで、照明器具の設計者は、直視を妨げるためのルーバーを取り付けたが、それは光損失を引き起こし、照明器具の効率は50%しかない場合もあった¹。半間接形のりニア型照明器具の登場によって、この問題が解消された。照明器具の上部を実質的に取り除くことで、通常はリフレクタに向けられる上方の配光が可能となり、遮断されることなく照明器具の光を逃すことがで

きるようになった。業務用分野では一般的に反射率が高いため(天井で80%、壁で50%、床で20%)、この間接光は反射して作業面に到達し、直接光を補完する。

これは、効率的で効果的な方法であることが明らかになった。発光効率が100ルーメン/W (LPW)の直管蛍光灯ランプを使用する、平均的な半間接形のりニア型照明器具で、70LPWほどのシステム発光効率が得られる²。一般的な吊り下げ高さは1.5~2フィート(約45~60cm)であるため、これらの照明器具は作業面により近くな

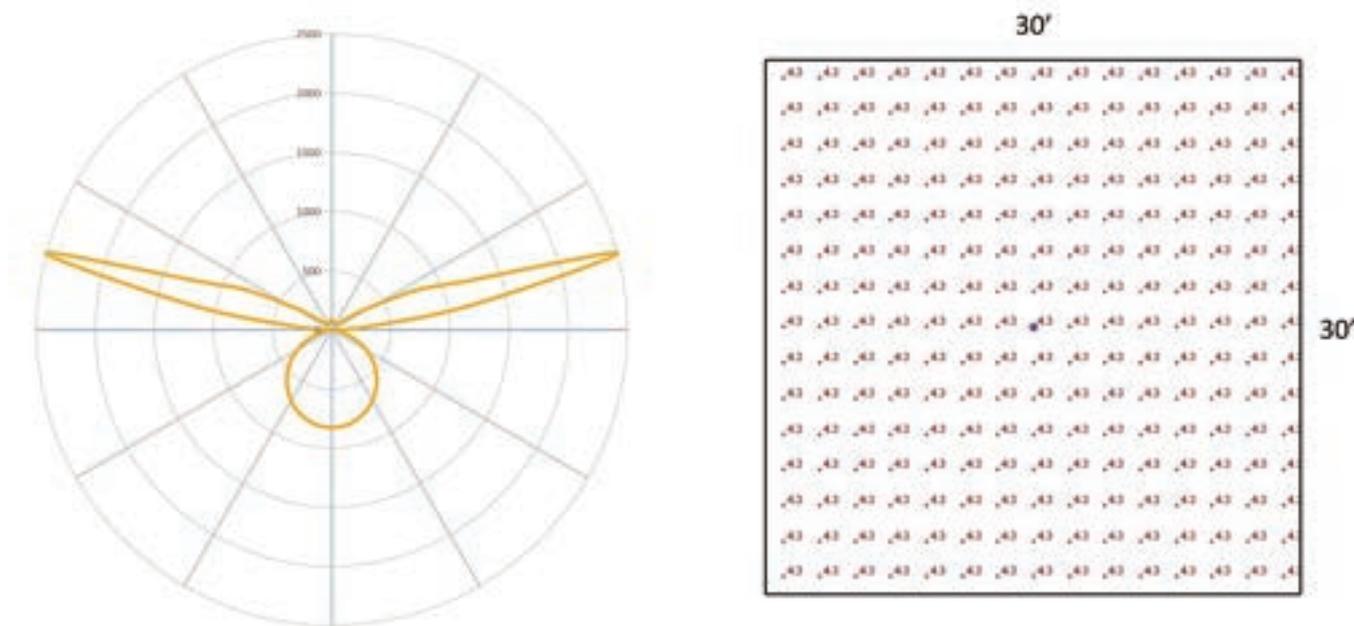


図2 理想的な「ウサギ耳型」の配光と、それに対応する間接光のみの天井照度

り、視覚的な不快感を生成しにくくなった。LED技術が業務用分野に初めて導入された後に、長年にわたって普及を阻まれたのは、この標準仕様が、手強い壁となってその前に立ちはだかったためである。そのような経緯があって、半間接形の直管蛍光灯が、今日の最も一般的なLED照明器具の雛形となった。

LEDによる状況の一変

固体照明器具が業務用照明分野に導入されたことで、サプライチェーンは一変した。ランプと照明器具を設置場所で初めて統合することは、もうできなくなった。LEDは、製品の発案において不可欠な要素となった。既存の蛍光灯安定器との電氣的構成が複雑であるために市場における利用が限られているTLEDを除き、LEDは照明器具に組み込まれるようになった。LEDは、最初の機械設計だけでなく、照明器具の光学／電気／熱設計においても中心的な要素となった。

市場で既に受け入れられていることを理由に、メーカーが過去の技術に似せて新しい照明技術を設計するのは珍しいことではない。しかし、業務用照明において、LEDには直管蛍光灯の適切な代替になることを阻む特性がある。

まず、LEDは垂直軸の全方向に光を放射しない。その放射パターンは170～180°に限られている。半間接照明器具の中の直管蛍光灯の放射パターンに一致させるには、それぞれ上向きと下向きに光を放つ、2セットのLEDが必要である。LEDは、部品表(Bill Of Materials : BOM)の中で最も高額な部品である場合が多いため、コストが増加する。また、LEDは動的なデバイスであるため、LEDの数が2倍になると、複数のLED列の間の電気負荷のバランスを取る負担が増す。LED列の間に電流をミラーリングするため受動部品が必要になり、さらにコストが増加する。

次に、水平方向の光放射を検討する必要がある。直管蛍光灯技術の重要な

制約の1つは、エンドキャップによって発光が遮られることに起因する、左右相称性である(図1下)。

この非対称の放射パターンは、対象の照明器具とアプリケーションの両方に現れる。均一な照明を実現するために、不規則な間隔で照明を配置することが標準になった。吊り下げ型の直管蛍光灯[長さ4フィート(約1.2m)]は、4×8フィート(約1.2×2.4m)ⁱⁱⁱの間隔で、端から端までくまなく設置されるようになった。

LEDは水平軸において対称であるため、直管蛍光灯技術のこの現象は生じない。それにもかかわらず、今日のLED半間接照明器具はいまだに、4×8フィートの間隔で端から端まで設置されている。それによって、商業ビルの電力密度(W/ft²)を低下させる機会が失われている。商業ビルでは、照明が消費電力量の17%を占める^{iv}。他の分野では、デバイス効率の急速な向上が電力密度の低下に転換されているのに対し、業務用照明ではこのメリット

の活用が遅れている状態にある。

設計方法論

この技術を改良する方法の説明に入る前に、このアプリケーションの概観として、最先端の半間接形リニア型LEDと蛍光灯技術の比較結果を示す。

LEDと蛍光灯の両方のリニア製品の光強度分布(配光)の特性評価結果を示す、独立系試験機関の試験結果に基づくIESファイルが存在する。照明インベションのインキュベーターであるSmash the Bulbにおいて筆者らは、これらのIESファイルをVisual Lighting Software^vで使用するにより、このアプリケーションの照明をモデル化した。競合する複数のLED半間接照明器具の調査を行い、天井と作業面における均一性と電力密度で最も性能が高いものを選択した。その企業のLED半間接照明器具^{vi}と、その企業が最良の使用事例を示すために販促資料の中で使用したアプリケーション条件[60×60×9フィート(約18×18×2.7m)]を採用した。室内の反射率は(80/50/30)に設定した。照度は、作業面と天井の両方で2×2フィート(約60×60cm)の格子間隔で測定するように設定した。各照明器具の光損失係数は0.9、安定器/ドライバ係数は1に設定した。公正な比較を行うために、直管蛍光灯についても、独立系試験機関のLM-79の試験手順に則った試験結果に基づく性能^{vii}を参考にした。その結果は表1のとおりである。

表のデータは、電力密度はこの10年間で低下したが、間隔などのその他の性能指標は、蛍光灯パラダイムの時代よりも悪くなっていることを示している。蛍光灯の間隔が4×18フィート(約1.2×5.5m)だったのに対し、最高級製品の販促資料から引用したこの特

定の事例における照明器具の間隔は、4×15フィート(約1.2×4.6m)で、それによって照明器具の数は25%増えている。また、このアプリケーションにおいて天井における均一性は、この10年間で大きくは向上していないように思われる。

この調査結果に基づき、われわれは、天井における均一性をほぼ完璧にするという目標を掲げてviii、業務用分野におけるLED技術の強みを生かした設計に乗り出した。最初のステップは、理想的な配光を見つけて、簡単に入手できる既存のコンポーネントでそれを達成できるかどうかを確認することだった。

複数のIESファイルを作成してデジタル光計算ソフトウェアに入力するという、試行錯誤を重ねた末に、理想的な「ウサギ耳型の配光」にたどり着いた。平均的な反射率(80/50/30)の教室サイズの空間[30×30×9フィート(9×9×2.7m)]を使用した。1個

の照明器具を天井から1.5フィート(約46cm)下の高さに吊り下げて、天井面の照度を2×2フィートの格子間隔で測定した。これによって、1:1の完璧な均一性を示す配光結果が得られた(図2)。照明の直接光には、最先端のダウンライト照明器具に基づいて、ランバーシアン分布を割り当てた。間接配光のニュアンスを、市販の光学系で達成するのは難しかったが、この配光の中核部分を近似することができた。メインビーム形状については、7°×50°のビーム形状を持つ楕円形の直交光学系で、半値全幅(Full Width Half Maximum:FWHM)を近似することができた。ピークカンデラを近似するために、この光学系のカンデラ/ルーメン値ixを、十分に小さくて(2×2mm未満)良好な光束結合が可能であるとともに、300ルーメンを生成できるLEDと一致させた。これによって、2400ピークカンデラという理想に近い



図3 個別の市販の光学系を含むヒートシンク/アップライトモジュールの立体図

表1 最高水準のリニア型LEDと直管蛍光灯の性能

製品	作業面 (fc)				天井 (fc)				器具の数	W/ft ²
	Ave E	Max E	Min E	Ave: Min	Ave E	Max E	Min E	Ave: Min		
蛍光灯	77	164	23	3.4	64	246	15	4.4	39	1.2
LED	40	62	19	2.1	36	88	9	4.0	52	0.4

表2 理想的な配光と、最高水準のリニア型LEDと直管蛍光灯との比較

製品	作業面 (fc)				天井 (fc)				器具の数	W/ft ²
	Ave E	Max E	Min E	Ave: Min	Ave E	Max E	Min E	Ave: Min		
蛍光灯	77	164	23	3.4	64	246	15	4.4	39	1.2
LED	40	62	19	2.1	36	88	9	4.0	52	0.4
Sparkle	24	58	11	2.2	17	23	6	2.7	16	0.16

値が得られた。

そうして得たIESファイルを、先ほどの表1で説明した空間レイアウトに落とし込み、その結果は表2のとおりである。空間サイズを考慮して、20fcの最小照度基準を満たすために、Sparkleのプロトタイプ照明器具を15×15フィートの間隔で配置した。この照明器具は、他のリニア型照明器具と同じように、天井から1.5フィート下の高さに吊り下げられている。

この理想的な配光によって、天井における均一性は顕著に高くなった。最も重要な点は、使用した照明器具の数である。必要な照明器具の数は16個と69%も減少し、プロジェクトの器具コストと設置コストが削減された。また、このシナリオでは、照明器具とパッケージングの材料も大幅に削減される。最後に、電力密度(W/ft²)は60%低下した。技術の強みを生かした設計によって、アプリケーション効率、性

能、光品質を大きく改善することに成功している。

個々の光学系の配置は、水平方向の対称性と天井における均一性を達成するために重要である。各LED / 光学系を理想的なピークキャンドル角度(104°)に傾けて、8個の光学系を、各ビームを少し(50°)重ねた状態で円形に配置すると、このアプリケーションにおいて360°のカバレッジが得られる。この方法は、左右相称性が生じ、天井の均一性が低く、照明器具を端から端まで設置しなければならないという問題を解消して、より広い対称的な間隔での設置を可能にする。「ユビキタスコンピューティング」という用語を定義する際に、コンピュータサイエンティストのマーク・ワイザー氏(Mark Weiser)は、最も奥深い技術は消えて見えなくなると述べた^{*}。照明器具メーカーに対する設計者の長年にわたる包括的な要望は、溶け込み、注意を必

要とせず、実質的に消えて見えなくなる製品を開発することだった。数の減少は、この目標を達成するための最高の手段である。

機械特性と熱コンポーネントの問題を積層造形で解決

ここで提案するSparkleの間接エンジン、LED、光学アセンブリには、ヒートシンクが必要である。これらのアップライト光学系を収容するために、積層造形で実現できる、一体成形型のヒートシンクと筐体を検討した。

循環型デザインの思想に基づき、材料の均一性は、この思考実験において非常に重要な要件である。従来の製造方法では、独立したヒートシンクが金型鑄造によって製造される。従って製品設計者は、ヒートシンクと製品のその他の部分の外観の違いを整える必要がある。ヒートシンクを製品のその他の要素に機械的に接合する必要もある。そのためには必ず、ネジ穴を開けて取り付けを可能にするための第2の処理が、ヒートシンクと照明器具本体の両方に必要になる。

処理と分解の容易さを考えると、これは最適なソリューションではない。Sparkleは、製造セルにおける組み立てと現場における分解が簡単に行える、完全にツールレスのデザインにしたいとわれわれは考えていた。最終的には、照明器具の他の部分と同じ材料を使用して、筐体とヒートシンクを単一のモノリシックなコンポーネントとして作成することができた。

米レンセラー工科大(Rensselaer Polytechnic University:RPI)の照明研究センター(Lighting Research Center:LRC)の協力を得て、3Dプリントのヒートシンクの初期デザインを提案し、熱蓄積を緩和するその能力を試験

した。その後、直接照明要素と新しい取り付け機構に対応するための変更を加えた。図3は、最終的なアップライトホルダー／ヒートシンクコンポーネントで、LEDスターボードと個別の市販の光学系がアレイ状に並んでいる。

積層造形では、従来の製造プロセスではコスト効率が低いか簡単には実現できない、ハイリスクの設計方法を試すことができる。例えば、アップライトの光学系アレイは、ごくわずかな公差(0.1mm未満)のフリクションフィット(摩擦適合)で保持されている。この形状を3Dプリントで試作することにより、設計者は、さまざまな穴寸法にブラケットを取り付けて最適フィットを見つけることができ、後の量産積層造形に向けて材料の振る舞いと流れを正確に予測することができた。

Sparkleのルーバー

ルーバーは、不快なグレアを緩和するために業務用照明器具に一般的に用いられている。Sparkleルーバーの最初のコンセプトは、最先端のルーバー付き照明器具の光損失と低い照明器具効率に対する不満から生まれたものだった。従来の蛍光灯照明器具には、板金のルーバーが採用されており、壁厚が薄く(厚さ1mm未満)、いくらかの鏡面性を備える可能性があった。照明器具に戻る散乱光の量は最小限に抑えられた。しかし、LED照明では、プラスチック製のルーバーを採用するのが現在のトレンドである。従来の製造方法と使用される金型により、厚さは蛍光灯のルーバーよりもはるかに厚い。3mmの壁厚も珍しくはないため、照明器具効率が低下する。

Sparkleルーバーの最初の要件は、壁を薄くすることで、積層造形によって壁厚を1mm未満にすることができ

た。また、より多くの光を逃がせるように、ルーバーの羽の穴を増やした。ヒートシンク／アップライトのコンポーネントと同様に、このコンポーネントは積層造形でしか実現できない。金型でそのすべての形状を作成するのは不可能で、パーツを傷つけることなく第2の処理を行うのも不可能である。

試作を行ったことで、いくつかの予期せぬ効果にも気づかされた。1つは、ルーバーの薄い壁によって光源の直視がやや妨げられることである。しかし、薄いプラスチックであるために、光を少しは透過する。ルーバーフィンそのものからのほのかな光は、視覚的に美しく、その背後からの照明に対しても効果的である。

ルーバーを下から見ると、小さな個々の光源が見えることにも気づいた。これには、森の中で鬱蒼とした樹冠を見上げているときに見える薄明かりと同じようなバイオフィリア効果があった。各種アプリケーションにおけるスパークル効果の使用に関する過去の研究が思い浮かんだ^{xi}。スパークル(きらめき)は、単に明るい状態とまぶしい状態の間の狭い帯域として定義さ

れ、業務用照明分野における明るさの知覚を高め、照度レベルとエネルギー使用量の削減を可能にする。Sparkleのルーバーデザインは、それと同じ効果を生成する可能性がある。追加の利点として、LEDへのアクセスや使用期間終了後の分解のために、簡単に取り外すことが可能である。

パート1のまとめ

Sparkleは、従来の照明器具製造方法に勝る積層造形独自の利点を示すための思考実験として開発された。業務用照明分野における性能を大きく改善すること、具体的には、以前の照明パラダイムの代わりにSSLの強みを生かした設計を行うことが、重要な要件だった。積層造形は、部品数を減らし、締め具や接着剤を不要にすることを可能にして、この取り組みを円滑に進める上で役立った。仕上げ処理などの現場以外での補助的な修正作業の必要性も低減した。前述のとおり、Sparkleの形状の多くが、従来の製造方法では法外なコストがかかるだけでなく、量産も不可能である。従ってわれわれは、このデザインを成功と捉えている。

参考文献と脚注

(1) K.S. Hickcox and A. Smith, "Strategies for achieving circular economy goals in the lighting industry through design for disassembly-based methodologies," Light-Symp-2022, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Sci., 1099, 012004 (2022).

(2) Y. Akashi, "Effect of sparkling luminous elements on the overall brightness impression," Lighting Research and Technol., 32(1), 19-26 (2000).

ⁱ DOE Caliper Benchmark Report: Performance of T8 and T12 Fluorescent Lamps

ⁱⁱ After 20% fixture losses and 10% power supply losses

ⁱⁱⁱ Sometimes 4 × 9 feet

^{iv} CBECS 2012: Trends in Lighting in Commercial Buildings

^v Acuity Brands Visual Lighting Software

^{vi} Fluxwerx Aperture

^{vii} ITL62319, Independent Testing Laboratories, Inc.

^{viii} This would address systemic application issues such as cave effect and hot spots with dark surrounds

^{ix} 8 candela/lumen

^x M. Weiser, "Ubiquitous Computing"

^{xi} Y. Akashi, "Effect of sparkling luminous elements on the overall brightness impression," Lighting Research and Technol., 32(1), 19-26 (2000).