

非球面レンズが 本当に必要かどうかを判断するには

ゲリー・ヘリット、レベッカ・ダーフィー、ジャスティン・コヴァルチュク

集束ビームの指標は、レーザーアプリケーションに対するレンズタイプの評価において不可欠である。

特定のレーザーアプリケーションに最も適したレンズを選択する際には、複数の項目を検討する必要がある。レンズの素材とコーティングを選択したら、次は、シンプルな平凸レンズ、ベストフォームレンズ(www.laserfocusworld.com/14291432のNote1参照)、非球面レンズのどの形状が必要かを判断しなければならない。

この問題に対する正しい答えを見つけるには、システムのレーザービームパラメータ(波長、ビーム径、モード、ビームパラメータ積[Beam Parameter Product: BPP])、レンズのパラメータ(直径、厚さ、表面半径)、アプリケーション要件(集光径、出力レベル、電力密度要件など)に関する知識が必要である。レーザーとレンズのパラメータが既知となれば、集束ビームの指標を

計算し、それを基に、アプリケーションの要件を満たすかどうかを判断することができる。

高速ダイヤモンドターニングマシン、磁性流体研磨(Magneto-Rheological Finishing: MRF)装置、CNC非球面研磨装置や、業界内の競争の激化によって、非球面レンズは、以前よりも費用対効果が高くなり、ごく一般的な製品となっている。それでも、シンプルな平凸レンズやベストフォームレンズと比べるとやはり高額であるため、アプリケーションに適切なレンズ形状を選択することは、レーザーエンジニアにとって重要な作業である。

主なレーザービームの種類

特定のレーザーアプリケーションに対してレンズが適切かどうかを判断する

には、レーザービームの種類とそのパラメータを理解することが重要である。レーザーの波長、出力、ビームプロファイルは、レンズを適切に解析するために必要な、3つの主要項目である。レーザーの出力と波長は、ほとんどのレーザーシステムにおいて簡単に特定できるパラメータだが、ビームプロファイルを適切にパラメータ化する方法は、わかりにくいかもしれない。

理論的には、ガウシアンプロファイルのビーム径は無窮大である。これをレンズの設計や解析に使用するのは現実的ではないため、多くのエンジニアが、出力が最大値の $1/e^2$ (約13.5%)になる2点間の距離($1/e^2$ 幅)の1.5倍を、ビームサイズとして使用する。 $1/e^2$ 幅をそのまま使用する場合もあり、その場合はビームエネルギーの約13.5%が切り捨てられることになる。このビーム径は、レンズシステムのクリアアパーチャ(有効に使える開口部分の大きさ)の設定にも使用されることが多い。非球面レンズの設計時に最大の性能を確保するには、 $1/e^2$ 幅の1.7倍をビーム径として使用するべきである。設計時の解析では大抵の場合、レンズを通る光線をトレースして、像平面上で光線を解析することが行われるため、その光線によってビーム径全体がカバーされることが重要である。この規則に当てはまらない例外もあるが、 $1/e^2$ 幅の1.5~1.7倍を使用すれば、通常は適切な結果が得られる。

ファイバ端の口径とファイバの開口数(Numerical Aperture: NA)は、マ

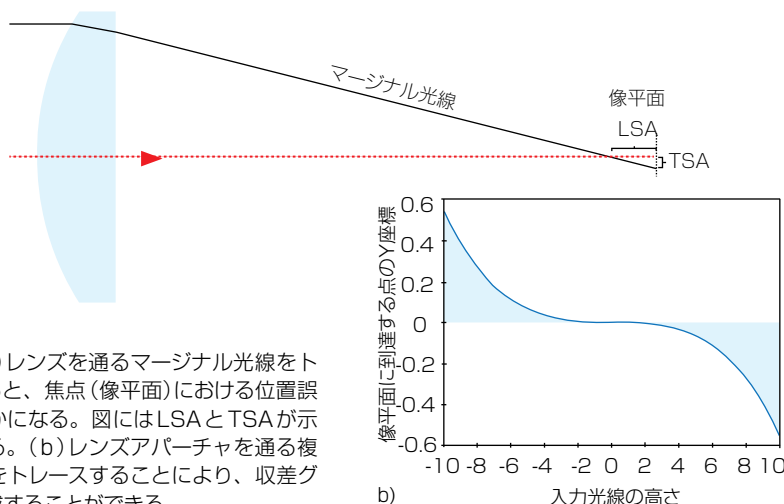


図1 (a)レンズを通るマージナル光線をトレースすると、焦点(像平面)における位置誤差が明らかになる。図にはLSAとTSAが示されている。(b)レンズアパーチャを通る複数の光線をトレースすることにより、収差グラフを作成することができる

ルチモードのファイバレーザビームの設計と解析において、非常に重要である。コリメーション後のビーム径がXmmであると、メーカーが主張している場合は、Xの値を集束レンズの解析に使用すべきである。コリメータレンズを設計する際にも、同じ理由に基づいて、この仕様を確認する必要がある。

レーザビームのパラメータが不明な場合は、少なくともレンズのアパーチャ全体を覆うビームサイズを使用する必要がある。例えば、30mmのレンズで、クリアアパーチャが26mmの場合には、レンズ性能の解析には、26mmのビームサイズを使用する必要がある。

レンズとビームの解析の種類

球面収差は、モノクロシステム（ここではレーザ）内の単一レンズの解析に使用される、従来からある主要な指標の1つである。球面収差には、縦方向と横方向の2種類がある。横球面収差(TSA)は、像平面で測定される、中心軸と垂直方向の光線誤差で、縦球面収差(LSA)は、中心軸と光線が交差する点と像平面の間の水平方向の誤差である。図1は、これら2つのパラメータを図示したものである。通常は、これらのパラメータのうちの1つだけが、レンズの評価に使用される。このパラメータは、レンズを通る光線の屈折に対するスネルの法則(Snell's Law)と、像平面までトレースした光線に対する簡単な三角法に基づいて、簡単に計算することができる。

レンズの中心を基準として複数の光線をマッピングすることができる。一般的なTSA曲線は、レンズにおける入力光線の高さ(X軸)に対して、像平面における軸方向の光線の高さ(Y軸)をプロットすることによって、作成す

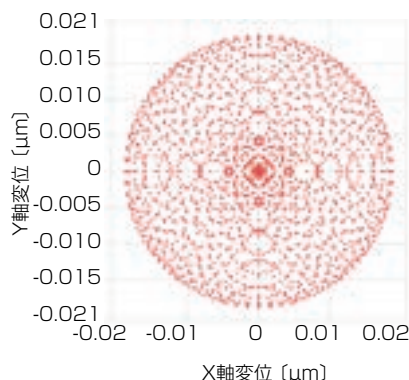


図2 サンプル非球面レンズのスポットダイアグラム。すべての光線が直径160nmの円の中に収まっている

ることができる。

図1bに示されているように、マージナル光線(最も外側の光線、このレンズの場合中心から+10mm)が像平面に到達する点のY座標は、-0.6mmである。マイナス符号は、光線が中心軸よりも下で像平面に到達することを表す。レンズ入射点が中心から±3mm以内の光線は、0に近い点で像平面に到達する。しかし、入射点がそれよりも外側の光線は、像平面における変位が指数的に増加する。

完璧なレンズであれば、このグラフ

は、Y軸の0の点の高さの1本の水平線になる。小さな変位は許容されるが、±0.6mmは、かなり大きな球面収差を表す。アプリケーションにおいては、これはスポット径が大きくなって、一般的に性能が低下することを意味する。かなり大雑把な概算だが、最大球面収差は1波長未満程度にする必要がある。

スルーフォーカススポットダイアグラム。完全なスポットダイアグラムは、レンズのアパーチャ全体を通る光線をトレースして、像平面における光線の(x, y)座標をプロットすることによって生成される。

レンズのスポットダイアグラムにおいて、すべての光線が1波長の直径の範囲内に収まる状態が、高精度なレンズを設計する際の理想である。高精度なレンズでは、最小限の直径の範囲内にスポットが集束される。

図2は、非球面レンズのスポットダイアグラムである。X軸とY軸の単位はミクロンである。このレンズでは、球面収差が最小限に抑えられている(波長の1/10未満)。

スポットダイアグラムは、レンズに関

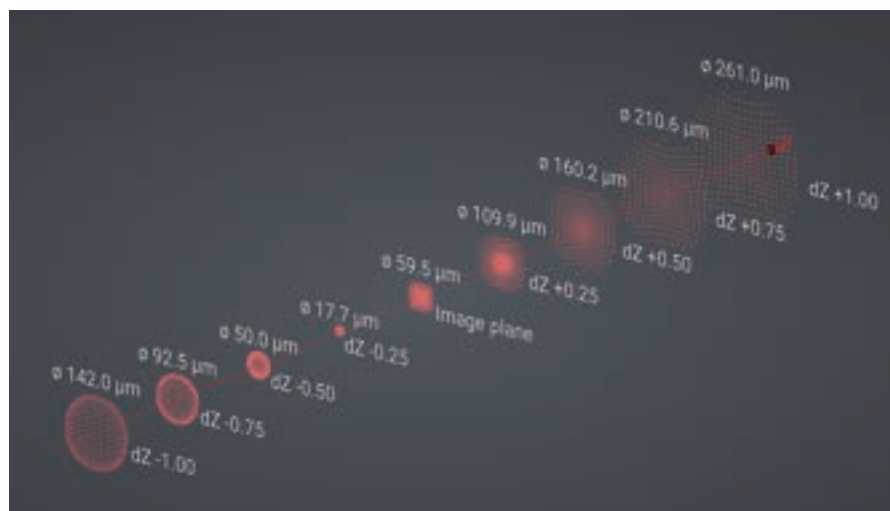


図3 サンプルレンズのスルーフォーカススポットダイアグラム。特に注目してほしいのは、最小スポット径が、焦点から-0.25mmずれた位置にあることだ。顕著な量の球面収差がその原因である

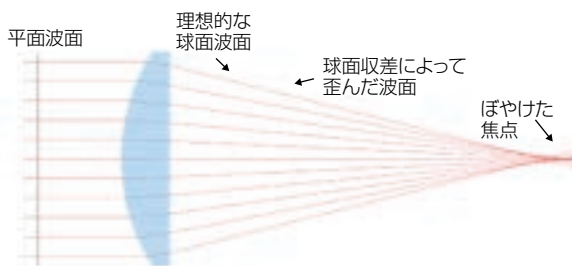


図4 球面収差を持つ多くのレンズが、平面波面を非球面波面に変換する。非球面波面によって、集束スポットはぼやけ、その様子は光線において観測できる場合もある

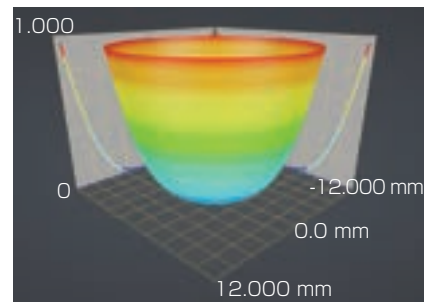


図5 約1波長の誤差を持つサンプルレンズの波面誤差プロットの例

する追加情報を提供するように拡張することができる。例えば、像平面の前後で光線がどのように集束するかを知りたい場合がある。そのような場合に対しては、スルーフォーカススポットダイアグラムが最適である。図3のスルーフォーカススポットには、像平面を-1mm~1mmの範囲で0.25mm単位でずらした場合の、スポットの形状とサイズが示されている。球面収差が原因で、光線が最も小さく集束されるのは、

実際にはメインの像平面から-0.25mmずれた位置であることがわかる。

波面誤差。これは、他のレイ(光線)トレーシングよりもやや複雑な数学に基づく、また別の種類の解析である。この解析の詳しい説明については、ウォーレン・J・スミス氏(Warren J. Smith)の「Modern Optical Engineering」⁽¹⁾を参照してほしい。この解析では、入力光またはレーザービームの波面は、レンズ入射時に平面であると仮

定する。レンズによって、この平面波面が球面波面に変換されるのが、理想である。

すべての光線を像平面の1点に集束させるには、光線は球面波面を持たなければならない。焦点において、波面は平面になり、その後ビームは再び拡散していく。実際には、レンズによって平面波面は、完全な球とははいくらか

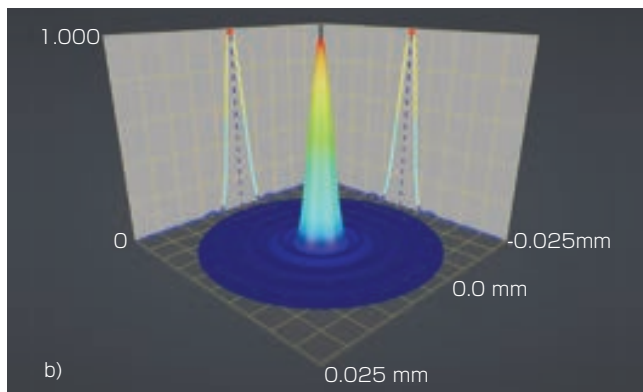
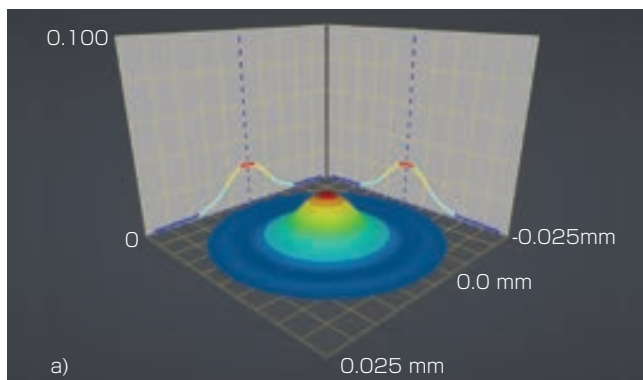


図6 シンプルな両凸レンズ(上)と、同じレンズに非球面性を加えて球面誤差を補正したもの(下)の点拡がり関数をプロットした図。上は球面収差によって、エネルギーが焦点においてビームの裾野部分に拡散されて、ピーク強度が抑えられていることに注目してほしい

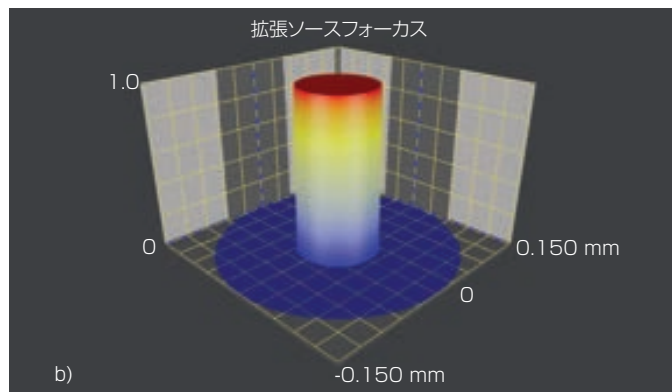
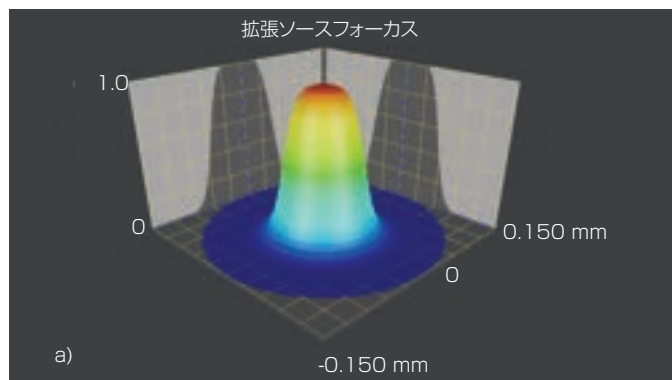


図7 (a)はシンプルな両凸レンズ、(b)は同じレンズに非球面性を加えて球面誤差を補正したものの拡張ソースフォーカスプロット。多くのマルチモードレーザーアプリケーションにおいて、集束スポットのこの軽微な変化は、あまり問題にならない可能性がある

ずれた球面波面に変換される(図4)。

波面誤差プロットは、理想的な平面波面または球面波面からの波面のずれの計算値をプロットしたものである。図5は、約1波長の誤差を持つサンプルレンズの波面誤差プロットである。波面の中心部分($\pm 3\text{mm}$)の波面誤差は非常に低い、誤差は指数的に増加する。

波面誤差は、一般的に設計波長における波数(単に λ の場合もある)の単位で表される。数波長分の波面誤差は、ほぼすべての光学アプリケーションにおいて非常に悪い状態を表す。おそらく $1/10\lambda$ 未満というのが、高精度レンズに対する適切な概算値だが、できる限り最良の設計を求めている場合は、 $1/20\lambda$ 未満にするのが良いだろう。

光学分野では、そこそこに良好なレンズシステムの最大波面誤差は、 $1/4\lambda$ (または $1/4$ 波長)未満と考えるのが一般的である。この規則は、レイリー限界(Rayleigh criterion、www.laserfocusworld.com/14291432のNote2参照)に基づいて天体望遠鏡を対象に定められたものだが、レーザ業界においても、レーザアプリケーションの高精度な光学系に対して採用されている。ただしこの条件では、集束スポットを最小限にするには不十分である。

球面と非球面の集束レンズの比較

集束レンズが目的に対して十分かどうかを判断するために、上記の解析結果をどのように利用すればよいのだろうか。多くの場合、最終的なスポット径などのシステム要件は、アプリケーションによって異なる。しかし、理論的なスポット径は、レーザビーム特性や光学系の焦点距離などのシステムパラメータによって決まる。波面誤差解

析は、集束レンズがシステムに収差を加えるかどうかや、それが全体的な性能にどのような影響を与え得るかを調べるために、特に便利な手段である。

ここで、直径 25.4mm 、有効焦点距離(EFL) 100mm の熔融石英(Fused Silica: FS)レンズを、波長 $1.07\mu\text{m}$ のレーザと使用する場合について考察しよう。オンラインのレンズ設計プログラム「LensKit」(www.lenskit.app)による簡単な設計では、両凸レンズがベストフォーム球面レンズとして出力される。名目上は、この設計の波面誤差は 1.26 波長である。比較のために、同じレンズを非球面にしてすべての球面収差を取り除いた場合についても考察する。この非球面版の波面誤差は $1/1000$ 波長未満である。

シングルモード(ガウシアン)レーザを使用する大半のシステムにおいて、全球面の両凸集束レンズの使用によって 1.26 波長の波面誤差が加わるのは、許容できない。収差が大きすぎて、ビームは像平面に鋭く集束されない。 1.26 波長の波面誤差の影響を完全に示すために、図6に、2つのレンズの集束ビームの形状を比較して示す。

多くのシングルモード(ガウシアン)のレーザアプリケーションに対し、良好な性能を得るには非球面レンズが必要である。

マルチモードファイバシステムの場合は、判断はそれほど明白ではない。その判断は、アプリケーションの許容レベルに依存することになる。 1.26 波長の波面誤差と回折限界性能の違いを、図7に示す。このシンプルなシステムは、 $200\mu\text{m}$ のマルチモードファイバ(BPP= $10\text{mm}^*\text{mrad}$)を使用してモデル化されており、焦点距離(FL) 100mm のコリメータレンズでコリメータされている。

クラディングや溶接に対しては、球面両凸集束レンズの使用による焦点のぼやけが、許容できる可能性がある。高精度な切断や穴あけの場合は、球面レンズによる性能の低下は、それよりも許容できないかもしれない。その場合は、非球面レンズを購入するのが妥当である。

システム設計者は多くの場合、トレードオフを行う必要がある。本稿の解析方法を利用することにより、非球面レンズの使用が、他の部分に充てるべきコストの無駄遣いになるか、性能を適切に向上させるか、システムが機能するための必須条件であるかを、判断するための十分な材料をそろえることができる。波面誤差解析やスポットダイアグラムなどは、レーザアプリケーションに対するレンズ選択の論理的な判断の指針となる。

本稿で紹介した解析は、手作業で行うこともできるので、果敢に挑戦してもらって構わないが、無料のオンラインレンズ解析ツールを使用して行うことができる。

参考文献

- (1) W. J. Smith, Modern Optical Engineering, 3rd Edition, McGraw-Hill (2000).

著者紹介

ゲリー・ヘリット(Gary L. Herritt)は、以前はII-VI Infrared社(現在は米コヒレント社[Coherent])で光学設計、レーザテスト設計、顧客サポートの職務に就いていたが、現在は非常勤の光学設計コンサルタントで、LensKitの共同創設者。レベッカ・ダーフィー(Rebecca Durfee)は、以前はII-VI Infrared社に勤務していたが、現在は米Thresher Engineering and Optics社の光学設計コンサルタント。ジャスティン・コヴァルチュク(Justin Kovalchuk)は、II-VI Incorporated社(現在はコヒレント社)の元レーザアプリケーション担当光学システム設計者で、現在は日本のGenomeMiner.ai社の最高技術責任者(CTO)であり、LensKitの共同創設者。
e-mail: gherrit52@gmail.com
URL: www.lenskit.app

LFWJ