第Ⅱ部 溶接・接合工学の最近の動向

II 溶接・接合プロセスとシステム化技術

2. 高エネルギービーム加工

片 山 聖 二*

High Energy Beam Processing

by KATAYAMA Seiji*

キーワード：レーザー加工，レーザー溶接，電子ビーム加工，リモート溶接

2.1 概要

高エネルギービーム加工として、主に、レーザーと電子ビームを利用する加工を扱うが、最近では、レーザー加工の研究開発と実用化例の報告が多い。また、加工には、穴あけ・切断などの除去加工、溶接・ブレージング・ソルダーリングなどの接合加工、表面焼入れ・クラッディングなどの表面改質加工などがあるが、主に、レーザー加工、特にその中のレーザー溶接について報告する。

レーザーや電子ビーム溶接は、システム化・自動化・省力化が容易であり、各種製品や構造物の高品質・低変形・高速・深溶込みの接合法として認められている。特に、レーザー溶接は、自動車や鉄道車両、船舶、橋梁などの重工業、電子・電機・産業機器など、種々の産業分野に利用されている。最近、ファイバーレーザーとディスクレーザーなどの固体レーザーにおいて、高パワー化・高ビーム品質化・高輝度化が図られ、利用が拡大している。一方、電子ビームは、局所真空溶接や多点瞬時照射溶接、表面改質分野への適用・展開が図られている。

2.2 レーザ加工（特に、レーザー溶接）の実用化動向

レーザー加工において、穴あけでは、金属およびプリント配線基板に対して、それぞれパルス YAG レーザおよび CO₂ レーザまたはエキシマレーザーによる超高速の穴あけが実用化されている。最近では、金属材料に対してパルス YAG レーザと放電加工との併用による高速で高品質な穴あけがトライされ、また、種々の材料に対して、ピコ秒レーザーやフェムト秒レーザーなどの極短パルスレーザーによる高品質な穴あけが検討されている。

レーザー切断では、鉄鋼材料の薄板から厚板まで CO₂ レーザによる高品質な切断が確立されている。一方、最近では、高輝度なファイバーレーザーやディスクレーザーによる薄板高速切断での優位性が強調され、CO₂ レーザ切断法との競争が始まっている。また、固体レーザーによるリモ

ート切断も注目され、CFRP をはじめとして各種材料の薄板切断がトライされている。

表面改質加工では、高効率な半導体レーザーによる鉄鋼材料の表面焼入れやニッケル (Ni) 基合金のクラッディング（3次元造形や補修溶接）の報告が多く、実用化が始まっている。

レーザー溶接は、今までに、電池ケースや電装品から自動車用のテラードブランク材やルーフの溶接まで広範囲に利用されてきている。最近のレーザー溶接の研究開発と実用化は、特に、高速・高生産性の接合、深溶込み・高品質な接合、微細・低入熱・高意匠性の接合、高機能接合部の作製などの観点から増加している。

現在、高速・高生産性の接合法として最も注目されるのがリモート溶接・スキャナ溶接である。リモート溶接には、スキャナ（ミラー）を動かすタイプと動かさないタイプがある。特に、ミラーを動かすタイプでは、レーザーの加工点を超高速に移動させることができ、ロボット等の機械動作による移動のロスタイムを画期的に削減できる。初期には、スラブ型の高輝度炭酸ガス (CO₂) レーザによるリモート溶接が、ボディパーツや薄鋼板のインパネに適用されたが、最近の主流はビーム品質の向上したファイバーレーザーやディスクレーザーなどの固体レーザーに変わりつつある。日本でも、ファイバーレーザーリモート溶接システムが自動車部品の量産に適用されている¹⁾。なお、リモート溶接では、レーザー誘起プラズマが大きく成長すると、試料上方に屈折率の小さい領域が形成され、レーザービームはそれらとの相互作用により、屈折したり、焦点位置が下方へ移動したりして、熔融部形状が変化して溶込み深さが浅くなることがある。このため、良好な溶接部を作製するためには、ファンやブローアを用いてプラズマとそれに伴って形成する溶接部上方の低屈折率領域を抑制する対策が必要である^{2) 3)}。

最近、自動車のハイブリッド化、電気駆動化が加速され、軽量化の観点から、アルミニウム合金接合技術の開発が再注目されている。今後、亜鉛めっき鋼板や高張力鋼だけでなく、アルミニウム合金の高速接合技術として、高品質レーザーによるリモート／スキャナ溶接技術の確立が必要となる。

近年、ファイバーレーザーおよびディスクレーザーの高品質・高パワー化が進展し、10 kW 以上の高パワーで 10 mm 以上の深溶込みの溶接部が作製されている。大出

原稿受付 平成23年4月4日

*正 員 大阪大学 接合科学研究所 Member, Joining and Welding Research Institute (JWRI), Osaka University

(a) レーザ・アークハイブリッド溶接装置

(b) 溶接部断面

図1 造船に実用されたレーザー・アークハイブリッド溶接装置と溶接部断面例

力 CO_2 レーザ溶接では、Ar ガス中での溶込みが浅くなるのに対し、波長が約 $1\mu\text{m}$ のレーザー溶接の場合、Ar ガスとの相互作用が小さく、溶込みが浅くならない。深溶込みの溶接部を得るための開発は、鉄鋼や重電・重工業の分野で特に期待されている。変形の低減・防止の観点からレーザー溶接法が望まれる場合とギャップ裕度拡大の観点を含めてレーザー・アークハイブリッド溶接法が望まれる場合がある。鉄鋼材料の場合、集光光学系が異なると、キーホール挙動や溶込み深さが変わりやすく、気泡の発生の有無が変わり、ポロシティの生成傾向が異なることから、高パワーレーザー溶接では、集光光学系の選択も重要である。特に、集光レンズの冷却が十分でないと、熱レンズ効果が起こり、焦点位置が上方へ移動することがあるので注意が必要である。また、鉄鋼材料厚板の貫通溶接の場合、板表面にアンダーフィルが起こり、裏面にハンピングが生じるなど、溶落ちが起こりやすい⁴⁾。この対策として、裏あての利用、シールドガスとして CO_2 が酸素 (O_2) を含むガスの利用、高パワー条件での溶接などが有効であることが示されている⁴⁾。

欧州では、客船の製造にレーザーとアーク併用によるハイブリッド溶接法が使用されているが、日本でも適用が始まりつつある。開発されたファイバーレーザー・MAG ハイブリッド溶接装置と溶接部断面の例⁵⁾を図1に示す。厚板の場合、裏あて法が適用され、良好な溶接が得られている。なお、ハイブリッド溶接では、溶着量を得るた

(a) 1 atm, Ar ガス

(b) 10 kPa

(c) 0.1 kPa

図2 大気圧Arシールドガス中または低真空中で得られた溶接部の断面写真

(a) & (b): 10 kw, 0.1 m/min, $f_0=0$ mm;(c): 26 kw, 0.3 m/min, $f_0=40$ mm

めにアーク電流を高くすると、表面ビード幅が広くなり、アンダーフィルやアンダーカットが形成しやすくなる。このため、さらに別にフィラーワイヤを添加熔融させるフィラー併用ハイブリッド (FLA) 溶接法が開発されている。この方法は、薄板の重ね溶接、厚板の突合せ溶接とも、良好な接合部が得られる条件範囲が拡大し、有効であることが示されている^{6, 7)}。

さらに、低真空中で長焦点の集光光学系を用いたファイバーレーザーまたはディスクレーザー溶接では、図2から明らかなように、通常の大気圧シールドガス中の溶接では得ることができないほどの深溶込みで欠陥のない良好な溶接部を得ることができることが報告されている^{8, 9)}。ICALEO 2010 国際会議では真空中でのレーザー溶接に関する報告が3件あり、電子ビーム溶接に匹敵する方法として今後の展開が注目される。

一方、レーザーマイクロ溶接の分野では、低入熱のパルスレーザーが利用されることが多い。最近、パルス YAG レーザ溶接により作製された眼鏡フレームが市販されている¹⁰⁾。レーザー溶接では、従来の抵抗スポット溶接やはんだ付、ろう付ではできない箇所へも適用でき、ばね性や意匠性に優れたものの作製が可能であることが明らかにされ、更なる展開が図られている。また、極細径のファイバーレーザーやディスクレーザーでは、約 $50\sim 100\mu\text{m}$ 直径の微小溶接部の作製が可能であり、今後、電子・電気機器分野などでの超精密微細溶接法として、パルス YAG レーザと競合しながら発展することが予想される。

2.3 高機能なレーザー接合部の作製

近年、構造物や部品の軽量化が要望されることが多い。このため、軽量のアルミニウム合金やマグネシウム合金のレーザー溶接とこれらの軽合金と鉄鋼材料とのレーザー異材接合が種々検討されている。軽合金のレーザー溶接では、良好な溶接部が得られる条件が明らかにされている¹¹⁾。また、レーザー異材接合でも、レーザー照射方法や接合法の工夫によって比較的高強度の接合部が作製できるようになってきている。さらに、鋳鉄と低合金鋼のレーザー溶接の

確立や熱伝導の良好な銅と軽量のアルミニウム合金とのレーザー接合法の開発も要望されている。

最近、超軽量であるプラスチックの利用が増加し、金属とプラスチックのレーザー直接接合も可能であることが判明している^{2, 12)}。ステンレス鋼 SUS 304 と非結晶 PET とのレーザー接合継手の引張せん断試験では、プラスチック母材が伸びて破断し、その荷重は、幅 30 mm、板厚 2 mm のサンプルで、3000 N を呈するほど高かった。鉄鋼材料、チタン、アルミニウムなどの金属とポリアミド（ナイロン：PA）、ポリエチレンテレフタレート（PET）、ポリカーボネート（PC）などのプラスチックの接合では、継手強度が十分に高く、プラスチック母材で破断する継手が得られている。レーザーは、金属の接合界面を溶融しない程度に加熱してプラスチックのみを溶融させ、さらに高温加熱で一部のプラスチックを分解させて気泡を発生させ、その気泡の発生と急膨張に伴う高圧の発生により、溶融プラスチックが流動して金属表面に密着し、アンカー効果、物理的なファンデルワールス力や化学結合の関与する高密着機構が発現したものと考えられる^{2, 12, 13)}。最近、この接合法により、異種金属間にプラスチックを挟む異材接合^{12, 14)}やセラミックスとプラスチックの接合、金属と CFRP（炭素繊維強化プラスチック）との接合¹⁵⁾も可能であることが確認され、今後、軽量化と高機能化の観点から更なる展開が期待されている。

2.4 レーザ加工の新展開

最近のレーザー加工では、鉄鋼厚板の溶接、リモート高速溶接、電池ケース薄板の溶接、異材接合、太陽電池の分割パターンニング¹⁶⁾、炭素繊維強化プラスチック（CFRP）の切断などが活発に研究されている。また、ピコ秒やフェムト秒など極短パルスレーザーを用いた微細加工も電子・通信機器分野で展開されている^{17, 18)}。

太陽電池は、結晶系、薄膜系および化合物系に大別され、現在、結晶系シリコン（Si）が主流であるが、今後、CIS/CIGS（銅・インジウム・ガリウム・セレンの化合物）や有機系を含め、薄膜 Si 太陽電池の需要拡大が見込まれ、レーザー適用の拡大が期待されている¹⁶⁾。太陽電池の作製では、レーザーパターンニング技術の適用がキーとなる。また、CFRP は、軽量・高強度であることから、飛行機や高級自動車、風力発電用ファン等に利用されており、環境とエネルギー問題の観点から今後の利用拡大が予想されている。その切断は、通常、砥石利用機械加工やウォータージェット切断加工によって行われているが、工具の摩耗や吸水性による強度低下、長時間加工などの課題がある。一方、レーザーには、高出力・高輝度の連続発振のレーザー、短波長化した高調波パルスレーザー、極短パルスのフェムト秒レーザー、ピコ秒レーザーなどがある。特に、高出力レーザーによる切断・穴あけは、高パワー密度、非接触、高生産性等の利点を有しており、CFRP に対して高速・高生産性の加工が期待されている。なお、レーザー切断に有効な CFRP の開発も同時に進める必要がある。高輝度レーザーによる超高速切断は、品質の改善と高生産性の実現を目指す切断法で今後の展開が期待される。

技術の発展は、通常、それに関連する有能な研究者の数と予算額に依存する。21世紀は「光の時代」とであると言われ、ドイツをはじめ諸外国では、極めて多くの研究者や技術者がレーザー加工分野に関与し、レーザー装置と加工法の研究開発に多額の予算が投入され、発展している。日本におけるレーザー装置と加工技術も、これまで、高出力の CO₂ レーザ、YAG レーザ、エキシマレーザー、LD 励起固体レーザーの開発を目指した各大型プロジェクトと共に発展した。平成22年度から平成26年度の5年間、NEDO による「高出力多波長複合レーザー加工基盤技術開発プロジェクト」¹⁹⁾が総予算約30億円でスタートした。この大型プロジェクトにおいては、LD レーザやファイバーレーザーの開発とそれを用いる加工技術の発展に期待したい。

2.5 電子ビーム加工の動向

電子ビームは、平滑な界面の作製から良好な微細な溶接部や極めて深い溶接部の作製まで幅広く利用されている。しかし、溶接学会の全国大会や各研究委員会においては、電子ビーム加工や溶接に関する講演・発表はほとんど行われていない。一方、2010年4月にドイツハーレ市で開催された第8回ビーム技術に関する国際会議において、大型海洋構造物の製造に対する局所真空電子ビーム溶接の応用²⁰⁾など数件の発表があり、7月のIIW 第IV委員会では高 Ni 基合金の溶接など2件の発表があり、実用化域に達しているため発表件数は減少傾向にある。

文 献

- 1) N. Yoshikawa, K. Mori and T. Sakamoto: "Development of new remote welding system for all closure assembly at Nissan", EALA - European Automotive Laser Applications 2011, pp.323-343.
- 2) S. Katayama: "Latest research results concerning laser weldability and laser direct joining of lightweight and dissimilar materials", EALA - European Automotive Laser Applications 2011, pp.121-144.
- 3) 川人, 大岩, 水谷, 片山: 「長焦点距離集光光学系を用いた高出力ファイバーレーザー溶接時のレーザー誘起ブルームの影響」, 溶接学会論文集, 29-1(2011), pp.18-23.
- 4) 大西, 川人, 水谷, 片山: 「高出力・高輝度レーザーによる高張力鋼厚板のホットワイヤ併用突合せ溶接法」, 溶接学会論文集, 29-1(2011), pp.41-47.
- 5) H. Goda and H. Koga: "Application of Laser-Arc Hybrid Welding to Shipbuilding", IIW IV-1017-10 (2010).
- 6) 王, 西村, 片山: 「フィラーを添加するレーザー・アークハイブリッド溶接法 (FLA 溶接法) の開発」, 配管技術, 52-6 (2010), pp.39-44.
- 7) 王, 西村, 片山, 水谷: 「フィラー併用ハイブリッド溶接 (FLA 溶接) 法によるアルミニウム合金の溶接」, 軽金属溶接, 48-11 (2010), pp.12-22.
- 8) Y. Abe, M. Mizutani, Y. Kawahito and S. Katayama: "Deep Penetration Welding with High Power Laser under Vacuum", Proc. of 29th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO 2010), (2010), pp. 648-653.
- 9) 片山, 阿部, 川人, 水谷: 「真空中におけるレーザー溶接現象と溶込み」, 高エネルギービーム加工研究委員会資料, HEB-627-10, JIWIW-IV-160-10 (2011).
- 10) シャルマンホームページ <http://www.charmant.co.jp/>
- 11) M. Wahba, M. Mizutani, Y. Kawahito and S. Katayama: "Keyhole stability in disc laser welding of AZ31B and AZ61A magnesium alloys and weld metal properties", Science and

- Technology of Welding and Joining, 15-7 (2010), pp. 559-566.
- 12) Y. Kawahito and S. Katayama: "Characteristics of LAMP Joining Structures for Several Materials", Proc. of 29th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO 2010), (2010), pp.1469-1473.
 - 13) M. Wahba, Y. Kawahito and S. Katayama: "Laser direct joining of AZ91D thixomolded Mg alloy and amorphous polyethylene terephthalate", Journal of Materials Processing Technology 211, (2011), pp.1166-1174.
 - 14) 日野, 水戸岡: 「インサート材を用いた半導体レーザーによる異材接合」, 高エネルギービーム加工研究委員会資料, HEB-626-10, JIW-IV-159-10 (2010).
 - 15) S. Katayama, K.-W. Jung and Y. Kawahito: "High Power Laser Cutting of CFRP, and Laser Direct Joining of CFRP to Metal", Proc. of 29th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO 2010), (2010), pp.333-338.
 - 16) 空田: 「太陽電池製造プロセスにおけるレーザー加工技術」, pp.129-135.
 - 17) D. Wortmann, R. Poprawe, et al.: "The future of tailored light: Perspectives of lasers, applications and strategies", 第74回レーザー加工学会講演論文集, (2010), pp. 1-6.
 - 18) S.-H. Cho: "Present status and Trend of Femtosecond laser processing in manufacturing industry of Korea", 第74回レーザー加工学会講演論文集, (2010), pp. 7-10
 - 19) NEDO ホームページ <http://www.nedo.go.jp/activities/portal/gaiyou/p10006/p10006.html>
 - 20) C. Punshon: "Applications of local vacuum EB welding and new steel development for fabrication of large offshore structures", Proc. 8th Int. Conf. on Beam Technology, DVS, GSI and SLV, Halle, Germany, (2010), pp.8-15.