

綿密な設計による ハロゲンに似たLED調光の実現

ウーヴェ・トーマス

LEDで黒体放射曲線に近い軌跡を実現するのは、黒魔術でなければならないというわけではない。本稿では、SSL製品を暖色系のCCT (Correlated Color Temperature : 相関色温度)に調光するという課題にうまく対処する手法を紹介する。

人間は慣れている環境を快適に感じ、予期しない状況を不快に感じる。ハロゲン電球や白熱電球の明るさを落とす(調光する)場合、電球のフィラメントを流れる電流が減少する。フィラメントの温度が低下し、スペクトルの赤色側で放射する割合が増加して暖かい光が生成される。その結果私たちは、照明を落とせば、暖かくくつろいだ雰囲気演出されるものだと期待するようになっていく。LEDは、白熱発光ではなく電界発光という異なる物理的メカニズムによって光を生成する。この場合、ルーメン出力を低下させるためにLEDダイを流れる電流が減少しても、色温度は大きく変化しない。LEDとSSL (Solid State Lighting : 固体照明)システムは、ハロゲン電球のように調光するように設計する必要がある。

指向性のハロゲン電球は、ホスピタリティ環境においてよく使用されている。しかしこのような用途においては、今や詳細に文書化されているハロゲン電球に勝るLED照明の利点が望ましい。特に、LED光源は電気から光への変換効率が格段に高いため、エネルギーの節減と、より低温での動作が可能である。しかし、LED光源をハロゲン光源と同じような色変化で調光し、それとともに色品質を維持するために

は、LEDエミッタおよび照明器具の設計者は、大きな技術的問題に対処しなければならない。

ここでの目的は、調光時に理想的な黒体放射曲線に近い軌跡を描くLEDエミッタを見つけることである。ハロゲン光源よりもこの曲線に近いものが見つかるならば、なおさら都合が良い。この目的を達成する方法を理解するには、技術的かつ商業的に実現可能な、ハロゲンのように調光できる指向性LED照明器具を構成するLEDダイ、基板、光学部品、制御電子回路の具体的な要件を検討することが重要である。

ハロゲン電球の調光時の仕組み

まずは、ハロゲン光源の仕組みをさらに詳しく見てみよう。金属を加熱すると光を発することは誰もが知っている。その光は、電磁放射の一種の熱放射で、金属内の荷電粒子の熱運動によって生じる。光の色は、赤から橙、黄色、白と変化し、最後は青色になる。この光の明るさは、対象の材料によって異なるが、スペクトル分布は材料には依存せず、温度のみに依存する。黒体は、受けた電磁放射を完全に吸収する理想的な物体のことである。黒体は、エネルギーを伝達したり反射したりすることはない。黒体が加熱されるときに放射する光の周波数つまり色温度

は、黒体放射に関するプランクの法則に基づく公式に従って、グラフに表すことができる(図1)。

ハロゲン電球は、ガラス管の中に吊るされたタングステンフィラメントに電流を流すことによって機能する。管内には少量のヨウ素または臭素(ハロゲン)が封入されており、これによって蒸発したタングステンが、ガラス管の内側ではなく、フィラメントに再び沈着する。タングステンフィラメントから放射される光は、黒体曲線にかなり近い軌跡を描くが、理想的な黒体曲線からはややずれるため、一部の温度において緑色を帯びた色合いが生成される。CRI (Color Rendering Index : 演色指数)で定義される色品質は、ハロゲン電球の調光時に適切に維持される。

LEDの調光が異なる理由

LEDからの光は、熱放射によって生成されるものではない。LEDは電界発光によって光を生成する。材料(一般的には半導体)内で電子と正孔が再結合するとき発光が生じる。発光のスペクトル、つまり色は、半導体の構成材料と蛍光体(LEDダイの被覆に使用される化学物質)によって主に決まる。そのため、流れる電流の量を減少させてLEDを調光するとき、熱放射は放射光全体に対して無視できるほど小さ

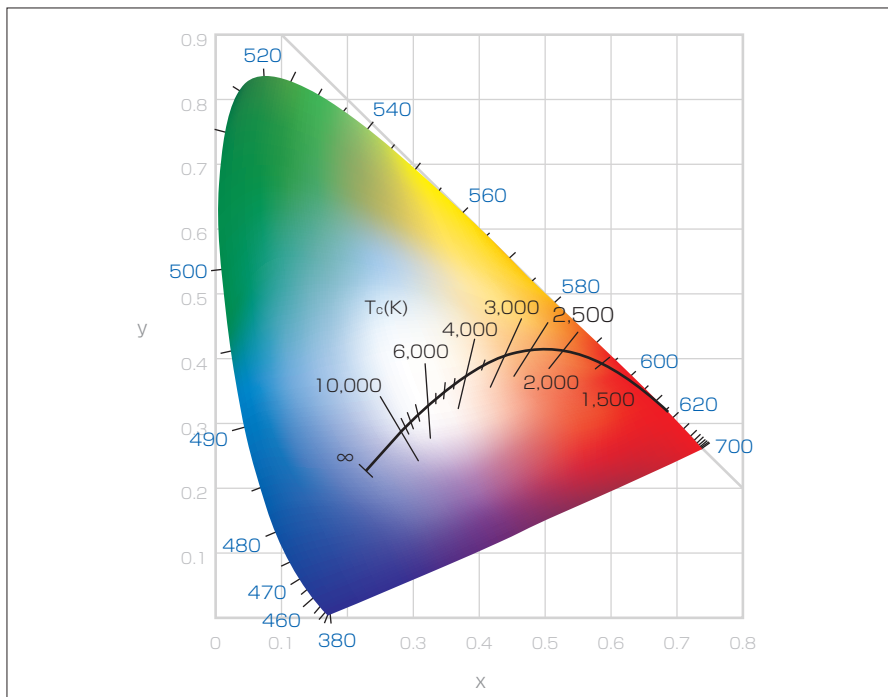


図1 黒体を加熱すると、その放射光の色温度 (T_c) は、黒体放射に関するプランクの法則に基づく公式に従って、グラフに表すことができる。

く、色温度の変化は非常に小さくなる。実際、LED 調光時の色相の変化は、人間の目ではほとんど確認できない。

私たちはハロゲンのような調光と、ハロゲンの調光時に維持される高い CRI 値に慣れ親しんでいる。CRI の違いは、肌の色合いに最も顕著に表れる。CRI が一定の場合、光度を低下させても肌の色合いは自然な状態に保たれる。人間の目は色の変化にきわめて敏感で、明るさの小さな変化よりもはるかに強くそれに反応する。日中は、人間は青い光に最も敏感で、色の変化に敏感であるのは、それに起因するところが大きい。私たちは、スペクトルの緑と赤の領域を通して細部を識別しており、主に緑色領域の範囲内で輝度の変化を認識する。ちなみに、純粋な白色は、定義上は緑 76%、赤 22%、青 12% の光で構成される。

私たちはハロゲンの調光に慣れていて、その効果に親しみと快適さを感じ

る。照明の明るさを落としたときに、暖かみのある白色が生成されないとすれば、不自然に感じてしまう。レストラン、バー、ホテルといったホスピタリティ環境においては、それはまったく望ましくないことである。

最も重要な特性

調光時に、LED 光源の色を黒体曲線などの軌跡に沿って変化させるには、少なくとも 3 種類のダイからの光を混合して、さまざまな白い色合い、つまり色温度を生成する必要がある。白色 LED エミッタを製造するには、青色の LED ダイを赤色と黄色の蛍光体を配合したもので覆う。445 ~ 455nm の波長の光を生成するダイを使用するのが最も一般的だが、それよりも長い波長を生成するものが採用される場合もある。ダイ波長と、黄色/赤色蛍光体の配合の組み合わせによって、望ましい色を生成する。

蛍光体は、個々のダイにスライスする前の LED ウエハ上に塗布するか、またはダイ上に直接プリントする。後者の方法では、蛍光体層に対する直接の熱経路が生成され、蛍光体をより低い温度で作用させ、蛍光体の特性をより一貫したものにすることができる。その場合、ダイからの光は、3 ステップのマクアダム楕円 (MacAdam ellipse) の範囲内に収まる可能性がある。複数の異なるダイと蛍光体の構成を組み合わせ、単一の高密度パッケージ内で混合することにより、1800K ~ 5500K の範囲の色温度を生成することができる。

効果的に光を混合するには、LED ダイを基板の上に密接させて配置する必要がある。LED に電流を流すと熱が生成される。熱は、動作期間にわたる安定性に影響を与えるが、電流を制限するとルーメン出力が低下してしまう。このトレードオフには、2 つの方法で対処することができる。ダイを基板に接着するのに接着剤を使用すると、それが大きな熱障壁となり、LED ダイからの有効な放熱が抑制される。接着剤の代わりに、それよりもはるかに熱伝導性に優れた金共晶ダイ接着プロセスを利用する独自開発技術を採用する方が望ましい。LED ダイに厳密に一致する熱膨張率 (CTE : coefficient of thermal expansion) を持つ複数層のセラミック基板を使用すれば、ダイ加熱時の影響を最小限に抑えることができる。

この技術の組み合わせによって、接合部温度を損傷が生じるほど高くすることなく、ダイをより高い電流で駆動し、より小さなパッケージからより多くの光を生成することができる。ダイ上にはガラス製の一次レンズを使用するため、シリコンレンズのように時間の経過とともに劣化することがなく、エミッタの動作期間を通して色の安定

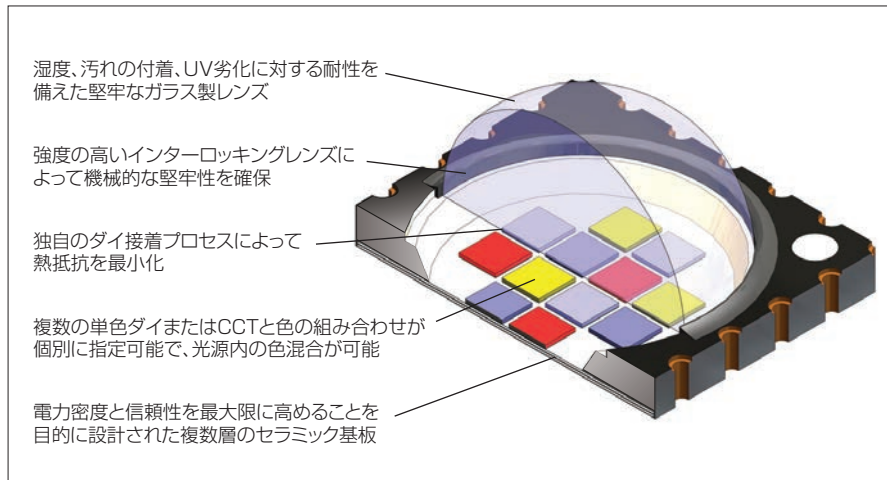


図2 独自開発技術を組み合わせることにより、コンパクトなエミッタを使用し一貫した高品質の光を生成することができる。生成した光は、二次TIRレンズを使用して正確に集束させることができる。

性が維持される。色の混合はダイの近くで開始し、慎重に適合させた二次光学部品を使って完了させることができる。二次光学部品は、内部全反射(TIR: Total Internal Reflection)設計による、ビームの高い集束性の実現にも寄与する(図2)。これによって、一貫した光品質がビーム全体にわたって実現される。

コンパクトなエミッタをそれに合った

二次光学部品とともに使用すれば、ターゲットにおける明るさを、従来のエミッタとリフレクタの組み合わせの2倍にできることが実証されている(図3)。また、コンパクトなエミッタとレンズを組み合わせると、ビームエッジが円滑になり、ターゲット領域外に放射される光が最小化され、不要なグレア(まぶしさ)が低減される。これは、ホスピタリティ環境やその他の専門照明分野にお

ける重要な要求である。

ドライバ制御の統合

以上で説明したエミッタ技術と、エミッタとレンズに関する技術を組み合わせ、調光可能な白色LEDプラットフォームの基盤とすることができる。例えば、米LEDエンジン社(LED Engin)が開発した「LuxiTune」は、エミッタに、二次TIR光学部品と内蔵ドライバが組み合わされている(図4)。このモジュールは、照明器具メーカーによる新製品の市場投入期間を短縮することができる。

このモジュールでは、12個のダイで構成される単一のエミッタが、3つのチャンネルを介して駆動される。つまり、4個のダイからなるグループが3つ存在する。基板は、各LEDダイを個別に駆動できるように設計されている。二次光学部品は、24°、32°、または45°のビーム幅を生成し、無駄な光やグレアを最小限に抑える。

モジュールの構成要素であるエミッタが実装されるプリント回路基板には、ダイの各グループに対する相対的

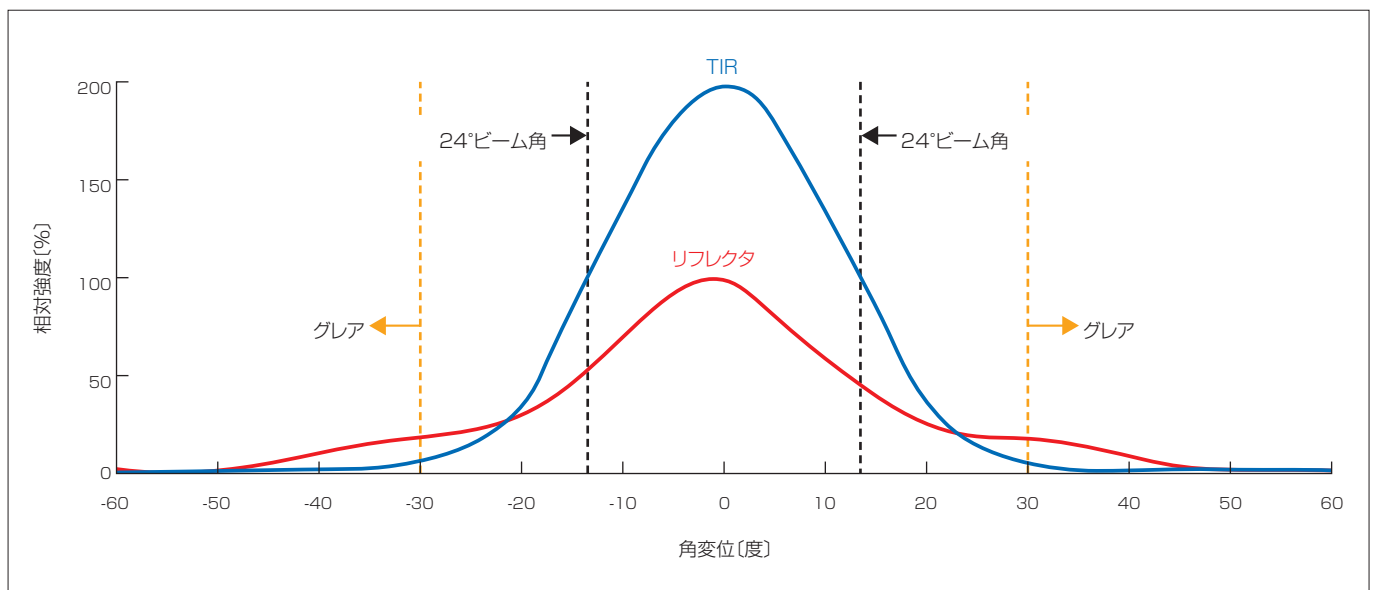


図3 LEDエンジン社のTIRと従来のリフレクタ技術で、視野角にわたる強度分布を比較したグラフ。コンパクトなエミッタにTIRレンズを組み合わせることによって、ターゲットにおける明るさは2倍になり、グレアは最小限に抑えられる。

な駆動電圧を決定する制御電子回路が集積される。各グループからの光に三角測量を適用することによって、色温度は、最大ルーメン出力における3000Kから、最大出力の2%未満までに完全に調光した場合の1800Kまで変化する(図5)。制御基板には、広く使用されている低価格で業界標準の0-10V調光器または押ボタン式制御スイッチへのインタフェース回路が含まれている。DMXインタフェースはオプションとして提供されている。このプラットフォームは、単一の非調整型24V電源で動作する。この電圧を供給するAC-DC電源は、低価格で簡単に入手できる。

制御は、マイクロコントローラ上で実行する独自開発のアルゴリズムを使用して行われる。プログラミングによって、動作温度範囲全体にわたる色温度と光束の一貫性が保証され、再校正が必要になることはない。

上述のプロセスと技術により、エミッタの色温度は3ステップのSDCM (Standard Deviation Color Matching: 等色標準偏差) またはマクアダム楕円の範囲内に収まる一貫したものになることが保証される。したがって、設置されたすべての照明器具において同一の性能が実現される。3000KでCRI 90、R9 80が達成可能で、調光範囲にわたるCRIの平均は85、赤色成分であるR9の平均は70である。通常出力は1100 lmで、TIRレンズからの安定した温度が維持される。消費電力は17.3W、発光効率率は63 lm/Wである。

最大出力において、このようなエミッタは60Wのハロゲン光源とほぼ等価だが、最大で70%のエネルギーを節減することができる。さらなる利点として、ハロゲンよりもかなり低い温度で動作するため、高温の照明器具に生じ



図4 コンパクトなエミッタ、二次光学部品、ドライバ制御基板によって、LEDの利点をすべて維持しつつ、ハロゲン式の調光機能を簡単に実現することができる。

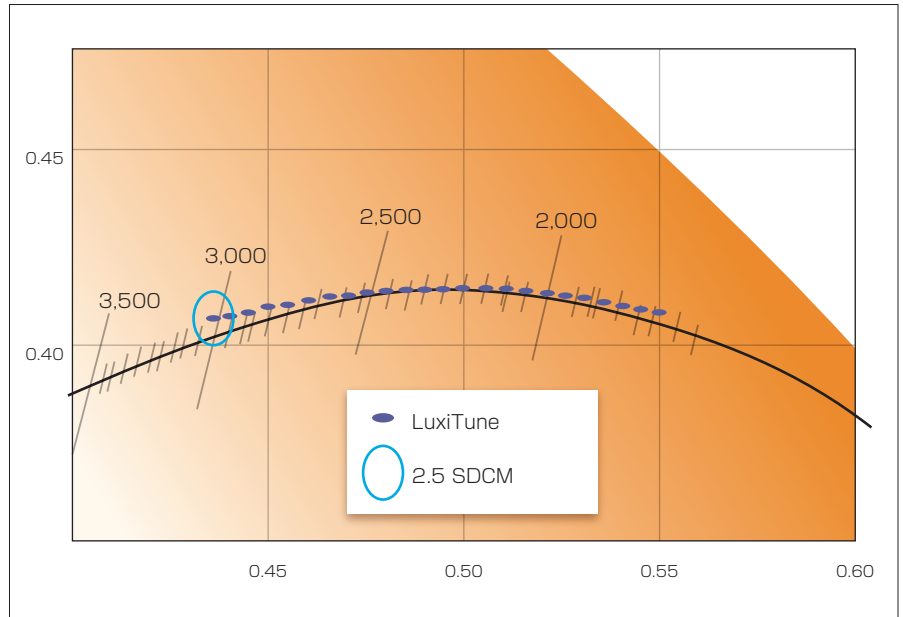


図5 「LuxiTune」のCCTは、黒体曲線に非常に近い軌跡を描く。

る安全性の問題が取り除かれる。

LEDダイの選定と被覆、ダイの基板への接着、基板の設計、一次および二次光学部品の設計、制御電子回路に対する独自開発技術を組み合わせることにより、コンパクトで効率的で経済的

なLED光源で、ハロゲンに似た調光を容易に実現するための解決法が創り上げられていく。

著者紹介

ウーヴェ・トーマス(UWE THOMAS)は、米LEDエンジン社(LED Engin)の製品管理担当副社長。