

前回レーザービーム品質評価尺度 M^2 値の定義について紹介しました (第 29 巻第 11 号)。今回は実際のビーム品質の測定方法と測定例について説明します。

4. ビーム品質の測定法

実際にビーム品質を測定する方法について、代表的な例を示します。まず、ビームの断面強度を測定する器具を準備します。CCDなどを搭載したビームプロファイル測定器を準備できれば、最も測定が容易ですが、適当な幅のスリット (典型的には集光点でのビーム幅の 10 分の 1~20 分の 1、目安として 5~50 μm くらい) をビーム断面の水平軸、垂直軸方向に掃引しながら透過強度を測定しても大丈夫です。またナイフエッジなどでビームの一部を遮光しながら、ビーム強度を測定する方法も一般的です。

次に、測定したいレーザービームの直径がおおよそ 100~500 μm 程度になるように緩やかにレンズで集光します。あまり強く絞っても、集光点近傍のビーム幅が測定器分解能を下回ってしまうので、意味がありません。通常のレーザービーム (発散角が数 mrad 程度 (~0.1 度)) の場合、典型的なレンズの焦点距離は 50~100 mm 程度です。発散角が、この値から大きく逸脱するビームの場合は、一工夫が必要です。例えばブロードエリア型半導体レーザーでは、発光ストライプ幅が 100 $\mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ 程度で、発散角も 10 度、45 度と非常に大きなものになります。この場合、適当なコリメートレンズ (開口数 0.5 程度) を使い、ビームをコリメートしてから集光するとよいでしょう。なお用いるレンズは単なる平凸レンズよりも、できるだけ収差の少ないレンズ (できれば収差補正レンズやアクロマティックレンズ) が望ましいです。収差の影響により、測定される M^2 値も劣化してしまうことがあるためです。

そして、集光点近傍でビーム幅を光軸方向の関数として測定します。測定点数は、ビーム幅が $\sqrt{2}$ 倍になる光軸位置のほぼ 2 倍程度まで、10 点程度測定すればよいでしょう。ここで厳密にはビームプロファイルの測定から 2 次モーメント (分散) を計算し、ビーム幅を算出すべきですが、プロセスが煩雑で時間もかかるので、簡便にはピーク値の 13.5% などを閾値にして大雑把にビーム幅を見積もることが多いです。この場合、リップルの多い複雑なビーム形状の場合、ビーム幅の見積もりに誤差が生じや

すいので注意が必要です。こうして得られたビーム幅の光軸方向依存性から、ウエストと遠視野広がり角を求め、 M^2 定義式 ($M^2 = n\pi d_0 \Theta / 4\lambda$) より M^2 値を見積もるか、またはフィッティングにより M^2 値が求められます。

より簡便な測定方法として、 M^2 値測定器なるものも市販されています。例えばコヒーレント社 (「モードマスター」) や浜松ホトニクス社などが代表的です (レーザー学会誌「レーザー研究」や応用物理学学会誌「応用物理」などの広告ページ参照)。これらの装置を用いて、より簡便・迅速・正確にビーム伝搬を把握することが可能になってきています。特にモードマスターにおいては、上述した測定プロセスを自動的に行います。すなわち集光レンズを光軸上で動かし、ビームのプロファイルを逐次測定すること (本器ではナイフエッジ法) により、ビーム品質を測定します。ただし、連続波 (CW) ビームのみ対応可能なので、パルス光に対しては、上述した手作業か、パルス対応のビーム品質測定器を用いる必要があります。またモードマスター使用上注意すべきことは、(1) 測れるのは実質的に $M^2 \sim 50$ くらいまでのビームであること、(2) 装置の構造上、被測定レーザービームの一部が装置内の光学部品に反射されてレーザー共振器に戻りやすいこと、などがあげられます。この場合、レーザーが反射戻り光による擾乱を受けるので (例えばビームのポインティング安定性が低下したり、強度変動をきたす)、戻り光減衰が必要な場合もあります。光減衰器やウエッジ板による斜め反射を利用すること、あるいは光アイソレーター素子などを光路に挿入するとよいでしょう。

5. ビーム品質の評価

図 1 には、実際にきわめて非対称な LD ビーム (100 μm (p - n 接合に平行、水平軸) \times 1 μm (p - n 接合に垂直、垂直軸) 発光ストライプ) の伝搬を追跡し、 M^2 フィッティングを行った例です。この場合は、焦点距離 6.5 mm (開口数 $NA=0.65$) の組み合わせレンズでコリメートした後、アナモルフィックプリズム・ペアにより接合方向ビーム幅を 3 倍に拡大した後、焦点距離 15 mm (平行)、50 mm (垂直) の円柱レンズで集光しました。CCD カメラを搭載したビームプロファイラー (Spiricon 社製) を用い、ビーム幅を各点で計測した結果、ビーム品質は水平、垂直軸に対してそれぞれ $M^2=12$,

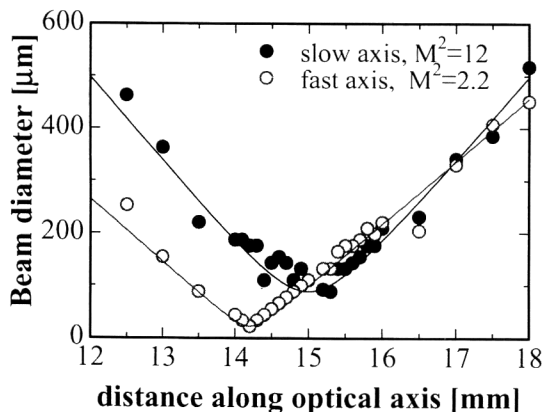


図1 マルチモードLDビームのビーム品質測定例。ビームはそれぞれ、Slow軸（接合方向）：高次モード，fast軸（接合に垂直）：回折限界。ビームの発光幅と発散角から推定されるビーム品質は $M^2=20$ (slow)， $M^2=1.5$ (fast)で，実測とまずまずの一致。

$M^2=2.2$ くらいと推測され，その積は26.4となります。一方，このLDのデータシートに記載されたビームウエストと発散角から推定される M^2 値はそれぞれ20，1.5程度で，その積は30となります。非対称ビームの場合， M^2 （水平） $\times M^2$ （垂直）が保存量となるので，測定結果とデータ値はまずまず一致しているといえます。

$M^2=20$ という大雑把にあって最低次から数えて20番目くらいの高次モードまで混在していると考えられますが，前述した通り，モードの合成比についての情報は M^2 表記では欠落してしまうので，実際にどのモードがどれだけ混入しているかは不明です。

さて，こうして測定されたビーム品質ですが，その適用や評価にあたっては，以下のような注意が必要です。 M^2 値は先ほど述べましたエルミートガウスモードのビームに対してきわめて有効ですが，ある種のレーザーでは， M^2 値でビーム品質を定義できません。ハードアパチャーを共振器内に有するビーム，代表例としては不安定共振器レーザーなどでは，波数ベクトルが激しく振動し， M^2 値を定義する段階で数式上発散してしまいます。一般に不安定共振器レーザーは高いビーム品質を有しているのですが， M^2 値をうまく定量化できません。

また先ほども述べましたが， M^2 値はあくまでビ

ームの包絡線を示すため，ビームプロファイルの詳細な情報は欠落します。ビームプロファイル自体が重要な問題（励起に伴う温度上昇，LD励起固体レーザーにおける出力エネルギーの計算モデルなど）においては， M^2 値を用いたビーム伝搬によるモデル化では実験との差が大きくなる危険性も秘めています。ほかにも， M^2 値が同じでも集光スポットに違いがでる，あるいは見た目も違っても M^2 値が同じ場合もあり， M^2 表記に絶対的信頼を置くことに躊躇するような例もあります。また，あらゆる共振器から生み出される多種多様なレーザービームを統一的に記述可能なビーム品質定義が可能なのか（それとも不可能なのか），疑問は尽きません。

6. む す び

M^2 値によるビーム品質表記は非常に便利なツールで，少なくとも西側レーザー研究者においてはデファクトスタンダード化しています。しかし，残された課題も山積みしているようです。ロシアの研究者と西欧の研究者の間には，いまだにビーム品質に関する統一的記述に関して議論があります¹⁾。あるロシアの研究者は，ビーム品質因子ではなく収差因子 (aberration factor) を用いることを推奨しています^{1,2)}。最近，ヤングの複スリットで得られるいわゆる空間的コヒーレンスの概念に基づき，コヒーレンス関数を導入することが提案されており³⁾，議論はまだまだ続きそうで，今後の展開を見守っていきたいと思います。より厳密な数式的記述，測定法，あるいはIEEEにおける標準化動向などは文献4)あるいは前回の参考文献を参照していただければ幸いです。

この記事に関してのご意見は，omatsu@image.tp.chiba-u.ac.jpあるいはoptics@kobe-u.ac.jpまでお願いします。（笠松 直史）

文 献

- 1) Y. Anan'ev: "Once again on the laser beam quality criteria," *Opt. Spectrosc.*, **86** (1999) 499-502.
- 2) Y. Anan'ev: *Laser Resonators and the Beam Divergence Problem* (Adam Hilger, Bristol, 1992).
- 3) 鷲尾邦彦: "第5回レーザービームおよび光学系等の評価に関する会議 (LBOC5) 報告", *レーザー研究*, **28** (2000), 523-525.
- 4) 平等拓範: "レーザービーム品質測定の基礎", *レーザー研究*, **26** (1998) 723-729.