

白熱電球の様々な特性を再現したLED電球型モジュール

LED Bulb Type Module Highly Compatible with Traditional Incandescent Bulbs

加藤 光章 大野 博司 津田 亮二

■KATO Mitsuaki ■OHNO Hiroshi ■TSUDA Ryoji

近年、発光ダイオード (LED) の発光効率の向上に伴って、白熱電球からLED電球への置換えが進んでいる。LED電球の更なる普及には、明るさや配光角だけでなく、光のスペクトル、外観 (発光位置、全面グローブ、及び寸法)、質量などの特性についても白熱電球と同等、若しくは凌駕 (りょうが) することが求められており、特に欧州ではこの傾向が強い。しかしこれらの特性の多くはトレードオフの関係にあり、全てを満足させることは容易ではない。

東芝は、白熱電球の様々な特性を再現したLED電球型モジュールを開発した。LEDの熱を支柱からグローブへの対流と熱放射により非接触で伝えることで、全面グローブを実現した。また、ロッド状の導光レンズ内部の散乱体に光を集めて散乱させることで、グローブ中心での発光と広配光を実現した。更に、紫色LEDと赤色・緑色・青色蛍光体を組み合わせることで、白熱電球と同等のスペクトルを再現した。開発したLED電球型モジュールは、欧州の著名な照明デザイナーからも高い評価を受け、2015年4月からそのデザイナーブランドの商品に採用されている。

With the improvement in efficiency of light-emitting diodes (LEDs), the replacement of traditional incandescent bulbs by LED bulbs has been accelerating. In order to promote the wider dissemination of LED bulbs, all of their specifications, including not only their luminance and light distribution but also their light spectrum, light-emitting position, transparency, size, and weight, need to be equivalent or superior to those of incandescent bulbs, particularly in the European market. However, the trade-off relationships among these characteristics are a critical issue.

Toshiba has now developed an LED bulb type module incorporating the following technologies to reproduce such characteristics of incandescent bulbs: (1) a pole type heat radiator that creates a glass globe over the entire surface and cools the LED through heat radiation and natural convection without any nontransparent heat sink; (2) a light guide that achieves light emission in the center of the globe with wide light distribution through total internal reflection and scattering; and (3) a white LED that realizes natural white light emission, consisting of a purple LED with a combination of phosphors based on red-green-blue (RGB). This module has been employed as a replacement for incandescent bulbs by a prominent European lighting designer since April 2015.

1 まえがき

近年、家庭やオフィスなど、様々な場所で白熱電球からLED電球への置換えが進んでいる。一般的なLED電球は、白熱電球の基本特性である明るさ (全光束) と光の広がり (配光角) の実現を目指して、開発が行われている。またLEDの発光効率の向上、及び放熱構造と光学素子の改良によって、白熱電球と同等の全光束や配光角を達成したLED電球が製品化され始めている。

一方、特に欧州では、全光束や配光角だけでなく、光のスペクトル、外観 (発光位置、全面グローブ、及び寸法)、質量などの特性についても白熱電球と同等、若しくは凌駕することが求められている。しかしこれらの特性の多くはトレードオフの関係にあり、全てを満足させることは容易ではない。

東芝は、これらの特性を満たし、白熱電球の更なる置換えを促すLED電球型モジュールの開発を進めてきた。LEDの熱を支柱からガラスグローブへの対流と熱放射により非接触で伝えることで、放熱と全面ガラスグローブを実現した。また、ロッド状の導光レンズ内部の散乱体に光を集めて散乱させ

ることで、ガラスグローブ中心での発光と広配光を実現した。更に、紫色LEDと赤色・緑色・青色蛍光体を組み合わせることで、白熱電球と同等のスペクトルを再現した。ここでは、欧州の著名な照明デザイナーから高い評価を受けて白熱電球の置換えを実現した、LED電球型モジュールについて述べる。

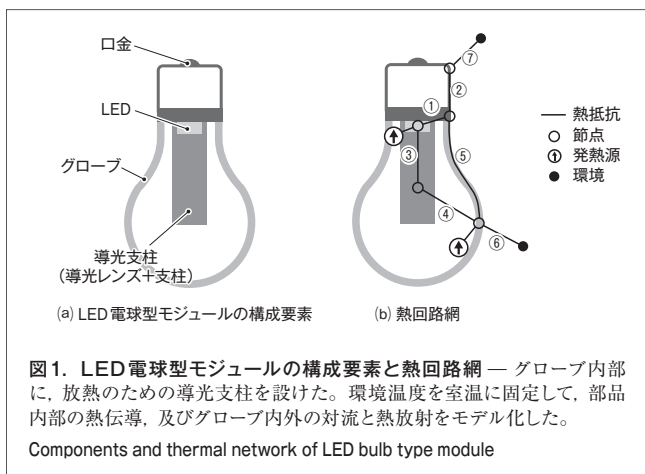
2 LED電球型モジュールの構成要素

この章では、白熱電球の様々な特性を再現するための、放熱構造、導光レンズ、及び白色LEDについて述べる。

2.1 全面グローブを実現する放熱構造

LED電球で白熱電球と同等の明るさ、外観、質量を実現するには、LEDの温度を耐熱温度以下に抑える放熱構造が必要である。

従来のLED電球では、外表面の一部に金属などの熱伝導率の高い筐体 (きょうたい) を配置し、その筐体にLEDの熱を伝えることにより放熱を行ってきた。しかし、白熱電球の外観を再現するためには、外表面全てをグローブにしなければならない。一般に、グローブに用いられている光を透過する素材



は金属などに比べて熱伝導率が非常に低いため、新たな放熱構造が必要になる。

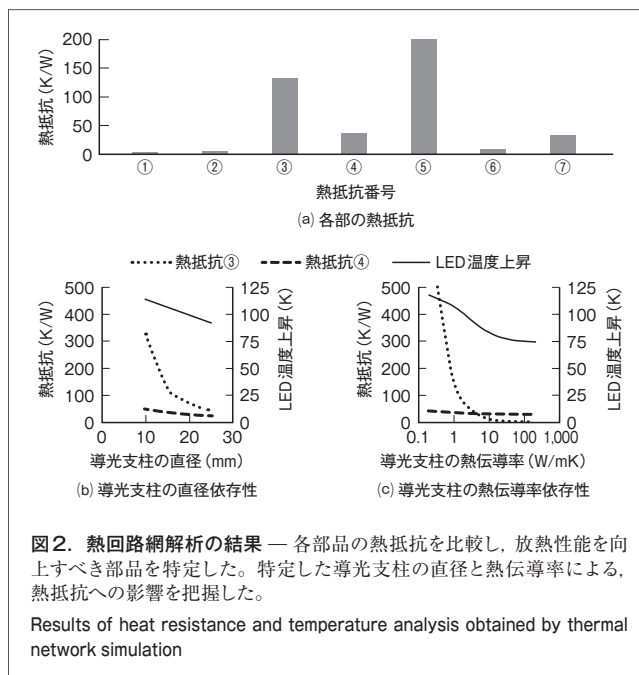
そこで、支柱を用いた放熱構造を開発した(図1)。LEDの熱が支柱に伝わり支柱全体の温度が上昇することで、支柱周囲の気体の温度が上昇し自然対流が発生する。また、熱放射率を高めるための塗装を支柱表面に施すことで、熱放射が発生する。この対流と熱放射の効果により、全面グローブと放熱性能を実現した。

目標の放熱性能を達成するためには、各 부품の熱抵抗と温度上昇を正確に把握し、熱抵抗の大きい部位を特定して耐熱温度を超えないよう、適切な熱抵抗の低減策を施す必要がある。そこで初期設計に適した熱回路網を用いて、各 부품の熱抵抗、及び温度上昇を解析した。

熱回路網においては、簡略化のために導光レンズと支柱を一体の部品として扱い、導光支柱と名づけた。図1(b)において、各節点を結ぶ線は熱抵抗を表す。部品内部の熱伝導、及びグローブ内外の自然対流と熱放射を、熱抵抗としてモデル化した。自然対流と熱放射の熱抵抗は温度に依存するため、それらは解析結果として導かれる。開発したLED電球型モジュールはAC(交流)-DC(直流)変換回路を内蔵していないため、発熱源はLED、及びLEDの放射熱を吸収するグローブの二つとした。放熱が厳しい条件として、口金を含めた電球の表面は全て空気に覆われているとした。

解析の結果として得られた各部の熱抵抗を図2(a)に示す。ここでは導光支柱とグローブの熱伝導率を、ともにガラス相当とした。電球内部の熱抵抗の中では③、④、及び⑤が比較的大きいことがわかる。③は導光支柱の熱抵抗に対応し、熱伝導率の向上や支柱厚さの増加などの対策が有効である。④は導光支柱とグローブ間の対流と熱放射の熱抵抗に対応し、導光支柱の表面積増加、及び熱放射率の向上が効果的である。⑤はグローブ内部の熱抵抗に対応し、グローブ厚さの増加などの対策が有効であるが、質量の増加を招いてしまう。

導光支柱の直径と熱伝導率を変えた場合の熱抵抗③、④



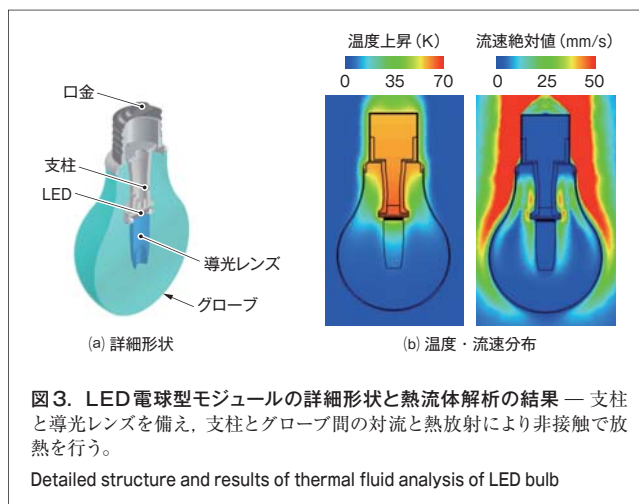
と、LED温度上昇との関係を、図2(b)及び(c)に示す。導光支柱の直径及び熱伝導率の増加に伴って、各部の熱抵抗とLED温度は低下している。

熱回路網解析の結果をもとに作成した詳細形状と、3次元熱流体解析結果を、図3に示す。今回の設計では、導光支柱を導光レンズと支柱に分離し、LEDを支柱先端に配置した。温度と流速の分布から、対流と熱放射による支柱からグローブへの放熱が確認できる。

2.2 広配光と中心光源を実現する導光レンズ

灯具としての光学性能は、広配光であり、演色性が高く、器具効率が高いほど良いとされる。更に、白熱電球と同等の光り方を再現するために、グローブの中心点から放射状に光が放射されるとともに、発光領域がコンパクトであることが望まれる。

従来のLED電球では、配光角を広げるために拡散グローブ



が用いられることが多かった。しかし、拡散グローブはグローブ全体が発光するため、グローブ中心からの発光とコンパクトな発光領域を再現できない。

そこで、図4に示すような散乱体を内部に備えるロッド状の導光レンズを開発した。LEDから発せられた光は、導光レンズ表面での全反射を利用して、効率よく散乱体に導かれる。更に散乱体に到達した光が、拡散反射によって様々な方向に出射されることで、広配光が得られる。散乱体の体積と形状を適切に設計することで、発光領域をコンパクトにできる。散乱体をグローブの中心に配置することで、グローブ中心が発光領域となる。また、LEDから異なる波長の光が照射される場合でも、それらを十分に混色できる。

散乱体がLEDに近づくにつれて先細りするようなテーパを設けることで、散乱体で拡散反射された光はLEDに戻りにくくなり、出射効率が向上する。また導光レンズに、LEDから遠ざかるにつれて先細りするようなテーパを設けることで、LEDの光は散乱体に確実に集光されるようになり、配光角が拡大されると同時に、よりいっそう混色される。

散乱体の大きさを最適化するために、放射輸送方程式に基づく計算を行って、散乱領域の長さとお射光束との関係を導いた。直径16 mmの円形LEDを対象とした解析結果を図5に示す。この解析結果から、散乱領域の長さが15 mm以上あ

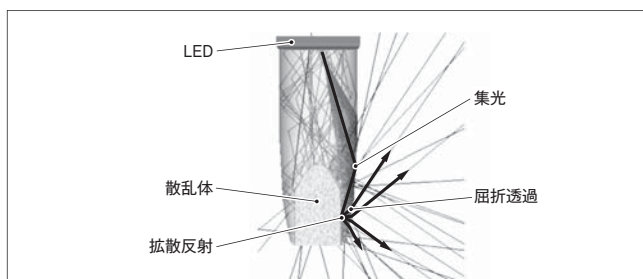


図4. 広配光を実現する導光レンズ — LEDの光は導光レンズ表面で全反射することで散乱体に導かれ、散乱体の拡散反射と導光レンズ表面の屈折透過によって複数の方向に出射される。

Axisymmetric light guide for widening of light distribution

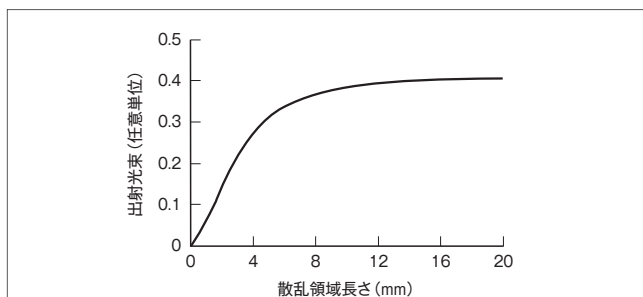


図5. 散乱領域長さとお射光束の関係 — 放射輸送方程式の計算結果に基づいて、散乱体の大きさを最適化した。

Relationship between length of scattering region and luminous flux

れば、十分な出射光束が得られることがわかる。また非順次光線追跡を用いて、テーパ部の形状についても最適化した。

2.3 白熱電球と同等のスペクトルを再現した白色LED

白熱電球と同等の特性を実現するために、白色LEDに求められる特性として、白熱電球と同等のスペクトルを再現すること、及び点灯時にフィラメントの色温度変化と同等の変化を再現すること、が挙げられる。

一般的な白色LEDは、青色LEDと赤色・黄色蛍光体を用いることで白色光を得ている。しかしこの方式は、青色光を直接用いるため白色光の中で青色波長域の成分が強くなり、白色電球と同等のスペクトルを再現できないという問題がある。東芝マテリアル(株)が開発した白色LED^{(1),(2)}は、図6のように、紫色LEDと赤色・緑色・青色蛍光体を組み合わせることで白色光を得る。全ての紫色光を蛍光体で変換することで、図7のように太陽光、すなわち白熱電球のスペクトルに近い連続するスペクトルを作り、自然な白色光を生成できる。

白熱電球が点灯しフィラメントの温度が上昇するにつれて、フィラメントから発せられる光は、その色を赤から白へと連続

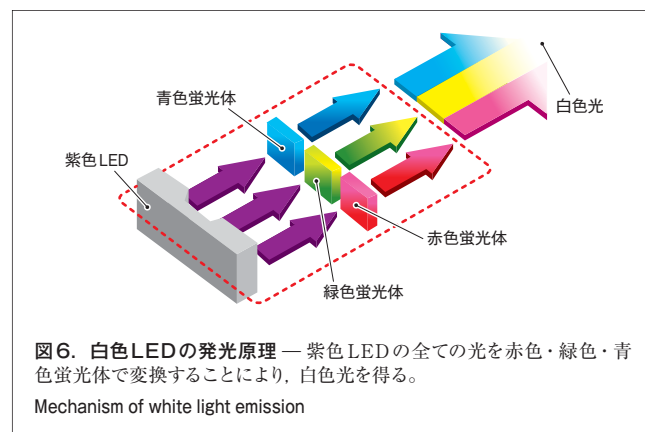


図6. 白色LEDの発光原理 — 紫色LEDの全ての光を赤色・緑色・青色蛍光体で変換することにより、白色光を得る。

Mechanism of white light emission

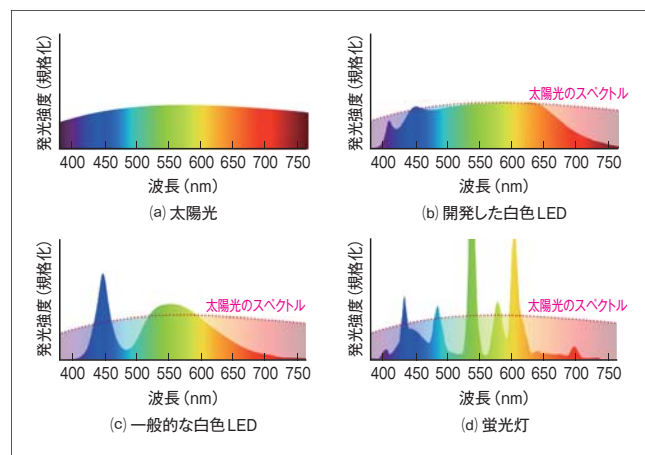


図7. 発光スペクトルの比較 — 開発した白色LEDのスペクトル(b)は、一般的な白色LEDや蛍光灯に比べて、太陽光、すなわち白熱電球のスペクトル(a)により近い自然な白色光となっている。

Differences in emission spectra of various light sources

的に変化させる。この変化を再現するために、色温度が低い白色LEDと、色温度が高い白色LEDを配置した。また、投入電力の増減に伴って各LEDの電力比率を変化させる、外付けの制御回路も作成した。投入電力が小さい(全光束が小さい)場合には、色温度が低いLEDの電力割合を高くし、投入電力が大きい(全光束が大きい)場合には、色温度が高いLEDの電力割合を高くすることで、赤から白への自然な色温度の変化を再現した。また導光レンズの散乱体により、色温度の異なる光を十分に混色させた。

3 実験

開発したLED電球型モジュールを図8に示す。導光レンズには軽量かつ透過率が高い樹脂を、支柱には軽量かつ熱伝導率の高いアルミニウムを用いた。支柱表面の熱放射率を高めるとともに、光の吸収を低減するために白色塗装を施した。ガラスグローブの内面には、発光領域や配光角に大きな影響を与えない程度のフロスト加工を施した。電球全体がグローブで覆われるとともに、点光源が再現されているようすがわかる。

配光角の測定結果を図9に示す。中心光度を基準とした1/2配光角は290°であり、白熱電球に匹敵する配光角が得られた。また導光レンズの効率は91%となり、高い器具効率が

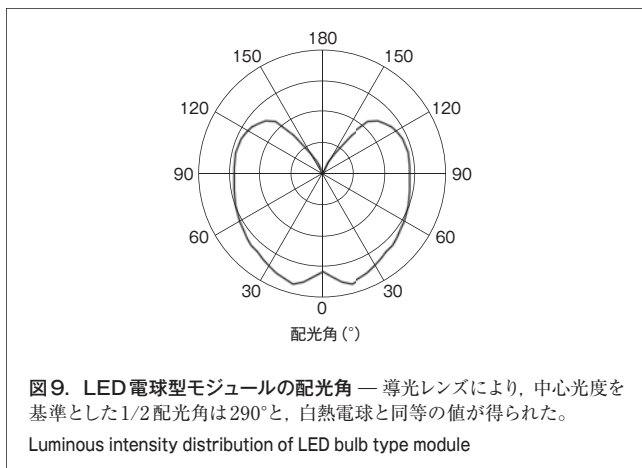
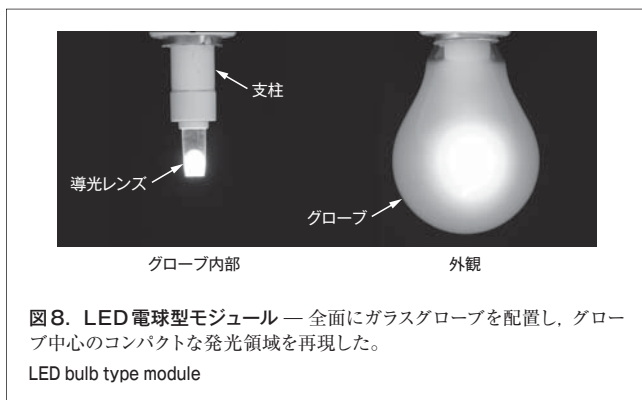


表1. LED電球型モジュールの主な仕様
Main specifications of LED bulb type module

項目	仕様	項目	仕様
全光束	90 lm	寸法	外径60 mm, 全長105 mm
消費電力	2.48 W	質量	48.5 g
配光角	290°	グローブ	全面
熱抵抗	30.0 K/W	光源位置	グローブ中心
平均演色評価数	Ra 96.5, 調光調色	電源	非搭載, DC入力

得られた。開発したLED電球型モジュールの性能を表1に示す。LED基板と周囲環境との間の熱抵抗は30.0 K/Wであった。また、白熱電球と同等の寸法と質量を実現した。

4 あとがき

一般的なLEDに求められる明るさや配光角だけでなく、特に欧州で重視される、光のスペクトル、外観(発光位置、全面グローブ、及び寸法)、質量などの特性についても、白熱電球と同等の特性を実現したLED電球型モジュールを開発した。

LEDの熱を支柱からグローブへの対流と熱放射により非接触で伝えることで、全面グローブを実現した。また、ロッド状の導光レンズ内部の散乱体に光を集めて散乱させることで、グローブ中心での発光と広配光を実現した。更に、紫色LEDと赤色・緑色・青色蛍光体を組み合わせることで、白熱電球と同等のスペクトルを再現した。開発したLED電球型モジュールは、欧州の著名な照明デザイナーから高い評価を受け、2015年4月からそのデザイナーブランドの商品に採用されている。

文献

- (1) 竹村博文. 白色LEDの多様化を支える高効率, 高演色性, 及び高信頼性蛍光体. 東芝レビュー. 67, 2, 2012, p.42-45.
- (2) 東芝マテリアル. "太陽光スペクトル再現白色LED". 東芝マテリアルホームページ. <http://www.toshiba-tmat.co.jp/case_tri_r/index.htm>, (参照2015-06-02).



加藤 光章 KATO Mitsuaki, Ph.D.

研究開発統括部 研究開発センター 機械・システムラボラトリー 研究主務, 博士(工学)。LED灯具や医療用診断機器などに適用する熱流体技術の研究・開発に従事。日本機械学会会員。Mechanical Systems Lab.



大野 博司 OHNO Hiroshi, Ph.D.

生産技術統括部 生産技術センター 光技術研究部研究主務, 博士(理学)。光学分野の研究・開発に従事。日本光学会会員。Optical Technology Research Dept.



津田 亮二 TSUDA Ryoji

東芝マテリアル(株) 開発・技術部 生産技術担当主務。LED光源の研究・開発に従事。照明学会会員。Toshiba Materials Co., Ltd.