モジュラ方式とレトロフィット方式のLED照明の性能を増強する総合的熱対策

モーリー・ライト

スペースの制約されるレトロフィット方式のランプとモジュール交換可能なシステムでは熱問題が特に難しい課題になる。

LEDの固体照明（SSL）アプリケーションでは、よく知られているように、LEDの接合部から発生した熱を除去する対策が必要になる。LEDの高温動作は光出力と発光寿命の減少をもたらし、突発故障を引き起こすこともある。電球の交換を前提にしたモジュラシステムは、機械的空間が狭く、その熱伝導と電気伝導はある種のコネクタに依存しているため、堅牢な熱設計をすることが非常に難しい。LEDと駆動回路の両方の冷却を含めた総合的な熱対策に基づいて熱設計を行うと、信頼性のある製品を得ることができる。

LEDを直に組込む照明器具のデザイナーは、熱設計の自由度がかなり大きい。このような設計は大きなヒートシンクを採用し、場合によっては米ヌーヴェンティクス社（Nuventix）のSynjetのようなアクティブ冷却技術を利用することで、熱対策が可能になる（www.ledsmagazine.com/features/6/4/8を参照）。

図1　GEのLEDモジュールはLEDアレイとドライバ回路の両方を内蔵している。この容易に交換できるモジュールは照明器具の台座に挿入することで、電気接続と熱接続が同時に可能になる。

しかし、短期的にみると既存のランプをLEDランプに交換する照明器具の市場のほうが、総合的なLED照明器具の市場よりも成長の可能性が大きい。米ストラテジーズ・アンリミテッド社（Strategies Unlimited）のロバート・スチール氏は、今年2月のStrategies in Lightのカンファレンスにおいて、「LED照明市場がよりしっかりと確立するまでは、レトロフィット方式の照明器具に使われる交換ランプが主要な成長分野になるだろう」と述べている。

レトロフィット方式の市場を専業としない照明器具メーカーでさえも、照明デザイナーがLEDとドライバの両方のモジュールが交換可能で、消耗した照明の交換や最新技術へのアップグレードが可能な製品を望んでいるということは認めている。実際のところ、2009年の次世代照明器具（Next Generation Luminaire）デザインコンテストで授賞した製品の多くは、交換可能なLEDとドライバに対応していた。

モジュラ方式の照明器具

今日の照明器具には多数のモジュラ方式の設計があり、いずれも熱問題へのある程度の対応がなされている。この分野にはザガ・コンソーシアム（Zhaga Consortium）と呼ばれる、少なくとも一

つの産業コンソーシアムがあり、モジュラ方式の標準化の計画や標準として対応すべき主要な熱問題のリストアップが行われている。

ここではモジュラ設計のいくつかを検証してみよう。米ゼネラル・エレクトリック社（General Electric：GE）は、昨年ジャーニー・ライティング社（Journee Lighting）から取得したモジュラ技術に基づいたGE LEDモジュールを市場に出すと発表している（www.ledsmagazine.com/products/22181を参照）。

GE LEDモジュールはドライバ回路とLEDを交換可能なモジュールに内蔵している（図1）。ドライバとLEDにはいずれも潜在寿命があるため、このアプローチが多くのSSLバイヤから注目されることは間違いない。最初の製品となる照明器具の台座には線間電圧を277、240または120VACから24VACへ降圧する変圧器が内蔵される。GEの技術に基づいて照明器具を製造する会社は、最終的に、特定の線間電圧用の照明器具台座の内蔵が必要になるだろう。同社のプログラム・マネージャのジョー・ホッブス氏（Joe Hobbs）は「われわれは汎用の降圧変圧器を用意できると考えている。GEは将来的に線間電圧で直に動作するモジュールを設計できる可能性がある」と語っている。

GEのシステムはモジュールを照明器具の台座に挿入し、時計方向に回して固定すると動作する。このねじ込みによって電気接続と熱接続の両方が成されなければならない。ドライバ回路はドーナツ型の回路基板上に実装され、基板の背面には同心円状の回路パタンが形成されるため、電気接続は比較的簡単に行うことができる。この導電性パタンは照明器具の台座へのばね仕掛けの接点に対して圧入される。

熱的接続には、ホッブス氏が「トップハット」と称している回路基板の中心にまで延びたアルミニウムモジュールを使用する。トップハットの頭部には4個のLEDが単一実装で搭載され、トップハットよりも大きな台座が米バークイスト社（Bergquist）の熱パッドで覆われ、照明器具の台座に内蔵されたヒートシンクと接触している。

図2　LEDのレトロフィットランプにはさまざまな形式があり、そのほとんどは普及している熱対策を採用している。iF製品設計賞を獲得した台湾のイーオン・ライティング社（Aeon Lighting）のランプは、LEDの周りにヒートシンクの羽根が取付けられている（www.ledsmagazine.com/press/20658を参照）。

GEは照明デザイナーの製品開発に役立つ応用手引書を用意した。この手引書はエンジニアに対して、照明器具の開発にあたっては、熱電対をトップハットに取付け、台座のヒートシンクとトップハットとの熱的相互接続の有効性を監視するように要請している。

ホッブス氏はモジュラ方式の信頼性を確信している。また、1層でも付加すると、熱モデルには影響が及ぶことも認めている。GEは商品化のために、500ルーメン（lm）モジュールの動作試験を徹底的に行った。ホッブス氏は500 lmモジュールのドライバ回路には熱問題が発生しなかったと述べている。GEは将来的に、1000および2000lmモジュールの製品化を計画している。

提携によるHelieonモジュール

他のモジュラ方式ではドライバ回路とLEDは交換可能なモジュールのなかに集積されていない。例えば、米ブリッジルクス社（Bridgelux）とモレックス社（Molex）は提携して、Helieonモジュールを商品化した（www.ledsmagazine.com/news/7/3/21を参照）。HelieonにはLEDライトモジュールとの電気接続を行うためのピン／ソケット式の導電性端子をもつプラスチック台座が内蔵されている（図3）。

図3　ブリッジルクス社とモレックス社は提携してLED照明モジュールHelieonを開発した。このモジュールはドライバ回路が照明器具の内部に実装されている。

しかし、Helieonの熱対策はGEの方法と類似している。ブリッジルクス社はモジュールのダイをアルミニウム基板の熱拡散器に取付け、熱拡散器には熱界面材料を追加した。LEDモジュールHelieonが固定されると、この熱材料は照明器具の設計者が取付けた熱表

面、つまりヒートシンクに押し付けられる。

米タイコエレクトロニクス社（Tyco）もモジュラ方式を採用している。同社のStar Board LED Pixel Holderには鋳造アルミニウムヒートシンク、電気接続用の接触キャリアおよびロッキングリングが含まれる。同社はGU10/MR16照明器具用の製品を設計している。

現在のモジュラ方式には、市場が知的所有権によって分断された状態を続けるのか、それとも産業界の標準化によって管理可能な状態に進むのかという問題がある。

ザガ・コンソーシアムは、産業界を統合の方向に導こうとしていることは確かだが、SSL製品の創造性と柔軟性を制約しようとは考えていない。ザガは複数のメーカーのLED照明エンジンに互換性を付与するインタフェースを定めようとしている。

ザガ・コンソーシアムの事務局長を務めるメンノ・トレファー氏（Menno Treffers）は「われわれは継続的な技術革新の推進を望んでいる」と語っている。トレファー氏は、この組織が世界中で6週間ごとに会議を行い、標準化のための作業を迅速に行うことも約束している。このコンソーシアムは照明エンジンの機械的、熱的、電気的、および光学的（表面積と光出力）インタフェースを定めようとしている。

トレファー氏はコネクタや調光制御方式などの機械的側面に対応する一連の技術の標準化を想定している。しかし、柔軟性と技術革新を最大化する試みと、電気および熱標準の必要性との調和をはかることは容易ではない。例えば、ザガは集積または個別ドライバ回路をもつ照明エンジンを支持すると表明している。このような決定は、典型的な産業標準化のプロセス、つまり形状を厳密に定義して複数メーカーによる互換性のある製品の製造を可能にするプロセスに対しては逆行している。しかし、恐らく単にドライバの位置だけが電気標準における選択肢として残されることになるだろう。

図4　レムニス・ライティング社のLEDランプPharox製品シリーズは、アルミニウムの台座がヒートシンクの役割を果している。

トレファー氏は熱問題に関して、コンソーシアムが試験法とともに「ヒートシンクの能力」などの熱的性質も定める予定だと表明している。彼は「たとえ理想的なインタフェースが明らかになっても、誰もその作り方を他人に教えはしないだろう」と語っている。とは言うものの、標準化には異なるメーカーの製品の相互運用性を保証するための十分な方向付けも必要となる。

レトロフィット方式のランプ

より近い未来の展望に戻すと、レトロフィット方式のランプメーカーには目前にチャンスがあり、市場には大量の製品が登場している。そうしたメーカーには独オスラム社（Osram）、オランダのフィリップス社（Philips）、レムニス・ライティング社（Lemnis Light ing）、GE、オーストリアのレドン社（Ledon）などが含まれる。

レトロフィットランプのメーカーは、モジュラ照明のメーカーに比べると、さらに難しい熱設計の問題に直面している。米アドバンスト・サーマルソリューションズ社（Advanced Ther mal Solutions：ATS）欧州法人のディレクタ、ノルベルト・エンゲルベルツ氏（Norbert Engelberts）は、「標準的な照明電球は冷却に対してこれまで最適化されたことがない」と語っている。たしかに、白熱電球は熱を放射するように設計され、ドライバ回路を内蔵した製品はまったく設計されなかった。ここでは、いくかのレトロフィットランプを取上げ、設計者が熱問題をどのように軽減し、最終のランプ性能を最大にしているかを検証してみよう。昨年10月、レムニス社は60Wの白熱電球と同等のPharox60ランプを発表し、レムニス社によると、この製品は最初の調光可能なレトロフィットランプであった。その後、同社は製品名をPharox300に改めたが、これはワット等価表示から光束出力表示への移行を反映している。

レムニス社CTOのマーチン・デッカー氏（Martijn Dekker）によると、同社は設計に対してシステムレベルで取組んだ。編成された設計チームはドライバ効率の最適化とドライバおよびLEDモジュールの冷却法の開発に集中した。ドライバは線間電圧に対応して82～84%の効率が得られるようになった。このような効率によって、ドライバ回路から発生する熱は最小になった。光量レベルが低ければわずか30mWないし40mWの放熱に収まる調光回路が発明されたこともデッカー氏は指摘している。多数のLEDランプに使用され、ト

ライアック調光の動作を保証している分圧回路の場合は1Wないし2Wの放熱が容易に起こる。

他方、ATSはレムニス社に対して、熱設計のさらなる改善を申し入れ、最近、両社は提携して対応すると発表した。この提携を先導したATSのエンゲルベルツ氏は、「熱設計においては最も重要な部品の開発に集中する必要がある」と語っている。ATSはLEDの冷却技術の開発に集中しているが、レムニス社にはドライバ回路の改善の可能性についても助言している。

エンゲルベルツ氏によると、この熱プロジェクトは材料の選択、形状および仕上げに重点を置いている。そのプロセスは、まず、熱モデルを構築し、次に、モデルのプロトタイピングによる検証を行う。その結果としての熱設計は、空気チャネルをもつアルミニウムの多層構造が形成され、この構造がLED電球の低い台座を構成することになる。

熱と測光

デッカー氏は現在のPharox60製品に対して、熱効率の22%の改善を期待し、新しい設計を試験生産して、この改善を実証したと述べている。デッカー氏は熱的ヘッドルームが選択肢になると指摘している。つまり、LEDが22%冷却され、より長時間の動作が可能になる。温度プロファイルが同じであれば、駆動電流と光束出力が22%大きくなる。

デッカー氏は、システムレベルのアプローチでは設計の測光要素も認識しなくてはならないとも述べている。レムニス社は青色LEDと蛍光体を組合せ、さらにいくつかの赤色LEDと組合せて、より好ましい色温度を実現している。しかしデッカー氏は、温度が低くなると、赤色LEDの発光は青色LEDよりも劣化が大きいと指摘する。このように、測光の設計は熱問題に対して直接的な影響を及ぼす。

図5　DOEのL Prizeの候補となったフィリップスのLEDランプは、アルミニウムの空気チャネルを採用して冷却を行い、四つの個別LEDモジュールを内蔵して、ほとんど全ての方向への発光を実現している。

熱的、光学的および機械的設計と意匠設計との組合せを革新するために、フィリップスは同社のレトロフィットランプ方式の電球の形状を完全に刷新した。この電球は米国エネルギー省(DOE)のL Prizeの候補になっている。DOEは総額1000万ドルの賞金を用意して、企業による交換可能LEDランプの開発を促している(www.ledsmagazine.com/news/5/6/7を参照)。

フィリップスは率先して60W白熱電球への置き換え用LEDランプを提出し(www.ledsmagazine.com/news/6/9/24を参照)、この製品が授賞する可能性も大いにある。しかしフィリップスの設計は、白熱電球や多くの交換用LEDの設計に比べると、大きく異なっている。

上述したレムニス社の例を含めて、ほとんどの交換用ランプは白熱電球に類似している。その光学レンズは伝統的な電球のような形状に加工され、ねじこみ台座の上部にアルミニウムのヒートシンクが配置されている(図4)。

フィリップスの設計は、電球のなかに深く切り込まれた4本のアルミニウムの空気チャネルが形成されていることに特徴がある。そのため、レンズ材料は4分割されている。フィリップスの電球は他の製品を上回る最大の光量を確保できるが、その頭部にはアルミニウムの切片が配置され、この切片とアルミニウム空気チャネルが接合された設計になっている(図5)。

一見したところ、フィリップスの設計には根本的な欠陥があるように思われる。しかし、LEDは指向性が強く、白熱フィラメントとはまったく異なることを思い出して欲しい。フィリップスの戦略マーケティング・ディレクタを務めるジム・アンダーソン氏(Jim Anderson)は、現在の電気スタンド用として販売されている交換用LEDランプのなかには、すべての光が上方に放射され、無駄になっているランプもあると指摘している。

DOEのL Prizeを獲得するには、交換ランプからの光が実質的に360°の放射角をもつ必要がある。フィリップスはL Prizeの候補となったランプの詳細を公開していないが、その設計はそれぞれが四分円、つまり90°の放射角をもつLEDから構成されているはずだ。すべてのLEDが台座から離れた1枚の平面モジュール上に配置されるランプに比べると、このランプは複雑に設計されていると考えられる。

フィリップスの設計は、ランプの台座だけにヒートシンクをもつ標準的な製品に比べると、熱的な利点が多いと思われる。アンダーソン氏の指摘によると、アルミニウムの溝は四分円のすき間の空気流が強くなるように設計されている。その結果、このLEDの構成はアルミニウムの溝との熱接続が実現され、他の多くの交換用ランプの設計に比べると、より多くの熱容量に耐えられると考えられる。

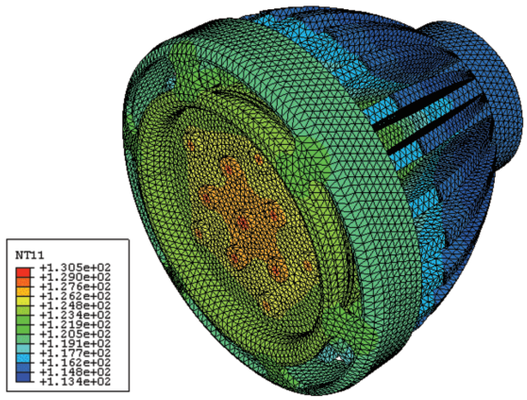

図6　DSMエンジニアリングプラスチックス社は有限要素解析法を使用して、Stanyl TC熱伝導性プラスチックを採用したMR16ランプの熱性能を証明した。

ドライバ回路

LEDは間違いなくSSL実用化に大きく貢献しているが、全体の熱対策ではドライバ回路の設計もさまざまに重要な役割を果している。例えば、独インフィニオンテクノロジーズ社（Infineon Technologies）は特にレトロフィットランプを対象にして、90%以上の効率が得られるICL8001Gドライバを発表した。

インフィニオン社の事業開発マネージャを務めるウォルフガング・マイヤー氏（Wolfgang Meier）は、電力変換器トポロジーも重要になると指摘している。インフィニオン社のICは変換器の1次側の電圧調整技術だけに依存しているが、これは制御回路が1次側（またはライン側）だけにあることを意味している。その結果、2次側から1次側へのフィードバックが行われない。

このトポロジーは変換器の線間電圧から2次側への電気経路のないガルバノアイソレーションを可能にする。このアイソレーションはドライバとLED熱源との絶縁にも役立つため、LEDの冷却設計が簡素になる。

エンゲルベルツ氏はマイヤー氏の指摘に賛同し、「LED台座の電気的絶縁の対策が不要になる」と語っている。彼はガルバノアイソレーションにおいて必要となる電気的絶縁の安全確保も考慮して、「この方法は熱設計が容易になる」との結論を出した。

熱材料

もう一つの注目すべき熱問題は、生産に大きな柔軟性をもたらし、コスト低減も可能にする熱材料の分野にある。モレックス社と米DSMエンジニアリングプラスチックス社（DSM Engineering Plastics）は、いずれも新材料を用いた熱技術をレトロフィットLEDランプに採用した。

モレックス社はめっき技術を使用している。この技術は、まず同社のコネクタ事業のなかで開発され、後にプラスチック基板に導電性材料をめっきする小型RFアンテナの生産工程において改良された。モレックス社のSSL事業担当バイスプレジデントのマイク・ピシニ氏（Mike Picini）は、「われわれの認識では放熱が最も重要な要素になる。とくに完全に封止されたLED固定具のなかでは最大の問題になる。われわれには熱被覆層の技術があり、すでに市場で使われている製品もある」と語っている。

同社はレトロフィットランプのTranscendシリーズを開発し、米国市場ではレヴィトン社（Leviton）から販売されている。Transcendシリーズには GU 24台座と一緒に使用するために開発された複数のモデルがある。これらのランプは電力変換器が不要でAC線間電圧によって直接動作する韓国のソウル・セミコンダクタ社のLED、Acricheを使用している。

このLEDには堅牢な冷却法が必要になる。モレックス社は金属の多層構造をめっきしたプラスチック反射鏡を使用して、LEDの冷却と光反射の両方を可能にした。そのなかの銅の単層が熱伝導の役割を果している。ニッケル層が銅の酸化を防いでいる。この冷却法はモジュールの外側にあるアルミニウムのヒートシンクによって増強されている。

他方、DSM社はフィリップスと提携し、MR16ハロゲン照明をLEDで置き換えるための熱技術を開発した。フィリップスはDSM社が開発してStanyl TCと名付けた熱伝導性プラスチックを使用することで、同社のMR16 LED照明に使われていたアルミニウム被覆をプラスチック被覆に置き換えることができた（図6）。

DSM社によると、プラスチックの使用は多数の利点が得られる。この材料はアルミニウムよりも軽量で、どのような形状とサイズにも容易に加工できる。射出成形法を用いて加工すると、ランプメーカーは製品の幾何学形状を熱性能と審美性に対して最適化できる。

初期のLED照明製品は予想されたほど普及しなかったが、現在はさまざまな熱技術が開発され、SSL産業の急速な発展を促している。適切な冷却法はSSLの寿命を延長し、一般照明としてのSSLの用途を拡大している。　LEDJ