レーザシェイピング特性の解析

—新しいレーザシェイピング光学系の開発とその応用 (第1報)—

丸尾 大**, 宮本 勇**

Analysis of Laser Beam Shaping Properties

—Development of Novel Laser Beam Shaping Optics and Its Applications to Materials Processing (Rept. 1)—

by Hiroshi Maruo** and Isamu Miyamoto**

A novel laser beam shaping optics was developed, which can provide high shaping efficiency and high absorptivity to base metal. The optics consists of two cylindrical lenses, a pair of flat mirrors and a spherical lens. Shaping properties in terms of intensity distribution and shaping efficiency were analyzed on the basis of the geometrical and the physical optics where spatical intensity distribution and angular reflectivity of complex refractive index were taken into consideration. CO₂ laser beam was shaped into a spot with uniform intensity distribution along y-axis with original intensity distribution along x-axis at variable aspect ratios, D_y/D_x , where D_x and D_y are spot size in the x- and y-axes, respectively. Shaping efficiency for different laser modes was determined as a function of angle ϕ between the polarization vector and the normal of the flat mirrors, and satisfactory agreement between experimental and theoretical values was obtained; negligible shaping loss was attained at $\phi=90$ degrees in contrast to 40% of shaping loss at $\phi=0$. Single CO₂ laser beam was demonstrated to be split into 19 beam spots by utilizing the interference of the laser beam; the number of the spot can be easily changed by changing the ratio of length and distance of the flat mirrors.

Key Words: CO₂ laser, shaping efficiency, reflectivity, linear-polarization, geometrical optics, physical optics, surface modification, beam splitting, interference

1. はじめに

レーザ表面改質¹⁻³⁾はオンラインで局所加工が可能であり、その優れた改質層の性質が注目を集めている。均質な表面改質層を得るには均一な矩形形状ビームが必要であり、これまでにレーザビームを分割・重畳してシェイピングするインテグレーションミラー⁴⁾、アキシコンレンズ⁵⁾、カライドスコープ⁶⁻⁸⁾などの光学系が開発されている。しかし、これらの光学系はシェイピング効率、ビーム形状・寸法の調整機能などの点で十分ではなく、またレーザビームのシェイピングに関しては系統的研究が極めて少ないのが現状である。

また、一般に表面改質にはYAG, CO₂などの赤外レーザが用いられるが、金属材料は赤外反射率が高いため⁹⁾、レーザ焼き入れなどでは反射防止コーティング^{10,11)}が必要である。そのためコーティングの形成・除去の両工程が必要であるばかりではなく、母材との反応物の生成、コーティング材からの放射スペクトルが表面温度測定を妨げるなど多くの問題があった。

上記の問題を克服するために著者らは直線偏光を用いる新しい表面改質用光学系を開発した。この光学系はシェイピング効率が従来の光学系よりも遥かに高い、表面コーティングがなくても金属材料の赤外レーザ吸収率が高い、ビームの形状・寸法が調整可能なため自由度の高い表面改質が可能である、レーザビームを多数のビームスポットに分割できるなど多くの特長がある。本報告ではCO₂レーザビームのシェイピング特性を幾何光学ならびに物理光学に基づいて理論解析する。

2. 強度分布の解析

2.1 光学系の構成とシェイピング原理

Fig. 1に示すように光学系は2枚のシリンドリカルレンズ、2枚の平面鏡、結像レンズで構成される。既存の光学系では2次元的に均一化されるが⁴⁻⁸⁾、多くの応用では移動熱源により表面改質するため移動方向と垂直な1次元の均一化のみで十分である。本光学系では平面鏡間の多重反射によりY方向分布を均一化し、かつレンズ2の位置によりX方向のビーム幅を変えることができる。平面鏡右端のビーム分布は球面レンズにより任意の倍率にて材料面に投影される。

本光学系では直線偏光レーザを用いてシェイピング効率ならびに材料の吸収率を同時に向上させるところに特徴がある。すなわち、平面鏡にはS偏光、傾斜材料にはP偏光となるよう光学系ならびに材料の方向を配置することによりシェイピング効率と材料の吸収率が同時に向

Fig. 1 Schematic diagram of novel laser beam shaping optics. Laser beam is homogenized at $z=L$ by reflections of flat mirrors, and is projected to specimen.

*原稿受付 平成5年9月1日 平成2年度秋季全国大会で発表

**正員 大阪大学 Member, Osaka University

Fig. 2 Schematic diagram of the optics drawn in (a) (y, z) and (b) (x, z) planes. Laser beam is reflected with s- and p-polarization at flat mirrors and specimen, respectively. Adjusting location of lens 2 changes spot size D_x .

上される (Fig. 2). このように直線偏光を利用し、形状可変のビームスポットが得られることから、本光学系を LSV 光学系 (Linear-Polarized Shape Variable Optics) と名付けた。

2.2 幾何光学による強度分布の解析

(a) 強度分布の一般式

光を分割・重畳すると干渉縞を生じるため、その分布の解析には波動光学が用いられる。しかし、金属材料のように干渉縞による加熱の不均一が熱拡散によって低減される場合や、エキシマ・YAG レーザ等の低コヒーレント光源を用いる場合には、ビーム分布は幾何光学により近似できる。任意の強度分布のビームが入射したとき、シェイピングビームの分布は、入射ビームの強度、レンズによるビームの屈折、反射率の入射角依存性ならびに偏光方位角の影響を考慮する必要があるため、極めて複雑な式になる。以下ではシェイピング分布を与える一般式を導出する。

Fig. 1 に示すように座標の原点をレンズ 1 の焦点面にとると、任意の強度分布 $w(\xi, \eta)$ のレーザビームが $z_1 = -f_1$, $z_2 = -b$ にあるレンズ 1 と 2 に入射する場合を考える。 $z = L$ 面においては、シリンドリカルレンズによってそれぞれ入射ビーム強度が、 f_1/L 倍、 $f_2/(L+b-f_2)$ 倍となるので、 (x, y) におけるビーム強度は次式で与えられる。

$$W_0(x, y) = \frac{f_1 f_2}{L(L+b-f_2)} w(\xi, \eta) \quad (1)$$

ただし、 $\xi = -f_2 x / (L - f_2 + b)$, $\eta = -f_1 y / L$, $f_{1,2}$ = レンズ 1, 2 の焦点距離, L = 平面鏡の長さ (正確にはレンズ 2 の焦点面から平面鏡右端までの距離) であり、レンズの収差、吸収、反射は無視している。平面鏡による反射の寄与を重畳すると反射鏡右端の強度は

$$W(x, y) = W_0(x, y) + \sum_{m=1}^{\infty} R^{2m} [W_0(x, 2md+y) + W_0(x, 2md-y)] + \sum_{m=1}^{\infty} R^{2m-1} [W_0(x, -(2m-1)d+y) + W_0(x, -(2m-1)d-y)] \quad (2)$$

となる (d = 反射鏡の間隔, m = 反射回数)。また、 R は平面鏡の反射率であり、次式で与えられる。

$$R = R_p \cdot \cos^2 \phi + R_s \cdot \sin^2 \phi \quad (3)$$

ϕ は角偏光方位角 (偏光ベクトルと反射鏡法線のなす角) である。また、 R_s , R_p はおのおの s 偏光 ($\phi = 90$ 度), p 偏光 ($\phi = 0$ 度) の反射率であり、入射角 θ の関数として

Fig. 3 Reflectivity of linear-polarized beam to mirror ($n=15$ and $k=40$) calculated as a function of incident angle θ .

次のように書ける¹³⁾。

$$R_s = \frac{(n - \cos \theta)^2 + k^2}{(n + \cos \theta)^2 + k^2} \quad (4)$$

$$R_p = \frac{\{(n^2 - k^2) \cos \theta - n\}^2 + k^2 (2n \cdot \cos \theta - 1)^2}{\{(n^2 - k^2) \cos \theta + n\}^2 + k^2 (2n \cdot \cos \theta + 1)^2} \quad (5)$$

ただし n = 屈折率, k = 減衰係数 (複素屈折率 $\tilde{n} = n + ik$) である。Fig. 3 に反射率の計算例を示す ($n=15$, $k=40$)。 R_s は θ によらず 1 に近い大きな値を有するが、 R_p は θ が $88 \sim 90$ 度の領域で約 50% にまで低下する。本光学系やカライドスコープでは、レーザビームの入射角度はこの低反射域に位置する。

いま幾何学的な関係から、 m 回反射したのち点 (x, y, L) を通るビームの平面鏡への入射角度 θ は

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\{L^2 + (x - x')^2\}^{1/2}}{|md \pm y|} \approx \tan^{-1} \frac{L}{|md \pm y|} \quad (6)$$

で与えられる。ただし、 x' は $z=0$ 面を光線が通る x 座標であり、 $L^2 \gg (x - x')^2$ としている。反射鏡右端における強度は Eq. (3)~(6) を Eq. (2) に代入することにより求められる。

(b) シェイピングビームの強度分布

以下では次式で与えられるガウス分布ビームが入射した場合のシェイピングビーム分布 $W(x, y, L)$ を計算する。

$$w(\xi, \eta) = \frac{W_{\text{las}}}{\pi a^2} \exp\left(-\frac{\xi^2 + \eta^2}{a^2}\right) \quad (7)$$

ただし W_{las} = レーザパワー, a = 定数 ($1/e^2$ 直径 = $2.83 \times a$) である。

Fig. 4 は、 $a = 5.65$ mm ($1/e^2$ 直径 = 16 mm), $d = 5$ mm, $f_1 = f_2 = 127$ mm, $n = 15$, $k = 40$, $\phi = 90$ 度の条件での種々の L に対する強度分布の計算例である。本計算では D_x が一定となるよう $f_2 - L - b = \text{一定}$ とし、全ビーム領域の分割数は 36000 とした。 L が短いと平面鏡での反射の寄与が小さいため y 方向の分布は中央部が高くなり、元の分布に近い楕円状の分布となる。 L が長くなると反射ビームの重畳効果により y 方向の分布は次第に平坦化される。ただし、 x 方向には反射ビームが重畳されないため、ガウス状の分布を維持した矩形ビームとなる。

Fig. 5 にはシェイピングビームの均一状況を知るため

Fig. 4 Intensity distribution in shaped beam spot calculated by geometrical optics (Gaussian beam with $a=5.65$ mm, $d=5$ mm, $f_1=f_2=127$ mm and $\phi=90$ degrees).

Fig. 5 Maximum and minimum intensity along the y-axis calculated as a function of L.

に y 軸上における $\phi=0$ と $\phi=90$ 度での最大値 $W_{\max}$ と最小値 $W_{\min}$ の値をプロットしている。ただし、 $W_{\max}=W(0, 0, L)$, $W_{\min}=W(0, d/2, L)$ は $\phi=90$ 度の $W(0, 0, \infty)$ で規格化している。破線は平面鏡が存在しない場合の $W_{\max}$ であり、L に逆比例する。 $\phi=90$ 度 (s 偏光: 鎖線) の場合、 $L < 50$ mm では $W_{\max}$ は L に逆比例して減少するが、 $L > 60$ mm では平面ビームの重畳効果により $W_{\max}$ は破線の値より大きくなる。更に L が長くなると $W_{\max}$ と $W_{\min}$ は急激に接近し、90 mm でほぼ均一と

Fig. 6 Calculated intensity distribution in shaped beam spot for various values of b.

なる。これに対して、反射率が低い $\phi=0$ (p 偏光: 実線) では反射ビームの重畳効果が小さいため、 $W_{\max}$ は一定値にはならず L と共に単調減少を続ける。また、同様の理由で $W_{\min}$ も $L=70 \sim 80$ mm でピーク値に達したのち減少に転ずる。その結果、均一分布 ($W_{\max} \approx W_{\min}$) となるのは $L \approx 140$ mm と $\phi=90$ 度より遥かに長くなり、 $W_{\max}$ も 70% 近くまで低下している。

一般に平面鏡での反射回数が多いほどより均一化される。反射回数は平面反射鏡のパラメータ (L/d) が大きく、入射ビームの F ナンバー (f_1/D) が小さいほど増大するが、幾何学的考察によると、反射回数の指標 N は両者の比の関数として次のように与えられる。

$$N = \frac{1}{2} \left(\frac{LD}{f_1 d} + 1 \right) \quad (8)$$

N の整数部分は直径 D のビームの反射回数であるが、小数部分も含めて N が大きいほど全ビームの反射回数が増大する。いま D を $1/e^2$ 直径とすると、 $\phi=90$ 度においては $N > 1.6$ でほぼ均一となるが、 $\phi=0$ では $N=2.1$ とより多くの反射が必要となる。

Fig. 6 は $\phi=90$ 度 ($L=115$ mm) において、レンズ 2 の位置を変えたときの平面鏡右端のシェイピングビームの分布を示す。このように D_y と独立に D_x が可変 (形状可変) であり、かつ結像倍率の選択によりサイズも可変である。これに対してカライドスコープではサイズのみが可変であり、インテグレーションミラーでは両者共に可変でないことを考えると、本光学系を用いると自由度の高い材料加熱¹⁴⁾が可能であることがわかる。

2.3 物理光学による解析

レーザー光の重畳による干渉縞の影響を知るには、物理光学による計算が必要である。以下では幾何光学的な分布をマクロ分布、物理光学による分布をミクロ分布呼ぶことにする。反射回数 m の鏡像光源の強度が $\int A_m \exp(-iks_m + m\pi)/i\lambda s_m d\eta$ で与えられるから¹³⁾、(x, y, L) におけるミクロ的な電場の強度は次の式で与えられる。

$$q(x, y, L) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \int \frac{A_m \exp(-iks_m + m\pi)}{i\lambda s_m} d\eta \quad (9)$$

ただし、 $s_m^2 = (md + \eta \pm y)^2 + (f_1 + L)^2$, $A_m^2 = f_1 R^{|m|} w(0, \eta)$, $k = 2\pi/\lambda$, λ = レーザ波長である。(0, y, L) におけるレーザー強度は $w = q \cdot q^*$ で与えられる (q^* は q の複素

Fig. 7 Interference patterns calculated along y-axis (Gaussian beam: $a=5.65$ mm, $f_1=127$ mm and $d=4$ mm).

共役).

Fig. 7 は $d=4$ mm での計算例である。x 軸方向には干渉縞を生じないので、y 軸上の分布のみを表示している。L が長くなるにつれて、マクロ分布の均一化に対応して干渉縞自体の高さの不揃いは解消される。ただし L が長くなると、マクロ的分布がより均一化するのとは逆に、ミクロ的には主干渉縞の間隔が $p=\lambda L/d$ と大きくなって不均一が増大することがわかる。Fig. 5 に示すように $\phi=90$ 度のとき $\phi=0$ よりも短い L でマクロ的に均一となることから、s 偏光を利用することによりシェイピング効率が上昇するだけでなく、ミクロ・マクロ両分布を均一化できることがわかる。ただし、L が大きいと主干渉縞の間に新たな干渉縞を生じてミクロ的不均一は幾分緩和されることを付記しておく。

3. 実験結果と考察

3.1 光学系の諸量

本実験には RF 放電励起する高速軸流タイプの連続発振 CO₂ レーザを用いたが、その最大定格出力は 3 kW (高次モード：直線偏光) である。本発振器では共振器中にアパーチャー (直径 20 mm) を挿入することにより低次モードのビームが得られる。Fig. 8 に低次と高次モードのバーンパターンを示す。低次モードはややトップハット傾向を示すがほぼガウス分布で近似でき、その $1/e^2$ 直径は約 16 mm である。また、多重モードは TEM₂₁* に近いがそれより外周リブが高く、その最大強度の $1/e^2$ となる直径は約 30 mm である。

レーザビームは 45 度折曲げ鏡で反射後にシェイピング用光学系に導入される。光学系を構成する 3 枚のレンズはいずれも焦点距離 127 mm (口径 50 mm) とし、金蒸着した 2 枚の銅ミラーを 5 mm の間隔で配置した。Fig. 5 によると $\phi=90$ 度では $N \approx 1.6$ ($D=16$ mm のとき $L=87$ mm) のとき低次モードの y 方向の分布はほぼ均一となるが、本実験ではレーザ光軸のミスマライメントの影響⁷⁾ も考慮して、 $N \approx 2$ ($L=115$ mm) とした。このとき多重モードではビーム直径が $D=30$ mm と大きいので、 $N \approx 3.2$ とさらに大きな値となる。

3.2 シェイピングビームの形状と分布

結像レンズ (レンズ 3) にて平面鏡の右端の分布を光

Fig. 8 Acrylic burn pattern of raw CO₂ laser beam. (a) low order and (b) multi-modes.

Fig. 9 Acrylic burn patterns of shaped beam spot for b: (a) 12 mm, (b) 16 mm, (c) 22 mm and (d) 28 mm (low order mode, $\phi=90$ degrees).

Fig. 10 Acrylic burn patterns of shaped beam spot for b: (a) 16 mm, (b) 22 mm, (c) 28 mm and (d) 32 mm (multi-mode: $\phi=90$ degrees).

軸に垂直に設置したアクリル試料に 3 倍に拡大投影し、シェイピングビームの分布を調べた。このとき結像レンズと試料の距離は $4 \times f_3$ となり、 $f_3=127$ mm のときこの値は 50 cm 以上と大きくなるので、加工部からヒュームやスパッタリングを生じる場合には有利である。また、この条件下では本実験に用いた結像レンズの口径 50 mm は十分大きく、平行平面鏡を出射したレーザビームは全て受光できる。レンズ 2 の位置を種々変えたときの、低次ならびに高次モードでのシェイピングビームを Fig. 9, 10 に示す。両モード共に間隔約 0.75 mm の干渉

Fig. 11 Intensity distribution of (a) raw and (b) shaped beams.

縞が認められるが、その値は2光源間の干渉縞の間隔 $p = 3 \times (\lambda L/d)$ とほぼ一致している。干渉縞によるミクロ的不均一を除くと、x方向のサイズ D_x は可変であり、y方向の分布は両端が切り立った極めて均一なビームであることがわかる。

低次モードにおいては、x方向の分布はFig. 6に比べて中央部がやや平坦となっているが、これは入射ビーム分布がトップハット気味であることを反映している。高次モードではy方向に伸びる稜線とx方向に強度のうねりを生じる。

高次モードについてもシェイピング分布の計算を行った。Fig. 8(b)の分布は複雑で数式化が困難であるが、Fig. 11(a)に示すように TEM_{01} の外周に重みを加えた分布で近似した。また、シェイピングビームの計算値をFig. 11(b)に示すが、実験値とほぼ一致しており、ねじれた稜線も認められる。詳細にみると計算値のほうがいくぶん凹凸が大きい。入射ビーム分布 $w(\xi, \eta)$ により現実に近い値を用いることにより差異は解消されるものと思われる。この程度のx方向のマクロ的うねりやy方向のミクロ的不均一があっても、レーザ焼き入れ等においては局所溶融等を生じないことを確認しているが、その詳細については次報¹⁴⁾にゆずる。

3.3 シェイピング効率

レーザビームをシェイピングするとき、入射ビームを光学系に導く45度折曲げ鏡、3枚のレンズ、平面反射鏡での損失が考えられる。本実験では45度折曲げ鏡と3枚のレンズでは約4~5%の吸収損失が認められたが、これらによる損失はより新しい光学部品を用いることにより1~2%程度にできるためあまり重要ではない。入射角 θ が大きいとき、Fig. 3に示すようにレーザビームの偏光状況が反射率に大きな影響を与えるため、平面反射鏡でのシェイピング効率が最も重要である。以下では偏光性質が平面反射鏡でのシェイピング効率に与える影響を解析することにする。

平面鏡のシェイピング効率を評価するにあたって、その反射率を測定した。連続出力約10 Wの直線偏光の CO_2 レーザを45度の入射角で照射したとき、 $R_s = 98\%$ 、 $R_p = 96\%$ が測定された。この値は文献値¹⁵⁾に比べていくぶん低い。ほこりや水滴の付着によるものと考えられる。これらの値より $n=15$ 、 $k=40$ とした。

いま、 W_{las} のレーザパワーが入射したとき、シェイピング効率 η はEq. (2)の $W(x, y, L)$ の全領域にわたる積

Fig. 12 Shaping efficiency plotted against ϕ . Solid and dotted lines show calculated values for low order and multi modes, respectively.

分値との比より求められる。

$$\eta = \frac{1}{W_{las}} \int_{-d/2}^{d/2} \int_{-\infty}^{\infty} W(x, y, L) dx dy \quad (10)$$

Fig. 12の実線ならびに破線は両モードに対するシェイピング効率 η の計算値である。偏光方位各 ϕ が90度(s偏光)のとき、平面鏡での効率はほぼ100%となる。 ϕ が増大するとp偏光成分が増大するため効率は次第に低下し、 $\phi=0$ の効率は低次モードで約78%、高次モードで約65%と小さくなる。高次モードの方が効率が低いのは反射回数が多いためである。本光学系でランダム偏光または円偏光を用いた場合やカライドスコープの場合には、 $\phi=45$ 度に相当し、低次モードで約88%、多重モードで約80%となる。

平面反射鏡の入り口と出口でレーザパワーを実測し、その比より偏光方位角 ϕ に対するシェイピング効率を求めた。Fig. 12のプロット点はシェイピング効率の実験値を示すが、その傾向は計算値とよく一致している。ただしその絶対値は実験値の方がやや効率が低い。これは入射ビーム直径の測定誤差や発振ビームが完全な直線偏光でないことなどが原因と考えられる。

3.4 ビームの分割

レーザビームの分割には通常ハーフミラーが用いられる。しかし、分割数が多いときには、多数のハーフミラーが必要であり¹⁶⁾、個々のミラーの透過率のばらつきも問題となる。これに対して本光学系を用いると、容易に多数のビームを分割することができる。

Fig. 13(a)は物理光学により計算した強度分布で、波長 λ のレーザビームに対しては距離 d 離れた2光源による干渉縞のピッチが $\lambda L'/d$ で与えられるので¹³⁾、分割数は次式で与えられる。

$$N_{spot} = \frac{d^2}{\lambda L'} \quad (11)$$

ただし、 L' はレンズ1の集光位置と平面鏡右端の距離、 d は反射鏡の間隔である。この場合、各鏡像光源の組からの干渉縞間隔が一致するようにレンズ1の焦点位置を左に移動し、 $L'=124.1$ mmとしている。Fig. 13(b)は同上の

Fig. 13 Splitting of laser beam. (a) Calculated and (b) experimentals for low order mode at $\phi=90$ degrees ($L=124.1$ mm and $d=5$ mm).

条件下で分割した例で、ほとんど分離した19個のビームを得ることができた。分割数は d または L' を変えることにより任意の値に選ぶことができる。

4. 結 言

直線偏光を利用する形状可変の新しい光学系を開発し、 CO_2 レーザビームのシェイピングに適用した。また幾何光学ならびに物理光学により、シェイピングビームの分布ならびに効率を理論解析した。得られた主な結論は以下に示す。

(1) 本光学系において1方向に均一で、これに垂直方向のサイズが連続可変のビームを得ることができ、また直線偏光を用いることにより高効率のシェイピングを実

現した。

(2) 任意のモード・偏光状態を有するレーザビームのシェイピングにおいて反射鏡の入射角、偏光方位角を考慮した強度分布、効率を与える理論式を導いた。実験値は計算値とよく一致した。

(3) 本光学系によりレーザビームを多数のスポットに分割することができ、その分割数を容易に変更できる。

謝 辞

本光学系の試作ならびに実験に際しては榊日平トヤマ研究所堀口幸弘氏に多大の協力を賜った。記して深謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 丸尾, 宮本, 石出, 荒田: 溶接学会誌, 50-2 (1981) 208.
- 2) J.E. Miller and J.A. Wineman: Metal Progress, May (1977) 33.
- 3) M. Kawasaki et al: Proc. 24th ISATA, Paper No. 921052 (1992) 293.
- 4) 中谷, 菱井, 星之内: 昭和60年精密機械学会春季大会学術講演論文集 (1985) 129.
- 5) G. Sharman et al: Proceeding of International Congress on Laser Advanced Materials Processing (1987) 625.
- 6) R.E. Grojean: Review of Scientific Instrumentation, 51 (1980) 375.
- 7) I. Miyamoto and H. Maruo: Proc. 7th Int. Symp. GCL, SPIE Vol. 1031 (1988) 512.
- 8) 石出ら: 第25回レーザ熱加工研究会論文集 (1991) 189.
- 9) J.F. Ready: Industrial Applications of Lasers, Academic Press (1978) 341.
- 10) F. Dausinger: Proceedings of Int. Conf. LAMP'87 (1992) 697.
- 11) Y. Arata and I. Miyamoto: Trans. Japan Weld. Society, 3-1 (1972) 1.
- 12) F. Dausinger and T. Rudraff: Proceedings of International Congress on Laser Advance Materials Processing (1987) 323.
- 13) M. Born and E. Wolf: Principles of Optics, Pergamon Press (1974).
- 14) 丸尾, 宮本: 溶接学会論文集 (投稿中).
- 15) M.A. Ordal et al: Applied Optics, 22-7 (1983) 1099.
- 16) 田中: 第23回レーザ熱加工研究会論文集 (1990) 193.