

# レーザービームの制御光学系の現状と動向

新 井 武 二

## Beam Control for Laser Materials Processing in Industrial High Power Laser

Takeji ARAI

A lot of optical components are used for the laser machining systems. The optical component has the accuracy error and manufacture error owing to the machining limits in manufacturing. This paper has highlighted some of the practical considerations of optical problems, both items of laser cavity and beam delivery as an industrial laser system. High power laser, in generally, has high order mode of low beam quality and these affect the beam propagation and the pointing stability. These problems lead the difficulty of beam control to get the low divergence and good focusability. Therefore, an appropriate beam control is necessary to use it for the laser materials processing and a detailed verification is needed to know to accurate control, such as the characteristic of the polarization, absorption and focussibility of laser beam. Under the circumstances, the current state and the trend are described here.

**Key words:** high power laser, laser beam control, actual beam mode, laser optics, polarization of beam

産業応用を意識したレーザー加工が日本で始動したのは、1972年の研究会や1978年の国家プロジェクトの発足からである。1980年を境に国産のCO<sub>2</sub>レーザー加工機がはじめて市販されたことに端を発して、本格的なレーザー加工の時代に突入した。それから四半世紀を経て、現在では生産手段として産業界に広く定着している。しかし、レーザーは発振理論を具現化した実際のレーザー装置から取り出される光であるために、ビームの特性は、発振方式によって決まる特有の性質を有するとともに一定の限界をもっている。

生産ツールとして設計された産業用レーザー応用装置を加工に利用するわけであるが、実際に利用するに際しては改良すべき点や解決すべき問題が多い。このように理想的でない光を扱っているため、ビームを適切に制御して使用する必要がある。ここでは、加工技術に絡めて、産業用高出力レーザービームの制御光学系の現状と動向について述べる。

## 1. レーザービームの現状

### 1.1 レーザービームモード

レーザービームの品質は加工特性に大きく影響することは一般に広く知られている。光路に垂直な断面におけるビーム内の強度分布は一樣ではなく、装置の種類、発振方式などによって異なる固有のエネルギー分布を有する。これをビームモードとよんでいるが、ビームモードには縦モードと横モードがある。縦モードは直接観察することは難しいが、共振器の軸方向に一往復したときの波面全体にわたる位相遅れが $2\pi$ の整数倍になるような定在波の分布状態を示すもので、加工には直接の影響は少ない。これに対して、光軸に垂直なレーザーの強度分布を横モードといい、これらはアクリルによるバーンパターンによってビーム内の強度分布をほぼ推測することができる。レーザー加工でビームモードと称する場合には、横モード (TEM: transverse electromagnetic wave) を指す場合が多い。

このうち、TEM<sub>00</sub>モードをシングルモードといい、その

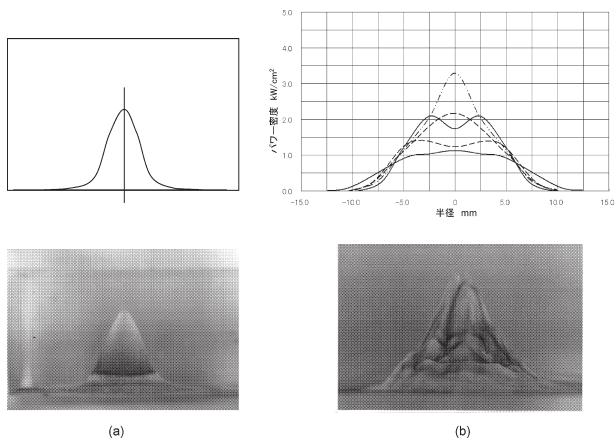


図1 安定型共振器で得られるビームモード。(a) 低出力レーザー、(b) 高出力レーザー。

他のモードをマルチモードと称している。実際の高出力の産業用レーザー発振器ではシングルモード（またはガウスモード）と称される理想状態に一致するものは少なく、シングルモードといわれている場合であっても、 $TEM_{00}$ 、 $TEM_{01}^*$ 、および  $TEM_{10}$  が数十% ずつ混合している場合が多く、現実には見かけ上からくる“ニアガウス”である。産業用レーザーの安定型共振器から発振された実際のビームモードを図1に示す。

ビームモードは共振器の鏡の構成にもよるが、 $CO_2$  レーザーのような気体ガスレーザーでは、簡易的には  $D_0/4\lambda L \leq n$  で示される。ここで、 $D_0$  はビーム径、 $L$  は共振器を構成する2枚の鏡の間の距離で共振器長という。 $n$  はフレネル数であるが、この値が  $\leq 1$  の場合は  $TEM_{00}$  で  $n$  が2~3の場合は  $TEM_{10}$  となり、4の場合は  $TEM_{21}$  となり  $\approx 10$  では  $TEM_{mn}$  となる。 $D_0$  の大きいときはミラー曲率を変化させて擬似的なガウスモードを得ているが、この式は、 $L$  を一定以下に抑えて高出力を得ようとする場合には、 $D_0$  を大きくしてモード体積を稼ぐ必要がある、その分、モード品質は低下することを示している。一方、シングルモードを維持しつつレーザー出力を上げるためには  $L$  が十分に長くなければならず、装置構成上またはアライメント上からも限界はある。高出力化によるレンズ、ミラーなどの光学部品の耐光強度にも限界があることから、 $D_0$  を大きくするのが普通である。このように大出力化とモード純化 ( $TEM_{00}$  化) は、一般的に相反する条件下にある。

## 1.2 レーザー用光学部品

レーザー加工機システムで、発振器内部に配置される光学部品を内部光学系とよぶ。これに対して、発振器より取り出された光を加工ステーションまで伝送し集光するまでの一連の光学部品を外部光学系という。また、加工の直前

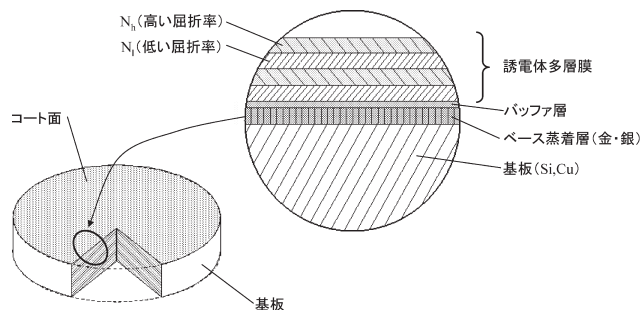


図2 高反射ミラーの表面構造 ( $CO_2$  レーザー用)。

に光を集光する目的で集光光学系が用いられる。 $CO_2$  レーザーの光学系はおもにミラー系とレンズ系が、YAGレーザーではこのほかにファイバーを含めた伝送光学系が用いられる。レンズ系では光の透過率が、またミラー系では反射率が重視される。

### 1.2.1 内部光学系部品

共振器を構成する光学系としては、光を増幅し部分的に透過させて取り出すための出力鏡と、全反射鏡からなるリアミラーとがあり、その中間には共振器長を稼ぐ目的で折り返しする際に用いる折返し鏡 (bend mirror) がある。内部光学系は一般にクリーンな環境で全反射鏡の反射率は  $R=99.5\sim 99.7\%$  であり、部分透過鏡は取り出しうるレーザー出力や利得との関係もあるが、概して透過率は  $T=35\sim 60\%$  である。

### 1.2.2 外部伝送系光学部品

これに対して、大気中に置かれる外部光学系ではコーティングで表面強度を増す工夫がなされている場合が多く、また、光伝送経路の途中で位相がずれないようにゼロシフトのコートを使用している。従来、基板には銅を用いて Au や Ag コートを施していたが、近年ではコーティング技術が発達して、Si 基板に金メッキや銀メッキを施しその上に誘電体多層膜 (ZnSe と  $ThF_4$  とを交互に重ねて多層膜を形成) をコートして反射率を向上させた EG (enhanced gold) コートや ES (enhanced silver) コートなどがある。膜厚は数  $\mu m$  ~ 数十  $\mu m$  程度であるが、反射率は  $R=99.6\sim 99.7\%$  あり、なかには  $R=99.8\sim 99.9\%$  の高反射率のものもある。光反射を目的としたミラーでは、一般に Cu, Si などの基板表面に高反射材による蒸着層を置き、その上に誘電体を順に加熱蒸着させて多層の膜の層がつけられる。図2に高反射ミラーの表面構造の例を示す。

### 1.2.3 集光光学系

レーザー光を加工に用いるためには、発振器から取り出されたビームを収束しパワー密度を高めるための集光系を必要とする。おもな集光系 (結像光学系) にはレンズとミ

表1 レーザーに用いる光学部品.

レーザーの種類	レンズ材質	ミラー材質
CO <sub>2</sub> レーザー (10600 nm)	セレン化亜鉛 (ZnSe) ガリウムヒ素 (GaAs)	Si+誘電体多層膜 Cu+Au コート
YAG レーザー (1064 nm)	クラウンガラス (BK7) 溶融石英 (SiO <sub>2</sub> )	BK7+誘電体多層膜 SiO <sub>2</sub> +誘電体多層膜
LD レーザー (780~830 nm)	クラウンガラス (BK7) 合成石英 (SiO <sub>2</sub> )	BK7+誘電体多層膜 SiO <sub>2</sub> +誘電体多層膜
エキシマーレーザー (193~350 nm)	合成石英 (SiO <sub>2</sub> )	BK7+誘電体多層膜

ラーがある。場合によっては、収差特性の改善のために2枚以上の複合レンズで集光するか、入射面を非球面に加工した無収差レンズを用いることもあるが、一般に産業用レーザーでは材質的にもコスト的にも制限されるため、単レンズを用いることが多い。

集光系の光学材料としては、CO<sub>2</sub> レーザーでは ZnSe, GaAs, Ge などが用いられる。比較的高い屈折率  $n$  を有するものが多いが、現在では光軸調整のために用いる He-Ne の光を透過するため、アライメントが容易になるとの理由から ZnSe ( $n=2.40$ ) が主流を占めている。ただし、基板材料となる素材は  $R = [(n-1)/(n+1)]^2$  の反射率をもち、例えば ZnSe の場合、 $R=0.168$ 、すなわち 16.8% の反射率を素材自身がもっているため、この素材表面に誘電体多層膜の無反射コーティング AR (anti reflection) コートを施して透過率を 99% 以上に上げている。

また、YAG レーザーでは、ガラスの一種である溶融石英 (SiO<sub>2</sub>) や BK7 (boro-silicate crown glass) などが用いられる。これらは化学的に安定した材料で不純物が少なく、材質が硬く研磨が容易である。レンズとしては、この基板に両面反射防止用コーティングを施し使用する (表 1)。

## 2. ビームの空間制御

### 2.1 方向の制御

安定型共振器から得られるビームは、伝搬距離に関係なく基本的に初期のモードが維持される。加工機システムでは多くの全反射鏡が用いられ、反射鏡はビームの伝送における中継点として光の向きを変える偏向の役割をしている。外部光学系での反射鏡は直角折返しに用いられる場合が大半を占めるが、入射角度により光の反射率が異なる。

実例として、基板が無酸素銅でダイヤモンドカッティング仕上げによって得られた表面では、垂直入射時 (ビーム入射角=0°) は反射率  $R_s=98.6\%$  であるが、入射角が増すにしたがって  $R_p$  は減少し、反対に  $R_s$  は上昇する。し

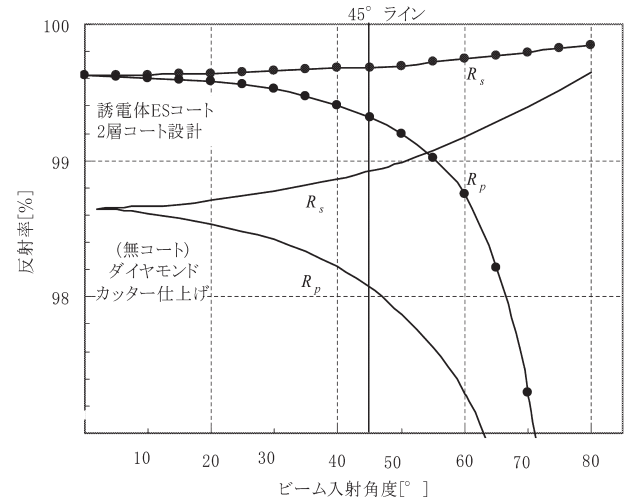


図3 入射角度によるミラー反射率の違い。

かし、反射に伴う損失は非常に大きい。この面に ES コートを施すと、図 3 に示すように表面反射率が垂直入射時では 99.6% 以上に向上し、入射角の変化に対しても全体に損失はきわめて小さく改善される。したがって、反射率は反射方向 (水平, 垂直) と入射角によって異なる。各ミラーが回転を伴うミラー伝送のレーザーロボットなどにおいては、すべての箇所が高い偏光成分での反射率を用いることは困難で、平均値を用いる必要がある。

### 2.2 空間伝搬制御

レーザー加工機で構成される光学系は、おおむね 2 種類に分類される。1 つ目は、共振器の出力鏡から取り出されたビームをそのまま加工に用いる単純光学系で、加工テーブルのサイズが比較的小さい場合などに用いられる。2 つ目は、共振器から取り出されたビームの広がりや中間にコリメーションを介することで抑え、擬似的に平行光を作って伝送させる複合光学系である。特に、光路の長い大型加工システム、あるいはサイズの大きい加工テーブルの場合などにおもに用いられる。産業用高出力レーザーで用いられているコリメーションには、レンズによる透過型コリメーションと、ミラーによる反射型コリメーションとがある。

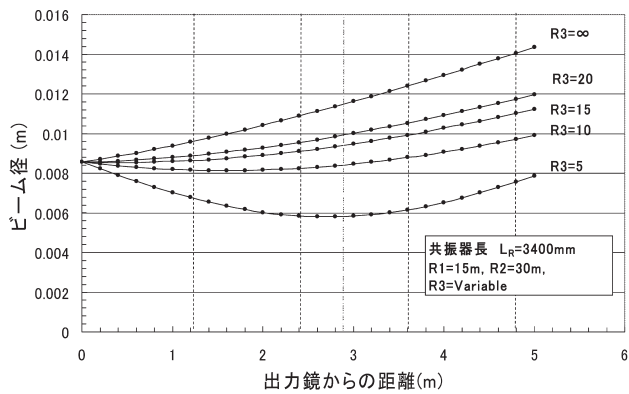


図4 出力鏡の曲率を変化させた場合のビーム伝搬。

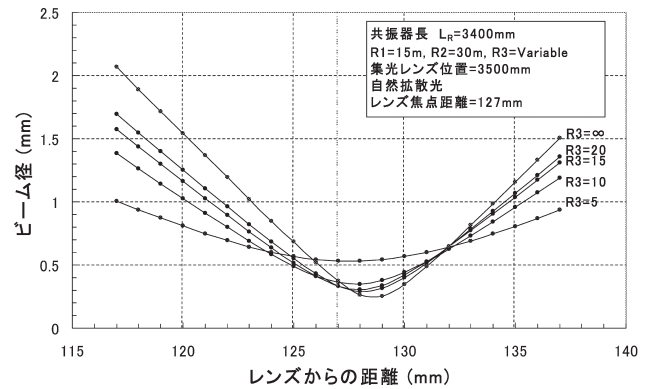


図5 単純光学系における集光特性（拡散ビーム）。

なお、共振器の出力鏡と集光系との間に、円偏光ユニットを含めて、3枚から8枚の全反射鏡を用いるが、これらは向きを変えるための中継点であって光学的に直線である。

### 2.2.1 ビーム伝搬特性

CO<sub>2</sub> レーザー共振器の例として、共振器長  $L_R=3.4$  m、共振器内のビームウェスト  $w_0=4.29$  mm で、出力鏡位置でのビーム半径  $w_{0c}=4.37$  mm である。この構成による共振器の R1 の曲率半径を変化させても、取り出されるビームの伝搬特性には大きな変化はみられない。図4に、R1 と R2 の曲率半径をそれぞれ 15 m、30 m に固定し、出力鏡の外側 R3 を変化させた場合を示す。ビームの伝搬は、R3 の曲率半径を小さくするとビームウェストが大きくなり、R3 を大きくすると最初から直線的に広がってゆく傾向を示す。このことから、R3 を小さくすることで加工機が大きい場合や、ビーム移動距離の長いシステムの場合には伝搬ビームの広がりを抑えることができる。

### 2.2.2 一定伝搬距離での集光

出力鏡から一定距離伝搬した光路長  $Z=3.5$  m のところでの集光特性を、R3 をパラメーターに図5に示す。焦点距離が  $f=127$  mm のレンズによる、ビームコリメーションを用いない場合の単純光学系における集光特性である。一般に R3 の曲率半径が大きいほど焦点距離近傍でより小さく集光し、小さいほど絞れないが、ビームコリメーションを用いた場合には、ほぼレンズの焦点距離付近で集光するのに対して、用いない場合には R3 の曲率半径が大きいほど集光位置は公称焦点距離から外側に遠ざかる。このことは同じ集光レンズを用いた場合においても、共振器の光学系の構成によって集光特性が異なることを意味する。

### 2.3 ファイバー伝送

YAG レーザーでは、一部モードを重視する切断などでミラー伝送をおこなうこともあるが、ファイバーによる伝送が一般的である。特に溶接では、モードをある程度犠牲

にしても溶接性能は十分維持されるので、熔融石英系ファイバーが用いられている。また、最近では、ファイバーを用いた切断でも、径が 0.1~0.2 mm の極細ファイバーにより高い出力を伝送させることによってパワー密度を高め、ファイバー伝送によるモード劣化を補うことができるようになってきた。ファイバーのコア径は 0.3~0.8 mm までのものが大半であるが、高出力用（数 kW 連続出力用）に大量のエネルギー伝達が可能な 1.0~1.2 mm のものも出現している。産業用に用いられている YAG レーザー用のファイバーには、主として SI (step index) 系ファイバーと GI (graded index) 系のファイバーとがある。一般の高出力用ファイバーは SI ファイバーが用いられている。

一方、GI ファイバーでは、コア内の屈折率分布が不均一で放物線状に変化しているため、その傾向に沿ってサイン波のような伝搬をする。そのため、ファイバー通過後に取り出されるビームはやや中央部が強い山形の強度分布をもつ。SI と GI の伝達強度分布形状が加工に及ぼす影響として、軟鋼材料上にビームを走らせて溶接した例を図に示す（図6）。伝送される光強度分布は熔融形状にも反映される。

### 2.4 偏光制御

産業用として高出力化したレーザー共振器の場合には、一般に出力は共振器長に比例する。そのため、出力の割に長さをコンパクトにするために、全体をコの字に折り返した共振器を用いることが多い。共振器を構成する全反射鏡と折返し鏡の間でレーザーの種光が発現したとすると、最初発生したレーザー光はランダム偏光のままミラー間を直進し、光は 90° の折返し鏡に至る。この鏡面に対して垂直をなす方向の P 波の振動ベクトルはミラー面で吸収されるため損失が大きく減衰し、鏡面に対して平行をなす方向の S 波の振動ベクトルは損失が小さくほとんど反射され

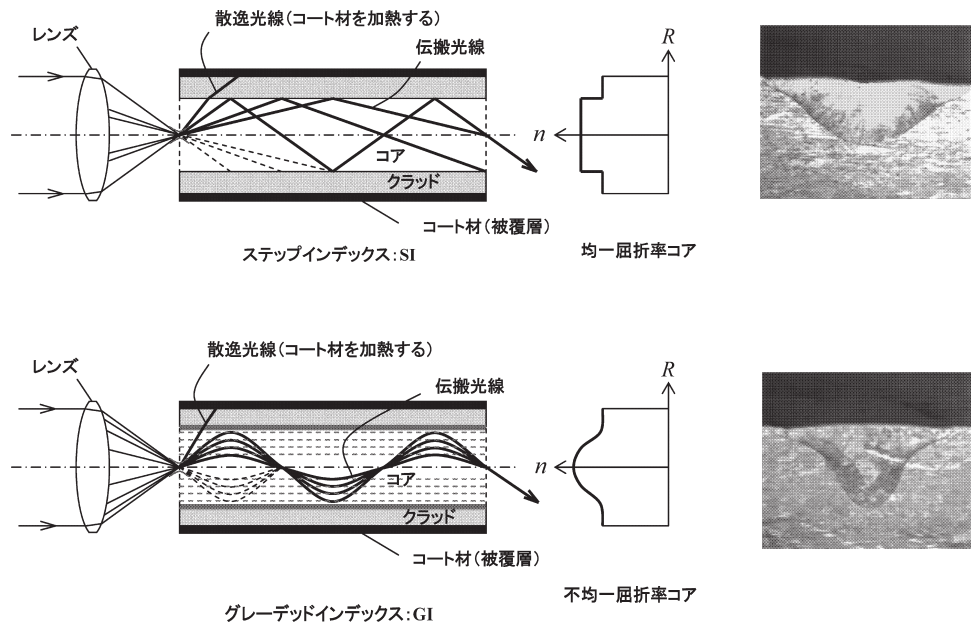


図6 伝送用ファイバーの種類と溶接加工形状。

る。したがって、出力鏡と全反射鏡の間を往復する間にS波だけが増幅されることから、鏡面に平行となるS波の振動ベクトルがまさり、反射率の高い水平波(S波)のみが共振器内に存在することになる。その結果、このような共振器からは向きが下向きの直線偏光のみが強調されて残る。

金属の切断加工では、光の吸収率が入射するビームの偏光方向に依存し切断幅や表面粗さなどが変化するため、偏光状態が加工品質に大きな影響を与える。直線偏光は方向によって反射や吸収に偏りをもつことから、直線加工以外は不都合が多いため、最終的に取り出された光を円偏光に変換してから用いる。共振器の出力鏡から出た光を、円偏光に変換する光学素子の円偏光鏡(retarder)と平面鏡を組み合わせて変換する。

### 3. ビームの収束制御

#### 3.1 ビームウェスト位置近傍での集光

中規模以下の加工システムにおいては、コリメーションを用いずにビームにウェストをもたせて広がりを抑制するのが一般的である。そのため、ビームウェスト近傍の集光特性には注意を要する。実機における光学系をもとに集光特性をみると、焦点距離が127 mm レンズを用いた場合、ビームウェストの位置を境に変化する。入射ビーム径とレンズの焦点距離に対しては、ビームウェスト位置より前では見かけの焦点位置(結像点)は短く、同位置の後では反転して見かけの焦点位置は長めになる。この傾向は、レンズに入射されるビーム径が小さく焦点距離が長いほど変化

は大きい。一般の産業用レーザー加工機によるビームの集光特性は、光路長とレンズ位置によって変化する。

#### 3.2 レンズによる集光

加工用レーザーにおけるレンズ集光によるビーム強度は、レンズによる収差があるため焦点の内側と外側とは非対称となり、ビームエネルギーが最も高くなるのはいわゆる焦点位置(公称焦点距離)よりやや内側になる。レーザービームの集光性を上げることは、焦点距離の短い、短焦点レンズを用いてある程度実現することができる。しかし、短焦点レンズの場合には、球面収差のためにかえって集光性は悪化する。また、短焦点レンズは、ワークディスタンスが短いために加工の際に発生蒸気やスパッターの影響を直接受けやすく、レンズの維持管理のうえからも問題がある。

単レンズで集光する場合でも、実際のビームは高次成分を含んでおり、従来の単純な計算では実態に合わないものがあった。より正確のために、ビーム品質による広がり角の係数  $C_m$  を考慮する必要がある<sup>1)</sup>。回折における係数は  $C_m \geq 1$  であり、 $C_m = 1$  は特別な場合で理想的なガウス分布を示す。レンズに入射されるビーム径を  $D$  として、標準的な焦点距離  $f$  をもったレンズで集光する場合には、一般に回折によるスポット径 ( $d_m$ ) の広がり、収差によるスポット径 ( $d_a$ ) の広がり(または、ぼけ)の和として表される<sup>2)</sup>。

$$d_g = d_m + d_a = 1.27 C_m \frac{\lambda f}{D} + K \frac{D^3}{f^2} \quad (1)$$

ここで、

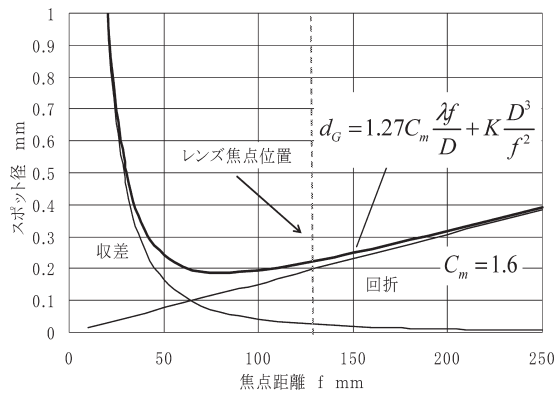


図7 CO<sub>2</sub>レーザーによる集光スポット径の計算例。

$$K = \left| -\frac{n(4n-1)}{16(n-1)^2(n+2)} \right|$$

ただし、 $n$ は屈折率で、CO<sub>2</sub>レーザーで用いるZnSeでは $n=2.4$ 、YAGレーザーで用いる溶融石英では $n=1.45$ である。なお、ここで求めたビーム径は、両者の物理的な意味が若干異なることから、単純に加えることは理論的には厳密さに欠けるが、一般に、集光スポット径を把握する方法として用いることができる<sup>3)</sup>。

式(1)では、レンズへの入射ビームは平行光としている。ビームの伝搬による径の拡大を実測してみると、直径の変化は8 m先では15 mmから27 mmに拡大する。この場合の拡大を角度で換算すると、 $\theta=0.013^\circ$ となってきわめて小さい。また、実際の加工システムで使用される伝搬の範囲が限られていて、その光路移動距離は小さいので、ビームの入射角度の変化は無視できる。そのため、計算ではほぼ平行光を仮定することができる。CO<sub>2</sub>レーザーで、 $D=14$  mm、 $C_m=1.6$ 、 $f=127$  mmの場合の計算例を図7に示す。

### 3.3 ビームの集光限界

加工用標準レンズの焦点距離相当(127 mm)の間隔をワークディスタンスとして維持したままで集光限界を実現しようとする場合には、理論上、ビームを拡大して、そのうえで非球面レンズを用いて球面収差をなくした光学系を組むことで最小の集光性を実現することができる。比較のために、市販している焦点距離127 mmのレンズを用いて集光させた場合のスポット径と、無収差光学系によるスポット径の測定結果を示す<sup>3)</sup>。測定器は、PROMTECH社のレーザースコープUFF100を用いて測定された。本測定器では、集光位置近傍の測定が可能である。その結果、出力1 kWのCO<sub>2</sub>レーザーを用いた場合の市販のレンズによる集光径は、実測値で $\phi 220 \mu\text{m}$ を得た。このワークディスタンス127 mmを維持した無収差光学系の非

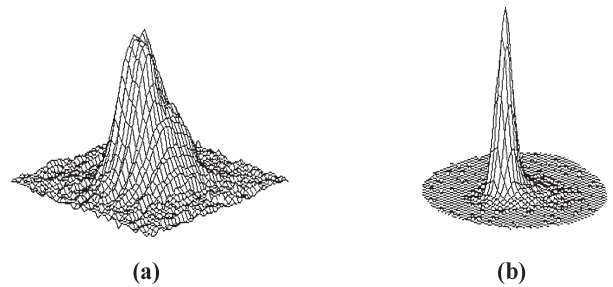


図8 焦点距離127 mmの場合の集光特性の比較(CO<sub>2</sub>レーザー)。(a)通常光学系による集光(スポット径 $\phi=220 \mu\text{m}$ )、(b)無収差光学系による集光(スポット径 $\phi=88 \mu\text{m}$ )。

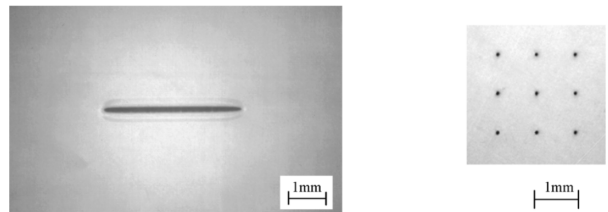


図9 整形ビームによるレーザー加工例。

球面レンズによる集光径は $\phi 88 \mu\text{m}$ を得た。これらの光学系で得られたビームの集光特性の測定結果を図8に示す。

実際の産業用のレーザービームを用いて無収差光学系を構築するためには、光軸からの許容偏芯量、設置されたレンズのサイズや傾き、また所定のレンズによる結像点の位置など精度上の制限がある。

### 3.4 ビームの形状制御

あらかじめビームの形状を制御して、材料に照射する方法も考えられている。アパーチャーなどによってレーザービームのまわりの余分な裾野をカットし、中心部分の円形ビームのみを取り出す方法もそのひとつであるが、さらに取り出される光そのものを直接整形する方法がある。ただし、レーザー光をカットした分だけエネルギーは減少する。

レーザー光の伝搬を制御して加工に用いる方法として、ビーム整形がある。回折格子などの光学素子を用いておこなう整形法にはビーム分岐、ビーム拡散、ビーム整形などがあるが、紫外域から赤外域までの高出力レーザーでキノフォーム型フーリエ変換回折光学素子を用いて実現できる。YVO<sub>4</sub>の第三高調波を用いてビーム整形した例を図9に示す。発振器から取り出される円形のビームを回折格子で分岐してドットに変換した例と、回折型ディフューザーによって線状ビームに変換した例である。用途に応じた正確な光の直接的な形状制御方法として、今後が期待されて

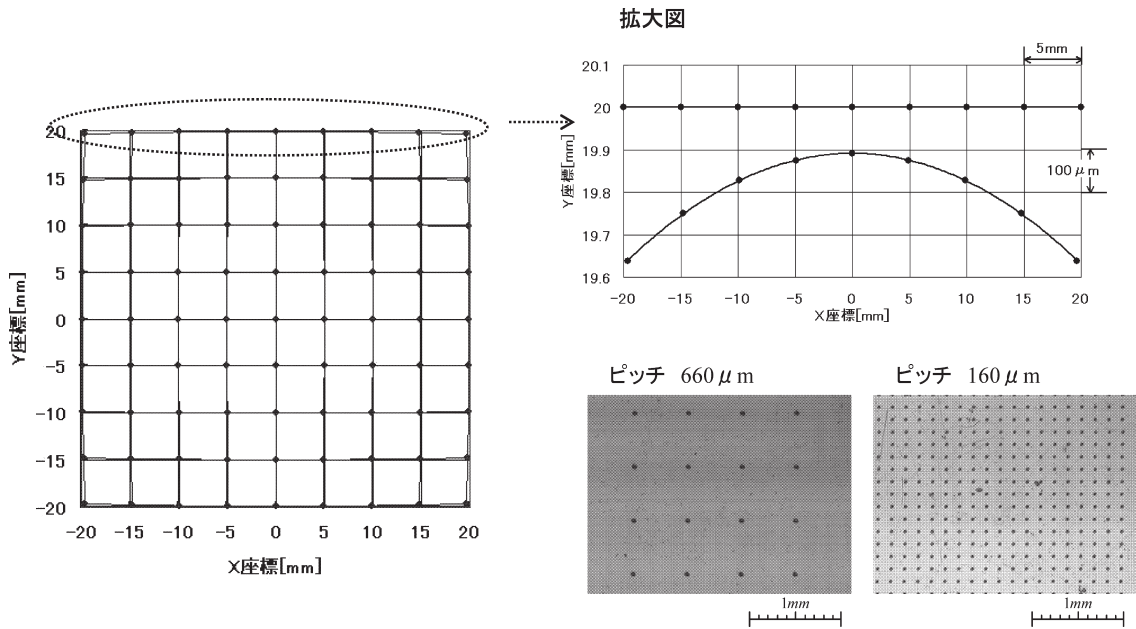


図 10 時間による位置補正。

いる。

### 3.5 時間制御

電子部品の高密度実装技術に関連してプリント基板の穴あけなどのピア加工や表面に多数の穴加工を施す場合、高速繰り返しや回転などによってビームを一定間隔に照射して加工するが、その光学系にはガルバノやポリゴンミラーなどととも  $f\theta$  レンズが用いられる。大口径を有する  $f\theta$  レンズは中心付近では照射位置が正確であるが、外側に向かうほど屈折により照射位置に誤差が生じる。そのため、照射時間のタイミングなどを制御して誤差修正をおこなう必要がある。

レンズ口径内で四角形にパルスビームを照射すると、 $x$  軸および  $y$  軸ともに中心から遠ざかるにつれて光路が変化し遅れるために、理想の照射位置に対して実光路では形状が全体でやや樽状に変形してくる。等間隔で高精度に微細な穴列を一面に加工する場合には、位置を補正し照射時間のタイミングを合わせるための精密な時間制御を必要とする。ガルバノミラーとポリゴンミラーによる微細加工光学系においての結果を図 10 に示す。理想的な光路とレーザー光の実光路の差を前もって割り出して、収差を補正し直角と位置のずれを相殺する方向に外部に向かうほどガルバノの向きを上げ、照射時間をやや遅らすことによって補償する制御をおこなった。直径 60 mm の  $f\theta$  レンズを用いた加工範囲 40 mm 角の場合で、角度で最大  $\alpha=4.5^\circ$ 、位置で最大  $550 \mu\text{m}$  の誤差に対して、これを  $x$  方向で  $0.3 \mu\text{m}$ 、 $y$  方向で  $0.6 \mu\text{m}$  まで理想ラインの位置に近づける

ことができている。実際の加工では、光の空間的な制御だけでなく時間制御もおこなわれている。

同じ現象を扱ったとしても、工学と物理、実学と理論では似て非なるものがある。理論は理想状態に限定して解くことができるが、工学は純粋理論では解けなくても、実用に供するために解決しなければならない場合が生じる。発振器から発生する光は理想状態のものではなく、光学部品は製作の過程で誤差が生じる。実学では誤差や近似というあいまいさが付きまとう。ここでは述べなかったが、ビーム光路にある光学部品が波長吸収によって熱的な変形が起こり、熱レンズ現象で焦点位置に変動をきたすこともある。レーザー加工機が高出力化されるなかで、実学ではそうした現実の課題と常に取り組んでいるのである。高出力レーザービームの現状を知るうえで、少しでも参考になることを願っている。

### 文 献

- 1) G. H. Shermann and G. Frazier: "Transmissive optics for high-power lasers: Practical considerations," *Opt. Eng.*, **17** (1978) 225-231.
- 2) 新井武二: "レーザー加工光学系に関する研究 第1報: 全光学系を考慮した伝搬と切断特性", *砥粒加工学会誌*, **50** (2006) 397.
- 3) 新井武二: *レーザー加工の基礎工学* (丸善株式会社, 2007) p. 96, p. 103.

(2007年4月2日受理)