

光-熱連成解析を活用した 白色LEDパッケージの設計技術

Technology for Design of White LED Packages Using Optical-Thermal Coupled Analysis

浮田 康成 十河 敬寛 遠島 未希

■ UKITA Yasunari ■ SOGO Takahiro ■ TOSHIMA Miki

青色LED（発光ダイオード）と蛍光体を組み合わせて発光させる白色LEDは、年々高効率化し、照明やモバイル機器など様々な機器への適用が進んでいる。製品をタイムリーに市場投入するには、シミュレーション技術を活用して開発の初期段階で仕様を満足する設計を完了させる必要がある。

今回東芝は、光-熱連成解析技術として、光学シミュレーションと熱シミュレーションを組み合わせたパッケージ内部温度と光学特性の予測技術を開発した。LEDチップの発光効率及び蛍光体の波長変換効率の温度依存性を考慮し、実測した材料物性をシミュレーションに反映することで、予測精度を向上させた。この技術は、ハイパワー白色LED TL1Lxシリーズの設計に適用されている。

With the increase in luminous efficiency of white light-emitting diode (LED) packages, which are composed of a blue LED and phosphors, white LED packages have been applied to lighting systems, mobile devices, and various other lighting fields in recent years. In order to achieve the timely introduction of such a product on the market, it is necessary to predict the performance of the white LED package using simulation technologies at the initial stage of development.

Toshiba has now developed a technology to predict the internal temperature of a package and its optical performance utilizing optical-thermal coupled analysis, which can improve the prediction accuracy by means of a simulation model taking into consideration the temperature dependency of the luminous efficiency of the LED chip and phosphors and reflecting the measured thermal properties of each material. This technology has been applied to the design of the TL1Lx series high-power white LED packages.

1 まえがき

青色光を放出するLEDチップと、青色光を長波長光に波長変換する蛍光体を組み合わせて疑似白色光を放出する白色LEDは、1990年代の製品化以降、LEDチップと蛍光体の特性改善により効率向上が進み、照明や、モバイル機器、自動車など様々な機器に適用されてきた。そのパッケージは用途により異なるが、それぞれで蛍光体の種類や濃度を変えることで色温度や演色性など様々な発光色のものがラインアップされている。この白色LEDパッケージでは、年に数度特性が向上しており、製品サイクルが短い。このため、タイムリーに製品を市場投入するためには、シミュレーション技術を活用して開発の初期段階で特性を精度高く見積もり、仕様を満足する製品設計をする必要がある^{(1), (2)}。

しかし、LEDチップと蛍光体のそれぞれで発熱があること、発光や波長変換の効率が温度の影響を受けることから、特に発光層の近傍での光学と熱の特性を予測することは難易度が高い。また、LEDチップと、蛍光体を混合させる封止樹脂には上限温度があり、高温で動作させた場合、信頼性試験で変色やクラックなどの不具合が発生して、大幅な開発の後戻りが発生する可能性がある。

東芝は、光と熱の現象を互いの影響を考慮しながら解析す

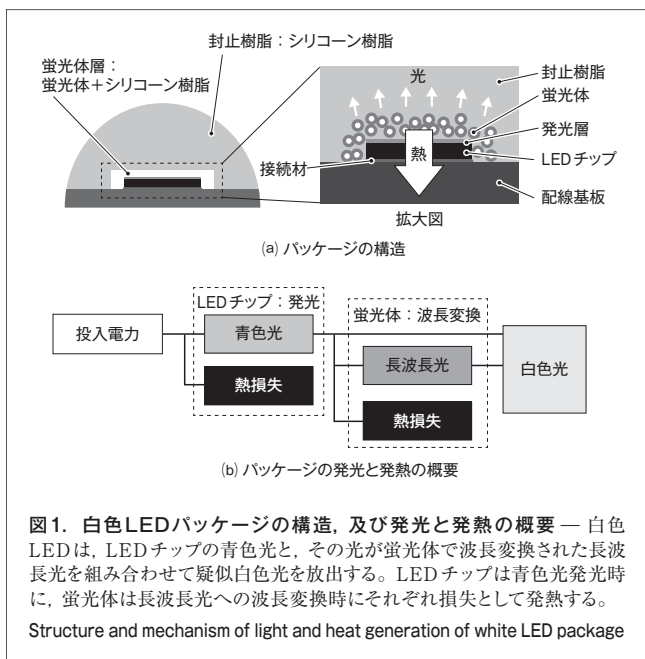
る光-熱連成解析を実現するため、光学シミュレーションと熱シミュレーションを組み合わせるとともに、解析上重要な構成材料の物性を実測しシミュレーションに反映することで、精度の高い特性予測技術を開発した。ここでは、白色LEDパッケージ設計における解析手法とTL1Lxシリーズの製品開発に適用した事例について述べる。

2 白色LEDパッケージでの発光と発熱

LEDチップ近傍での発光と発熱の状態を、**図1**を用いて説明する。発光層が上面形成されたLEDチップは配線基板に接続材で接続されている。蛍光体は、透明なシリコン樹脂と混合され、LEDチップの周囲に配置されている。

LEDチップは通電により発光層から青色光を放出するとともに、発光ロスにより発熱する。投入した電力が光に変換される効率（発光効率）は、投入する電力の増大及び点灯温度の上昇により低下する。

蛍光体は、青色光を吸収して長波長光、例えば黄色光を放出する。この蛍光体も波長変換時のロスで発熱し、温度の上昇に伴い波長変換の効率が低下する。混合される蛍光体の種類と量は発光色により異なり、このため、蛍光体層での発熱量は発光色により異なる。また、LEDチップの近傍に配置



された蛍光体は、発熱した発光層の影響によっても温度が上昇する。蛍光体で発生した熱は、蛍光体周辺のシリコン樹脂、LEDチップ、接続材、配線基板と伝わり放熱されるが、蛍光体の混合及び封止に使用されるシリコン樹脂の熱伝導率が低いために温度が下がりにくく、点灯中は蛍光体層がパッケージ内部でもっとも温度が高くなりやすい。

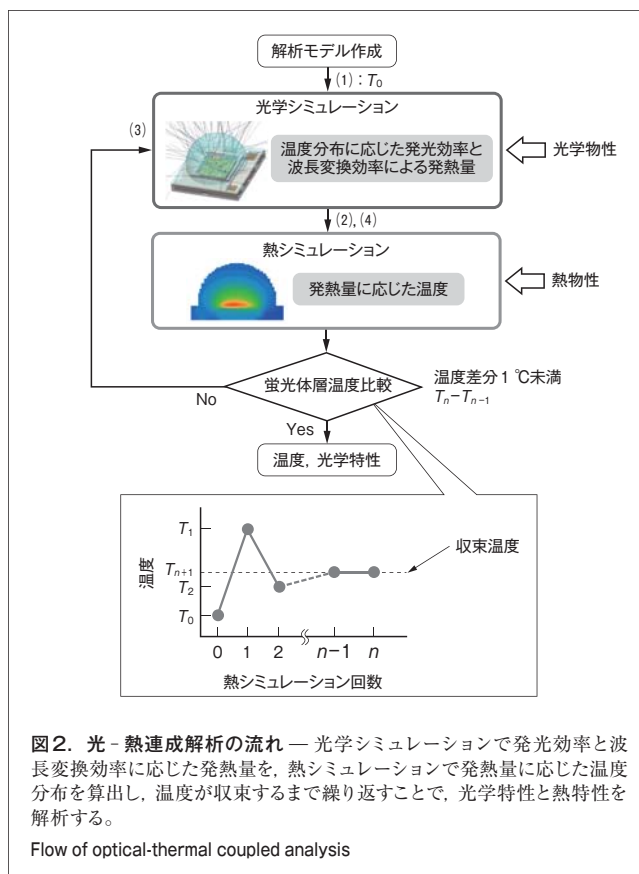
このように、LEDチップの発光及び蛍光体の波長変換の特性と発熱には相互に影響があり、光学シミュレーションと熱シミュレーションを独立で進めても正確な特性予測はできない。また、高い予測精度を確保するためには、青色光の発光強度が高く、発熱量の大きいLEDチップ上面と蛍光体層の界面近傍の材料特性を解析のモデルに反映することが必要で、これらの取得が課題となる。

3 光-熱連成解析

3.1 光学シミュレーションと熱シミュレーションを組み合わせた連成解析

光学シミュレーションと熱シミュレーションを組み合わせた解析の流れを図2に示す。解析では、点灯時に高温化する蛍光体層の特定箇所の温度を T_n (n : 解析回数)として算出していく。詳細な手順は以下のとおりである。

- (1) パッケージの各構成部材に、特性を取得したい基板温度を考慮した、初期温度 T_0 を仮設定する。光学シミュレーションにより発光量を算出し、LEDチップの発熱量 Qc_1 と蛍光体の発熱量 Qp_1 を、それぞれ温度に応じた発光効率と波長変換効率から算出する。
- (2) (1)で算出した Qc_1 、 Qp_1 の条件における熱シミュレーション



シオンを行い、 T_1 を算出する。ここまでが解析の1ルーチンである。初期ルーチンでは、光学シミュレーション時に初期温度として暫定値を使用している。このため、初期ルーチンの熱シミュレーションの結果を次のルーチンの光学シミュレーションにフィードバックして、再度、光学シミュレーションと熱シミュレーションを実施する。

- (3) 光学シミュレーションにより、LEDチップの発熱量 Qc_2 と蛍光体の発熱量 Qp_2 をそれぞれ(2)の温度分布に応じた発光効率と波長変換効率から算出する。
- (4) (3)で算出した Qc_2 、 Qp_2 の条件における熱シミュレーションを行い、 T_2 を算出する。

(1)~(4)で、光学と熱のシミュレーションを2度ずつ実施して得られた T_1 と T_2 の温度を比較する。両者の差が、例えば 1°C 未満であれば、構成材料の温度がほぼ同じ状態で光学シミュレーションと熱シミュレーションが行われたと判断する。 1°C 以上の差がある場合、発光時と放熱時の構成材料の温度に差があるため、温度差が 1°C 未満に収束するまで、光学シミュレーションと熱シミュレーションを繰り返す。収束後の解析結果が、部材の発熱を考慮した光学と放熱の予測結果となる。

3.2 光学物性

光学シミュレーションに使用するLEDパッケージの構成部材と光学物性及び測定方法の一例を表1に示す。LEDチップの光学物性は、発光層の発光強度分布を実測してモデル化す

表1. 白色LEDパッケージの構成部材の光学物性とその測定方法の例
Example of optical properties of white LED package and measurement methods

構成部材	光学物性	測定方法
LEDチップ	発光強度分布	ニアフィールド測定器
蛍光体	吸収率, 量子効率, 発光スペクトル, 波長変換効率	蛍光体効率測定器
その他構成部材	光反射率, 光透過率	分光光度計
	散乱特性	散乱分布測定器

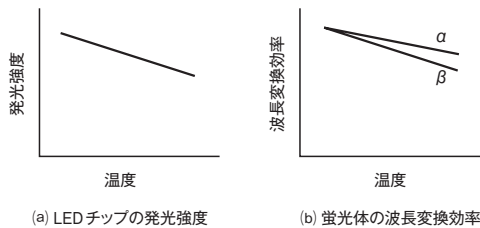


図3. 温度の光学物性への影響 — LEDチップの発光強度及び蛍光体の材料 (α , β) 別の波長変換効率への温度影響を明らかにして, 光学シミュレーションに反映する。

Effect of temperature on optical properties

るとともに, 発光効率の温度影響を明らかにしてシミュレーションに反映する (図3)。蛍光体も同様に, 材料別の温度影響を明らかにしてシミュレーションに反映する。

3.3 熱物性

パッケージ構成部材の材質の一例を表2に示す。熱特性には, シリコンや銅など, 物性値が明らかな材料はメーカー保証値や文献値を使用する。光-熱連成解析で重要なのは, 温度が上昇しやすい蛍光体とシリコン樹脂を混合した蛍光体層の熱伝導率の正確な値をシミュレーションに反映することである。必要な特性は, 蛍光体層の熱伝導率の蛍光体濃度と温度の影響であり, この解析では, これらの材料特性を実測して使用する。以下に, この設計技術での熱伝導率の測定方法を述べる。

シリコン樹脂に対する蛍光体の濃度を固定して厚さ t (m) を変更した樹脂片を用いた熱抵抗 R_{th} (K/W) の測定結果を

表2. パッケージ構成部材の材質の例

Example of constituent materials of white LED package

構成部材	材質
LEDチップ	シリコン
蛍光体層	蛍光体+シリコン樹脂 (色仕様で配合比が異なる)
封止樹脂	シリコン樹脂
接続材	樹脂系, 金属系
基板	銅, セラミック

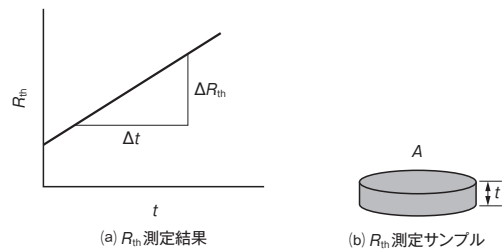


図4. 蛍光体層の熱抵抗測定結果 — 同一の蛍光体濃度では, R_{th} は t の1次関数で表される。

Result of measurement of thermal resistance of phosphor sample

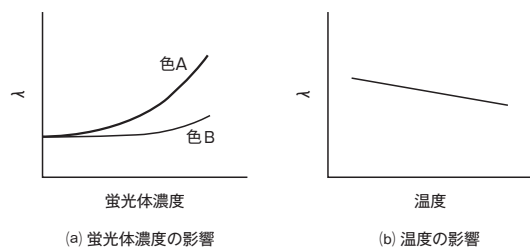


図5. 蛍光体層の熱伝導率測定結果 — 蛍光体層の熱伝導率には, 樹脂に対する蛍光体の濃度, 色仕様, 及び温度の影響がある。

Result of measurement of thermal conductivity of phosphor sample

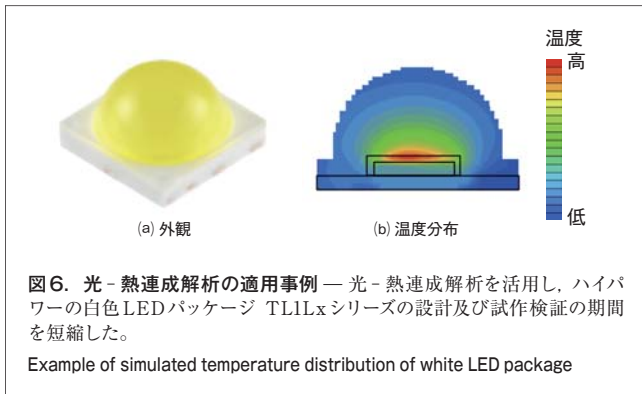
図4に示す。同一蛍光体濃度での R_{th} は t の1次関数で表されるため, 熱伝導率 λ (W/(m·K)) は, R_{th} , t , 及び断面積 A (m²) との関係式(1)から算出される。

$$\lambda = \Delta t / (\Delta R_{th} \times A) \quad (1)$$

蛍光体層の熱伝導率測定の結果例を図5に示す。熱伝導率が蛍光体濃度の増加に伴い2次曲線的に増加すること, 温度の上昇に伴い熱伝導率が低下することが明らかにできている。前者の特性は金属粒子と樹脂で構成される導電性接着剤などでも見られるように, 濃度の増加に伴い熱伝導率の高い蛍光体どうしの接触点数が増えることの効果であり⁽³⁾, 後者の特性は温度上昇によりシリコン樹脂が膨張することの影響で発生したと考えられる。これらの物性値は使用する蛍光体の種類の影響が大きく, 例えばLED電球に使用される昼白色と電球色を発光させる蛍光体層を比較した場合, 約35%の熱伝導率差が発生しており, 色仕様別に実測の熱物性を反映することが重要となる。

4 光-熱連成解析の白色LEDパッケージへの適用例

光-熱連成解析を, 3.5×3.5 mmサイズのハイパワー白色LEDパッケージ TL1Lxシリーズの設計に適用した事例を図6に示す。熱解析と実測値の誤差を5%以下に低減し, 高い精度



で特性予測ができたことを確認した。また、予測技術の向上により、後戻りをなくし、設計及び試作検証の期間を約20%短縮できた。

5 あとがき

製品開発サイクルの短い白色LEDパッケージ製品をタイムリーに市場投入するため、光学シミュレーションと熱シミュレーションを組み合わせた解析技術を開発した。この解析技術を白色LEDパッケージの新規製品開発に適用し、精度の高い特性予測を実現して設計段階でパッケージ課題を明確化することで、仕様を満足する設計が後戻りなく短期間で実施できた。

今後の白色LEDパッケージ開発にも活用するとともに、更なる精度向上に向けた技術開発を進めていく。

文 献

- (1) 井上道信 他. 熱シミュレーションを活用したLED照明の放熱設計技術. 東芝レビュー. 69, 9, 2014, p.12-15.
- (2) 玉置紗矢加 他. 応答曲面法を用いたシミュレーションによる光学製品の設計技術. 東芝レビュー. 70, 4, 2015, p.38-41.
- (3) 菅沼克昭. ここまできた導電性接着剤技術. 東京, 工業調査会, 2004, 209p.



浮田 康成 UKITA Yasunari

生産技術統括部 生産技術センター 実装技術研究部主任研究員。電子機器及びモジュール実装の研究・開発に従事。
Electronic Packaging & Assembly Technology Research Dept.



十河 敬寛 SOGO Takahiro, D.Eng.

生産技術統括部 生産技術センター 実装技術研究部研究主務。博士(工学)。電子機器及びモジュール実装の研究・開発に従事。
Electronic Packaging & Assembly Technology Research Dept.



遠島 未希 TOSHIMA Miki

生産技術統括部 生産技術センター 光技術研究部。光学設計及び光学シミュレーション技術の開発に従事。
Optical Technology Research Dept.