

# LEDと3Dプリント技術を活用した、持続可能なSSLパラダイム—パート2

ドナルド・パイファー

積層造形によって、モジュール性、カスタマイズ性、分解できるデザイン、コスト効果の高いデザインが実現されて、公平な循環型照明の未来が形作られることについて解説する。

この2部構成シリーズのパート1では、一般的なリニア型の照明器具における蛍光灯とLED照明の性能の違いをおさらいし、次世代の照明コンポーネントと最終製品に対する積層造形の実行可能性の試験と実証を目的に開始された、Sparkle照明コンセプトについて説明した。パート2では、従来の照明製造および配光モデルを覆して進化させる可能性を秘めた、この照明器具コンセプトに寄与する、コンポーネントのモジュール性、カスタマイズの柔軟性、分解できるデザインという3つの項目の交差点について解説する。

## 照明器具のフレーム設計

パート1の最後では、グレアを緩和して、直視した時に光源が目立たないように工夫された、Sparkleのルーバードesignについて説明した。

フレーム設計に話を進めると、フレームのメインシャーシには複数の目的がある。パート1の光学機械と熱コンポーネントの説明で強調したように、積層造形によって実現されるフレーム形状の多くが、従来の金属製造や金属加工では不可能である。

フレーム下部の2列の穴は、光抽出とスパークル効果を可能にする。これ

らの穴は、音を抑えたり環境に吸収したりする効果もある可能性がある<sup>xii</sup>。側面の穴と目打ちに加えて、照明器具の上部にも、上下両方からアクセサリを取り付けるための一連の穴がある。配線、吊り下げハードウェア、ライトエンジンのアクセサリを、フリクションフィットでそれらの穴に固定することが可能で、分解が容易である上に、ULの振動試験にも合格する。接着剤や、ネジなどの補助ハードウェアは不要である。建材、ハードウェア、締め具が少ないことは、サーキュラーエコノミー（循環型経済）の目標達成のために役立つ。

積層造形でしかできないもう1つの機能が、テキストをコンポーネントそのものに印字することである。例えば、フレーム上方の窪んだ部分に分解手順を印字することができた。この情報は、空間で直視しても見えないが、現場で照明器具を取り扱う作業者は、誰でもすぐに参照できる。これは重要な保守機能になり得るものだ。簡単に剥がすことのできる3Dプリントのメダリオン文様は、QRコードにすることも可能で、作業者はそれをスキャンすることで、使用期間終了時の改修と廃棄のための分解手順を参照することができる。

保守計画の改善は、照明における循環型経済の目標を達成するための鍵を握る要素である<sup>xiii</sup>。そのための方策の

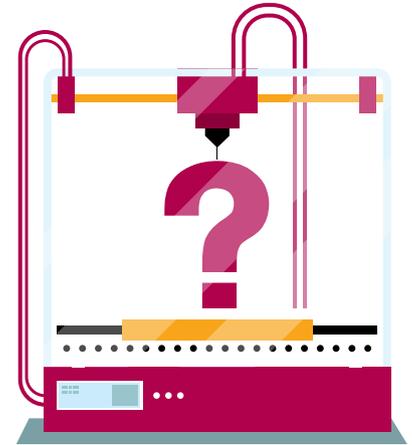


Illustration 1 15860956 © Fandiki | Dreamstime.com

1つが、予備のLEDエンジンを照明器具に収容して、問題が発生した場合に光源を類似のLEDに交換できるようにすることである。照明器具は現在、ツールレスで保守する機能が限られている。現場でのLEDの保守に関する懸念は、LEDが特定のピンに分類されていること、蛍光体配合が異なること、現場で経時とともに特性にずれが生じることによる。例えば、LEDは現在、出力（単位：ルーメン）、色座標、順方向電圧の3つの異なるモードでピン分けされている。AT0のLEDモジュールは出力重視で、照明器具の保守が必要になった場合に既存のLEDの色特性に合わせるのは難しいかもしれない。同一バッチのLEDを予備として備えれば、保守時間が短縮されるだけでなく、LEDの特性が一致するという安心感をユーザーに与えることができる。

## 新しいタイプのエンジン

蛍光体技術の進歩により、LEDは、

### 編集者注記

図、表、脚注は、連続性を維持するために、パート1とパート2で連番で番号が振られている

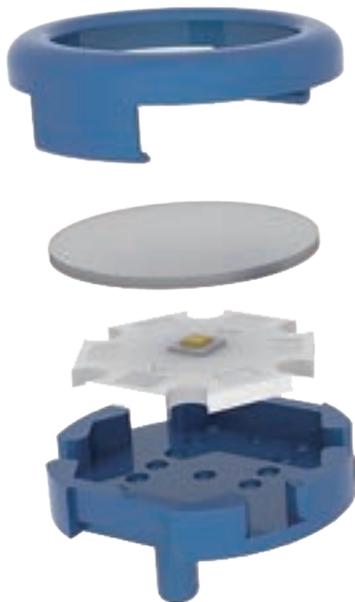


図4 ツールレスのスナップフィット筐体と取り外し可能なスターボードを採用するSparkleのダウンライトLEDモジュール。本稿の図はすべて、Smash the Bulbのドン・パイファー氏提供

デバイス効率と色品質が急速に高まるとともに、価格は低下している。業務用照明器具の2つの一般的な小型構成要素が、3030(3×3mm)と2630(2.6×3mm)のパッケージで、出力は一般的に30～60lmである。

ローフォーマットLEDの従来のコンポーネントの一部、具体的にはパッケージを取り払うというのが、LED技術の現在のトレンドである。古いLED(2630と3030)のパッケージは、セラミックなどの耐摩耗性に優れた材料が使われる場合もあるが、大半はプラスチック製だった。そうしたパッケージは安価ではあるものの、温度に弱く、溶けてしまう恐れがあった。そのため、低出力デバイスの駆動電流には厳しい制限が設けられている。従って、出力のハイエンド側における、照明器具システムのルーメンレンジは限られていた。

CSP(チップスケールパッケージ)タイプのLEDが登場したことで、そうしたパッケージコンポーネントが業界から一掃され、過駆動の制約が取り払われた。その結果、300lmを超える出力を備え、フットプリントがはるかに小さくなって

光束結合が改善されたCSP LEDが、今では多く存在する。それらは駆動電流範囲も広いため、ルーメン出力が異なる、幅広い製品タイプが実現可能である。Sparkleルーバーには、250lmを出力可能な新しいLEDパッケージが採用されている(図4)。

今日のリニア型LED照明システムの標準仕様が1000lm/ft(公称値)であることから、CSP採用の4つのスターボードで、標準的なLEDボードに配置されている27個の低出力デバイスを置き換えられると考えることができる。標準的な4フィート(約1.2m)の半間接照明器具(アップライトボードとダウンライトボード)のLEDの数は92%減少し(Sparkleの場合)、PCB材料の量は84%減少する。

Sparkleルーバーは、LEDパッケージをそれほど密集して配置する必要がない。従来のプロセスでは、ディフューザ(パージプラスチック)が各ダウンライトLEDアレイの下に使用される。均一性を実現するために、LEDは通常、密集した間隔(10mmピッチ)で並べられ、ディフューザは一定の距離をあけて配置され、リフレクタが併用される場合が多い。Sparkleルーバーは、個別のCSPパッケージを採用して、はるかに広い間隔(80mmピッチ)

で配置し、ローカルディフューザのみを使用する。ここでも、同じ効果を生じつつ使用材料は減少し、循環型の目標が実現される。

それでも、「標準的」なLevel 2ボードの電氣的構成の違いを理解することは重要である。非常に多くのLEDが使われるため、LED(一般的には公称電圧3V)は列に分けられる。1つの列に複数のLEDが直列に接続されて、複数の列が並列に並べられる。ボードあたりのLEDの数は、製品によって大きく異なる。例えば、標準的なZhagaのリニアボードは、9個のLEDからなる列が3列並んでいる可能性がある。LEDベンダーの間でも、1列のLEDの数やボード上の列の数にばらつきがある。電氣的ビアがそのボード専用で作成されていることを考えると、後でそれを再利用できる可能性は非常に低い。一方、スターボードには、1つの入力チャンネルと1つの出力チャンネルがある。照明用途だけでなく、他の用途向けに改修と再利用を行う能力も最適化されている。

## 分解できる材料とデザイン

金属製造は、環境に多大な悪影響を与える。金属の加工やリサイクル時には、大量の水が使われる。原材料の採掘時には、その土地の大気質や水質を損なう有害粉塵が生成される。リサイクル処理には、膨大な量の天然資源も使われ、リサイクルの副産物の1つであるドロスは、極めて危険と考えられており、特殊な容器に保存する必要がある。業務用照明器具のリサイクル率は非常に低く、大半がそのまま廃棄される。

その理由の1つは、照明器具を個々のコンポーネントに簡単に分解できないことにある。分解できないのは、共通材料が使われておらず、除去できな

図5 ウッド仕上げの「Sparkle Eco-System」の例。積層造形技術によって実現されるモジュール性によって、カスタムデザインが可能であることを実証している

い塗料や接着剤が使用されているためである。材料の統一は、Sparkleの最優先事項だった。(配線、LED、吊り下げ用ハードウェアを除く)各コンポーネントは、同一素材でできており、同じ廃棄手順でリサイクルできる。例えば、Sparkleのあるコンポーネントは、リグラウンドプラスチックでできている。このプラスチックは、使用期間終了時にリグラウンドして、照明器具やその他の種類の製品に再利用できる。このようなクローズドループシステムは、バージン材料の新たな投入を減らし、排出量を削減して、カーボンフットプリントの飛躍的な削減に貢献する。

積層造形の外観上のメリットは、さまざまな色を設計者が自由に選択できるということである。塗装と陽極酸化は、金属製照明器具のリサイクル能力を損なう。また、ほとんどのメーカーが、照明器具の塗装を自社では行わない。塗装を外注するため、出荷と品質管理のための処理工程でさらにカーボンフ

で  
形  
で  
に、選  
上げ(光  
沢  
し)をリ  
サイク  
に適用  
できる。

モジュール性、分解できるデザイン、完全にツールレスな構造が、Sparkleのコンセプトを循環型の目標に近づけている。ネジや締め具は使われていない。その代わりに、一連の3Dプリントのキーやルーバーコネクタを締め付け手段として採用している。加えて、フレームから突き出した突起部と、その突起部とかみ合うくぼみが反対側にある。従来のプロセスでは、この細かい形状を作成するには、コストのかかる追加部品や締め具と、CNC加工や成形などの異なる製造方法が必要だった。われわれは積層造形によって、コストに影響を与えることなくそれらの形状を作成することができた。

ットプリントが増える。不良品という形で廃棄物が生じるのは言うまでもない。積層造りはプリント時した色と仕上げ／艶消し材料

ルーバークリップによって隣接する2つのルーバーが連結され、穴のパターンを一致させることでシームレスな連結が可能である。このクリップの形状は、金属部品として簡単に作成できるが、このような小さくて脆い部品に、部品を傷つけることなく、また、セットアップに時間をかけすぎることなく、補助穴をあける処理は、このコンポーネントを数センチで製造しなければならないことを考えると難し

い。普遍的な結合コンポーネントと、突起／くぼみの構造を使用すれば、無数の方法で照明器具を組み立てることができる。さまざまな半径のコーナーとさまざまな長さの本体ピースを用意すれば、組み立て、現場での保守、分解を簡単に行うことができる。

### ダイバーシティ・エクイティ&インクルージョン

DEI(ダイバーシティ・エクイティ&インクルージョン)の目標は、Sparkleのデザインにおける重要な要件だった。それらは特に、業務用照明製品に対する公平なアクセスに関連するためである。従来の北米販売は、地域の代理店ネットワークを通して行われている。小規模企業や個人ユーザーが、業務用製品を注文するのは難しい。小口注文は軽視される傾向にある。また、現行の過剰生産の慣習により、エンドユーザー価格は、コストと比べて不釣り合いなほど高くなる可能性がある。これが理由で、われわれはこれらの製品を無料で提供している。さまざまなコンポーネント(図6)のSTLファイルは、Smash The Bulbのウェブサイト

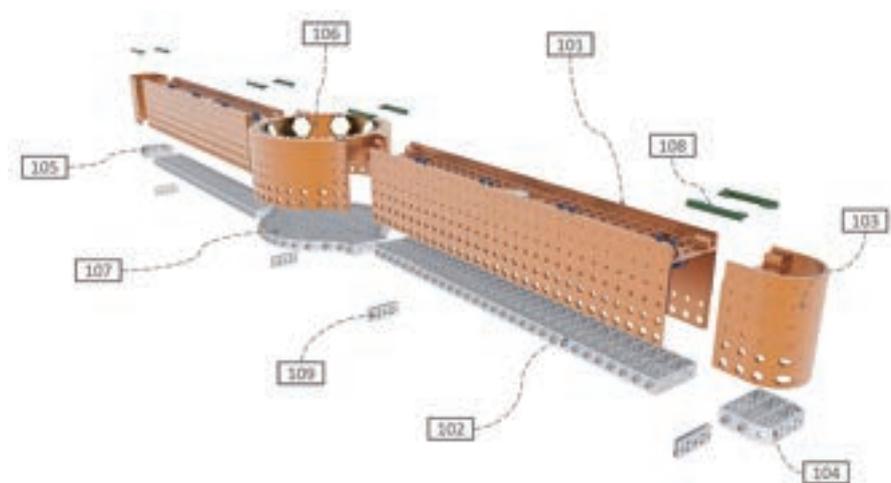


図6 標準的なスタンドアロンのSparkle照明器具と、その番号付きコンポーネントの立体分解図

表3 最高水準のリニア型LEDと直管蛍光灯の性能

コンポーネント	部品番号 (図6)	重量	個数	ユニット単価 (US\$)	小計 (\$)
ミドルピース本体	101	81.3	2	2.44	4.88
ミドルピースルーバー	102	37.1	2	1.11	2.22
エンドキャップ	103	15.9	2	0.48	0.96
エンドキャップルーバー (センサーなし)	104	3.5	1	0.11	0.11
エンドキャップルーバー (センサー)	105	2.6	1	0.08	0.08
アップライト本体	106	96.6	1	2.90	2.90
アップライト本体ルーバー	107	33.6	1	1.01	1.01
コネクタキー	108	0.7	8	0.02	0.16
ルーバーコネクタ	109	1.7	4	0.05	0.20
合計		417.3			\$12.52

\* 簡単に利用できるSLRプリント手法/材料を使用して3Dプリントした場合  
提供: ドナルド・パイファー氏

からダウンロード可能である。標準的な4フィートのリニアランプに対応する、シンプルなTLEDバージョンが存在する。

表3は、基本的なコストの内訳を、材料の使用量とともに示したものである。基本的なスライサーソフトウェアxivを使用して、材料の量と使用材料の予想コストを特定した。プリント物の総重量は417g、コストは12.52ドルだが、ここで、標準的な3Dプリントフィラメント一巻(フィラメント1000g)が25ドルであることに注意してほしい。現時点ではリサイクルフィラメントのほうが高額だが、それでも1kgあたり40ドルを超えることはない。標準的なライン電圧TLED、トゥームストーンコネクタ、吊り下げ用ハードウェアを使用する場合、4フィートのリニア型半間接照明器具の総コストは40ドルを大きく下回るはずである。リニアフィートあたり約10ドルというのは、優にその5~10倍はする最先端の業務用照明器具と比べて大幅なコスト削減である。

積層造形の採用によって得られるサステナビリティの機会は、その他にも

存在する。数台の3Dプリンターを、出荷コンテナ内の携帯型装置としてセットアップして、現場で仕様に合わせて照明器具デザインを作成することにより、パッケージと輸送によるカーボンフットプリントをさらに削減することができる。

安価な照明ユニットを実現して、それを通常の販売チャネルから切り離すことにより、われわれは、デスクトップ3Dプリンターを利用できるすべての人々に対して、このデザインの恩恵を受ける機会を提供する。

## 結論

積層造形は、業務用照明業界の課題

## 脚注

- <sup>xii</sup> 現時点でサンプル/プロトタイプに対する音響試験は行われていないため、確認はできない。
- <sup>xiii</sup> K. Hickox and A. Smith, "Strategies for achieving circular economy goals in the lighting industry through design for disassembly-based methodologies," Light-Symp-2022. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Sci., 1099 (2022) 012004.
- <sup>xiv</sup> ideaMaker バージョン 4.2.1

## 著者紹介

ドン・パイファー (DON PEIFER) は、シリコンバレー在住のシリアルアントレプレナー(連続起業家)で照明イノベーター。米レンセラー工科大(Rensselaer Polytechnic University: RPI)の照明研究センター(Lighting Research Center: LRC)で、照明の建築科学修士号を取得し、照明および制御の業界で20年近くにわたり、照明デザイナーや幹部として勤務している。同氏は、DOE L-Prize Concept Phaseの4人の受賞者のうちの1人である。Sparkleの詳細については、smashthebulb.comを参照のこと。

に対応できる状態にはまだないという認識は、LED技術の導入初期の時代にあったものと同じである。照明業界のソートリーダーは当時(2007~2010年)、LEDは、キャビネット下照明などのニッチな分野には適しているかもしれないが、それが取って代わろうとしている技術(メタルハライドランプ、蛍光灯、白熱灯)の場所が奪われることは決してないだろうと考えていた。今日では、そうではなかったことが明らかになっており、LEDがまだ占有しておらず、将来的にも占有しないであろう業務用照明分野(UV照明など)は、おそらく存在しない。それとほぼ同じことが、積層造形についても言える。カスタマイズ可能であること、製品のカーボンフットプリントが低いこと、処理工程が減って複雑さが緩和されること、そして最も重要な点として、他の技術ではできない結果が得られることを考えると、積層造形は、金属ベースの照明器具製造に近い将来置き換えることが現実的に可能なソリューションである。

## 免責事項:

本稿で説明したSparkleのデザインとコンセプトは、米国特許商標庁(U.S. PTO)に申請済みで、特許出願中の状態にある。