

サプライチェーンにおけるLED製品 仮想プロトタイピングによる開発加速 —パート1—

アンドラーシュ・ポッペ、ロビン・ポーノフ、グスターフ・ハントス、ヤーノシュ・ヘゲダス

LEDやLED搭載システムに対する多次元的なモデリング手法について説明する。仮想プロトタイピング用のデジタルツインの特性評価が可能なこの手法により、SSL製品開発を加速化することができる。

応用分野が自動車であるか、一般照明であるか、特殊製品であるかに関わらず、LEDを搭載する照明器具設計のプロトタイピング、サンプリング、試験検査には、莫大な時間とコストがかかる。固体照明 (Solid State Lighting : SSL) のサプライチェーンに対する、より高い統合レベルでのデジタル化、つまり、インダストリ 4.0 (Industry 4.0) の原則の適用は、そうしたコストの削減につながる。この問題に取り組むために、Delphi4LED というコンソーシアムが設立された (<http://www.delphi4LED.org>)。Delphi4LED は、照明器具メーカー、学術機関、ソフトウェア/テスト企業を代表する、7カ国の15のパートナー組織で構成されている。このコンソーシアムの目標は、テストデータから導出されたLEDモデルを基に、マルチドメイン (熱、光学、電気) のLED構造用設計及びシミュレーションツールを構築するための標準化手法を、SSL業界向けに開発することである。二部構成のパート1となる本稿では、モデル開発の手順について解説する。パート2では、パイロット実装を紹介する。

まずは背景を簡単に説明しよう。本稿で紹介するのは、Delphi4LED H2020 ECSEL という開発研究 (R&D)

プロジェクトである。欧州連合の ECSEL (European Union Electronic

Components and Systems for European Leadership) イニシアチブの一環

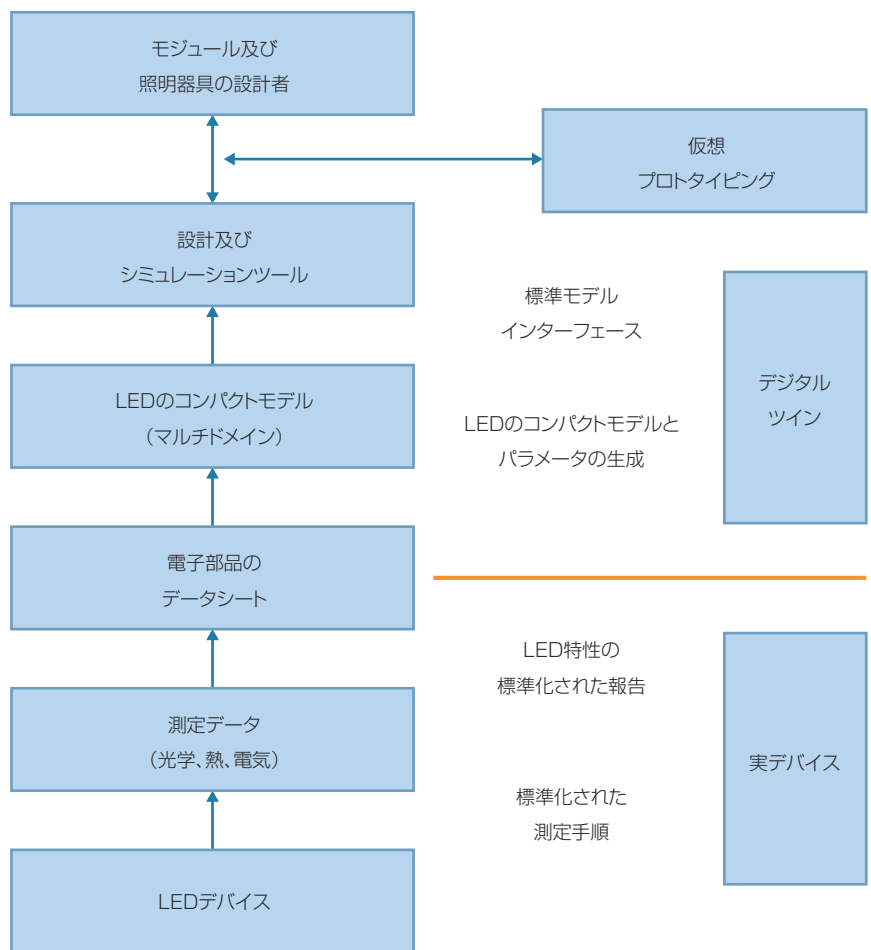


図1 LEDのアプリケーション設計をデジタル化するためのDelphi4LEDのアプローチは、パッケージLEDの実サンプルのデジタルツインの作成を基盤とする。

として助成を受けている。前述のとおり、コンソーシアムの参加パートナーは、LED製品のマルチドメインの特性評価のためのテスト及びモデリング手法の開発に取り組んでいる。重要なのは、このプログラムが、SSLサプライチェーンに沿ったさまざまな統合レベルでのアプリケーションに着目している点である。得られたコンパクトモデルを、実製品のデジタルツインとして使用して、照明器具設計時の仮想プロトタイピングをサポートすることを、目標としている。

高いレベルでは、このプロジェクトは、インダストリ4.0の理念に歩調を合わせることを目指している。インダストリ4.0は、第4次産業革命とも呼ばれている。サイバーフィジカルシステムと呼ばれるものに基づき、最終的には、無線接続とインダストリアルIoT (Industrial Internet of Things : IIoT) 技術を備えたスマートファクトリで製造を行おうというのが、その概念である。

本稿では、新しいアプローチ、概念実証として行われたこのプロジェクトの最初の実証実験、その結果について説明する。

このプロジェクトのもう1つの重要な目標は、この手法を広い範囲に適用可能とすることである。多次元モデリングの実現により、LEDアプリケーションの効率的なシミュレーションが可能になるはずである。前述のデジタルツインの作成によって、個々のパッケージLEDから完全な照明器具に至るまでの製品に適用できるように、モデリング手法は汎用的なものでなければならない。デジタルツインは、シミュレーションに基づく実験と最適化において、物理的な実製品を適切に表す必要がある。

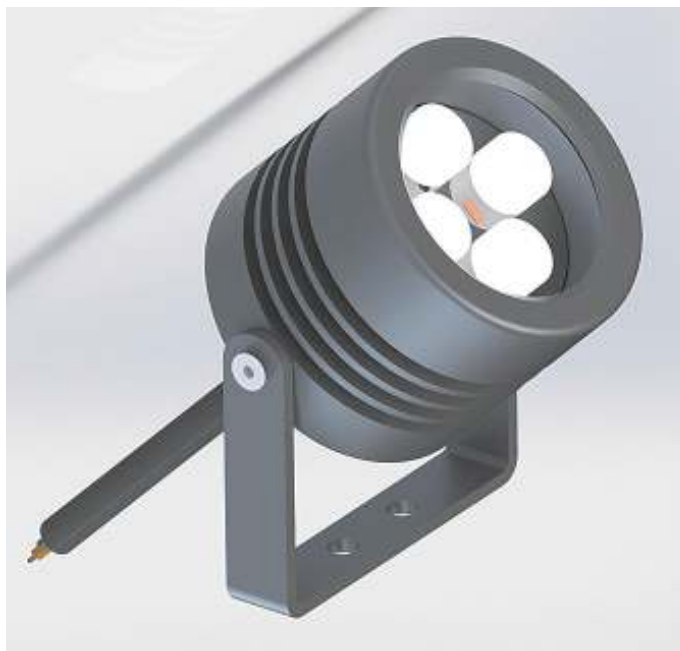


図2 Delphi4LEDのアプローチによるサンプルモデルとシミュレーションの開発に用いられた、LEDスポットライト照明器具。



図3 熱シミュレーションの出発点となる、LEDスポットライト照明器具のMCADモデル⁽³⁾。

まずはビジョン

まず、完全にデジタル化されたLED製品開発を実現するために実行しなければならない、さまざまな工程の全体的なビジョンを作成した(図1)。このアプローチには、2つの重要な要素が存在する。1つは、パッケージLEDのコンパクトなマルチドメインモデルで、実際のLEDパッケージの境界条件に依存しな

いコンパクトサーマルモデル (Compact Thermal Model : CTM) で構成される。もう1つは、チップレベルでのLEDの動作を表すマルチドメインのSPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) に似たモデルである。SPICEとは、標準化されたコンポーネントモデルを使用する、オープンソースのアナログ電子回路シミュレータである。

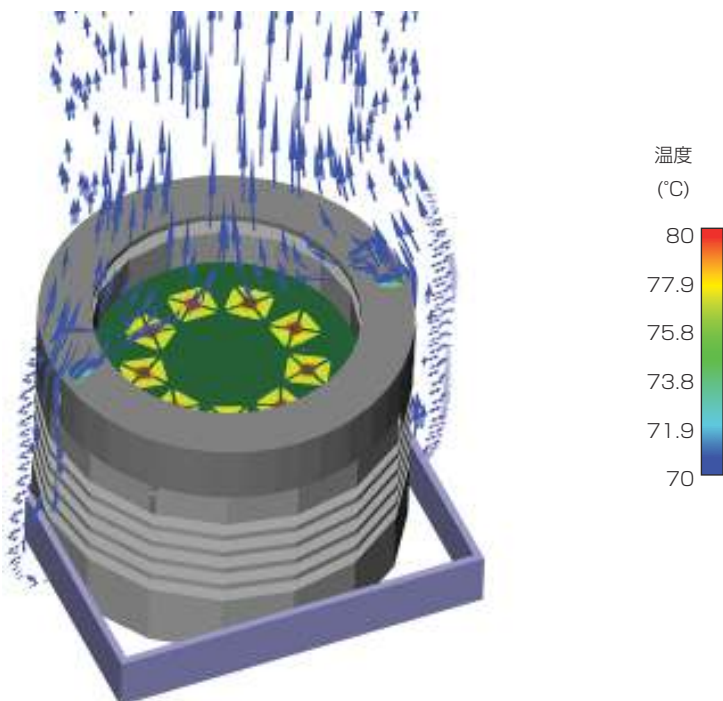


図4 MCADモデルから生成された、LED照明器具の詳細なCFDシミュレーション。

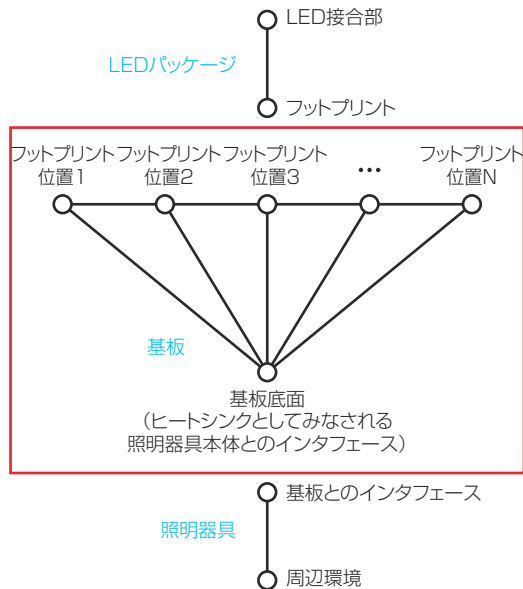


図5 基板に対する複数熱源のCTMにおいて、LED照明器具は、全体的なシステムモデルの中の基板から周辺環境への単一の熱抵抗として表されている。

測定データに基づいてそうしたモデルを簡単に作成できるような、新しいテスト及びモデリング手法を開発することが、このコンソーシアムプロジェクトの目的の1つだった^{(1), (2)}。

方法論の構築

次に、LEDスポットライト照明器具(図2)を例として使用し、中小企業にも大企業にも適用できる、インダストリー4.0ののりとした新しいアプローチ

の概要を考案した。この例に対する技術的なデータシートを、応用プロジェクトで適用される条件に基づき、また、照明器具の実際の最大性能を基準に、照明デザイナーが規定した⁽³⁾。

LEDの試験検査には、JEDECのパワー半導体用⁽⁴⁾またはパワーLED用^{(5), (6)}の熱試験規格や、CIEの高出力LED用のLED光学試験に関する推奨事項⁽⁹⁾など、最新のLED試験方法を採用したいと考えている。その前提に基づき、等温の電流/電圧/光束特性を、熱インピーダンスとの組み合わせで測定するという、これらの規格の推奨事項を取り入れた。熱モデリングでは、熱インピーダンス曲線の代わりに構造関数を使用される⁽⁸⁾。

温度がLEDの動作に大きな影響を与えるため、LEDパッケージ、モジュール、照明器具の熱モデリングを、電氣的/熱的/光学的統合レベルの基礎として使用した。基本的にはLEDのチップレベル/パッケージレベルで、マルチドメイン処理を開始する。この設計アプローチは、パッケージLEDチップ(またはパッケージ)に関する必要データを、適切なモデルを抽出するソフトウェアツールで処理可能な電子フォーマットで、LEDベンダーが供給してくれることを拠り所とする。LED動作のマルチドメイン特性を記述するには、一貫した方法で測定された光出力特性、熱特性、電気特性が、LEDベンダーによって標準的な形で供給される必要がある。現在、CIEのDivision 2のTC2-84技術委員会が、LEDパッケージ用のテストデータの報告に関する推奨事項の策定に取り組んでいる⁽⁹⁾。

われわれが開発したLEDチップのデジタルツインは、SPICEに似たマルチドメインのLEDモデルである。これについては、以前発表したものに^{(10), (11)}、

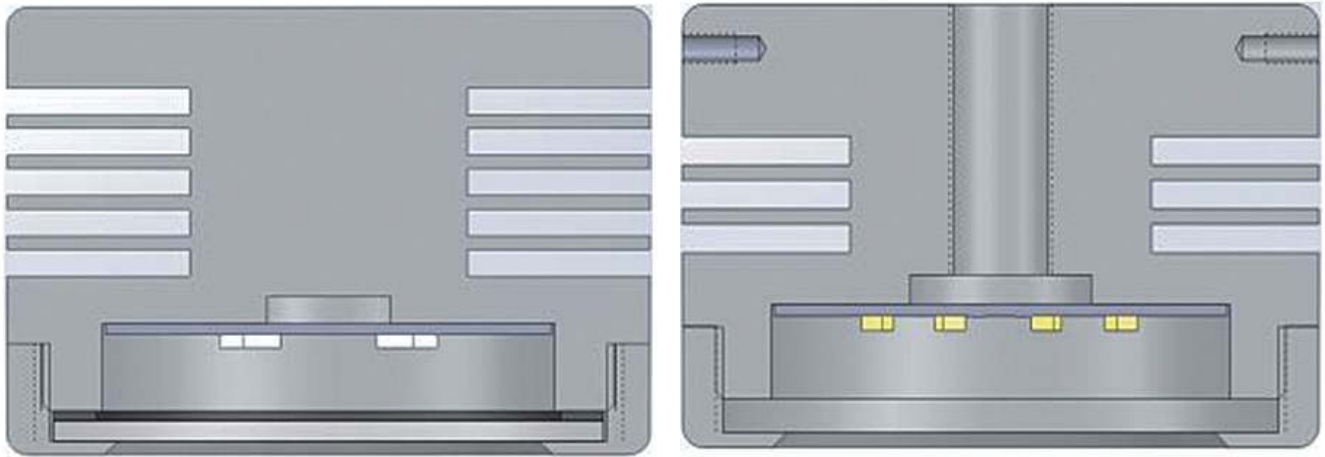


図6 異なる熱設計の。CTMにおいて、照明器具本体が、基板から周辺環境への異なる熱抵抗によって表されている。

その後アップグレードを加えた^{(12)~(14)}。一連の適切な式、回路マクロモデル、測定データに適合させたモデルパラメータによって、LEDチップのデジタルツインが表される。将来的には、必要な測定とモデルパラメータ同定が、標準化されたフォーマットでLEDベンダーから得られるようになると期待できる。

テストワークフローのシナリオ

熱デジタルツインを作成するための最初の工程は、構造関数を使用して、LEDパッケージの校正済みの詳細な3Dモデルを作成することである⁽¹²⁾。モデルには、詳しい構造や材料特性に関するLEDベンダーからのプロプライエタリ情報が含まれている。その情報は、LED製品開発者から直ちに入手できるものではない。LEDベンダーは、そのようなモデルをエンドユーザーには共有しないが、エンドユーザーは独自のLEDパッケージ測定に基づいて、そうしたモデルを構築することもできる。

Delphiの当初の方法論⁽¹⁵⁾がこの新しいアプローチにも受け継がれており、それに基づいて、校正済みの詳細な熱モデルから、最適化プロセスを通してCTMが同定される⁽¹⁶⁾。このDelphi

4LEDプロジェクトでは、LEDパッケージのダイナミックコンパクトサーマルモデル(Dynamic Compact Thermal Model:DCTM)が作成される⁽¹⁷⁾。このモデルは、LEDパッケージの実際の熱動作を表す実際のデジタルツインとして、その後の照明器具レベルの解析に用いられる⁽¹⁸⁾。

このコンパクトモデルのメリットは、プロプライエタリ情報はもう含まれないため、LEDベンダーが自社のIPを共有することなく共有できることである。チップレベルのマルチドメインLEDモデルに接続されたパッケージDCTMは、パッケージLEDの究極のデジタルツインで、例えばSPICEネットリストとして提供される。

熱の観点からは、照明器具は複数の熱源からなるシステムであり、検討が必要な熱源は、LEDパッケージとそのフットプリントである。LED照明器具のデジタルツインの出発点として適切なのは、そのMCADモデルである(図3)。照明器具の熱のみのデジタルツインとしての熱モデルを、このMCADモデルから抽出することができる。

照明器具のCTM作成ツールでは、照明器具のCTMを提供するために、

さまざまなアプローチがとられる場合がある。その1つとして、照明器具の熱特性マトリックスを同定し、照明器具の数値流体力学(Computational Fluid Dynamics:CFD)シミュレーションを使用して、それをSPICEネットワークに変換する方法が考えられる(図4)⁽¹⁸⁾。次数低減モデリング(Reduced Order Modeling:ROM)手法を用いることによっても、照明器具のCTMを得ることができる⁽¹⁹⁾。

LED照明器具の完全なデジタルツインは、上述の照明器具のCTMに、LEDパッケージのデジタルツイン(パッケージDCTMによって完成させた、チップレベルのマルチドメインモデル)を組み合わせることによって得られる。このような照明器具全体のデジタルツインを、仮想プロトタイプとして使用することにより、さまざまな環境条件やさまざまな設計バージョンに対して、ホットルーメン(動作温度で放出された全光束)を計算することができる。照明器具設計を分割し、それをシミュレーションモデルに反映させることも可能である。

本稿の例では、メタルコアプリント回路基板(Metal Core Printed Circuit

Board:MCPCB)を、(複数熱源のコンパクトモデルによって記述された)1つの熱コンポーネントとみなし、ヒートシンクとしての照明器具本体を、周辺環境に対する単一の等価熱抵抗によってモデル化されたもう1つのコンポーネントとみなしている(図5)。

異なる照明器具の熱設計では(図6)、異なる熱抵抗がシンプルなコンパクトモデルとして使用される。そのように

することで、異なる材料と異なる設計(銅被覆領域、フットプリントレイアウトなど)で製造された基板と、異なる熱特性を持つ照明器具のライブラリを作成し、後のシステムレベル設計と最適化に利用することができる。

Delphi4LED コンソーシアム内と世界の両方において、企業文化や利用可能な技術的/経済的リソースに基づいて、まったく異なる設計手法を日常

的に採用する2つの企業を特定した。Delphi4LED コンソーシアムによるパイロット研究と実証実験は、その2つの状況に基づいて構築されている⁽³⁾。

本稿のパート2では、2つの異なるシナリオにおけるパイロット実装の結果について詳しく解説する。また、このモデリング手法を、大小両方の規模の組織において使用する方法について説明する。

参考文献

- (1) R. Bornoff et al., "Delphi4LED - From Measurements to Standardized Multi-Domain Compact Models of LEDs: a New European R&D Project for Predictive and Efficient Multi-domain Modeling and Simulation of LEDs at all Integration Levels Along the SSL Supply Chain," Proc. THERMINIC, 174-189 (Sept. 2016), DOI: 10.1109/THERMINIC.2016.7749048.
- (2) G. Martin et al., "Delphi4LED - from measurements to standardized multi-domain compact models of light emitting diodes (LED)," Electron. Cooling Mag., 20-23 (Aug. 2017).
- (3) C. Marty et al., "Design flow for the development of optimized LED luminaires using multi-domain compact model simulations," Proc. THERMINIC (Sept. 2018), DOI: 10.1109/THERMINIC.2018.8593318.
- (4) JEDEC JESD51-14 Standard, "Transient Dual Interface Test Method for the Measurement of the Thermal Resistance Junction-To-Case of Semiconductor Devices with Heat Flow through a Single Path" (2010).
- (5) JEDEC JESD51-51 Standard, "Implementation of the Electrical Test Method for the Measurement of Real Thermal Resistance and Impedance of Light-Emitting Diodes with Exposed Cooling" (2012).
- (6) JEDEC JESD51-52 Standard, "Guidelines for Combining CIE 127:2007 Total Flux Measurements with Thermal Measurements of LEDs with Exposed Cooling Surface" (2012).
- (7) CIE 225:2017 Technical Report, "Optical Measurement of High-Power LEDs," ISBN 978-3-902842-12-1, DOI: 10.25039/TR.225.2017 (2017).
- (8) G. Farkas, A. Poppe, "Thermal testing of LEDs," Thermal Management for LED Applications, 73-165, Springer (2014), DOI: 10.1007/978-1-4614-5091-7_4.
- (9) Scope of the CIE TC2-84 technical committee.
- (10) A. Poppe, "Multi-domain compact modeling of LEDs: an overview of models and experimental data," Microelectron. J., 46, 12 A, 1138-1151 (2015), DOI: 10.1016/j.mejo.2015.09.013.
- (11) A. Poppe, J. Hegedüs, and A. Szalai, "Multi-domain modeling of power LEDs based on measured isothermal I-V-L characteristics," Proc. CIE Lighting Quality & Energy Efficiency Conf., 318-327 (Mar. 2016).
- (12) G. Hantos et al., "Measurement issues in LED characterization for Delphi4LED style combined electrical-optical-thermal LED modeling," Proc. EPTC (Dec. 2017), DOI: 10.1109/EPTC.2017.8277493.
- (13) G. Farkas et al., "LED characterization within the Delphi-4LED Project," Proc. IOTHERM (May/June 2018), DOI: 10.1109/IOTHERM.2018.8419602.
- (14) A. Poppe et al., "Multi-domain modelling of LEDs for supporting virtual prototyping of luminaires," Energies, special issue on Thermal and Electrothermal System Simulation, submitted (2019).
- (15) JEDEC JESD15-4 Standard, "DELPHI Compact Thermal Model Guideline" (2008).
- (16) R. Bornoff, G. Farkas, L. Gaál, M. Rencz, and A. Poppe, "LED 3D Thermal Model Calibration against Measurement," Proc. EuroSimE (April 2018), DOI: 10.1109/EuroSimE.2018.8369929.
- (17) R. Bornoff, "Extraction of Boundary Condition Independent Dynamic Compact Thermal Models of LEDs - a Delphi4LED Methodology," Energies, special issue on Thermal and Electrothermal System Simulation, submitted (2019).
- (18) A. Poppe, J. Hegedüs, A. Szalai, R. Bornoff, and J. Dyson, "Creating multi-port thermal network models of LED luminaires for application in system level multi-domain simulation using Spice-like solvers," Proc. SEMI-THERM, 44-49 (March 2016), DOI: 10.1109/SEMITHERM.2016.7458444.
- (19) S. Lungten et al., "Dynamic Compact Thermal Model Extraction for LED Packages Using Model Order Reduction Techniques," Proc. THERMINIC (Sept. 2017), DOI: 10.1109/THERMINIC.2017.8233791.
- (20) G. Martin et al., "Luminaire Digital Design Flow with Multi-Domain Digital Twins of LEDs," Energies, special issue on Thermal and Electro-thermal System Simulation, submitted (2019).

著者紹介

アンドラーシュ・ポッペ(ANDRÁS POPPE)とロビン・ボーンフ(ROBIN BORNOFF)は、独シーメンス社(Siemens)傘下の米メンター社(Mentor, <https://www.mentor.com/>)所属。グスターフ・ハントス(GUSZTAV HANTOS)とヤーノシュ・ヘゲダス(JANOS HEGEDUS)は、ブダペスト工科大学(Budapest University of Technology and Economics, <https://www.bme.hu>)所属。