照明器具の多様なデザインを可能にする成形可能な光学シリコーン

ウーゴ・ダ・シウヴァ

シリコーン材料は、高温に対する耐久性があり、SSL（solid state lighting：固体照明）製品設計における高いルーメン密度の実現に貢献するとともに、製造プロセスを簡素化して、より複雑なアーキテクチャを可能にする。

成形可能シリコーンは、LEDを使用する製品設計における有望な選択肢として頭角を現しつつある。2次光学部品、ライトパイプ、ライトガイドといった光学部品として使用することができる。特にSSLを対象として設計された新しいシリコーンは、LED半導体接合部における高温に、光学的に劣化することなく耐えることができる。またこの材料は、複雑な形状に成形可能で、製品開発者に多大な柔軟性を与える。

世界の照明市場は、LEDが従来の光源に代わって採用されるケースがますます増えており、まさに変革が起ころうとしている。米国の調査会社であるマッキンゼー・アンド・カンパニー社（McKinsey & Company）のアナリストらによると、LED照明市場は年間30%という爆発的なペースで成長し、2020年までに810億ドルを超える規模に達し、照明市場全体の60%近くを占めるようになる見込みであるという。

このような予測の根拠となっているのは、低出力で低ルーメンの照明器具から、より高度な応用分野にいたるまで、ますます多くの汎用的な照明分野においてLED技術の普及が加速していることである。前者の例はダウンライトの交換用ランプで、低出力の小型蛍光灯（CFL：compact fluorescent light）やハロゲンランプに代わってLEDが使用されるケースが増加している。後者の例としては、街路照明、産業用照明、オフィス照明、高出力ハロゲン、スポーツ会場の照明などがある。LEDベースの光源は、より高いルーメン密度と出力を必要とする応用分野へとさらに浸透していくにつれて、さらに高い温度で動作することが求められるようになる。加えてランプや照明器具のデザイナは、これまでの製品と同等かそれよりも小さいサイズの光源を開発しようと、LED数を減らしたり、LEDの密度を高めたりしようとする。

図1　主要な光学部品サプライヤであるレディル社による、2つの機能を併せ持つ2次光学部品が組み込まれたデザインは、成形可能シリコーンによって実現されている。この光学部品は、光を整形するとともに、水分が入らないように電子回路を密封する。

それと同時に、LEDのデザイナは、新しいモジュール、ランプ、照明器具を開発して、複数の機能をより少ない部品に搭載したり（**図1**）、さらに小型で複雑な機構を組み込んだりしている。LEDメーカーは、生産性を高めたり、（特に大型部品の）歩留まりを高めたり、無駄をなくしたりすることのできる新しい材料を求めている。

新しい材料

このような課題はすべて、短期間でこれまでの設計や材料を超えて進化してきた新しい照明分野の成長の痛みのようなものである。これらの課題に対応するために、業界では新しい材料が研

究されている。例えばシリコーンは、LEDの分野ではなじみが薄いが、最先端エレクトロニクス、自動車、通信といった他の多くの業界において、実証済みの成果を上げてきた豊富な実績がある。シリコーンは、次世代のLED設計が抱えるいくつかの課題に対応する。例えば、高温に耐えることができ、高いルーメン密度に対応し、製造可能性を高め、より複雑な設計を可能にする。LEDと同様に、シリコーンもまた進化している。最近では、複数の主要な光学部品やLEDのメーカーが、光学品質を持つ新しい種類の成形可能シリコーンを自社の設計に試用し、有望な結果を得ている。

一部のグレードのシリコーンは透明だが、米ダウコーニング社（Dow Corning）が最近発表したような成形可能シリコーンは、特にLED用に開発された、さらに高度な材料となっている。その性能は、今日の最高級の光学材料に匹敵するという。また、従来のシリコーン材料と同様に、成形可能シリコーンは硬化前の粘度が低いため、有機ポリマーやガラスよりも容易に複雑な形状に成形することができ、2次レンズ、ライトパイプ、ライトガイドなどの光学部品に対する新しい設計を可能にする。この性質は、射出成形などのプロセスの製造コストの低減とサイクルタイムの短縮にも貢献し、LED照射のランプや照明器具のシステムコストを削減できる可能性もある。最後に、多くの有機材料と比較して、シリコーンは化学的に優れた物質であることから、現在および将来のLED照明システムのますます高くなる温度の管理に、特に適している。

高温化するLED設計

高温の応用分野こそが、成形可能シリコーンの活躍の場である。高性能な材料である成形可能シリコーンは、光学的または機械的性能を大きく損なうことなく、150℃以上の温度に容易に耐えることができる。この性質は今後、ますます魅力的なものとなる。LED光源は、比較的小さなパッケージサイズでより高い強度の白色光を照射するようになりつつあり、また、顧客がより小型でより高光束のランプや照明器具を求め、それによってデバイスレベルの温度も上昇するためである。

図2　成形可能シリコーンは、熱的および光学的安定性を比較した試験において、PC、アクリル、エポキシといった従来の材料よりも高い性能を示した。

ルーメン密度の増加に伴い、今日の高輝度LED内のパッケージ温度は既に150℃にまで達している。これによって、LEDパッケージの密封にこれまで使用されてきたエポキシ封止材料に問題が生じるだけでなく、ポリカーボネート（PC）やアクリルといった従来の2次光学部品材料がさらされる温度も高くなる。一般的に、これらのプラスチック材料の光学品質は、それぞれ125℃と95℃を超える温度で時間の経過に伴い低下する。同様の問題が、エポキシの場合は150℃を超える温度で生じる。

このような高い温度によって、LED照明システムに使用される従来の光学材料は経時とともに黄色くなり、それによってシステム全体の光出力が低下する。この問題は、光束維持と効率に大きな影響を与え、期待される80%というルーメン出力が、LED光源に期待される使用可能寿命である5万時間より前に許容可能なレベルを下回る可能性がある。さらに、黄色への変色は、経時に伴いLEDの色温度に悪影響を及ぼす恐れがある。光源の色がこのように変色することは、照明デザイナにとってもエンドユーザーにとっても許容できないことである。

従来の材料と比較して、成形可能シリコーンは、150℃を超える温度に長時間さらされた後でも優れた光学的安定性と透明性を維持し、黄色への変色はほとんどまたはまったくなく、可視帯域全体にわたってより高い信頼性を示す。この新しい種類のシリコーンによってLED光学部品は、LEDの使用可能期間にわたって、より優れたルーメン出力と効率を維持することができる。

熱試験

ダウコーニング社が150℃の空気循環炉を使用して1万時間かけて実施した熱劣化試験では、シリコーンの高い光伝導性が、このような条件下において安定した状態を保つ（可視帯域で90～95%）ことが示された。成形可能シリコーンは、高温下での経時劣化において、反射率、ヘイズ（曇り）の低さ、屈折率の安定性といった他の光学品質においても高い性能を維持した。

成形可能シリコーンは、PC、アクリル、エポキシなどの従来の材料と熱的および光学的安定性を比較した関連試験においても優れた結果を示した。150℃で200時間の熱劣化試験において、成

形可能シリコーンはその高い光学品質を維持した（**図2**）。一方、現行の有機材料は、同じ条件下において、温度が125℃を超えると黄色への変色が顕著となった。

卓越した熱的および光学的安定性だけでも、成形可能シリコーンは十分に新しいLED設計を生み出す可能性がある。成形可能シリコーンは、時間経過後も効率、色温度の安定性、性能を維持するとともに、グレア制御などの問題を解決することができる。しかしそれだけではなく、シリコーンは硬化前の粘度が低いことから、デザイナは、より複雑な形状、より薄型のウォール構造、高機能もしくは非常に微細な機構を持つLED部品を検討することができる。

シリコーン構造

例えばアンダーカットなどの構造は、プラスチックでは容易には実現できない。プラスチックは金型から簡単には取り出せないためである。薄いウォール部分と厚いウォール部分に隣接する部品の作製も、もろく、ひびが入ったり破損したりしやすいプラスチックでは難しい。最後に、プラスチック材料を使用する場合は通常、それらをLED光源の熱から隔離して設計するため、プラスチック光学部品をLEDの近くに配置したり、LEDに接触したりする構造は採用できない。

従来のシリコーンと同様に、光学グレードのシリコーンは、高精度な成形に非常に適している。硬化する前、シリコーンの粘度は熱の上昇に伴い低下する。そのためシリコーン樹脂は、他の材料に通常適用されるよりも低い圧力で金型に注入しても、適切なフローが得られ、複製が可能である。例えば、粘度が低いことから、マイクロメートルサイズの機構をレンズ表面に複製することができ、それによって光出力の強度、集束性、指向性が高まるという利点が得られる。

つまり、成形可能シリコーンの物理的特性によって、現行の材料では実現が非常に困難であった新しい設計が可能になり、新しい形状、スタイル、サイズのLED照明を開発し、新しい応用分野を開拓することができるようになる。

作製技術

シリコーンベースの部品は、射出成形、鋳型／キャビティ成形などの多様な技術を使用して作製することができる。本質的に非常に柔軟性が高いため、硬度を調節して振動吸収性や耐衝撃性を高めることが可能である。また、吸湿性が低く、過酷な環境による影響に耐えられることから、従来のシリコーンは既に、エレクトロニクス業界において脆弱な部品を破損から保護するために多く使用されている。成形可能な光学シリコーンは、それと同じ利点の多くを備えている。

収縮も、プラスチックの問題としてよく挙げられるが、成形可能シリコーンではさほど大きな問題ではない。成形可能シリコーンは金型の中で、反りを防ぐためにプラスチックほど長い時間冷却する必要がないためである。これによって、特に大きな部品の場合はサイクルタイムが短縮される。1つの部品を機械の中に入れておかなければならない時間の長さが、上述の金型、光学部品設計、プロセスの要因によっては、総コストの重要な部分を占めるため、サイクルタイムの短縮は重要である。また、成形可能シリコーンは収縮性が比較的低いことから、半球形の光学部品の背面など、水平部分を含む部品内の反りを最小限に抑えるか、防ぐことができる。

成形可能シリコーンの設計と製造上の利点は、どれだけ誇張してもし過ぎることはない。その利点によって、問題をLED設計チェーンの初期の段階で解決することができるためである。最終的なLEDランプには、接着材料、注封材料、2次光学部品、封止材料など、10種類を超えるシリコーンベースの部品が含まれる場合がある（**図3**）。シリコーンは、パッケージレベルで問題に対応できることが広く知られている。そして、LEDが汎用照明分野へと浸透していくにつれ、それらの問題はさらに一般的なものとなる見込みである。

光学部品の例

再び図1に戻るが、世界中の照明メーカーに光学部品を提供する大手サプライヤであるフィンランドのレディル社（LEDiL）は最近、同社の革新的なレンズモジュールである「Strada-FT-TPHS」の開発によってこれを実現した。レディル社やダウコーニング社といったサプライヤが共同開発した同モジュールには、ダウコーニング社の成形可能シリコーンで作成した非対称型レンズで構成される2次光学部品が搭載されている。

特筆すべきは、レディル社が成形可能シリコーン技術を採用したことによって、この2次光学部品には2つの機能が実現されているという点である。この2次光学部品は、前方に向けられた非対称の光分散パターンを生成するとともに、LEDパッケージに対する進入防護の役割も果たす。レンズ材料を防水防塵用の封止材として使用することにより、レディル社は部品総数を減らすとともに、通常は設計チェーンの下流に位置する同社の顧客にあたる照明器具メーカーが対処すべき問題を解決することができた。つまり、照明器具

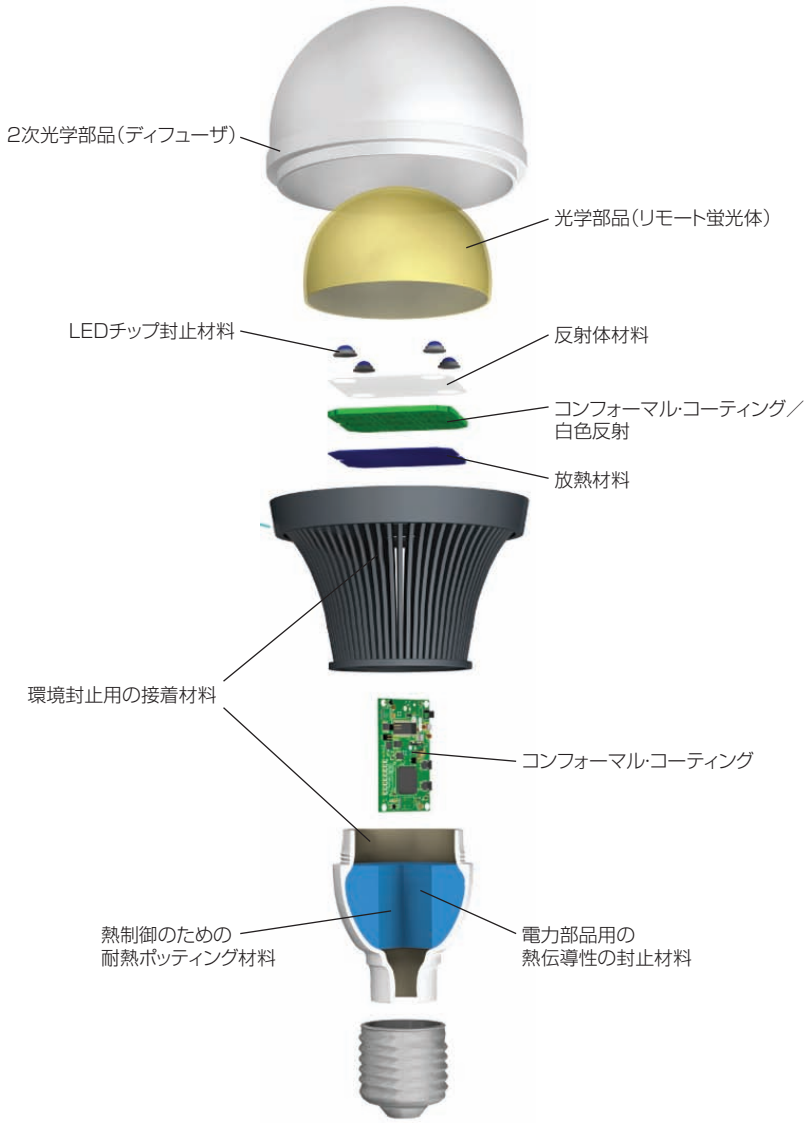

図3　最終的なLEDランプには、接着材料、ポッティング材料、2次光学部品、封止材料など、10種類を超えるシリコーンベースの部品が含まれる場合がある。

全体の封止は通常、同社の顧客が実施すべき作業である。

成形可能シリコーンによって、アンダーカットなど、モジュールにおけるさらに細かい形状が設計できるようになった。また、−45～150℃の範囲で熱的および光学的安定性を示すことから、モジュールの使用期間に黄色に変色することはない。このような特性も、2次光学部品による2つの機能の実現も、プラスチックを使用する場合は容易ではないばかりか不可能である場合もあり、多様な設計を可能にする成形可能シリコーンの利点があらためて強調される。

絶えず進化する今日の照明業界においては、個々のLED設計によって性能要件は大きく異なる可能性がある。しかし成形可能シリコーンは、他の主要な光学部品サプライヤや照明設計企業においても、LED設計チェーンのすべてのレベルで応用されつつある。ダウコーニング社は今後も引き続き、新しい業界における提携を模索し、成形可能シリコーンの革新的な応用分野を開拓していくつもりである。

性能に関しては、成形可能な光学シリコーンは有機ポリマーとガラスの両方の最高品質を併せ持ち、それを超える品質を示すことも多い。今後10年間でLED照明に対する需要がさらに高まるにつれ、成形可能な光学シリコーン材料は、新しい高性能LED光源の開発において重要な役割を担い、LEDランプや照明器具の設計や処理の選択肢の拡大に貢献することが期待される。熱安定性、成形可能性、機械的特性に優れていることから、LEDバリューチェーンのほぼすべての段階に恩恵をもたらし、封止、保護、接着、光整形の問題を解決する。その魅力的な光学的品質に加えて、成形可能シリコーンは、拡散やグレアの制御、色温度変化、経時に伴う性能の変化といった設計上の問題に対処することができる。成形可能シリコーンは、LED照明の普及をさらに進めてコストの低下を促し、LED技術を、家庭、オフィス、小売店舗の全般照明やアクセント照明、信号機などの屋外照明、携帯端末や自動車インテリア照明といった新しい市場へと拡大する可能性を秘めている。シリコーンベースのLED照明は、高いデザイン性と環境耐性を必要とする応用分野に特に恩恵をもたらす可能性がある。

著者紹介

ウーゴ・ダ・シウヴァ（Hugo da Silva）は、米ダウコーニング社（Dow Corning）照明ソリューション（Lighting Solutions）の照明担当グローバル・マーケット・マネージャ。ベルギーを拠点として、LEDや有機EL（OLED）などの固体照明デバイスの光学、熱、保護に関する事業と、ランプ、モジュール、照明器具分野に関連するイノベーションを統括している。e-mail: hugo.silva@dowcorning.com

LEDJ