SSLシステムのLED選定に潜む真のコストを理解する

ラルフ・タトル、マーク・マックリア

LED部品のコストは、SSL（Solid State Lighting：固体照明）システムの設計と製造にかかるコストのほんの一部分にすぎない。汎用照明製品の全体的なコスト、性能、寿命に影響を与える要因としてはその他に、対象とする照明分野に対する部品の適合性、熱管理、パッケージなどが挙げられる。

SSL業界は、LED照明とそのさらなる普及の初期コストを抑えるための主要な要素として、LED部品コストに着目してきた。確かに、LED価格の低下はSSLがさらに広く普及するための重要な要素である。しかし、LED部品の選定にはシステムレベルのコストと信頼性の問題が潜んでいる可能性があり、SSLの開発者はそれを理解して、設置時とその後の長い使用期間を通して適切に動作する製品を提供する必要がある。部品に対して長い時間をかけてLM-80の試験を実施することが、堅牢な照明製品を構築するために何よりも重要である。本稿では、LED製造の背景と動向を紹介し、SSL応用分野の要件を説明してから、LED部品の隠れたコスト（問題）が、汎用照明製品の成功を左右する可能性について検討する。

LED技術がどれほど急速に変化しているか、また、いわゆるLED照明改革の目覚ましい勢いについては頻繁に耳にする。しかし、この明らかな動向を支えるのは、何十年間にもわたる製品研究と開発、そして、LED照明市場分野よりもずっと以前に出現した、LED市場の別の古い分野を対象として行われた製造設備への投資である。LEDテレビ市場はそのような市場分野の1つである。比較的安価で低性能のこの民生製品市場分野で予測される需要に対応してLEDチップとプラスチックLEDパッケージを供給するために、全体的な製品および製造インフラが2010年から2011年にかけてひそかに構築された。

どのような種類のLEDチップを製造する場合でも、有機金属気相成長（MOCVD：Metal Organic Chemical Vapor Deposition）装置が必要である。2010～2011年にかけての短い期間に、登場したばかりのLED TV市場で予期される需要に対応しようと、LEDチップ製造設備に対する莫大な投資が行われた。それによって追加された製造能力は、それ以前に存在した業界全体の製造能力を超えるほどの規模だった。

LED業界ではこれと同じ時期に、低出力および中出力のプラスチックパッケージ製造設備にも同様の投資が行われた。しかしその後、ディスプレイパネル技術の進歩によって、一定のディスプレイサイズに必要なLED部品数が大幅に減少し、膨大な過剰設備が同業界の問題となった。このようにして行き場を失ったLEDチップ製造とパッケージの設備だったが、LED部品の価格には非常に好都合で有益な影響を与え、LED照明改革の促進に貢献することとなった。

SSLにおける中出力LEDの使用

価格が急速に低下したことで、民生製品市場向けに設計されたこれらの安価なプラスチックLEDパッケージを、品質と信頼性に対する期待が、それよりもはるかに高いLED照明分野にも採用しようとする動きが高まった。テレビ向けに設計されたLEDの物理的なサイズ、形状、初期光出力特性は、照明クラスのLEDと類似しているように見えるかもしれないが、両者のLEDには明らかな違いがある。つまり、構成材料と、光束維持率や色の安定性といった長期的な信頼性を表す重要な指標が異なるのである。

プラスチック製の低／中出力LEDは、LEDパネルライト、リニアアレイ、T8直管型照明交換用LEDなど、LED接合部温度（Tj）が最大で約70℃またはそれ以下に一貫して維持される一部の白色照明において、均一で滑らかな外観の照明を実現することができる。

これらの低／中出力のプラスチックLEDパッケージは価格が低いことから、コストと性能に関する設計上の厳しい制約に直面することの多いLED照明器具デザイナーにとって、魅力的な選択肢である。しかし、多くの低／中出力LEDの製造に用いられる材料は、一般的にLED接合部温度が容易に70℃を超えるほとんどの汎用照明に対し、不適切な選択肢である可能性がある。米クリー社（Cree）で行われるTEMPO

（Thermal, Electrical, Mechanical, Photometric, and Optical：熱、電気、機械、測光、光学）テストサービスプログラムでは、100℃の温度が頻繁に観測されている。

温度の影響

ここで、高温による影響を詳しく考察してみよう。ポリフタラミド（PPA）は、高温の車載用途で電気コネクタのハウジング材料に用いられることの多い熱可塑性樹脂である。エンジンコンパートメントの高い温度に、亀裂や変形を生じることなく耐久することができる。PPAは、プラスチックパッケージを採用するほとんどの低／中出力LEDの材料としても使用されている。

PPAプラスチックLEDパッケージ内では、チップから直接放射される光に加えて、**図1**に示すように、LEDチップが配置されるパッケージキャビティの明るい白色の内部表面から、膨大な量の光が反射される。

このようなLEDの材料としてPPAを使用することの問題の1つは、高温にさらされた場合、経時に伴って白い表面が変色して暗くなることである。また、蛍光体変換白色LEDに使用されるLEDチップが放射する青色の光子によって、PPA表面の変色はさらに進行する。その結果、LEDの使用に伴って、パッケージ内の反射率の高い白色表面は光を吸収し始めるようになり、それがLEDの光束の著しい低下につながる。

LM-80の試験

クリー社は、プラスチック製とセラミック製の両方のLEDパッケージに対し、IESNA LM-80-08「LED光源の光束維持率測定方法」に基づく長期的な光束維持率に関する詳細な試験を実施した。LM-80では、LEDを6000時間以上試験することを求め、さらに長時間の試験を行うことによって光束維持率の予測モデリングを高めることを推奨している。IESNA TM-21-11「LED光源の長期光束維持率の推定方法」においても同様に、6000時間以上の試験が推奨されている。TM-21における重要な点は「6X rule」（6倍の法則）である。これは、試験対象のLEDの有効寿命（L_{70}）として、実際に行ったLM-80累積試験時間の6倍を超える値を表記してはならないというものである。この法則は、一部のLEDパッケージが不安定であることに対する懸念から生まれたものであり、LEDメーカーによる光束維持率の誇大表示を抑える目的もある。

図2は、一般的な中出力（0.5W）のプラスチックLEDパッケージに対するLM-80試験結果を示したものである。LEDは、温度85℃、駆動電流175mAで試験した。上のグラフは、データセットのルーメン出力（% LF）、下のグラフは、試験を6048時間実施した後のデータセットの色度または色点のずれ（Δu'v'）を示している。TM-21で定められた方法でこのデータセットの光束維持率を推定すると、L_{70}はおよそ4万3000時間となる。ただし、6倍の法則に基づき、表示は3万6000時間以下とする必要がある。平均的な色度のずれは、マクアダム楕円（MacAdam Ellipse）で7-stepの範囲内で、米国環境保護庁

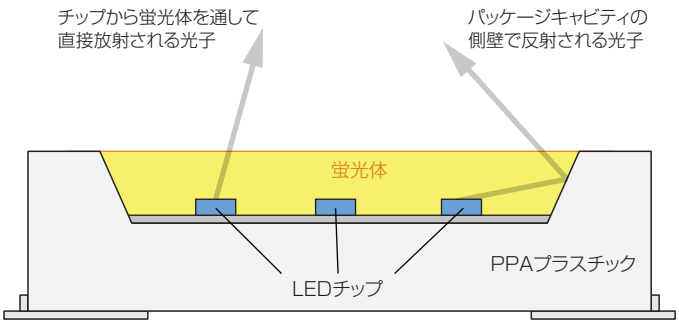
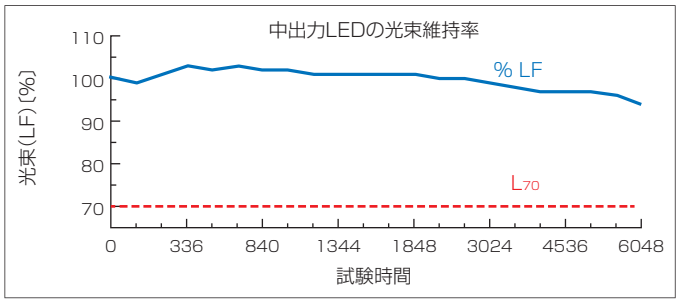


図1　プラスチックLEDパッケージの簡素化された断面図



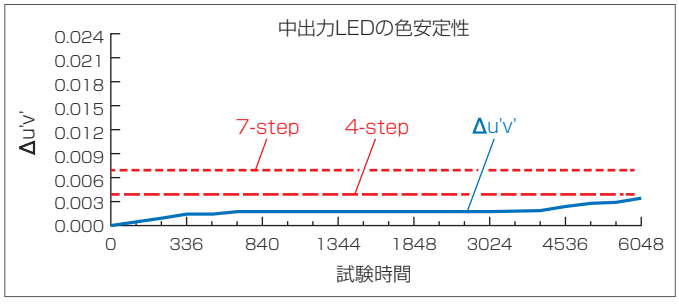
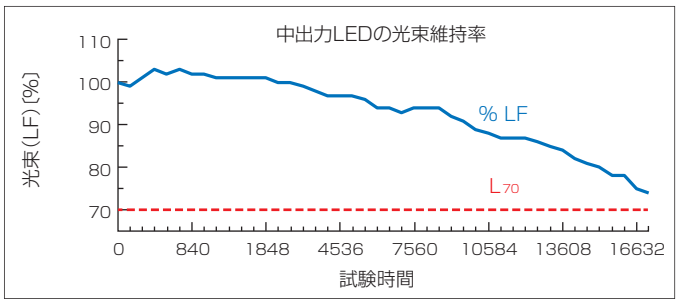


図2　中出力のプラスチックLEDパッケージに対してLM-80試験を6048時間実施した結果



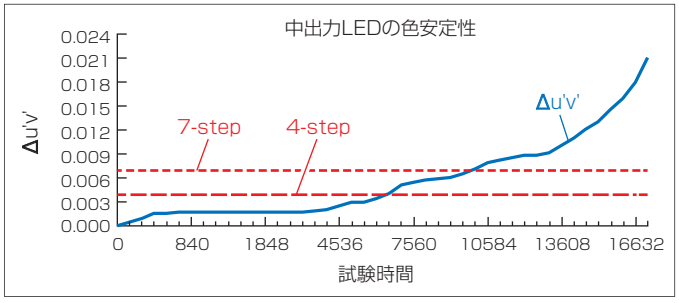


図3　中出力のプラスチックLEDパッケージに対してLM-80試験を1万7136時間実施した結果

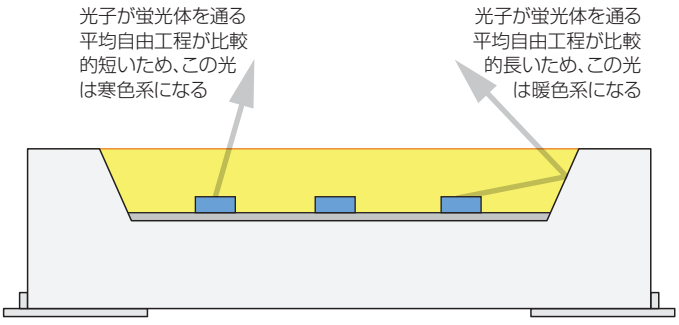


図4　使用開始時の新しいプラスチックLEDパッケージ。LEDの色点は、寒色系と暖色系の両方の放射光に依存する。

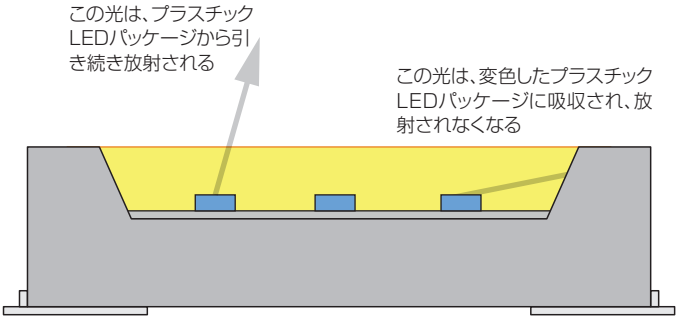


図5　使用後に材料が変色したプラスチックLEDパッケージ。光出力が低下するだけでなく、色点に青色へのずれが生じる。

（EPA：US Environmental Protection Agency）のEnergy Starプログラムで求められる基準を満たしている。この結果は、ほとんどの照明分野に対し、（Energy Starプログラムを含めて）一般的に十分と判断されるものである。

これらの安価なプラスチックLEDパッケージの隠れたコストが現れ始めるのは、同じデバイスに対してLM-80試験を6000時間以上行う場合である。**図3**は、同じLEDに対してLM-80試験を1万7000時間以上実施した後の様子を示したものである。PPA材料の変色に起因して、光束は著しく低下している。上のグラフからわかるように、LEDパッケージが光を吸収することから、L_{70}寿命は2万時間未満にまで急速に低下していく。また、材料の変色によるもう1つの結果として、色度がマクアダム楕円の20ステップ近くにまで大きくずれていく。これは、ほとんどの照明分野においても許容できないレベルである。

色ずれ

このような色度のずれは、プラスチックLEDパッケージに関する非常に深刻な問題であるにもかかわらず、議論されることはほとんどない。**図4**に示すように、プラスチックLEDパッケージの使用を開始すると、LEDチップからの放射光は、一部は直接蛍光体を通り、一部はパッケージ内部の側壁で反射する。直接蛍光体を通る青色光子の平均自由工程の方が、パッケージの側壁で反射する青色光子の平均自由工程よりも短い。そのため、直接蛍光体を通る放射光の色点は、反射光の色点よりも青色エネルギーが高く、寒色系になる。同様に反射光は、直接放射される光よりも黄色エネルギーが高く、暖色系になる。LEDパッケージ全体の平均的な色は、寒色系と暖色系の両方の放射光のすべてが組み合わされたものになる。PPAが変色すると、反射光はパッケージ側壁に吸収されるようになるため、**図5**に示すように色度の暖色系成分が減少する。その結果、色点はスペクトルの寒色系方向に大きくずれるようになる。

高出力LEDでは、プラスチックパッケージの低／中出力LEDに見られるこのような光束の低下や色度のずれは生じない。高出力LEDの製造に使用されるセラミック基板は反射面としては使用されないため、LEDチップから直接放射された光だけが、光束維持率と色点の初期値と長期的な値に影響を与

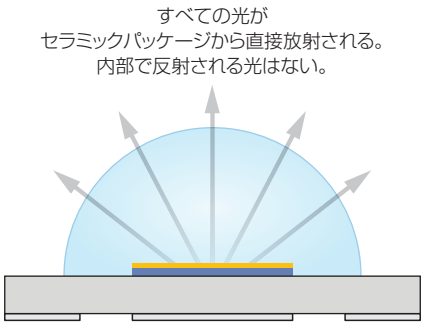
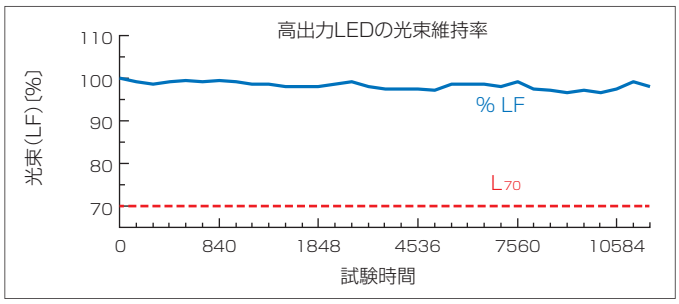


図6　一般的なセラミックLEDパッケージ



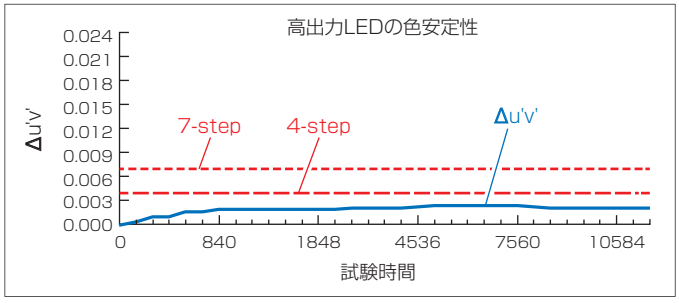


図7　高出力のセラミック製LEDに対してLM-80試験を105℃で1万1592時間実施した結果

える(**図6**)。

高温にさらされる場合でも、光束維持率と色点は、プラスチックパッケージのLEDよりもはるかに優れた安定性を示す。**図7**は、クリー社の標準高出力LED「XLamp XP-E」に対するLM-80試験データである。駆動電流350 mA、温度105℃で1万1000時間以上試験を実施した後でも、光束維持率と色点は優れた安定性を示すことが確認されている。

中出力パッケージの改良

LEDのパッケージ材料としてPPA樹脂を使用する場合には限界があることが知られていることから、クリー社は、従来の低／中出力LED製品と高出力セラミックLED製品の両者の利点を併せ持つ、新しいLED製品ラインを開発した。クリー社の新しい「XH」ファミリのセラミック製LEDは、プラスチック製の低／中出力LEDと同じ滑らかな照明を実現しつつ、元々は民生用途向けに設計された、PPAを採用する従来のプラスチック製LEDの隠れたコストである色ずれや信頼性の問題はない。

プラスチック製かセラミック製か、低／中／高出力であるかにかかわらず、すべてのLED部品の光束維持率を推定するための共通基準であり、業界標準の方法は、LM-80試験を実施することである。TM-21では、光束維持率を推定するためにLM-80試験を6000時間実施することを最小要件としているが、さらに長い時間LM-80試験を実施すれば、より正確な予測が可能となり、照明器具デザイナが、経時に伴う光束の低下や色ずれに悩まされるリスクを軽減することができる。LM-80試験が、多数のLED部品に対して引き続き実施され、累積試験時間が膨大な量になるにつれ、劣化のメカニズムに対する理解はさらに深まり、実験室での試験結果を実世界の照明分野に適用する能力も高まっていくだろう。

市場に現在提供されている低／中出力LEDは、LED TV市場の需要を予測して、LED製造業界がLEDチップとプラスチックパッケージの製造設備に過剰に投資したことに大きく起因する産物である。好都合な結果がLED照明業界にもたらされたことにより、LEDパネルライトやT8直管型照明交換用LEDが普及した。また、汎用LED部品の価格の大幅な低下にもつながった。しかし、LED接合部温度が70℃を大きく超えることが多い大多数の一般的な照明分野に対し、安価なプラスチック製LEDは、信頼性、光束維持率、色安定性が低いという隠れたコストを露呈する恐れがある。

LED照明器具のデザイナーは、LM-80試験を1万時間以上実施して正式に認定されたデータ報告書をLEDメーカーに求めるべきである。そしてその結果を、対象用途で予測される動作条件と慎重に照らし合わせる必要がある。

プラスチック製の低／中出力LEDは、一部の照明分野に対して合理的な選択肢かもしれないが、真に照明クラスのLED(一般的にはセラミック基板をベースとする)は、ほとんどの照明分野において優れた光束維持率と色安定性を示すことが実証されており、長期間にわたって色、コスト、エネルギー節減性能に対する期待に応えることができる。

著者紹介
ラルフ・タトル(RALPH TUTTLE)は、米クリー社(Cree)アプリケーション・エンジニア・マネージャー、マーク・マックリア(MARK McCLEAR)はアプリケーション・エンジニアリング担当副社長。

LEDJ