薄板のCO₂ レーザ溶接時に誘起されるプラズマ プルームの性質*

—レーザ溶接の知能化に関する研究 (第1報)—

宮本 勇**, 森 清和***, 丸尾 大****

Properties of Plasma Plume Induced in CO₂ Laser Welding Thin Sheets*

—Study on Intellectualization of Laser Welding (Reprot 1)—

by Isamu Miyamoto**, Kiyokazu Mori*** and Hiroshi Maruo****

Laser induced plasma plume was characterized by a spectral analysis in terms of temperature and electron density in lap welding of mild steel sheet of 0.8 mm thickness by using CO₂ laser in a power range from 1.4 to 2.5 kW. Spatially and temporally averaged temperature of the plasma plume was determined as a function of focal position, F, location of focal point with respect to the work surface in Ar shielding; it was found that the temperature ranged from 7500 K to 8500 K, and increased with increasing the absolute value of F in penetration welding. Abel transformation analysis indicated that the local temperature and electron density were higher in the area near the laser beam axis than the surrounding area due to laser beam heating; the maximum temperature and electron density were 9500 K and 10¹⁷/cm³, respectively. According to inverse Bremsstrahlung theory, this electron density corresponds to the absorption coefficient of approximately 0.2 cm⁻¹. Although this value proved little effect on bead formation, it was high enough to heat the plasma plume depending on laser focusing conditions, indicating possibilities to monitor the laser welding by detecting plasma temperature or brightness for establishing intellectual laser welding.

Key Words: plasma plume, temperature, electron density, Abel transformation, inverse Bremsstrahlung, absorption coefficient, CO₂ laser, mild steel, intelligent welding

1. はじめに

レーザビームはパワー密度が高いため、高性能・高エネルギーの溶接が可能である。しかし、集光直径が小さいので開先精度や狙い位置の裕度がアーク等の熱源に較べて小さく、これまでの適用例は精度よく加工した継手の接合がほとんどである¹⁾。加工精度の低い継手に対しては、溶加棒の供給²⁾、集光ビームのウイビング³⁾などによる裕度の改善が試みられている。しかし、これらは設定した溶接条件を単純に繰り返すものであり、例えば薄板の溶接では油污れや機械傷などがある場合には溶接欠陥の発生は避けられない。また現状のレーザ加工機は、発振器の安定性⁴⁾、レンズの熱誘起光学ひずみ⁵⁾、放物面鏡の光軸ずれ⁶⁾など長期・短期を含めた信頼性も十分ではなく、溶接品質を如何に保証するかがレーザ溶接の重要な課題である。

薄板のレーザ溶接は極めて高エネルギーであり、また、組立工程とレーザ溶接を組合わせて複雑な形状の部品を製作することも多いため、X線や超音波などによる溶接の非破壊検査法は現実的ではない。そのため高い溶接エネルギーに見合ったインプロセスでの品質検査や適応制御も含めたレーザ溶接の知能化が望まれる。

レーザ溶接継手の良否を高エネルギーで判定するインプロセスモニタリング⁷⁾には高い関心が払われており、これまでにレーザ誘起プラズマの発光強度^{8,9)}や音圧¹⁰⁾などの検出が試みられている。検出した信号の物理的意味を理解するにはプラズマの温度や電子密度などの諸量を知る必要がある。これまでにレーザ溶接において誘起されるプラズマの温度や電子密度が研究されているが¹¹⁻¹³⁾、その目的は溶込み深さなどビード形成への影響が中心であり、溶接品質のモニタリングに関連した系統的研究はほとんど報告されていない。

本研究はインプロセスで溶接継手の良否を判定できるモニタリング手法を確立し、最終的には適応制御も含めたレーザ溶接の知能化を目指している。本報告ではその基礎となるレーザ誘起プラズマの温度ならびに電子密度を測定するとともに、レーザビームとプラズマの相互作用の解析を行った。

2. 実験装置と方法

本研究ではRF励起する高速軸流タイプの連続発振CO₂レーザ(波長10.6 μm:円偏光)を用いた。定格出力は低次モードで1.5 kW (1/e²ドーム直径D=16 mm)、高次モードで3 kW (D=30 mm)である。レーザビームは焦点距離5インチ(127 mm)のZnSeレンズで集光し、これと同軸のノズル(直径5 mm, 高さh=8 mm)から送給するArガス(30 l/min)によりシールドを行った(Fig. 1)。焦点での強度分布は著者らが開発したビーム分布計測装置¹⁴⁾を用いて測定したが、その1/e²直径は低次モードで約0.16 mm, 高次モードでは0.34 mmであった。

Fig. 2 にプラズマの発光分光に用いた実験配置を示

*原稿受付 平成6年5月16日 平成3年度秋季全国大会で発表, 平成5年11月 高エネルギービーム加工研究委員会 で発表

**正 員 大阪大学 Member, Osaka University

***正 員 日産自動車 Member, Nissan Motor Corporation

****正 員 福井工業大学 Member, Fukui Technical University

Fig. 1 Schematic diagram of nozzle head used for laser welding ($h=8$ mm, Ar: 30 l/min).

Fig. 2 Experimental arrangement used for spectral analysis.

す。レーザ誘起プラズマは光軸を溶接進行方向に対して直角となるよう配置したレンズにより光ファイバー端面(溶融石英製)に結像(結像倍率5, 仰角約15度)した。光ファイバー面には, 矩形開口を設け, 被測定面内で試料面に接する縦0.5 mm×横0.25 mmの矩形領域から発光を受光した。波長分解能0.06 nmのモノクロメータを用いてスキャン速度5 nm/s, 周波数850 Hzでサンプリングし(サンプリング波長間隔: 約0.006 nm), A/D変換したのちにコンピュータに取り込んだ。

レーザ溶接中に誘起されるプラズマは変動が激しく^{12,13)}, スペクトルデータの再現性に影響を与えるため, 同一条件で所定波長域を多数回スキャンし, 平均化する手法をとった。本報告の解析に用いるスペクトル強度は全てこのようにして求めた時間平均値である。1本のビードから一連のスペクトルデータを採取するために, 比較的大きな薄板試料(直径620 mm, 板厚0.8 mm: SPCC)を作成し, その外周付近を重ね溶接した(Fig. 2)。溶接速度は1.4 m/min一定とし, 試料面に対する焦点の相対位置F ($F>0$ で試料面上方, $F<0$ で試料内部)を主なパラメータとした。

3. 実験結果と考察

3.1 発光強度の時間変化

ビーム照射域には高さ1.5~2 mmのプラズマブームが観察されたが, 続報で詳述するように上部の輝度は比較的弱く, 高さ約0.5 mmの領域に約90%の発光量が, 集中することを確認している。レーザ溶接中には高温のプラズマが瞬間的に発生・消滅を繰り返すことは, これまでも報告されている¹⁵⁾。そこで試料面直上の縦0.5 mm×横0.25 mmの領域でのFeI (375.824 nm)の時間変化を測定した。Fig. 3に示すように一定強度のレーザビームを照射しても発光強度は一定とはならず, 激しく変動することがわかった。

Fig. 4(a)に1回の波長スキャンで得られたスペクトルデータを示す。図のように輝線スペクトル上には時間変動による細かいピークが重畳しているため, 正確なスペクトル強度を得ることは困難であった。そこで所定の波

Fig. 3 Time change in spectral intensity of FeI (375.824 nm, sampling: 850 Hz) at welding speed of 1.4 m/min at 1.4 kW (low order mode).

Fig. 4 Spectrum of plasma plume induced in laser welding steel sheet averaged at scanning times: (a) 1, (b) 10, (c) 15, (d) 20.

長域を多数回スキャンして得られたスペクトルデータを平均化することにより時間平均値を求めた。Fig. 4(b)~(d)に示すように、平均化回数が増大すると時間変動の影響は減少し、よく分離したFeスペクトルを得ることができた。本研究では平均化回数を10回とした。

3.2 温度と焦点位置の関係

光学的に希薄なプラズマが局所平衡にあるとき、次式が成立する¹⁶⁾。

$$\ln = \frac{I_{nm}\lambda}{g_n A_{nm}} = -\frac{E_n}{kT} + \text{const.} \quad (1)$$

ただし、 λ =波長、 k =ボルツマン定数、 E_n =エネルギー準位、 g_n =統計重率、 A_{nm} =遷移確立、 I_{nm} =スペクトル強度である。

プラズマの中心軸を含む試料面直上の縦0.5 mm×横0.25 mmの矩形領域からデータを採取し、波長域 $\lambda=364.874 \text{ nm} \sim 382.782 \text{ nm}$ のFeIスペクトル線を同定した。そのうち遷移確率¹⁷⁾がわかっているFeIスペクトル線を用いてボルツマンプロットした例をFig. 5に示す。直線関係は満足ゆくものであり、その勾配から温度を求めた。

Fig. 6に低次モード(1.4 kW)における焦点位置 F と上記ボルツマンプロットで求めた温度 T の関係を示す。

Fig. 5 Typical Boltzmann plot of laser-induced plasma in CO_2 laser welding steel sheet (1.4 m/min, 1.4 kW: low-order mode).

Fig. 6 Average temperature of plasma plume plotted against focal position (1.4 m/min, 1.4 kW: low-order mode).

$-6 \text{ mm} < F < 6 \text{ mm}$ の領域で分光可能な発光が得られた。焦点が試料面に近づき熱伝導型から深溶込み型へ遷移¹⁸⁾する過渡領域で、急激に度上昇するのがわかる。しかし、貫通溶接の範囲内($-3 \text{ mm} < F < 3 \text{ mm}$)では、焦点が試料面に近づくにつれて温度は逆に低下し、 $F=0$ 付近で極小値となることがわかった。

この現象はFig. 7に示す材料と集光ビームの相互作用から説明される。貫通ビードの限界付近では、裏面ではキーホール径が小さいため、プラズマは主として表面側に噴出するが、プラズマがレーザービームを吸収するならば、加熱されてより高温となる。焦点が試料面に近づき十分に貫通するようになると、裏面ではキーホール径は大きくなり、裏面側に噴出するプラズマが増大する。そのため、表面ではプラズマが希薄になり、温度も低下したものと考えられる。プラズマの吸収性は電子密度に依存するが、これについては後述する。

また、Fig. 6ではT-F曲線は対称ではなく、 $F < 0$ 側よりも $F > 0$ 側の温度が幾分高くなっているのがわかる。これには試料面からの反射ビームとプラズマの相互作用が関係すると考えられる。Fig. 8は熱伝導型から深溶込み型へ遷移¹⁸⁾する過渡域の状況を示している。蒸発反力によって溶融池には浅い窪みが形成されるが、窪み面からの反射ビームは、 $F < 0$ では下方に向かうのに対して、 $F > 0$ では上方に向かうことがわかる。試料表面付近のプラズマはビームを吸収するため(3.5項参照)、 $F > 0$ 側では反射ビームがプラズマを加熱することによって温度上

Fig. 7 Schematic illustration of plasma plume ejecting from key hole in thin sheet at different focal positions.

Fig. 8 Reflection of focused laser beam from slightly depressed molten surface. (a) $F < 0$, (b) $F > 0$.

Fig. 9 Average temperature of plasma plume plotted against focal position (1.4 m/min, 2.5 kW: multi-mode).

Fig. 10 Averaged electron density plotted against focal position in plasma plume (1.4 m/min, 1.4 kW: low-order mode).

昇したものと理解される。

高次モード (2.5 kW) でも同様の分光実験を行い、プラズマの温度を測定した。Fig. 9 に高次モードでの温度と焦点位置の関係を示す。低次モードレーザと同様に $F=0$ 付近で温度が極小となる傾向が見られる。ただし、Fig. 6 と比較するとレーザパワーが高いにもかかわらず全体に低温であった。これは低次モードに較べて高次モードの方がパワー密度が低いためである。

3.3 電子密度

分光実験では、Ar のスペクトル線は弱く、イオン線は検出されなかった。局所熱平衡にあるプラズマにおいて、原子線 FeI とイオン線 FeII の強度比が既知のとき、電子密度は次式により求められる¹⁹⁾。

$$N_e = 4.83 \times 10^{15} \frac{I_g^+ A^+ \lambda}{I^+ g A \lambda^+} T^{3/2} \exp\left(\frac{E - E^+ - V}{kT}\right) \quad (2)$$

ここで、 V はイオン化エネルギー、 E は励起準位、 T は温度、 I はスペクトル強度であり、Fe のみの平衡を考えた。ただ

し、添字+はイオン種、添字のないものは原子種の各値を示す。本研究では FeI (285.18 nm) と FeII (292.659 nm) の時間平均した強度から平均電子密度を求めた。

Fig. 10 は平均電子密度 N_e と焦点位置 F の関係を示すが、電子密度は $F=0$ 付近で極小となり、温度とほぼ同じ傾向を示すことがわかる。その値は $N_e = (1 \sim 4) \times 10^{16}/\text{cm}^3$ の範囲にある。

3.4 温度と電子密度の半径分布

以上の解析ではプラズマブルームの中心から周辺までの平均スペクトル強度を用いたため、温度、電子密度ともに半径方向の平均値である。そこで以下ではスペクトル線強度の半径分布を求めるためにアーベル変換¹⁹⁾を行い、各半径位置でボルツマンプロットにより温度を求めた。実験はレーザパワー=2.5 kW (高次モード)、1.4 m/min、 $F=1$ mm の条件で行った。

Fig. 11 のように溶接進行方向と逆方向に y 座標をとり、各 y 位置でスペクトル強度 $I(y)$ を測定した。 y 方向の測定間隔は 0.25 mm とし、 $y > 0$ の領域のみを解析した。ただし、解析を単純化するため測定域では温度分布が軸対称をなすと仮定した。

アーベル変換は 367.736~376.719 nm の波長域の 6 波長について行ったが、Fig. 12 に $\lambda=376.554$ nm ($E_n=52655 \text{ cm}^{-1}$) と 381.584 nm ($E_n=38178 \text{ cm}^{-1}$) での $I(y)$ の測定値を示す。両波長ともに中央部が最も高い分布が見られる。これらをアーベル変換して求めた半径方向のスペクトル強度 $\epsilon(r)$ を Fig. 13 にプロットした。 E_n の高い 376.554 nm では中心部の強度が最大となるのに対し、 E_n が低い 381.584 nm では中心付近が周辺部よりも強度が低いことがわかる。そのためボルツマンプロットの直線の勾配が小さくなり、中心部では高温となることがわかる。

このようにして得られた局所的なスペクトル強度をボルツマンプロットし、各半径で求めた温度を Fig. 14 に示す。図より温度は半径約 0.5 mm より 2.5 mm にわたってほぼ一定で、その値は 8000~8500 K と Fig. 9 に示す平均値とほぼ一致している。しかし、レーザビームが通過する中心付近の狭い領域では約 9500 K と周辺に較べて 1000~1500 K も高い値を示した。

同様にアーベル変換によって FeI (285.18 nm) と FeII (292.659 nm) のスペクトル強度の半径分布を求め、それ

Fig. 11 Illustration of geometrical relationships between variables in Abel transformation.

Fig. 12 Lateral distribution of spectral intensity integrated along x-axis at (a) 376.554 nm and (b) 381.581 nm.

Fig. 13 Radial distribution of spectral intensity calculated by Abel transformation. (a) 376.554 nm, (b) 381.581 nm

らを Eq (2) に代入することにより、電子密度の半径方向の分布を求めた。その結果を Fig. 15 に示すが、電子密度は中心部が高く周辺部で平坦となり、温度分布とほぼ同じ傾向を示した。平坦部の電子密度は $N_e = (2 \sim 5) \times 10^{16} / \text{cm}^3$ であり、別に測定した平均値とほぼ対応している。しかし、集光ビームが通過する中心部では約 10^{17} cm^{-3} と、周辺部に比べて一桁近く高いことがわかった。

3.5 プラズマとレーザービームの相互作用

レーザービームの周波数がプラズマ周波数より十分に高いとき、吸収係数は次式で示す逆制動輻射の式²⁰⁾で与えられる。

$$\beta = \frac{4}{3} \left(\frac{2\pi}{3kt} \right)^{1/2} \frac{N_i N_e k Z^3 e^6}{h c m^{3/2} \nu} \left\{ 1 - \exp \left(- \frac{h\nu}{kT} \right) \right\} \quad (3)$$

ただし、 Z = 平均電荷、 ν = レーザの周波数、 k = ボルツマ

Fig. 14 Radial temperature distribution in plasma plume induced in laser welding steel sheet (2.5 kW : multi-mode, 1.4 m/min).

Fig. 15 Radial distribution of electron density in plasma plume induced in laser welding steel sheet (2.5 kW, multi-mode, 1.4 m/min).

ン定数, h = プランクの定数, c = 光速, T = 温度, $N_{e,i}$ = 電子, イオンの密度である。CO₂ レーザ ($\nu = 2.83 \times 10^{13}$ Hz) では Eq (3) は次のように書ける。

$$\beta \approx 2.21 \times 10^{-29} \frac{N_e^2}{T^{3/2}} \quad (4)$$

これに $T = 9500$ K, $N_e = 10^{17}/\text{cm}^3$ を代入すると, $\beta \approx 0.24 \text{ cm}^{-1}$ が得られる。このとき入射ビームの強度がその $1/e$ に減衰する距離 $1/\beta$ は約 4 cm であり, 本研究でのプラズマブルームの高さはこれより遙かに小さい。

いま, 吸収係数 β のプラズマをレーザビームが距離 z 進むとき, 吸収される場合は次式で与えられる。

$$R_{\text{Loss}} = 1 - \exp(-\beta z) \quad (5)$$

3.1項で述べたようにプラズマは試料面にごく近い部分のみが高温であり, これを $z = 0.5$ mm であると見積もると, プラズマ中での吸収損失 R_{Loss} は約 1.2% と推算される。このようにプラズマ中での吸収損失の割合は小さいので, ビード形成に与える影響は無視することができる。しかし, 吸収ビームによるプラズマ自体の加熱は, 無視できない。いま, 1.2% の吸収ビームが直径 1 mm, 高さ 1 mm の Ar ガスを単純に加熱すると仮定すると, 数十 μs で 1000 K 以上の温度上昇が計算される。正確な温度上昇を求めるには熱伝導, 輻射損失などを考慮する必要があるが, いづれにしてもビーム吸収によるブルームの温度上昇は無視できないことがわかる。集光レーザビームが通過する狭い領域で温度と電子密度が高いのは, このように逆制動輻射による吸収によることがわかった。

このようにビード形成に影響しない程度のビーム吸収でも, プラズマの加熱には十分に大きい。そのため, レーザビームの集光条件, 試料面からの反射, キーホルの形態などがプラズマ温度に反映すると考えられる。このことは何らかの方法でプラズマの温度または発光状況などを検出できれば, インプロセスでレーザ溶接の状況がモニタリングできることを意味している。

4. 結 言

CO₂ レーザにより軟鋼 (SPCC) 薄板の溶接時に誘起されるプラズマの時間平均した分光を行い, 温度, 電子密度と焦点位置の関係ならびにその半径方向分布を求めた。また, プラズマの発光状態を検出することにより溶接状況をモニタリングできる可能性があることがわかった。得られた結果は次のように要約される。

(1) プラズマの温度ならびに電子密度の平均値は, 焦点が試料面付近にあるとき極小となり, 貫通溶接限界付近で高い値となる。

(2) 局所的な温度と電子密度は, レーザビームが通過する領域付近で高い値となり, その周辺では平坦な温度分布となる。ビーム中心軸付近では周辺部に較べて, 温度は 1000~1500 K, 電子密度は 1 桁近く高かった。

(3) プラズマ中では逆制動輻射により 1% 程度のビーム吸収を生じた。この程度のビーム吸収はビード形成に与える影響は無視できるが, プラズマ温度を変化させるのに十分な強度である。

参 考 文 献

- 1) H. Sasaki et al: A CO₂ Laser Welding Sysem for Sheet Steel Production Line, Trans. Iron and Steel Institute of Japan, Vol. 2b, No. 5 (1986) 491-495.
- 2) T. Atsuta et al: A Study of CO₂ Laser Welding with Filler Wire, 4th CISFFEL (1988) 347-352.
- 3) 広崎ほか: ビームスキャナーのレーザ溶接への応用, 高温学会誌, 15巻 6号 (1989) 286-293.
- 4) レーザ熱加工研究会 WG 編: レーザ加工機のビーム計測と光学部品の評価技術, セイエ印刷 (1991).
- 5) 丸尾, 宮本: CO₂ レーザ集光時における ZnSe レンズの焦点距離の変化—高パワーレーザによるレンズの熱誘起光学ひずみ(2)—, 溶接学会誌論文集, 10巻 4号 (1992) 434.
- 6) I. Miyamoto et al: Effects of Misalignment in Focusing CO₂ Laser Beam by Parabolic Mirror, Proc. ICALEO'92 (1993).
- 7) T. Ishide et al: High Power YAG Laser Welded Sleaving Technology for Steam Generator Tubes in Nuclear Power

- Plants, Proc. LAMP'92 (1992) 957-962.
- 8) C. Bagger et al: Process Behavior during High Power CO₂-Laser Welding of Zinc Coated Steel, Proc. LAMP'92 (1992) 553-558.
- 9) E. Beyer et al: Process Monitoring in Laser Materials Processing, Proc. LAMP'92 (1992) 433-438.
- 10) W. Gatzweiler et al: On-line Plasma Diagnostics for Process Control in Welding with CO₂-Lasers, Proc. 1st European Congress on Optics, SPIE Vol. 1020 (1988) 84-95.
- 11) A. Matsunawa et al: Characteristics of Plume Induced by Pulsed Nd: YAG Laser Irradiation and Their Effects on Material Processing, Proc. 3rd CISFFEL (1983) 53-60.
- 12) W. Sokolowski et al: Spectral Study of Laser-Induced Plasma in Welding Process of Steel and Aluminum, Proc. 2nd European Congress on Optics, SPIE Vol. 1132 (1989) 288-295.
- 13) I. Miyamoto et al: Spatial and Temporal Characteristics of Laser-Induced Plasma in CO₂ Laser Welding, Proc. LAMP'92 (1992) 311-316.
- 14) I. Miyamoto et al: Analysis of Thermally Induced Optical Distortion in Lens During Focusing High Power CO₂ Laser Beam, Proc. 3rd European Congress on Optics, SPIE Vol. 1276 (1990) 112-120.
- 15) A. Poueyo et al: Study of Laser Induced Plasma with Continuous High Power CO₂ Lasers, Proc. LAMP'92 (1992) 323-328.
- 16) H.R. Griem: Plasma Spectroscopy, McGraw-Hill, New York (1964).
- 17) C.H. Corliss and W.R. Bozman: Experimental Transition Probabilities for Spectral Lines of Seventh Elements, NBS Monograph, Vol. 53 (1964).
- 18) I. Miyamoto et al: Beam Absorption Mechanism in Laser Welding, Proc. Laser Processing, SPIE Vol. 668 (1986) 11-18.
- 19) W.L. Barr: Method for Computing the Radial Distribution of Emitters in Cylindrical Source, J. Optical Soc. Am., Vol. 52 (1962) 885-888.
- 20) J.F. Ready: Effects of High-Power Laser Radiation, Academic Press (1977) 188.
- ~~~~~