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

ギャビ・バー、モイラ・ニール

SSL光学システム用の熱可塑性複合材料を選択する方法と、重要な透過および拡散パラメータを測定する方法について説明する。

照明メーカーや開発者は近年、従来の光源から、LEDをベースとする固体照明（SSL：Solid State Lighting）技術への移行を進めている。LEDは、エネルギー効率に優れているなどの多数の利点を備えるが、点光源であることから一般照明用途にいくつかの問題をもたらしてもいる。たとえば、グレア（ちらつき）だ。そこでエンジニアはLED照明を開発するにあたり、LEDのグレアの問題を抑えるために、光拡散特性の面で最適化されたレンズシステムやカバーを設計する必要がある。

ガラスや透明プラスチック、特にアクリル樹脂は、光学設計における外観上および機能上のさまざまな目的を満たすために古くから照明業界で使われてきた。しかし、照明市場においてLED技術への移行がますます進むにつれて、高い光拡散性が求められることから、レンズやカバーのメーカーは、プラスチックを用いた適切な製品の開発にかなりの労力を注ぐようになっている。

二部構成の第一部となる本稿では、プラスチックをめぐる光拡散技術の問題を取り上げる。本稿では、光拡散システムのキャリアとして最適なポリマーを選択する方法と、光拡散特性を測定する方法について説明する。第二部では、最適な光拡散システムの選択について説明する予定である。

図1　独BYKガードナー社（BYK-Gardner）製ヘーズメーターは、フィルム、銘板、プラスチック製品、レンズ、フロントガラスなどの透明材料の外観測定に広く使われている。このヘーズメーターによって、光透過率、ヘーズ、明瞭度を測定することができる。

最適なポリマーの選択

光拡散カバーまたはレンズの熱可塑性材料を選択する場合、検討候補になり得る選択肢はあまりない。最も重要な性質は透明度である。ポリマーはそのままの状態で、光拡散時のLEDの効率損失を最小限に抑えられるように、透明度が非常に高くなければならない。

エンジニアリングポリマーに分類される少数の材料は、技術的には適切な解決策であると考えられる。しかし、コストを考慮に入れると、候補として残るのは、基本コストが1kgあたり2～3ドルのポリカーボネート（PC）かアクリル（PMMA：polymethyl methacrylate：ポリメタクリル酸メチル樹脂）しかない。ほかのエンジニアリングポリマー、またはウルトラポリマーの価格は、1kgあたり20ドルかそれ以上にまでのぼる場合がある。

ポリカーボネートかアクリルか

PCとPMMAのどちらを選択するかと考える場合、明確な回答はない。PCとPMMAは、価格、加工のしやすさ、光学特性が非常によく似ている。しかし、そこで両者の比較は終わりで、どちらを選択するかは用途要件に依存することになる。P5の表は、これら2つのポリマーのいずれかを選択する際に、メーカーや開発者が検討すべき特性を比較したものである。

メーカーや開発者は最良の決断を下すために、特性に優先順位を付ける必要がある。たとえば、屋内用に設計されたプラスチック部品ならば、機械特性の優先順位は低くてもよく、アクリルが最良の選択肢である。光学特性がきわめて重要で、照度（単位：ルクス）ができるだけ高いことが求められる場合も、アクリルを選択するのが適切かもしれない。その一方で、高層建築物基準や火災の危険性に配慮して、耐火性が求められる場合は、ポリカーボネートが唯一の選択肢となる。

ポリマーの改変

アクリルとポリカーボネートのいずれかを選択する場合、設計者はどちらか一方に妥協して、選択したほうの欠点をすべて抱え込む必要はない。以下に、アクリルまたはポリカーボネートポリマーに適用できる、改変例をいくつか示す。

アクリルの場合、機械特性が改変可能である。具体的には、低い耐衝撃性を2つの方法によって改善することができる。まず、レンズまたはカバーをより厚い壁で設計することができる。2つめの方法は、耐衝撃性の高いPMMAグレードを使用することである。その場合は、追加コストが生じるだけでなく、光透過率が低くなるというトレードオフがいくらか生じる。

ポリカーボネートの場合は、複数の種類の改変が可能である。日光にさらされる製品にとって問題となる、紫外線（UV：ultraviolet）の感度を考えてみよう。ポリカーボネートの低いUV安定性は、紫外線吸収剤（UVA：UV Absorber）をバルク材料に添加することによって、大きく改善することができる。UVAのレベルを変えれば、UV安定性のレベルが変わる。カバーをPCシートから製造する場合は、UVAを強化したPCの共押出層をベースに、UV保護を実現することができる。そのほうが、UVAをバルク材料に添加するよりもはるかに効率と費用対効果が高い。

耐引掻性も改善することができる。この特性は、第2段階の処理で適用される特殊コーティングによって改善することができる。この改善は、自動車業界におけるPCランプカバーの製造で非常に多く適用されている。

また、ポリカーボネートは格段に優れた耐火性を備えているが、さらに難燃性を高めることが求められる用途もある。防火基準に準拠することが求められる製品は、特にこれに該当する。防火基準の代表的な例が、鉄道車両のすべての部品に適用される欧州規格（EN 45545-2）である。このような用途に対し、照明供給メーカーは、LEDカバーやレンズの製造用に難燃剤が添加された特殊グレードのPCを使用しなければならない。

光拡散の測定

次は、光拡散を測定して光学性能を特性評価する作業に話を進めよう。それは非常に単純な作業であるように思う読者もいるかもしれない。しかし、そうではない。メーカーや開発者は、拡散品質の測定にさまざまな方法を採用している。光拡散性能を表現するための統一された手法や基準は存在しない。統一性がないことから、光拡散システムを表現したり、システムを互いに比較したりする場合に問題が生じる。

光拡散性能を左右する2つのパラメ

表　光拡散ディフューザー用ポリマーの特性の比較

特性	アクリル	ポリカーボネート
耐衝撃性	アクリルは衝撃に対し、PCと同程度の強度と耐性がない。十分な力を加えると粉砕してしまう。	ポリカーボネートは、衝撃に対する強度と耐性が高いことがよく知られている。物体をぶつけても、割ることはほぼ不可能である。この性質から、機械ガードや保護スクリーンに最適となっている。これは、フェイスシールドや保護ゴーグルがPCでできていることが多い理由の1つである。
耐候性	卓越した耐候性を備える。紫外線による経時劣化がほとんどないので、アクリルは屋外用途に適している。	紫外線照射に対する感度が非常に高い。紫外線にさらされると、急激な黄色化や微小亀裂が生じる。紫外線吸収剤をバルク材料に添加することによって、PCの耐候性を改善することができる。
熱安定性	熱変形温度（応力：260psi）は200°F（93°C）	熱変形温度（260psi）は264°F（129°C）
耐引掻性と耐摩耗性	耐引掻性と耐摩耗性はPCよりも高い。	擦過や摩耗に対する耐性は非常に低い。この性質は、PCの最もよく知られている欠点の1つである。この欠点を解消するには、ハードコーティングを検討する必要がある。
耐燃性	最も燃えやすいポリマーの1つで、添加剤によって耐燃性を強化する方法も知られていない。	3.2mmでUL-94のV0基準に準拠する耐燃性を本質的に備える。透明度を損なうことなく、さらに耐燃性を高めるための多様な手段が存在する。
光学特性	光透過率は約92%。屈折率は1.49。	光透過率は約88%。屈折率は1.58。

ータがある。光透過（透明度）レベルと光拡散レベルだ。拡散性は高いが光をあまり透過しないシステム、または、その逆に光透過率は高いが拡散性が低いシステムは、非常に簡単かつ低コストで実現できる。光拡散レベルと光透過レベルがともに高く、透過光が元の光源の光レベルにできるだけ近いシステムを実現することはそれよりもはるかに難しい。そのため、システムの光学性能をテストするには、光透過率と光拡散率の両方のパラメータを測定する必要がある。システムの光学品質は、両方のパラメータが明らかである場合のみ規定可能である。

光透過率の測定：2つのパラメータのうち、光透過率の方が簡単かつ単純に測定できる。ASTM D-1003は、透明プラスチックのヘーズ値（曇り度）と光線透過率の標準テスト方法である。この規格は、透明または半透明製品を製造するほとんどのプラスチック成形業者によって採用されている。

プラスチックフィルムまたはシートの光透過率の測定には、光透過率計またはヘーズメーターが一般的に用いられる。一般的な実験室用ヘーズメーターの1例を、**図1**に示す。全光線透過率とは、入射光に対する透過光の割合のことである。全光線透過率、または光透過率（L.T：Light Transmission）は、材料の吸収率と反射率に依存する。

L.T(%)=100%－吸収率(%)－反射率(%)

L.T値の範囲は、不透明システムの場合の0%から、厚さ3mmのガラスの場合の97～98%までの間となる。同じ厚さのポリカーボネートで一般的に88～90%、アクリルは92～93%である。吸収率は、材料特性とサンプルの厚さの関数となる。粒子や色素を組み込むことによっても、本質的な値が増加する場合がある。

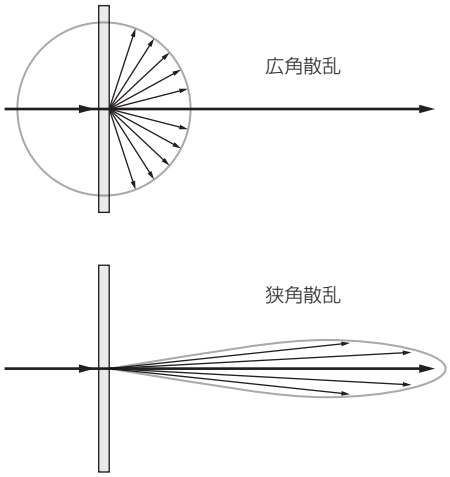

図2　光学物質を透過した入射光の配光状態を示した図。上の図は、ヘーズ値が高く明瞭度が低い広角散乱、下の図は、ヘーズ値が低く明瞭度が高い狭角散乱を示している。

反射率も、物質表面に組み込まれた粒子や色素の影響を受けるが、それに劣らず重要な要素が、表面品質である。表面が荒いと散乱が大きくなり、滑らかであれば散乱は最小限に抑えられる。従って、L.T値の高い光学カバーやレンズを設計する際には、表面をできるだけ滑らかにすることを検討する必要がある。

ヘーズメーターは主に、実験段階で半完成状態の原材料を評価するために使用される。そのため、上述の方法は製品開発段階にしか適用できない。完成した照明システムの光線透過率や輝度レベルの測定に使用することはできない。

光拡散率の測定：光学カバーの光拡散について語るとき、それは光学カバーを透過する光の散乱を意味している。究極の目標は、優れた散乱性を示す高い光透過を実現することで、それによって「ソフト」な光が生成される。散乱性を高めるには、加工されたガラスや透明プラスチックといった半透明材料を採用することができる。こうした加工材料は、表面に小さな構造を組み込んだり、色素や小さな粒子を材料に埋め込んだりすることによって、作製することができる。

物質の光拡散特性を表記しようとする場合、その作業は必ずしも単純ではない。作製者や設計者が、異なる用語や測定方法を用いてこの特性を定量化するためである。実験室レベルでも、光拡散特性の測定はL.T値の測定よりも複雑である。最大の理由は、前出のヘーズメーターなどの標準的な実験用測定器が、システムの拡散性能について部分的な情報しか示さないことにある。

光拡散レベルは一般的に、ヘーズとして示される。ヘーズは、基準から2.5°以上ずれた角度に、広角散乱される光の量として定義される。ヘーズ測定もASTM D1003に基づいて行われ、L.T値測定と同様に、光透過率計またはヘーズメーターによって測定される。ヘーズパラメータの最大の欠点は、感度が低いことである。中～高の拡散レベルに対し、ヘーズはシステム性能を適切に表す指標になる。しかし、拡散性の高いシステムの場合はヘーズ値が上限に達し、それ以上のレベルに対しては、ヘーズメーターによって光拡散レベルの違いを区別することはできなくなる。

ASTM D1003に基づく別の実験室テストとして、明瞭度テストがある。

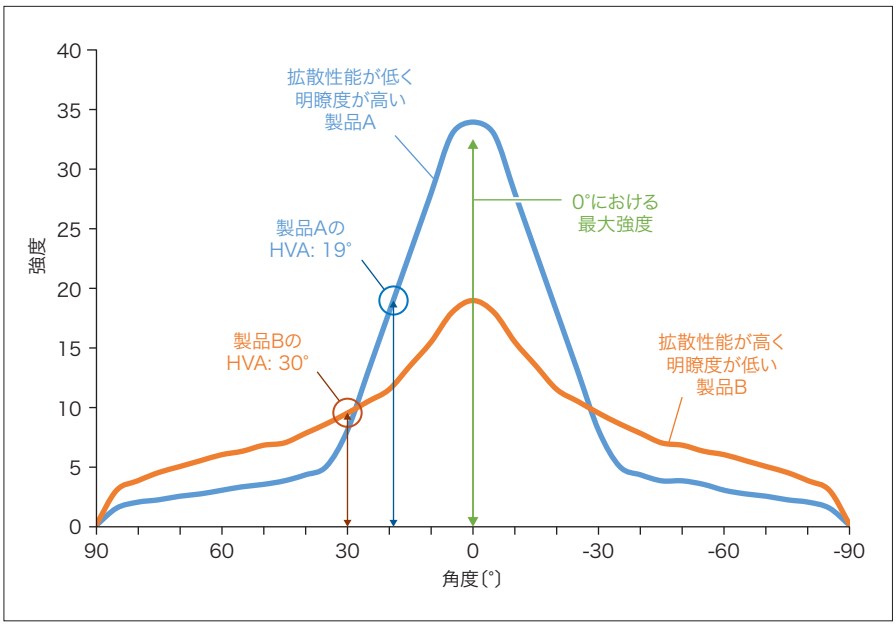

図3　ゴニオメーターで測定した2つの拡散システムの半値角（HVA）曲線の例を示したグラフ。システムA（青色）は、中央の傾斜が急峻で、拡散性能が低く明瞭度が高いことを示している。システムB（赤色）は、傾斜が緩やかで、拡散性能が高く明瞭度が低いことを示している。HVAは、強度が各システムのピーク強度の半分になる箇所として計算される。

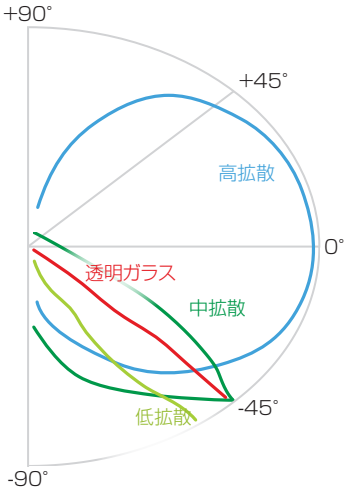

図4　透明ガラス（赤）、拡散性能が低いシステム（黄緑）、中程度のシステム（緑）、きわめて高いシステム（青）という4つの異なる透明システムの光拡散出力を測定した結果を示したグラフ。光強度は－85°～+85°の範囲で測定されている。各グラフ領域は、－85°～+85°の積分範囲で割ることによって求められている。

これは、ヘーズテストを補完するテストである。明瞭度テストも光透過率計によって行われるが、基準から2.5°の範囲内の透過値だけが測定される。この測定によって示されるのは、光学物質を通して細部がどれだけ見えるかである。つまりここでは、拡散特性は間接的にテストされる。明瞭度が低いということは、入射光の多くが標準プレーンから2.5°以上離れた角度にずれていることを意味する。広角散乱（明瞭度が低い）と狭角散乱（明瞭度が高い）の様子を**図2**に示す。

明瞭度テストの主な利点は、先ほどと同様に透過光が使用できることと、テストが単純なことである。またこのテストは、ヘーズの場合よりも感度が高い。しかし主な欠点としては、間接テストであることが挙げられる。明瞭度は、システムが標準プレーン周辺でどれだけ明瞭であるか（または明瞭でないか）を示すが、物質の光拡散特性を完全に定義するものではない。

半値角テスト

光拡散性能の定量的評価に最も有効な方法の1つとして、半値角（HVA：Half-Value Angle）テストがある。このテストでは、物質表面に垂直な入射光に対する、さまざまな角度における光強度を測定する。測定は、－90°～+90°の範囲で行われる。最終的な半値角は、光強度が0°における測定値の半分になる角度である。この角度が大きいほど、光拡散性は高い。HVAの例を**図3**に示す。

HVAは、ゴニオメーターによって測定される。適切な検出器を装備したゴニオメーターによって、さまざまな角度における光散乱強度を測定することができる。この測定器は、工業実験用というよりは研究開発用である。ゴニオメーターは、さまざまな現象の角度依存性を測定するために使用される。

HVAテストの利点はその感度で、光拡散レベルが高いシステムを区別することができる。その感度は、ヘーズ測定では得ることができない。欠点は、テスト装置のコストが高いことから、このテストを実施できる設備を備えた実験室が少ないことである。

光拡散出力

光拡散出力（LDP：Light Diffusion Power）テストも、拡散特性の評価に有効なテスト手法である。実際、LDPの方法論はHVAの手法に似ている。最大の違いは、LDPテストでは、サンプルを照射する入射角が90°ではなく45°であることだ。HVAと同様に、ゴニオメーターなどの測定器によって背面の放射強度を記録する。数値またはグラフデータを－85°から+85°の範囲で積分し、その角度範囲の総面積で割る。LDPグラフデータの例を**図4**に示す。LDP値が1に近いほど、光拡散出力が高いことを表す。

シート、プロファイル、レンズのメーカーの間で、最も一般的に実践されているテストは、ホットスポットテストで

ある。これは、どの正式規格にも依存しない品質テストだが、拡散システム性能を直接的に表す、最も単純明快なテストである。このテストは**図5**に示すように、LEDのアレイまたはストリップを底に配置したシンプルなチャンバーの中で行われる。テスト対象の光学物質をチャンバーの最上部に配置し、光源の反対側からサンプルを観測して、LEDのホットスポットが隠された状態がどの程度まで維持されるかを調べる。

シンプルなチャンバーはスタティックである。つまり、光源と物質の間の距離は固定である。より高度なチャンバーを用いれば、光源とテスト対象物質の間の距離を変更することができる。それにより、物質によってホットスポットが隠される最小の距離を測定し、拡散特性を定量化することができる。チャンバー側の目盛りは、LEDストリップの高さを示している。LEDストリップの位置がテスト対象物質に近いほど、ホットスポットを隠すことは難しくなる。複数の異なる拡散システムを、同時に視覚的に比較することができる。

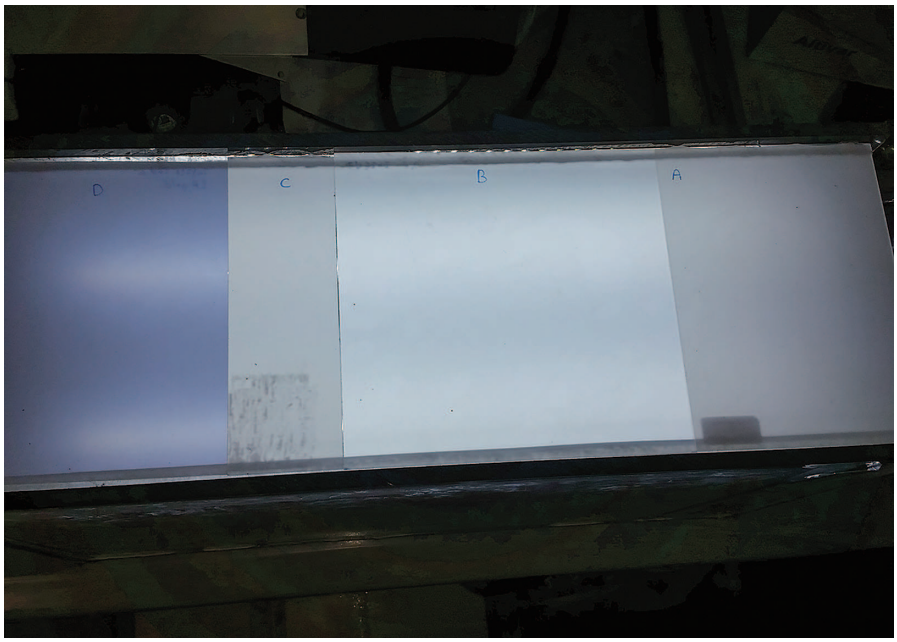

図6　ホットスポットチャンバー内で4つの光学サンプルを比較した様子。光学拡散システムの選択の難しさを表している。

図6は、4つの光学サンプルに対してホットスポットテストを行った様子を示している。LED点光源を隠す効果が最も高かったのは、サンプルCである。しかし、拡散特性と光透過率の間のトレードオフを考慮して、開発者は、透過輝度が高かったサンプルBを選択する可能性がある。

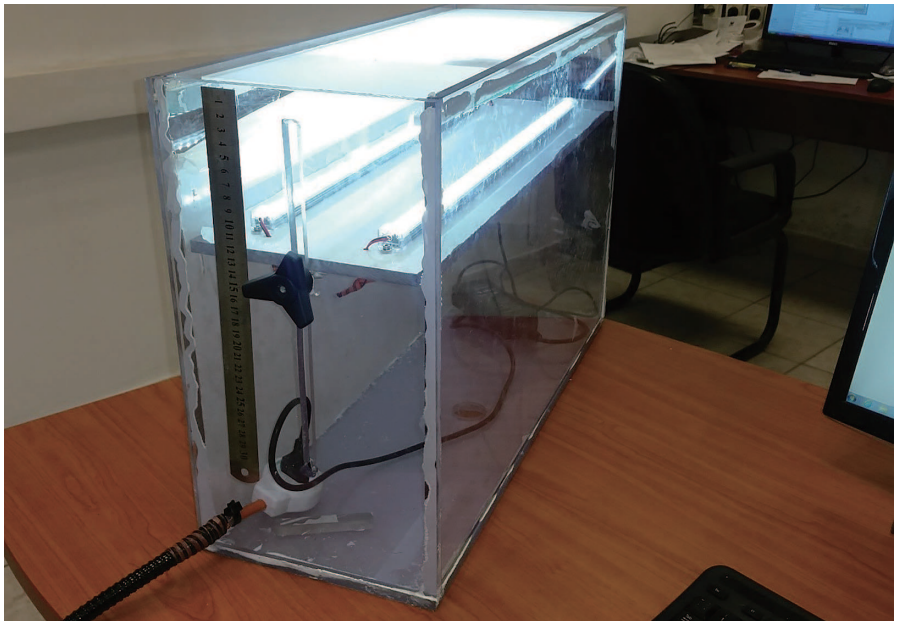

図5　ホットスポットチャンバーは、拡散特性と透過特性を観測するためのシンプルな方法である。

第一部のまとめ

光拡散特性の設計基準を伝えるのは容易ではない。メーカー、設計者、顧客は、拡散特性と光透過レベルの間のトレードオフに注意する必要がある。材料は光を透過させる必要もあるので、拡散性能そのものだけを検討しても意味がない。拡散特性を測定するためのさまざまな方法の中で、半値角は最も専門的なアプローチである。その一方で、ホットスポットチャンバーは、達成目標とするベンチマークを把握して設定しているメーカーや設計者によって最も実践されている方法である。第二部では、適切な添加剤パッケージによって、最適な光拡散システムを選択する方法について詳しく説明する。

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 Ltd.）のグローバル・ポリカーボネート・マネージャー、モイラ・ニール博士（MOIRA NIR）は同社開発部門に所属。URL：tosaf.com

LEDJ