

1. はじめに

レーザービームの品質という何を想像されるでしょうか。ビーム品質を示す評価尺度として、ビームの空間コヒーレンス、波面精度、位相分布などを連想する方も多いかと思いますが、ここでは、レーザー研究者の間でデファクトスタンダードとなりつつある空間的なビーム品質表記尺度  $M^2$  値について、その定義と測定実例・問題点などを2回にわけて紹介したいと思います。

2. なぜビーム品質の定義が必要か

図1に、あるビームのプロファイルを示します。これが、例えばビームプロファイラーや、ナイフエッジ法、スリット掃引法によって観測されたものだとします。見た目ではまったくガウスビームにみえますが、実は、このビームはガウスビーム ( $TEM_{00}$ ) 成分をまったく含んでいないのです<sup>1)</sup>。種を明かすと、このガウスビームライクなプロファイルは、 $TEM_{01}$ 、 $TEM_{10}$  成分などを適当な配分で合成した結果、得られてしまったものなのです。

同様な例として、図2の2つのビームを比べてみましょう。ほとんど違いはないようにみえます。しかし、実線ビームをレンズなどで絞ると、その集光スポットは、破線ビームに比べて1.5倍大きくなります。すなわち、実線ビームの集光強度は破線ビームに比べ低くなってしまいます<sup>2)</sup>。

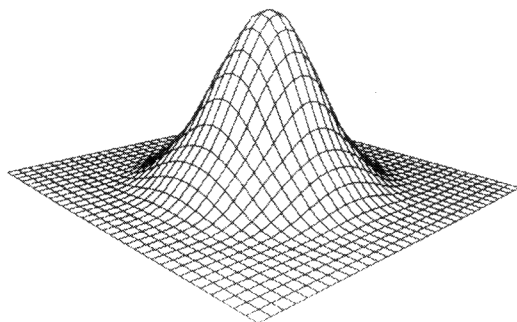


図1  $TEM_{00}$  モード成分を全く含まないガウス分布に酷似したビーム<sup>1)</sup>。

図1、図2の例は、みたくでビームを判断することの危険性を示しています。あるビームがどの程度の品質を有しているか、定量的に把握することが重要になってきます。このことは皆さんが、レーザー装置を購入するときの仕様検討、あるいはレーザービームの伝搬光学系を実際に設計するときに特に重要になります。

3. ビーム品質の定義

そもそも上記のような現象は何に起因しているのでしょうか。レーザービームの品質は、構成されている共振器の性質とレーザー利得の空間分布に関係しています。簡単のため後者の利得分布を無視し、2枚のミラーが対向した共振器を想定すると、そこに存在する空間モードはエルミート（あるいはラグール）ガウスモードになります。このことは代表的な光エレクトロニクスの教科書<sup>3)</sup>にも記載されています。最低次のモードはガウス分布をしており、 $TEM_{00}$  モードと呼ばれ、このビームの伝搬特性は厳密に光線追跡できます。これに対して、ビームが高次モードを含む場合、ビーム形状はガウス分布か

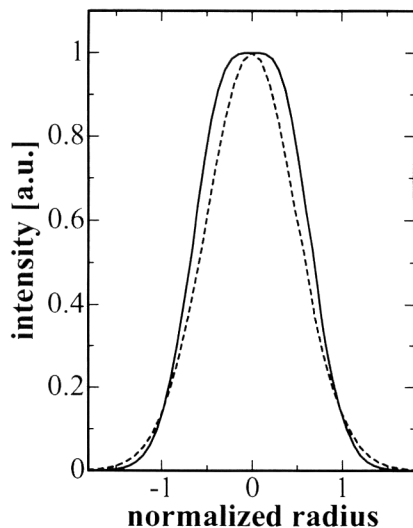


図2 2つのビームのプロファイル。実線ビームの集光径は破線のビームの1.5倍である<sup>2)</sup>。

ら離れ、伝搬特性もガウスビームとは異なってきます。この違いが上記のような現象を引き起こしてしまうのです。しかし、高次モード伝搬は複雑で、これまで簡便な記述がありませんでした。1990年代に入ってスタンフォード大学の A. Siegman 教授により高次モードを含むビーム伝搬を統一的に記述する試みがなされ、本コラムの主題であるビーム品質因子  $M^2$  値 (エムスクエア値, えむにじょう値) が登場しました<sup>1,4-7)</sup>。  $M^2$  値とは、一言でいえば、ガウスビームに比べ、何倍集光度が悪いビーム品質かということを示す物理量で、ビーム直径  $d_0$  (2次モーメント (分散) で定義することが必要)、遠視野広がり角  $\theta$  を用いて次式のように書けます。

$$M^2 = \frac{n\pi d_0 \theta}{4 \lambda_0}$$

ただし、 $\lambda_0$ : 真空中の波長,  $n$ : 媒質屈折率

ガウスビームでは  $M^2=1$ , 高次モードを含む場合  $M^2>1$  となることが示されています。また無収差でハードアパチャーによる回折のない光学系においては、 $M^2$  値は保存量であることも知られています。 $M^2$  値を用いると、ガウスビームに対する伝搬式に、 $\lambda \rightarrow M^2\lambda$  に置換した波長を代入することで高次モード成分を含むビームの伝搬を正確に追跡できます。ここでいうガウスビームの伝搬式とは、ガウスビームの複素  $q$  パラメーター (複素曲率半径とビームウエストで記述できる) を、光学系の光線行列 (ABCD 行列) で追跡していく手法です<sup>3)</sup>。実は図2の例では、実線ビーム、破線ビームの  $M^2$  はそれぞれ、1.5, 1 だったのです。結果として、1.5 倍に波長が長くなったことと等価と考えてもよいでしょう。

低出力の He-Ne レーザーからは、実測値として  $M^2=1.05$  程度のきわめてガウスビームに近い (ビーム品質のよい) レーザービームが出ます。これに対して、一般的に高出力固体レーザー (20 W 以上) や高出力半導体レーザー (1 W 以上) 等では、レーザーロッドの熱的光学収差や導波路構造のため

に、レーザービームは高次モード成分を含んでしまいます。そのため、出力レーザービームをガウスビームだと想定して光線追跡を行っても、数値計算と実験では集光特性に大きな違いが現れてしまいます。この場合には、レーザービームの  $M^2$  値を測定して、それをガウスビーム伝搬式に代入することで、精度よくレーザービームの伝搬を光線追跡できます。ただし、 $M^2$  値というのは、いったい最低次から数えて何番目くらいまでの高次モードがレーザービームに含まれているのか、を示す尺度にすぎません。したがって、モードの合成比や空間コヒーレンスの情報は  $M^2$  値からはまったく得られないのです。このことが、実用的に問題になる場面もあります。

今回は、レーザービーム品質  $M^2$  値の測定方法、測定結果の実例、そして、 $M^2$  値がもつ問題点などについて解説します。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) A. Siegman: "How to (maybe) measure laser beam quality," OSA Trends Opt. Photonics, **17** (1998) 184-199.
- 2) 安井公治, 小島哲夫, 藤川周一, 竹中裕司, 西前順一: "加工用高出力レーザーのビーム品質測定と評価", レーザー研究, **26** (1998) 730-734.
- 3) A. Yariv 著, 多田邦雄, 神谷武志共訳: 光エレクトロニクスの基礎, 原書3版 (丸善, 1988).
- 4) A. Siegman: "New developments in laser resonators," Proc. SPIE, **1224** (1990) 2-14.
- 5) M. W. Sasnett: "Propagation of multimode laser beams—The  $M^2$  factor," *The Physics and Technology of Laser Resonators*, eds. D. R. Hall and P. E. Jackson (Adam Hilger, Bristol, 1989).
- 6) 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.
- 7) 久場一樹: "スラプレーザーの高輝度化", レーザー研究, **21** (1993) 840-849.