レーザ溶接の溶込みに及ぼすレーザ誘起プルームの影響*

宮崎 康信**, 片山 聖二***

Influence of Laser-Induced Plume on Penetration in Laser Welding*

by MIYAZAKI Yasunobu** and KATAYAMA Seiji***

The influence of laser-induced plume on penetration is discussed in remote laser welding. Melt-runs accompanying plumes of various lengths were carried out in order to investigate the influence of plume on penetration using 4.5 kW YAG laser and air knife. Penetration depth obviously reduced on the conditions with long plume. It is considered that the decrease of penetration depth comes from attenuation of laser power in plume, through the decrease in weld metal cross-sectional area. Attenuation of laser power was estimated about 7% and focus shift was estimated to be about 0.7 mm on the experimental condition with plume of 90 mm length, compared with the condition with plume of 11 mm length.

Key Words: laser welding, remote welding, plume, penetration depth, attenuation, focus shift

1. 緒 言

近年大出力固体レーザの高ビーム品質化が進み、長焦点距離で集光しても加工に十分なパワー密度が得られるようになったことから固体レーザのリモートレーザ溶接への適用が進み始めた^{1, 2)}。溶接中、加工点からは高温の金属蒸気であるレーザ誘起プルームが噴出する。炭酸ガスレーザ溶接に関して、プルームによる逆制動輻射に起因したレーザ光の吸収など、多くの研究がなされてきた³⁾。固体レーザを用いた溶接においてもレーザ誘起プルームが溶接に与える影響が研究されており、プルームによるレーザビームの屈折やパワーの減衰が指摘されてきた。古くは松縄ら⁴⁾がレーザ誘起プルーム中に生成される超微粒子によりレーザビームがレイリー散乱されることを指摘している。川人ら⁵⁾は最大出力 4kW の Nd:YAG レーザを用いて板厚 8 mm の SUS304 ステンレス鋼のメルトランを行い、加工中に形成されているレーザ誘起プルームの側面からビーム径 3 mm のファイバレーザ光を透過させ、パワーの 3~4.3% の減衰と平均 0.45 mrad の屈折が生じたことを報告している。その後、川人ら⁶⁾は 3 種類の波長のプローブレザを用い、レーザの減衰にレイリー散乱特有の λ^{-4} の波長依存性が認められたことを報告している。しかしこうした試みはプルームの側面よりプローブレザビームを透過させた結果であり、レーザビームと同軸上に吹き上

がるレーザ誘起プルームにより溶接がどのような影響を受けるのかは必ずしも明確ではなかった。これに対し大家ら⁷⁾は SUS304 箔 (板厚 80 μ m) 溶接時に、箔を透過したレーザ出力の焦点位置依存性を調べ、11 μ m の焦点シフトが生じたことを報告している。焦点シフトはレンズから遠ざかる方向で生じ、大家らは幾何光学モデルを用いた考察からこの焦点シフトがプルームによるものであると結論している。一方、大岩ら⁸⁾は、加工中のプルームをファンによって吹き流せば溶込みが回復する事実と高速度ビデオによる観察から、プルームは溶込みに有意に減少させることを指摘している。川人ら⁹⁾は、この現象が加工点上方の屈折率が低下した領域によって焦点が下方へシフトすることにより生じるものあることを報告している。また、水谷ら¹⁰⁾は、円柱の高温気体を通るレーザビームを対象に数値計算を行い、波長 1 μ m のレーザ光に対しても高温気体により有意な焦点シフトが生じ得ることを示している。

本研究では自動車分野を念頭に、出力 4kW 程度の固体レーザ溶接においてプルームがどの程度溶込みに影響を及ぼすのかを明らかにすることを試みた。具体的には、レーザ出力 4.0 kW でプルーム長さを変えた炭素鋼の部分溶込みメルトランを行い、溶込み形状のプルーム長さ依存性からパワーの減衰量と焦点シフト量を推定することを試みた。

2. 実 験 方 法

2.1 実験装置と供試鋼

実験には加工点定格最大出力 4.5 kW の Nd:YAG レーザ発振器を用いた。レーザ光はコア径 0.6 mm の光ファイバを通して出力される。このレーザビームを焦点距離 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スポッ

*受付日 平成24年9月13日 受理日 平成25年1月25日 平成22年度春季全国大会で発表, 平成22年度秋季全国大会で発表

**正 員 新日鐵住金(株) Member, Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation

***正 員 大阪大学 Member, Osaka University

ト径 0.84 mm に集光し、実験に供した。供試鋼板は板厚 5 mm のみがき帯鋼であり、その化学成分を Table 1 に示す。Fig. 1 に示すように試験体を XY テーブル上に固定し、テーブル駆動にて 200 mm 長さのメルトランを実施した。その際、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 160 mm 離れた位置に No. 1 エアナイフを設置した。

2.2 実験方法

レーザ誘起ブルームの成長が溶込みに与える影響を調べるために、Fig. 2 に示す No. 2 エアナイフを用いて種々の長さのブルームを作り分け、メルトランでの溶込みを調査した。設定したエアナイフ高さは、試料表面からエアナイフの吹き出し位置までの高さで 11 mm から 160 mm の範囲であ

Table 1 Chemical compositions of steel plate used in this study.

Chemical compositions (mass%)					
C	Si	Mn	P	S	Cu
0.12	0.24	0.55	0.019	0.018	0.26

Fig. 1 Schematic illustration of experimental set-up.

Fig. 2 Schematic illustration of air knife setup for restricting plume length.

る。焦点外し距離を変更した場合は、それぞれの焦点外し距離でエアナイフ高さが設定値になるように調整した。但し、高さ 160 mm の実験では No. 2 エアナイフを取り外し、No. 1 エアナイフだけでメルトランを行った。この場合、焦点外し距離に応じたエアナイフ高さの調整は行っていない。エアナイフはその作動時に周辺大気を吸い込む。Fig. 3 に、エアナイフがレーザ光軸上に引き起こす気流の風速測定結果を示す。シュー直下の風速は 3 m/s であった。風速の測定には、熱線風速計を用いた。

2.2.1 ブルームによる溶込みの減少量調査実験

レーザ出力は 4.0 kW、溶接速度は 33.3 mm/s (2.0 m/min) であり、焦点位置は鋼板表面である。比較のためにレーザビームと同軸でシールドを行ったメルトラン、およびファンによりブルーム除去を行ったメルトランも実施した。同軸シールド条件では、スタンドオフ 10 mm、内径 5 mm のノズルより Ar 20 l/min を供給した。ファンを用いた実験では、エアナイフ高さを 140 mm とし、溶接後方より前方に向けて送風した。本実験において、熱線風速計により測定した試料表面上の風速は、Fig. 4 に示すように広い範囲で概ね一定で、7 m/s 程度であった。なお Fig. 4 において、エラーバーは最大値と最小値の範囲である。

2.2.2 ブルームによる焦点シフト量調査実験

ブルームによる焦点位置のシフト量を調べるため、エアナイフ高さ 11 mm および 160 mm において 5 水準の焦点外し

Fig. 3 Wind speed of air flow caused by air knife.

Fig. 4 Speed of wind by fan conducted in this study.

距離を設定し、メルTRANを行って溶込み状態の焦点外し距離依存性を調査した。設定した焦点外し距離は、銅板表面を基準に ± 5.6 mm (集光レンズ焦点距離の $\pm 2\%$)、 ± 2.8 mm (同 $\pm 1\%$)、および 0 mm (同 0%, ジャストフォーカス) の 5 水準である。本実験におけるレーザ出力は 3.6 kW と 4.0 kW で、溶接速度は 33.3 mm/s (2.0 m/min) である。

2.3 測定・観察方法

溶込みの安定性確認のために外観観察を行い、溶込み形状を測定するために溶接始点より 50, 100, 150 mm 位置において溶接ビードの断面観察を実施した。断面観察では、試料を樹脂に埋め込んで研磨し、ピクリン酸水溶液で腐食した後、光学顕微鏡によりビード断面の写真撮影を行い、写真上で溶込み形状を特徴付ける諸寸法を測定した。測定項目は溶込み深さ、表ビード幅、2 分の 1 溶込み深さにおけるビード幅、および溶融断面積である。

ブルームを観察するために溶接進行方向と直交する方向よりブルームのビデオ撮影を行った。フレームレートは 30 F/s、シャッター速度は 1/100 s であり、ゲインは撮影画像が裸眼での観察と概ね一致する条件とした。

3. 実験結果と考察

3.1 エアナイフ高さとブルーム長さ

Fig. 5 に、各エアナイフ高さにおける平均的な長さのブルームの写真を示す。エアナイフ高さが試料表面より 40 mm までは、ブルームは常にエアナイフ位置まで成長した。60 mm を超えるとエアナイフの下に発光のない領域が残ったものの、120, 140 mm とエアナイフが高くなるに従ってブルームも成長し、ブルームが 60 mm 以上に吹き上がる能力のあることが分かる。従って、エアナイフ高さが 60 mm の場合に非発光領域が顕れることは、Fig. 3 に示したエアナイフ下の気流によりブルームが抑制されたためと考えられる。またファンを用いた場合、ブルームの成長は短く抑えられた。Fig. 6 にエアナイフ高さが 120 mm の場合のブルームの写真を示すが、エアナイフ高さが 60 mm 以上になると、ブルームは時間的に激しくその長さを変動させた。Fig. 7 は、エアナイフ高さ 160 mm におけるブルーム長さの時間変化を示している。フレームレート 30 F/s のビデオ画像から測定したため、激しい変化は分からないものの、周波数 1 Hz 以下の大きなうねり成分が認められた。Fig. 8 に、ブルーム長さのエアナイフ高さ依存性をまとめた。エアナイフ高さが 60 mm を超えて高くなると、ブルームが徐々に長くなること、また長さのばらつき範囲が広がることが分かる。

3.2 ブルームの溶込み深さに与える影響

エアナイフ高さを変えて作成したメルTRANビードの外観写真を Fig. 9 に示す。裏面の酸化状況により概ね溶込み状態を評価できる。同軸シールドやファンを使用したビードに

Fig. 5 Behavior of plume under several air knife conditions.

Fig. 6 Photos of typical plumes in 0.5 seconds.

Fig. 7 Time change of plume length.

Fig. 8 Dependence of plume length on air knife height.

比べ、ブルームが長く成長し、長さが時間的に変動したエアナイフ高さ 140 mm でのビードは裏面の酸化が弱く、また 200 mm の溶接長の中で、酸化幅が狭くなっている部位が 5 箇所認められる。周波数に換算すると 0.83 Hz である。従ってエアナイフ高さ 140 mm の条件は他の条件に比べ溶込みが浅く、また溶込み深さが溶接位置によって変動していることが推定された。

Fig. 10 は溶込み深さのエアナイフ高さ依存性を示す。特定の測定位置で常に溶込みが深いとか浅いといった傾向は認められない。特に溶接後半で常に溶込みが浅くなる、集光レンズなど透過光学部品の熱ひずみ起因の現象は生じていないと判断された。またファンを用いた場合、エアナイフが高くても溶込みが深いことが分かる。Fig. 11 は、溶込み深さとブルーム長さの関係を示している。Fig. 11 において、エラーバーは測定位置の違いによる最大値と最小値の範囲である。同軸シールドやファンを用いた実験結果を含め、溶込みはブルーム長さに反比例して浅くなることが分かる。

Fig. 9 Photos of specimen appearance. (Power 4.0 kW, Speed 33.3 mm/s, Just focus)

Fig. 10 Dependence of penetration depth on air-knife height.

3.3 プルームの溶込み形状に与える影響

Fig. 12 に溶接線方向中央におけるビードの断面写真を示す。溶込み形状は概ねくさび状で、エアナイフ高さにはほとんど依存しないことが確認できる。Fig. 13 は、表ビード幅と 2 分の 1 溶込み深さにおけるビード幅のブルーム長さ依存性を示している。ここでエラーバーは測定位置の違いによる最大値と最小値の範囲である。表ビード幅は、エアナイフを高くするほど狭くなる傾向を示したが、2 分の 1 溶込み深さでのビード幅は、エアナイフ高さに関わらず安定していた。Fig. 14 に、溶融断面積（溶接金属の断面積）のブルーム長さ依存性を示す。エラーバーは測定位置の違いによる最大値と最小値の範囲である。溶融断面積は、ブルーム長さに反比例して小さくなった。溶接速度が一定で溶込み形状が大きく変わらなければ溶融効率（試験片が吸収した熱量に対する溶融に寄与した熱量の割合）は一定と考えられる。Fig. 12 に示し

Fig. 11 Dependence of penetration depth on plume length.

Fig. 12 Dependence of weld penetration on air knife height.

Fig. 13 Dependence of bead width on plume length.

たように溶込み形状に大きな違いが認められないことから、溶接速度一定で行った本実験の溶融断面積は試験体に吸収された熱量に比例すると考えられる。従って、本実験において溶融断面積がブルーム長さに反比例することは、ブルームが長くなると加工点に到達するエネルギーが小さくなること、即ちブルームの成長によって熱効率が低下することを意味する。この現象は、松縄ら⁴⁾や川人ら⁶⁾の指摘より、レイリー散乱(あるいはミー散乱)によると考えることが妥当であろう。

3.4 溶込みのレーザ出力および焦点位置依存性

Fig. 15 は、エアナイフ高さ 11 mm と 160 mm における溶込み深さの焦点外し距離依存性を示す。エラーバーは測定位置の違いによる最大値と最小値の範囲である。いずれの条件においても、最大の溶込み深さは焦点を鋼板表面あるいは 2.8 mm 鋼板内部に設定した場合に得られた。エアナイフ高さ 160 mm での溶込み深さは、高さ 11 mm の場合に比較して、焦点が鋼板内部となるアンダーフォーカス条件で大きく減少したのに対し、焦点が鋼板より上にあるオーバーフォーカス条件では差異が認められなかった。一方、エアナイフ高さ 11 mm においてレーザ出力を 3.6 kW とした条件における溶込み深さの焦点外し距離依存性は 4.0 kW の場合と同じであり、溶込み深さは全焦点外し距離で減少し、焦点外し距離に

ついでの平均で 82.5% となった。ブルームによりレーザパワーの減衰のみが生じているとすると、ブルームが長く成長したエアナイフ高さ 160 mm での溶込み深さは、レーザ出力を 3.6 kW に下げた場合と同様、全焦点外し距離で一律に減少するはずである。しかし、実験ではアンダーフォーカス条件のみで減少した。このことから、ブルームによってレーザパワーの減衰と同時に焦点シフトも生じていると考えられる。

溶融断面積の焦点外し距離依存性を Fig. 16 に示す。溶融断面積の焦点外し距離依存性は明確ではない。エアナイフ高さ 160 mm における溶融断面積は、焦点外し距離の平均で 11 mm での断面積の 93.4% であった。またエアナイフ高さ 11 mm で出力 3.6 kW での溶融断面積は、焦点外し距離の平均で 4 kW での断面積の 82.7% であった。

3.5 ブルームによるレーザパワーの減衰と焦点シフト

加工点からブルームが吹き上がっている状況では、これまでの研究報告に見られるように、レーザパワーの減衰と焦点シフトが生じていると考えられる。そこで、ブルームの影響が少ないと考えられるエアナイフ高さ 11 mm での実験結果を用いて、ブルームの影響が強いと考えられるエアナイフ高

Fig. 14 Dependence of weld metal area on plume length.

Fig. 15 Dependence of penetration depth on defocused distance.

Fig. 16 Dependence of cross-sectional area of weld on defocused distance.

Fig. 17 Power loss and focus shift caused by plume.

さ 160 mm での実験結果を推定することを試み、ブルームによるパワーの減衰量と焦点シフト量を見積もることを考える。具体的には、エアナイフ高さを 11 mm から 160 mm とした場合の溶融断面積の変化から、レーザパワーの減衰量と焦点シフトを考慮しない溶込み深さの減少量を見積もり、その後焦点シフト量の推定を行う。

3.4 項で見たように、エアナイフ高さ 11 mm において、出力が 4.0 kW から 3.6 kW になると、4.0 kW の時に比較して、溶融断面積は焦点外し距離についての平均で 82.7% となった。一方、出力 4.0 kW において、エアナイフ高さが 11 mm から 160 mm になると、溶融断面積は 93.4% となった。ブルームが長く成長した場合に出力を下げた場合と同じ比率で溶融断面積が変化すると考えると、次式が成り立つ。

$$\frac{\text{設定出力の変化}}{\text{出力を下げた場合の平均溶融断面積の変化}} = \frac{\text{ブルームによる出力の変化}}{\text{ブルームによる平均溶融断面積の変化}} \quad \dots (1)$$

ここでエアナイフ高さが 11 mm から 160 mm になってブルームが成長した場合に、溶融に寄与したレーザ出力を $P(160)\%$ とすると、

$$P(160)\% = 100 - \frac{100 - 90}{100 - 82.7} (100 - 93.4) = 96.2\% \quad \dots (2)$$

従って、エアナイフ高さが 11 mm から 160 mm になった時のレーザパワーの減衰量は 3.8% と推定された。この値は、川人⁹⁾が報告している 3~4.3% の減衰量とほぼ同じ値である。

また出力を 4.0 kW から 3.6 kW にすると、4.0 kW の時に比較して、溶込み深さは 82.5% となった。出力を下げた場合と、ブルームが長く成長した場合で溶融断面積と溶込み深さが同じ比率で変化すると考えると、次式が成り立つ。

$$\frac{\text{出力を下げた場合の平均溶込み深さの変化}}{\text{出力を下げた場合の平均溶融断面積の変化}} = \frac{\text{ブルームによる平均溶込み深さの変化}}{\text{ブルームによる平均溶融断面積の変化}} \quad \dots (3)$$

ここで、エアナイフ高さが 11 mm から 160 mm になってブルームが成長した場合の、焦点シフトを考慮しない仮想的な溶込み深さを 11 mm の場合を基準に $\text{Depth}\%$ とすると次式が得られる。

$$\text{Depth}\% = 100 - \frac{100 - 82.5}{100 - 82.7} (100 - 93.4) = 93.3\% \quad \dots (4)$$

従って、エアナイフ高さが 11 mm から 160 mm になると、全焦点外し距離で溶込み深さが 93.3% まで減少すると考えられる。

次にエアナイフ高さ 160 mm では高さ 11 mm に比較して

生じているであろう焦点シフト量を推定する。エアナイフ高さ 11 mm における溶込み深さの実験値に、(2) 式で求めた規格化された溶込み深さを乗じて各焦点外し距離における仮想的な溶込み深さを決定する。そしてこれらがエアナイフ高さ 160 mm での溶込み深さ実験値と合致するように、焦点シフト量を決定した。その結果を Fig. 17 に示す。エアナイフ高さ 160 mm では、高さ 11 mm の場合に対し、約 +0.7 mm (焦点距離の +0.25%) の焦点シフトが生じているものと推定された。これは焦点距離の長くなる方向への焦点シフトであり、集光レンズの熱ひずみによって生じる焦点シフトとは逆方向のシフトである。

この焦点シフトの方向は、過去の報告⁷⁻¹⁰⁾と合致している。ところで川人⁹⁾は、焦点距離 1250 mm の集光レンズを用いた実験において、30 mm 程度の焦点シフトが生じたことを報告しており、本実験で決定した焦点シフト約 0.7 mm と大きな違いがある。彼らの実験では可視ブルームの上空においても高温で屈折率変化の生じる領域が形成されているのに対し、本実験では Fig. 3 に示したように、エアナイフに付随した気流があることからそうした領域が形成されていないと考えられる。この違いが川人らの報告と焦点シフト量の数値的な差をもたらしたと考えられる。また、今回決定した諸数値は、平均化順序の見直しにより、既報¹¹⁾のものと若干異なっていることを指摘しておく。

4. 結 言

種々エアナイフ高さでレーザ誘起ブルームの長さを作り分けたメルトラン実験を行い、ブルーム長さの溶込みに与える影響を調査した。その結果、以下の結論が得られた。

- (1) ジャストフォーカス条件では、ブルームが長く成長した場合、低い場合に比較して溶込み深さ、溶融断面積ともに減少した。
- (2) ブルームが長く成長した場合、アンダーフォーカス条件で溶込み深さが減少したが、オーバーフォーカス条件ではほとんど変化しなかった。一方溶融断面積は、実験範囲内で焦点外し距離にほとんど依存しなかった。
- (3) レーザ出力が低下すると、溶込み深さおよび溶融断面積は、焦点外し距離に関わらず概ね一律に浅く、あるいは狭くなった。
- (4) ブルームにより、過去の報告に見られるように、レーザパワーの減衰と焦点シフトが生じていると考えられた。
- (5) ブルームが長く成長した場合の各焦点外し距離における溶込み深さを、ブルームが低い場合のそれらから推定することを考え、ブルームによるレーザ出力の減衰程度と焦点シフト量を見積もった。その結果、ブルーム長さが 90 mm 程度 (エアナイフ高さ 160 mm) の場合、11 mm (エアナイフ高さ 11 mm) の場合に比較してレーザ出力は 96.2% まで減衰して溶込み深さが 93.4% となり、0.7 mm 程度の焦点シフトが生じているものと推定された。

参 考 文 献

- 1) T. Tarui, K. Mori, N. Yoshikawa, and T. Hasegawa: Latest Laser Welding Applications for Body in White, Proceedings of the 68th Laser Material Processing Conference, 68 (2007), 157-163. (in Japanese)
- 2) K. Mori, T. Tarui, and T. Hasegawa: Remote Laser Welding Application for Car body, Journal of The Japan Welding Society, 77-8, (2008), 215-219. (in Japanese)
- 3) M. Ono, K. Nakada and S. Kosuge: An Investigation on CO₂ Laser-Induced Plasma, Quarterly Journal of The Japan Welding Society, 10-2, (1992), 239-245. (in Japanese)
- 4) 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)
- 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) 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)
- 7) 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)
- 8) 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)
- 9) 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)
- 10) 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.
- 11) Y. Miyazaki and S. Katayama: Influence of Plume on Focus Shift during Laser Welding, Preprint of the National meeting of J.W.S, 87, (2010), 376-377. (in Japanese)