

レーザー加工技術の進展とアルミニウム合金のレーザー溶接

Progress of Laser Material Processing and Laser Welding of Aluminum Alloys

杏名 宗春 Muneharu Kutsuna

1. レーザ加工技術が注目される背景

1960年にレーザーが開発されて、約60年になる今日、レーザー技術は「文明の利器」として広い分野で利用されている、工業分野、通信分野、情報分野、医療分野、バイオ分野、軍事分野、生活分野にまでレーザーが利用され、21世紀の文明にはなくてはならないものとなっている。

レーザー加工技術についても20世紀から21世紀になり、CO2レーザー-YAGレーザーの時代から高効率の半導体レーザーやファイバーレーザーやファイバレーザの時代になり、それぞれのレーザーの特性を生かすレーザーの特性を生かした各種レーザー機器が開発され、工場や店舗に安価工場や店舗に安価に配置されるようになってきた。その理由はレーザーのもつ特性に他ならない。数ミクロンまで集光できる微細熱源で、出力密度も数10GW/cm²まで高くでき、毎秒数10mの速さで走行できる熱源である。波長も0.2μmから10μmまで多種のレーザーがあり、各種材料に利用できる。

レーザー切断穴あけではダイヤモンド、ガラス、宝石、金属、樹脂、紙、布、栗の皮など材料を選ばない。このような熱源は他にはない。

2. レーザ加工機の進展

1990年代に、高効率、高性能、低価額の半導体レーザーが開発されて、これを励起源とした各種高出力レーザーが2000年以降開発されてきた。

代表的なファイバーレーザーをはじめ、ディスクレーザー、高出力半導体レーザー、超短パルスレーザー（フェムト秒レーザー、ピコ秒レーザー、ナノ秒レーザー）、短波長レーザー（グリーンレーザー、ブルーレーザー、UVレーザー）、樹脂加工用のトリウムレーザーなどである。ファイバーレーザーは変換効率が40%～50%と高く、最大出力はマルチモードで120kWであり、シングルモードで10kWと高く、ビーム品質のBPPも小さく、材料加工に最適なレーザーである。

半導体レーザーも表面加工用に60kWの装置が開発されている。銅の溶接や肉盛加工に適するブルーレーザーは出力が1kWまで上がってきた。これらのレーザー発振器のビームの横モードを変換する技術がここ2、3年で進み、現在では、ガウシアンモード、リングモード、トップハットモード、これらのモードを組み合わせたモードなど、任意のビームモードを作ることができるなど、加工品質を高め

る横モード技術が進んでいる。その一例を示す。Fig.1に示すようにビーム横モードをガウシアンモードからリングモードに変えることにより、薄板から厚板まで、高品質で切断できる技術を三菱電機が開発した¹⁾。また、三菱電機や古河電工ではシングルモードとリングモードの共存モードで、スパッタの発生を低減することに成功している。Fig.2はモードを変えた結果で、スパッタの発生状況を示す。ビームの横モード制御によりスパッタの発生が抑制されている²⁾。

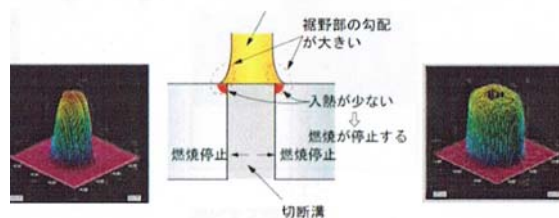


Fig.1 ビーム横モードの変換による厚板切断 (右) (左: ガウシアンモード、右: リングモード) ¹⁾

I P G社は3つのビームの出力をそれぞれ制御するマウスモードにより、鋼材のレーザーろう付の改善をしている。主ビームでろう材を主に溶融し、2つの補助ビームで母材を加熱し、濡れ性を高めている。

これらのCWファイバーレーザーの出力は最大120kWまで高まっており、20kW以上のCWファイバーレーザーが造船業、エネルギー産業、鉄鋼業などで利用されている。例えば、JFEスチール社では30kWのファイバーレーザーでクラッド鋼のスラブ（板厚：約50mm）の製造ラインに真空レーザー溶接を導入している³⁾。

ワーク：t10mmSUS304、出力：3kW、加工速度：5m/min、ガス：N₂
モード制御なし（通常集光） モード制御あり

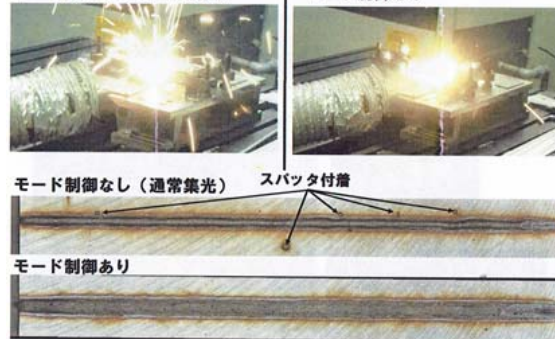


Fig.2 モード制御によるスパッタの低減²⁾

CWファイバーレーザー以外にも、ミクロンオーダーの微細

レーザ加工に、MOPA (Master Oscillator Power Amplifier) ファイバレーザが多く利用されるようになってきた。図3はその発振方式を示す⁴⁾。このファイバレーザ出力は20W~150Wが主で、レーザマーカや微細穴あけなどに利用されている。

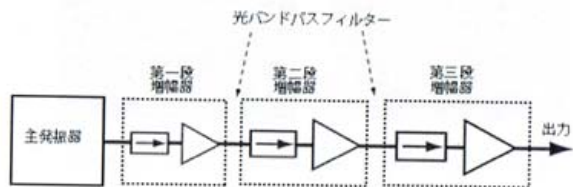


Fig. 3 MOPAファイバレーザの発振機構⁴⁾

また、数10WのQスイッチファイバレーザも開発され、マーキングやマイクロ溶接や穴あけなどに利用されている⁵⁾。また、QCWファイバレーザはCW出力10倍のピーク出力が得られるパルスファイバレーザで燃料フィルターなど金属の穴あけなどに広く利用されている。

これら発振器の発展以外にも、レーザ加工光学系として、焦点シフト量の少ないレンズ系、高出力密度のビームを伝送できる光ファイバ、レーザービームを高速に操ることができる3Dデジタルスキャナーも開発されており、Fig.4に示すように3kWのシングルモードファイバレーザの60ミクロン径のビームを毎秒4mでスキャンでき、金属、ガラス、樹脂などの表面を高速のスキャン加工ができる。Fig.5に示すような板曲げ加工も高速スキャナーで効率よく加工できる。1kWのレーザビームならば、毎秒約10mでスキャンできるので、歪の少ない微細な表面加工が高速で可能である。



Fig. 4 高速の3Dデジタルスキャナー装置 (ALTREC提供)

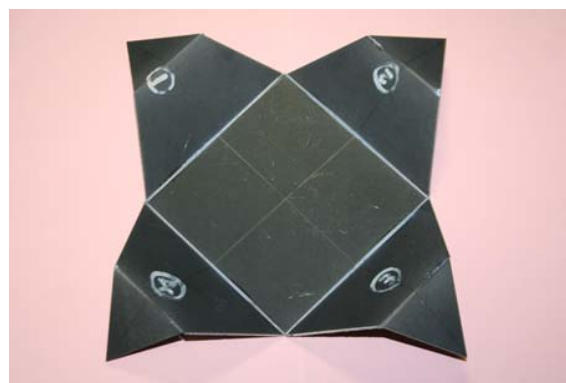


Fig. 5 スキャナーを用いたレーザ曲げ加工例 (材料：マグネシウム合金)

さらに、レーザ溶接時のモニタリング、センシング技術の開発により、溶接前のシームトラッキング、溶接中の溶込み深さの検出、仮付けのあるシームの適応制御、溶接後の外観検査などが可能となってきた。Fig.6はOCT (光学干渉計) などを用いて、キーホール深さなどを計測できる対象を示す⁶⁾。

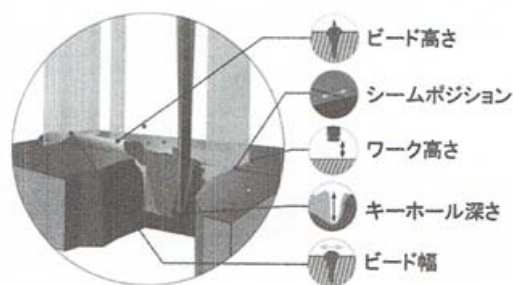


Fig. 6 インプロセスで計測できるパラメータ⁶⁾

3. 最近の注目される研究・開発

軽量化を進めるため、樹脂部品と軽金属部品の接合にレーザ技術が応用される。ダイセルポリマーはFig.7に示すDLAMP法によりまず金属表面をシングルモードファイバレーザと高速スキャナー (速度：4m/s以上) で深溝を形成し、その後の射出成形で金属と樹脂などを接合できる方法を開発した⁷⁾。金属表面にFig.7に示すような溝を高速で構築し、ここに樹脂を射出成形して接合を行う。この継手の引張せん断強さは約50~60MPaと高い。

Fig.8はこの方法で金属シャフトと樹脂歯車の部品を製造した例を示す⁷⁾。軽量の歯車を作製できる。

金属としては炭素鋼以外に、ステンレス鋼、アルミニウム合金、銅合金、チタン合金、亜鉛、マグネシウム合金に適用でき、樹脂もPA66系にガラス繊維強化したものが適用できる⁷⁾。

[ここに入力]

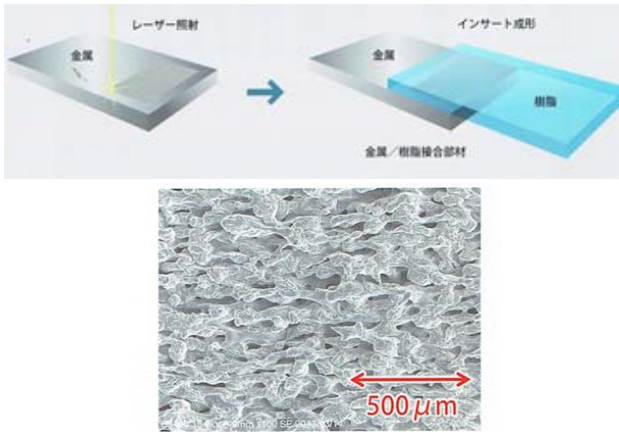


Fig. 7 DLAMP法と形成された金属表面⁷⁾



Fig. 8 DLAMP法により作製した歯車⁷⁾

最新レーザー技術研究センターでは中島精工と共同開発で、金属や樹脂部品のバリ取り用のレーザーコーナー成形装置を開発し、部品コーナーを任意の形状に成形する技術を開発した。FFig. 9 はバリ取り後の金属部品のコーナーの外観を示す。バリの除去以外にコーナー部を任意の形状に成形できる特性を持つ。

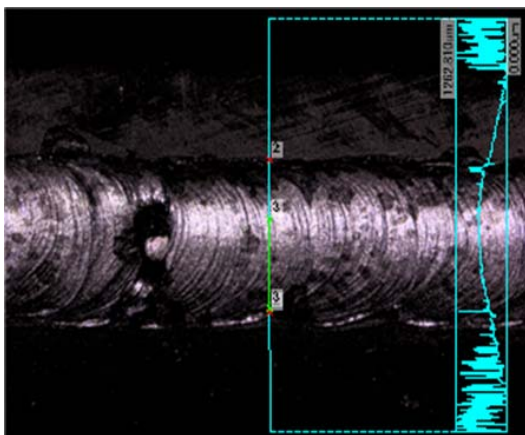


Fig. 9 レーザバリ取り後の部品コーナー部外観

対象材料は金属のみならず、樹脂、ガラス、石材などにも適用できる。今後の発展が期待できる。

[ここに入力]

原子力発電プラントの解体では汚染されたコンクリート壁や金属を除染する必要があるが、これにもファイバレーザが適用される。Fig. 10 は若狭湾エネルギー研究センターが開発した自走式のレーザ除染装置を示す⁸⁾。今後、解体作業が進む場合、このような遠隔制御できる自走式の除染装置が重要になるとと思われる。

近年、3次元造形をレーザ溶接や電子ビーム溶接を用いて実施する3Dプリンターの研究・開発が進んでいる。Fig. 11 は三菱重工業が開発した3Dプリンターに採用しているDED (Directed Energy Deposition) 方式のノズルを示している⁹⁾。この技術にもファイバレーザが採用されている。このAM技術により人工関節、ジェットエンジン部品など重要な部品がレーザ直接成形により製造されている、



Fig. 10 自走式レーザ除染装置

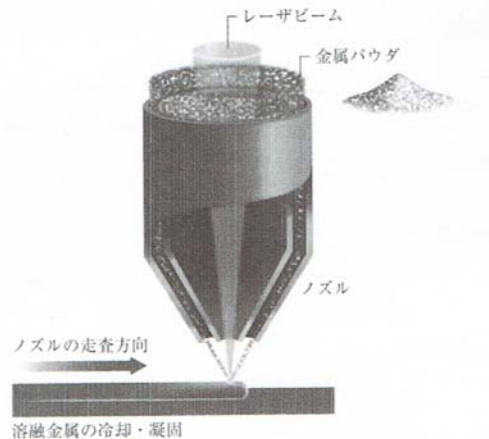


Fig. 11 DED方式の3Dプリンター用ノズル⁹⁾

4. アルミニウム合金のレーザ溶接に関する研究

アルミニウム合金のレーザ溶接の研究はCO₂レーザの出力が2kWを超えた1980年代から本格的に行われてきた。著者も1990年代に研究し、I I Wや軽金属溶接協会に発表した^{9) ~ 13)}。特に、アルミニウム合金の

レーザ溶接ではポロシティの発生が問題であったので、この発生機構を研究し、文献12および13として発表し、軽金属溶接協会より論文賞を受賞した。1998年ごろには片山らの本誌にアルミニウム合金の熔融特性や溶接欠陥について報告している¹⁴⁾¹⁵⁾。凝固割れについても報告がなされた¹⁶⁾。これらの研究はCO₂レーザやYAGレーザによる溶接であったが、2000年以降はファイバーレーザやディスクレーザを用いたレーザ溶接の研究が多くなった。最新はレーザ発振器や周辺機器の高性能化が進み、ビームの横モードをいろいろと制御できるようになり、スパッタの低減が可能になってきた。ここではアルミニウム合金のレーザ溶接の研究についてその一部を紹介する。

4.1 溶接性の研究

通常、溶接欠陥（ポロシティ、割れなど）や継手性能などを溶接性として、古くからアルミニウム合金のレーザ溶接についても多数研究されている。

(1) ポロシティ

熔融池に発生したガスの気泡が凝固時に溶接金属に残留してポロシティ（気孔）となるが、磁気を与えて、ポロシティを減少した例がある¹⁷⁾。Fig. 12にその状況を模式的に示す。Fig. 13は磁気によるポロシティの減少結果を示す¹⁷⁾。

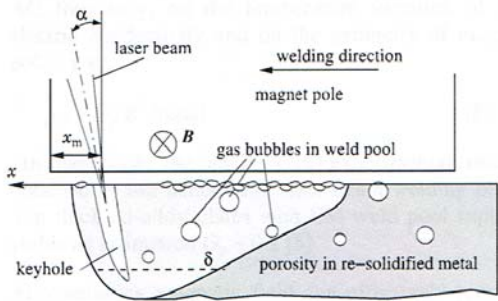


Fig. 12 ポロシティ発生に対する磁場の与え方¹⁷⁾

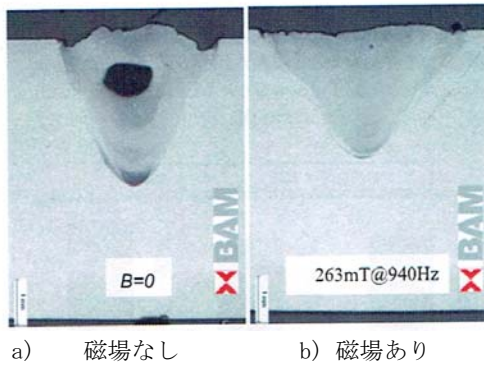


Fig. 13 磁気によるポロシティの減少結果¹⁷⁾

磁場を与え、熔融池を振動することで、ポロシティが浮

上して減少している。アルミニウム合金のダイキャスト材のレーザ溶接を低真空で行う Fig. 14 に示すようにポロシティが減少することも報告されている¹⁸⁾。

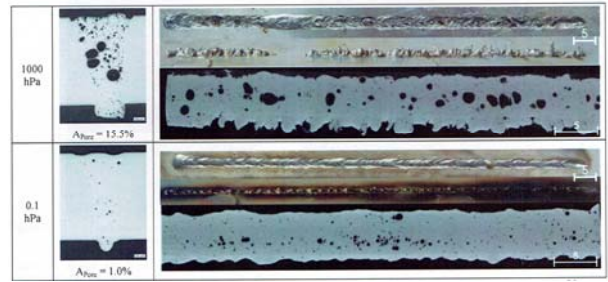


Fig. 14 雰囲気圧力を変えたときのポロシティ発生量¹⁸⁾

溶接速度を1 m/min から6 m/min に高めると Fig. 15 に示すようにポロシティが減少した¹⁸⁾。

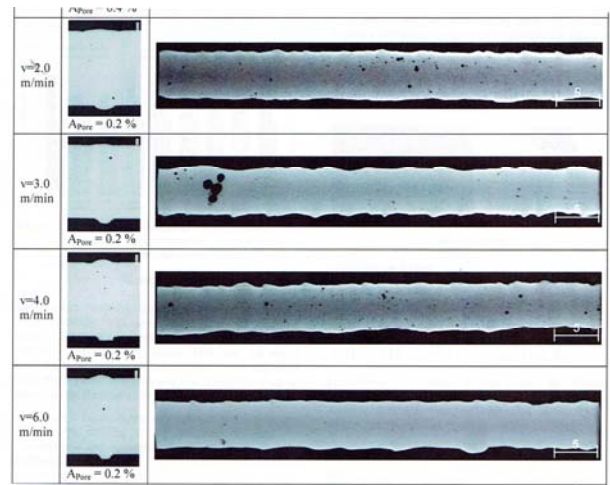


Fig. 15 溶接速度とポロシティ発生量の比較¹⁸⁾

ドイツのBIAS（ブレイメンビーム応用研究所）でも超音波振動によりポロシティの減少を確認している¹⁹⁾。またIFSW（シュツットガルト大学レーザ研）でも、16 kWのディスクレーザで30 m/minの高速で溶接するとポロシティがなくなることを確認している。

(2) 溶接割れ

アルミニウム合金のレーザ溶接における凝固割れの傾向は合金系により依存し、アーク溶接時とほぼ同様である¹⁵⁾¹⁶⁾。ただ、割れ試験法としては円周溝割れ試験やフィッシュボーン試験以外に、Fig. 16に示すように、矩形の試験片を側面から3～6 mmの場所を溶接することにより、Y方向の歪を Fig. 17に示すように高めて、割れを発生させる方法もある²⁰⁾。前述のIFSWでは継手形状が耐割れ性にどのように影響するか調査している²¹⁾。このようなレーザ溶接の高温割れの数値解析も積極的になされている。

[ここに入力]

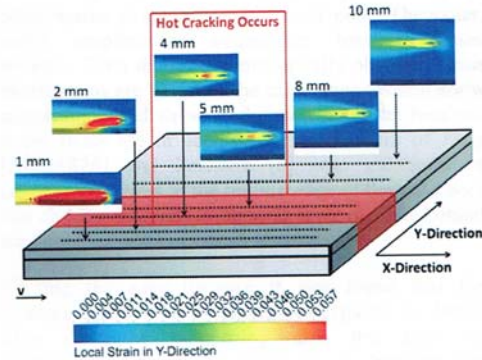


Fig. 16 Y方向歪誘起割れ試験²⁰⁾

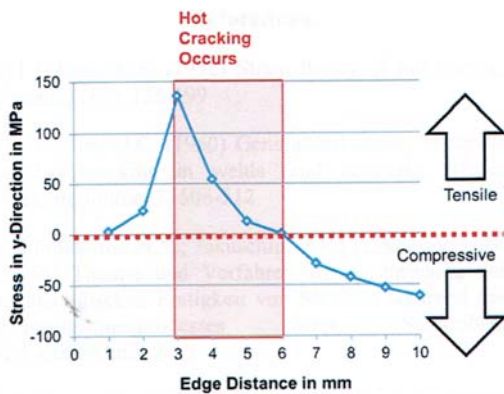


Fig. 17 方向歪誘起割れ試験における側面からの距離と収縮応力との関係²⁰⁾

(3) アルミ合金のレーザー溶接継手の継手性能

アルミニウム合金の溶接では継手性能の低下が問題となる。著者らは継手性能の改善について検討した。溶接金属に合金添加すると同時に、溶接継手の時効処理をすることにより、100%以上の継手効率を得た²³⁾。また、A6061-T6合金をレーザー溶接、CMT溶接、Laser-CMTハイブリッド溶接、Laser MIGハイブリッド溶接を行った時の継手強度を比較した結果をFig. 18に示す²⁴⁾。レーザー溶接の継手が最も高く220MPaであった。

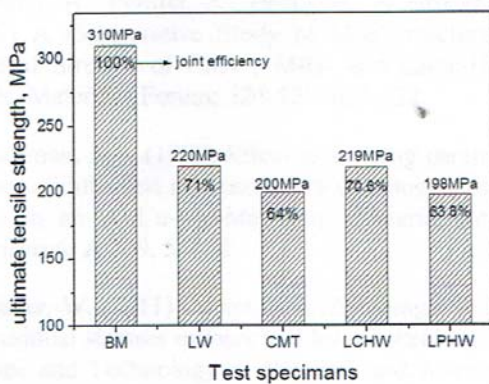


Fig. 18 A6061合金の継手強度²⁴⁾

(4) アルミ合金の異種金属継手

アルミニウム合金の異種金属継手については古くか

らいろいろ研究がなされてきた。銅とアルミニウムの継手のCO₂レーザー溶接が東芝から発表されたのは1992年である。アルミニウムは反射率が高く、ポロシティが発生しやすいので、5kWで2mm厚の板材を4m/minで溶接している²⁵⁾。銅とアルミニウムの異種金属継手のレーザー溶接の研究は前述のBIASで1999年に報告されている²⁶⁾。継手強度は198MPaまで達している。

その後、自動車のボディパネルのルーフ（アルミ合金）とドア（SPCC鋼）をレーザー溶接研究が報告された^{27)~28)}。Al-Mg, Al-Ti, Mg-Ti異種金属継手のレーザー溶接についても研究されている²⁹⁾。アルミニウム合金と樹脂のレーザー溶接も広く研究されている³⁰⁾。その状況をFig. 19に示す。

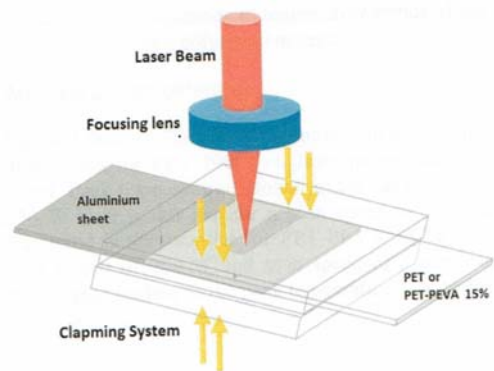


Fig. 19 アルミニウム合金と樹脂のレーザー溶接³⁰⁾

4. 2 溶接プロセスの研究

アルミニウム合金のレーザー溶接におけるプロセスの研究も盛んである。レーザーによるすみ肉溶接にYAGレーザーと半導体レーザーを重ねて溶接する方法もある³¹⁾。スパッターの発生も研究されている³²⁾。アルミニウム合金中のMg量が増加すると増加している。最近ではレーザービームの横モードをガウシアンモードを中心に、リングモードを周辺に配置し、スパッターを減少する技術がFig. 2のように開発されている。溶接中のキーホール深さもOCT法でモニタリングできる時代になった。

アルミニウム合金を2つのTIG溶接ヘッドにレーザービームをハイブリッドする新溶接法がFig. 20のように開発された³³⁾。レーザーによりアークが安定化され、2mm厚の板が安定して溶接されている。

圧延されたアルミ合金とダイキャスト材を突合せ溶接するのにビームをFig. 21に示すようにオシレーションしてポロシティやスパッターの低減を図っている³⁴⁾。その結果、アルミダイキャスト材と圧延材の突合せ溶接がFig. 22に示すように、ポロシティも少なく、比較的良好に溶接継手ができている。

[ここに入力]

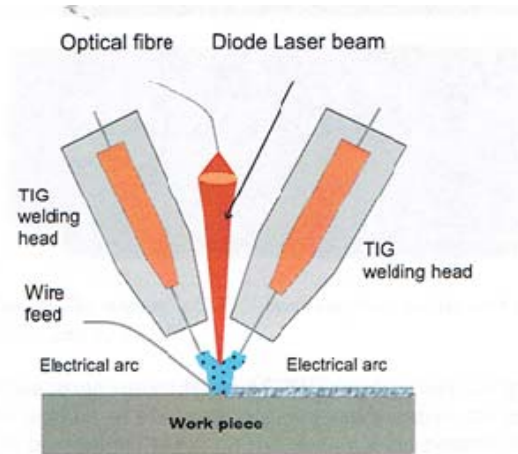


Fig. 20 TIG・レーザハイブリッド溶接法の模式図³³⁾

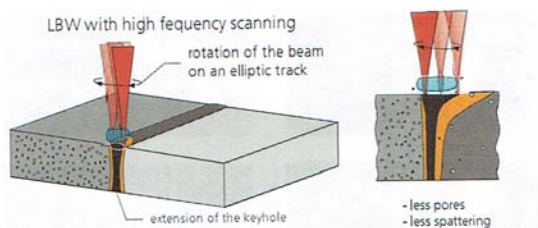


Fig. 21 高速オシレーションのレーザ溶接³⁴⁾

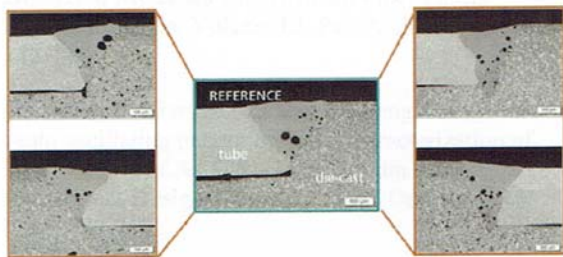


Fig. 22 高速オシレーションを用いたアルミダイキャスト材と圧延材のレーザ溶接結果³⁴⁾

5. レーザ溶接のアルミニウム部材への応用

アルミニウム合金は比重が約2.7で軽合金の代表であり、輸送機器の軽量化には不可欠の合金である。その応用分野も広い³⁵⁾。自動車、航空機、車両、船舶、宇宙機器、産業機器、電池などに広く利用されている。燃料電池の電極としてFig. 23に示すような銅とアルミニウム合金がレーザ溶接される³⁶⁾。スパッタの出ないレーザ溶接が要求される。太陽光吸収器はFig. 24のような構造でアルミニウム板と銅チューブが利用されており、レーザ溶接される³⁷⁾。

2007年ころ、エアバス社は旅客機のA380などのスキンパネルとスティフナーをレーザ溶接することに成功した。Si含有量の高いフィラーワイヤを用いたレーザ溶接をFig. 25に示すように適用してすみ肉溶接を行っている³⁸⁾。中国でもこのようなスティフナーのレーザ溶接[ここに入力]

をFig. 26およびFig. 27に示すように研究している³⁹⁾。

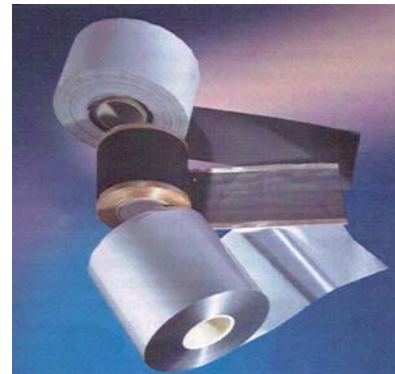


Fig. 23 リチウム電池の銅電極とアルミ電極³⁶⁾

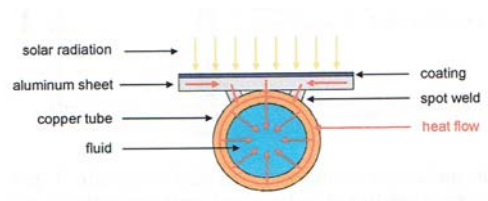


Fig. 24 アルミニウム板と銅チューブをレーザ溶接して製造される太陽光吸収器³⁷⁾



Fig. 25 航空機のスキンプレートとスティフナーのレーザ溶接状況³⁸⁾

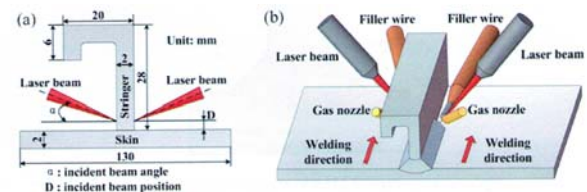


Fig. 26 スキンプレートとスティフナーのレーザ溶接の概要(両側より同時溶接)³⁹⁾

船舶分野においても軽量化を図り、高速性を増し、燃費を下げるため、アルミニウム合金が利用される場合がある。Fig. 28は船舶のアルミニウム部材のウェブとフランジのすみ肉溶接をレーザ溶接で行っている例を示す⁴⁰⁾。

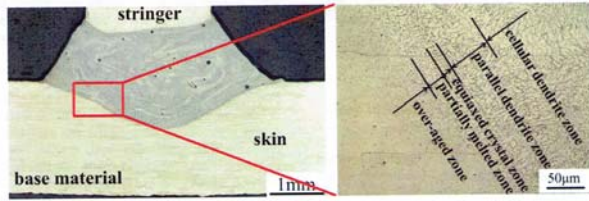


Fig. 27 スキンプレートとスティフナーのレーザー溶接部の組織³⁾⁹⁾



Fig. 28 ウェブとフランジ部材のレーザー溶接例⁴⁾⁰⁾

6. レーザ加工技術の今後の動向

レーザー加工技術は2000年以降、格段と進歩し、装置の低価額化、高出力化、メンテナンスフリー化、多様化が進み、ますます各種材料の加工工具として最適化が進んできた。今やレーザーなくして部品の加工ができない分野も多くなってきた。微細な部品のみならず、鉄骨、造船の分野においても、高出力のレーザー加工機で、切断、穴あけ、溶接がなされるようになってきた。発振器のビームモード可変技術や励起用LDの長寿命化、装置の安定化が進み、周辺技術のモニタリング、センシング、IoT技術なども今後は発展するので、多くの産業分野で、レーザー加工の利用が進むと思われる。

まさに著者が2002年に表した「第4の波」が大きな波紋となって広がっていくと思われる。

参考文献

- 1) 山森浩人, 中部レーザー応用技術研究会、第107回研究会資料、2019.8.29、名古屋
- 2) 大竹裕吉、名古屋レーザー・ニュース、第31号、pp.28-37、(2019)
- 3) 木谷靖、沖田泰明、溶接技術、Vol.67、11、pp.38-41、(2019)
- 4) 茅原崇、中部レーザー応用技術研究会、第107回研究会資料、2019.8.29、名古屋

- 5) 川内隆、名古屋レーザー・ニュース、第31号、pp.50-66、(2019)
- 6) 菊池淳史、レーザー加工学会誌、Vol.26, No.3、pp.129-135 (2019)
- 7) 板倉雅彦、名古屋レーザー・ニュース、第32号、pp.62-75、(2019)
- 8) 坪井昭彦、名古屋レーザー・ニュース、第31号、pp.67-75、(2019)
- 9) I. Masumoto, M. Kutsuna, J. Suzuki, IIW Doc. IV-566-91
- 10) M. Kutsuna, J. Suzuki, S. Kimura, S. Sugiyama, M. Yuhki, and H. Yamaoka, *Welding in the World*, 31-2, pp126-135, 1993
- 11) 沓名宗春、軽金属溶接、34-4, pp183-190
- 12) 沓名宗春、顔 旬、軽金属溶接、36-2, pp51-64
- 13) 沓名宗春、顔 旬、軽金属溶接、36-11, pp517-533
- 14) 片山聖二、軽金属溶接、34-4, pp191-198
- 15) 片山聖二、軽金属溶接、34-4, pp191-198
- 16) 山岡弘人、溶接学会誌、68-7, pp 512-515
- 17) V. Avilov, A. Schneider, M. Lammers, A. Gumenyuk, M. Rethmeier, *Proc. of ICALEO'2012*, Oct.2012, Orlando, FL, Paper # 701
- 18) C. Bormer, C. Garthoff, H. Pries, K. Dilger, *Proc. of ICALEO'2014*, Oct.2014, San Diego, CA, Paper # 404
- 19) T. Radel, IIW Doc. XII-2426-19,
- 20) P. Stritt, R. Weber, T. Graf, S. Mueller, J-P. Weberpals, *Proc. of ICALEO'2012*, Oct. 2012, Orlando, FL, Paper # 1003
- 21) D. Weller, P. Stritt, R. Weber, T. Graf, *Proc. of ICALEO'2014*, Oct.2014, San Diego, CA, Paper # 408
- 22) H. Wei, J.S. Chen, H-P. Wang, E.E. Carlson, *Proc. of ICALEO'2015*, Oct.2015, Miami, FL, Paper # 602
- 23) 沓名宗春、北村修平、柴田公博、坂元宏規、津島健次、溶接学会溶接法委員会資料 SW-2891-03
- 24) C. Zhang, M. Gao, G. Li, X. Zeng, *Proc. of ICALEO'2012*, Oct. 2012, Orlando, FL, Paper # 1304
- 25) S. Kimura, T. Kubo, Y. Makino, K. Honda, S. Sugiyama, IIW Doc. IV-565-92
- 26) G. Sepold, E. Schubert, I. Zerner, IIW Doc. IV-734-99
- 27) 沓名宗春、ラソッド・マノジュ、菰田頼忠、籠原幸彦、溶接学会論文集、21-1、(2003)、pp.101-108
- 28) M.J. Rathod, M. Kutsuna, *Welding Journal*, 73-1, pp.16s-26s

[ここに入力]

- 29) Y.M. Baqer, S. Ramesh, F. Yusof, S. M. Manladan,
Intern. Jour. of Advanced Manufacturing Tech. Jan
.2018, Springer,
- 30) A. Gisario, M. Mehrpouya, E. Pizzi, Proc. of
ICALEO'2016, Oct. 2016, San Diego, CA, Paper #
2106
- 31) M. R. Kronthaler, S. Spengler, M. F. Zaeh, Proc. of
ICALEO'2011 Oct. 2011, Orlando, FL, Paper #
1505
- 32) A. Felsing, P. Woizeschke, IIW Doc. IV-1436-19
- 33) A. Barroi, R. Knill, et al: Proc. of ICALEO'2012, Oct.
2012, Orlando,FL, Paper # 1301
- 34) D. Dittrich, A. Jahn, J. Standfuss, E. Beyer, Proc. of
ICALEO'2016, Oct. 2016, San Diego, CA, Paper #
1204
- 35) 熊谷正樹、溶接学会東海支部 第77回溶接研究会
資料、(2012-8-30), 名古屋
- 36) H. J. Herfuth, R. Patwa, H. Pantsar, S. Heinemann,
G. Newaz, Proc. of ICALEO'2008, Oct. 2008, San
Diego, CA, Paper#701
- 37) A. Springer, P. Kallage, M. Hustedt, et al., Proc. of
ICALEO'2011, Oct. 2011, Orlando, FL, Paper # 803
- 38) B. Brenner, J. Standfuss, D. Dittrich, et al, Proc.
of ICALEO'2008, Oct. 2008, San Diego, CA,
Paper#1801
- 39) Y. Zhang, W. Tao, Y. Chen, Proc. of ICALEO'2015
Oct. 2015,Orlando, FL, Paper # 604
- 40) A. Salminen, T. Purtonen, J. Tolvanen, J. Isotalus,
Proc. of ICALEO'2009, Nov. 2009, Orlando, FL,
Paper # 1608