プラスチック光学系に挑戦する精密成形ガラス

アラン・シモンズ、レイ・ピニ

成形加工とガラス技術の進歩はプラスチック光学系とコスト競争できる成形ガラス光学系の生産を可能にし、その応用範囲を拡げている。

近年、成形プラスチック光学系は精密レンズの大量生産の最適解であると見なされている。プラスチック光学系は研磨ガラス光学系に比べるとコストと性能に利点がある[1]。しかし、プラスチック光学系の参考文献の多くは代替可能なガラスの生産技術、つまり精密ガラス成形（precision glass molding：PGM）を無視している。実際のところ、PGMはプラスチック光学系と同じ利点を確保できるが、ガラスを原材料に使うことの利点も付加される。ガラスレンズはプラスチックレンズに比べると高価になり、非球面、回折素子、実装オプションなどの形状はガラスでは成形できないと誤解されている。そのため、多くの場合、PGMはプラスチック成形に代替できる量産技術としての利点が見過されている。このような誤解は事実と異なり、間違っている。PGMは1970年代の終りごろから存在し、さまざまな用途に対して、コスト効果が確実に得られる技術として使われてきた。ここではPGMにより生産されるガラス光学系とプラスチック光学系とを比較して、前者が正当な代替品であることを明らかにする。

材料特性

光学素子の成形の工程は、プラスチックの射出成形とガラスの圧縮成形のいずれも原材料の選択から始まる（図1）。成形用の代表的な原材料は、その種類はガラスの方がプラスチックよりもはるかに多い。成形可能なガラスの選択肢は100種類を十分に超えるが、光学プラスチックの選択肢は1桁にとどまる（図2）[2]、[3]。成形可能なガラスは、この広い選択肢に加えて、材料特性に関係する利点も得られる（表1）。成形可能なガラスは比重を除いて、すべての定量的性質が優れた性能を示し、より良い光学的判定基準（屈折率、アッベ数および光透過率）と、その他のより広い判定基準を選択できる。

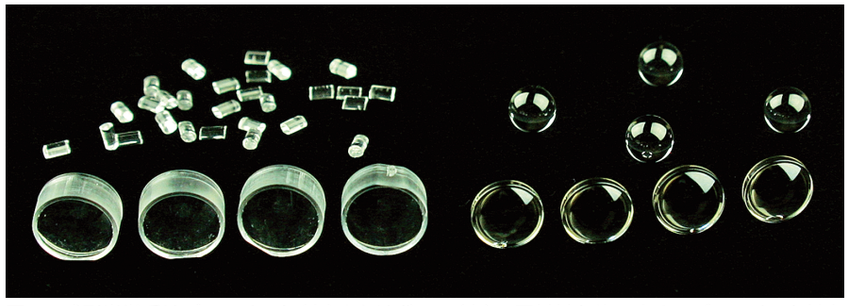

図1　成形光学系はプラスチック（左）またはガラス（右）の原材料を使用する。プラスチック射出成形光学系用の熱硬化性樹脂は押出成形されてペレット状になる。PGM加工は成形前にプリフォームが必要になる。（資料提供：ロバート・カリノフスキー氏）

基本的な射出成形プラスチック光学系、つまり環状ポリオレフィン（COP）、ポリカーボネイト（PC）およびアクリル樹脂（PMMA）の標準の透過率プロフィルは、350から1200nmまでの波長範囲に対して、80%台の上位から90%台の下位までの範囲に収まる。最も成形の容易なガラスの透過率は、同じ波長範囲に対して90%台の上位になる。成形可能なガラスの熱性能は成形可能なプラスチックに比べるとかなり優れ、成形可能なガラスはより高い使用温度を1桁低い熱膨張係数で得ることができる。成形可能なプラスチックにはPMMAのように、光学的性質に影響を及ぼす水の吸収や複屈折による問題をもつ材料もあり、選択前の評価が必要になる。重量は成形可能なプラスチックがガラスよりも優位にある唯一の大きな利点であり、少なくとも2：1の比率で重量の軽減が可能になる。

定性的性質について述べると、ガラス光学系はプラスチック光学系よりも非常に良好な耐環境性と良好な耐摩耗性が得られる。他方、射出成形プラスチック光学系は別の実装形状や複数の光学面を集積できる基本的な利点をもつが、このことは研磨によるガラスレンズとは違って、PGMで成形したガラスレンズの場合も可能になる。このようなレンズは集積実装フランジをもつ場合が多い。ガラスはレンズアレイ、回折光学面、非円柱外部面などの形状を付加した成形もできる。ガラスはPGMを用いると、プラスチックへの成形品

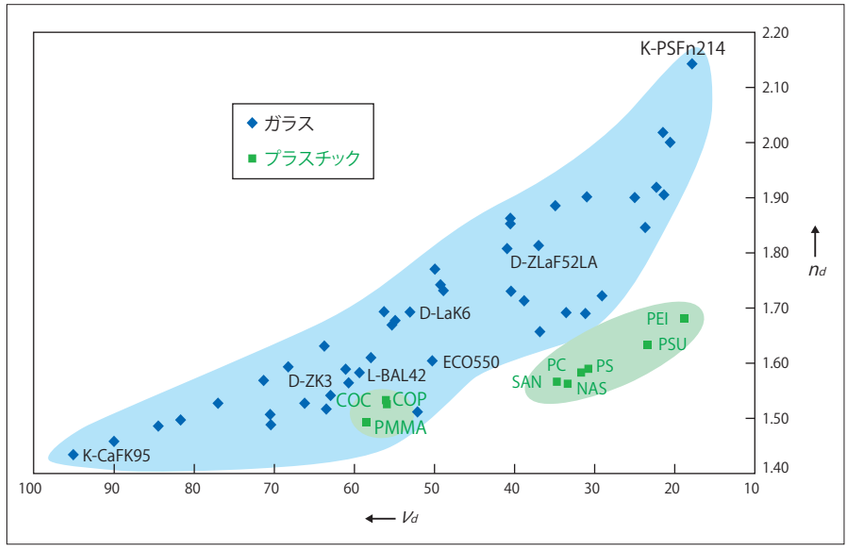

図2　成形可能なガラス材料の代表的な選択肢の屈折率とアッベ数の関係を図示している。ガラスはプラスチックに比べると選択可能な多数の材料がある。これらのガラスのデータは一般の光学ガラスのデータではなく、主要なガラスメーカーから成形用として市販されているガラスのデータであることに注意してほしい。

の挿入と同様に、金属ハウジングの直接成形も可能になる。全体として、プラスチック光学系の場合の複雑な形状に比べると、PGMにより可能となるガラスの幾何学形状は限定されるが、複雑な形状に向けてのPGM技術の改善は継続的に行なわれている。

生産者はPGMによるガラス光学系と射出成形によるプラスチック光学系の最終製品を比較するとき、PGMはプラスチック光学系よりも高品質の製品が標準的に得られる技術であると考える場合が多い。このことは前述したように、ガラスの優れた熱安定性、高い光学品質および耐久性にもとづいている。ガラス成形は収縮が少ないので、レンズ間の良好な再現性と性能の優れた一貫性を得ることができる。

コストは部品を選択するときの基本的な判定基準の一つであるため、プラスチック光学系が選択される主要な理由の一つはコストにあると見なされる。プラスチック光学系は加工コストの問題を解決できれば、個々の光学系のコストが非常に低くなる。射出成形プラスチック光学系の加工コストは複雑に変化し、複雑な光学系は高価な加工が必要になる。簡単なレンズは安価に加工できる。このことはPGMの場合にも当てはまるので、基本的なコストは個々の部品に対して比較する必要がある。

原材料の場合、プラスチックとガラスの材料間には大きな違いがない。2011年の初め、射出成形用の光学品質ポリカーボネートの価格は1.00ドル/kgであったが、ホウケイ酸ガラスのロッドは少量でも1.50ドル/kg以下で購入できた[4]。COPプラスチックや成形用高屈折率ガラスなどの特殊成形材料は高価になる。これは当然のことだが、重要なことは成形用ガラスと成形用プラスチックのコスト差が加工によるものであり、原材料からは生じていないことだ。

材料加工

成形用の原材料の準備は最初の工程になる。プラスチック光学射出成形用

表1　成形したガラス光学系とプラスチック光学系の重要な性質の比較

性質	ガラス	プラスチック
利用可能材料の選択肢	>100	＜10
定量的性質		
屈折率（n_d）	1.434＜ n_d＜2.144	1.491＜ n_d＜1.682
アッベ数（ν_d）	17.8＜ν_d＜95.0	18.9＜ν_d＜58.5
CTE（α）（10^{-7}/℃）	49＜α＜160	558＜α＜720
ガラス転移温度（T_g）（℃）	288＜ T_g＜618	77＜ T_g＜210
dn/dt（10^{-4}/℃）	10.9＜ dn/dt＜23.4	−14.3＜ dn/dt＜−8.5
比重（SG）	2.4＜SG＜7.1	1.0＜SG＜1.3
定性的性質		
耐環境性	優秀	良-不良
集積形状	限定的	多数
代表的市販製品の性質		
焦点距離（%）	±1	±2〜3
曲率半径（%）	±1	±2〜3
パワー／不規則性（フリンジ）	3 ／ 1	5 ／ 2
スクラッチ／ディグ	40 ／ 20	60 ／ 40
中心厚み（mm）	±0.050	±0.050

の熱硬化性樹脂は押出成形され、ペレット状に切断される。PGMはニアネットシェイプ加工に属するため、最終製品に近い形状の精密プリフォームを成形前に準備する。プリフォームはゴブ成形法または精密球形プリフォームを用いて製作するため、PGM加工はコストのかかる工程が付加される。しかしながら、ガラス成形はプラスチック成形に比べると、材料の使用効率が高くなる。プラスチック成形に使われる余分な材料は最大で全体の98%にも達し、光学用途の多くはその削減が難しい。一方で、ゴブからのガラスのプレス加工は基本的に100%のガラスを使用できる。プラスチック光学系のコストの本質的な利点は材料コストよりも加工速度にある。

プラスチックは射出成形の産業規模が1410億ドルに達していることも利点になる[5]。その産業規模が大きいため、射出成形機械と加工技術は活発に開発され革新されてきた。プラスチック光学系は射出成形の全体市場の一部しか占有していないが、そこには成形光学系としての固有の要求があることで、技術の最先端の地位を占めてきた。このことは産業が限定的でかなり未熟なPGMよりも有利に働いている。

精密ガラス成形は制御された環境のなかでの高温圧縮成形加工として定義され、光学品質の金型と特許化された多数の装置を使用して、光学品質の部品またはレンズを生産する[2]。近年のPGM装置は、とくに大量生産用の装置には顕著な技術革新が実現されている。射出成形する直径6mmのプラスチックレンズのサイクル時間は30秒以内だが、同等のガラス成形レンズは15分もの時間が必要になる。この時間差はキャビテーションを増加し、量産用に開発された特殊な機械によるトランスファ成形を行なうことで最小になる。しかしながら、ガラス成形が必要とする長い加工時間と高温は、加工機械の寿命の短縮をもたらし、部品の相対コストを増加させる。量産規模がとくに大きい用途に使われるプラスチック光学系のコストは、ガラスに比べると間違いなく低いが、そのコスト差は最近の数年間にかなり縮小した。

多くの場合、研磨レンズと比較したプラスチック光学系の利点は、軽量、低コスト、非球面の形成能力および集積形状の付加の容易性にあると言われている。しかし、精密ガラス成形レンズと比較したときのプラスチック光学系は、これらの利点の多くが消失し、その魅力も減ってしまう。精密ガラス成形は非球面や微小光学形状を容易に製作でき、限定された集積形状を付加できる。PGMはプラスチック光学系に固有の軽量化などの利点とはまったく競争できないが、プラスチックレンズはPGMに対して大きなコストの利点をもつとした従来の考えは、徐々に弱まっている。現在のPGMレンズは携帯電話のレンズ系のような、量産規模がきわめて大きく最低のコストを要求される用途にも使われている。

参考文献
（1）A.Maahs, “Plastic optics lower mass manufacturing price tag,” www.optics.org（Dec. 21, 2007）.
（2）M. Schaub et al., Molded Optics: Design and Manufacture, Chapter 5, “Molded Glass Optics,” CRC Press, London, UK（2011）.
（3）S. Bäumer, Handbook of Plastic Optics, Chapter 5, “Optical Plastics,” Wiley -VCH, Weinheim, Germany（2010）.
（4）ICIS.com, Polycarbonate Prices and Pricing Information, http:// bit.ly/jqamcl.
（5）US Census Bereau, 2009 Annual Survey of Manufacturers, NAICS codes 3261 and 33320 for Plastic Manufacturing.

著者紹介
アラン・シモンズ（Alan Symmons）は米ライトパス・テクノロジーズ社（LightPath Technologies Inc.）の企業技術担当副社長、レイ・ピニ（Ray Pini）は同社のマーケティング部長。
e-mail: rpini@lightpth.com URL: www.lightpath.com

LFWJ