

レーザーろう付の概要と特徴*

池田 剛司**

Overview and Characteristics of Laser Brazing*

Takeshi Ikeda**

1. はじめに

ろう付という用語は、JIS Z 3001-3：2008 溶接用語－第3部：ろう接の中で「450℃以上の融点を持つろうを用いて母材をできるだけ溶融しないで行う接合方法。ブレイジングともいう。」と定義されており、ISO857-2：2005では“brazing”に対応している。また、レーザーろう付を同JISでは「レーザーの熱でシールドガス中で行うろう付。」とし、ワイヤ状の溶加線材をレーザービームで溶融する技術として定義されており、同ISOでは“laser beam brazing”に対応している。レーザーろう付は自動車ボディパネルの接合技術として欧州から導入が進められ、亜鉛めっき鋼板に対してCu-3%Siワイヤを用いて行われてきた。その後、アルミニウム合金に対しては高温割れを防ぐ目的から4000系ワイヤを用いたレーザーろう付が欧州の自動車メーカーで導入されている。一方、国内ではアルミニウム合金と鉄鋼材料との異材接合技術として研究開発事例が報告されているものの、自動車メーカーでの導入事例は亜鉛めっき鋼板を対象にホンダCIVICやN-BOX、日産アリアに見られるのみでまだまだ限定的である。しかし近年、ハンドトーチ型のレーザー溶接機にワイヤ供給装置を組み合わせた安価な装置が市販化されており、板金加工業界からもレーザーろう付技術が広がっていく予感もしている。以下、このような流れで装置仕様としてのレーザービームプロファイルにも触れながら、レーザーろう付の概要と特徴を述べる。

2. 亜鉛めっき鋼板のレーザーろう付

亜鉛めっき鋼板のレーザーろう付は、1997年に Audi

TTに初めて導入された¹⁾。レーザー発振器はランプ励起 Nd:YAGレーザーで、ワイヤ径程度にビーム径を大きくするため、焦点から外れた位置で照射するデフォーカスビームを用いていた。Cピラーをリアクォータパネルと接合することにより、コンバーチブルとクーペとで部品の共通化を可能とした。その後2000年頃から、ファイバーレーザー、ディスクレーザー及び半導体レーザーといった、電気から光へのエネルギー変換効率が高いレーザー発振器が登場した。ランプ励起Nd:YAGレーザーのエネルギー変換効率が3%程度であったのに対し、ファイバーレーザーは30%、ディスクレーザーは25%、半導体レーザーは40%といわれた。エネルギー変換効率の向上は電力消費のランニングコスト低減だけでなく、電源装置や冷却装置の小型化にも繋がった。これらのレーザー発振器の中でも半導体レーザーはビーム品質に劣るため細いコア径の光ファイバーには通すことができず、当時のファイバーコア径は1000 μm程度であった。しかし、もともとNd:YAGレーザーのデフォーカスビームを用いてきたレーザーろう付への適用に際してはそれが逆に幸いし、焦点のトップハットビームプロファイルで照射することができた。半導体レーザーを用いたレーザーろう付は、2001年にAudi A3のテールゲートで初めて導入された²⁾。ここまで述べてきたレーザーろう付の利点は後処理せずに塗装工程へと進められる外観品質にあったが、外観品質に加えて軽量化の観点からもレーザーろう付の導入が進められた。それは、抵抗スポット溶接と比較してフランジ幅の狭い継手形状が可能となる点である。窓枠やAピラーのフランジを短くすることによって、軽量化だけではなく車内からの視界の拡大にも貢献した。また、ルーフとサイドパネルの接合部にレーザーろう付を導入することにより、抵抗

* 本稿の主要部分は、軽金属溶接, 62 (2024), 461-465に掲載

The main part of this paper has been published in Journal of Light Metal Welding, 62 (2024), 461-465.

** (株) UACJ マーケティング・技術本部 R&Dセンター 板・鍛製品開発部

Flat Rolled, Foundry and Forged Products Development Department, Research & Development Center, Marketing & Technology Division, UACJ Corporation

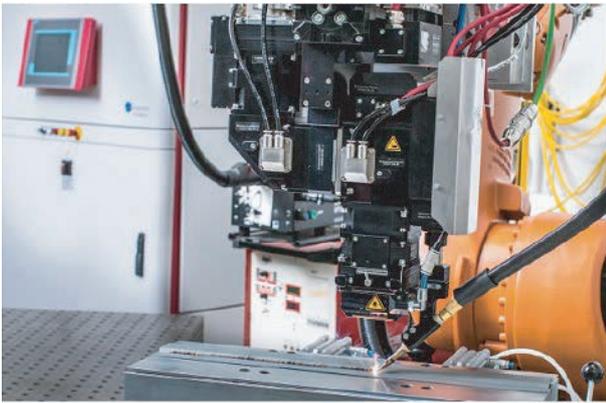


Fig. 1 Roof joint lab trials at Laserline and Audi A3²⁾.

スポット溶接部を隠すために用いてきた樹脂カバーを削減できた。Fig. 1に、Laserline社におけるルーフ溶接試験及びAudi A3外観を示す。溶接ワイヤ供給機構及び光学系はScansonic社ALO3を用い、溶接速度は4～5 m/minである。溶接ワイヤ先端が開先に接触し、開先位置に合うように溶接ワイヤ先端が移動することにより、開先からレーザー照射位置がずれることなくレーザーろう付を行う。このような接触型加工ヘッドによるルーフ等へのレーザーろう付は欧州では一般的な生産技術と捉えられている。

3. アルミニウム合金のレーザーろう付

アルミニウム合金のレーザーろう付も外観品質向上や軽量化の観点から、亜鉛めっき鋼板で用いられてきたものと同じ接触型加工ヘッドによって、欧州の自動車メーカーで導入されている³⁾。その一例として、Fig. 2にAudi Q5のアルミニウム合金製テールゲートを示す。鉄鋼材料と比較したアルミニウム合金における留意点は、レーザー反射率及び熱伝導率がともに高いことにより大きな溶込み深さを得るには高いパワー密度が必要になる点である。アルミニウム合金において、熱伝導型溶込みから大きな溶込み深さが得られるキーホール型溶込みへと移行する閾値は、レーザー出力をスポット



Fig. 2 Audi Q5 aluminum tailgate with weld bead³⁾.

径で除した値として4.4 kW/mmと示した例がある⁴⁾。これはパワー密度にすると560 kW/cm²となるが、SUS304ステンレス鋼への電子ビーム溶接においてキーホール型溶込み形状へと移行する閾値として示された600 kW/cm²と同等であることも確認できた⁵⁾。このように高いパワー密度を得るためにはスポット径を小さくする必要があり、アルミニウム合金のレーザーろう付では0.6～0.9 mmのスポット径を用いている。

ここまでは単純な集光光学系によるスポット径の選択について述べてきたが、過度な裏ビード幅を回避するためにダブルスポットと呼ばれる大小2つのスポット径を同軸上に配置した特殊光学系を試験した事例を紹介する³⁾。Fig. 3にダブルスポット及びシングルスポットによるアルミニウム合金の重ね隅肉継手を示す。ワイヤ送給速度や溶接速度を同一としている。ダブルスポットの方が平滑なビード表面を示しているほか、裏ビード幅が狭くなった影響により余盛高さ(文献では最小有効断面：a)が大きくなって機械的特性が改善された。また、同じような目的で3スポットと呼ばれる特殊光学系を適用した事例もある⁶⁾。3スポット

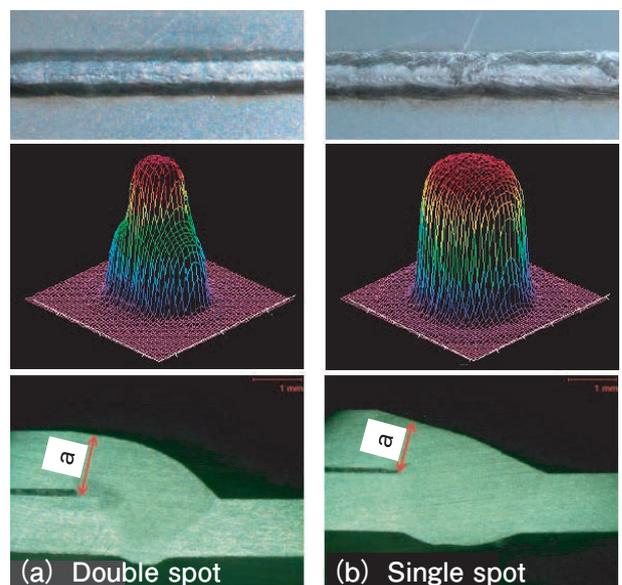


Fig. 3 Lap fillet weld joint with Al-Si filler wire³⁾.

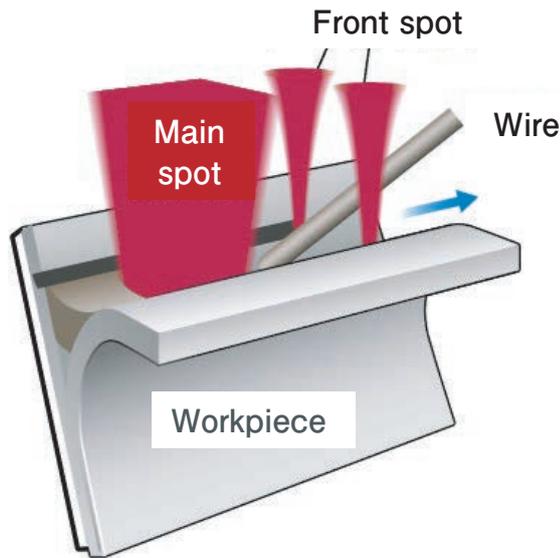


Fig. 4 Schematic illustration of 3-spot beam irradiation on galvanized steel sheet⁶⁾.

モジュールはもともと亜鉛めっき鋼板のレーザーろう付において、先行する2つのレーザーで亜鉛めっきを除去した後にろう付を行うために開発された。Fig. 4に亜鉛めっき鋼板での3スポットビーム照射の模式図を示す。アルミニウム合金においては追加した2つのレーザーによって平滑なビード形状とする目的がある。Fig. 5に3スポットモジュールによるアルミニウム合金製ルーフ溶接部を示す。このように、レーザービームプロファイルを改善するための光学系の開発も進められてきた。

4. レーザろう付による異材接合

近年、地球環境保護の観点から自動車においてはCO₂排出量削減を目的とした燃費規制が行われている。そのためには軽量材料への置換による軽量化が効果的であり、ボデー及び部品へのアルミニウム合金等の適用が検討されている。これら軽量化では複数の素材を適材適所で用いるマルチマテリアル化がトレンドである。マルチマテリアル化では例えば鉄鋼材料とアルミニウム合金といった異材接合技術が必要であるが、接合界面に形成する金属間化合物層の制御といった技術課題があるため、リベットなどの副資材が用いられてきた。しかし副資材がリサイクル中に異物となることから、副資材を必要としない接合技術として抵抗スポット溶接、摩擦かくはん接合及び摩擦かくはん点接合が今後のトレンドと考えられた⁷⁾。一方、接合界面に形成する金属間化合物層の制御という点では、低融点のろう材を用いるレーザーろう付も検討されてきた。ここでは、レーザーろう付による鉄鋼材料とアルミニウ

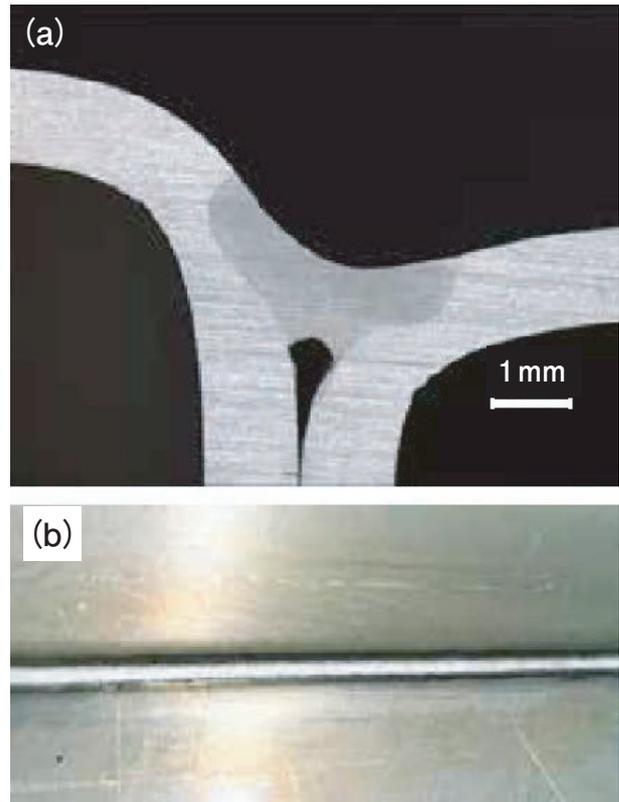


Fig. 5 Aluminum alloy roof joint by 3-spot module⁶⁾.

ム合金の異材接合の研究開発事例を紹介する。

はじめに、開先にフラックスを塗布した事例を紹介する⁸⁾。供試材にはアルミニウム合金5052、自動車用裸鋼板IF (Interstitial Free) 鋼、及びステンレス鋼SUS304でいずれも板厚は1.2 mmである。ろう材は4047ワイヤで、ワイヤ径は1.2 mmである。フラックスはノクロックろう付用フラックスFL-7 ($\text{KAIF}_4 + \text{K}_3\text{AlF}_6$)で、塗布量は 22.5g/m^2 である。レーザーろう付は、多関節ロボットに取り付けた定格出力2.0 kWの半導体レーザーで実施した。Fig. 6に示すように15°の角度をつけた治具に下側に鉄鋼材料、上側にアルミニウム合金を固定し、重ね隅肉ろう付を実施した。レーザー出力、溶接速度 (V_w) 及びワイヤ送給速度 (V_f) を変化させた。その際、 $V_f/V_w = 2.4$ とした。得られた継手の機械的特性を調査したところ、破断強さの最大値は5052母材強さの80%以上を示し、その条件での鉄鋼材料とろう材の界面の金属間化合物層の厚さは $2\ \mu\text{m}$ 以下であった。レーザー出力を増加させると金属間化合物は急激に成長して破断強さが低下した。金属間化合物は FeAl_3 及び Fe_2Al_5 が同定された。

次に、フラックスを使用しないレーザーろう付技術として、タンデムビームを用いた事例を紹介する⁹⁾。供試材にはアルミニウム合金6022で板厚は1.2 mm、及び2種類の亜鉛めっき鋼板 (合金化溶融亜鉛めっき鋼板

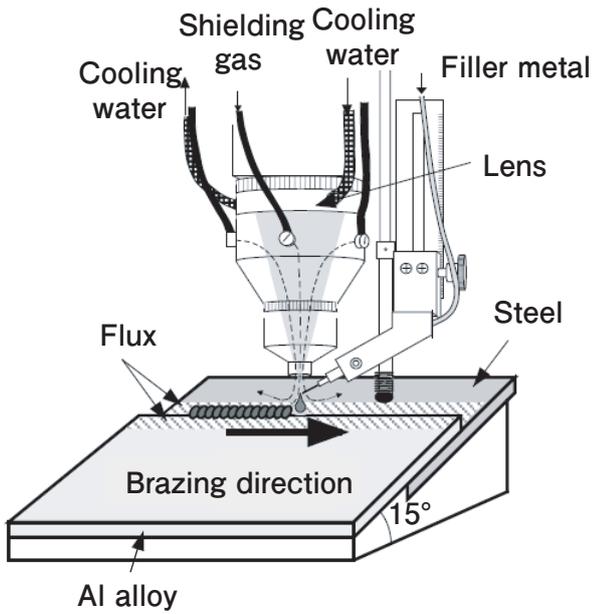


Fig. 6 Schematic illustration of laser brazing with flux⁸⁾.

GA, SCGA270) 及び溶融亜鉛めっき鋼板GI, GI70) で板厚は0.8 mmである。ろう材は4047ワイヤで、ワイヤ径は1.2 mmである。タンデムビームはFig. 7に示すように配置し、予熱ビーム (定格出力500 W) と主ビーム (同2 kW) を用いた。溶接速度5 mm/s 及びワイヤ送給速度10 mm/s を固定とし、両ビームのレーザー出力及び予熱ビーム照射位置として重ね隅肉継手ルート部から亜鉛めっき鋼板側へのずらし距離を変化させた。亜鉛めっき鋼板に対するろう材のぬれ性はおおむね良好であったが、GIの方がGAよりもろう材のぬれ・拡がり性に優れていた。得られた継手の機械的特性を調査したところ、破断強さの最大値はGAでは6022母材の55%程度で、GIでは75%を示した。ここまでで紹介した事例では、スポット径の記述は無いものの焦点で照射しており、半導体レーザーのトップハットビームプロファイルを使用したと考えられる。また、フラックスについては皮材をアルミニウム合金、内部にフラックスを充填したフラックスコアードワイヤが開発されており、ワイヤ送給機構を持つ市販のレーザー溶接機によるレーザーろう付が容易になっている¹⁰⁾。

5. ハンドタッチ型レーザー溶接機によるレーザーろう付

近年、ハンドタッチ型のレーザー溶接機が市販化されており、板金加工工場への導入事例も見られている¹¹⁾。Fig. 8にハンドタッチ型レーザー溶接機による軟鋼の溶接作業を示す。当初は水冷のNd:YAGレーザーを光源としたハンドタッチ型レーザー溶接機が市販化され、ステ

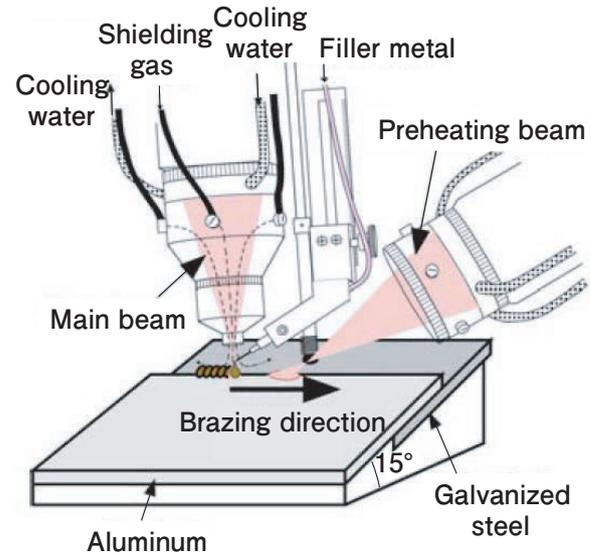


Fig. 7 Schematic illustration of tandem beam laser brazing⁹⁾.

ンレス鋼などの鉄鋼材料を対象としていた。その後、電気から光へのエネルギー変換効率が高いファイバーレーザーの登場により空冷が可能となり、装置を小型化することができるようになった。また、高出力化及び小スポット径化によりアルミニウム合金を溶融させることが可能となった。アルミニウム合金の溶接ではワイヤ供給を伴うレーザーろう付が一般的だが、前述の通りワイヤ径程度以上にビーム径を拡大する必要がある。そのため、ビーム径の拡大手法としてFig. 9に概略図を示すようなウォブリング (ワブリングともいう) 照射を用いている¹²⁾。加工光学系内にガルバノスキャナを搭載し、円や直線などの高速ミラー走査を行いながら溶接方向に照射するものである。ウォブリング照射もまた、レーザービームプロファイルの改善手法と認識している。このような安価な溶接機が市販化されたことにより、板金加工業界からもレーザーろう付技術が広がっていく予感もしている。



Fig. 8 Mild steel welding using hand torch type laser¹¹⁾.

Wobbling mode	Schematic illustrations	Samples
Circle (CW & CCW)		
Straight line		
Figure eight (8)		
Infinity (∞)		

Fig. 9 Schematic illustrations of wobbling irradiation¹²⁾.

6. おわりに

レーザーろう付の概要と特徴について、レーザービームプロファイルにも着目して述べてきた。欧州で先行している自動車ボディパネルの接合や、日本国内で開発されてきた異材接合が生産技術として浸透するにはまだまだ時間が掛かるのかもしれないが、ハンドトーチ型のレーザー溶接機にワイヤ供給装置を組み合わせた安価な装置が広まれば、レーザーろう付がより身近な接合技術として捉えられるようになるはずである。また、溶接ワイヤをレーザーによって溶融させることを金属造形に応用した付加製造 (AM, Additive Manufacturing)、いわゆる3Dプリンティングは、接合方法の枠から飛び出したレーザーろう付技術の発展形といえるであろう¹³⁾。最後は多少の拡大解釈が入ってしまったが、レーザーろう付技術の総論として参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) Axel Luft, Silke Pflueger: Industrial Laser Solutions, **26** (2011), <https://www.laserfocusworld.com/industrial-laser-solutions/article/14216538/body-in-white-diode-laser-brazing>
- 2) Axel Luft, Tobias Stittgen: Laser Technik Journal, **11-5** (2014), 32-35.
- 3) Axel luft, Tobias Stittgen: Laser Technik Journal, **12-3** (2015), 58-62.
- 4) Jan-Philipp Weberpals, Daniel Boehm, Martin Sommer, Johann Hesse: Proceeding of LAMP2019-the 8th International Congress on Laser Advanced Materials Processing, #19-057.
- 5) 荒田吉明: 日本金属学会会報, **8** (1969), 243-253.
- 6) Axel Luft: Industrial Laser Solutions Japan, 2017年9月号, 20-22.
- 7) 池田剛司, 戸次洋一郎: 軽金属溶接, **59** (2021), 475-480.
- 8) 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.
- 9) 才田一幸, 大西春樹, 西本和俊: 溶接学会論文集, **26** (2008), 235-241.
- 10) 大西武志: 軽金属溶接, **52** (2014), 416-421.
- 11) 株式会社トーコー: Sheetmetal ましん&そふと, **794** (2022), 24-27.
- 12) Bryce Samson, Tony Hoult, Mustafa Coskun: Industrial Laser Solutions Japan, 2017年9月号, 24-27.
- 13) 服部聡史, 鷺見信行, 木場亮吾, 橋本 隆: 軽金属溶接, **61** (2023), 130-133.



池田 剛司 (Takeshi Ikeda)
(株)UACJ マーケティング・技術本部
R&D センター 板・鋳造製品開発部