大型部材に対する高信頼性レーザー溶接技術の開発

安田 耕三, 室 幹雄

川崎重工業(株) 関東技術研究所 (〒278-8585 千葉県野田市二ツ塚118)

High Performance Laser Welding Technology for Heavy Industries

Kozo YASUDA and Mikio MURO

Kawasaki heavy industries Ltd. Kanto Technical Institute, 118 Futatsuzuka, Noda, Chiba 278-8585

(Received May 21, 1999)

High power CO₂ lasers with an output power up to 45 kW are available for the heavy industries with thick material welding today. These systems offer a comparatively low beam quality with high price and operating costs. On the contrary a flexible high power laser welding system up to 6 kW with optical fiber like Nd:YAG laser becomes possible using for heavy industries. The use of a high power Nd:YAG laser can lead to better material processing for the thick section. For the thick material high performance welding are required but there are sometimes difficulty to remove the welding defect. This paper reviews laser processing for high performance welding and shows the results of research for a defect free welding system which is carried out in the *Advanced Photon Processing and Measurement Technology Project*.

Key Words: Laser welding, Welding defect, Keyhole, Material processing, In-process monitoring

1. はじめに

レーザー技術は、日進月歩の進展をしているが、レーザー溶接加工技術に関しては、適応上の多くのハードルが存在しており、期待されている程広く採用されていないのが現状である。特に加工の板厚や溶接速度を制限するレーザー出力や、レーザーの安定性、ビーム品質等の点で解決すべき課題が多く、これまでその発展が阻害されてきた。最近になってようやく炭酸ガスレーザーの高出力で信頼性の高い装置の出現や、YAGレーザーの高出力化の開発が本格化するに及んで、レーザー溶接装置が、大型の部材の溶接や板厚の厚い溶接のツールとして用いられるようになってきた。レーザー装置の安定性が確保されるようになると、次には適用の信頼性を向上させる加工ソフトの確立や、加工の品質を保証するためのインプロセスモニタリング技術、加工状態をモニタリングして最適な加工条件で溶接するための適応制御システムの構築等が必要となってくる。現在は、レーザー溶接技術が、幅広い産業分野に適用されるかどうかの過渡期にあるように思われる。

本解説では、大型部材や厚板部材の溶接加工の現状と課題および可能性について述べるとともに、現在進行している通産省のプロジェクトである「フォトン計測・加工技術開発」の高品位レーザー溶接加工技術開発の現状について報告する。

2. レーザー装置の現状

2.1 レーザー装置の大出力化の現状

鉄鋼業を中心にして、工程の連続化を目指した板継ぎ工程やパイプ造管分野には、大出力の炭酸ガスレーザーの導入が進んでいる。Fig.1には、高出力炭酸ガスレーザーの開発と鉄鋼業への導入の状況を示したものである^{1,2)}。従来10kWクラスの炭酸ガスレーザー装置が導入されていたが、ここ数年に装置の大出力化がはかられ、25kW、45kWさらには60kWクラスのレーザー装置の導入が検討されるように

Fig.1 History of high power CO₂ laser.

なっている。これは厚板を高速に溶接してラインの板継ぎを行い連続化して板を流すシステムや溶接管の製造では、溶接結果が良好であることはもちろん、溶接速度が速いことが必須の条件となるためである。そのために一部の鉄鋼メーカーでは、必要なレーザー出力を確保するために大出力の装置の開発までも手がける場合がある。

パイプの溶接分野では、ステンレス管の溶接に25kWクラスの炭酸ガスレーザー溶接装置が製鉄分野で導入されており、従来の溶接法では達成出来なかった溶接速度の高速化、溶接部の高品質の確保の要求をクリアしている³⁾。

レーザー出力の増大に伴って、レーザービームの品質は、低下の傾向にある。Fig.2は、レーザー出力とビーム品質の関係を、 $\text{mm} \cdot \text{mrad}$ で表示したものである。レーザー出力が増大するとビームの直径が大きくなること、及びビームの発散角が大きくなるため、直径と発散角で表示される値が大きくなりビーム品質は低下する。ビーム品質の低下は、加工部分での収束ビームサイズが小さくならない事を示すため、レーザービームの特徴である収束性の良いビームとして使えない。また溶接時に発生するプラズマブームの発生やスパッタから、加工光学系を守るために加工光学系の焦点距離を長くしたいという要求を満たす事が難しくなる。従って大出力化でも、ビーム品質の高いレーザー装置の開発が求められる。

現在炭酸ガスレーザー装置では、20kWクラスのレーザー出力に対して高ビーム品質のレーザーが開発($M^2=2$)されており、市販されるようになった。またYAGレーザーでは4kWクラスでは、 $100\text{mm} \cdot \text{mrad}$ のビーム品質のものが市販されており、さらに6-7kWクラスの出力で同じビーム品質を確保し、0.6mmの光ファイバに導光可能な装置の開発も行われており、市販される様になっている⁴⁾。これらのビーム品質の高いレーザーの出現により、薄板の高速溶接や、厚板の溶接への適用の可能性がさらに大きくなってきたと考えられる。

現在米国では、プレジジョンマシナリプロジェクトでLD励起の3.5kWクラスの高品位YAGレーザーの開発⁵⁾が、EUではレーザー2000でLD励起の5kWクラスのレーザーが⁶⁾、

さらに現在進行中の我が国のプロジェクトでは、YAGレーザーで10kWクラス、小型、高効率の目標を掲げて開発されており、LD励起方式を採用していることから良好なビーム品質が期待できる⁷⁾。これらのプロジェクトで開発されるレーザーが市販されるようになる事を考えるとますます、広い産業分野へのレーザー溶接の適用が、現実味を帯びてくる。

2.2 インプロセスモニタリング技術の現状

レーザー装置の大出力化にともない、厚板の溶接分野へのレーザー溶接の適用も現実的となるが、溶接部の品質保証のシステムとしてインプロセスのモニタリング技術が重要となってくる。厚板溶接では、溶接部に発生する欠陥の発生頻度が薄板に比べて高くなる傾向にある。溶接時に発生する欠陥の除去手段としては、照射時のビーム形状の調整、タンデムビームの採用、波形制御パルスの採用等種々の手法が検討されているが、溶接時の欠陥発生を的確にモニタリングする手法が開発されないと、インプロセスでの本質的な品質保証システムは構築出来ない。レーザー加工現象と大きな相関性のあるモニタリング因子が特定出来れば、これをフィードバック因子として利用し、インプロセスの加工システムの構築が可能となる。自動車分野などの薄板分野では、一部プラズマの発光強度分布をモニタリング因子として、溶接部の品質記録として活用するシステムが採用されている⁸⁾。また原子炉の蒸気発生器の補修方法としてYAGレーザーを使った遠隔補修溶接のモニタリングとして、溶接加工部の温度分布の計測や、特定波長の光のセンシング情報をもとに、良好な溶接を保証するシステムが採用されている例がある⁹⁾。さらにドイツのフランフォーファー研究所のグループでは、発光するプラズマ信号をモニタリングして、熔融深さをモニタリングできるシステムを開発し、熔融深さのコントロール手法として利用している。これらのモニタリング手法がさらに高度化し、溶接欠陥との相関性が明らかになれば、欠陥発生を事前に予想し、加工条件を変更するようなシステムの構築も可能となると考えられる。

2.3 加工システムの変遷

レーザー装置の出力が向上し、厚板対応が可能となると、大型部材への適用が可能となる。レーザー加工を行うために炭酸ガスレーザーではこれまでビームのハンドリングにミラーを導光手段として用いてきた。しかしながら、フレキシブルなビームハンドリングに関しては、ファイバ導光が大出力レーザーで実現できれば遙かに使いやすい。Fig.3には、レーザー出力、ビーム導光と加工システムの変遷のイメージを示す¹⁰⁾。ファイバ導光可能なYAGレーザーの出力が大幅に向上し、ビーム品質も良いものが開発され始めている現在は、加工システムとして従来のミラー導光で実現されてきたシステムを大きく乗り越えて、新しいロボットと組み合わせられたフレキシブルな加工システムが構築されていく丁度過渡期にあると考えられる。さらに装置の小型化が進めば、半導体等の固体レーザーによる直接加工の分野も開ける事が予想される。加

Fig.2 Beam quality vs. laser power.

Fig.3 Schematic transfer of laser manufacturing system.

工システムが正常に作動するためには加工光学系適正化が必要であり、フレキシブルな加工システムとしては、大出力での加工光学系をいかに安定して作動させるかが最後の課題となるものと考えられる。

3. 高品位レーザー溶接システムの 開発研究状況^{11,12)}

3.1 研究の概要

レーザーにより厚板を高品位に溶接するためには、加工パラメータと溶接部の品質との関係を明らかにする必要がある。レーザー溶接では、溶接時に発生するガス及び金属プラズマとレーザーの相互作用が複雑であり、これが溶接中に発生する溶融池のキーホール現象と関連がありレーザー加工現象を複雑にしている。特に厚板を対象とした場合には、溶融池内部のキーホールそのものの観察が難しく、溶接欠陥の発生のメカニズムの把握も困難を極める。従って溶接部の加工現象を明らかにすることが、高品位溶接の実現には不可欠となる。そこでフォトン計測・加工技術開発の研究では、まずレーザー加工現象を明らかにするために、高速度ビデオカメラ及び大阪大学接合科学研究所で開発されたマイクロフォーカスX線ビデオカメラのシステムを用いて同時観察する事で、プラズマの発生状況と溶融金属内部の状況を明らかにし、溶接時に発生する欠陥の発生状況に対するメカニズムを解明するとともに、加工現象の数学的モデルを構築し、加工現象をシミュレーションできるソフトの開発を行っている。また加工現象を把握する事で得られる知見に基づいて、欠陥の発生を防止する手法を開発し、インプロセスモニタリング因子をフィードバック信号として、シミュレーションで得られる適応加工条件データベースと比較することにより、常に最適状態で加工を実現できる溶接加工システムを実現し、本プロジェクトの数値目標である板厚30mmの鋼、板厚20mmの溶接を1m/min以上の速度で実施しようとするものである。Fig.4に開発のイメージの概要を示す。これらの目標を実現するために、当社は大阪大学接合科学研究所、四

Fig.4 Schematic diagram of welding system.

国工業技術研究所、(株)レーザー応用工学研究所との共同研究を行っている。以下にこれまでに得られた主な成果について解説する。

3.2 研究内容

レーザー溶接部の高速度ビデオカメラ及びX線ビデオカメラの同時観測により、溶接部の欠陥発生の現象に対して、間欠的なキーホール形成が欠陥の発生を抑えている事が明らかになった。溶接部に発生する空洞状欠陥であるポロシティーは、キーホール先端部及び中間部分から激しくバブル状態で発生している事が観測される。これは金属蒸気の間欠的な激しい蒸発現象にともない、溶融池の金属が押されて空洞を生じ、この空洞が溶融池内部から離脱出来ないときに空洞状欠陥ポロシティーとして金属内部にトラップされる現象として理解される。間欠的なポロシティーの発生は数十msecオーダーの現象であり、キーホールから吹き出すプラズマの周期も数十msecオーダーの現象である。炭酸ガスレーザーを用いて窒素雰囲気中でステンレス鋼、炭素鋼、アルミ合金を溶接したところ、発生するプラズマによるレーザー吸収現象が間欠的に生じ、結果として溶接母材にレーザーの照射が間欠的に行われ、間欠的なビーム照射が、キーホール形成を間欠的にし、結果として溶接欠陥の発生が防止されている事が観測された¹³⁾。このことは、間欠的なビーム照射条件を選定してやれば、溶接時に発生しているポロシティーを除去できる可能性を示したものであることと解釈する事ができる。間欠的なビーム照射により溶接部の欠陥が各種材料に対して減少している状況を示した高速度X線観測の結果から、間欠的なビーム照射の時間は数十msecであり、照射時間に最適値が存在するものと考えられる。今後は、間欠的なビーム照射による欠陥の除去効果を明らかにする実験を行う予定である。

インプロセスのモニタリング因子として、直接キーホール開口状態をモニタリング出来る観測手法を試みている。Fig.5は、キーホールに直接グリーンのレーザービームを照射し、その反射信号からキーホール開口状態を検出する装置の概要を示したものである¹⁴⁾。画像処理によるキーホール開口状態の計測手段も考えられるが、情報処理

Fig.5 Schematic diagram of keyhole measuring method.

の時間がかかるため、msecオーダーで変動するキーホール状態を検出する手法としては難しいと思われる。直接ビーム照射による方式でキーホール状態の動きを動的にとらえる事が出来れば、フィードバック信号として利用できると考えている。現在反射信号と高速度ビデオの状態を比較して、検出信号の有効性を確認中である。

板厚30mmの鋼を溶接するためには、最終的に1 μ mの波長でレーザー出力が17-20kWを想定しているが、現在は10kWのよう素レーザー(波長1.315 μ m)を用いた溶接を行っている。Fig.6にレーザー出力8.5kWの場合の溶接結果の一例を示す。溶接雰囲気ガスをヘリウム、アルゴン、窒素の3種類に変化させて、溶接結果を見ると、窒素の場合の雰囲気ガスの場合に欠陥の発生が最も少なくなっている事が解る。溶接中のプラズマの発生状況は、炭酸ガスレーザーの場合に比べて極端に少なく、加工部のプラズマの輝度は低い。Fig.7は、板厚10mmのステンレス鋼を窒素雰囲気中で速度1.2m/minで溶接したときの断面マクロを示したもので

ある。溶接部に欠陥の発生はなく、完全溶け込みの良好な溶接部が得られている事が解る。この程度の板厚に対しては雰囲気ガスを調整する事で欠陥の無い良好な溶接が可能である。さらに板厚が厚くなった場合にはキーホールの制御が必要になると考えている。

高反射材料であるアルミ合金のレーザー吸収率を高める試みとして、紫外レーザーとYAGレーザーのハイブリッドプロセスを検討している。紫外レーザー照射によって母材表層に形成される高密度プラズマが持続している時間の間は、YAGレーザーを良く吸収し、プラズマに吸収されたレーザーエネルギーが、アルミ合金表面に吸収され結果として溶融能力を10%程度増加させることが確認できた。今後は、さらに吸収率を高める工夫を行った試験を実

Fig.6 Characteristics of penetration depth by Iodine laser.

Laser type	Iodine laser
Laser power	8.5kW
Shielding gas	N ₂
Material	SUS304,t10

Cross sections of laser welded stainless steel

Fig.7 Welding example of stainless steel by full penetration.

施する予定である。

さらに溶接時の現象をシミュレーション出来る熱流動解析を用いた2次元の数学モデルを構築し、レーザー溶接の過渡現象をシミュレーションし、実際の溶融実験との比較を行った。今後は、3次元のシミュレーションモデルを構築し、より現実に近いレーザー溶融のシミュレーションを実現する予定である。

4. あとがき

厚板を対象としたレーザー溶接について、レーザー出力、ビーム品質、モニタリング等の観点から現状技術を検討した。これらの課題に基づき、現在行われているフォトン計測・加工技術開発の高品質レーザー溶接技術の開発研究の内容について述べた。レーザー溶接の広い産業分野への適用は、これら技術の開発が起爆剤となって今後拡大する可能性が高いものと思える。ファイバ導光可能な高品質で高出力レーザーの開発が実現されたとき、高品質溶接を行える加工ソフトと結合する事により、これまでとは異なった新しい適用の展開がもたらされると信じている。

謝 辞

本研究は、産業科学技術研究開発制度に基づく「フォトン計測・加工技術」プロジェクトとして、通商産業省、新エネルギー産業技術総合開発機構の支援のもと、(財)製造科学技術センターの付属機関であるフォトンセンターからの委託を受けて行ったものであり、関係者各位に深く感謝します。

参考文献

- 1) 南田 勝宏：溶接技術 **46** (1998) 91.
- 2) 辻 正和：レーザー熱加工研究会誌 **6** (1999) 18.
- 3) 小野 守章：第41回レーザー熱加工研究会論文集 (1997) p.151.
- 4) M. Bea and J. Raupach: レーザ熱加工研究会誌 **6** (1999) 24.
- 5) L. Marabella: *Proc. The 2nd Symposium on Advanced Photon Processing and Measurement Technologies* (1998. 11) p.70.
- 6) R. Poprawe and P. Loosen: *Proc. The 2nd Symposium on Advanced Photon Processing and Measurement Technologies* (1998. 11) p.80.
- 7) 松野 建一：第2回フォトン計測・加工技術シンポジウム講演集 (1998. 11) p.12.
- 8) 森 清和：溶接技術 **45** (1997) 92.
- 9) 石出 孝, 名倉 保身, 稲坂 重孝, 長島 是：第27回レーザー熱加工研究会論文集 (1992) p.123.
- 10) 安田 耕三：光技術コンタクト **34** (1996) 514.
- 11) 安田 耕三：第一回フォトン計測・加工技術シンポジウム講演集 (1998) p.15.
- 12) 安田 耕三：レーザー熱加工研究会誌 **6** (1999) 39.
- 13) 瀬戸 直樹, 水谷 正海, 片山 聖二, 松縄 朗：溶接学会全国大会講演概要 No. 63 (1998) p.220.
- 14) 上向 賢一, 井上 尚志, 安田 耕三, 室 幹雄, 松縄 朗：溶接学会全国大会講演概要 No. 64 (1999) p.44.

レーザーワード

高品位レーザー溶接システム

(high performance laser welding system)

インプロセスモニタリング等のセンサー機能を持ち、レーザー溶接状態を監視しつつ最適な溶接条件で行ったレーザー溶接システム。従来の溶接法では、溶接した結果が良好に溶接されたかどうかの判断は、溶接後の非破壊検査や破壊検査等でないと確認できなかったが、インプロセ

スのモニタリングを行うことで最適状態の溶接が実現できていることを、溶接しながら保証するシステムの構築が可能となる。溶接した継手性能が良好で、特に厚板を対象とした溶接に採用されるようになると考えられる溶接システム。
(安田 耕三)

超微粒子 (ultrafine particles)

粒径が小さいがためにバルクとは異なる物性や特性を示す微粒子。その粒径は、厳密には材料種と着目する物性ごとに異なるが、概ね数nmから数百nmの範囲になる。これより小さな、原子数千個以下の微粒子は、概念的に、細分化されたバルクというより原子の集合体と捉える向きがあり、クラスターとも呼ばれる。物理的製法としては、ガス中蒸発法、ガス中レーザーアブレーション法、同時スパッタ法などが知られている。化学的製法としては、溶液(コロ

イド)法が中心となる。歴史的には、Maxwell-Garnetによるステンドグラスの発色機構の解析、Frölichによるアルカリハライドの赤外表面波モードの解析、久保 亮五による久保効果の予言、などが有名である。実用上の強保持力・残留磁化の強磁性体超微粒子の開発などを経て、最近では非線形光学効果やIV族半導体からの常温可視発光など、より活性的な素子機能を期待した研究が注目されている。

(吉田 岳人)