

シンクロ調色LED照明システムの開発

Development of Synchronized Color Controllable LED Lighting System

田中 健一郎
Ken-ichiro Tanaka

鳴尾 誠浩
Masahiro Naruo

井戸 滋
Shigeru Ido

福田 健一
Ken-ichi Fukuda

山本 祐也
Yuya Yamamoto

江崎 佐奈
Sana Esaki

要 旨

発光色が色温度で2000 Kから5000 Kまで黒体軌跡上を調色することが可能なLED (Light Emitting Diode) 照明システムを開発した。通常LED照明は、調光したときには発光色温度は変化せずに減光していく。しかし、従来の白熱球は、減光していくとともに色温度は低く変化する。そこで、2000 Kから2800 Kにおいては、白熱灯の調光時の明るさと発光色の変化を再現するように明るさと色温度を連動して変化させ、2800 Kから5000 Kにおいては、明るさを徐々に明るくしながら色温度が変化するように制御している。この調色変化は、従来慣れ親しんだ白熱灯の変化であるとともに、人が快適と感じる領域といわれるクルイトフの快適領域を再現している。用いたLEDモジュールは3色の光源であり、青色LEDチップからの光を蛍光体で波長変換する際の色度調整技術によりばらつきを低減して色のずれを抑制している。また、ドライブ回路では、3色の光源を独立して制御する降圧チョップ方式をベースに、低い光出力レベルまでスムーズな調光を可能とするピーク電流制御技術を新たに開発した。その結果、明るさと色温度が連動して変化するシンクロ調色LED照明システムが構築でき、住宅空間などでのシーン演出が可能な照明器具を創出することができた。

Abstract

We developed an Light Emitting Diode (LED) lighting system called “Synchronized Color Controllable LED Lighting System” that changes the color temperature from 2000 K to 5000 K in synchronization with the brightness. The LED unit consists of 3 colors of light sources, and achieves uniform luminescent color using technology to reduce the unevenness of the luminescent color of the light sources. In addition, the luminescent color is changed by independent control of the 3 colors of light sources. In the driver specifically for the LED unit, smooth dimming to low light levels was realized by using peak current control technology. This enables a natural luminescent color on the black body locus to be reproduced. As a result, we can produce lighting fixtures which create various scenes in housing spaces, etc.

1. はじめに

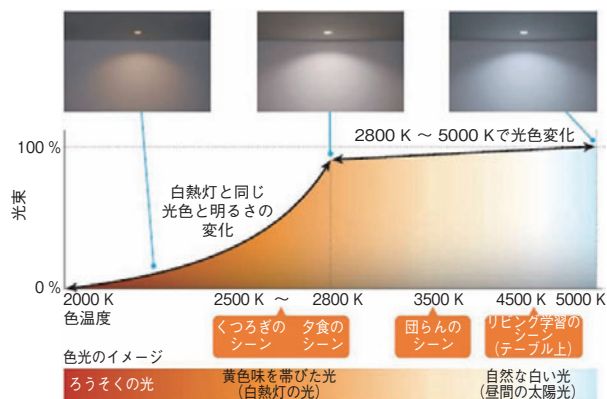
近年、地球温暖化に伴い省エネルギーへの取り組みが活発化しており、国内の家庭でのエネルギー消費の約16%を占める照明器具は、特に省エネルギー化が望まれている[1]。その結果、エネルギー消費の少ないLED照明器具の普及が加速し、最近ではベース主照明にまで展開されており、その発光効率は蛍光灯とほぼ同等となっている。LEDは長寿命が期待できるため、光源の交換頻度を大幅に低減することもできる。

しかし、省エネルギー性を追求するために、生活空間の快適性を損なってよいものではない。そこで、“省エネルギー性”と“生活快適性”を両立させることが可能な照明器具、つまり、生活シーンに応じて照明の発光色を調整し、その場の快適性を向上させることが望まれている。従来から慣れ親しんでいる白熱灯では、調光と共に発光の色温度は2000 Kから2800 Kまで変化するのに対して、従来のLED照明器具は明るさを調整しても発光色は変化しないため、減光していくと不快な空間となる。

また、最近のLEDシーリングライトでは2色のLED光源を用いて、それぞれの出力比を調整することで発光色を制御しているものがある。しかし、これらの発光色の下限はおおよそ2800 Kであり、より低色温度の2000 Kまでの変化を必要とする場合、発光色は黒体軌跡からずれるため、不快な空間になるという課題もある。そこで、当社は、明るさに連動（シンクロ）して光色に変化する「シンクロ調色LED照明システム」を開発した。第1図は、シンクロ調色LED照明器具スタイルと空間の光色変化を示している。この3スタイルの調色器具を用いることで、主な住宅でのあかり空間を提案することが可能となり、例えば、ダウンライトを用いた場合には図中のように電球色から昼白色まで光色を変化させた空間が実現できる。また、色温度と照度の関係には、人が快適と感じる領域といわれる「クルイトフの快適領域[2]」がある。これは、色温度が低いと低照度が快適であり、色温度が高いと高照度が快適とされている。この関係を活用して、第2図が示すような色温度が高くなると光束も高くなる関係を採用することで、住宅のあかりで使いやすい調色・



第1図 シンクロ調色LED照明器具と空間イメージ
Fig. 1 Synchronized color controllable LED lighting system and space imaging



第2図 各色温度における光出力と空間シーンの関係
Fig. 2 Relation between optical power at each color temperature and space scene

調光カーブ「シンクロ調色カーブ」を考案し、快適な空間を実現可能な「シンクロ調色LED照明システム」を開発したので報告する。

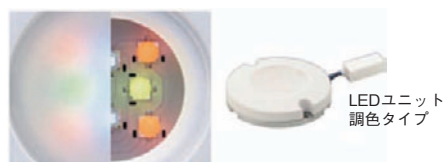
2. シンクロ調色LED照明システム

これまでも発光色が変化するLED照明器具は存在していた。その方式としては、赤、緑、青の原色発光するLED素子を用いたものや、青色LED素子に蛍光体を組み合わせた白色LED光源であって、電球色相当の低色温度で発光する光源と昼光色の高色温度で発光する光源を組み合わせたものがある。前者は、各色のLED素子が、環境温度や長期の経時変化による出力や発光色の変動で、常に一定の発光色を得ることが困難である。その対策として、発せられた光を検出して、フィードバック制御す

る方式[3]が採用されている。しかし、システム構造が複雑になり、コストも高くなる。また、後者においては、前述のとおり、発光の色温度を2000 Kまで変化させた場合には黒体軌跡からずれるので違和感が生じて望ましくない。そこで、環境温度や長期の経時変化による出力の変動を抑えるために用いるLED素子は青色のみとし、青白、緑、赤の3色の光源を得る際に発光色の変動を抑えるために青色LED素子と蛍光体の組み合わせで構成されたLEDユニットを用いた。また、この3色LED照明ユニットを駆動動作させる電源回路も新たに開発したので、以下に述べる。

2.1 LEDユニット部

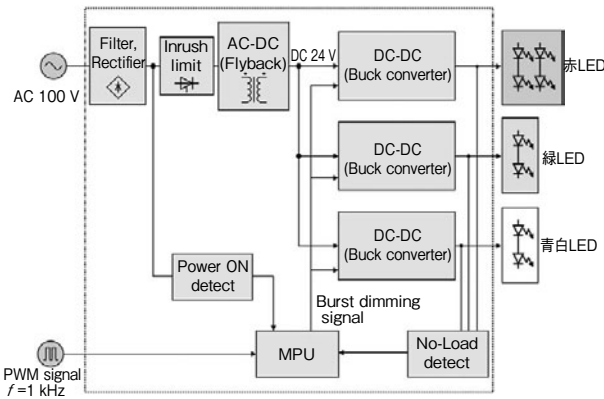
開発したLEDユニットの光源部および概観を、第3図に示している。青白、緑、赤のLED光源として、発光色が8000 K近傍の青白発光のLEDパッケージを用いた。緑色LED光源は、この青白色LEDパッケージに緑色の蛍光体をシリコン樹脂に分散させて成形した蛍光体キャップを青白色LEDパッケージの光放出部の全面を覆うように搭載し、波長変換することで緑色LED光源を得ている。また、赤色は同様に赤色蛍光体を用いて、赤色LED光源を得ている。これらの青白、緑、赤のLEDパッケージをそれぞれ独立した回路配線の金属ベース基板に実装し、LEDモジュールを作製した。このLEDモジュールの各色の間隔が離れているため、混色性を改善するためにLEDユニットの光取り出し部には、乳白パネルを用いて拡散させた。その結果、発光色温度2800 Kで全光束が350 lm、平均演色評価指数Raが90、5000 Kで全光束が370 lm、Raが80の性能が得られた。また、このLEDユニットは、さまざまな器具スタイルへの展開を考慮して、照明器具に光源を直に取り付けられているのではなく、器具に対して交換可能なユニット構造を採用した。



第3図 LEDユニット部の概観
Fig. 3 General view of LED unit part

2.2 LED駆動電源回路部

LED駆動電源回路部のブロック図を、第4図に示す。駆動電源回路部は、入力フィルタ、突入電流防止回路を介して接続されるAC-DCコンバータ、またその出力に接続され、LED電流を制御するDC-DCコンバータを

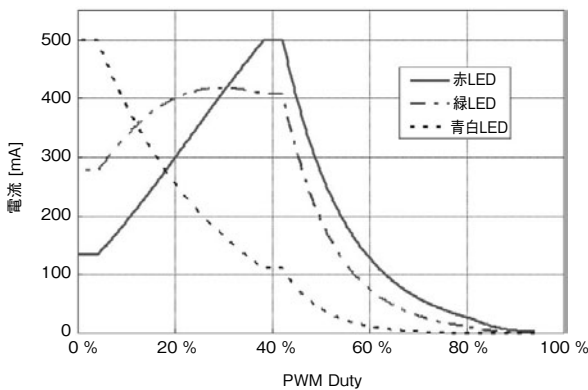


第4図 LED駆動電源部回路ブロック図
Fig. 4 Block diagram of LED driver part

各色ごとに備え、LED負荷が外れたことを検出する無負荷検出回路 (No Load detect) と、ライトコントローラなどから入力されるPWM (Pulse Width Modulation) 信号を受けて、各DC-DCコンバータに電流値の指令を出すマイクロコンピュータ (MPU : Micro Processing Unit) よりなる。

このマイクロコンピュータ内のデータテーブルにシンクロ調色を再現するためのデータを設定しており、このデータに応じた電流で各LEDを点灯することで、シンクロ調色を実現している。第5図に、PWM信号に対する各LEDの電流を示す。

また、マイクロコントローラは、AC入力検出 (Power ON detect) や無負荷検出の信号を受けて、DC-DCコンバータのON/OFF制御を行っている。



第5図 PWM信号に対する各LED電流
Fig. 5 Each LED current versus PWM signal

3. 発光色の安定化設計

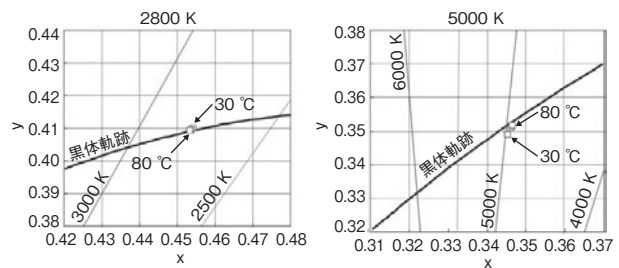
3.1 LEDモジュールでの発光色の安定化技術

シンクロ調色LEDモジュールから発せられる光が、初

期設定時に所定の色からずれる要因として、次の項目が考えられる。

- (1) 各色の光源での色ずれ
- (2) 各色の光源の出力比のずれ
- (3) 蛍光体の温度上昇による色ずれ

この3つの主要因を抑制するために、次のような対策を採用した。まず、第1としては、蛍光体での発熱を分散させた。各色における色変換を蛍光体キャップで行った場合、蛍光体での波長変換時の損失により、蛍光体キャップの温度上昇が発生する。そこで、各色の共通な発光スペクトルで構成された青白色発光のLEDパッケージを用いる。その結果、蛍光体での主な発熱はLED素子上に配置されている蛍光体で発生し、LED素子を經由して放熱される。つまり、蛍光体キャップで発生する熱は、緑および赤に変換する際に生じるものとなり、すべての波長変換を蛍光体キャップで行った場合に比べて、蛍光体キャップでの熱負荷を低減することができ、熱による色ずれを抑制することが可能となっている。動作環境温度に対する混色時の色度変化について検証した結果、LEDモジュール裏面温度を30℃から80℃まで変化させたときの青白色LEDパッケージのxy色度座標上の移動量は0.006であり、緑LED光源は0.004、赤LED光源は0.003であった。これらを混色させた場合の温度変化による移動量は、第6図で示しているとおり色度座標上での移動量が2800 Kでは0.001、5000 Kでは0.003となり、ほとんど色の変化を感じる事がなく色ずれを抑制することが可能となっている。第2の対策としては、蛍光体キャップにより波長変換した際に得られる緑および赤の色ばらつきを抑制するように、蛍光体キャップによる波長変換の蛍光体配合比率および濃度を最適化し、色度調整を行っている。その結果、青白色LEDパッケージでのxy色度座標上のばらつきが±0.014であったのに対して、緑および赤のLED光源では±0.005に抑えることができた。第3の対策としては、用いる青白色LEDパッケージの光出力をそろえることである。そうすることにより、青白色



第6図 温度変化による発光色の移動
Fig. 6 Movement of luminescence color by temperature change

LEDパッケージの光出力が一定であれば、そのパッケージのLED素子からの青色光の強度も一定となり、緑色および赤色で変換される割合も一定の値となる。したがって、青白と緑と赤の光出力強度の比率が一定となり、安定した発光色を得ることが可能となる。

また、経時変化により所定の色からずれる要因としては、主に次の項目が考えられる。

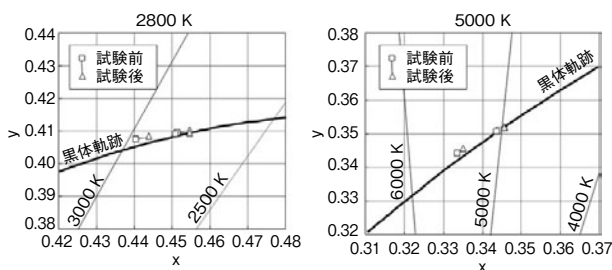
- (1) LED素子の劣化過程および速度が異なる。
- (2) 蛍光体の劣化速度が異なる。
- (3) LED素子や蛍光体を封止している樹脂の劣化速度が異なる。

これらの対策として、(1) に対しては、すべての発光色で用いている基本発光は、すべて同一の青白色LEDパッケージを用いているので、劣化による光束の経時変化の低下も同じようになる。また、(2) および (3) に対しては、蛍光体や樹脂は動作時の温度上昇を抑制することで劣化を極めて少なくすることが可能である。第1表および第7図は、これらの経年劣化による調色LEDモジュールの色ずれを検証するために実施した代表的な試験である耐高温高湿断続通電試験の結果を示している。試験条件は、温度85℃、湿度85%、30分点灯30分消灯の500サイクルである。このように経時変化も安定しているため、経年劣化による色ずれも色度座標上の試験前後の変化量として、2800 Kで0.004、5000 Kで0.001に抑えることが可能となっており、ほとんど色の変化を感じない。この結果や高温連続動作試験などの評価結果から、温度や湿度に対する信頼性を検討した結果、器具寿命にいたっても4万時間を確保できていると考えられる。

第1表 耐高温高湿断続通電試験結果

Table 1 Result of tolerant examination by high temperature and high humidity

	2800 K			5000 K		
	初期値	試験後	変化量	初期値	試験後	変化量
光束 [lm]	478	471	-1.6 %	505	490	-2.9 %
色度座標 x	0.448	0.451	0.003	0.341	0.342	0.001
色度座標 y	0.408	0.410	0.002	0.349	0.350	0.001



第7図 耐高温高湿断続通電試験結果

Fig. 7 Result of tolerant examination by high temperature and high humidity

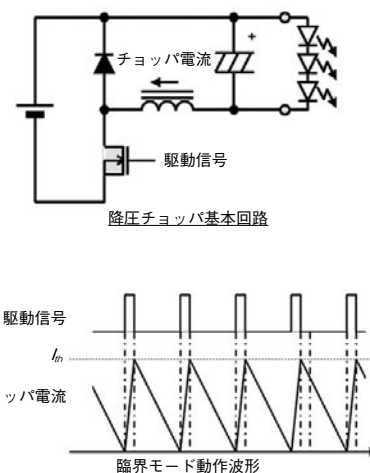
3.2 駆動電源LED点灯回路部の調光方式の選定

DC-DCコンバータの基本回路において、回路効率や定電流特性を考慮し、第8図に示す臨界モード動作の降圧チョップパ構成を採用した。ここで、第8図中の I_{th} はチョップパ電流のピーク電流しきい値を表し、この値に達したときにスイッチング素子がオフするよう駆動信号を入力する制御がなされる。

次に調光制御方式として、大きく次の2つが挙げられる。

- (1) 振幅調光方式・・・連続点灯で、その振幅を変化させることにより調光制御
- (2) バースト調光方式・・・間欠点灯で、点灯期間の時比率を変化させることにより調光制御

本システム目標仕様は2000 Kにおける最低調光比を0.5%としている。従来器具とは違い、混色状態での0.5%出力制御であり、各色の一回路で見ると、さらに低いレベルの出力制御が必要となる。振幅調光方式のみであると、調光下限は降圧チョップパスイッチングの最小オン時間に制約される。このため、汎用ICなど安価な部品で構成するとおのずと限界が生じる。バースト調光方式は点灯期間の時比率を変化させるものであるから、振幅調光方式と組み合わせることで、さらなる低レベルの出力制御が可能となる。この点をかんがみ、基本の調光方式はバースト調光方式を採用し、幅広い調光範囲を実現して発光色の再現性を確保する。



第8図 降圧チョップパ基本回路と臨界モード動作

Fig. 8 Basic topology of buck converter and critical conduction mode operation

3.3 バースト調光方式での課題

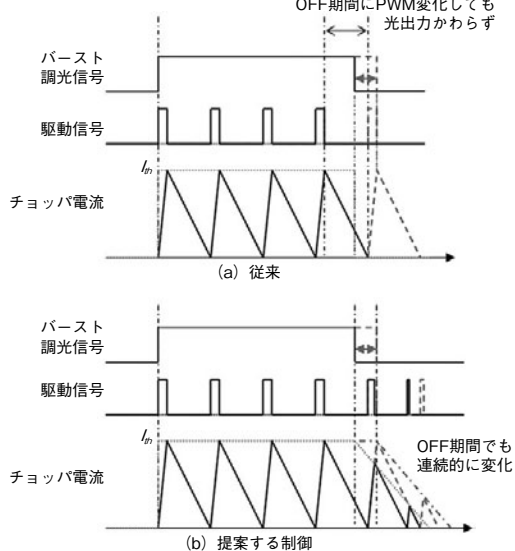
バースト調光の課題として、ビデオカメラなどの映像機器との干渉チラツキがある。これはバースト調光の周期と映像機器のシャッタースピードのズレによって起こ

るもので、映像機器の画像にちらつきや縞状の濃淡となって現れる。また、LEDに関連する電気用品安全法の技術基準の改正に伴い、光出力の繰り返し周波数を500 Hz以上とする必要がある[4]。これらの対策として、以下の2つを実施する。

- (1) バースト周波数を高くする (約1 kHz)。
- (2) LEDと並列に大容量のコンデンサを接続し、LED電流を平滑化する。

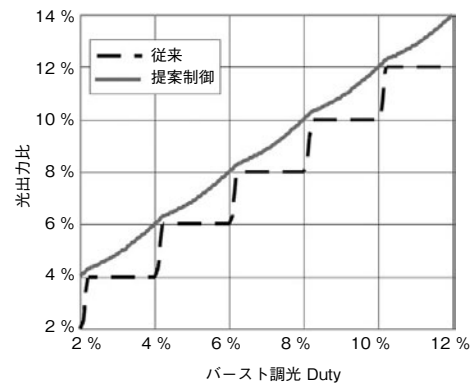
このうち (1) について、降圧チョップ構成との組合せで次のような課題がある。第8図に示す降圧チョップ回路において、スイッチング素子がオフの期間はインダクタの回生電流がダイオードを介してLEDに流れる。そのため、この期間にバースト調光信号が変化してもLED電流は変化せず、LED電流に比例する光出力が変化しない (第9図 (a))。これはバースト調光信号に対する光出力変化が階段状となってしまふことを意味し (第10図破線)、ライトコントローラによる色調整時に不連続な光の変化となって現れる。また、線形性が崩れているので、混色による色再現性の低下にもつながる。これらの現象は、特に低光束調光時において目立つことになる。

この課題に対し、第9図 (b) に示すように、バースト調光点灯期間の立ち下り時のピーク電流しきい値 I_{th} を緩やかに変化した新しいバースト調光制御を提案する。点灯期間の立ち下りの間の電流ピークは、バースト調光信号の連続的な変化に応じて連続的に変化する。第10図に、バースト調光信号に対する光出力比を示す。これによってLED電流すなわち光出力は連続的に変化するので、ライトコントローラによる色調整時に滑らかに変化



第9図 バースト調光動作の比較

Fig. 9 Comparison of burst dimming operation



第10図 バースト調光信号に対する光出力比

Fig. 10 Optical output ratio versus burst dimming signal

させることが可能となる。

以上のような対策により、降圧チョップでバースト調光方式を用いてもバースト調光信号に対する光出力変化の線形性を確保し、色再現性を高めるとともに、映像機器との干渉チラツキをほぼなくすることができた。

3.4 シンクロ調色LEDシステムの展開

上述したLEDユニットと駆動回路を組み合わせて、第1図で示したような器具を用いることで、調光とシンクロした光色を切り替えることが可能となり、第11図に示したような勉強、団らん、くつろぎ、夕食など暮らしのシーンに適したあかりの演出が可能となった。



第11図 明るさと光色を変化させたあかりシーン設定例

Fig. 11 Example of light scene setting to which brightness and light color were changed

4. まとめ

青白、緑、赤のLED光源を個別制御することで、明るさと連動して違和感がなくスムーズに発光色温度を

2000 Kから5000 Kまで黒体軌跡上で変化させることが可能であり、その色ばらつきを初期値および経時変化ともに抑制することができるシンクロ調色LED照明システムを開発した。その結果、調光した際に白熱灯と同等の色温度の変化を得ることが可能となり、省エネ性と快適性の両立を図ることが可能となった。今後、より集光性が必要となる器具への展開を図るため、配光制御性が良好なLEDユニットの開発を進めていく。

参考文献

- [1] 資源エネルギー庁, “平成16年度電力需要の概要（平成15年度推定実績）”。
- [2] A. A. Kruithof, “Tubular luminescence lamps for general illumination,” Philips Technical Review, vol.6, no.3, pp.65-73, 1941.
- [3] PHILIPSカタログ, “Fortimo LED & Lixel LED modules,” p.2, 2011.
- [4] 電気用品の技術上の基準を定める省令第1項基準 改正省令平成24年1月13日。

執筆者紹介



田中 健一郎 Ken-ichiro Tanaka
 エコソリューションズ社 ライティング事業グループ
 Lighting Business Group, Eco Solutions Company



鳴尾 誠浩 Masahiro Naruo
 エコソリューションズ社 ライティング事業グループ
 Lighting Business Group, Eco Solutions Company



井戸 滋 Shigeru Ido
 エコソリューションズ社 ライティング事業グループ
 Lighting Business Group, Eco Solutions Company



福田 健一 Ken-ichi Fukuda
 エコソリューションズ社 ライティング事業グループ
 Lighting Business Group, Eco Solutions Company



山本 祐也 Yuya Yamamoto
 エコソリューションズ社 ライティング事業グループ
 Lighting Business Group, Eco Solutions Company



江崎 佐奈 Sana Esaki
 エコソリューションズ社 ライティング事業グループ
 Lighting Business Group, Eco Solutions Company