

焦点スポット径と M^2 (エムスクエア値) とビーム径

2023年12月25日

三田技研有限会社

光は回折します。回折とは狭い所を通った波が、拡がりながら伝播していく現象です。例えばピンホールを通ったレーザー光は、拡がりながら伝播して行きます。この際にピンホールの直径が小さい程、レーザー光の拡がり方は大きくなります。

レーザー光の最も細い部分はビームウエストと呼ばれます。レンズ等で集光された場合の焦点もビームウエストであり焦点スポットとも呼ばれます。ピンホールが無くても、レーザー光はビームウエストの部分にピンホールがあるかの様に回折します。レーザー光はビームウエストの直径が小さい程、より大きな角度で拡がります。

理想的に集光するレーザー光について、以下の関係が成り立ちます。

$$1 = (\pi d_w / 2 \lambda) \tan(\theta / 2) \quad (\theta \text{ が小さくて } \tan(\theta / 2) \sim \theta / 2 \text{ のときは } 1 = \pi d_w \theta / 4 \lambda \text{ とみなせる})$$

d_w : ビームウエストの直径(μm)

θ : ビーム集光(拡がり)全角(rad)

ビームウエスト付近でなく無限遠で角度を定義します。

ビームは集光と同じ角度で拡がります。

λ : レーザー光の波長(μm)

最も明るい中心部に対してパワー密度が $1/e^2$ に下がる位置でビームの直径を定義します。

実際のレーザー光については、以下の関係が成り立ちます。

$$M^2 = (\pi d_w / 2 \lambda) \tan(\theta / 2) \quad (\theta \text{ が小さいと } M^2 = \pi d_w \theta / 4 \lambda \text{ とみなせる})$$

M^2 : 「エムスクエア値」と呼ばれるビームの集光性を表す値

横モードがシングルモードと呼ばれるレーザー光の M^2 は 1 に近い値を示します。 M^2 の値はレーザー光を集光して d_w と θ の測定を行い、上の式から算出されますが多くの場合はレーザーの仕様書に記載されています。

ビーム伝搬方向の任意の位置におけるビーム直径 d は

$$d = (d_w^2 + d_g^2)^{1/2} \text{ (mm)}$$

$d_w^2 = d_w / 1000 \text{ (mm)}$ ビームの回折によるにじみ。単位を mm に変換する

$d_g = 2z \tan(\theta / 2) \text{ (mm)}$ ビームの幾何光学的拡がり(θ が小さくて $\tan(\theta / 2) \sim \theta / 2$ のときは $z\theta$ とみなせる)

z : ビームウエストからの距離(mm)

で求めます。

焦点スポットの直径は、以下の計算で求めます（但し収差の無視できるレンズを使用し、かつ集光前に $d_w^2 \ll d_g^2$ で $d \sim d_g$ となる場合）

$$\theta = 2 \sin^{-1}(\text{集光前のビーム直径}/(2 \text{ 焦点距離}))$$

$$d_w = 2 \lambda M^2 / (\pi \tan(\theta/2)) \quad (\theta \text{ が小さいと } d_w = 4 \lambda M^2 / \pi \theta \text{ とみなせる})$$

ビームの形が真円でなくて楕円の場合は楕円の長軸方向と短軸方向それぞれについて上記の式が成り立ちます。