

LED照明のニーズに合致する、プラスチック光拡散システム—パート2

ギャビ・バー

反射や透過といった光学システムの現象を理解することで、SSL開発チームは望ましいビームパターンを達成するための適切な添加剤と製造手法を選択することができる。

LEDは近年、従来の屋内および屋外光源に代わる非常に消費電力の低い選択肢として、広く注目を集めている。LEDはサイズが小さいことから、幅広い種類のデザインを採用して屋内／屋外照明器具を構築することができる。それでも、LEDで従来の電球や蛍光灯を置き換える際にはやはり、光強度と発光均一性の仕様を満たさなければならない。その課題は、効果的な光学サブシステムが設計できるかどうかによって依存する部分もあり、第二部となる本稿では、固体照明(SSL: Solid State Lighting)システムで達成可能な光学的効果について解説する。

本稿の目的を把握するために、LEDを採用するほとんどの照明器具の基本

要件を考えてみよう。LEDは点光源だが、「点のような」光放射が求められるケースはほとんどない。そのため、LED設計における主要な課題の1つは、光強度の損失を最小限に抑えつつ、均等な拡散光を生成することである。さらに、拡散剤は軽量で、環境温度が高い場合と低い場合の両方に対応できる必要がある。最後に、経済的に量産可能でなければならない。

本稿の前編にあたる第一部は、LEDs Magazine 英語版7/8月号(<http://bit.ly/2xYjmht>、日本語版3月号)に掲載されている。ここでは、最適なポリマーキャリアを選択するという観点から、光拡散方法について説明し、光拡散特性を測定するためのさまざまな手法を

紹介した。本稿では、システム全体で最適な光拡散特性が得られるように、選択したキャリアに添加される、光拡散剤そのものに焦点を当てる。

光学システムの現象

光拡散のメカニズムを理解するには、光と透光材料の間の相互作用を理解する必要がある。可視光が透光物質に作用するとき、複数の現象が同時に発生する。LEDカバー内の対象システムに対する最も顕著な現象は、反射と透過である。反射は、光が表面から目に向けて跳ね返ってくるときに生じる。反射には、鏡面反射(正反射)と乱反射がある。表面が鏡のように非常に滑らかな場合は、反射光は非常に明瞭な像を形成することができる。これは、正反射または鏡面反射として知られる現象である。

例として、湖面を考えてみよう。湖面が完璧な静水面であれば、鏡に映るような、木や雲の鏡面反射像が観測できる可能性が高い。反対に、光が荒い表面で反射した場合は、光の波が異なる多数の方向に反射するため、明瞭な像は形成されない。これを乱反射と呼ぶ。図1に見られるように、水面の微小なさざ波さえもが、雲の反射を拡散させる。

光の透過は、光が物質を完全に通過する場合に生じる。透過するとき、光



図1 池の水面に映る雲の鏡面反射を示す画像。池の水面が静止している場合は、鏡のような効果が得られ、正反射とみなされる現象が生じる。画像に示された水面のさざ波は、乱反射と呼ばれる現象を引き起こす。

はまっすぐ進む場合もあれば、通過にともなって屈折や散乱が生じる場合もある。光が屈折すると、図2に示すように、新しい媒体に入射するときその速度と方向が変わる。また、図に示されている透明材料と空気の屈折率(RI: Refractive Index)が異なることから、材料を通して見た物体には不連続性が生じる。類似の現象は、水の入ったグラスにさしたストローでも観測することができる。ストローは、水中の部分と水の上の空気中の部分で不連続に見える。

拡散透過は、小さな透明粒子を含む透明媒体を光が通過する場合に生じる。粒子に当たると、光は屈折するか、散乱するか、またはその両方が生じるため、光の一部はまっすぐには進まなくなる。その結果、透過光は分散し、拡散透過とも呼ばれる現象が生じる。そしてこれこそが、光拡散システムのメカニズムである。

光拡散の度合いは多数のパラメータに依存し、本稿ではこれについて詳しく解説する。図3に、光拡散システムの日常的な例を示す。雨の中の自動車のヘッドライトからの光は、光が微粒子に当たって多数の方向に分散する様子を示す例である。

光との相互作用による物質の分類

すべての物質を、光との相互作用によって分類することができる。物質と光の相互作用には、次の3つの基本的なオプションがある。

- ・物質は光を透過させることができる
- ・物質は光の一部を透過させることができる
- ・物質は光を通さない(光を遮断できる)

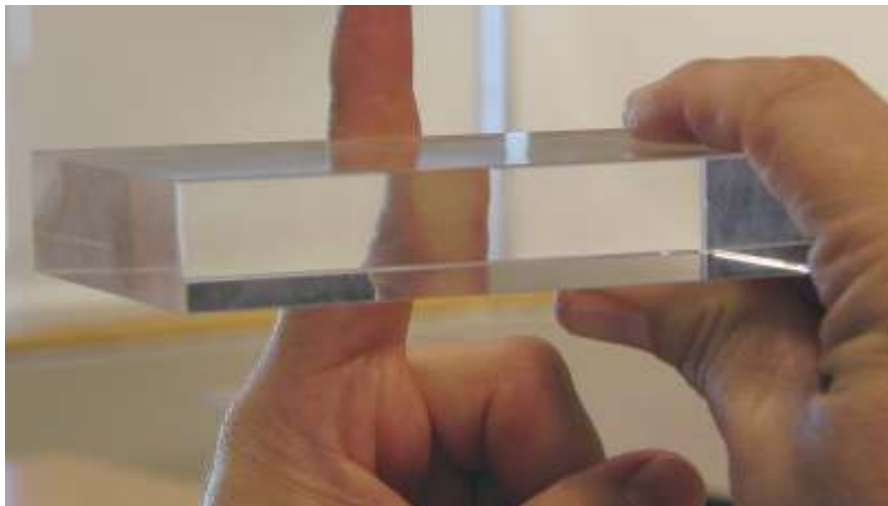


図2 光は、プラスチック、水、空気などのさまざまな物質の中を速度を落として進行する。プラスチックと空気での屈折率(RI)が異なることから、指の像に明らかな不連続性が生じる。

光拡散システムは2つめの項目に分類される。つまり、その材料は光の一部を透過させる。透光材料は次の項目によってその特性を評価することができる。

- ・(吸収または反射されずに)物質を通過する総光量
- ・透過光をどれだけ拡散するか
- ・透光性に影響を与えるその物質のパラメータ

次は、光学物質の特性と透光性との

関係について説明する。以下の内容を理解してもらうために、屈折率という用語についてももう少し詳しく説明しなければならない。屈折率 n は、光が特定の媒体をどのように伝播するかを表す無次元数で、次の式で求められる。

$$n = \frac{c}{v}$$

この式において、 c は真空中の光速度、 v は媒体中の光速度である。たとえば、ポリカーボネート(PC)の屈折率は1.58で、光は真空中をPC中より



図3 散乱は、光が物質の微粒子に当たって多数の方向に分散する場合に生じる。ここでは、自動車のヘッドライトからのビームが霧を通して照らされている。大気中の水滴が透過光を分散させ、自然な光拡散システムを構成している。

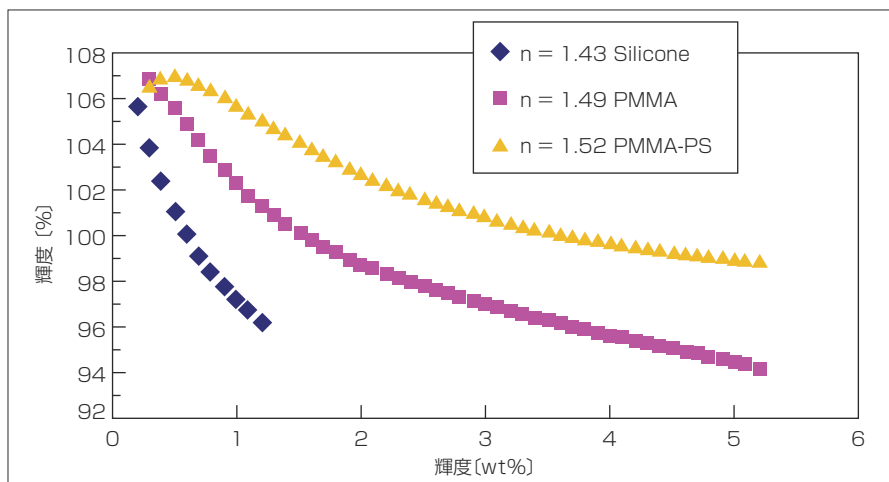


図4 ポリカーボネートに添加されたLD添加剤の濃度および種類と、輝度の関係を示すグラフ。PCのRIは1.58である。(ホストポリマーとの)RI差が大きいマイクロビーズほど、拡散特性の面で効果が高いが、輝度はそれ以上に急激に低下する。

も1.58倍速く進むことを意味する。

媒体と粒子

では早速、最適な拡散システムの説明に入ろう。2つの必須要素が存在する。品質の高い光拡散システムを構成するには、透明な媒体と、媒体に組み込まれた透明粒子の両方が必要である。先ほど示した大気中の水滴の例は、この組合せの好例である。

光拡散システムの場合、前述の透明媒体に相当するのはポリマーである。これについては第一部で詳しく説明した。実際には、光拡散システムのキャリアの選択肢は2つしかない。PCか、またはポリメタクリル酸メチル樹脂 (PMMA : polymethyl methacrylate) である。それよりも難しい問題は、ホスト(またはキャリア)のポリマーで水滴のような拡散効果を得るために、どのような種類の粒子を使用すればよいかというものである。

最近の添加剤と以前使われていた添加剤を比較すると、この20年間使われてきた光拡散 (LD : Light Diffuser、光ディフューザー) 添加剤の種類は、画期的なものである。透明プラスチック

に対する最初の光拡散添加剤は、技術と性能の面でかなり粗削りだった。それでも、PCやPMMAシートを使ったルーフィング用途に対して十分に効果的だった。

シート製造業者は、配合業者を通してさまざまな材料を使って、LD特性をシートに添加していた。添加剤の多くは、BaSO₄(硫酸バリウム)、ZnO(酸化亜鉛)、ZnS(硫化亜鉛)、CaCO₃(炭酸カルシウム)、さらにはTiO₂(酸化チタン)などの無機化合物に基づいていた。TiO₂は現在でもまだ使われているが、その用途は白色の着色料に限られている。無機化合物を光拡散剤として

使用することの最大の利点は、コストが低いことである。LD添加剤のコストは、ポリマーそのものよりも低いことが多かった。

最先端の添加剤

現在では、新しいLD添加技術が登場したことで、LD添加剤自体のコストが、同じ重量で比較してホストポリマーの10倍にも及ぶ場合がある。それでも移行が進んだのには、意外な理由がある。コストが直接的な要因ではないからだ。

無機化合物を使用する方法はコスト面で多大なメリットがあったが、無機化合物を光拡散剤として使用するには、許容できる適度な拡散特性を得るために、比較的多くの量を添加しなければならなかった。しかし、大量に添加すると機械特性が低下し、全体的な光透過率 (LT : Light Transmission) も著しく低下する。天然ポリマーのLTは90%で、無機化合物の添加剤により、LTは60~65%にまで低下する可能性がある。ちなみに、現在のシステムでは80~85%のLTレベルを維持することができる。

なぜそのような差があるのだろうか。その答えは、LTを維持しつつLD性能に影響を与えるパラメータにあ

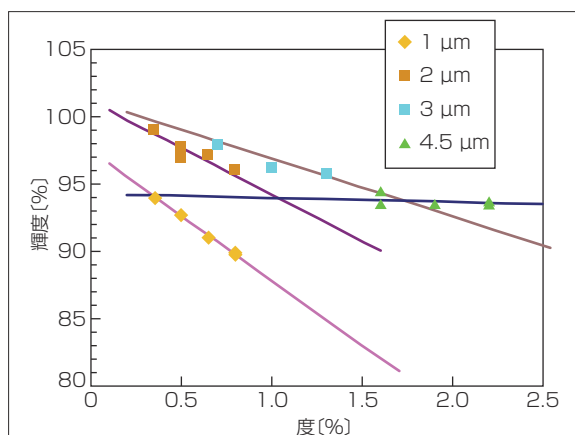


図5 同じ種類のLD添加剤の粒径と、輝度の関係を示すグラフ。最適な粒径範囲は2~3μmである。粒径がそれよりも大きいか小さいと、輝度レベルが低下する。粒径が4.5μm以上になると、輝度レベルは、濃度あまり依存しなくなる。

る。最も重要なパラメータについて、以下で説明する。

LD添加剤濃度は、自明な要素のように思われるが、実際そのとおりである。ポリマー内のLD添加剤の濃度を上げると、光拡散特性が高くなる。しかしその一方で、総光透過量は低下する (<http://bit.ly/2hJcWN6>)。輝度とは、面から放射される光の強度の測定単位である。輝度の低下と濃度の関係を図4に示す。このことから、どのような種類のLD添加剤であっても、LDとLTの間のトレードオフを考慮して濃度を最適化する必要がある。

LD添加剤の屈折率(RI)も主要なパラメータである。LD添加剤のRIを選択する際には、ホストポリマーのRIを考慮しなければならない。キャリアとLD添加剤のRI差が大きくなるほど、光拡散の度合いは増す。そのため、LD添加剤の濃度を下げて同じ光拡散レベルを達成することができる。しかしその一方で、光透過率はそれ以上のベースで低下する。輝度とRIの関係も図4に示されている。言い換えるならば、ホストポリマーとLD添加剤のRI差が小さいLDシステムの場合、添加量は増加するが、RI差が大きい場合と比べて輝度は高くなる。

LD添加剤の粒径も散乱に影響を与える。粒径が小さいほど、光を散乱する効果は高くなる。重量で比較してLD添加剤の濃度が等しい場合、粒径が小さいほうが、何倍もの光がポリマー媒体からLD添加剤媒体へと通過することになるので、これは理にかなっている。これにより、光拡散効果は増大する。しかし、LTを考慮する場合、最適な粒径は2~3 μm (ミクロン)だという実験結果が得られている。粒径がその範囲よりも大きい小さい場合は、LTが低下する。異なる粒径で輝

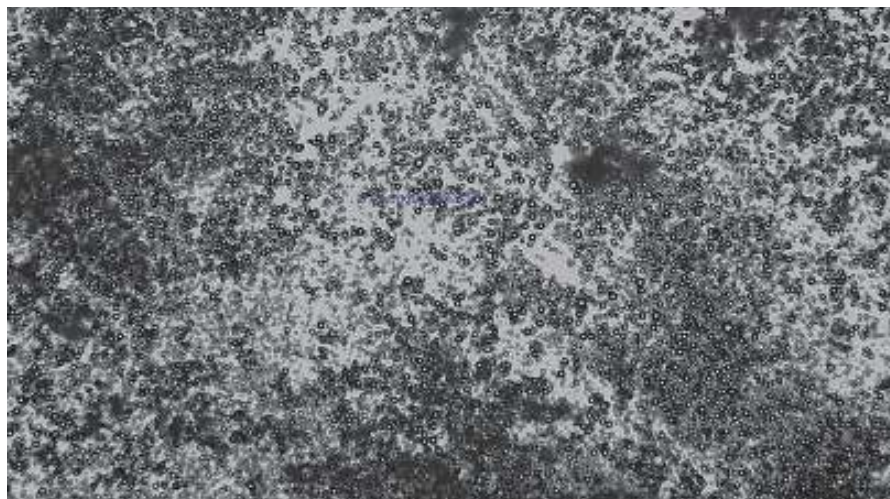


図6 純度100%のマイクロビーズの顕微鏡画像。平均粒径は4 μm であることがわかる。

度の実験を行った結果は、図5のとおりである。

予想されるように、LD添加剤の粒径のばらつきは重要である。平均粒径が等しい場合に、粒径が均一であるほうがばらつきがある場合よりも輝度が高くなるという実験結果が得られている。

LD添加剤の形状も影響を与える。LD添加剤が純水できていて小さな球状ではなく、砕いた氷のように小さく薄い不規則な板状であると仮定しよう。透過光のレベルは同じになるだろうか。この場合もやはり、同じにはならない。氷と水は化学組成が同じだが、粒子の形状や形態がLTレベルに影響を与える。その理由は、次のとおりである。光が透明材料の滑らかな表面に当たるとき、光の大部分はその物体を透過する。これは、水滴のような球状の場合の現象である。しかし、LD添加剤が不規則な形状をしている場合は、反射または散乱する光の割合が高くなる。

LD添加剤の光透過率が、ここで挙げる最後のパラメータである。自動車からの光ビームを、水滴の代わりに、同じ粒径と濃度のコーラ滴に照射した場合、私たちの目に届く光レベルは同じ

だろうか。答えは明らかである。光透過レベルは低下する。従って、LD添加剤の光透過率も重要な要素となる。

工業用水滴

LD添加剤に求められる性質を理解したところで、光拡散剤として使われる可能性のある、工業用水滴と呼ばれるものについて説明する。PCシート業界ではこの20年間、従来の無機化合物に代わって、架橋ポリマーマイクロビーズがLD添加剤として使われてきた。マイクロビーズは、フラットな液晶画面の製造にも使われている。ポリマーマイクロビーズはもともと、化粧品業界向けに開発されたものだった。

図6は、スペインのトサフ社(Tosaf)のマイクロビーズの顕微鏡画像である。マイクロビーズの直径は0.8 μm から、最大で40 μm にも及ぶ場合がある。画像に示されているのは、標準的な純度100%のマイクロビーズであり、何かが配合されたものではない。

マイクロビーズは、PCやPMMAに対する理想的な光拡散剤である。この添加剤は、透明、球状、サイズが均一で、使用されているポリマーの種類に応じて幅広いRIで提供されている。

また、化粧品で使用する場合は異なり、ポリマーマイクロビーズには、押出加工に耐えるだけの熱安定性が求められる。そのため、マイクロビーズの製造時には架橋処理が施される。この処理では、ポリマーを熱可塑性から熱硬化性に変換する化学反応が適用される。それによってマイクロビーズは、ホストポリマーに配合される際の熱に対して安定し、元の球状の形を維持することができる。

プロファイル、レンズ、カバー、シートの製造業者など、PMMAやPC製品の加工業者は、LD添加剤を自社のプロセスに直接注入することはできないことに言及しておかなければならない。LD添加剤は、かさ密度が非常に低いため、機械に注入するには特殊な装置が必要である。また、添加剤をポリマーに均等に分散させるための専用加工工具も必要になる。そのため、LEDカバーや光学部品のメーカーは、その分野を専門とする配合業者によって製造された、ホストポリマーにすでに配合された形のLD添加剤を入手する必要がある。

LD添加剤のコスト

当然ながら、コストもLDシステムを選択する際の重要なパラメータである。純度と熱安定性が高く、粒径のばらつきが小さいLD添加剤は、コストが高くなる。しかし、そうしたLD添加剤は、光拡散品質と輝度レベルではるかに優れた効果を発揮する。LD添加剤のコストが、PMMAまたはPCのカバー部品に与える影響は限られている。キャリア内のその濃度は、0.3~1.0%と非常に低いためである。つまり、2種類のLD添加剤のコストに、1kgあたり20ドルの差があっても、最終的なコスト差は許容できるレベルとなる。

平均的なLEDカバーの重量は0.5kgであるため、1個あたりのコスト差はわずか0.1ドルにしかならない。

また、実験結果により、ポリマーカバー内のLD添加剤の最適な配合量は、LD添加剤の濃度とカバー部品の厚みの両方に依存することが示されている。濃度は、厚みに反比例するとほぼ近似することができる。つまり、部品の厚みが1mmならば0.6%のLD添加剤が必要になる。厚みが2mmならば、わずか0.3%で同等の光拡散効果が得られる。

PMMAまたはPCに配合済みのLD添加剤は、配合業者によって次の2つの形態で提供される。

- ・既製配合物—配合物をそのまま使用できることが、LD加工業者の最大のメリットとなる。つまり、追加の処理を施すことなく、射出成形または押出ラインに直接注入することができる。
- ・マスターバッチ (MB) 形態—この場合は、加工業者がマスターバッチを一定の配合量でPMMAまたはPCと混合する必要がある。機械に注入する前にMBをホストポリマーに混合しておくか、配合システムを使用してインラインで混合を行うことができる。

既製配合物は処理しやすく、分散の問題も生じないが、MBと比べるとはるかにコストがかかる。そのため、大量を扱う加工業者は、既製配合物より

もMBを使用することを検討するべきである。また、MBを使用すれば、加工業者に柔軟性と制御がもたらされ、製品内のLD添加剤のレベルを、製品の厚みや顧客の仕様に応じて増減させることができる。

まとめ

LED照明システムは、個人住宅、ショッピングセンター、駅、工場、企業、街灯など、今やいたるところに導入されている。そこで注意しなければならないのが、光拡散システムの性能である。製品の光拡散が均等であるか、光源の形が見えるか、輝度は高いかといった点を、特に確認する必要がある。

こうした用途に対し、品質の高い材料が得られるかどうかは、LEDデバイスのエネルギーを最大限に利用できるような、光拡散添加剤システムが選択できるかどうかにかかっている。本稿で説明したように、最適なシステムとは、高いレベルの光を透過させつつ、透過光を広く拡散するものである。

さらに環境に配慮したエネルギー効率の高い製品を求める政府規制や消費者嗜好の高まりを受けて、メーカーは、新たなレベルのエネルギー効率を達成する、LED技術に基づくソリューションを、市場に向けて開発している。このトレンドにともない、LED技術の市場シェアは、他の光技術と比べてますます増加していくだろう。そしてその結果、高品質な性能を備える光拡散システムに対する需要は、さらに高まっていくものと思われる。

謝辞

本稿執筆にあたり、支援と有益な助言をいただいたトサフ・コンパウンズ社研究開発部門のモイラ・ニール博士 (Moira M. Nir) に謝意を表す。

著者紹介

ギャビ・バー (GABI BAR) は、スペインのトサフ・コンパウンズ社 (Tosaf Compounds) のグローバル・ポリカーボネート・マネージャー。URL: tosaf.com