軽金属 第71巻 第6号 (2021), 264–268 DOI: 10.2464/jilm.71.264
© 2021 The Japan Institute of Light Metals

レーザ溶接によるアルミニウム合金と異種金属の接合

Joining of aluminum alloy and different metals by laser welding

泊 圭一郎*・松本 剛

Keiichiro TOMARI* and Tsuyoshi MATSUMOTO

1. はじめに

近年のCO₂削減要求の高まりを受け、自動車を主とした輸送機器の重量軽量化が活発に議論されており、高張力鋼板(ハイテン)、アルミニウム合金、マグネシウム合金、プラスチック・樹脂の適用が検討されている。ただし、現状自動車構造の主要材料である鋼をすべて代替することは、製造面、コスト面での懸念が大きいことから、最近では、各種材料の固有の特徴を活かして最大効果を発揮するべく、材料の適材適所化が強く望まれている。

その達成のため、「ハイブリッド構造」の検討、例えば、鋼と軽量のアルミニウム合金との組合せによる異種金属接合もその主要な解決策の一つであると考えられる。しかしながら、異種金属の溶融接合においては金属が相互溶融したときに生成する脆い金属間化合物(Intermetallic Compound: 以下IMCと記す)を制御しなくてはならないという課題があり、継手の品質改善が検討されている。溶融接合法としてはアーク溶接、レーザ溶接、抵抗溶接があり、いずれの接合法も適用においては溶融部組成と冷却速度の制御が重要とされる。本報では、それらの溶融接合法の中の一つとして、高エネルギー密度熱源によって金属の急速加熱/凝固が期待できるレーザ溶接を用いた異種金属の接合方法について検討された技術について調査を行った。

2. レーザとその開発動向

レーザ溶接(図1¹⁾)は集光された数百kW/cm²のパワー密度を有するビーム光を照射することで、キーホール型溶融となる溶接部を形成する。溶接用レーザとして、これまでにCO₂レーザ、パルスまたは連続発振のNd:YAGレーザ、半導体レーザ、ディスクレーザ、ファイバーレーザなどが開発され、ものづくりに活用されている。

まず高パワー化が容易で高速・深溶込み溶接が可能なCO₂レーザおよびファイバー伝送が可能で高柔軟性のYAGレーザが開発され、自動車ルーフ、電装部品などの溶接に適用されてきた。続いて、ビーム光の集光性向上によってより安定したビーム形成(レーザの高品質化)が可能となり、高パワーCO₂レーザおよび連続高パワーYAGレーザが開発され、従来のものの代用として用いられるだけでなく、リモート溶接用にも利用されてきた。その後は、電気-光変換効率が最も高

くてファイバー伝送が可能な高柔軟性の半導体レーザやYbをドープしたレーザ媒質を用いる高輝度・高品質のファイバーレーザおよびディスクレーザの開発が活発である。表1²⁾にそれぞれのレーザの特徴を示している。

最近の半導体レーザは、ビーム品質が従来のYAGレーザと同等のものや、ディスクレーザと同等レベルまで改善されたものが市販されるようになり、ブルーレーザ、グリーンレーザのように高効率・高輝度な半導体レーザの高パワー化が競われている。

また、数kWのファイバーレーザやディスクレーザでは溶接中に大きなスパッタがときどき発生して、溶接ビード表面が荒れてピットが形成する場合がある。これらを改善する方法として、2重のファイバーを利用して細径の集光ビームとその周囲のリング形状のパワー密度分布を有するビームモード制御レーザが最近開発された。

現在、高速・高生産性の接合方法として最も注目されるのがリモート(スキャナ)溶接である。スキャナ(ミラー)を動かすリモート溶接では、レーザの加工点を瞬時に移動させることができ、機械動作(ロボット等)による移動のロスタイムを画期的に削減することが可能となっている³⁾。

3. レーザブレイジング

レーザブレイジングとは熱源にレーザを用いるブレイジング方法であり、従来のろう付法と同様にろう材をあらかじめろう付部に設定してレーザを照射する「置きろう方式」と、

図1 レーザ溶接概念図¹⁾

表1 溶接・接合用レーザーの種類と特徴²⁾

種類	波長 (μm)	発振効率 (%)	出力 [連続] (kW)	利点
CO ₂ レーザ	10.6	10	最大: 50 通常: 1~15	高出力化容易
YAG レーザ	1.06	1~4	最大: 10 通常: 0.05~7	ファイバー伝送可能, 波形制御, 分岐可能, 高柔軟性
半導体レーザー	0.8~1.0	20~50	最大: 15 通常: 0.05~4	コンパクト, 高効率
LD励起固体レーザー	1.0	10~20	最大: 13.5	ファイバー伝送, 高効率
ディスクレーザー	1.03	15~25	最大: 16 通常: 0.5~8	ファイバー伝送可能, 高輝度, 高効率
ファイバーレーザー	1.07	20~30	最大: 50 通常: 0.2~10	ファイバー伝送可能, 高輝度, 高効率

図2(a)⁴⁾に示すようにろう材を供給しながらレーザーを照射する「差しろう方式」がある。レーザーブレイジングは1980年代に開発されたレーザーはんだ付を応用させたプロセスとして位置づけられるが、レーザー発振機の高出力化に伴い、融点の高いろう材を用いる硬ろう付に適用されるようになった。レーザーブレイジングの一般的な特徴としては①熔融溶接とろう付の中間的な接合プロセス、②母材に対するぬれ性やエロージョンを高度に制御可能、③局所加熱、急熱/急冷による母材の材質劣化や変形抑制可能、④インプロセスモニタリングやリアルタイム制御可能、⑤ろう付品質の安定化や高信頼化の達成、などが挙げられる。アルミニウム合金および鋼のろう付、さらにこれらの異材接合に対してレーザーブレイジングが実用化されるに至っている。また近年、予熱用としてレーザー発振機を追加したタンデムレーザーブレイジング法も開発されている (図2(b)⁵⁾)。

4. レーザ異材接合技術

4.1 異種材料のレーザーブレイジング

異種材料のレーザー溶接では、通常の溶接と同様に、突合せ

部や重ね部において異材を共に大きく熔融させて混合させると、固液共存域が広い組成やIMCが生成する組成の領域が広範囲に形成し、高温割れが発生する。このため、異材接合では一方の材料を溶かし、他の材料の熔融を抑制するような溶接方法を採用することが重要である。また、レーザーとしては高輝度のレーザーが一般的に有利であるが、アルミニウム合金やマグネシウム合金などの薄板の溶接やろう付を利用する溶接では、パワー密度があまり高くない条件で半導体レーザーも利用できる。特に、薄板になると入熱の制御の点から他の熱源が利用できなくなり、パルスレーザーが有利になる。ただし、パルスレーザーによる熔融溶接の場合、急速凝固により溶接金属部に凝固割れが起こりやすいため、熔融金属の組成に注意を払う必要がある⁶⁾。

YAG レーザまたは半導体レーザーを用いて、低炭素鋼とA6000系合金薄板の接合が試みられ、機械的特性の良好な継手が得られたことが報告されている⁷⁾。YAG レーザによる接合部の例を図3⁷⁾に示す。レーザーは主に鋼に照射され、その一部が同時にアルミニウム合金に照射されるが、鋼を熔融させない程度に加熱し、その熱と一部の照射レーザーでアルミニウ

図2 異材接合のレーザーブレイジングの例

(a) シングルビームろう付⁴⁾, (b) タンデムビームろう付⁵⁾

3

ム合金のみを溶融させる方法であり、IMC層を極めて薄くできるという特徴がある。ただし、機械的特性の観点からIMC層の厚さを $10\mu\text{m}$ 以下に抑制する必要がある、またアルミニウム合金の濡れをよくするためにフラックスを用いる必要がある。

4.2 インサート材を用いたレーザーブレイジング

アルミニウム合金とマグネシウム合金の異材接合における継手特性の向上には、母材同士の界面反応の抑制が重要であることが知られている。界面反応を制御する手法として、インサート材を母材間に挟み、接合を行うことで母材同士の相互拡散を抑制する手法がある。レーザーブレイジングにおいてもインサート材を母材間に挟み込むことでIMCの生成を抑制することが期待されており、例としてチタン箔をインサート材として適用した検討が報告されている。図4⁸⁾に示すように、Tiインサートを用いたA5052合金とAZ31合金のレーザーブレイジングではAZ92ワイヤ/TiインサートおよびTiインサート/A5052の接合界面にて非常に薄いIMCが形成されることで接合が達成されており、直接接合と比較してTiインサートを用いることで継手強度が著しく増加することが報告されている⁸⁾。

4.3 FCWを用いたレーザーブレイジング

本項では、当社で取り組んだレーザーブレイジング関連技術について紹介する⁹⁾。

鋼材とアルミニウム合金材の異種金属接合において、十分な接合強度を確保するためには、接合界面に形成するFe-Al系の脆弱なIMCの成長を抑制する必要がある。過去の知見の一つとして、ろう付用のアルミニウムフラックスコアードワイヤ（以降Al-FCW）を用いてレーザーでのブレイジング+溶接（以降ブレイズ溶接）を施工することにより、脆弱なIMC成長抑制効果ならびに溶接部のぬれ性改善が確保され、アルミニウム合金材溶接継手の引張剪断強度となる継手性能が得られていた。

しかし、ろう付用のAl-FCWの本ブレイズ溶接への適用は、ワイヤ送給時の座屈、スラグ過多、剥離強度が低いなど、実用化には不適な要素があった。当社では、それらを解決するために、工業的な用途にも応えうる新しいAl-FCWの開発に着手した。具体的には、Al-FCWの構成要素であるシース材とフラックス分について適正化を図った。

シース材成分の適正化では、FCW形態の簡易的模擬のため、当初はソリッドワイヤ形態とした。施工は、一般的なろう付用Al-FCWに適用される粉末状フラックスをあらかじめ

表面に塗布したアルミニウム合金材を上、鋼材を下に配置して重ね合わせ、アルミニウム合金材の端部にレーザー光を照射して溶融させ、その溶融部にソリッドワイヤを供給添加する

図4 レーザブレイジングを用いたアルミニウム合金とマグネシウム合金の異材接合に及ぼすTiインサートの効果⁸⁾

図3 低炭素鋼とA6000系合金のYAGレーザー溶接断面⁷⁾

方法を用いて、重ねすみ肉溶接継手を作製した。継手性能の評価は、引張剪断強度については25 mm溶接幅に切断した短冊継手試験片、剥離強度についてはその短冊継手試験片を溶接端部から10 mm離れた部分で直角に折り曲げた試験片を用いて、単位溶接長当たりの破断応力にて評価した。その結果、継手強度（引張剪断、剥離）は新開発シース成分ワイヤが最も高く、次いでJIS A4000系ワイヤ、JIS A5000系ワイヤの順となった。

接合部断面のマクロ観察および接合界面に生成したIMC層の光学顕微鏡観察の結果を図5に示す。JIS A5000系ワイヤのIMC層厚は今回の比較の中で最も厚く、またアルミニウム溶接金属内に針柱形状のものも観察された。一方、JIS A4000系ワイヤならびに新開発シース成分ワイヤによるIMC層厚は全体にわたり薄く、とくに新開発シース成分ワイヤは最も薄く分布していることが確認できた。

一方、フラックスの最適化では、ろう付用のAI-FCWにも用いられている一般的なノコロックのほかに、数種類のフラックスを準備した。フラックスの選定には、アルミニウム酸化皮膜の融解性があり、置換めっき反応や高融点物質生成がなく、耐食性に影響しない物質とし、かつAI-FCWへの充填供給性も考慮した結果、表2に示すフッ化アルミカリウム化合物をベースとし、フッ化アルミ化合物またはフッ化セシウムの混合とした。さらに、前述の新開発シース材の適用、フラックス充填率の適正化を図り、AI-FCWを試作した。

その試作AI-FCWを用いて、前述のシース適正化と同様の

方法で継手を作成し、継手性能を評価した。その結果、A3、A4はまったく接合せず、A1、A2、B2は引張剪断強度がほぼ同等で、剥離強度は高い順から $B2 > A1 > A2$ となった。B2では界面剥離破断をせずアルミニウム合金側で破断、との良好な結果を得た。一方で、ミグブレイズ溶接による同検証の結果では、剥離強度が最も高いのはA2となった。

以上の検証から、レーザブレイズ溶接ならびにミグブレイズ溶接によるアルミニウム合金/鋼の異種金属接合に適した新開発のAI-FCWのコンセプトが明確になった。図6には、レーザブレイズ溶接にて得られた接合部の外観を示す。特にビード外観の改善が顕著で、新開発のAI-FCWがろう付用のAI-FCWよりも安定した溶接部を呈している。本ワイヤはナイス株式会社の協力を得て実用化も完了した。

本開発でのアルミニウム合金材と鋼板との異種金属接合継手の継手性能と接合界面のIMC層厚との関係を整理した結果を図7に示す。本開発のAI-FCWを用いることで、IMC層成長の抑制効果が高まり、IMC層厚をより薄く制御できる。その結果として、脆いIMCの成長が界面全域にわたり抑制され、継手性能、特に剥離強度が改善したと考えられる。

フラックスのIMC抑制の作用については、現段階では未だ推定の域を脱しないが、元来保有する表面洗浄効果により、アルミニウム側だけでなく鉄側の表面皮膜にも影響を及ぼした可能性があることや、今回添加したCsFが6000系（Al-Mg-Si系）酸化皮膜における対Mgフラックスとして有効であったこと、などが想像される。

図5 レーザブレイズ溶接部の断面形状および界面の比較⁹⁾

図6 ブレイズ溶接部外観⁹⁾

3

表2 フラックス配合 (目標値)⁹⁾

Al-FCWの 種類	フラックス配合比率 (mass%)		
	K-Al-F	Al-F	Cs-F
A1	100	-	-
A2	75	25	-
A3	50	50	-
A4	25	75	-
B2	75	-	25

図7 界面IMC層厚と継手性能の関係⁹⁾

4.4 レーザ異材圧接

2枚のA6061とSPCCの薄板(幅12mm)を圧接ローラで押さえながら、その接合面にYAGレーザを10~90Hzでスキャン照射して面接合する方法が試みられている。レーザ圧接装置の概略を図8¹⁰⁾に示す。この方法でも、両金属の溶融を少なくした場合、IMC層厚さを薄くでき、良好な試験片では、引張荷重1~1.6kNでアルミニウム母材破断をする結果が得られている。一方、剥離試験では、①接合界面で剥離が起り、②剥離強度は比較的低いこと、③その剥離面にはFeOが生成して

おり、④FeOはレーザ照射位置を鋼側にずらすと増加すること、そして⑤剥離強度は溶接部のシールド状態の改良と圧接強度の増加により増加できることなどが確認されている。この方法でも、溶接部のシールド状態が重要であり、接合中の継手界面をArガス雰囲気中で覆い、接合中の酸化を防止する必要がある。なお、アルミニウム合金と亜鉛めっき鋼板では、膜状のIMC層の生成を防止することによって高引張強度・高剥離強度の継手を製作できることが明らかにされている^{11), 12)}。

5. おわりに

レーザ溶接を用いたマルチマテリアル接合への検討は、発振方法、ビームモード、マルチ化などレーザ技術の進化に伴い、継続的に検討されている。レーザが得意とする高速度加工、低入熱、瞬発性、リモート制御などを活かした接合技術が進化していくこと、また、本技術が自動車やそれ以外の分野において、素材選択の幅を広げ、各材料のもつ特長を最大限引き出す構造の創出に貢献できることを期待したい。

参考文献

- 1) 今村美速：軽金属，**66** (2016)，552-559.
- 2) 片山聖二：軽金属，**62** (2012)，75-83.
- 3) 三瓶和久：レーザ加工学会誌，**16-1** (2009)，8-15.
- 4) 宋 宇絃，才田一幸，安藤彰芳，西本和俊：溶接学会論文集，**22** (2004)，315-322.
- 5) 才田一幸，大西春樹，西本和俊：溶接学会論文集，**26** (2008)，235-241.
- 6) 片山聖二：レーザー研究，**38** (2010)，594-602.
- 7) F. Wagner, I. Zerner, M. Kreimeyer, T. Seefeld and G. Sepold: Proc. ICALEO 2001, Section C (2001), 1301.
- 8) 小椋 智，柊津俊介，池 和薫，才田一幸：溶接学会論文集，**36** (2018)，247-252.
- 9) 松本 剛，笹部誠二，岩井正敏，杵渕雅男：自動車技術会論文集，**42** (2011)，591-596.
- 10) 西本浩司，奥本良博，原野智哉，安宅 健，藤井洋郎，片山聖二：溶接学会論文集，**25** (2007)，436-442.
- 11) 西本浩司，奥本良博，原野智哉，安宅 健，藤井洋郎，片山聖二：溶接学会論文集，**26** (2008)，181.
- 12) 西本浩司，安宅 健，藤井洋郎，片山聖二：第63回レーザ加工学会講演論文集，(2005)，133.

図8 レーザ圧接装置の概略¹⁰⁾