チャレンジが続くSSLと制御技術の融合

イーサン・ビアリー

LEDの調光および制御に関する業界の状況を説明し、適切に照明仕様を定めるための方法を提案する。

LED光源は、エネルギー効率の高さ、寿命の長さ、そして、新たな形状の照明器具を開発することによってほとんどすべての用途に使用可能であることを理由に、急速に普及している。LEDは効率が非常に高く、耐用期間は平均5万時間と長く、演色性にきわめて優れている。また、LEDランプは赤外線（IR）の放射が非常に少なく、水銀を含まない。このような明らかな利点を持つ反面、LEDランプ、ドライバ、制御の間の互換性の問題が、仕様作成者やその顧客を悩ませ続けている。不適切な組み合わせでそれらを使用すると、性能が損なわれてしまう。

LED製品選定時の最良の戦略は、用途の種類、求められる調光性能、制御要件を含む、さまざまな要因を考慮に入れた包括的なアプローチをとることである。提案する照明システムが最良の選択肢であることを顧客に納得してもらうためには、モックアップ設置や、コストと時間のかかるテストが必要かもしれない。LED部品や制御を提供する多くのメーカーが、調光の試験や研究にますます多くの時間と労力を投入しており、LEDランプ、ドライバ、制御を適切に実装するための互換性情報はこれらのメーカーから入手することができる。

基本的な効率以外の効果

LEDは、その設計上エネルギー効率が高い。LEDランプや照明器具を使用するだけで、その施設は、消費電力とコストを削減しつつ、ビルやエネルギーに関する最新の規定を満たすことができる。ではなぜ、わざわざLEDを調光しなければならないのだろうか。その目的は、他の任意の光源の制御と同じである。つまり、最大限にエネルギーを節減すること、システム寿命を延長すること、柔軟性を高めること、生産性を向上させること、そして、ビルを利用する人々に安全で快適な環境を提供することである。また、エネルギー効率に関する多くの規格が、より高度な照明制御機能を義務付けるように更新されつつあり、それによって実質的に、多くの応用分野において調光が義務付けられることになる。

シンプルなスイッチや調光器から、一元化された照明制御システムにいたるまで、多様な制御方法が存在する。それによって最大限の柔軟性を実現するとともに、測定およびレポート機能を提供し、設置された照明と制御によって達成されるエネルギー節減を分析できるようになっている。洗練された構成可能なシステムならば、設置後の実際の占有状況に基づいて照射範囲を調整することができる。これによって時間の経過とともに、設計時の目標よりも低いエネルギー密度を達成できる可能性がある。さらに、容易に実装可能なワイヤレス制御によって、交換作業は簡単になり、設置とプログラミングのコストは低下し、ROI（Return on Investment：投資回収率）は向上する。

どの制御システムを選択する場合でも、所望のLED負荷に対する互換性

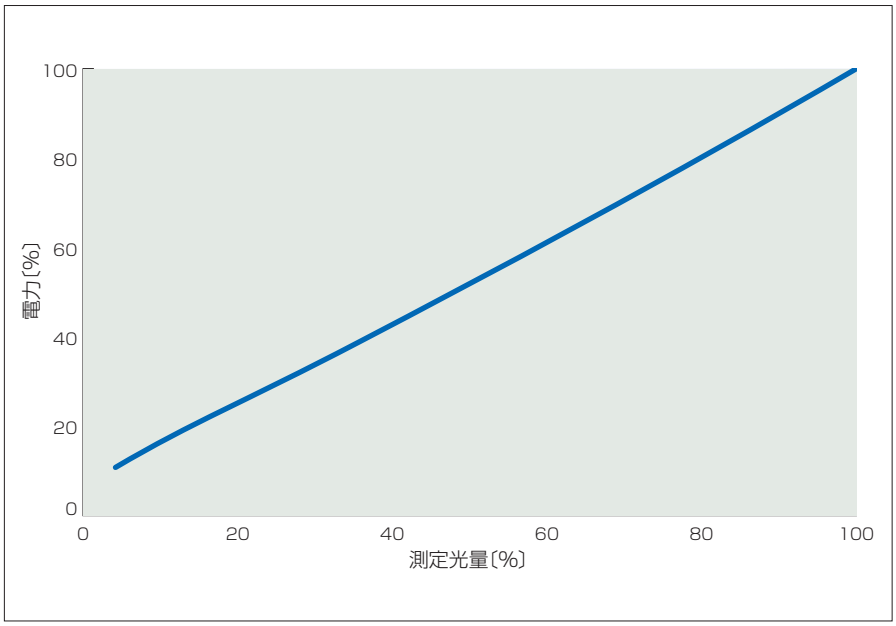

図1　LED照明の調光レベルと消費電力には比例関係がある。

と性能を保証することのできるメーカーと協力することが不可欠である。そうすることで、LED設置時に遭遇する一般的な懸念や問題の多くを解消することができる。以下では、調光機能を導入する理由と方法について詳しく説明する。

節減効果とシステム寿命の最大化

LEDを調光すれば、およそ1:1の比率でエネルギーを節減することができる。その節減効果は、蛍光灯の調光と同等かそれを上回る。つまり、LEDの輝度を50%低くすると、そのエネルギー使用量は50%近く節減される(**図1**)。LEDが、他のほとんどすべての光源と比較して既に非常に効率が高いのは事実だが、それを調光することによってさらに高いエネルギー節減効果が得られることになる。

またLEDを調光すれば、動作時の温度が低くなり、ドライバ内の電子部品と、LEDの中の蛍光体の寿命が長くなる。これによって、LEDランプまたはモジュールの耐用期間は2～3倍にもなる可能性がある。LEDの調光と寿命の延長の関係をより適切に定量化する方法については、引き続き研究が行われている。

ただし、プロジェクトのニーズを満たす照明器具、ドライバ、制御の組み合わせを選択する必要がある。LEDは順調に進歩を遂げており、現在では、汎用照明、ダウンライト、コーブ照明、屋外照明など、実質的に任意の種類の照明器具の代替となるLED製品が存在する。どのような種類の制御を選択するかは、どのような結果を求めているかによって異なる。例えば、ロビーや吹き抜けになった空間では通常、最小調光レベルは20%でよい。しかし、会議室やレストランでは、1%まで調光された非常に低い照明レベルが望ましい場合が多い。

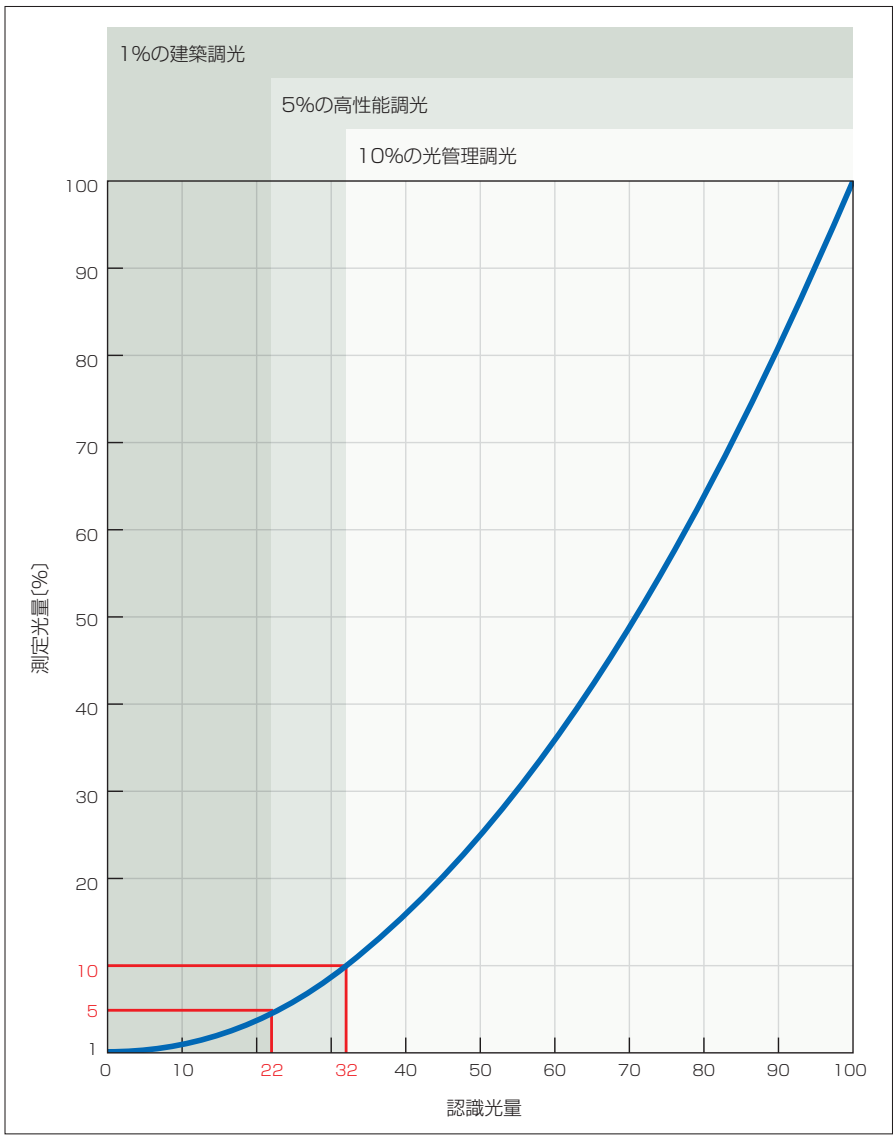

図2　人間の目は、調光された光源からの光を、実際の出力よりもかなり高い照明レベルとして認識する。

LEDの調光範囲の重要性は見落とされがちである。10%の調光は、ほとんどの用途に対して適切であるように思われるかもしれないが、人間の目はときに敏感になりすぎる場合がある。目の瞳孔が開いている場合には、輝度の低い光が思ったよりも明るく感じられることがある。例えば、10%の照明レベルが33%程度に感じられる場合がある。1%に調光された照明が、10%の明るさに感じられる場合さえある(**図2**)。

予測される調光範囲は、製品仕様に必ず記載されるべきだが、メーカーは必ずしも調光範囲を明らかにしているとは限らない。また、同じLED負荷であっても、適用される制御によって調光範囲は変わる可能性がある。設計者や仕様作成者は、提案するLED負荷と制御の組み合わせによって達成可能な最小の調光レベルを確認しておく必要がある。

すべての構成部品や要素を慎重に評

価しなければ、調光可能製品が仕様どおりに動作しないことになりかねない。例えば、決して完全に消灯することができなかったり、ちらつきが生じたり、調光の途中で急に点灯／消灯（調光範囲よりも点灯範囲の方が狭いために生じる）したりする可能性がある。これではエンドユーザーに対し、LEDは常に適切に調光できるわけではないのだという印象を与えてしまう。

調光に関する問題

LEDは本質的に調光や制御が可能であると一般的には認識されている。ではなぜ、LEDの調光には、これほど多くの問題が伴うのだろうか。その理由は、LEDと、白熱電球やハロゲンランプといったそれ以前の光源との間の物理的な違いにある。

白熱電球は、低圧のガラス管内でタングステン線を高温に加熱することによって光を生成し、白熱光を発する。電気的にはきわめて単純なデバイスであり、光源への供給電圧を上げるほど、高温になり、多くの光が生成される。従来の光源に対しては、電圧波形の形状はまったく関係がなかった。交流、直流、位相カットなど、ほとんどすべての電圧波形によって、RMS電圧が同じならば同じ量の光が生成される。

LEDの動作は、これとはまったく異なる。光は、特別に設計された半導体物質の原子内プロセスによって生成される。あるLEDデバイスにおいて、生成される光の量は、そのデバイスを流れる（電圧ではなく）電流の量に比例する。さらに、LED内で電流は、一方向にしか流れることができない。つまり、LEDには直流電流しか適用できない（いわゆるAC LEDは、一部のダイオードに対してある一方向に電流が流れ、その他のダイオードにはもう一方向に電流が流れるように、2個のダイオードを接続するという工夫がなされていることに注意してほしい）。最後に、LEDは本質的に低電圧デバイスであり、電源配線からの電圧を大幅に低下させることが通常は必要になる。電圧の低下と直流への調整、電流の制御といったこれらの機能はすべて、LEDドライバと呼ばれるデバイスで行われる。

LEDドライバは、さまざまな設計、構造、機能セットで提供されているが、すべてのドライバに共通するのは、白熱電球の負荷とは電気的特性が異なるという点である。そしてこの違いこそが、制御とLEDの間の互換性の問題を引き起こす根本原因である。

ドライバに対してどのような要件を優先させるかは、メーカーによってそれぞれ異なる。コスト、サイズ、寿命など、メーカーが優先して最適化する項目はさまざまである。ドライバ設計の一部は、どの程度の調光機能の精度と範囲を、どのような制御によって実現するかという判断に影響を与える。このことから、次の2つの重要な結論が導き出される。

ドライバの設計によって、達成可能な最大調光性能が決まる。

ドライバと制御の互換性によって、ドライバがその最大調光性能に対し、実際にどれだけの性能を達成するかが決まる。

つまり、最良の制御を採用したとしても、LEDランプの設計パラメータを上回る調光機能を実現することはできない。ドライバ設計と、ドライバと制御の組み合わせのどちらが不適切であっても、ちらつき、調光途中の消灯、調光器を少し操作しても明るさが変わらない現象、ノイズ音（耳鳴りのような音）といった、望ましくない外観上の問題が生じる可能性がある。

さらに、ドライバ設計や、ドライバと制御の組み合わせが不適切である場合は、制御や負荷の寿命が短縮する恐れがある。優れたドライバは、多様な制御に対して、寿命に悪影響を及ぼすことなく、非常に低い照明レベルまでの滑らかで連続的な調光を保証し、人々が白熱電球に期待する調光性能と同等の性能を実現する。照明業界には現在、このような優れたドライバを高い信頼性で製造できるドライバメーカーはほとんどない。

期待される性能の確保

顧客の期待に適切に応えるLEDシステム性能を実現するには、LEDプロジェクトの設計過程において、以下に示すいくつかの項目について検討する必要がある。

- 負荷の種類（交換用ランプか照明器具か）
- 求められる制御の種類
- 制御に対する許容負荷個数
- 負荷と制御の組み合わせによって実現される調光性能

この作業に役立つ情報については、信頼できるメーカーから提供されている、選定プロセス向けの参考資料を参照してほしい。例えば、米ルートロン・エレクトロニクス社（Lutron Electronics）は「LED Control Center of Excellence」を提供している。以下では、個々の項目について詳しく説明する。

LED光源は、2つの基本的な種類に分類される。つまり、交換用ランプ（ねじ込み式ランプまたはLEDランプと呼ばれることもある）と、LED照明器具である（**図3、4**）。用途が異なれば、必要となる解決法も異なるが、調光の互換性の観点からは、両者には顕著な相違点が1つある。LED交換用ランプは、固定のドライバがランプに組み込まれて

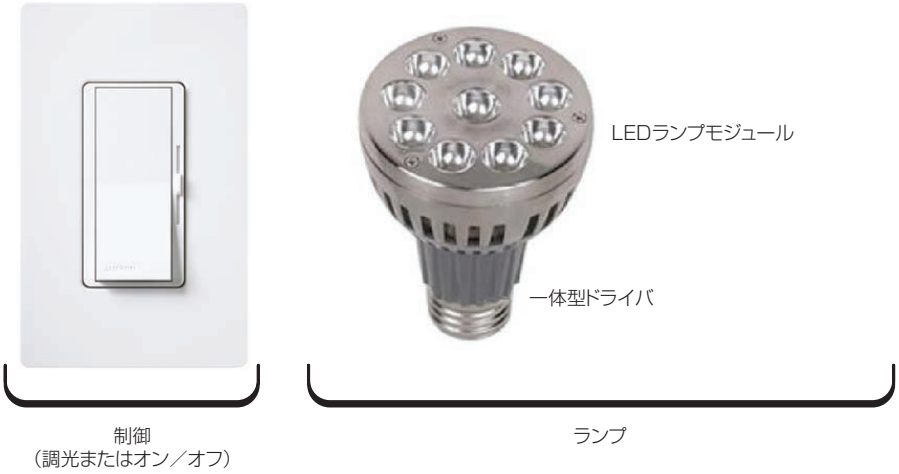

図3　LEDランプには、制御オプションが限定された一体型ドライバが組み込まれている。

おり、位相カット調光でしか制御することができないのに対し、LED照明器具には、仕様作成時にドライバが選択可能で、調光性能や、どの制御と互換性があるかが多種多様なドライバの中から、選択できる場合がある。

交換用ランプを使用する場合、実証されたランプと制御の組み合わせであっても、ランプの公表性能によって、性能の限界が定められる。それ以上の性能を達成するには、異なるランプを選択する必要があるかもしれない。異なるメーカーのランプを選択しなければならない場合もあるだろう。照明器具に対しては、ほとんどのメーカーが多様なドライバを提供しており、照明器具の外観や光学的性能に影響を与えることなく、事前に調光性能を選択することができる。

汎用照明に対しては、次の4つの主要な制御方法が存在する。

- 順位相制御
- 逆位相制御
- 0－10Vアナログ制御
- デジタル制御（DALIまたはEco System）

それぞれの方法に長所と短所があるため、用途によって適切な方法とそうでない方法がある。しかし、照明デザイナや仕様作成者は照明器具や制御システムを選択する際に、LEDと制御の互換性の面でどのような影響があるかを完全に理解しないまま、それを選択する場合が多い。ここで、ランプや照明器具に対する、DMXやダイレクトワイヤレス制御といった他の制御機構も存在するが、これらの方法は今日の汎用照明には広く採用されていないことに言及しておく。

順位相制御

順位相制御は現在、圧倒的大多数の調光器に採用されており、世界中でかなりの割合を占め、北米だけでも1億5000万個の調光器が存在すると推定される。したがって、多くのLED負荷が、順位相調光器との互換性を持つ。順位相調光器は、60Hz、120V（北米の場合）の電源電圧の正弦波の前部分をカットする（ゼロにする）（**図5**）。電源電圧のカットによって、照明器具に供給されるRMS電圧が低下する。正弦波の多くの部分をカットするほど、電圧は低下し、負荷が消費するエネルギーは低減する。この方法が非常に広く採用されているのは、簡単で、一般的に安価で、照明器具への既存の接続配線を使用するためである。

最近リリースされたNEMA SSL7-A

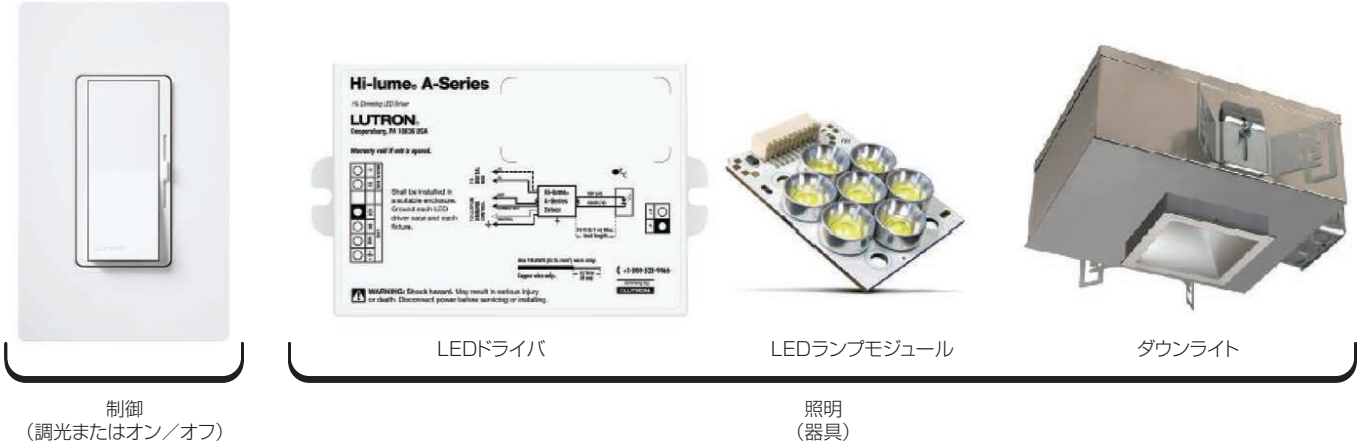

図4　照明器具に対しては、所望の適応型制御に対応するドライバを選択できる場合が多い。

規格は、信頼性の高い動作を保証することを目的に、順位相調光器とLED負荷の適切な動作の定義を支援するものである。同規格には、基本的な予測性能も規定されている。LED負荷と制御がSSL7準拠と表記されていれば、順位相制御の互換性について、推測で作業を進めるようなことはほぼなくなるはずである。

逆位相制御

逆位相調光器の動作は、順位相調光器とほぼ同様である。どちらも、正弦波の一部をカットすることによって、負荷に供給されるRMS電圧を低下させる。ただし、正弦波の前部分を除去する順位相調光器とは異なり、逆位相調光器は、正弦波の後ろ部分をカットする（**図6**）。順位相調光器と同様に、これによって照明器具に供給されるRMS電圧を低下させ、また、既存の配線を使用する。

この方法はもともと、低電圧ハロゲンランプの電子低電圧（ELV：Electronic Low Voltage）トランスの制御用に開発されたものである。これらの負荷は、ライン電圧トランスと比べて市場に占める割合がかなり小さい。そのため、逆位相調光器が採用されるケースは、順位相調光器と比べるとかなり少ない。設置済み調光器のうち、ELV負荷と互換性のあるものの割合は、ほんのわずかである。しかし、ELVトランスとLEDドライバは電気的性質が似ているため、逆位相調光器のみに対応するドライバを開発するドライバメーカーも、いくつか存在する。

0－10Vアナログ制御

既存配線のみを使用する上述の2つの方法とは対照的に、0－10Vアナログ制御では、制御から各照明器具への2本の低電圧配線が別途必要である。この低電圧配線ペアによって信号がドライバに供給され、その信号によってターゲットとする照明レベルが決まる。電圧が1Vの場合、ドライバは調光範囲の下限への制御を行い、10Vの場合は、調光範囲の上限への制御を行う。一般的に、システムには、照明消灯時にドライバへの電源を遮断するためのライン電圧スイッチも含まれる。この動作は、IEC規格60929に規定されている。同規格で規定されるのは、最も基本的な機能のみである。例えば、低い照明レベルへの調光が滑らかに連続的に行われることを、同規格は保証しない。異なるメーカーが提供する0－10V制御対応の照明器具を混在させて使用したり、0－10V信号用に長い配線を使用したりすると、複数の照明器具の照明レベルに、目に見えるばらつきが生じる可能性がある。

0－10V制御は、電源配線とは独立した配線による制御が可能だが、複数の制御が必要な場合に対して、本質的に欠点がある。当然ながら、同一の0－10V配線ペアに接続されるすべての照明器具は、同時に制御され調光される。このため、異なる制御入力（昼光セン

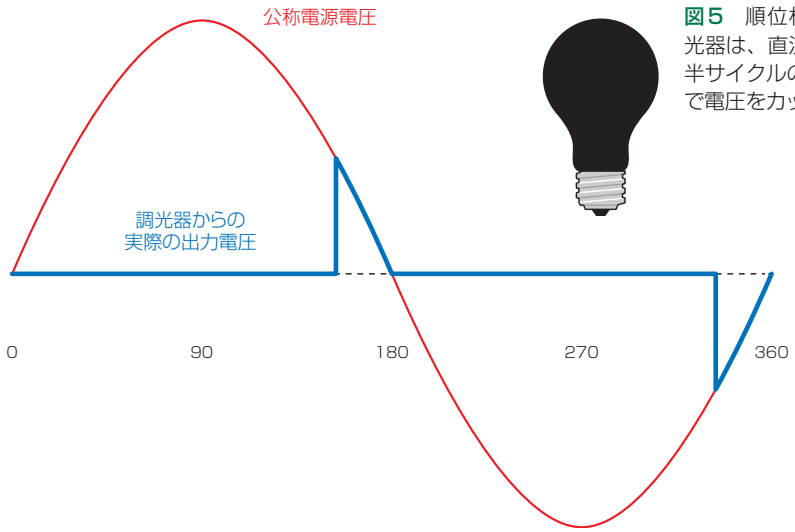

図5　順位相カット調光器は、直流電源の各半サイクルの先頭部分で電圧をカットする。

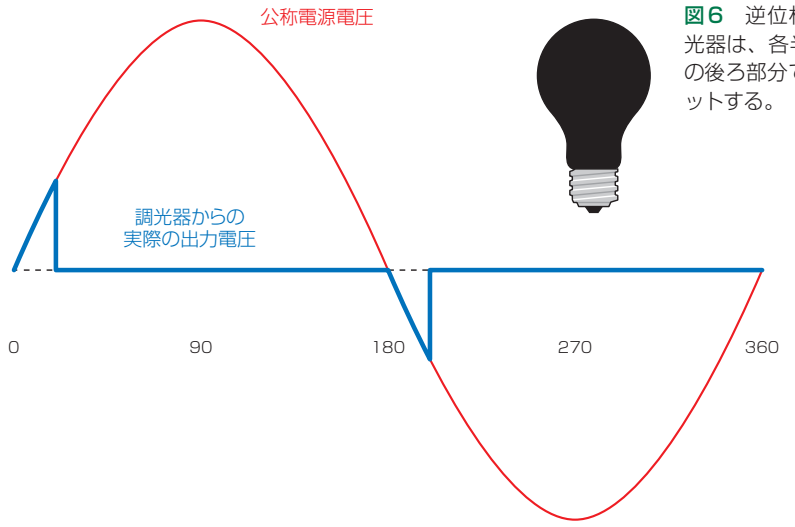

図6　逆位相カット調光器は、各半サイクルの後ろ部分で電圧をカットする。

サ、個別ゾーン制御、占有センサなど）に応じて照明器具を異なるレベルに調光する必要がある場合など、複数の種類の制御を採用する空間では、室内を複数の制御領域に分割し、それぞれに独自の0－10V配線を追加する必要がある。負荷に対する0－10V制御は、非常に簡単な場合を除くすべての用途に対して、設計と設置がかなり複雑になる場合がある。0－10V制御のその他の欠点として、機能や照明器具のゾーニングを変更する場合に、0－10V制御線の再配線が必要になるというものがある。

デジタル制御

0－10Vアナログ制御と同様に、ルートロン社の「EcoSystem」やDALI（Digital Addressable Lighting Interface）などのデジタル制御方法にも、各照明器具への低電圧配線ペアを追加する必要がある。ただし、0－10V制御と異なる点は、配線ペアが各照明器具との間で双方向に信号を送信するため、個別に指定や制御が可能であることだ。一般的に使用されるデジタルプロトコルであるDALIも、IECによって定義されているが、この規格に対する解釈が異なるために、DALIに準拠するとされる製品であっても、異なるメーカーが提供する製品の間には互換性がない場合がある。EcoSystemは、ルートロン社がDALIをベースに開発したもので、互換性のある照明器具が、ルートロン社に加えて、米クリー社（Cree）や米GEライティング社（GE Lighting）といった他の照明企業からも提供されている。互換性のある照明器具ならば、どのメーカーのものを選択しても制御の互換性が保証される。

デジタル制御方法を採用すると、複数の制御機構を容易に階層化することができる。各照明器具は、必要ならばそれぞれ独立に動作させることができる。デジタル技術を利用すれば、必要な配線を変更することなく、シンプルなソフトウェアインターフェースを介して、高度な機能や照明器具のゾーニングが可能である。また、デジタル制御は、柔軟なスペース構成と再利用を可能にする。照明器具に対するデジタル制御は、LEDのスマートな照明能力を最も効果的に引き出すものである。

制御に対する定格規定

既に述べたとおり、LED負荷は白熱電球の負荷とは電気的動作が異なるため、適用する制御によって性能が左右される。しかし、外観上の性能以外に、多くのLED負荷は、その電気的特性によって、ワット数だけで表される以上の負荷を制御に与える。これによって、どれだけの負荷（例えば、何個の交換用ランプまたはダウンライト）を、安全に制御に接続することができるかという判断は複雑になる。

LEDに対して位相カット調光器を使用する場合に、高い突入電流、反復的なピーク電流、RMS電流が生じる可能性があることは、白熱電球の負荷に対して定格されているほとんどの制御が、ほぼ同じワット数のLED負荷に対応できないことを表している。一般的に、制御に接続可能な最小／最大負荷個数を正しく見極めるには、詳細な電気的試験を行う以外に方法はない。

多くのユーザーが、ランプの選択と、制御に対する規制上の規定との関係を理解していない。制御は、特定の種類の負荷に対して試験され、規定される。例えば、ある制御に対してULは、白熱電球負荷または磁気低電圧（MLV：Magnetic Low Voltage）負荷に対して適切であると規定する場合がある。それを、ELV負荷など他の種類の負荷に適用するのは、電圧レベルが同じであったとしても、当初の設計および試験の想定外であり、予期せぬ動作や信頼性の低下につながる恐れがある。

既存の白熱電球用調光器のほとんどは、ULやその他の米国国家認定試験機関（NRTL：Nationally Recognized Testing Laboratory）によって、LED負荷を対象に設計、定格、試験されていない。幸い、多くの制御メーカーが最近、LEDの制御用に明示的に定格された調光器を発表している。例えばルートロン・エレクトロニクス社は「C・L」調光器ファミリを提供している。これらの種類の制御は、特にLED向けに定格されており、LEDの実際のワット数を使用して、最大負荷を判断することができる。つまるところ、対象とする制御がLEDに対して試験済みであるか、また、その制御が過負荷にならないかについて、必ずその制御のメーカーに問い合わせる必要がある。

LED制御に対して包括的なアプローチをとれば、顧客の期待を満たし、それを上回ることができる。技術は進歩し続け、制御オプション、参照可能な資料、一般知識はますます拡大しており、LEDは現在、実質的に任意の種類の商業的用途に効果的に使用することができる。適切なメーカー、制御、ドライバを選択して、主要な問題を検討すれば、エネルギー節減、性能、外観に対する期待を満たすLED照明と制御システムを、これまで以上に容易に顧客に提供することができるようになる。

著者紹介
イーサン・ビアリー（ETHAN BIERY）は、米ルートロン・エレクトロニクス社（Lutron Electronics Co., Inc.）のLEDエンジニアリングリーダー。

LEDJ