

特集『SIL Europe 2011』

Part2: 設計面から見たLED照明の課題

ローラ・ピーターズ

『Strategies in Light Europe 2011』の技術トラックでは、LED技術を最大限に活用するための適切な材料、光学部品、ドライバなど、照明器具を構成するための技術要素に関して数多くの発表が行われた。

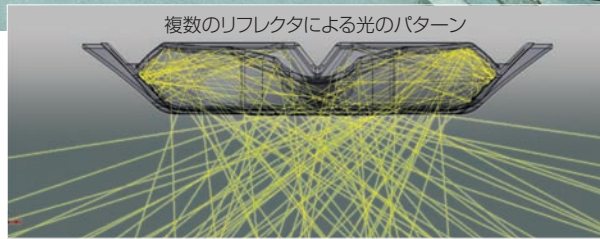
『Strategies in Light Europe 2011 (以下、SIL Europe 2011)』で行われた市場の変化のトラックについては、p.8のPart 1で報告した。Part 2では、もう1つのトラックである技術トラックについてレポートする。技術トラックでは、2日間にわたり、SSL (Solid State Lighting: 固体照明) 製品に利用される技術の進歩についてのディスカッションが行われた。発表された事柄に込められた主要なメッセージは、次のようなものだった。それは、LED照明は、街灯、埋め込み型のダウンライト、旧式電球からの置き換え用電球といった種類を問わず、最適化されたドライバと光学部品、熱設計を組み合わせた設計により、LED技術が提供するすべての利点を最大限に活用しなければならないレベルにまで成熟したということである。

光学設計の最前線

ドイツのエネベタルを拠点とするアラノッド・アルミニウム・フェレドリング社 (ALANOD Aluminium-Veredlung) でコンサルタントを務めるハンス・ラシェフスキ氏 (Hans Laschefski) は、パッケージ化された高出力LEDアレイによるグレア (光沢) を制御するための手段として、複数のリフレクタ (反射体) を使用するというトレンドについて論じた。業界において、さらに小型で高密度のアレイが採用されるにつれてグ



図1 「DEFLECTO」では、複数の反射 (複数のリフレクタ) を利用して、ポイント光源のグレアを抑制する。図の下部に示したのは、照明器具からの配光パターンである (提供: アリアナ社)。



レアは増大している。その結果、許容可能なユーザーエクスペリエンスを提供するためにグレアを制御する必要があるが生じている。「グレアの評価において、平均輝度が取り上げられることがよくある。しかし、LEDはスポット型の光源なので、スポット輝度を評価すべきだ。残念ながら、スポット輝度の評価に必要な装置は一般的には提供されておら

ず、評価の実施が困難な状況にある」と同氏は述べた。

ラシェフスキ氏は、いくつかの高度なリフレクタの設計を紹介した。いずれも、パッケージ化されたLED上に直接レンズを使用するのではなく、角度が調整されたミラーやリフレクタにLEDが向けられているというものである。これにより、配光が改善され、より優

れた混色性が得られることでグレアを抑制できる。アラノッド社のリフレクタである「MIRO」と「MIRO-SILVER」では、95～98%の反射率が実現されている。このように、アルミニウムをベースとする合金によって非常に高い反射性を実現することには、1つのメリットがある。それは、複数の反射(複数のリフレクタ)によって、照明を直視する人間に、それがポイント光源に見えないようにすることができるということだ。例えば、イタリアのパドヴァを拠点とするアリアナ社(Arianna)が設置した「DEFLECTO」という街灯では、複数の反射によって光が十分に拡散されている(図1)。「このような設計であれば、光源がLEDであることに気づくことはない」とラシェフスキ氏は述べた。

ラシェフスキ氏によると、「LEDを光学部品から分離すれば、レンズの老朽化の問題も制御できる」という。「LEDが、気密性の高い環境で光学部品と近接している場合、LEDのアセンブリ内で使用される揮発性有機化合物(VOC: Volatile Organic Compound)がシリコン膜を透過する可能性がある」と同氏は説明する。VOCは露光によって酸化し、シリコンを変色させる。一方、LEDのエミッタが気密な状態で封入されていない場合、VOCは拡散し、光の透過に影響を与えずに済む可能性がある。

オランダのフィリップス・プロフェッショナル・ライティング・ソリューションズ社(Philips Professional Lighting Solutions)で光学設計者を務めるジョルジア・トルディーニ氏(Giorgia Tordini)も、LED照明では視覚的な快適性が重要であることを強調した。同氏が発表したのは、「The visual barrier: Designing the night appearance of an LED product(視覚的障害: LED製品の夜間

外観の設計)」という表題のものである。同氏は、照明器具を最初に点灯した際に人間が認識する視覚を夜間外観(night appearance)と定義した。LED光の輝度が非常に高い($10^8\text{cd}/\text{m}^2$)場合にはグレアが生じる可能性があり、まぶしさが不快なものとなる。同氏は、「グレアは、主に紫外線領域の光によって生じる光生物学的な損傷とは異なる」ことを指摘した。

トルディーニ氏は、フィリップス社のオフィス用照明器具「DayZone」の光学システムについて説明した。この製品では、中心の作業用の光と、それとは独立して制御される外環光によって環境照明が実現される。外環光の輝度は中心部分の1/3となっている。英国の規格EN-12464では、作業スペースにおける輝度の上限を、垂直軸から90～65度の範囲で $1000\text{cd}/\text{m}^2$ と定めている。

トルディーニ氏によると、同製品では、配光を制御されたビームとして実現するために、LEDのレベル(複数のLEDから成るパッケージ)で1次光学部品を使用する光学的設計を採用しているという。光学部品は、ポリメタアクリル酸メチル(PMMA)で作られたマイクロレンズアレイで構成されている。これによって、1次干渉による色収差を低減しつつ、拡散性を高めて光が視覚的に均一になるようにしている。PMMA膜の透過率は92%である。この膜はパターン化されており、ロール・ツー・ロール(roll to roll)のシートとして提供される。そのため、さまざまな形状やサイズに柔軟に対応することができる。この1次光学部品のほかに、空洞のプリズムリングで構成される2次光学部品によって、配光の変更と、ターゲット面に放射される光のレベルの制御が行われる。

無指向性の実現

ドイツのミュンヘンを拠点とするオスラム社(OSRAM)でシニア開発エンジニアを務めるマークス・ホフマン氏(Markus Hofmann)は、家庭用の一体型電球の無指向性を実現するための4つの手法を紹介した。4つの手法とは、以下のものである。

- ライトガイド(導光板)
- リフレクタ
- リモートフォスファ(蛍光体)
- LEDの3次元(3D)配置

ライトガイドを使用する方法の主な利点は、白熱電球に似た外観を実現できることだ。ただし、この手法は、光損失が非常に大きく、効率が悪い。そのため、ENERGY STAR規格への準拠が非常に難しい(図2)。結果として、ライトガイドを用いる手法は、ルーメン出力の低い、デザイン重視の用途でのみ利用されている。

ENERGY STARの要件を満たす上では、電球内部にリフレクタを配置して配光を制御する方法のほうがずっと実用的である。この手法は、もう1つ、旧来型の電球設計が可能であるという利点を持つ。「現在、ルーメン出力が中程度の電球については、レトロフィット電球の内部にリフレクタを配置する手法が最も有効だ」とホフマン氏は述べた。

高いルーメン出力を実現したい場合は、リモートフォスファを使用する方法が適している。その理由の1つは、光損失が少ないことだ。もう1つの理由は、フォスファは、ヒートシンクとして機能する外部のアルミニウム製フィンに対応できることである。一方、この方法の欠点は、「特に今日の市場においては、希土類材料を含むリモートフォスファの価格が高いことだ」(ホフマン氏)という。ただ、「電球の組み

一体型LED電球に対するENERGY STARの要件



図2 無指向性は、ENERGY STARにおける非常に難しい要件の1つである(提供:オスラム社)。

立てプロセスもより複雑なものとなるが、ENERGY STARの要件を満たすことはできる」と同氏は述べた。

この方法の代わりに、LEDを3D配置する方法でも、高いルーメン出力を実現しつつ、ENERGY STARの要件

を満たすことが可能である。「3D配置の手法によって、ENERGY STARの要件を満たしつつ、CRI(演色指数)、CCT(相関色温度)、寿命に優れた60W相当(850lm)、75W相当(1060lm)のLED電球が製造されている。100W相当の

電球も間もなく実現される見込みだ」(ホフマン氏)という。

小型化への対応

LEDベースのMR16電球は小型であるため、すべてのレトロフィット電球の中で、おそらく最も設計が難しい。英国ロンドンを拠点に光学部品の設計と製造を行うカルクロ・テクニカル・プラスチック社(CTP:Carclo Technical Plastics)で設計/開発を統括するマイク・ビーン氏(Mike Bean)は、「LEDを用いたMR16電球の設計は非常に難しい。市販の交換用電球がいくつか存在するが、そのほとんどが、性能の面で50Wのハロゲン電球に及ばない」と語る。米国エネルギー省(DOE:Department of Energy)のCALiPER(Commercially Available LED Product Evaluation and Reporting)プログラムに基づき、LEDベースのMR16電球に対して行った試験結果によると、50W相当の性能を目標とするものでも、

仮想的な垂直統合企業

SIL Europe 2011の技術トラックでは、従来とは異なる手法で製造/出荷されているレトロフィット電球の事例が紹介されていた。オランダのLED電球メーカーであるレムニス・ライティング社(Lemnis Lighting)で最高技術責任者(CTO)を務めるマーティン・デッカー氏(Martijn Dekker)は、同社が、コスト効果の高いLED電球を開発/販売するために、ある大手小売業者と複数年契約を結んだことを明らかにした。同氏は明言しなかったが、その小売業者とは、スウェーデンを拠点とするイケア社(IKEA)のようだ。最初の製品は200lmと400lmの電球で、欧州各地の店舗で間もなく発売される予定だという。

これらの電球はENERGY STARの要件を満たしてはならず、一般的な交換用電球よりも定格寿命が短い(2万時間)。だが、「この製品の開発における最優先の目標は、消費者が納得できる価格で高品質な電球を提供することであった」(デッカー氏)という。デッカー氏は、「45Wの交換用電球で9.99ユーロ(約1076円)未満、25Wの交換用電球で6.99ユーロ(約753円)

未満という価格を目標にしていた」と説明した。

400lmのLED電球を例にとると、そのCCTは2700K、CRIは85以上である。このLED電球は、2個の赤色LEDと、4個の蛍光体変換青色LEDを組み合わせで設計されているが、レムニス社は、2012年の製品では蛍光体のみのアレイを使用する計画である。

デッカー氏は、「レムニス社がパートナー企業らと結んだ新しい事業提携により、小売業者、照明メーカー、インドのLED製造業者、その他の供給パートナーで構成される仮想的な垂直統合企業が実現されている」と説明した。これらの企業は、電球レベルで8米ドル/klmの価格のLED電球の長期的な大量販売を目指して、そのプロジェクトのリスクを共有している。同氏は、「サプライチェーンが統合されていなければ、サプライチェーンのあちこちで利幅を大きくとろうとする動きが生じる。そうすると、販売価格の低下に向けた業界の能力が制限されてしまう」と語った。

一般的な測定値は25Wまたは35Wの電球相当の実力であるという(図3)。

必要な中心光度を実現し、全体的なビーム角度を狭めるには、より小さなLEDと集光用の光学部品を組み合わせる必要がある。このことがLED電球の設計における重要なポイントの1つである。小さなLEDとTIR(Total Internal Reflection: 内部全反射)光学部品を使用することにより、ビーム角度を40度から27度に減少させつつ、27度で2250cdの光度を実現することができる。このような設計にすることで、直径30mmの光学部品をマルチチップLEDの15mm上という最適な位置に配置でき、リフレクタがMR16電球のサイズ(ANSI C78.24の仕様で規定)に収まるようになる。

ベーン氏は、「マルチチップLEDを使用する方法には、ビーム角度の改善以外にも、直列/並列動作を含む、より多くのドライバ構成に対応できるという利点もある」と述べた。同氏が紹介したリファレンスデザインでは、米ダイオーズ社(Diodes)製で出力電流が1.5Aのドライバ、米クリー社(Cree)製のLEDパッケージ「MT-G」、CTP社製のTIR光学部品を使用し、10.1Wにおいて611lmの初期出力(61lm/W)が実現されていた。

材料の工夫

SIL Europe 2011では、照明設計の中で製品寿命にかかわる要素を取り上げた発表もあった。ドイツのレバークーゼンを拠点とするバイエル・マテリアルサイエンス社(BMS: Bayer Material-Science)でグローバルLEDプログラム担当ディレクターを務めるクラウス・ライナルツ氏(Klaus Reinartz)は、高度なポリカーボネート材料を使用することによって薄型光学レンズの透過性が高

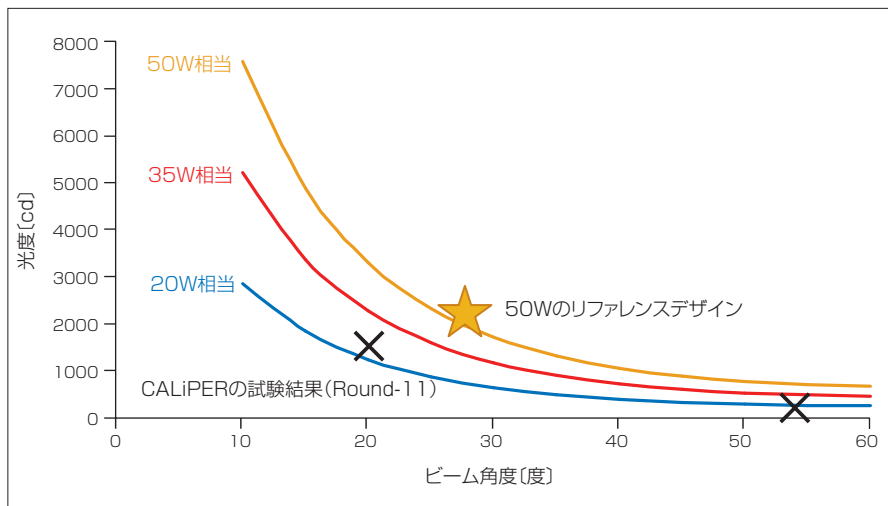


図3 MR16電球に対してENERGY STARが定める中心光度の目標値。CALiPERプログラムに基づく一部の試験結果とリファレンスデザインの値を示している(提供:CTP社)。

まり、前世代の材料と比較して大幅に黄色成分が抑えられるということについて説明した。同社の「Makrolon」ブランドの製品群は、光度が46lm/cm²の90度のLED光に対して安定した性能を示す。現在、同社はより高い温度と光度での試験を実施中である。

高度なポリカーボネート材料であれば、射出成形によってさまざまな形状/サイズに対応することが可能である。そのため、LED光の透過、整形、拡散の各種ニーズに対応できる。ライナルツ氏は、新たな技術的進歩の1つとして、ポリカーボネートの高い熱伝導性(最大40W/m・K)について説明した。これにより、ポリカーボネートをカスタム成形し、アルミニウムを使うよりも軽量で柔軟性の高いヒートシンクを実現できるという。

ドライバ/調光器の設計

英国ウェイクフィールドを拠点とするハーバード・エンジニアリング社(Harvard Engineering)でエンジニアリングマネージャを務めるラシブ・カーン氏(Rasib Khan)は、LED、CFL(Compact Fluorescent Lamp:電球型蛍光灯)、お

よびHPS(High Pressure Sodium: 高圧ナトリウム)の各光源について、調光システムの効率を比較した結果を発表した。それによれば、LEDを適切な調光レベルで使用した場合に、最もエネルギーが節減されるという(図4)。これに対して、HPS光源は、最大ルーメン出力の約40%までしか調光できず、すべての調光レベルにおいてシステムの効率が悪い。つまり、同じルーメン出力を得るために、より大きい入力電力が必要だということになる。例えば、ハーバード社のDALI(Digital Addressable Lighting Interface)バラストを実装する60Wの照明器具で50%の光出力レベルを維持するには、約67%の入力電力が必要となる。システムの効率はCFL光源のほうが高く、ルーメン出力が約40%のレベルまで高い効率が維持される。一般的な照明器具の場合、30%のルーメン出力に対して約35%の入力電力が必要である。ただし、調光レベルが40%未満になると、CFLでは陰極やドライバの非効率性の問題が生じる。

LEDは調光が容易で、理論的には1%まででも簡単に調光することができる。システムの効率は、光出力が100%

から約20%までの範囲において優れている。例えば、ハーバード社製で700 mA対応のDALIドライバを実装する50W相当の照明器具では、光出力が50%の場合、必要な入力電力はわずか44%で済む。現在の技術では、光出力が20%を下回ると、システムの効率にドライバの効率の影響が現れるようになる。

カーン氏によると、「簡単なアナログスイッチによる調光(0~10V)は、規模が小さい場合にはうまく機能するが、大規模な実装になると、必要な配線の数がかかり増大することが問題になる」という。DALIなどのより高価な制御手法ならば、任意の規模の実装に対応できる柔軟性があり、再構成も可能である。ただし、DALIのような手法を用いる場合、制御範囲における制御効率と力率を最大限に引き上げるために、さらなる工夫が必要となる。「将来的には、プラグアンドプレイ実装が可能な無線インテリジェント制御システムへと業界は移行する」とカーン氏は見ている。

同じくドライバのセッションにおいて、ドイツのレコム・エレクトロニック社(RECOM Electronic)で技術マネージャを務めるスティーブ・ロバーツ氏(Steve Roberts)は、高い温度が照明器具の信頼性に与える多大な影響について論じた。同氏は、LED照明器具において温度上昇を抑えるための設計上の推奨事項をいくつか示した。例えば、ヒートシンクへの熱インピーダンスが低くなるようにLEDを配置することや、ドライバをLED/ヒートシンクから離して配置することがポイントとなる。ヒートシンクは、サイズと効率の比率が最も効率的になるように設計すべきだ。接合部温度が仕様の上限值に近づいた際にLEDの電流を低減するには、熱ディレーティングを使用することが

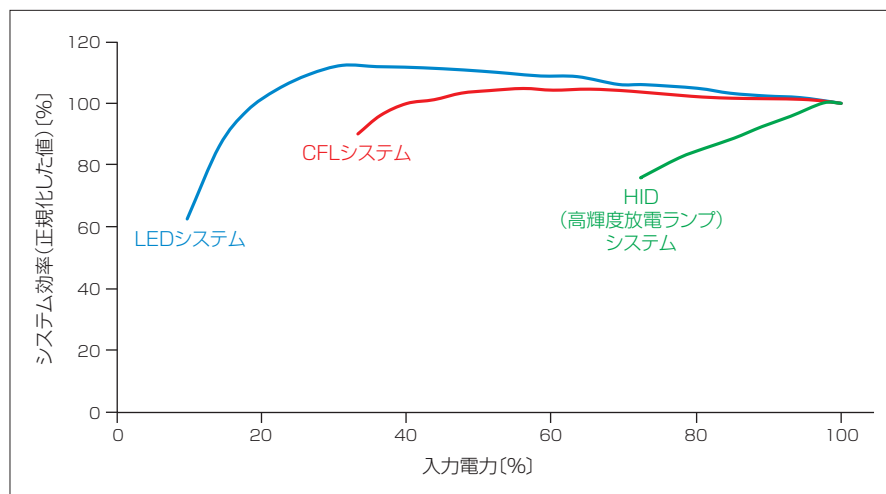


図4 調光時のシステム効率(提供:ハーバード・エンジニアリング社)。

できる。さらに、ロバーツ氏は、熱サイクリングを制限すること、複数のLEDを実装する場合にそのうちの1つが故障してもよいように設計することを推奨した。入出力電圧の過渡現象には、スパイクに対する保護を適用するとともに、入力ケーブルを短く、出力ケーブルを相対的に長くすることで対処することができる。

トライアック調光器について、ロバーツ氏は、「トリガのタイミングとドライバの電子回路への影響を考慮すべきだ」とエンジニアらにアドバイスした。加えて同氏は、「大規模なAC/DC電源で複数のDC/DCドライバを駆動する場合、AC/DCバラストを分離するよりも、中央集中型の配電ネットワークを採用すべきだ」とも述べた。最後にロバーツ氏は、照明システム内のすべての部品の信頼性を検討することを推奨した。

配電ネットワークの設計

配電ネットワークについては、英国ホッデスドンを拠点とするアイソテラ社(iSotera)のマーク・オットリーニ氏(Marc Ottolini)も見解を述べている。同氏は、SSL用のDC配電ネットワーク

として、以下の4つのネットワーク構成を取り上げ、それぞれの実用性について説明した。

- 従来型のアーキテクチャ
- 1つのAC/DC電源でDC/DCドライバを駆動する中央集中型のDCスター構成
- 低電圧のDCがAC/DC電源から分離されたDCグリッド構成
- 中央集中型の高周波AC(HFAC: High Frequency AC)バス構成

オットリーニ氏は、これらの構成について、実装のしやすさ、コスト、安全性、信頼性、制御可能性を調査し、比較を行ったという。その結果として、同氏は、「LED照明用に、完全なDC配電システムを実装することには説得力のある利点はない」と結論付けた。しかし、中央集中型の(大規模な)電力処理方法は、昇圧と降圧(2段階型)の変換を十分に効率的に実装できるならば(十分に効率的であるかどうかは、LED負荷に依存する)、有効な場合もあるとしている。

オットリーニ氏は、「エネルギー効率の利点(2~5%)だけでは、新しい規格策定を促す十分な根拠にはならない」と述べて、発表を締めくくった。 LEDJ