

小形LED電球の放熱設計

Thermal Management of Small-Form LED Light Bulbs

甲斐 誠 岡崎 亨 真鍋 由雄
Makoto Kai Toru Okazaki Yoshio Manabe

要 旨

白熱電球と比較して長寿命で省電力性能に優れたLED (Light Emitting Diode) 電球に関心が集まっている。白熱電球をLED電球で置き換えていくためには、コスト、性能と同時に既設照明器具への設置適合性を満たすことが要求される。しかし、白熱電球同等サイズの小型化を追求するほどLEDが発する熱による温度上昇が発生し、性能や寿命に影響を及ぼす。商品設計においては過剰な温度上昇抑制を実現する放熱設計が極めて重要となっている。LED電球の放熱性能向上を目的として、熱流体シミュレーション技術を用いた定量的な放熱設計手順を構築した。これにより業界に先駆けた白熱電球同等サイズの小型LED電球を開発した。

Abstract

Light Emitting Diode (LED) light bulbs have spread rapidly as a substitute for incandescent lamps. For acceleration of this replacement, it is necessary to make the size of the LED light bulb shape fit in with that of incandescent lamps. At this point, the smaller the LED light bulb is, the more serious the problem of increased operating temperature due to the excessive heat generated by the LED itself with respect to assuring performance. Thermal management, for small-form LED light bulbs in particular, has been a key technology. This paper shows a new scheme of thermal management for LED light bulbs using Computer Fluid Dynamics (CFD) modeling. We developed a small-form LED light bulb which is compatible with E17 socket incandescent lamps.

1. はじめに

地球環境保護の観点から家電製品の省電力化要請がいつそう強くなっている。なかでも照明機器の家庭における国内電力消費は約16%に達しており、照明機器の省電力化が大きく期待されている。

近年、電力消費の多い白熱電球撤廃が世界各国で宣言され、代替として長寿命で省電力性能に優れたLED電球に関心が集まっている。白熱電球をLED電球で置き換えていくためには、コスト (イニシャル・ランニング)、性能 (明るさ) と同時に既存白熱電球器具への設置適合性 (軽量・小形) を満たすことが要求される。

省電力性能に優れたLED電球であるが、小型化を追求するほどLEDが発する熱によりLED自体の温度上昇が生じ、発光効率や寿命に悪影響を及ぼすという課題がある。特に口金サイズの小さい小形LED電球の場合、上記課題を解決するための放熱設計が重要となる。しかしながら、これまで定量的なLED電球放熱設計事例はほとんど報告されていない。

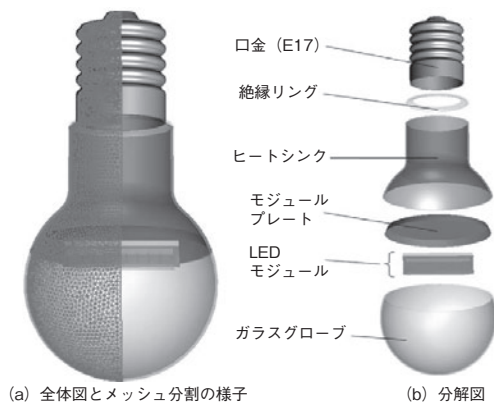
本稿では、熱流体シミュレーション技術を用いた小形LED電球の放熱設計技術について報告する。本技術により、業界初[1]、業界No.1の明るさと高い省エネ性を小形電球同等サイズにおいて実現し[2]、さらには業界で初めて断熱材施工器具にも対応した小形LED電球の開発を実現した[3]。

2. 放熱設計の基本手順

LEDの発光効率を維持しながら長寿命性能を生かすためには、点灯動作時のLED温度 (T_j : ジャンクション温度) を絶対最大定格温度 $T_{j,max}$ (一瞬でも超えると、製品の劣化・破壊が起きる可能性がある温度) 以下にする必要がある。LEDからの熱を周囲領域に逃がすために効果的な放熱設計アプローチを見いだすため、熱流体シミュレーション技術 (CFD: Computer Fluid Dynamics) を用い検証した (CFDとはコンピュータを用いて流体に関する方程式を解くことにより対象領域の温度分布や流れの様子を予測、再現する手法である)。

2.1 解析モデル

放熱設計検討の端緒とするために、代替する白熱電球の外郭形状を模擬した、簡易的な熱流体解析モデルを各部材の分解図と共に、第1図に示す。外郭寸法は小形白熱電球 (外径: 35 mm, 長さ: 67 mm) と同じである。中央部にはLEDモジュールが設置されたモジュールプレートがあり、モジュールプレートは、その内部に点灯回路を設置するため略円筒形をしたヒートシンクに接続されている。LEDモジュールは、LED素子が実装基板上に配置され、それらが蛍光体樹脂に覆われた構成となっている。モジュールプレートおよびヒートシンクはアルミニウム製、絶縁リングは樹脂製である。ランプ電力は所望の全光束を得るのに必要な電力をLEDの定格発光効

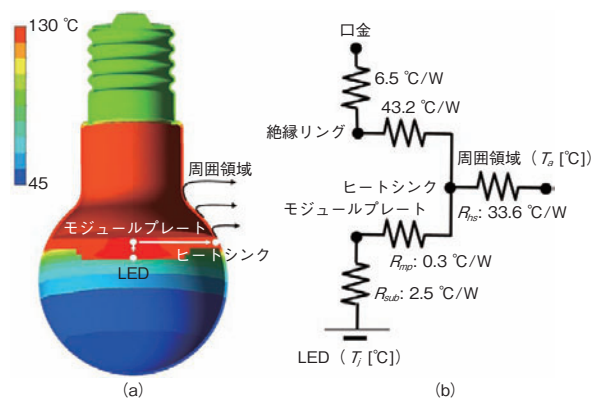


第1図 熱流体解析モデル
Fig. 1 CFD model

率から概算した。

第1図のモデルを用い、LEDから発せられる熱が周囲領域にどのように放熱し、放熱のボトルネックがどこにあるのかを検証するため温度解析を行った。解析は、ランプ電力6.0 Wを想定した熱源をLED素子に与え、各部固体材料内の熱伝導、周囲流体との熱伝達および熱輻射を考慮した。

第2図 (a) に、温度解析結果を示す。この結果からLEDが発する熱は主にモジュールプレートを通じてヒートシンクに伝えられ、そこから周囲領域に放熱されることがわかった (第2図 (a) 内矢印)。この放熱経路を定量的に把握するために熱回路網法を利用した[4]。熱回路とは、電流が流れて電位差が生じ電流の流れにくさを電気抵抗で表す電気回路と同様に、熱流によって温度差が生じ熱流の流れにくさを熱抵抗で表したものである。各部の熱抵抗は2点間の温度差 (ΔT) を、2点間を流れる熱エネルギー (W) で除した $\Delta T/W$ で表される。第2図 (a) の温度解析結果から、各構成部材間の温度差 (代表

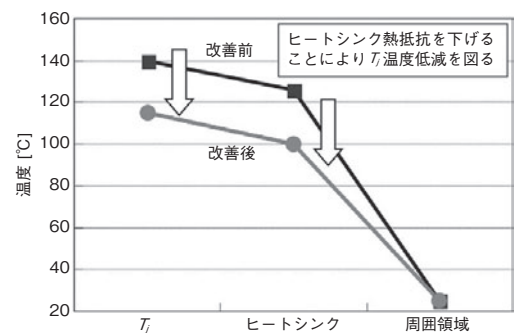


第2図 放熱経路と熱回路
Fig. 2 Thermal path and thermal network

点) とそれら部材間を流れるエネルギーから求めた熱抵抗値 (LED-モジュールプレート間 (R_{sub}), モジュールプレート-ヒートシンク間 (R_{mp}), ヒートシンク-周囲領域間 (R_{hs}), ヒートシンク-絶縁リング間, 絶縁リング-口金間) を、第2図 (b) に示す。

求めた各熱抵抗値を見ると、LEDからモジュールプレートを通じてヒートシンクに熱伝導した熱は熱抵抗値の大きな絶縁リング ($43.2 \text{ }^\circ\text{C/W}$) にはほとんど伝わらず、周囲領域 ($33.6 \text{ }^\circ\text{C/W}$) に放熱される様子が見える。つまり、熱の最終的な周囲領域への出口は主にヒートシンク表面であり、 T_j を効率的に低下させるには、ヒートシンクの熱抵抗を下げる手段が有効である。この考え方を、第3図に示す。ヒートシンク熱抵抗を小さくすることができれば、ヒートシンク周囲領域との温度差が小さくなり、 T_j 低減が実現できる。

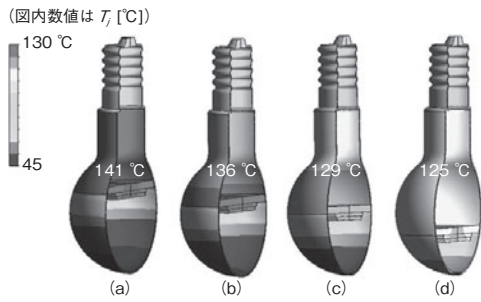
なお、第1図からもわかるように本解析モデルでは点灯回路のモデル化をしていない。実際の点灯回路は樹脂製のケースに収容され絶縁リングに熱的に接続されている。点灯回路内にも熱源となる回路素子が存在するが、上記に述べたように絶縁リングは熱抵抗値が大きいため回路内熱源のLED温度への影響はほとんどない。このことは実測であらかじめ検証しており、本解析モデルの予測精度は実測値 $\pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ ($\pm 3 \%$) を確認した。これにより、点灯回路のモデル化を含まない解析モデルの簡易化が実現し、計算時間の短縮に大きく貢献している[4]。



第3図 T_j 低減の考え方
Fig. 3 Concept of way to decrease T_j

2.2 ヒートシンク包絡体積と熱抵抗

電子部品冷却に使用される櫛 (くし) 状ヒートシンクの場合、最外郭表面で定義される体積をヒートシンクの包絡体積とすると、ヒートシンク包絡体積とヒートシンク熱抵抗には一定の相関が見られる[5]。この考え方より、第1図の外郭形状を元にヒートシンク形状を各種変更し、その包絡体積と熱抵抗の関係を求めた。第4図に、ヒートシンク形状を変更したモデルと温度分布が変



第4図 温度分布結果（ヒートシンク形状依存）
Fig. 4 Temperature distribution depended on heat sink volume

化する様子，第5図にグラフを示す．ヒートシンク包絡体積が大きくなるに従い T_j およびヒートシンク温度は低下し，熱抵抗が小さくなる様子が確認された．

第2図に示した構造を放熱設計の前提とし，熱源となるLEDモジュール，ランプ電力が決まれば満足すべき T_j を実現するのに必要なヒートシンクの包絡体積は，(1)式より熱抵抗 R_t の範囲を求めた後，第5図を用いて求めることができる．

$$T_j - T_a \geq Q \times R_t \dots \dots \dots (1)$$

$$R_t = R_{sub} + R_{mp} + R_{hs}$$

T_j ：実現させる T_j [°C]

T_a ：周囲領域温度（例えば，室温25°C） [°C]

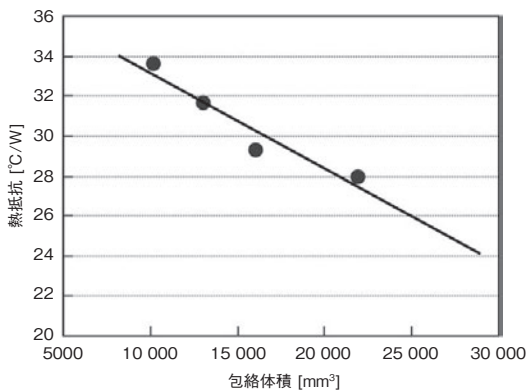
Q ：LED素子が発する熱源相当の電力 [W]

R_{sub} ：チップボードの熱抵抗 [°C/W]

R_{mp} ：モジュールプレートの熱抵抗 [°C/W]

R_{hs} ：ヒートシンクの熱抵抗 [°C/W]

(1)式において， T_j は $T_{j,max}$ 以下で，かつ仕様とする光束条件，寿命条件を満足する温度 Q はランプ電力のうち回路熱損失および放射光変換分を差し引いた熱源相当の電力である．(1)式より得た R_{hs} の値を上限とすれば，第5図を用いてヒートシンクの最小包絡体積が求められる．



第5図 ヒートシンク包絡体積に対する熱抵抗
Fig. 5 Correlation between heatsink volume and thermal resistance

2.3 ヒートシンク熱抵抗の低減

前項で得られたヒートシンクの最小包絡体積が，最大外郭寸法内で実現が困難な場合，実現可能な最大包絡体積にしたうえで，さらなるヒートシンク熱抵抗低減手段を講じる必要がある．

筆者らは，ヒートシンク熱抵抗が2種類の熱抵抗の並列で表されることを詳細に検証した．ヒートシンク表面から周囲領域への放熱は自然対流による熱伝達と熱放射による輻射伝達によって発生する．この様子を，第6図に示す． R_{hs} を熱伝達の熱抵抗 (R_{conv}) と輻射伝達の熱抵抗 (R_{rad}) を用いて表すと (2) ~ (6) 式になる．

$$R_{hs} = \left(\frac{1}{\frac{1}{R_{conv}} + \frac{1}{R_{rad}}} \right) \dots \dots \dots (2)$$

$$R_{conv} = \left(\frac{1}{S \times h_{conv}} \right) \dots \dots \dots (3)$$

$$R_{rad} = \left(\frac{1}{S \times h_{rad}} \right) \dots \dots \dots (4)$$

$$h_{conv} = 2.51C \left(\frac{T_{hs} - T_a}{L} \right)^{1/4} \dots \dots \dots (5)$$

$$h_{rad} = \varepsilon \times 5.65 \times 10^{-8} (T_{hs}^2 - T_a^2) (T_{hs} + T_a) \dots \dots \dots (6)$$

R_{conv} ：熱伝達による熱抵抗 [°C/W]

R_{rad} ：熱放射による熱抵抗 [°C/W]

h_{conv} ：自然対流熱伝達率 [W/m²·K]

h_{rad} ：放射熱伝達率 [W/m²·K]

S ：ヒートシンクの表面積 [m²]

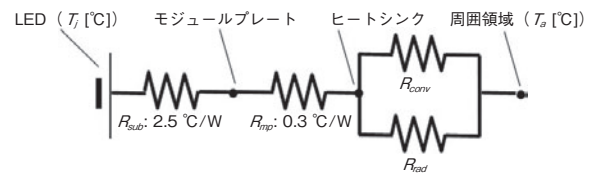
T_{hs} ：ヒートシンク表面温度 [°C]

C ：0.55（鉛直においた円柱周りの自然対流を想定した場合の係数）

L ：代表長さ [m]（円柱高さ）

(2)式から， R_{hs} を小さくするためには R_{conv} ， R_{rad} が小さくなればよいことがわかる．

(3)式より， R_{conv} を小さくするためには h_{conv} あるいは S を大きくすればよい． h_{conv} を大きくするには円柱高さ L を小さくすればよいが，ヒートシンク包絡体積がこの時点で変更となるのは設計手戻りとなるため難しい．一方，包絡体積そのまま S を大きくすることは可能である．



第6図 新熱回路
Fig. 6 New thermal network

例えば、ヒートシンク表面に凹凸形状（フィン構造など）を設ければよい。

(4) 式より、 R_{rad} を小さくするためには h_{rad} あるいは S を大きくすればよい。そのためにヒートシンク表面の放射率 ε を大きくすることは有効である。しかし R_{rad} にかかわる S は、対流熱伝達における S とは異なり包絡形状の表面積（熱放射が直接外部領域へ向かう表面積）に相当するため、包絡体積を一定にして包絡形状の表面積を増加させる、すなわち包絡形状の表面を凹凸形状にしても R_{rad} に与える効果は少ないと考えられる。

以上、LED電球の放熱設計基本手順を次のように定めた。

- 手順1) 最大外郭寸法内におけるヒートシンク包絡体積とヒートシンク熱抵抗の相関を求め、必要なランプ電力投入時に $T_j \leq T_{j,max}$ となる包絡体積のヒートシンクが実現可能かどうかを検証する。
- 手順2) 手順1) において取りうる最大包絡体積において $T_j \leq T_{j,max}$ が実現しない場合、包絡体積を一定にしてヒートシンク表面積増もしくは表面放射率増を検討する。

3. 放熱設計の商品化への適用

E17口金の小形LED電球は、ミニクリプトン電球代替として開発が進んでおり、主な用途がダウンライト照明器具である。ダウンライト照明器具は天井埋め込み型で直下方向照度が必要なため、照射指向性に優れたLED電球での代替に適している。ダウンライト照明器具の中には、狭小天井裏空間へ設置するためランプを斜め向きに差し込むことにより器具高さを低くしたタイプや、断熱材に覆われた天井においても放熱性能が妨げられない断熱材施工対応タイプなどがある。

本章ではミニクリプトン電球同等サイズの小形LED電球（スタンダードタイプ）と、断熱材施工器具対応小形LED電球（斜め取り付け専用タイプ）の放熱設計について述べる。

3.1 小形LED電球（スタンダードタイプ）

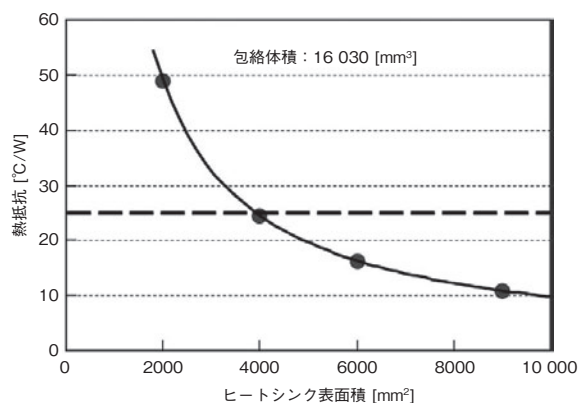
所望の全光束（昼光色相当タイプ480 lm，電球色相当タイプ390 lm）を得るに必要なランプ電力6.0 W，最大外郭寸法を外径35 mm，長さ67 mmと設定した。ランプ電力6.0 Wのうち、回路損失と放射光変換分を差し引いた熱源相当電力は、回路およびLEDモジュール仕様から算定し3.6 Wである。以上の条件から各種ヒートシンク形状の包絡体積と熱抵抗値の相関を求めた（既出第5図）[6][7][8]。

第5図から、 T_j が最大外郭寸法内の包絡体積で実現できるか判断するために、(1)式を用いてヒートシンクに必要な熱抵抗 R_{hs} を求める（ $T_j=125\text{ }^\circ\text{C}$ ， $T_a=25\text{ }^\circ\text{C}$ ， $R_{sub}+R_{mp}=2.82\text{ }^\circ\text{C/W}$ ）。計算の結果、 R_{hs} は $25.0\text{ }^\circ\text{C/W}$ が必要であることがわかった。これから第5図より、ヒートシンクに必要な最小包絡体積が約25 700 mm³となることがわかる。

このヒートシンクの大きさが最大外郭寸法内において実現可能か検証する。取りうる各種ヒートシンク形状例を、第4図に示したが、形状(d)の包絡体積が約22 000 mm³である。約25 700 mm³の包絡体積を確保することは、ガラスグローブが小さくなり、光放射特性の確保およびデザイン面を考慮すると実現困難であることがわかった。

次にヒートシンク表面に凹凸形状（フィン形状）をつけることによる熱抵抗低減の検討を行った。さまざまなフィン形状の効果を個別に試作検証する前に、熱抵抗低減に必要なヒートシンク表面積の算出を(3)，(5)式を用いて行った。包絡体積を一定にして検討するためヒートシンク高さを3 cm（包絡体積約16 030 mm³）とし、これを代表高さ L とした。この基準となるヒートシンク高さ3 cmの表面凹凸のないヒートシンク表面積は約2500 mm²である。

第7図は、ヒートシンク表面積に対する R_{hs} の変化を示す。ヒートシンク表面積を約4000 mm²まで増加させることにより包絡体積16 030 mm³のまま熱抵抗を $25.0\text{ }^\circ\text{C/W}$ 以下にできることがわかる。しかし現実には表面凹凸のないヒートシンク表面積を1.6倍増加させるためにはかなり微細な表面凹凸にするか、あるいは電球内部方向に十分な厚みを確保したフィン構造とする必要がある。一般に自然空冷は強制空冷とは異なり低風速なため、フィン構造においてはピッチの大きなタイプが採用され、微細な表面凹凸は不利である[5]。また、ピッチを

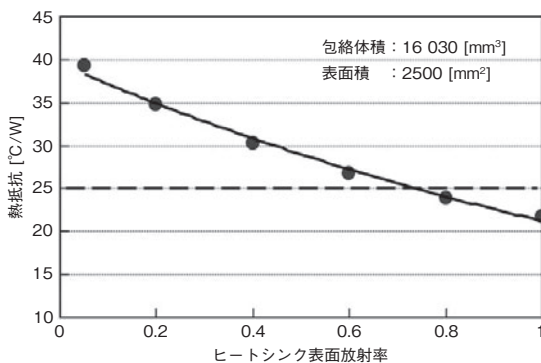


第7図 ヒートシンク表面積に対する熱抵抗
Fig. 7 Correlation between heatsink surface area and thermal resistance

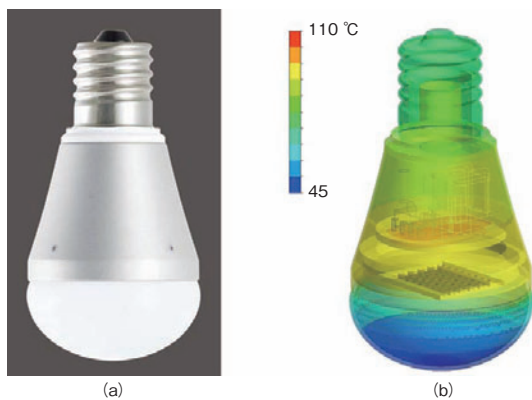
大きくするためヒートシンクの厚みを確保すると内部点灯回路の収容体積が減少し回路設計に影響を及ぼす。製品重量も増加する可能性がある。これら検討結果からヒートシンク表面へのフィン構造採用は困難と判断した。

最後にヒートシンク表面放射率増による熱抵抗低減の検討を行った。包絡体積 $16\ 030\ \text{mm}^3$ 一定とし、熱抵抗低減に必要な放射率 ε の算出を(4)、(6)式を用いて行った。ここまでの比較対象であるヒートシンク表面放射率はアルミニウム無垢材の0.05である。

第8図は、ヒートシンク表面放射率 ε に対する R_{hs} の変化を示す。放射率 ε を0.8まで増加させることにより包絡体積約 $16\ 030\ \text{mm}^3$ 一定で熱抵抗を $25.0\ \text{°C/W}$ 以下にできることがわかる。実際にアルミニウム無垢材の表面放射率を増加させる方法として、アルミニウムを陽極として強酸中で電気化学的に酸化させ表面に酸化アルミニウムを生成させるアルマイト加工がある。これにより表面放射率は0.8まで増加させることが可能であることがわ



第8図 ヒートシンク表面放射率に対する熱抵抗
Fig. 8 Correlation between heatsink surface emissivity and thermal resistance



第9図 小形LED電球 (スタンダードタイプ)
(a) 外観図[2] (b) 温度分布解析結果
Fig. 9 Small-type LED light bulbs (Standard type)
(a) Shape (b) Contour of temperature distribution

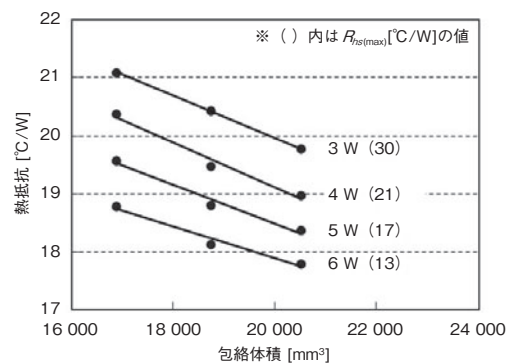
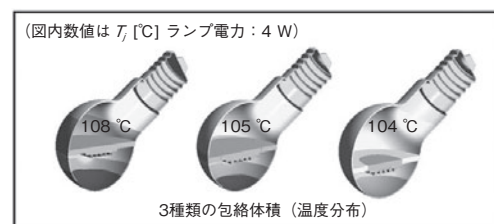
かった。

以上の検討をふまえ、開発した小形LED電球 (スタンダードタイプ) を、温度分布解析結果と共に、第9図に示す。最終ヒートシンク形状はデザインも重視したうえで決定された。包絡体積は回路熱損失による温度上昇分も考慮し増加させて $18\ 260\ \text{mm}^3$ 、ヒートシンク表面積 $2500\ \text{mm}^2$ 、放射率はアルマイト加工を施し0.8である[9]。現物試作評価の結果、各部温度はおよそ第9図に示す様であることが確認された。

3.2 断熱材施工器具対応小形LED電球 (斜め取り付け専用タイプ)

断熱材施工器具に対応し、斜め取り付けする小形LED電球の放熱設計がスタンダードタイプと異なる点は、周囲領域温度が室温ではなく断熱材内点灯による高温状態である点と、斜め取り付けにより自然対流流れの方向とヒートシンクの位置関係が異なる点である。

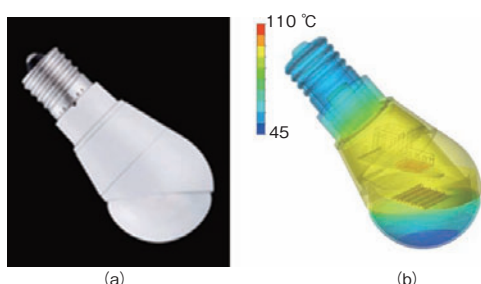
これらを考慮し、新たな熱流体解析モデルを作成、包絡体積に対する熱抵抗を算出した。最大外郭寸法はスタンダードタイプと同じ外径 $35\ \text{mm}$ 、長さ $67\ \text{mm}$ 、周囲領域温度 $60\ \text{°C}$ 、ヒートシンク表面放射率 $\varepsilon = 0.8$ である。投入電力は、高温下で $T_j \leq T_{j,max}$ が満たされる上限ランプ電力を検証するため、 $3, 4, 5, 6\ \text{W}$ とした。第10図に、3種類の包絡体積に対する熱抵抗の投入電力依存と、(1)式より各投入電力におけるヒートシンクに必要な熱抵抗 $R_{hs}(\text{max})$ を示す ($T_j = 110\ \text{°C}$, $T_a = 60\ \text{°C}$, $R_{sub} + R_{mp} = 2.82\ \text{°C/W}$)。



第10図 ヒートシンク包絡体積に対する熱抵抗
Fig. 10 Correlation between heatsink volume and thermal resistance depended on lamp power

点灯回路収容を考慮して最大包絡体積を約18 000 mm³とすると、第10図より $T_j \leq T_{j,max}$ を満たす熱抵抗 (R_{hs} (max)) 以下を実現できるランプ電力は、約4 W以下であることがわかる。

以上の検討をふまえ、開発した小形LED電球（斜め取り付け専用タイプ）を、温度分布解析結果と共に、第11図に示す（ランプ電力4 W、周囲領域温度60℃、ヒートシンク包絡体積20 430 mm³）。ヒートシンク表面はアルマイト加工からさらに熱放射率の高い材料を最適調査した新開発の白色塗料を採用した。最終的なヒートシンク熱抵抗は約18.2℃ /Wである。



第11図 小形LED電球（斜め取り付けタイプ）
 (a) 外観図[3] (b) 温度分布解析結果
 Fig. 11 Small-type LED light bulbs (Diagonal type)
 (a) Shape (b) Contour of temperature distribution

4. まとめ

LED電球の放熱性能向上を目的に、熱流体シミュレーション技術を用いた放熱設計手順を構築し、小形LED電球の開発を実現した。

構築した手順は、第1に、許容される最大外郭寸法内におけるヒートシンク包絡体積とヒートシンク熱抵抗の相関を求め、必要なランプ電力投入時に $T_j \leq T_{j,max}$ となる包絡体積のヒートシンクが実現可能かどうかを検証するということ、第2に、得られた最大包絡体積において $T_j \leq T_{j,max}$ が実現しない場合、包絡体積を一定にしてヒートシンク表面積増もしくは表面放射率増を検討するというものである。これら手順構築に際してはシミュレーション解析結果を用いて構成した熱回路を検証し、特にヒートシンク熱抵抗低減のためには熱伝達の熱抵抗と輻射伝達の熱抵抗を個別に検討する重要性を見いだした。

白熱電球代替が加速しており、より高出力なLED電球が望まれている。最大包絡体積に制限があるなか、ますます体積あたりの電力消費密度は増加することになり放熱設計の重要性が増すと予想される。そのためには今回の設計手順に組み入れられていない新たなランプ構造や

放熱手段も取り入れながら、放熱性能向上に向け引き続き検討する必要がある。

LED電球が本格的な普及期に入りつつあり、小形化だけでなく、コスト対応やグローバル対応も含め、さまざまなタイプのラインナップ充実が急務となっている。本放熱設計を通じスピーディな開発を実現することにより、お客様価値拡大に貢献していく。

参考文献

[1] <http://panasonic.co.jp/corp/news/official.data/data.dir/jn090910-2/jn090910-2.html>, 参照 Jun. 5, 2012.
 [2] <http://panasonic.co.jp/corp/news/official.data/data.dir/jn100305-1/jn100305-1.html>, 参照 Jun. 5, 2012.
 [3] <http://panasonic.co.jp/corp/news/official.data/data.dir/jn110307-1/jn110307-1.html>, 参照 Jun. 5, 2012.
 [4] 岡崎 亨 他, “LED電球の熱解析モデルの構築,” 第44回照明学会全国大会予稿集, 2011.
 [5] 国峰尚樹, “エレクトロニクスのための熱設計完全入門,” 日刊工業新聞社, pp.170, 1997.
 [6] 甲斐誠 他, “小形LED電球の放熱設計,” 第43回照明学会全国大会予稿集, 2010.
 [7] A. Motoya et al., “Thermal management of LED lamp,” 12th International Symposium on the Science & Technology of Light Sources, 2010.
 [8] 真鍋由雄, “照明用白色LEDの開発,” 第193回ニューセラミックス懇話会予稿集, 2010.
 [9] 細田雄司 他, “小形LED電球の放熱改善技術,” Panasonic Tech. Journal, vol.56, no.2, pp.64-65, 2010.

執筆者紹介



甲斐 誠 Makoto Kai
 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



岡崎 亨 Toru Okazaki
 生産革新本部 生産技術研究所
 Production Engineering Lab., Corporate Manufacturing Innovation Div.



真鍋 由雄 Yoshio Manabe
 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
 工学博士