レーザ誘起プルームによるレーザの減衰と焦点シフト*

宮崎 康信**, 片山 聖二***

Power attenuation and focus shift of solid state laser beam caused by laser induced plume*

by MIYAZAKI Yasunobu** and KATAYAMA Seiji***

Currently, remote laser welding using a solid-state laser is widespread in the industry. Meanwhile, it is well-known that laser-induced plume blown up from the processing point affects the penetration in laser welding, through the attenuation and the refraction of the laser beam. These phenomena in carbon dioxide laser welding have been investigated well and it is widely recognized that using the shielding gas flow to blow away the laser-induced plume is very important. However, at remote laser welding, it is not easy to maintain the shielding gas flow to processing point. By the way these phenomena depend on the wavelength of the laser. So, the quantitative knowledge of the attenuation and the refraction of the solid state laser beam are necessary in achieving a stable penetration in remote laser welding with this laser.

This study was made to determine the attenuation coefficient and the amount of the effective focus shift caused by refraction of the laser beam in the plume, through the melt run experiments with YAG laser. The attenuation coefficient of the laser beam was estimated to be 0.00090 mm^{-1} , from the dependence of the cross-sectional area of weld metal on the laser power and the plume length. This value is about one twentieth of the attenuation coefficient of the carbon dioxide laser beam at welding, found in the literature. The amount of focus shift was estimated to be 0.67 mm per 100 mm length plume, from the dependency of penetration depth on the defocusing distance and the plume length. Comparing the 3 mm plume of length, this value is centesimal of the estimated value by Beck et al in CO_2 laser welding. Therefore, the solid-state laser like YAG laser is considered to be suitable laser source for remote laser welding.

Key Words: Power attenuation, focus shift, solid state laser, laser-induced plume, remote laser welding, solid-state laser, refraction, attenuation coefficient, YAG laser, CO_2 laser

1. 諸 言

レーザ溶接時に加工点から吹き上がるレーザ誘起プルームはレーザ出力の減衰とビームの屈折を通して、溶込み能力に影響を及ぼす。リモートレーザ溶接では、加工点を狙ってシールドガスを常時吹き付けることは容易ではない。このためプルームによる出力の減衰やビームの屈折程度を定量的に把握することは、リモートレーザ溶接において安定した溶込みを実現する上で有益である。

出力の減衰や焦点シフト現象はレーザの波長によって発生する機構が異なる。炭酸ガスレーザ溶接における出力の減衰は、プラズマプルーム中でのレーザ光の逆制動輻射によって生じる。例えば、宮本ら¹⁾は、軟鋼板 (SPCC, 板厚 0.8 mm) を 2.5 kW の炭酸ガスレーザで溶接した場合の減衰係数 (吸収係数) を 0.024 mm^{-1} と見積もっている。従っ

て、溶接中に試料表面に生じる 0.5 mm 高さの高温プラズマ中でレーザ出力は約 1.2% 減衰することになる。一方、Poueyo-Verwaerde ら²⁾は、 1 kW および 15 kW での溶接時の減衰係数を 0.035 mm^{-1} と見積もっている。そしてプラズマ全体での出力の減衰率をそれぞれ $8\% \pm 5\%$, $20\% \pm 10\%$ と計算している。また、電子密度の勾配により屈折率に勾配が生じ²⁾, レーザ光の強度分布が変化する。出力の最大値が He ガスシールドの場合 20% 減, Ar ガスシールドでは 10% の 1 になると見積もっている。このことから, Ar ガスシールドを用いた炭酸ガスレーザ溶接において, プルームが成長して溶込みがなくなる主な理由は, プラズマ中でのビームの屈折による加工点での出力密度の低下であるとしている。

YAG レーザ, ディスクレーザやファイバレーザなど加工用の固体レーザの波長は約 $1\text{ }\mu\text{m}$ であり, 炭酸ガスレーザの波長の 10% の 1 である。逆制動輻射, あるいは free-free absorption によるレーザ光の吸収は, 波長の $2\sim 3$ 乗に比例する³⁾。このため逆制動輻射による固体レーザビームの吸収はごく小さい。一方, レーザ誘起プルーム中の超微粒子によるレイリー散乱に起因する出力の減衰現象が指摘されてきた^{3, 4)}。出力減衰の定量的な値として, 川人ら⁵⁾は加工中に形成されたレーザ誘起プルームの側方からファイバレーザを透過させた実験より, $3\sim 4.3\%$ という値を報告している。また, 大家ら⁶⁾は厚さ $80\text{ }\mu\text{m}$ の SUS304 箔を透過したレ

*受付日 平成26年5月20日 受理日 平成26年8月18日 平成24年度春季全国大会で発表, 平成25年度春季全国大会で発表

**正 員 新日鐵住金株式会社 Member, Steel Research Laboratories, Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation

***正 員 大阪大学 Member, Joining and Welding Research Institute (JWRI), Osaka University

ーザ出力の焦点位置依存性から、ブルームにより $11\mu\text{m}$ の焦点シフトが生じたことを報告している。水谷ら⁷⁾は、屈折が高温に加熱された大気密度勾配によっても引き起こされることを報告している。筆者らは前報⁸⁾において、ブルームによる出力の減衰量と焦点シフト量を報告した。すなわち長さ 90 mm のブルームにより長さ 11 mm のブルームに比較して 7% の出力の減衰と集光レンズから離れる方向に 0.7 mm の焦点シフトが生じることを報告した。大岩らは、固体レーザーによる溶接中のブルームをファンによって吹き流せば溶込みが回復することを指摘している⁹⁾。しかし鋼板を支持する治工具のために鋼板表面で十分な風速が得られないこともありうる。そこで本研究では、固体レーザーにおける出力の減衰係数(散乱係数)および焦点シフト量を定量的に決定することを試みた。

2. 実験方法

2.1 供試鋼と実験装置

供試鋼板には板厚 5 mm、幅 50 mm の炭素鋼みがき帯鋼を、長さ 250 mm に切断して用いた。化学成分を Table 1 に示す。用いたレーザーは、加工点定格出力 4.5 kW のダイオードレーザー励起 YAG レーザーである。ビームをコア径 0.6 mm の光ファイバにより伝送後、焦点距離 200 mm のコリメータレンズと同 280 mm の集光レンズを用いてビームウェスト径 0.84 mm に集光し、実験に供した。

Fig. 1 に示すように、加工中のヒュームやスパッタから光学部品を保護するために、焦点位置から約 160 mm 離れた

Table 1 Chemical compositions of steel used in this study (mass%).

C	Si	Mn	P	S	Cu
0.12	0.24	0.55	0.019	0.018	0.26

Fig. 1 Schematic illustration of laser processing head used in this study.

位置に No. 1 エアナイフを設置した。更に、レーザー誘起ブルームを吹き流し、その長さを変えて溶接実験を行うために No. 2 エアナイフを用いた。レーザーの出力指令値を 4 kW としたときに加工点に到達したレーザー出力の、No. 2 エアナイフ高さ依存性を Fig. 2 に示す。No. 2 エアナイフの高さが焦点位置より 120 mm までの範囲では加工点出力は 4,280 W で変わらず、ビームと No. 2 エアナイフとの干渉がないことを確かめた。

2.2 加工条件

溶接は、突合せ隙間の僅かな変動が溶込みに与える影響を排除するためにメルトランとした。供試鋼板を XY テーブル上の治具に載せ、テーブル駆動により 200 mm 長さのビードを形成した。採用した溶接条件と各溶接条件における試験数を Table 2 に示す。溶接速度は全ての条件で 33.3 mm/s (2.0 m/min) 一定であり、加工点出力は主に 4.0 kW である。溶込みの出力依存性を調査するために出力 3.6 kW および 3.8 kW での実験も行った。

ブルーム長さを変えるために No. 2 エアナイフの高さを、試料表面 11 mm から 120 mm の範囲で変更し、溶接実験を行った。その際、レーザー光の焦点位置を変えてもエアナイフ高さが一定になるように、No. 2 エアナイフの高さを調整した。更に No. 2 エアナイフを取り去った状態で、No.

Fig. 2 Measured laser power at work piece under commanded laser power of 4 kW.

Table 2 Welding conditions and number of welds conducted in this study.

Laser power (kW)	Air knife height (mm)	Defocused distance (mm)									
		-5.6	-4.2	-2.6	-1.3	0	1.3	2.6	4.2	5.6	
3.6	20	1	-	1	-	1	-	1	-	1	
		1	-	1	-	1	-	1	-	1	
3.8	11	2	-	2	-	4	-	2	-	2	
	20	2	1	2	1	4	1	2	1	2	
	30	2	-	2	-	4	-	2	-	2	
	40	1	-	1	-	3	-	1	-	1	
	80	2	-	2	-	4	-	2	-	2	
	160	2	1	2	1	4	1	2	1	2	

1 エアナイフのみで溶接実験を行ったが、この場合、焦点外し距離を変えると、エアナイフ高さが ± 5.6 mm の範囲で変化した。以上の詳細を踏まえ、以降混乱の生じない範囲で No. 2 エアナイフの高さを単にエアナイフ高さとして表記し、No. 1 エアナイフのみで実験を行った場合は、エアナイフ高さを 160 mm と表記する。

レーザ光の焦点外し距離を、銅板表面を基準として ± 5.6 mm 範囲で変化させた。これは、集光レンズの焦点距離を基準とすると $\pm 2\%$ の範囲である。また集光レンズが供試銅板から離れる方向、従って焦点位置が材料表面の上にある場合を焦点外し距離が正の方向、逆の方向を負の方向とした。この定義は川人ら⁴⁾と、正負が逆になっている。ところで前報⁸⁾で報告したように、エアナイフはその周囲大気を巻き込んで大気の流れを引き起こす。この大気の流れが加工点に動圧を及ぼすと溶込みに影響を与えることが懸念される。そこで銅板表面にエアナイフを接近させた場合の基準条件は、エアナイフ高さ 20 mm とした。エアナイフ高さ 20 mm と 160 mm の条件においては、溶込みの焦点外し距離依存性を詳細に調べるため、焦点外し距離を 1.4 mm 間隔で変更した。その他のエアナイフ高さでは、2.8 mm 間隔で変更した。

2.3 観察方法

2.3.1 断面観察方法

溶込み形状を測定するために、溶接開始点より 50, 100, 150 mm の各位置において溶接ビードの横断面マクロ観察を実施した。腐食液はピクリン酸水溶液である。溶込み形状の測定項目は、Fig. 3 に示すとおり溶込み深さ、表ビード幅、溶込み深さ 2 分の 1 におけるビード幅（以下、1/2 深さビード幅と表記する）および溶融断面積である。

2.3.2 プルームの観察方法

加工中のプルームを観察するため、プルームの側面を加工進行方向と直交方向よりビデオ撮影した。フレームレートは 30 F/s、シャッター速度は 1/100 s で、プルームの画像

Fig. 3 Topological amounts of weld discussed in this study.

が裸眼で見えるものと同じ程度の高さになるようにゲインを調整した。

3. 実験結果

3.1 加工中のレーザ誘起プルーム

Fig. 4 にエアナイフ高さ 160 mm、レーザ出力 4.0 kW で焦点外し距離を変えた場合、および焦点外し距離 0 mm でレーザ出力を 3.6 kW とした場合のプルームの写真を示す。加工を行った中央 1 s 間 30 枚の写真よりプルーム長さを読み取り、プルームの平均長さとその標準偏差を求めた。Fig. 4 に示したプルームの写真は、平均長さおよび平均値 $\pm$ 標準偏差の長さを持ったプルームの写真である。

Fig. 4 Photos of plume at various defocused distance and laser power with air knife of 160 mm height.

Fig. 5 Dependence of plume length on air knife height.

Fig. 5 に、プルーム長さの焦点外し距離依存性を示す。平均値と最大・最小値の範囲である。焦点外し距離が大きくなるとプルームが若干長く成長すること、および10%のレーザ出力低下では、プルーム長さが変わらないことが確認できる。また Fig. 5 には、焦点外し距離 0 mm でエアナイフ高さを変えた場合のプルーム長さ⁸⁾も合わせて示している。エアナイフ高さを変えた場合は 0.5 s 間の平均長さとして、最大・最小値である。プルームはエアナイフ高さが 40 mm まではエアナイフ位置まで成長して時間的に安定しているが、エアナイフ高さが 60 mm 以上になるとエアナイフ位置まで成長せず、瞬間々々その高さを変動させた。しかし、エアナイフが高くなるとプルームも徐々に成長し、エアナイフ高さが 160 mm の場合は 80 mm 超まで成長していることが分かる。

3.2 溶込み形状のエアナイフ高さ依存性

エアナイフ高さが溶込みに与えた影響を Fig. 6 に示す。焦点外し距離 0 mm における種々エアナイフ高さでの測定結果である。Fig. 6 (a) は溶込み深さおよび溶融断面積のエアナイフ高さ依存性を示している。これら測定値は、ばら

つきが大きいものの、エアナイフが高くなるとともに単調に減少した。Fig. 6 (b) は、表ビード幅および 1/2 深さビード幅のエアナイフ高さ依存性を示している。これらビード幅は、エアナイフ高さにはあまり影響されなかった。表ビード幅はビームウェスト径 0.84 mm の 2 倍程度であり、溶融池表面付近の湯流れによって広がったものと推定された。また 1/2 深さビード幅は非常に安定しており、最大値と最小値との乖離は狭い。全エアナイフ高さについての平均値は 1.0 mm であり、ビームウェスト径 0.84 mm に対し +0.16 mm であった。これはキーホールを迂回して後方へ流れる溶鋼の層が、厚さ 0.08 mm 程度であることを示唆しているものと考えられた。

ところでエアナイフ高さ 11 mm における表ビード幅のみ、他の高さの幅に比べて狭くなっている。これはエアナイフ直下の、エアナイフに吸い込まれる気流の影響を受けた結果と推定される。

3.3 溶込み形状の焦点外し距離依存性

エアナイフ高さ 20 mm と 160 mm において、焦点外し距離を変えて形成した溶接ビードの断面写真を Fig. 7 に示

Fig. 6 Dependence of cross-sectional bead shape on air knife height.

Fig. 7 Dependence of weld penetration on defocused distance.

す。溶込み深さが平均値に近い断面の写真である。また、エアナイフ高さ20, 80, 160 mmにおける溶接ビードの断面写真から読み取った、溶込み形状の焦点外し距離依存性をFig. 8に示す。

溶込み深さの焦点外し距離依存性をFig. 8 (a)に示した。平均値と最大・最小値を示している。いずれのエアナイフ高さにおいても、溶込み深さは焦点外し距離-1.4 mm程度で最大となっていること、焦点外し距離が正の条件と負の条件で溶込み深さの同距離依存性が対称ではなく、焦点外し距離が正の方向で急激に浅くなることわかる。また、焦点外し距離が負の条件では正の条件に比べ、溶込み深さがエアナイフ高さにより強く影響されることが分かる。この現象については前報⁸⁾において論じた。すなわちレーザ出力の減衰と同時に、正の方向への焦点シフトが生じた結果であると考えられる。

溶融断面積の焦点外し距離依存性をFig. 8 (b)に示す。実験範囲内で溶融断面積は、エアナイフが高くなると狭くなる傾向を示し、また明確な焦点外し距離依存性を示さなかった。溶融効率（有効に溶融に使われた熱量／投入された熱量）が変わらないとすると、これは鋼板が吸収したエネルギー、従って熱効率がエアナイフ高さに依存する一方、実験範囲内で焦点外し距離には依存しなかったことを示す。

表ビード幅と1/2深さビード幅の焦点外し距離依存性を、それぞれFig. 8 (c)とFig. 8 (d)に示す。表ビード幅の測定値は、ばらつきが大きいものの焦点外し距離0 mm付近において概ね最小となる傾向が認められた。これに対し1/2深さビード幅は、測定値のばらつきが小さく、焦点外し距離が正の方向に大きくなるに従って大きくなる一方、負の方向ではほとんど変化しなかった。また表ビード幅同様、エアナイフ高さの影響を受けなかった。1/2深さビード幅は、狭いところで1 mm程度であった。

3.4 溶込み形状のレーザ出力依存性

溶込み形状の焦点外し距離依存性が、レーザ出力によってどのように変化したかをFig. 9にまとめた。Fig. 9 (a)は溶込み深さの焦点外し距離依存性を示す。いずれのレーザ出力においても溶込み深さは焦点外し距離が負の領域で最大となっている。また、焦点外し距離が正の方向と負の方向で溶込み深さが対称ではなく、正の方向で急激に浅くなっている。こうした特徴はエアナイフ高さを変えたときと同じ傾向である。しかしレーザ出力を下げた場合、焦点外し距離が正の条件においても、負の条件と同程度に溶込みが浅くなることはエアナイフ高さを変えた場合（Fig. 8 (a)）と異なった傾向である。

Fig. 9 (b)は溶融断面積の焦点外し距離依存性を示してい

Fig. 8 Dependence of cross-sectional bead shape on defocused distance under several air knife conditions.

Fig. 9 Dependence of cross-sectional bead shape on defocused distance under several laser power conditions.

る。少しばらつきが大きいものの、実験範囲内で溶融断面積はレーザー出力が低下すると狭くなる傾向を示し、焦点外し距離にはほとんど依存しないものと考えられた。

表ビード幅と1/2深さビード幅の焦点外し距離依存性を、それぞれ Fig. 9 (c) と Fig. 9 (d) に示す。表ビード幅はばらつきが大きいものの、レーザー出力の低下とともに若干狭くなる傾向、また焦点外し距離 0 mm 付近において最小となる傾向を示した。これに対し1/2深さビード幅は、実験範囲内ではレーザー出力にあまり依存せず、測定値のばらつきが小さかった。また、焦点外し距離が正の方向に大きくなるに従って大きくなる一方、負の方向ではほとんど変化しなかった。こうした特徴は、エアナイフ高さ依存性と概ね同じである。

4. 考 察

4.1 プルーム中でのレーザー出力減衰係数の決定

4.1.1 鋼板に吸収されるレーザー出力と溶融断面積

レーザー発振器から出力されたレーザー出力の内、光ファイバや集光レンズなどの透過光学部品での内部損失および反射損失により一定の割合が伝送損失として失われる。加工点出力 P_0 を、これら伝送損失を除き、加工しない状態で加工点に到達する出力として定義する。従って加工点出力はパワーメータで測定されるレーザー出力である。今回の実験

で用いた装置では、Fig. 2 で示したように、出力指令値 4.0 kW での加工点出力は 4.28 kW である。残念ながら、溶接加工中に加工点に到達するレーザー出力を直接測定する手段はない。今回対象にしている非貫通溶接では、加工点出力の内、一定割合がプルーム中で減衰するからである。

レーザー誘起プルームがレーザー光の光路上で一様であると仮定し、プルーム中の微小長さ dx (mm) の伝播でレーザー出力の一定割合が減衰すると考える。比例係数を a (mm⁻¹) とすると、プルーム中で損失するレーザー出力 dP (kW) は、次式で表現される。

$$dP = -a P(x) dx \quad \dots \dots (1)$$

比例係数 a は減衰係数である。(1) 式を変数分離して積分を行うことにより次式を得る。

$$P(x) = \exp(-ax) \times P_0 \quad \dots \dots (2)$$

ここで積分定数 P_0 は、加工点出力である。また、プルーム長さの原点を鋼板表面に置くと、 x (mm) は各溶接条件におけるプルーム長さに相当し、 $P(x)$ がプルームによる減衰を経たのち鋼板表面に到達するレーザー出力となる。

鋼板に吸収されるレーザー出力 P_{abs} は、鋼板に到達したレーザー出力の内、プルームの生成と反射ロスにより失われる

分を除いたレーザ出力である。ブルームは、低パワー密度で熱伝導型溶込み溶接を行う場合には小さく、パワー密度を上げてビームホールを形成すると成長する。ここでブルーム生成のために消費されるレーザ出力は、出力の一定割合であると考ええる。また反射損失は、反射という現象から出力に比例すると考える。更に、溶込み形状に強く依存し、浅い熱伝導型溶込みでは大きく、深いキーホール型溶込みでは小さくなると考えられる。しかし今回の実験範囲では Fig. 7 に示したように、アスペクト比が 1.5 以上の溶込みが得られている。そこで反射損失は焦点外し距離に関わらず、出力の一定割合で生じると考えることにする。以上の考察より、ブルームの生成に消費される割合、キーホールから反射により損失される割合をそれぞれ G および R とすると、鋼板に吸収されるレーザ出力 P_{abs} は、加工点出力 P_0 と次式で結びつけられる。

$$P_{\text{abs}} = (1-G) \times (1-R) \times \exp(-\alpha x) \times P_0 \quad \dots \dots (3)$$

ここで P_0 と P_{abs} の比は、いわゆる熱効率である。芦田¹⁰⁾によると、加工点出力 4kW、ビーム径 0.6mm の YAG レーザで溶接した場合、熱効率は 85~90% である。

今回の実験では、鋼板に吸収されたレーザ出力 P_{abs} を直接計測せず、溶融断面積 $\text{Area}(\text{mm}^2)$ を計測対象とした。しかし鋼板に吸収されたレーザ出力 P_{abs} の全てが、鋼板の溶融に寄与するわけではない。鋼板に吸収されたレーザ出力の内、熱伝導によって散逸する分（熱伝導損失分）を除いた出力が溶融に寄与する。その比率は溶融効率 η である。単位時間に溶融する体積は、溶接速度を $v(\text{mm/s})$ とすると、 $\text{Area} \times v$ である。従って、単位体積を溶融させるのに必要な熱量を $Q_0(\text{J/mm}^3)$ とすると、溶融効率 η は、

$$\eta = Q_0 \times \text{Area} \times v / P_{\text{abs}} \quad \dots \dots (4)$$

で与えられる。ここで溶融効率 η は溶接速度とともに熱伝導型溶込みか、キーホール型溶込みかといった溶融形態にも強く依存する。本研究の実験範囲では、溶接速度は一定で、また Fig. 8 や Fig. 9 に見たように、溶込み形状にも大きな差は見られない。そこで溶融効率は概ね一定であると考ええる。

(3) および (4) 式より、溶融断面積は次式によって加工点出力と結び付けられる。

$$\text{Area} = \eta \times (1-G) \times (1-R) \times \exp(-\alpha x) / (Q_0 \times v) \times P_0 \quad \dots (5)$$

議論が抽象的にならないように、これまで報告されている諸数値を確認しておく。キーホール溶接時の溶融効率 η の理論限界値は約 48%¹¹⁾であり、溶接速度 2 m/min で幅 1 mm の貫通ビードを形成した場合の計算値は約 46%¹²⁾である。この数値は二次元熱伝導方程式の解析解において、溶

融幅が 1 mm となるように出力調整した場合に得られる値で、板厚を 1 mm とすると 653 W が完全に吸収された場合に相当する。また、室温から融点までの鉄の平均比熱を 0.67 J/gr $^{\circ}\text{C}$ 、温度差を 1500 $^{\circ}\text{C}$ 、融解潜熱を 270 J/gr とすると、単位体積を溶融させるに必要な熱量 Q_0 は、約 10 J/mm 3 となる¹³⁾。但し、密度は $7.8 \times 10^{-3} \text{ gr/mm}^3$ とした。

4.1.2 溶融断面積のレーザ出力依存性

Fig. 9 (b) に示したように、エアナイフ高さ 20 mm で作成したビードの溶融断面積はレーザ出力に比例するようである。また、溶融断面積の焦点外し距離依存性は、実験範囲内で小さい。そこで焦点外し距離について平均した溶融断面積とレーザ出力との関係について回帰分析を行った。その結果を Fig. 10 に示す。ここでレーザ出力には、4kW の出力指令値で規格化した相対レーザ出力 (Relative power) を用いた。またエラーバーは、標準偏差の範囲 (Average $\pm \sigma$) を示している。本図に見られる通り、溶融断面積は実験範囲内でレーザ出力に良い比例関係を示す。相対レーザ出力と溶融断面積の関係を回帰することにより実験式として次式が得られた。

$$\text{Area} = 7.6 \times \text{Relative power} - 3.1 \quad \dots \dots (6)$$

(6) 式の意味を少し考察する。4.1.1 項での考察に従うと、(5) 式より、溶融断面積と相対レーザ出力の関係として次式が得られる。

$$\begin{aligned} \text{Area} &= 0.46 \times 0.875 / (10 \times 33.3) \times (4280 \times \text{Relative power}) \\ &= 5.2 \times \text{Relative power} \quad \dots \dots (7) \end{aligned}$$

ここで、4.1.1 で引用したように、溶融効率 η として 0.46、熱効率 $(1-G) \times (1-R) \times \exp(-20\alpha)$ として 0.875、単位体積を溶融させるに必要な熱量 Q_0 として 10 J/mm 3 、溶接速度として実験に用いた 33.3 mm/s、出力指令値 4kW での加工点出力 4280 W を用いた。(6) 式と (7) 式より算出される溶融断面積は、比較的良く一致している。実験式と理論式

Fig. 10 Relationship between cross-sectional are of weld metal and relative laser power.

による予測値の誤差は、実験式を基準に相対レーザ出力が1.0の場合で16%, 0.9の場合で25%に過ぎない. 各物性値の温度依存性を考慮せず, 平均値を用いた割によく合っている.

一方実験結果の回帰式(6)には常数項があり, レーザ出力が低下した場合に(7)式との誤差が大きくなることを示している. 理論式(7)は反射率, 熱効率や溶融効率の溶込み形状依存性を含んでいない. これに対し実験式(6)は, 出力低下が90%までの範囲において, パワー密度の低下による反射率の上昇や溶融効率の低下を含んでいる. これが実験回帰式と理論式との推定誤差が, レーザ出力が低下した場合に大きくなることの原因と考えられる.

4.1.3 プルーム中でのレーザ出力の減衰係数

4.1.2に示したように, 溶融断面積はレーザ出力に良い比例関係を示す. そこで溶融断面積をもとに, プルームによるレーザ出力の減衰程度を定量的に決定することを試みる. 川人ら¹⁴⁾は, 気流の無い環境においてレーザ溶接時のプルーム観察実験を行い, 可視プルームの上方の領域にも低屈折率の不可視領域があり, 溶接に影響を与えることを指摘している. 本研究は川人らの実験と同様, シールド無しの実験ではあるものの焦点距離が短く, プルーム上方の不可視高温領域は, 前報⁸⁾で指摘したように, エアナイフに伴う気流によって吹き流されている状態での実験である. そこで以下の考察では, 加工点から上空まで一様な可視プルームのみが溶接に影響を与えるものとして考察を進める.

Fig. 5に示したエアナイフ高さとの関係を用い, Fig. 6(a)に示したエアナイフ高さとの関係を, プルーム長さとの関係に変換する. 更に実験式(6)を用いて, 溶融断面積を相対レーザ出力で表し, プルーム長さと相対レーザ出力の関係を得る. ところでFig. 8(b)に示したように, 溶融断面積は本研究の範囲内で焦点外し距離に依存しないと考えられる. そこで焦点外し距離について平均した溶融断面積Areaを相対レーザ出力の値に換算した. 得られたプルーム長さと相対レーザ出力の関係をFig. 11に示す. 本図においてエラーバーは標準偏差

の範囲を示す. 前項で述べたように, 相対レーザ出力と溶融断面積の関係において, 溶込み形状に依存した効率の変化は実験式(6)に取り込まれている. 従って, Fig. 11に示すプルーム長さと相対レーザ出力の関係は純粋に相対レーザ出力に及ぼすプルームの影響を表現していると考えられる. そこで, (2)式の関数型に従いプルーム長さと相対レーザ出力の関係を回帰し, 次式を得た.

$$\text{Relative power (x)} = 1.03 \times \exp(-0.00090 \times x) \cdots (8)$$

(8)式は, 加工点出力4.28kW, プルーム長さ11~84mmのメルトラン実験における, プルーム中でのレーザ出力の減衰係数が 0.00090 mm^{-1} であることを示している. すなわち, プルーム長さ100mmあたり, 9.0%の出力減衰が生じることを示している.

4.1.5 プルームによる焦点シフト

次にプルームによる焦点シフト量を現象論的に決定することを試みる. すなわち, 最大溶込み深さを与える焦点外し距離を推定し, これがプルーム長さによってどのように変化するかを調べる. 最大溶込み深さを与える焦点外し距離

Fig. 11 Dependence of relative laser power on plume length.

Fig. 12 Polynomial regression of penetration depth.

離を決定するために、溶込み深さと焦点外し距離の関係を多項式で回帰する。Fig. 8 (a) に示された焦点外し距離と溶込み深さの関係は、最大溶込み深さを与える距離に対し対称ではない。このため多項式で溶込み深さと焦点外し距離の関係を考える場合、3 次以上の次数が必要となる。一方次数を上げるほど、個々の実験点を無理にフィッティングするようになり、最大溶込み深さを与える焦点外し距離の推定には不向きとなる。そこで必要最小限の次数でフィッティングすることを考える。Fig. 12 に、エアナイフ高さ 20 mm と 160 mm における溶込み深さと焦点外し距離の関係を回帰した結果を示す。Fig. 12 (a) に示すように、高さ 20 mm では、3 次関数より 4 次、5 次関数の方がフィッティング状態がよく、4 次関数と 5 次関数とではフィッティング状態に違いは認められなかった。一方、Fig. 12 (b) に示す高さ 160 mm の場合、5 次関数では個々の実験点を無理にフィッティングする傾向が認められた。このことから溶込み深さの焦点外し距離依存性を回帰するには 4 次の多項式が最適と考えた。他のエアナイフ高さの溶込み深さについても 4 次の多項式で回帰し、最大溶込み深さを推定した。その結果を Fig. 13 に示す。この図は、プラズマが高くなるほど最大溶込み深さを与える焦点外し距離が短くなる、すなわち 0

Fig. 13 Estimated defocused distance at maximum penetration depth.

(a) Relationship between relative penetration depth on relative laser power.

に近づくことを示している。両者の関係を一次回帰し、次式を得た。

$$\begin{aligned} & \text{最大溶込み深さを与える焦点外し距離} \\ & = 0.0067 \times \text{プラズマ長さ} - 1.7 \cdots \cdots (9) \end{aligned}$$

(9) 式より、プラズマによる焦点シフト量は集光レンズから遠ざかる方向に 100 mm あたり 0.67 mm と見積もられた。これは集光レンズや保護ガラスの熱レンズ効果とは逆方向の焦点シフトである。

4.2 プラズマの溶込み特性に与える影響の定式化

4.2.1 溶込み深さのレーザ出力依存性

溶込み深さがレーザ出力にどのように依存するのか考える。溶融断面積の場合、実験範囲内で焦点外し距離には依存しないと考えられたが、溶込み深さは Fig. 9 (a) に示したように、焦点外し距離依存性を有している。しかし 4 kW の溶込み深さとの比でみると、Fig. 14 (a) に示すように、実験範囲内の出力で焦点外し距離依存性を無視できそうである。そこで、溶込み深さ比の焦点外し距離についての平均値とレーザ出力との関係を一次回帰する。結果を Fig. 14 (b) に示す。エラーバーは最大値と最小値の範囲である。実験範囲内で溶込み深さ比は、レーザ出力に比例していると考えてよさそうである。すなわち、レーザ出力 4 kW、エアナイフ高さを 20 mm とした場合の溶込み深さを基準とした相対溶込み深さ (Relative depth) と、相対レーザ出力 (Relative power) の関係として次式を得た。

$$\text{Relative depth} = 1.5 \times \text{Relative power} - 0.50 \cdots \cdots (10)$$

4.2.2 プラズマの溶込み特性に与える影響

以上、プラズマによってレーザ出力がどの程度減衰するのか (8 式)、最大溶込み深さを与える焦点外し距離がどの程度影響を受けるのか (9 式)、溶込み深さがどの程度

(b) Dependence of relative penetration depth and defocused distance.

Fig. 14 Dependence of penetration depth on laser power.

Fig. 15 Comparison of penetration depth at air knife height of 160 mm between experiment and estimation from the result at air knife height of 20 mm.

変化するのか(10式)が得られた。これらの式を用いれば、ブルームが成長した場合に溶込み深さが焦点外し距離にどのように依存するのかを推定することが可能である。ここでは、エアナイフ高さ20mm(ブルーム長さ20mm)の実験結果から、エアナイフ高さ160mm(ブルーム長さ84.1mm)の結果を推定する。

(8)式を用いると、エアナイフ高さ20mmと160mmでの相対レーザー出力が、それぞれ1.011および0.955と求められる。これら数値を(10)式に代入することによって、エアナイフ高さ160mmでの溶込み深さが、20mmでの溶込み深さの0.92倍となることが推定される。次に焦点シフト量は、(9)式を用いて、エアナイフ高さ160mmでは20mmに対し、0.43mmと推定される。そこで、エアナイフ高さ20mmでの溶込み深さ実験値を0.92倍し、焦点外し距離を0.43mmシフトした値をエアナイフ高さ160mmでの実験値と比較した。結果をFig. 15に示す。良い精度で再現できていることが確かめられた。

4.3 固体レーザーによる溶接と炭酸ガスレーザー溶接による溶接でのブルームの影響の比較

YAGレーザーなど、固体レーザーではシールドガスを用いずに溶接されることが多い。これに対し炭酸ガスレーザーを用いた溶接では、加工点を狙ったシールドガスが必須である。その理由について、レーザー出力の減衰とビームの屈折という観点から考える。

YAGレーザー溶接において、ブルーム中での出力の減衰係数は(8)式に示したように、 0.00090 mm^{-1} と見積もられた。従って、100mmのブルーム中をレーザービームが通過するときの出力減衰は約9%である。また、焦点シフト量はブルーム長さ100mmあたり、0.67mmと見積もられた。この程度の実効焦点シフト量であれば、集光プロファイルの変化も議論する必要はないものと考えられる。これらの現象を引き起こしているのはレイリー散乱と考えられ^{3, 4)}、出力の

減衰(散乱)係数は波長の4乗に反比例する。従って、炭酸ガスレーザーに比べ波長の短い固体レーザーによる溶接において強い影響を与える現象である。

これに対し、アシストガスを用いた炭酸ガスレーザー溶接の場合、緒言で引用したように、減衰係数は $0.024\sim 0.035\text{ mm}^{-1}$ と見積もられている。固体レーザーの場合の20倍である。また、Beckら¹⁵⁾は、60%のHeで希釈された僅か高さ3mm、約10000Kの金属蒸気プラズマ中の電子密度の強い勾配によって、ビーム径は2倍になり、焦点シフト量が2mmと推定している。一方、YAGレーザーの場合、(12)式より3mmのブルームでは、0.02mmの焦点シフトが推定されるに過ぎない。

ところで、レイリー散乱は弾性散乱であり、光を散乱することによって散乱粒子はその状態を変えない。一方、逆制動輻射は非弾性散乱であり、光を散乱する過程で散乱粒子である電子は光子エネルギーを吸収して運動エネルギーを大きくする。すなわち加熱され、プラズマの温度を上げてしまう。またパワー密度の高い加工点近傍では、プラズマの加熱能力が高い。従って、固体レーザーによる溶接ではファンによってブルームの成長を抑制するだけで良いが、炭酸ガスレーザー溶接では、加工点近傍をアシストガスで冷却する必要がある。このため炭酸ガスレーザーは瞬時に加工点を移動させるリモート溶接には不向きな光源と考えられる。

以上、ビームの減衰と屈折という観点から、炭酸ガスレーザー溶接と固体レーザー溶接でのブルームの影響を比較した。固体レーザー溶接では、いずれの観点からもブルームの影響は弱く、リモートレーザー溶接に適した光源と考えられた。

5. 結 言

YAGレーザーによるメルトラン実験を行い、ブルーム中での出力の減衰係数と焦点シフト量を決定することを試みた。メルトランにおいてエアナイフの高さを変えて種々ブルーム長さを作り分けた実験を行い、以下の結果が得られた。

- ・溶融断面積のレーザー出力依存性およびブルーム長さ依存性より、出力の減衰係数は 0.00090 mm^{-1} と見積もられた。この値は、文献^{1, 2)}に見られる炭酸ガスレーザー溶接時の減衰係数の約20分の1である。
- ・溶込み深さの焦点外し距離依存性およびブルーム長さ依存性より、ブルーム長さ100mmあたり、0.67mmと見積もられた。この値は、長さ3mmのブルームと比較するとBeckら¹⁵⁾の推定値の100分の1である。

以上、YAGレーザーに代表される固体レーザーによる溶接では、ブルーム中での出力の減衰と屈折による焦点シフト量は充分小さく、ファンによりブルームを吹き流せば安定した溶接が可能であり、リモートレーザー溶接に適した光源と

考えられた。

参 考 文 献

- 1) I. Miyamoto, K. Mori, and H. Maruo: Properties of Plasma Plume Induced on CO₂ Laser Welding Thin Sheets, Quarterly Journal of The Japan Welding Society, 13-2, (1995), 211-217. (in Japanese)
- 2) A. Poueyo-Verwaerde, R. Fabbro, G. Deshors, A. M. de Frutos, and J. M. Orza: Experimental study of laser-induced plasma in welding conditions with continuous CO₂ laser, Journal of Applied Physics, 74, (1993), 5773-5780
- 3) A. Matsunawa, S. Katayama and T. Ohnawa: Spectroscopic Measurements of Laser Induced Plume and Energy Dissipation Process of Incident Beam in Plume, Preprint of the National meeting of J.W.S, 48, (1991), 106. (in Japanese)
- 4) Y. Kawahito, Y. Kinoshita, N. Matsumoto, M. Mizutani and S. Katayama: Interaction between Laser Beam and Plasma/Plume Induced in Welding of Stainless Steel, Quarterly Journal of The Japan Welding Society, 25-3, (2007), 461-467. (in Japanese)
- 5) Y. Kawahito, K. Kinoshita, S. Katayama, S. Tsubota and T. Ishide: Visualization of Interaction between Fiber Laser Beam and Laser-Induced Plume, Journal of Japan Laser Processing Society, 13-1, (2006), 41-47. (in Japanese)
- 6) T. Ooie, S-J. Park and I. Miyamoto: Precision Micro-Welding Using Single-Mode Fiber Laser -Effect of Laser-Induced Plume and Assist Gas on Welding Process-, Journal of High Temperature Society, 30-2, (2004), 87-92. (in Japanese)
- 7) M. Mizutani and Katayama, S.: Numerical Calculation of Laser Beam Path Influenced by High Temperature Gas above Specimen during Laser Welding, Proc. ICALEO'09, (2009), 600.
- 8) Y. Miyazaki and S. Katayama: Influence of Laser-Induced Plume on Penetration in Laser Welding, Quarterly Journal of The Japan Welding Society, 31-2, (2013), 119-125. (in Japanese)
- 9) S. Oiwa, M. Mizutani, Y. Kawahito, S. Katayama, H. Ishide and N. Ozawa: Fundamental Study of Fiber Laser Remote Welding, Preprint of the National meeting of J.W.S, 83, (2008), 226-227. (in Japanese)
- 10) E. Ashida, S. Shono, M. Ushio and T. Hidaka: Measurement of Heat Efficiency in Nd:YAG-Laser Welding, Preprint of the National meeting of J.W.S, 66, (2000), 58-59. (in Japanese)
- 11) D. T. Swift-Hook and A. E. F. Gick: Penetration Welding with Lasers, Welding Journal, 52, (1973), 492s-499s
- 12) Y. Miyazaki, H. Hamatani, T. Otani and S. Okita: Laser Welding of Fine Grain Steel Sheet (Part1), Preprint of the National meeting of J.W.S, 73, (2003), 380-381. (in Japanese)
- 13) 例えば, 松田福久: 溶接冶金学, 日刊工業新聞社, (1972), p96, p173
- 14) Y. Kawahito, S. Oiwa, M. Mizutani and S. Katayama: Effects of Laser-Induced Plume in High-Power Fiber Laser Welding with Long-Focal-Distance Focusing Optics, Quarterly Journal of The Japan Welding Society, 29-1, (2011), 18-23. (in Japanese)
- 15) M. Beck, P. Berger and H. Hügel: The effect of plasma formation on beam focusing in deep penetration welding with CO₂ lasers, J. Phys. D: Appl. Phys. 28(1995) 2430-2442