能動冷却で高輝度LEDの熱を管理

ライアン・ハーン

能動冷却技術を用いれば、受動ヒートシンクよりも優れた放熱性能が得られる。このことは、LED電球の輝度の向上と寿命の延伸に役立つ。

2011年は、一般照明用のLEDにとって素晴らしい年になった。2010年に比べると、59%の成長が予想されているという。既存の白熱電球や蛍光灯を固体照明(SSL：Solid State Lighting)で置き換えるレトロフィットランプの利用が1つの大きな流れとなった。このことが、大きな成長の要因となっている。ユーザーはLED電球の高いエネルギー効率や、長い寿命、低い維持コストを評価している。実際、LED電球は、企業や都市において、数百万ドル/年のエネルギーコストと維持コストの節約を可能にする。そして、一般消費者の家庭では、品質に優れた光で照らしてくれる。

しかし、LEDが売店や住居、屋外で用いる照明に採用されるためには、さらなる進化が必要になる。高い評価を得ているとはいえ、現時点では、LEDのコストと輝度(ルーメン出力)は、より広範な用途に用いる上で、まだ制約要因となっている。

LEDの生産コストは2015年までに大きく低減すると期待されている。米国エネルギー省は、向こう5年間でLED照明器具の生産コストが40～45%ほど低下すると予測している。そしてコストの低減は、政府の補助金と払い戻しによってさらに加速される。

LED照明を利用する上でもう1つ問題となるのが、高輝度のLEDを利用する際に生じる熱である。LEDの進化は続いているが、高輝度出力のLED電球を利用するにあたっては、受動冷却だけでは十分ではない。LED電球の冷却に受動ヒートシンクを使うのでは、寸法が大きくなりすぎ、従来の白熱電球や蛍光灯を置き換えるレトロフィットランプとして実現することができない。だからと言って、ヒートシンクを小さくすると、LEDが熱によるダメージを受けて信頼性が低下する。このような理由から、能動冷却方式に注目が集まっている。

LED電球の熱の問題

発熱は、高輝度のLEDを照明用途に用いる上での大きな制約要因である。LED電球は、旧来の白熱電球に比べると消費電力を80%も削減できるが、それでも、LEDと駆動用の電子部品(ドライバ部品)からはかなり大量の熱が発生する。適切に放熱が行われなければ、LEDの光品質と期待寿命は大幅に減少することになる。

輝度の低いLED電球であれば、ヒートシンクによって熱の問題を解決することができる。照明器具メーカーは、40Wの白熱電球との置き換えが可能なLEDレトロフィット電球を難なく開発した。60W相当の場合も、熱の問題は適切に解決された。しかしながら、さらに輝度が高いLED電球では、熱の管理が非常に難しくなる。ヒートシンクだけでは、75Wあるいは100W相当のLED電球を冷却することはできないのである。

このクラスの高輝度電球に対する需要は間違いなく存在する。実際、75Wと100Wの電球は照明市場の大きな部分を占めている。多くの企業は、エネルギーコストと維持コストの節減に、LED電球を積極的に利用したいと考えている。米国で2007年に制定されたエネルギー独立性及び安全保障法は、

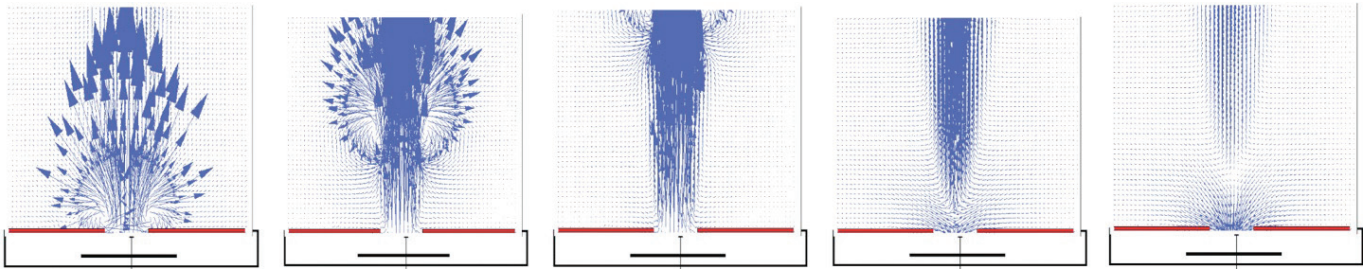

図1　シンセティックジェット技術を用いて噴出した空気の速度ベクトル。

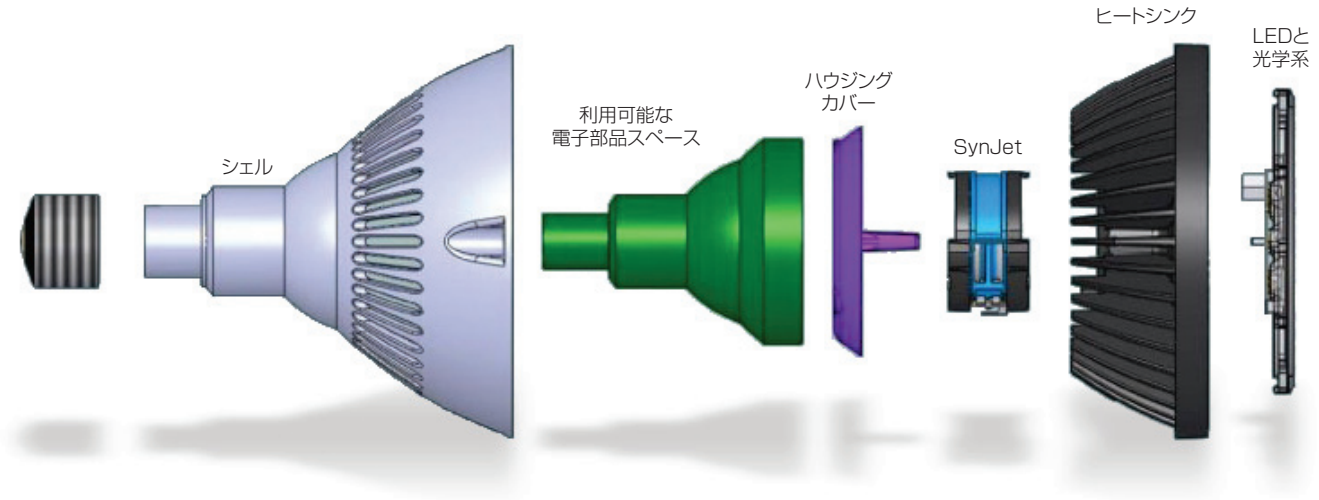

図2　ヌヴェンティクス社のSynJetを用いたPAR38型のリファレンスデザイン。

2012年から高効率の電球を使用することを定めている。これは、白熱電球からLED電球への置き換えを促すものだが、消費者は輝度が高いことだけではなく、優れた光品質を備えた長寿命の電球を使用したいと考えている。

フォームファクタが固定されているLED電球で所望の輝度を実現するには、能動冷却を採用し、LEDから発生する熱を放散させる必要がある。ただし、送風ファンなど、能動冷却方式の種類によっては、LED本体と同等の期待寿命を得ることができない。能動冷却方式としては、エネルギー消費量が基本的に少なく、電球の小さなフォームファクタに適合する十分な柔軟性を持ち、LEDと同等以上の期待寿命を持つものが必要となる。

シンセティックジェット技術

多くの大手照明企業が、LED照明の能動冷却法としてシンセティックジェット（Synthetic-jet）技術を採用している。この技術を用いた小型冷却モジュールは、LED電球の開発を妨げている制約を解消してくれる。すなわち、効果的な放熱、小さなフォームファクタへの対応、高い信頼性を実現できる。

従来の送風ファンをシンセティックジェットに置き換えることで、LEDの熱管理における難題に容易に対応できるようになる。**図1**に示すように、シンセティックジェットでは、ダイヤフラムの運動によって開口部の空気が周期的に吸入／噴出されることでジェットが生じる。図1の左から3つ目までは噴出段階の様子を示したものである。ジェットの噴出と同時に渦が発生し、ジェットの出口から下流への対流が生じている。渦の流れが下流方向に十分に伝播すると、右の2つが示すように、開口部近傍の空気が引き込まれる。

急速に発生する乱流空気のパルスの数は、毎秒30～200個に上る。このパルスによって熱境界層が破壊され、熱源（多くの場合はヒートシンク）から移動する熱量が増加する。つまり、より多くの熱をより少ない空気で除去することが可能になる。空気のパルスは、ヒートシンクのブレードなど、冷却が必要な場所に向かって正確に流れ、熱効率がさらに高められる。

シンセティックジェット技術を利用することで、いくつかのメリットが得られる。1つは、より多くの熱をより少ない空気で除去でき、従来のジェットのように追加の空気の引き込みを必要としないということである。ヒートシンクを2/3まで小さく軽くできるので、光学部品のサイズが減少し、効果的な照明に必要な輝度を維持しながら、旧来の電球を置き換えることが可能である。シンセティックジェット技術は、通常の能動冷却法による層流に比べると、熱源からの放熱効率を50％も高めることができる。

シンセティックジェット技術を利用したモジュールのフォームファクタは、レトロフィットランプ、屋外照明、商店の照明、産業用の照明などを含め、すべてのLED照明器具に適用できる。シンセティックジェットは、従来の方式ではほぼ不可能な空気の流れを実現するので、照明器具の設計自由度を高めることが可能である。

さらに、シンセティックジェットのフォームファクタは、LED電球の長寿命化に必須となる信頼性の確保に役立つ。このモジュールの可動部品では摩擦が生じないので、高い信頼性、長期の耐久性、塵埃／粒子による汚染への耐性、静音性を確保できる。

レトロフィットランプの実現

シンセティックジェット技術を利用したLEDベースのレトロフィットランプの事例を紹介しよう。オーストリアに本拠を置くレドン・ランプ社（LEDON Lamp）は、高効率のLED電球の製造にフォーカスしている。同社は、白熱電球の置き換え用のものとして、Aランプに近いフォームファクタで、75W相当と100W相当のLED電球を試作した。シンセティックジェットによって熱対策を行ったことで、従来は実現できなかった高輝度のLED電球を具現化することに成功したのである。この電球は完全なAランプのエンベロープ様式ではないが、同社はほとんどの用途に適合すると考えている。

レドン・ランプ社は、75W／100W相当のLED電球を実現するために、シンセティックジェットを電球の上部に内蔵することにした。そして、シンセティックジェットの上部には、LEDからの熱をヒートシンクに伝達するヒートスプレッダを配置した。ヒートシンクにはシンセティックジェット用のノズルを形成し、空気を押し出して、その流れをヒートシンクのブレードへ分配するようにした。加えて、シンセティックジェットの上部にあるノズルは、ヒートシンク端に配置し、周囲の空気との間で良好な熱交換が行われるようにした。

図3　ダイヤフラムの振動を利用したシンセティックジェットのエンジン。

ドライバ部品を冷却するために、シンセティックジェットの1つのチャンバーをドライバ部品のハウジングに接続した。このハウジングの底部の通気口を開放することで空気を交換し、ドライバ部品の冷却を効果的に行う。それにより、白熱電球から75W／100W相当のLED電球への置き換えが可能になった。ドライバ部品とLEDの両方に空気を流して両方を同時に冷却するシンセティックジェットの柔軟性を利用することで、このような設計が初めて可能になったのである。

PAR38のリファレンスデザイン

ヌヴェンティクス社（Nuventix）は、PAR38型のレトロフィットランプに用いる熱管理システムのリファレンスデザインを開発している（**図2**）。このリファレンスデザインと同社のシンセティックジェット「SynJet」（**図3**）とを組み合わせることで、PAR38のフォームファクタに適合し、2500lm（ルーメン）以上の出力を持つLEDアレイシステムを構築できる。今日、PAR38型の置き換えに標準的に用いられているLEDの出力は約1500lm程度にとどまっているので、それを大きく上回ることになる。

この設計の特徴は、米テキサス・インスツルメンツ社（Texas Instruments）製のカスタムのドライバICを使用していることだ。個別部品を1つのICに集積したことで、より小さいフォームファクタが実現されている。

SynJetは、PAR38型のリファレンスデザインにおいて、500mW以下の消費電力で40Wまでの冷却を可能にしている。また、照明設計者は、SynJetとテキサス・インスツルメンツ社のICを用いることで、設計オプション以上の柔軟性を得ながら、より小さいフォームファクタ、より少ないLEDによって、より高い輝度を得ることができる。

著者紹介
ライアン・ハーン氏（Ryan Ahearn）は、ヌヴェンティクス社（www.nuventix.com）で製品マネージャを務める。

LEDJ