

超短パルスレーザー加工機による精密加工

Precision Hole Forming with Ultrashort Pulse Laser

中 奥 洋
Hiroshi Nakaoku

要 旨

高精度で微細な孔加工が可能なレーザー加工機を製品化した。レーザー光源として超短パルスレーザーを使用し、そのレーザービームをピエゾ素子による駆動ミラーによってスキャンすることで、高精度な加工を実現している。

本製品の大きな特長の1つとして、形状自由度の高い加工が可能であるということが挙げられる。本稿では多角形状の加工用ソフトウェアを開発し、さまざまな断面形状の孔加工を行うことで、孔加工の特性の検証を行った。その結果、加工時間は計算値より4.7倍以上必要であったが、非常にシャープなエッジの孔加工を行えるということが確認できた。

Abstract

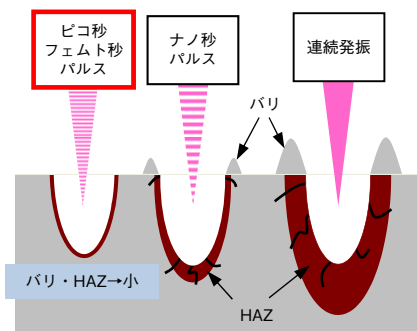
We have developed a precise laser milling machine for micro-hole machining. High-precision holes can be formed by using an ultrashort pulse laser and piezo-actuated scanning mirrors.

The newly developed machine is capable of forming holes of various shapes. This paper describes and evaluates the forming of polygonal holes with the machine and special software. We have achieved holes with a sharp edge although the machining time was more than 4.7 times longer than our calculation.

1. はじめに

近年、ディスプレイの高精細化やLSIの狭ピッチ化により、微細な孔加工のニーズが高まっている。一般的に機械加工においては $\phi 100 \mu\text{m}$ 以下の加工を行う際はツールの折れや摩耗、最小ツール径の限界といった課題があり、安定した精度で加工を行うことは非常に難しいとされているが[1]、今後は $\phi 100 \mu\text{m}$ 以下の孔加工が必要となることが予想される。また、特殊なノズルや、半導体部品などで丸孔だけでなく三角形や四角形、星型といった多角形状の孔のニーズも増加すると予想される。

こういった小径かつ多角形状の加工を実現するため、非接触加工であるレーザーによる加工が検討されている。特に高精度な孔加工を行うためには、超短パルスレーザーが有用である。超短パルスレーザーとは、ピコ秒レーザー、フェムト秒レーザーの総称であり、100フェムト(f)秒~100ピコ(p)秒の範囲の非常に短いパルスを発生させることができる。一般的な加工用のレーザーは、レーザーがワーク(被加工物)に照射されると、レーザーのエネルギーが熱となり、ワークを融解させることによって加工を行う。その際、融解したワークの一部は表面にとどまり、バリや熱影響層(Heat Affected Zone, HAZ)となることで加工の精度を悪化させる原因となる。一方、超短パルスレーザーを使用して加工を行った場合は、ワークが融解する前にパルスが終わるため、「アブレーション」と呼ばれる爆発的な加工現象が起り、ほとんどHAZのない加工を行うことができ、高精度な加工を行うことが可能である(第1図)。

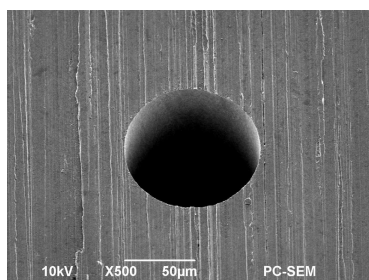


第1図 レーザ加工の模式図

Fig. 1 Illustration of laser machining

超短パルスレーザーにて加工を行う際には、レーザーを1箇所照射し続けることによって加工を行うのではなく、ガルバノミラーや回転プリズムといったスキャナを使用し、レーザーの加工スポット位置を円周や螺旋(らせん)状に動かして加工を行う。これにより、ワークが溶解することを防ぐとともに、孔の直径や形状を調整することができる。第2図は螺旋状にスポット位置を動かし、ステンレス鋼SUS304に対して超短パルスレーザー(ピコ秒レーザー)にて加工された丸孔の、レーザー出口側のSEM(Scanning Electron Microscope)写真である。超短パルスレーザーにより非常にシャープなエッジが加工されていることがわかる。

これまでレーザー加工は機械加工の補完という位置づけで考えられてきたため、三角形や四角形といった多角形状の加工を行う際には、スキャナで加工スポット位置を回転させつつ、ワークの搭載されているステージを動作



第2図 超短パルスレーザーによる加工結果
Fig. 2 Machined hole produced with ultrashort pulse laser

させることによって加工を行うことが一般的であった。しかしながら上記の方法では、加工時間がかかり、加工精度もステージ精度に依存するため正確に加工することができない。第3図に上記の方法にてSUS304に加工した四角孔を示す。右上と左下の頂点部分にオーバーシュートが見られ、またスミRと呼ばれる各頂点の曲率半径も約15 µmと大きいということがわかる。



第3図 ステージ動作による加工結果
Fig. 3 Machining result with stage movement

そこで今回、より高精度でスミRの小さな多角形状の孔を加工するため、超短パルスレーザー加工用の多角形加工ソフトウェアの開発を行った。そのソフトウェアを使用し、φ100 µm程度のさまざまな多角形の孔加工を行い、レーザー波長を含めた加工条件の最適化およびその際の加工状態の調査を行った。

2. 実験内容

2.1 実験装置

今回の実験には、当社製の超短パルスレーザー加工機を使用した。この加工機的主要なスペックを第1表に示す。本装置にはスキャナとしてピエゾ駆動ミラーを採用している。これは、クローズドループのピエゾアクチュエータによりミラーを駆動させ、レーザー光の方向を制御する

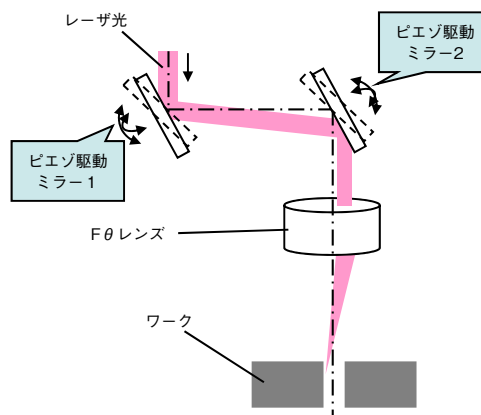
第1表 レーザ加工機のスペック

Table 1 Specifications of the laser milling machine

光学系仕様	集光レンズ	f100 mm fθレンズ
	スキャナ駆動方法	クローズドループ ピエゾ駆動
	最大加工孔径	500 µm
ステージ仕様	ストローク	X : 200 mm, Y : 200 mm, Z : 60 mm
	繰り返し位置決め精度	± 1 µm
	軸制御	Computerized Numerical Control (コンピュータ数値制御)

ものであり、自由度が高い動きを非常に高精度に行うことが可能である。ピエゾ駆動ミラーの構成を第4図に示す。このようにピエゾ駆動ミラーを2組使用することにより、加工点においてレーザーを傾け、ストレート形状の孔を加工することも可能である。筆者らのこれまでの実験ではφ100 µm以下のストレート孔を2000個加工し、孔径ばらつき±1.5 µm以下の精度で加工することも可能であった。

加工動作としては、XYステージにより位置決めを行い、孔の加工をピエゾ駆動ミラーによって行った。ワークは厚み100 µmのSUS304圧延材を使用した。

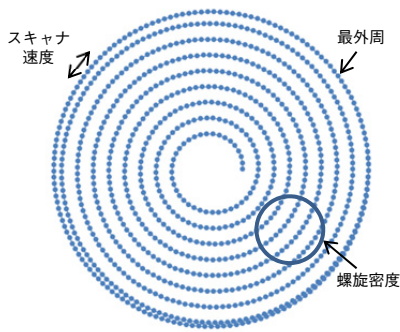


第4図 ピエゾ駆動ミラーの構成
Fig. 4 Configuration of piezo-actuated mirrors

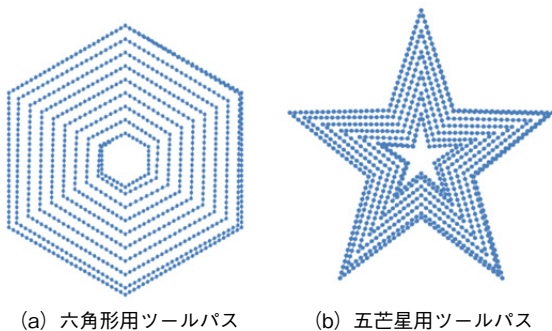
2.2 多角形加工ソフトウェアの開発

当社の従来の丸孔加工用ソフトウェアでは、レーザーをワーク表面に当てながらスキャナを螺旋状に動作させることで丸形状を加工している。ワーク上のレーザーの軌跡(ツールパス)は第5図のようになり、設定する主なパラメータは、「スキャナ速度」「螺旋密度」「最外径」の3つである。この3つのパラメータを操作することにより、孔の直径やエッジの品質を調整することが可能である。多角形加工用には、これに加えて「頂点数」というパラ

メータを定義した。その際、各頂点をショートカットすることがないように、必ずツールパスが頂点を通るようにスキャナ速度を自動的に微調整している。第6図 (a) に六角形のツールパスを示す。また、多角形の頂点はすべて中心を原点としたXY座標によって任意に設定することが可能となっている。これにより、正多角形だけでなく台形やひし形、第6図 (b) に示すような星型といったあらゆる形状のツールパスを作成することが可能である。



第5図 丸孔用ツールパス
Fig. 5 Toolpath for a round hole



第6図 多角形用ツールパス
Fig. 6 Toolpath for a polygonal holes

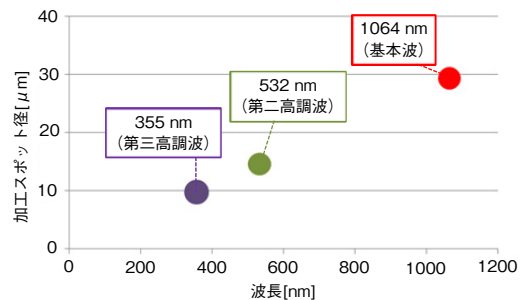
2.3 レーザ波長の選定

多角形や星型を加工する際、頂点の部分のスミRが大きいと形状が潰れてしまい、良好な加工形状を得ることができない。レーザ加工においてスミRを小さくするためには、加工スポット径（機械加工におけるドリル径に相当）をなるべく小さくすることが必要である。今回、φ100 μm程度の孔加工を行うことから、加工スポット径の目標はその1/10のφ10 μm以下に設定した。

加工スポット径d[μm]を求める式を式 (1) に示す[2].

$$d = 1.27 \frac{M^2 \lambda f}{D} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 M^2 : ビーム品質によるモード因子, λ : レーザ波長[nm], f : レンズ焦点距離[mm], D : 入射ビーム直径[1/e², mm]である。この式からわかるように、加工スポット径はレーザ波長に比例するため、波長が短い方がよりスミRの小さな加工を行うことができる。超短パルスレーザの波長は、1064 nm (基本波), 532 nm (第二高調波), 355 nm (第三高調波) の3つから選択できる。第7図に、式 (1) および加工機の設定から導かれるそれぞれの波長での加工スポット径を示す。加工スポット径が10 μm以下となるのは波長355 nmの場合なので、今回は波長355 nmの超短パルスレーザを使用することとした。



第7図 レーザ波長と加工スポット径
Fig. 7 Spot diameter as a function of laser wavelength

2.4 実験条件の設定

超短パルスレーザによる金属加工の場合、パルスフルエンス(レーザの1パルスが単位面積あたりに照射するエネルギー)が高すぎるとワークが溶解してしまい、高精度な加工が不可能となる。また、パルスフルエンスが低すぎても加工レートが低くなり好ましくないため、実際の加工には溶融しない最大のパルスフルエンスを使用することが望ましい。つまり加工を最適化するためには、加工対象となるワーク上にパルスフルエンスを変化させた加工を行い、溶融するパルスフルエンスの閾(しきい)値を見つけることが必要である。パルスフルエンスは、加工スポット径をd[mm]とすると、ガウシアンビームの定義[3]より式 (2) で表される。

$$\phi = \frac{0.865 E}{\pi (d/2)^2} \dots\dots\dots (2)$$

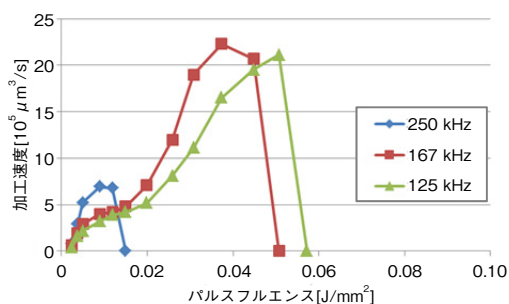
ここで、 ϕ : パルスフルエンス[J/mm²], E : パルスエネルギー[J]である。

また、実際の加工には、上記のパルスフルエンスに加えて「時間」の要素を考慮する必要がある。1パルスのみで加工を行うのであればパルスフルエンスのみを考慮すれば良いが、実際の加工ではパルスはパルス列としてワークに照射され、そのパルス列はスキャナを動作させることにより直線や曲線の軌跡をワーク上に描く。そのた

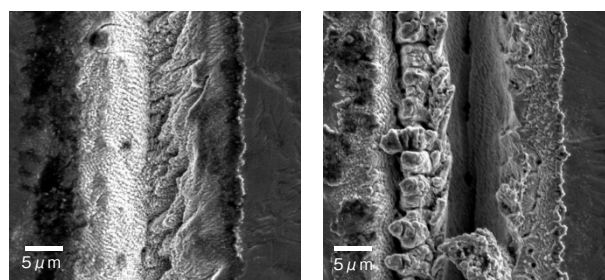
め、熱やプラズマ、加工屑（くず）の残留が発生し、パルスフルエンスのみでは加工条件を最適化することができない。一般的には熱やプラズマ、加工屑の残留を防ぐため、連続するパルス間の距離および時間は大きいほど加工結果は良くなるとされている。距離に関してはスキヤナの速度に依存し、スキヤナの速度は速い方がパルス間の距離を大きくすることができるが、スキヤナ速度を速くすると位置決め精度が低下する。時間に関しては発振器の周波数に依存し、周波数が低い方が加工状態は良くなるが、その分加工時間は長くなる。

そこで、今回はスキヤナの速度を固定し、ワーク表面にパルスフルエンスと発振周波数を変化させながら溝加工を行い、加工の状態と除去体積を測定することで、加工に最適なパルスフルエンスおよび発振周波数の設定を行った。

スキヤナ速度を10 mm/sに設定し、発振周波数を250 kHz, 167 kHz, 125 kHzの各設定でパルスフルエンスを変化させながらワーク表面に溝加工を行い、それを共焦点型レーザー顕微鏡で溝断面形状を測定した。また、測定された断面積とスキヤナ速度より加工速度を計算した。計算された加工速度とパルスフルエンス、発振周波数の関係を第8図に示す。最も加工速度が速い条件はパルスフルエンス0.035 J/mm²、周波数167 kHzであった。第9図(a)はその条件で加工された溝をSEMにて観察したものである。同じ周波数でもそれ以上のパルスフルエンスでは溶融によるバリの発生や、溶融したワークが凝固するなどの現象が発生し、正常に加工されなかった(第9図(b))。また、発振周波数250 kHzでは低いパルスフルエンスでも溶解が発生し、加工速度が遅く、発振周波数125 kHzでは167 kHzでの加工と比較して加工速度が遅かった。よって今回の実験はパルスフルエンス0.035 J/mm²、発振周波数167 kHzにて行うこととした。



第8図 パルスフルエンスと周波数、加工速度の関係
Fig. 8 Relationship between machining speed and pulse fluence for different frequencies



(a) 正常な加工状態 (b) 溶融の発生

第9図 溝加工の状態
Fig. 9 Result of trench forming

2.5 加工形状および評価方法

加工形状としては、丸孔と、正三～六角形孔、正五、六芒(ぼう)星孔の加工を行った。それぞれの加工はφ100 μmの丸孔を基準とし、加工体積が同じとなるようにツールパスの最外径(および内径)を設定して加工した。

加工の評価としては、「加工形状」「加工時間」「スミR」の3つの指標にて評価した

〔1〕加工形状およびスミRの評価方法

加工された孔の出口を、SEMにて、エッジの欠けや溶解がなく、所望の形状が加工されたかどうか評価した。また、多角形加工の各頂点の曲率半径の値をスミRとして評価した。ただし、レーザー加工において頂点部の曲率半径を求めるのは困難なため、各頂点に対する各辺の直線部の端から垂線を延ばし、中線までの距離をスミRと定義した。

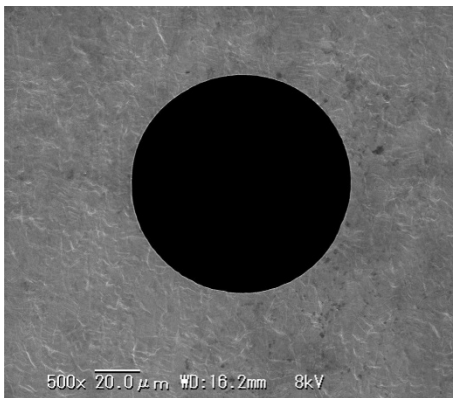
〔2〕加工時間の評価方法

スキヤナ速度10 mm/s、発振周波数167 kHz、パルスフルエンス0.035 J/mm²にて各形状の1孔を加工するのにかかった時間を加工時間として評価した。加工時間はツールパスの設定によって大きく変化するが、今回はツールパスの最外径を固定し、螺旋密度を徐々に上げていきながら加工を繰り返し、エッジが欠けなどなく加工できるようになった時点でのツールパスを使用した場合の加工にかかった時間をその孔の加工時間と定義した。

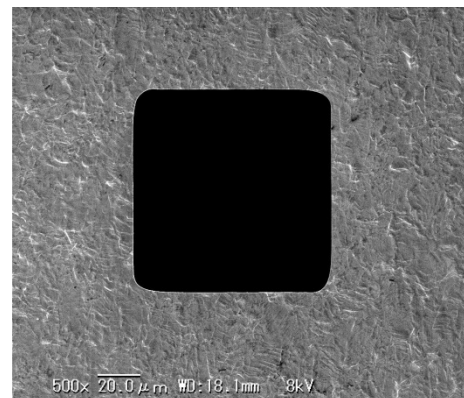
3. 実験結果

3.1 加工形状およびスミRの評価結果

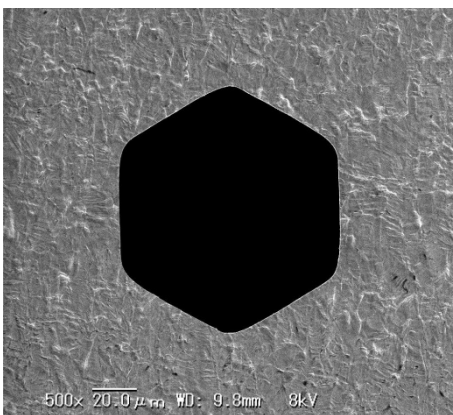
各形状の加工形状を第10図～第16図に示す。また、加工時間、スミRを第2表に示す。



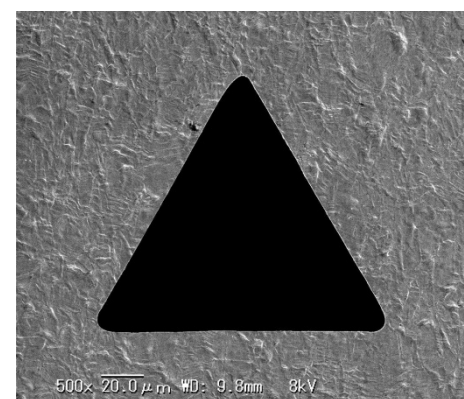
第10図 丸孔
Fig. 10 Round hole



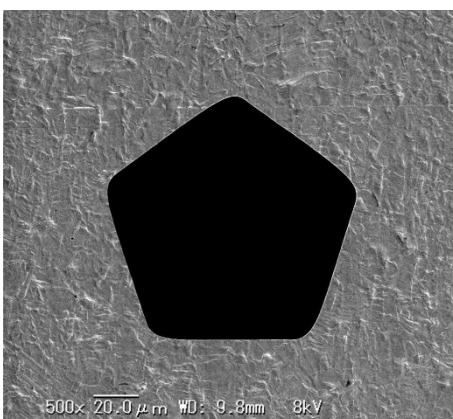
第13図 正方形孔
Fig. 13 Square hole



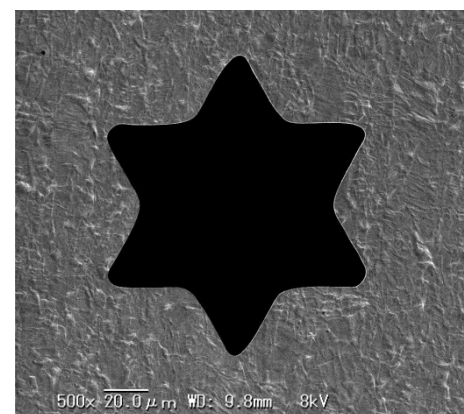
第11図 正六角形孔
Fig. 11 Hexagonal hole



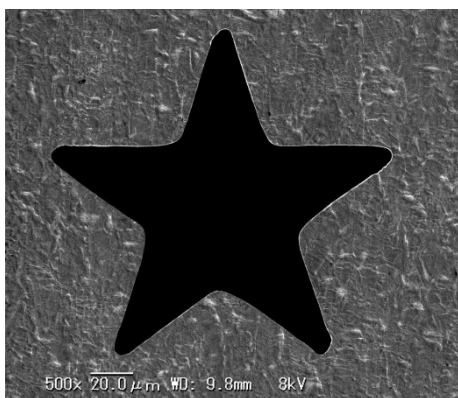
第14図 正三角形孔
Fig. 14 Triangular hole



第12図 正五角形孔
Fig. 12 Pentagonal hole



第15図 正六芒星孔
Fig. 15 Hexagram hole



第16図 正五芒星孔
Fig. 16 Pentagram hole

第2表 加工時間およびスミR
Table 2 Machining time and edge radius

	加工時間[秒]	スミR[μm]
丸孔	1.66	-
正六角形孔	1.97	6.2
正五角形孔	2.21	6.7
正方形孔	2.33	6.6
正三角形孔	2.40	5.1
正六芒星孔	2.81	5.8
正五芒星孔	3.90	4.8

すべての加工において、適切な螺旋密度を設定することにより、良好なエッジを観察することができた。また、スミRに関しては、式(2)にて求められた加工スポット径が約10 μmであり、その半径分の値(約5 μm)とほぼ等しい値となった。

3.2 加工時間の評価結果

2.4節で求めた体積加工速度から計算すると、φ100 μm、厚み100 μmの丸孔加工にかかる時間は0.35秒であるが、第2表に示す加工時間は、加工体積は同じであるにも関わらずそれよりすべて多く時間がかかっている。また、丸孔で一番加工時間が短く、多角形の角数が少なくなるほど加工時間が長くなっている。これは、2.4節で求めた体積加工速度が、深さの浅い溝を加工して求めた加工速度のため、ほぼ理想的な加工速度であったためであると考えられる。実際の孔加工では加工が深くなると加工屑やレーザーによって発生したプラズマなどがレーザーが加工面に到達することを妨げるため、理想的な加工時間よりも加工時間が多くかかる。そのため、丸孔の場合は計算の4.7倍程度加工時間がかかったと考えられる。また、同じ加工体積であるのにも関わらず多角形の角数が少ない方が加工時間が長くなる傾向を示している。これに関し

ては、角数が少ないほど各頂点は鋭角となるため、加工屑の排出が困難になり、より長い加工時間が必要となるためであると考えられる。これは、六芒星の加工よりも五芒星の加工に時間がかかっていることからわかる。

4. まとめ

波長355 nmの超短パルスレーザーと、今回開発された多角形加工ソフトにより、ステンレス材に対して丸、多角形、星型のさまざまな形状の微細孔を加工することが可能だということがわかった。加工時間に関しては、t100 μm、φ100 μmの丸孔を加工した場合、溝加工によって求められた計算上の加工時間よりも4.7倍程度必要である。また、加工時間は多角形の頂角数が少なくなるほど長く必要となるが、これは頂角部の加工屑の排出が影響していると考えられる。今後はこの技術を、さらに高スループット、高精度に加工を行えるように改良し、各種ノズル、マスクなどの加工に適用していく予定である。

参考文献

- [1] 新井武二, “レーザー穴あけ加工の特徴,” レーザ加工の基礎工学, 丸善出版(株), 東京, 2007, p224.
- [2] 新井武二, “回折限界,” レーザ加工の基礎工学, 丸善出版(株), 東京, 2007, p92.
- [3] 新井武二, “ビーム伝播の理論,” レーザ加工の基礎工学, 丸善出版(株), 東京, 2007, p80.

執筆者紹介



中奥 洋 Hiroshi Nakaoku
パナソニック プロダクションエンジニアリング(株)
Panasonic Production Engineering Co., Ltd.