レーザ用途に応じて最適な非球面を選択する

グレッグ・ファレス、ウィリアム・モアシェード、アラン・シモンズ

CNC研磨、精密ガラスモールド、複合非球面化などの製造技術と検査・試験技術の組み合わせが、非球面とレーザシステムを統合する。

非球面素子は、多くの光学設計においてパフォーマンスを向上させる。複雑な非球面プロファイルは、球面レンズの光学システムにおける多くの収差を大きく減少させる、または消滅させることができ、パフォーマンスの向上、軽量化、アセンブリ時間の短縮、公差スタックアップの抑制を実現する。だが、全ての非球面レンズが同等に作られているのではなく、特にレーザシステムと統合させるときにはなおさらである。

レンズを作るときにどの製造技術を選ぶかによって、レーザシステムのパフォーマンスや信頼性は大きく変わりうる。エネルギーや波長など、レーザの重要なパラメータに応じて、非球面レンズの製造方法を選択するのである。

CNC研磨非球面レンズ

非球面レンズを製造する最古の技術は、研磨である。コンピュータ数値制御された（CNC）機械を用いて、単軸回転するガラスを研削、研磨して作る。レンズを高速回転させながら、研削工具とレンズとのわずかな接触位置を、レンズのエッジから中心に移動させる。工具位置を精密にコントロールすることで、表面を非球面形状に研削できる。その後、研磨工具を使ってレンズを滑らかにして、鏡面仕上げにする。

必要があれば、磁性流体仕上げ（MRF）でさらに補正する。MRFは小型研削工具に似ているが、磁場をかけると粘性が変化するリボン状の流動体を使う。これにより、わずかな範囲でも、材料除去を非常に精密にコントロールできる。

研磨は小型装置とわずかな治工具費用で済むため、コストはレンズの製造時間と大きく関係する。レンズは1個ずつ作るため、大量生産しても利益規模は大きくならない。しかしながら、製造工程で特殊な工具や装置はほとんどないため、この方法で非球面レンズを製造するリードタイムは短い。レンズのコンセプト実証、試作、製造まで、同一の方法で実施できるので、初期生産や、（次に紹介する方法で使う）モールドのパフォーマンスとレンズのパフォーマンスとの相関研究に頭を抱えることもない。

レーザシステムのデザイナーにとっては、CNC研磨非球面レンズの最も重要な利点は、この方法で製造できる材料の多種多様性である。事実、基板材料の選択肢に制限はほぼなく、アッベダイアグラムにある一般的なガラスは全て使用できる。溶融石英ガラス・フッ化カルシウムなどのUV透過材料、ゲルマニウム・セレン化亜鉛・カルコゲナイドガラスなどの赤外線（IR）透過材料などがある。このように、非球面レンズは近年のレーザシステムと関連する高エネルギーに耐えられるようにデザインできる。**表1**に、異なる非球面レンズの製造技術における一般的な特徴を示す。

精密ガラスモールド

精密ガラスモールド（PGM）は、1980年代前半に登場して以来、レーザダイオードのコリメーションの主流となっている製造技術である。シングルエレ

複雑な非球面プロファイルは、球面レンズの光学システムにおける多くの収差を大きく減少させる、または消滅させることができる。（提供：米エドモンド・オプティクス社（Edmund Optics））

メントのガラスレンズを低コストで大量生産できるので、光学設計者とシステムエンジニアにとっては理想的な組み合わせである。非球面を利用して、光学設計者はシングルエレメントにデザインを最適化して、球面デザインに比べて優れたパフォーマンスを得られる。成形工程では、非常に低いコストで、数千個の高分解能レンズを成形できる。シングルエレメントで作られた精密ガラスモールド非球面レンズは、CD・DVDプレイヤー、工業用工具、医療機器など、大多数のレーザダイオードのコリメーション向け用途に適したものとして選択されている[1]。

精密ガラスモールドの工程では、一般的には等温圧縮で成形する。工程は、精密ガラスモールド装置の金型の間にガラスプリフォームを入れるところから始まる。この金型は、デザインした表面に仕上げるようにプリフォームを成形して、熱成形プロファイル、ガラス・機械特性を補正する。モールド装置は窒素で満たされ、プリフォームと機器を加熱する。圧力をかけた後、金型を冷やしてレンズを仕上げる。

精密ガラスモールドは大量生産する

表1　一般的な非球面レンズ製造技術の特徴

	CNC研磨	精密ガラスモールド	複合非球面化
高出力への耐久性	高	中	低
材料の利用可能性	高	中	低
UV透過性	中	低	なし
可視光、近赤外線透過性	高	高	高
中波長・長波長赤外線透過性	中	中	なし
試作品までのリードタイム	短い	長い	中
生産率	低	高	中
試作コスト	低	高	中
レンズ製造コスト	高	低	中
商業利用性	高	高	低

光産業技術マンスリーセミナー　OITDA

Optoelectronics Industry and Technology Development Association

プログラム（10～11月）

No. / 開催日	講演テーマ / 講師
第389回 10月20日(火)15:30-17:30	「ペロブスカイト光発電素子の特徴と応用」 講師：宮坂　力氏（桐蔭横浜大学）
第390回 11月17日(火)15:30-17:30	「レーザ溶接・接合法の発展と異材接合への応用展開」 講師：片山　聖二氏（大阪大学）

■場所　一般財団法人光産業技術振興協会
■定員　各６０名
■参加費　光協会賛助会員：1,500円（税込み）　／　一般参加：3,000円（税込み）
※支払いは、当日受付にて現金でお願いします。
■申込方法　オンライン申込フォーム　>>> http://www.oitda.or.jp/main/monthly/monthly_postmail.html
■申込締切　定員になり次第締め切ります。なお、締め切った場合にはWeb上にその旨を掲載します。

問い合わせ先　一般財団法人光産業技術振興協会マンスリーセミナー担当　潮田、綿貫
〒112-0014　東京都文京区関口1-20-10 住友江戸川橋駅前ビル7F　TEL：03-5225-6431　FAX：03-5225-6435
E-mail：mly@oitda.or.jp　URL：http://www.oitda.or.jp/

ことで大きな利益をもたらすが、いくつかの欠点も存在する。第一に、この方法は初期コストが高くつく。ガラス収縮に対して適合させる一方で、耐久性の高い材料から精度の高い金型を作る必要があるためである。機器形状の補正を何度も行い、ガラス収縮へ適合させる関係上、一般的にリードタイムが長くなる。ただ、一度金型が完成すれば、機器の保全に必要な費用はほとんどなく、多くのレンズを素早く製造できる。また、ガラス収縮のモデリングにおける絶え間ない改良によって、補正時間や装置に対する費用は減っている。金型作成のコストは下がり、リードタイムも短くなっている。

この方法の他の欠点は、材料選択の点にある。モールド成型は熱加工であるため、ガラス転移点（Tg）が比較的低い材料しか使えない。ガラス転移点とは、ガラスが低温のガラス状態から、高温の冷液体状態に転移するときの温度である。Tgが高くなるほど、ガラスを加熱して冷却するエネルギーや時間がかかるため、仕上げるモールドレンズのコストは高くなる。

モールド成型できる材料のガラスマップは広がっており、指標が1.4以下から2.0以下までのガラスが利用できる。ただ、一般的にはUV透過材料は除外される。また、レーザにおけるダメージは熱によるものであるため、モールドレンズを高出力のレーザ源と併せて使うときには細心の注意が必要である。

複合非球面化

複合非球面化技術（製造するレンズにガラスとポリマ表面があるため、複合またはハイブリッドとよばれる）は、最初にガラスの球面レンズを作成し、成形したポリマ表面を添加することで非球面にする。モールド内でポリマにUV光を照射して、ポリマを凝固させる。この方法は常温、低圧で行うため、モールド装置はガラスモールドのものほどの耐久性をもつ必要はない。

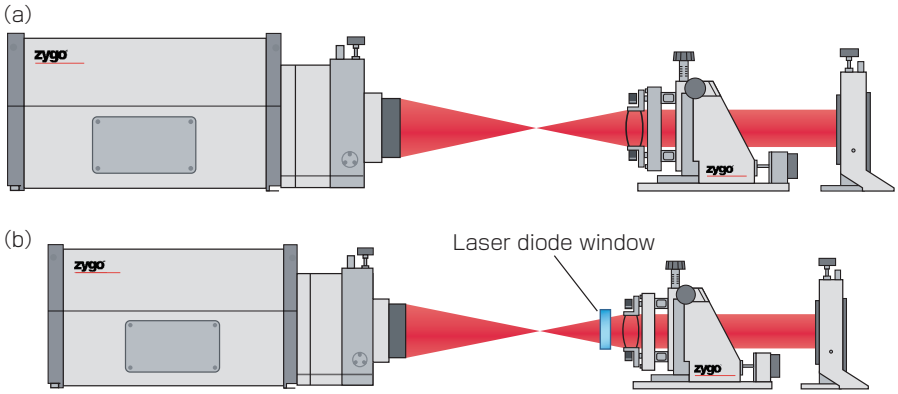

図1　Laser diode window: レーザダイオード窓。レンズのコリメーションのために、一般的にはデュアルパス構成の干渉計でRMS波面収差を計測する（a）。通常のレーザダイオードには保護窓があるため、レンズのデザインには窓の厚さと屈折率が考慮されており、レンズに対するテスト構成では光学パスに代理窓がある（b）。（提供：米ザイゴ社（Zygo Corp.）

この技術は常温で行うため、熱収縮に関する問題はほとんどなく、金型の形状が最終的なレンズの形状から逸脱する必要もない。研磨非球面レンズよりもリードタイムは長く、装置のコストは高いが、ガラスモールドに比べるとはるかに抑えられる。

複合非球面レンズのユニットコストは、中・大規模生産では低くできるが、利用前の設計時には考慮すべき制限がいくつかある。ポリマにはガラスのような耐久性はないため、外部環境から保護する方法がない場合には、複合非球面をマルチエレメント設計の外部表面に用いることは推奨できない。

厚さや表面の均等性においても制限がある。表面をデザインするとき、レンズの全口径を通して厚さは50～200μmに抑えなければいけない。そのため、基板の球面形状から緩やかに開始する必要がある。このことから、複合非球面は、大口径の迅速な非球面デザインでよく見られる大規模な球面補正よりも、緩やかな収差補正に最も使われる。ただ、ポリマ表面は光学設計において任意の表面に適応できるので、この利点によって光学トレインにおける他の収差補正光学と簡便に組み合わせることができる。

一般的な利用法の一つが、色消しレンズの最終表面として非球面を追加することである。ダブレットを球面補正させず、ダブレットやトリプレットにするよりも高性能な色補正や球面補正を行うことで、非球面にしなくても一定の基準に達することができる。

精密ガラスモールドのように、複合非球面化においても材料選択が問題になる。UVやIRを透過する樹脂の開発が進められているが、今日ではポリマ表面は可視光と近赤外線（NIR）透過に限られている。さらに、表面はポリマであるため、熱によるレーザのダメージが起きやすい。

固有のビームプロファイルを作成

光学設計者は通常、できるだけ多くの光を小さなスポットに当てさせるために、非球面レンズをレーザシステムに組み込ませる。前述した技術でこれを確保するには、レンズの波面収差を測定、検査すれば簡単にできる。波面

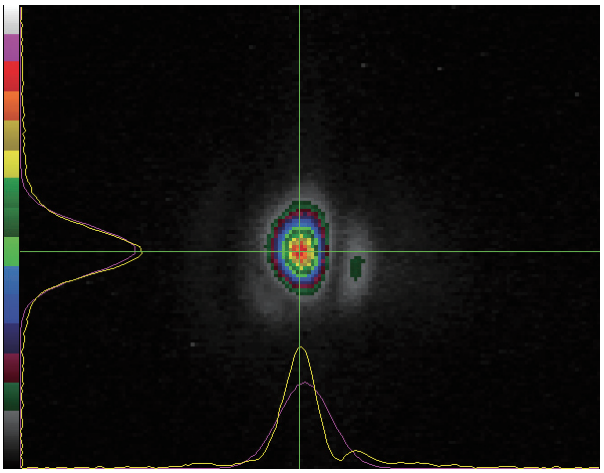

図2　RMS波面収差条件にパスした非球面レンズで計測した、ガウシアンビームとならないプロファイル。

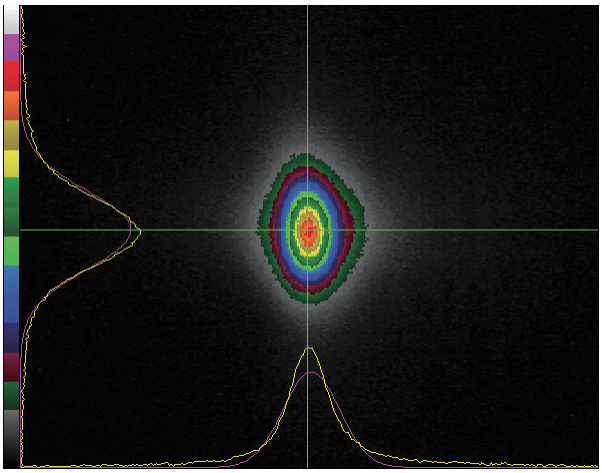

図3　改良金型で成形した非球面レンズで計測したガウシアンビーム。

収差の仕様は光学設計の段階で決定され、最初に試作して計測するときに、設計や仕様を検証する。二乗平均平方根（RMS）波面収差を計測するときには、一般的にはデュアルパス構成の干渉計が使われる（**図1a**）。

ほとんどの可視光波長干渉計は632.8nmで動作するHeNeを使うが、大抵のレンズはこの波長で使われるように設計されていない。設計波長と試験波長が違うのは、光学パフォーマンスは632.8nmでモデル化されており、製造過程における品質保証で適切な仕様を規定するためである。

多くのレンズは固有のレーザダイオードで使われるように設計されている。通常のレーザダイオードには、レーザ光が放射されるときに通過する保護窓がある。このような場合では、レンズの設計には窓の厚さと屈折率が考慮されており、レンズに対する検査系構成では、光学パスに代理窓がある（**図1b**）。

波面収差の仕様は、多くの用途においては十分なものでコスト効率がよい。しかしながら、より厳しい用途向け、特に非フォーカス用途では、レーザビームを生じさせる強度プロファイルに関係する有用な情報がないため、この計測方法ではしばしば不十分である。強度プロファイルが重要である用途向けでは、市販のカメラと付属ソフトウェアを使って測定する。より厳しい要求に合うレンズを確保するための金型を作らなければならず、さらなる工夫とコストが必要となる。

ビームプロファイル計測システムを使うと、ビーム中でピークが分かれていたり、サイドローブが見られたりする、ガウシアンビームとならないものを明らかにできる。**図2**で示すのは、ルーチンな波面収差計測をパスしたレンズのビームプロファイルであるが、プロファイル中にサイドローブが存在していた。このレンズの顧客にとっては、この非ガウスのパフォーマンスによる光のロスは受け入れがたいものだったため、金型をさらに改良した。**図3**では、改良金型で成形して作られたレンズのプロファイルを測定したものである。これらは米コヒレント社（Coherent）のビームビュー（BeamView）のカメラシステムと、日亜化学の408nmレーザダイオードを用いて計測した。

レーザ光学システムを設計する過程では、レンズ製造者と共に作業することが重要である。もしレンズ製造者が、レーザの波長、光学表面に作用するレーザの出力、レーザシステムの最終的な目標を知っていれば、ニーズに合わせたレンズを作ってくれることだろう。

同様に、開発中の製品の予算上の制約や長期展望を理解することで、製造プロセスの最初のソリューションを決定しやすくなる。本記事で紹介した3種類の技術で作るスタンダードな非球面レンズは、コンセプト実証、試作、レーザシステムへのダイレクトな組み込みに利用できる。

参考文献

（1）A. Symmons, Molded Optics: Design and Manufacture, ch. 5, CRC Press, Taylor and Francis Group, London（2011）.

著者紹介

グレッグ・ファレスはエドモンド・オプティクス社のシニア製造ラインマネージャー。
e-mail: gfales@edmundoptics.com　URL: www.edmundoptics.com
ウィリアム・モアシェードは米ライトパス・テクノロジーズ社（LightPath Technologies）の製造技術マネージャー、アラン・シモンズは同社の副社長。
e-mailはそれぞれbmoreshead@lightpath.com、asymmons@lightpath.com　URL: www.lightpath.com

LFWJ