レーザーオリジナル

リングモード 5 kW CO₂ レーザーの溶接性能

高浜 亨*・森安雅治*・深田 篤*・平本誠剛*
星之内進*・大峯 恩*・名井康人**

(1984年12月4日 受理)

Welding Characteristics of Ring Mode 5kW CO₂ Laser

Toru TAKAHAMA*, Masaharu MORIYASU*, Atsushi FUKADA*, Seigo HIRAMOTO*,
Susumu HOSHINOUCHI*, Megumi OHMINE* and Yasuhito MYOI**

(Received December 4, 1984)

The focusing characteristics of ring mode CO₂ laser beam have been analyzed by using the diffraction theory. Then the influence of the focusing performance, the beam power and welding speed on the penetration depth have been investigated with the 5 kW CO₂ laser.

It has been demonstrated experimentally that the welding performance depend on both the magnetification factor and F number especially under the high speed conditions.

The bead-transition phenomena according to changing the focusing position can be evaluated by the parameter $(Wd-f)/F$ (Wd is work distance and f is focal length).

1. 緒 言

わが国における大出力CO₂レーザーの開発は加速度的に進められ、本年度初めには連続出力26.5kWの取出し成功が報道されるに至っている。このような状況下で、すでに出力5kWまでの加工用CO₂レーザーが製品化され、付加価値の高い加工手段として鉄鋼プロセスラインでの板継溶接などに実用化され始めている¹⁾。

大出力レーザー溶接に関しては、溶融現象に関する優れた研究^{2,3)}が報告されているが、これら現在までの研究では、主として安定型共振器から取り出したマルチモードビームが用いられている。

ところが、5kW以上の大出力CO₂レーザー用の共振器としては、長時間にわたって安定したビーム品質と出力を確保するために、耐光強度が弱い半透過鏡を使用しない不安定型共振器が

* 三菱電機株式会社生産技術研究所 (〒661 尼崎市塚口本町8丁目1-1)

** 同 応用機器研究所 (同)

* Manufacturing Development Laboratory, Mitsubishi Electric Corporation (1-1, Tukaguchi-honmachi 8-chome, Amagasaki, 661)

** Mitsubishi Electric Corporation, Product Development Laboratory (1-1, Tsukaguchi-honmachi 8-chome, Amagasaki, 661)

採用される傾向にある。そのために、この不安定型共振器から取り出したリングモードビームの集光特性および溶接性能の解析が重要な課題となっている。

著者らは、大出力CO₂レーザーによる溶接技術の確立を目的として、リングモードCO₂レーザーの溶接性能に関する検討を進めている。

この報告は、不安定型共振器を用いたCO₂レーザー発振器から取り出したリングモードCO₂レーザービームの集光特性の解析結果と溶接性能におよぼすビームモード、出力、溶接速度の影響についてまとめたものである。

2. 実験装置および方法

2.1 実験装置

実験には Fig.1 に示す三菱電機製CO₂レーザー発振器ML-50Rを使用した。この発振器は、三軸直交型で Fig.2 に示す交流無声放電を補助とした直流グロー放電励起法 (Silent-Discharge Assisted Glow Dis. Excitation—SAGE方式) が採用され、共振器は Fig.3 に示す不安定型共

振器が用いられている。共振器から取り出されるリングモードビームの拡大率 M (ビーム外径 b とビーム内径 a との比 b/a) は、共振器を構成する光学素子を変更することにより変えることができ、今回は $M1.5$ と $M2.0$ について検討した。

溶接実験に際しては、ビーム集光とシールドガス噴出の機能を有する Fig.4 に示す構造の加工ヘッドを用いた。集光レンズの材質は、大出力レーザーによる熱歪や損傷の少ないKClを採用し、レンズの焦点距離は公称250mmと400mmの2種類を用いた。また集光レンズへの入射ビーム直径は70mmに固定した。

2.2 実験方法

溶接実験は、供試材料として板厚20mmの溶接構造用圧延鋼材SM41Bを使用し、ビードオンプレートで行なった。供試材料の組成を Table I に示す。

大出力レーザー溶接では、溶接部に発生するプラズマの制御をしないとプラズマにビームが吸収され溶接性能の低下をきたすことが知られ

Fig.1 5kW CO₂ laser oscillator.

Fig.2 Silent-Discharge assisted glow discharge excitation for 5kW CO₂ laser.

Fig.3 Schematic structure of unstable resonator.

Fig.4 Schematic drawing of CO₂ laser processing head.

Table I. Chemical composition of SM41B.
(wt.%, ladle)

	C	Si	Mn	P	S
SM41B	0.13	0.23	0.87	0.026	0.016

ているので、Fig.5に示す方法および条件で溶接部後方からガスを吹き付けてプラズマ制御を行なった。センターノズルからのシールドガス、プラズマ制御用ガスともに、プラズマの発生抑制と除去の效果に優れたHeガスをを用いた。なお、Fig.6に示すレンズ-試験片間距離Wdを変化させて試験片とビーム焦点との相対位置を変えて行なう実験については、プラズマ制御効果がばらつくことが考えられるので、プラズマ制御は行なわなかった。

また、レンズの実際の焦点距離fは、ワークディスタンスWdを0.5mm間隔で変化させ出力

Fig.5 Plasma control by side gas jet.

Fig.6 Definition for Wd, f and 2d.

500W、溶接速度10m/minでSUS304板にビードオンプレートを施したときのプラズマの輝度が最高となるWdとした。

3. リングモードビームの集光特性の解析

リングモードビームに対しては無収差集光系かつ入射ビームが平面波の場合しか理論で取扱うことが困難であるので、本研究では回折理論のみを用いて集光特性の解析を行うことにした。

3.1 焦点面における強度分布とビーム径

Fig.7に示すように光軸方向におけるレンズからの距離をzとし、これと直角方向の光軸からの距離をRとする。入射ビームを平面波と仮定すると、各(z, R)点における強度分布は回折理論により、次式で表わされる⁴⁾。

$$I = \left(\frac{kd^2}{z} \right)^2 \left| \int_0^1 A(\rho) J_0(s\rho) \exp\left(-i \cdot \frac{u\rho^2}{2}\right) \rho d\rho \right|^2 \quad (1)$$

ここで、

d ; 集光レンズへの入射ビーム半径

A(ρ) ; 入射ビームの電界振幅

J₀(sρ) ; 0次のベッセル関数

k = 2π/λ (λ ; ビームの波長10.6μm)

$$u = kd^2 \left(\frac{1}{f} - \frac{1}{z} \right) \quad (2)$$

Fig.7 Definition of coordinate axis for the analysis of focusing characteristics.

Fig.8 Radial intensity distribution of ring mode beam on focal plane.

$$s = kd \frac{R}{z} \quad (3)$$

である。

焦点面上でのビーム強度分布は、式(1)において $z=f$ の時に得られる。一例としてレーザー出力 5 kW, 焦点距離 250mm, 入射ビーム直径 70mm, $M=1.5$ と 2 の場合の計算結果を Fig. 8 に示す。焦点面における径方向のビーム強度は光軸を中心とする減衰振動分布を示す。

また、ピーク強度 I_0 は次式で表現される。

$$I_0 = \frac{W_{in} \pi}{4 \lambda^2 F^2} \left(1 - \frac{1}{M^2} \right) \quad (4)$$

ここで、 W_{in} ; レーザー出力, $F=f/2d$

光軸から距離 R までに含まれる出力の全出力に対する割合 E を求めた結果を Fig. 9 に示す。なお Fig. 9 の横軸としては式(3)に示した無時限化されたパラメータ s も併記した。ここでリングモードビームのビーム径を全レーザー出力の 84% を含む s の値と定義すると、焦点面でのスポット半径 R_0 は、

$M=1.5$ の場合

$$R_0 = 1.88 \frac{\lambda f}{d} = 3.76 \lambda F$$

Fig.9 Power ratio within radius R to total power as a function of R , f and d on focal plane.

$M=2.0$ の場合

$$R_0 = 1.29 \frac{\lambda f}{d} = 2.58 \lambda F \text{ となる。}$$

R_0 は F に比例し、 M の増加とともに減る傾向を示す。

3.2 集光ビームの焦点深度

ここで集光ビームのスポット半径が焦点面でのスポット半径 R_0 の $\sqrt{2}$ 倍になる点の、焦点面からの距離の 2 倍を焦点深度 l_f と定義する。焦点面近傍においては、式(2)は次のように近似される。

$$u = kd^2 \left(\frac{1}{f} - \frac{1}{z} \right) \approx kd^2 \frac{z-f}{f^2}$$

従って l_f は

$$\begin{aligned} l_f &= |z-f| \\ &= \frac{u}{k \left(\frac{f}{d} \right)^2} \\ &= \frac{2 \lambda u}{\pi} F^2 \end{aligned}$$

回折理論によれば焦点深度は F^2 に比例する。

4. リングモードビームの溶接性能

4.1 焦点位置の影響と最適焦点位置

溶接速度を 1 m/min に固定し、各集光および出力条件下における焦点はずし量 $Wd-f$ (Fig. 6 参照) の変化に対する溶込み深さ h_p の変化を

調べた。Fig. 10(a), (b)にその結果を示す。低次モードビームに対しては、急峻な溶込み変化

Fig. 10 Relation between out of focus $Wd-f$ and penetration depth h_p .

曲線を示すことがすでに報告されている³⁾が、リングモードビームの場合においても同様に溶込み深さが急変する。Fig. 10(a)は F を3.6に固定して M の影響を調べたもので、 M が大きいほど深い溶込みが得られる。しかし、深溶込み幅（最大溶込みに対して、その減少量が1 mm以下の深溶込みの得られる領域幅）に関しては、 M 1.5と M 2.0とでは顕著な差は認められない。またFig. 10(b)は M 2.0に固定して F の影響について調べた結果である。 F が小さいほど溶込み深さは大きく、深溶込み幅が小さくなっている。

以上の実験結果から、溶込み深さ h_p に対しては M と F が、深溶込み幅に関しては F がそれぞれ支配因子であることがわかる。本項では深溶込み幅について検討し、溶込み深さ h_p に関しては次項で述べる。

Fig. 11(a), (b)は、深溶込み幅と F の関係を検討するため、それぞれパラメータ $(Wd-f)/F$ および $(Wd-f)/F^2$ で h_p を整理したものである。低次モードビームの場合の結果³⁾と同様に異なる F に対しては深溶込み幅は、パラメータ $(Wd-f)/F$ でほぼ一義的に整理でき、最大溶込み深さが得られる最適焦点位置は、 $v=1$ m/minのとき $(Wd-f)/F \approx -1.5$ mm程度であった。なお、最適焦点位置は低次モードビームの場合の結果³⁾と異なるが、これは焦点位置の特定方法に起因しているものと考えられる。

すなわち、深溶込み幅は F^2 に比例する焦点深度 l_f だけでは整理できないことになり、 l_f とあわせて溶込み深さに対するエネルギー密度の影響を考慮する必要があるものと推察される。

4.2 溶込み性能

焦点位置を前項で得た最適焦点位置 $(Wd-f)/F = -1.5$ mmに固定し、Fig. 5に示したプラズマ制御を行ってビードオンプレートを実施してリングモードビームの溶込み性能について検討した。実験結果をFig. 12, 13, 14, 15に示す。

溶込み性能は、Fig. 12に示すようにビーム集光特性を規定する M に依存し、 M が大きい方が全体として溶込み深さは大きくなっている。し

Fig.11 Relationship among parameter $(Wd-f)/F$ (a), parameter $(Wd-f)/F^2$ (b) and bead-transition.

かし、低出力もしくは高速度条件下ほどこの傾向が顕著で、大出力かつ低速度になるとこの差が小さくなる傾向が見られる。これは、低出力もしくは高速度条件下では溶込み深さが主としてビーム強度 I_0 によって決まるのに対して、大出力かつ低速度条件下ではビーム照射部に形成されるキャビティの寸法が大きくなるためにビーム強度 I_0 に加えて出力の影響が顕著になるためであると考えられる。

一方、 F に対してはFig.14に示すように今回実験した範囲では、 F の小さい方が出力や速度に関係なく h_p は大きくなっており、大出力かつ低速度条件下においても明らかに差が見られる。

ここで、各集光条件におけるビーム強度 I_0 を(4)式を用いて比較すると、 $M1.5$ は $M2.0$ の場合の0.74倍であるのに対して $F5.7$ は $F3.6$ の場合

Fig.12 Influence of magnification factor M upon penetration depth h_p .

Fig.13 Influence of F number upon penetration depth.

の0.4倍となり、 F を変えることによってビームのエネルギー密度が極端に低くなっていることがわかる。このため、大出力かつ低速度条件下においても、 F によって溶込み深さが変化するものと考えられる。

以上の結果より、高速溶接では M が大きく F が小さい方が深い溶込みが得られ有利であるが、厚板の溶接においては M と F の最適化を図ることが重要であると推察される。

Fig. 14に溶込み形状の一例として $M1.5$ 、 $F3.6$ の場合の各出力および速度でのビード断面写真を示す。また、一般に溶込み深さ h_p と出力 P および溶接速度 v との間には、

$$h_p \propto P^\alpha \cdot v^\beta$$

の関係があり、 α および β の値は M や F および焦点位置に依存する。たとえば、 $M2.0$ 、 $F3.6$ ($Wd-f)/F=-1.5\text{mm}$ の場合にはFig. 15(a), (b)のグラフの傾きより、 P が1～5 kW、 v が1～15 m/min (1.7～13.3 cm/sec)の範囲で、 $\alpha=0.8$ 、 $\beta=-0.5$ 程度である。ちなみに、 α は M および

Fig. 14 Cross section of welds for $M1.5$ and $F3.6$.

Fig. 15 Welding performance for $M2.0$ and $F3.6$.

F に依存し0.6~0.8程度、 β はほとんど変化せず-0.5程度の値である。またこの結果は低次モードビームの場合の検討結果^{5,6)}とほぼ一致している。

5. 結 論

不安定型共振器を用いたCO₂レーザー発振器ら取り出したリングモードビームの集光特性の解析および溶接性能に関する検討を行ない。以下に示す結果を得た。なお、リングモードビーム固有のパラメータの拡大率 M に関するもの以外は、ガウスビームや低次モードビームの場合についても同様である。

(1) リングモードビームの集光特性を規定する因子は、 F 値と拡大率 M の2つである。

M が同じ場合、焦点面における光軸上のビーム強度 I_0 は $1/F^2$ に、焦点面におけるビームスポット半径 R_0 は F に、または焦点深度 l_f は F^2 にそれぞれ比例する。

また、 F が同じ場合、 I_0 は $1-(1/M^2)$ に比例し、 R_0 および l_f は M の増加とともに減少する傾向を示す。

(2) リングモードビームの溶接性能は、ビームの集光特性を規定する M および F に依存し、 M は大きいほど、逆に F は今回実験した範囲では小さいほど溶込み深さが大きくなる。この傾向

は、低出力もしくは高速度条件ほど顕著である。

(3) CO₂レーザー溶接において、溶込み深さを決定する主因子はビーム強度 I_0 に代表されるビームのエネルギー密度であり、大出力かつ低速度条件下では、これに加えて出力の影響が強くなる。

(4) 高速溶接では、 M が大きく F が小さい方が深い溶込みが得られ有利であるが、厚板の溶接においては、 M と F との最適な組合せがあり、この最適化を図ることが重要であると推察される。

(5) 深溶込みが得られる焦点位置の領域幅は、異なる F に対してパラメータ $(Wd-f)/F$ でほぼ一義的に整理できる。

参 考 文 献

- 1) A. Uomori, M. Matsunaga and S. Hoshinouchi: I.I.W. Doc. No. IV-375-84, (1984).
- 2) I. Miyamoto, H. Maruo and Y. Arata: Proceedings of International Conference on Welding Research in the 1980's, (1980), 103.
- 3) K. Inoue, J. Miyata and Y. Arata: Trans. J.W.R.I. 10 No. 2 (1981) 13.
- 4) M. Born and E. Wolf, 横田, 草川訳; 光学の原理 II, 568.
- 5) 水溜, 杉山, 高石, 中山, 佐野: 溶接学会全国大会講演概要, 31 (1982) 146.
- 6) 丸尾, 宮本, 川端, 荒田: 溶接学会誌, 50 (1981) No. 4, 404.