

# 報 告

## LED照明パッケージの開発とその応用

出 向 井 幸 弘 <sup>\*1</sup> , 田 嶋 博 幸 <sup>\*2</sup>

### Development of LED-Package for Lighting Applications

Yukihiro Demukai<sup>\*1</sup>, Hiroyuki Tajima<sup>\*2</sup>

#### 要 旨

LED照明の普及が始まってきた中で、豊田合成として照明用のパッケージ開発を進めている。まずは既存光源の置き換えが進む中、電球、蛍光灯といった既存光源に対応したパッケージ開発を進め、ラインナップを揃えてきた。

その中でも、高効率、信頼性の高いパッケージ開発を行い、技術ポテンシャルの高い製品により他社との差別化を図ろうとしている。この技術について報告する。

まず一つ目の高効率については、豊田合成の高効率チップの使用はもとより、パッケージ設計においてもSQC手法を駆使したパッケージの最適設計を行っている。また、信頼性の向上については、他社にない独自の技術開発により放熱性の高い設計とそれを造り込む生産技術により具現化した。

#### Abstract

While LED lighting had begun to increase and spread, TOYODA GOSEI has been developing LED package design for general lighting. Replacement of conventional lighting source has already started, we had created LED package line-up to replace conventional light bulb, fluorescent lamp, and so on.

Improving efficiency and reliability have been focused especially, which would differentiate us in the technical point of view. In this report, we would like to show some points of these technologies.

Improving efficiency had been progressed not only by integrating our high-efficient LED chips, but also by combining our SQC techniques to make optimum LED package design. Improving reliability contains our unique heating management design and its manufacturing technique to achieve higher heat release.

<sup>\*1</sup> Yukihiro Demukai オプトE事業部 第2技術部

<sup>\*2</sup> Hiroyuki Tajima オプトE事業部 第2技術部

## 1. はじめに

LEDが開発された当時、「将来的には照明用にLEDを！」というような夢がLEDメーカーで語られていたが、昨今ではLED照明が当たり前のように使われる時代になった。LED照明の立ち上がり初期はデザイン面の斬新さを狙って懐中電灯、テーブルランプ、ダウンライトなどの分野が主体に始まった。次に、白熱電球の置き換えから一般家庭へのLED化が一気に進み、更には蛍光灯などの光源がLED化され始め、LED照明は身近な存在になってきている。

LED照明は大きく、LEDモジュール（光源部）、電源部に分かれている。LEDモジュールは、半導体デバイスとしてのLEDパッケージが使われているものが主流である。LEDパッケージとは、図-1に示すような構造をしており、LEDチップを保護し、電気的接合を安定的に保持するために、金属や樹脂、セラミックなどを用いて設計・製造されたものである。パッケージングには、

- 1) 光取り出し性の向上（高効率）
- 2) 構造安定性の向上（高信頼性）

が求められ、要求性能を継続的に高めるために、LEDパッケージング技術開発を日々進めている。本報では、その設計技術や応用事例について報告する。

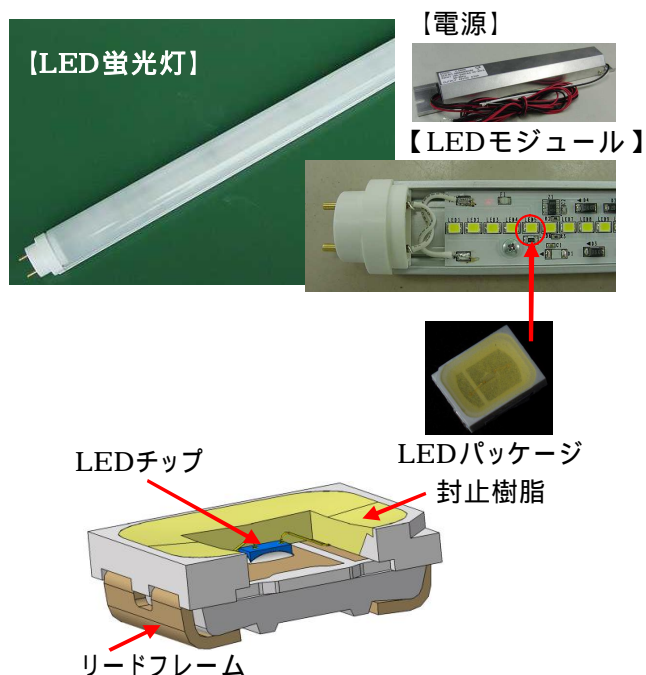


図-1 LED照明の例

## 2. LEDパッケージのラインナップ

照明には、これまでの歴史のなかで様々な光源が使われてきた。古代～近代にかけての木、油、ガスの燃焼から、現在は電気によるフィラメントの発光、放電（アーク）による発光および蛍光体の発光が主流であり、白熱電球、蛍光灯、ハロゲンランプ、水銀灯、HIDのように明るさや発色など特徴の異なった光源が、それぞれの用途に応じて使用されている。現在、これらの既存光源に対しLEDが置き換わるという動きが世界中で進んでいる。効率、寿命、点灯開始時間（スイッチを入れると瞬時に明るくなる）、水銀レスなど、それぞれの光源の弱点を補える特色がLEDに備わっているからである。既存光源の明るさと、豊田合成の各既存光源に対応するLEDパッケージのラインナップ全体像を表したものを、図-2に示す。

白熱電球は、最初にLED化が先行した光源である。発光効率 約15%と低いことがLED化を加速した要因で、LEDの特徴である高効率と長寿命をうれしさとして置換えが一気に進んだ。ただし、依然として価格差は大きく、低価格化が更に求められる領域ではある。LEDパッケージとしては、ミドルクラス（投入電力 0.5～0.8W程度）のものが主流で用いられ、その効率と価格のバランスが重視されている。

現在LEDが次に進みつつある光源が蛍光灯である。白熱電球よりも効率が高い蛍光灯をLEDに置き換えるために、LEDも高効率のものを搭載することを求められることが多い。そのため、高効率化に有利なレギュラークラス（投入電力 0.1～0.5W）のパッケージが使われることが多い。これらのパッケージは、1個の明るさ（光束、lm）は小さいものの、器具内に多数実装することで、求められる明るさを達成させる。蛍光灯は、白熱電球と比較して、LEDを配置できる（実装できる）面積が大きいため、このような設計が可能となる。

蛍光灯用LEDモジュールの低コストを目指してLED個数を極端に低減させる考え方も勿論存在はするものの、パッケージ1個1個を明るくさせる必要がある。最終製品としては、LED発光の粒々感が強く既存の蛍光灯とは異なる見えとなり、感性面で嫌厭される場合がある。

ハロゲンランプは小サイズで一定の明るさを確保する必要があるため、ハイパワークラス（投入電力 1～3W）のパッケージを使用することが多

い。ハロゲンランプには光に指向性を持たせたい用途が多く存在し、レンズやリフレクターの光学設計をより容易にさせる点からも、小型で出力の高いパッケージが好まれる。ただし、小型でありながら投入電力も高いため、耐熱・耐光に対しての要求も高い。

水銀灯，HIDランプにおいては，二千～数万lm程度の，前述の既存光源とは桁の異なるレベルの明るさが必要である。レギュラークラスあるいはミドルクラスのLEDチップを数十～数百個搭載したCOB（Chip on board）と呼ばれるパッケージを使用することで，LED化が可能となる。店舗用のスポット光源では1個のCOBで対応させる場合が多く，高天井照明，道路等など更に明るさを必要とする用途では複数個のCOBを使用することで対応させている。明るさ以外のLED化メリットとして，点灯応答性の良さや調光可能な点も，実際の顧客の声として挙がっている。

### 3．LEDパッケージの開発

LEDパッケージ開発の主体は高効率化および高信頼性化であるが，代表事例をそれぞれ一つずつ説明する。

高効率化は，パッケージ形状設計による効率の向上についてであり，試作レス化の開発ツールとして，CAE，光学シミュレーションおよびSQC手法の積み重ねにより，近年その予測精度は格段に向上した。開発期間の短縮を図ることが出来た一方で，高効率化のための適切な形状設計を実施できた事例である。

後者の高信頼性化は，フリップチップ実装設計および生産技術開発による寿命向上の事例である。豊田合成ならではの高出力フリップチップを用い，断線の原因となりやすいワイヤーボンディングをチップ実装から廃止し，AuSn共晶はんだを用いた独自の接合技術を開発することにより高放熱化および長寿命化を実現させた事例である。

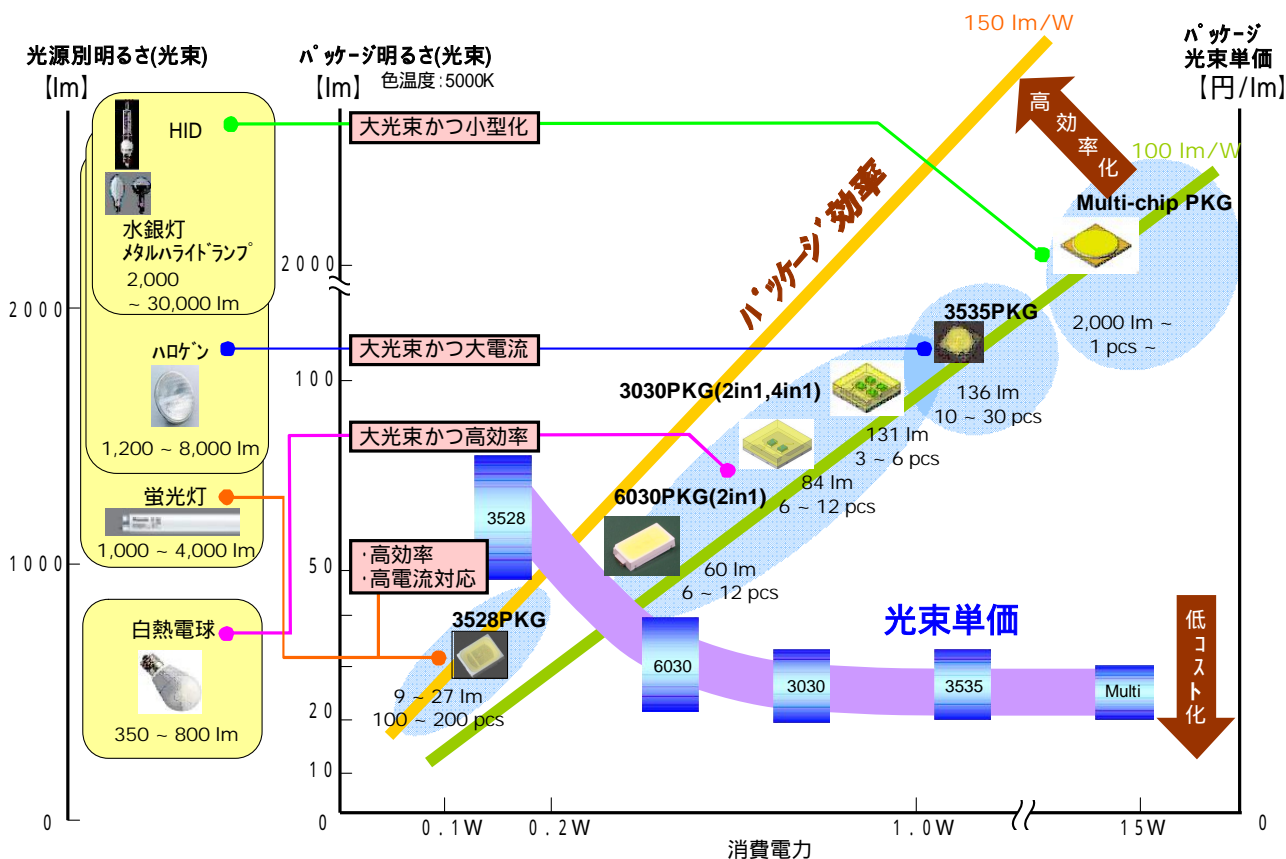


図 - 2 LEDパッケージラインナップ  
既存光源の明るさと，豊田合成の各既存光源に対応するLEDパッケージのラインナップ全体像

### 3 - 1 . 高効率SMDパッケージ開発

一般的な白色LEDパッケージは図 - 3 の構成をしている。電流はリードフレーム及びワイヤを経由してLEDチップへ供給され、LEDチップは青色発光する。発光した青色光の一部は蛍光体により黄色光へと変換し、青色光と黄色光が混合することで擬似的に白色光が発せられる。これらの混合光を如何に効率良く外に取り出すかを考慮して、パッケージの構造および部材配置を設計する。

効率は投入電力あたりの光束（明るさ）であり、次式で示される。

$$\text{効率} = \frac{\text{光束 [lm]}}{\text{投入電力 [W]}}$$

効率の値が高い程、少ない投入電力で所望の明るさを得ることが出来、各LEDメーカーは高効率化を目指した技術開発を継続して鋭意推進している。一般的に最終的な照明器具製品としての効率は100lm/W以上が必要とされる。LEDパッケージやLEDモジュールは照明器具に組み込まれるため、照明器具での取り出しロスを考えて、LEDとして更に高い150lm/W以上を求められている。

以下、実装面積 3.5 x 2.8mmのパッケージ（以下 3528パッケージ）を実例として、150lm/W以上の効率を達成したパッケージ開発事例を示す。

#### 3 - 1 - 1 . パラメータの選定

高効率化の方策主体は、如何に光束を高めることが出来るかであり、パッケージ設計面では、如何に多くの光をパッケージから取り出すかがポイントになる。過去の検討によりパッケージの種類の違いによってパッケージからの光取り

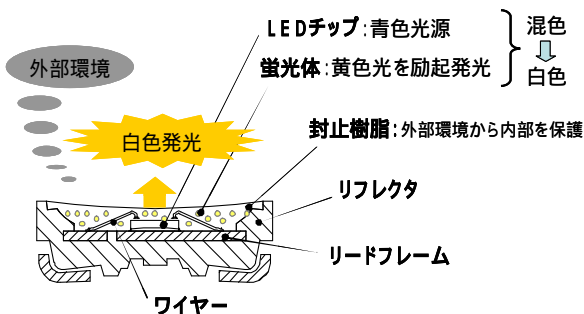


図 - 3 白色LEDパッケージの構成

出し量が異なっていることが確認されているので、光の挙動はパッケージ形状と大きく関わっていると考えられる。光取り出しについての推定メカニズムを図 - 4 に示す。光はその進行経路によって、パッケージ内での減衰を伴った反射や、封止材/空気（パッケージ外部）界面での屈折や全反射が生じ、各過程において光量の損失が発生すると考えられる。

形状を決定する幾つかのパラメータの中から、推定メカニズムを元に、図 - 5 に示す4つの因子A~Dに絞り込んだ。

#### 3 - 1 - 2 . 中心複合計画と応答曲面解析

本検討はパラメータの最適化を目的としており、最適値の探索に適している、中心複合計画と応答曲面解析を用いた。中心複合計画は、3水準系の実験において、1次の主効果と1次×1次の交互作用、および2次の効果が分かる実験計画の手法である。図 - 6 に示すように、角の実験点、軸点、中心点に配置することで、直交実験にくらべて実験点を少なくできるメリットがある。

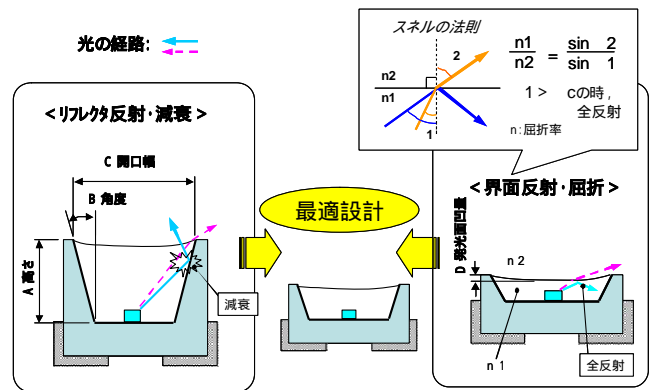


図 - 4 推定メカニズム

|      |   |
|------|---|
| 実験条件 |   |
| 特性   | : 光束[lm] (望大特性)   |
| 因子   | : A)高さ A <sub>1</sub> ~A <sub>2</sub> [μm]<br>B)角度 B <sub>1</sub> ~B <sub>2</sub> [°]<br>C)開口幅 C <sub>1</sub> ~C <sub>2</sub> [mm]<br>D)発光面凹量 D <sub>1</sub> ~D <sub>2</sub> [μm] |
| 計画   | : 中心複合計画(直交計画)  |
| 点    | : 1.41  |
|      | : 中心点での繰り返し:1回  |

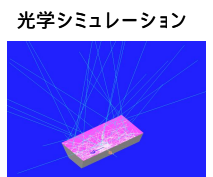


図 - 5 実験計画とパラメータ

応答曲面解析は予め設定したモデルにおいて、パラメータの影響度を定量的に評価したり、最適条件を探索し予測値を導いたりする手法である。図-7に示すように、得られた予測式より、実験水準以外にも最適条件が探索できるメリットがある。

### 3-1-3. 実験計画の立案

選定したパラメータA～Dについて、中心複合計画にて実験計画を立案した。中心複合計画には直交計画や面中心計画などの手法があるが、計画の直交性を持たせるため直交計画を選定し

た。今回、計画の立案および結果の計算は解析ソフトにて行った。なお、実験はCAE（光学シミュレーション）で計算するため繰り返し誤差はなく、全25回の実験となる。

### 3-1-4. 解析結果

25回の実験について光学シミュレーションを行い、アウトプットした光束値で解析を行った。図-8に示すように、分散比より各パラメータの影響度は定量化される。

因子B「角度」と因子C「開口幅」、因子D「発光面凹量」には1次の主効果が認められ、因子A「高さ」には2次の効果と他因子との交互作用が確認された。

応答曲面解析の結果を図-9に示す。図中の望ましき関数D(x)は0～1の値をとり、応答の値と対応している。この値は1に近いほど応答が望ましいことを示すものであるが、本解析では応答である光束は望大特性のであり、光束が大きくなるほど望ましきは1に近づいている。今回、新たに因子A「高さ」には極大点が存在し、とくに因子D「発光面凹量」によって極大点が移動することがわかった。A「高さ」の極大点が移動することについて、発光面凹量が小さくなれば入射角が小さくなるので、全反射し

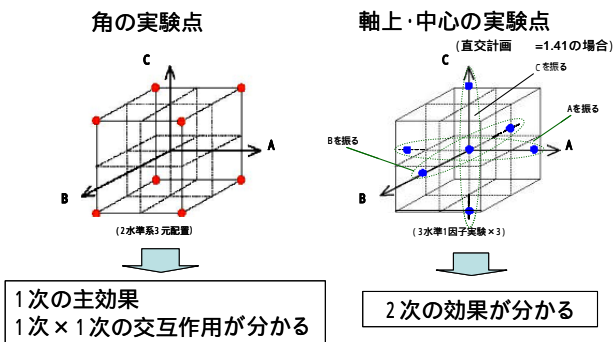


図-6 中心複合計画

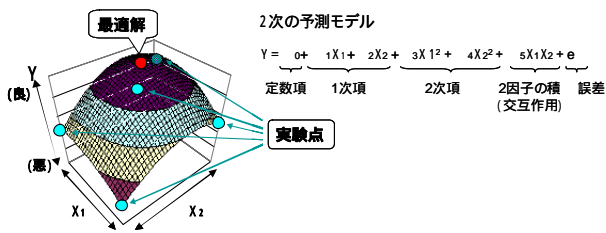


図-7 応答曲面解析

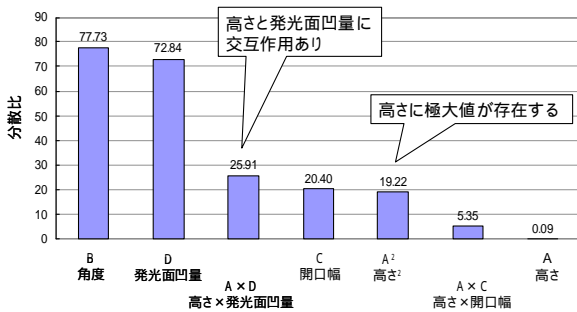


図-8 各パラメータの影響度

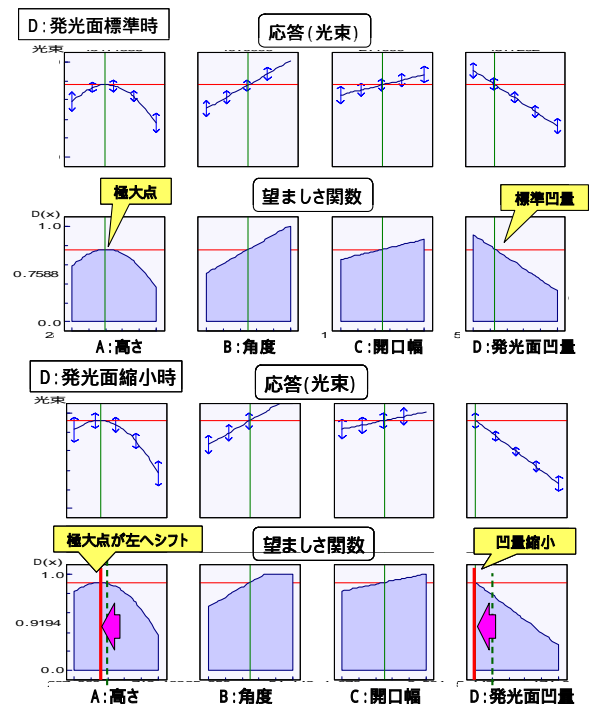


図-9 応答曲面解析結果

難しくなるといった図 - 4の「スネルの法則」に基づく推定メカニズムは正しいと考える。

### 3 - 1 - 5 . 検証および設計展開

以上の解析結果をもとに、一部の代表的な水準で試作を実施し、効果の確認を実施した。B「角度」とC「開口幅」は交互作用がなく、単独での効果であることから、本検討ではA「高さ」とD「発光面凹量」の関係に着目して試作実施し結果を得た。

図 - 10の試作結果により、発光面凹量により光束の極大点は移動し、解析結果と同様の傾向であることが現物確認できた。CAEおよびSQC手法を組み合わせた解析による事前検討の結果の有用性が立証された。

実際に製品設計を行う際は、成形性や封止精度などの要件を考慮する必要があるため、それぞれの値を微調整しながら更なる最適化を行い設計へと反映した。結果として、154lm/Wの効率（従来比 19.1%の効率向上）を得ることにより、目標とする効率150lm/Wを達成することができた。（図 - 11）

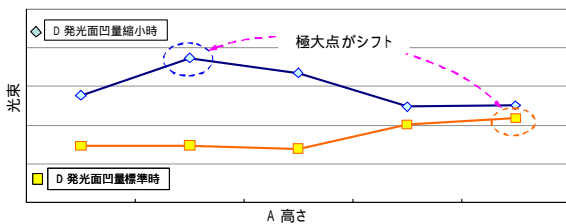


図 - 10 試作確認結果

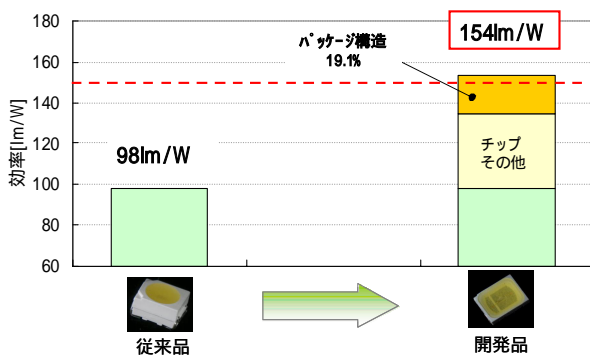


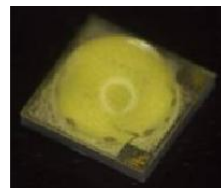
図 - 11 達成状況

### 3 - 2 . 高信頼性セラミックパッケージ

LEDパッケージの劣化要因として、光による劣化と、熱による劣化の2つが挙げられる。この2要因を如何にマネジメント出来るかが設計的なポイントである。このためには、劣化部位や構成部材の特性を正確に把握し、劣化モードを詳細に解析することが重要である。解析結果を元にして、高信頼性（長寿命化）に向けたアプローチとして、適切な構造設計および部材選定による放熱性や耐光性を高めることが挙げられる。

前述の3528パッケージのようなレギュラークラス領域およびミドルクラス領域のLEDにおいては、長寿命化を過度に追及しすぎることなく、高効率化とコスト成立を念頭に、顧客での実使用領域での寿命確保を目指した設計を心がけている。使用する樹脂材料や、放熱に寄与するリードフレームの材料、パッケージ構造設計などをポイントとして目標寿命の達成を継続的に図っている。

一方、大電流（ハイパワークラス）領域においては、図 - 12に示すようなセラミック基板を用いたフリップチップパッケージを開発しているが、AuSnによるLEDチップのフリップチップ実装技術による長寿命化が技術的なポイントである。



|       |               |
|-------|---------------|
| パッケージ | 3.5×3.5×2.0mm |
| 光束    | 136lm         |
| 効率    | 122lm/W       |
| 駆動電流  | 350mA/chip    |

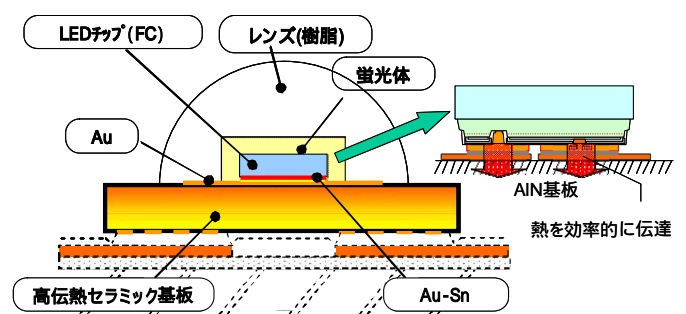


図 - 12 フリップチップパッケージ

構成としては、セラミック基板の上にLEDチップが実装されている。LEDチップは蛍光体含有のシリコン樹脂、および、レンズ状に成形したシリコン樹脂で囲われている。セラミック基板にはAuメッキ層を設けており、LEDチップ電極に蒸着したAuSnを介して、LEDチップは発光層をセラミック基板側に近い位置に実装

している。このようなフリップチップ実装により、発光層とセラミックが近接することで高放熱性を確保できた。本パッケージは、LEDチップの温度 ( $T_j$ ) が140 程度と高温な状態であっても、図 - 13に示すように、2万時間連続点灯後の光度低下は5%程度に留まる。光度残存率70%での予測寿命は6万時間以上であり、非常に長寿命なパッケージに仕上がっている。

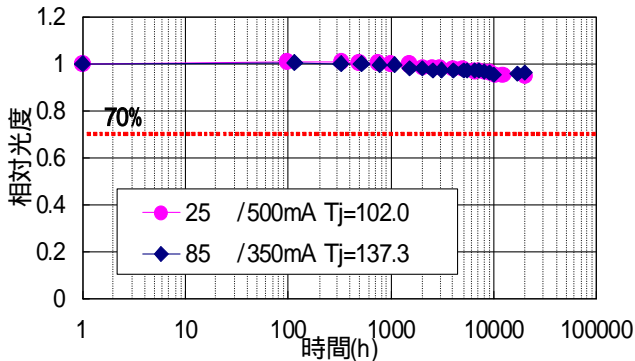


図 - 13 信頼性試験結果

LEDチップは電流密度を高くしていくことで明るさが高まっていく。一般的なLEDチップの実装方法であるフェースアップ (LEDチップの発光面を上向きにして、ワイヤーボンディングによって電気的な接合をする: FU) では、電流密度を増しても、ある領域から次第に明るさの高まりが小さくなっていく。FU実装は、LEDチップの放熱性が低いため、LEDチップの温度上昇により発光効率が下がってしまうためである。

フリップチップ (FC) は、LEDチップの発光部分を直接セラミック基板と接合させることによって、放熱性を上げている。そのため、FUチップでは明るさ低下が起こるような電流密度領域であっても、図 - 14に示すように明るさを高め続けることができる。LEDチップの表面温度を評価すると、図 - 15に示すように、フリップチップの方が温度の面内分布が均一かつ温度自体が低いことが確認された。

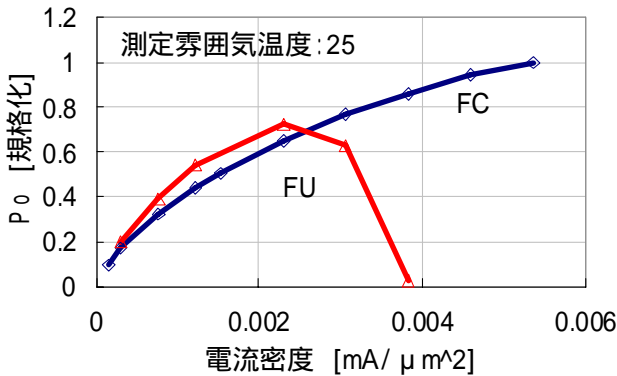


図 - 14 FUチップとFCチップの特性の違い

以上のようにLEDチップに対するストレスが少なく済む放熱性・実装方法を確保した、高信頼性を確保できる高い設計となっている。更に構成部材に無機材料を採用することにより、前述の十分な長寿命を確保した。

#### 4 . LED照明への応用

前述の高効率パッケージを用いて、LED照明に用いた例をご紹介します。2009年初頭から、主に事務所や工場での使用数量の多い、40W形直管蛍光ランプの置き換え用として、約1200mmの蛍光灯形LEDランプを検討している。

図 - 16に構成を示すが、高効率3528パッケージ192個を、プリント基板上に動作ICとともに実装する。アルミの筐体は放熱性を兼ねており、その他にポリカーボネート製のカバー、口金部品でモジュール部が構成されている。電源部は別置きタイプであり、蛍光灯の駆動用電源と丁度置き換わるように配置できる。

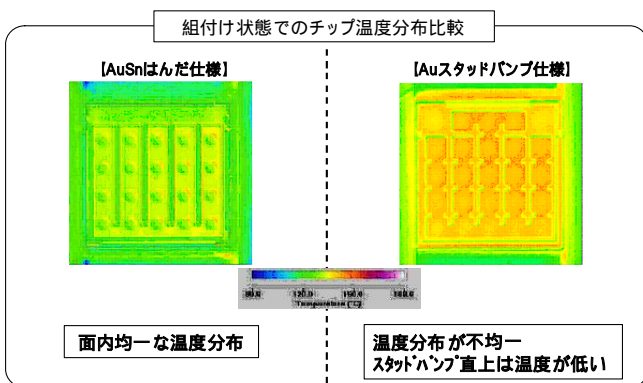
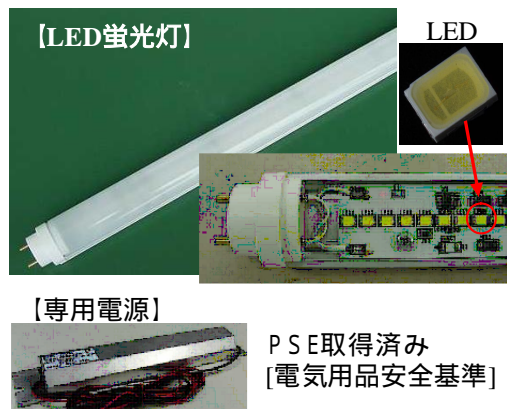


図 - 15 チップの表面温度分布

LEDの駆動用として交流から直流へ変換する回路であり、PSE（電気用品安全法）の取得もしている。性能面では、光束は約2000～2300lm、照度は450～500lx程度確保でき、約24Wで駆動する。ラピッド式の蛍光灯に対しと比較して十分性能があり、省費電力も約60%で省エネ効果（40%）も得られる。（図-17）



蛍光灯、電源はサンケン電気株式会社にて製造

図-16 LED蛍光灯

| 項目   | 開発品           | 蛍光灯                |
|------|---------------|--------------------|
|      | 40W型LED蛍光灯    | ラピッド式<br>FLR40SN/M |
| 光束   | 2,300 [lm]    | 1,800 [lm]         |
| 発光色  | 昼白色           | 昼白色                |
| 消費電力 | <b>24 [W]</b> | 41.7 [W]           |
| 寿命   | 40,000 [H]    | 10,000 [H]         |
| コスト  | 6,000 [円]     | 500 [円]            |

図-17 LED蛍光灯とラピッド式蛍光灯との比較



図-18 豊田合成 森町工場設置の例

この蛍光灯形LEDランプはすでに1,000本を越えて設置されており、事務所や工程内でも違和感なく使用されている。図-18に実施例を示す。今後、弊社の第5次環境取り組みプランにうたわれている照明のLED化の一環として増設していく計画である。

## 5. おわりに

照明として使用されるためにLEDに求められる性能は、ある一定の部分は既にほぼ満足できるものとなっているが、省エネ化に向けて更なる性能向上を求められている。一方で、現状のLED化は、従来の既存照明光源または既存照明器具などの置き換えに留まってしまう場合が非常に多い。LEDの本来の特徴である、小面積で発光でき、電気応答性も高く、調光特性も併せ持っているという点を、残念ながら十分に生かされていないのでは、というのがLED開発担当者としての思いである。今後、LEDが更に普及していく一方で、従来存在し得なかったデザイン性の高い照明など、「LEDらしさ」をより生かしたLED照明が現れてくると、LED照明は更に面白い分野になるものと期待する。

### 【参考文献】

- 1) 森 輝雄「タグチメソッドの応用と数理」  
トレンドブック
- 2) 山田 秀「実験計画法方法論 - 基礎的方法から応答曲面法、タグチメソッド、最適計画まで」  
日科技連
- 3) 立松 和夫「入門タグチメソッド」  
日科技連