最近のレーザービームの応用技術

② レーザ溶接を考える*

石 出 孝**

Up-to-date Laser Welding*

by Takashi Ishide**

キーワード：レーザー溶接，CO₂レーザー，YAG レーザ，インプロセスモニタリング，
レーザー誘起プラズマ，アルミ合金

1. は じ め に

レーザー加工には溶接，切断，穴あけ，表面処理等がある。このうちレーザー加工機が生産設備として溶接に用いられている割合は，CO₂レーザーで全体の約10%，YAG レーザで約20%である。これは，溶接という現象が複雑で，ユーザ側で独自に加工技術を開発してゆかなければならないという側面があり，このことが他の加工法と比べ溶接の実用化を遅らせている。本稿では，各種レーザーのうち実際に生産手段として用いられているCO₂レーザー，YAG レーザを対象を絞り，レーザー溶接のメカニズム解明状況について述べるとともに，最近の注目すべき溶接プロセスとその実用化状況につきまとめる。

2. 溶接のメカニズム

レーザービームが材料に照射された場合，エネルギー密度が高くなるにつれレーザービームと材料表面の関係は次のように変化してゆく¹⁾。①材料の表面（固体表面）でのビームの反射・吸収 ②材料表面が溶融した状態でのビームの反射・吸収 ③溶融した材料が蒸発し，その蒸発反力でキーホールが生じ，キーホール内でのビームの反射・吸収 ④金属の蒸発量が多くなり，溶接部に生じるレーザーブルーミングの量も多くなった状態でのビームと材料との相互作用に大別できる。以下にその各状態について考えてゆく。

(1) 固体，液体表面でのビームの反射・吸収

CO₂レーザーのように波長が十分長い場合は，材料に対する吸収率はハーゲン・ルーベンスの式に従う。さらに，波長，材料温度に対しては金属材料に対する光の屈折率と減衰係数を求める Drude の方法を延長し，温度依存によるバンド間遷移を考慮した Roberts らの結果に基づき純鉄に対し，ビームが垂直入射した際の解析された結果が示されている²⁾。これにより固体から溶融状態まで

のビームの材料に対する吸収は，表面が理想的な状態であれば大まかな予測はつく。

(2) レーザブルーミングとの相互作用

さらにレーザービームのエネルギー密度があがると，ビーム照射部にはレーザーブルーミング³⁾が発生する。溶接では，照射されたレーザービームはまずこのレーザーブルーミングに入射する。このレーザーブルーミングは一部プラズマとなっており，ここにレーザービームが入射した場合，このプラズマは完全に透明な媒質ではなく，逆制動輻射により入射エネルギーの一部は吸収される。これは，プラズマ中をレーザービームが通過する際に，電子がレーザービームを吸収して加速され，原子または分子と衝突することにより温度を上昇させるもので，電子が減速される際に電磁波を放出する制動輻射と逆の現象である。この逆制動輻射により，ビーム吸収時のプラズマの透過距離に従ってエネルギーは指数関数的に減衰する。ビーム強度が1/eに減衰する距離を吸収長 α と呼び⁴⁾，図1に示すごとくYAG レーザではCO₂レーザーの100倍ほどの電子密度にならないとCO₂レーザーなみの吸収が生じない。また，プラズマはレーザービームを屈折させることも確認されているが通常の溶接では大きな影響はない。

(3) キーホール溶接現象

実際のレーザー溶接では10⁵~10⁶ W/cm²以上のエネル

図1 電子密度とレーザービーム吸収長の関係

*原稿受付 平成8年10月15日

**正 員 三菱重工業(株) Member, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.

図2 高周波予熱レーザ製管法の実用化

ギー密度のビームにより溶融池に激しい蒸発現象が発生し、この蒸発反力により液層は押し下げられキーホールを形成する。キーホールの形状を透過 X 線装置と高速度カメラで観察したり^{5,6)}、キーホール内のプラズマ温度、電子密度を計測したり⁷⁾、さらにキーホール内圧力を計測している例もあり、キーホール内部の状態を正確に知る研究が進められている。現状では、キーホールに入射したビームはプラズマによる吸収をうけつつ、キーホール壁面の溶融金属面で多重反射を繰り返し、キーホール底部まで、ビームが伝送されると考えられている。このようなレーザ溶接のメカニズムをモデル化し、解析する試み⁸⁾も盛んに行われている。

3. 最近の溶接プロセスとその実用化状況

ここでは溶接プロセスで、今後適用化が拡大され、一層検討が進むだろう項目につき述べる。

(1) 発振器出力の増大と実用化拡大

鉄鋼メーカーはこれまで高周波予熱レーザ製管法を開発してきており、25 kW 級 CO₂レーザを国内で初めて実用化している⁹⁾。このプロセスでは外径 508 mm、板厚 16 mm までの鋼管の製造を目的とし、図2に示すように高周波による予熱を行いながらアルゴンシールド雰囲気中でアプセット圧力を調整することにより欠陥発生を押しえた溶接を実用化している。このプロセスでは板厚 15 mm に対し、従来の SAW の3倍以上の高速溶接が可能となっている。一方 YAG レーザでも 3~4 kW クラスのレーザでコア径 0.6 mm の光ファイバが実用可能な高品質ビームが得られる発振器が登場し、今後このような高出力分野での実用化に拍車がかかるものと予想される。

(2) 適用材料の拡大

アルミニウム合金は、軽量で比強度が高く、耐食性に優れリサイクルが容易であることから、自動車、高速船、都市交通システム等の輸送車両に積極的に使われつつある。一方、このレーザ溶接は、材料自体のレーザに対する反射率が高く、熱伝導率も良いため深溶込みを得るのに高いレーザ出力が必要な上、蒸気圧の高い Mg や Zn 等の合金元素が入っていることから、アンダーフィル、ポロシティ、凝固割れも発生し易い。そこでこれらの溶接欠陥防止技術の開発が盛んに行われている。

図3 YAG レーザによる配管全姿勢溶接

アンダーフィルを防止するためのレーザ溶接条件の適正化や割れ発生防止のためのパルス波形制御¹⁰⁾、連続発振、パルス発振ビームの同時利用^{11,12)}等の研究が報告されているとともにポロシティ発生防止のための波形制御¹³⁾も検討されている。

アルミニウム合金のレーザ溶接の実用化は、自動車アルミボンネットヘミング部の 800 W パルス YAG レーザ溶接による低コスト化¹⁴⁾、高い意匠性の要求されるアルミニウム建材の 1 kW パルスレーザによる溶接¹⁵⁾等がある。この他、携帯電話の 2 次電池ケースにも YAG レーザ溶接は実用化されており、今後電気自動車の電池ケースを含めたアルミ合金製 2 次電池ケースの溶接にも実用化が進むものと予想される。

(3) 狹隘、複雑箇所への適用

YAG レーザでは光ファイバによる伝送が可能な上、その高出力化が著しいことから、内径約 17 mm 細管内面からの溶接の実用化に続き、今後各種姿勢での狹隘、複雑箇所への適用が益々進むと考えられる。図3には 2 kW 級の YAG レーザで肉厚 3 mm のステンレス製配管の全姿勢溶接を行っている状況¹⁶⁾を示す。この種のプロセスでは従来の TIG 溶接に代わり、肉厚 10 mm 程度までを対象とした狹隘箇所での実用化が進んでゆくものと考えられる。

(4) 溶接品質管理方法の充実

レーザ溶接はその施行能率が高いがゆえに一度不具合が発生すると大きな損害が発生しがちである。そこでこの損害を最小限に止めるための溶接品質のインプロセス

(A) プラズマ発光モニタリング (CO₂レーザー)

(B) 溶接部発光モニタリング (YAGレーザー)

図4 溶接インプロセスモニタリングの実用化

モニタリング技術の開発が成され、一部実用化が開始されつつある。CO₂レーザー溶接では図4 (A) に示すごとくプラズマの発光を様々な角度よりモニタすることにより自動車での薄板突合せ溶接で、アンダーフィル、穴あき欠陥の発生をモニタしている¹⁷⁾。YAGレーザー溶接では図4 (B) に示す17本のモニタ用ファイバにより、溶接部の発光、レーザーの反射光を同時にモニタすることにより原子力プラント蒸気発生器伝熱管の溶接で、溶込み、不整ビードの発生、光学部品劣化をモニタする¹⁸⁾とともに不具合発生原因の予測を行う知的監視システムの開発も成されている¹⁹⁾。

4. 今後の展開

(1) レーザ発振器

レーザー発振器については、CO₂レーザーでは20~50 kWクラスのレーザーが鉄鋼、重工分野である程度導入が進むものと考えられる。一方、YAGレーザーでは高出力のLD励起のスラブYAGレーザー、さらには高出力LDの実用化研究が進み、高効率な発振を目指す発振器開発が行われてゆくものと考えられる。いずれにしても現状の発振器のイニシャルコストが下がることが実用化対象が増える近道となるのは間違いない。

(2) 光学系

ミラー伝送系では、YAGレーザー並のフレキシビリティを有する安価なレーザーロボットの出現が適用対象拡大の重要なポイントのひとつと考えられる。一方、YAG

レーザーではその高出力化にともない、高いピーク出力でも十分余裕を持ちビーム伝送が可能な耐光強度の高い光ファイバの開発が必要である。また溶接用光学系で光学系のコンパクト化、標準化を進めることにより光学系のコストを下げる努力が図られてゆくと考えられる。

(3) 溶接プロセス

溶接プロセスの実用化には加工品質の安定性が重要である。これを目的としたダブルビーム、ツインビーム化が検討されているとともに、従来アークプロセスとの複合化も検討されている²⁰⁾。さらにインプロセスモニタリングではその高度化が一層図られるものと考えられる。

いずれにせよ、レーザー加工技術の発展には、従来プロセスにとらわれ過ぎないこと、発振器メーカ、光学機器メーカ、エンドユーザが協力し、機器、プロセス開発に取り組んでゆく必要があると考える。

参考文献

- 1) F. Dausinger et al.: On coupling mechanisms in laser process, Proc. 5th Conf. Laser in Manufacturing (1988, Sep.), p. 177~p. 185
- 2) F. Dausinger et al.: Energy Coupling Efficiency in Laser Surface Treatment, ISU International, Tokyo (1993, Oct.)
- 3) A. Matsunawa: Physical phenomena and their interpretation in laser materials Processing, Proc. ICALEO (1990), p. 313~p. 324
- 4) S. Chiang et al.: Light material interaction in laser material processing, SPIE Vol. 1031 (1988)
- 5) 阿部：レーザービームによる深溶込み溶接現象，第26回レーザー熱加工研究会論文集 (1991)，p. 65~p. 70
- 6) 片山 他：レーザー溶接時の欠陥生成機構の解明と防止 (第2報)，本会講概第59集 (1996)，p. 78~p. 79
- 7) R. Fabbro et al.: Spectroscopic studies of iron plasmas induced by continuous high power CO₂ laser, laser Assisted Processing II, SPIE Vol. 1279 (1990), p. 118~p. 127
- 8) T. Ohji et al.: A Mathematical Model for Laser Welding with Keyhole, ICALEO (1994)
- 9) M. Ono et al.: High Power Laser Applications for Steel Industry, Proc. ECLAT (1996), p. 115~p. 122
- 10) 松縄 他：波形制御によるアルミニウム合金のレーザー溶接割れの防止，本会講概第53集 (1993)，p. 120~p. 121
- 11) S. Aruga et al.: Efficient and High-Quality Overlap Welding of Car-Body Aluminum Alloy Metal Sheets with High Power Nd: YAG Lasers by Flexible Fiber Beam Delivery, Proc. LAMP (1992), p. 517~p. 522
- 12) M. Onozuka et al.: Remote Welding and Cutting Techniques for Fusion Experimental Reactors, 16th Symposium on Fusion Engineering (1995), p. 276~p. 269
- 13) 松縄 他：アルミニウム合金のYAGレーザー溶接性に及ぼすパルス波形の影響，本会講概第51集 (1992)，p. 142~p. 143
- 14) 福岡：アルミボンネットへのレーザー溶接の適用，第30回レーザー熱加工研究会論文集 (1993)，p. 245~p. 251
- 15) 梅田 他：パルス式YAGレーザーによるアルミニウム合金溶接の実用化，第36回レーザー熱加工研究会誌，Vol. 2, No. 3 (1995)，p. 143~p. 147
- 16) 富田 他：高出力YAGレーザーによるステンレス配管全姿勢溶接の開発，本会講概第58集 (1996)，p. 120~p. 121
- 17) 森 他：自動車部品のプラズマモニタリング，第33回レーザー熱加工研究会論文集 (1994)，p. 71~p. 75
- 18) T. Ishide et al.: High Power YAG Laser Welding and Its In-process Monitoring Using Optical Fibers, Proc. ECLAT (1992), p. 81~p. 86
- 19) 穂坂 他：ニューラルネットと多変量解析によるレーザー溶接の知的監視，日本機学会論文集，58巻554号(1992-10)，p. 143~p. 148
- 20) E. Beyer et al.: New Aspects in Laser Welding with an Increasing Efficiency, Proc. ICALEO (1994), p. 183~p. 192