

ワイヤをインサート材として用いるレーザーロール溶接に関する 基礎的研究

三重大学 大学院工学研究科

助教 尾崎 仁志

(2018年度 一般研究開発助成 AF-2018211-B2)

キーワード：レーザーロール溶接，インサート材，ワイヤ

1. 緒言

近年、自動車等の輸送機器の軽量化のために、アルミニウム合金などの軽金属と鉄鋼とを適材適所に配置した、材料ハイブリッド構造が適用されるようになってきている。その構造の実現には、両者を高い信頼性と生産性の下で接合する必要が生じるが、接合法のデファクトスタンダードは未だ定まっていない。その一因として、両者の物性値の差が大きく、かつ接合部に脆性な金属間化合物を容易に形成することから、通常の方法では接合が困難であることが挙げられる。

一方、沓名ら¹⁾が開発したレーザーロール溶接法では、図1に示すようなレーザーとローラを組み合わせた装置により重ね継手の線溶接を行い、難接合継手であるアルミニウム合金と鋼とを高強度で接合することが可能である。過去の研究²⁾において、接合面にアルミろう付用フラックスを塗布すると、フラックスを塗布しない場合よりも高速での溶接が可能となり、継手強度も向上することが明らかになっている。しかし、当該フラックスは粉末であり、それを接合面に塗布する際の作業性および塗布量の制御が困難であることが課題となっており、これは接合の自動化の際にも支障となる。よって、レーザーロール溶接においてフラックスを接合面に効率良く供給する技術が必要である。

一般的なアルミニウム合金と鋼とのレーザー溶接においては、フラックスを用いない、所謂フラックスレスでの接合が検討されており、Longら³⁾は脆性な金属間化合物の

生成を抑制するために、Ni、SiおよびZnの金属粉末の混合物を接合面に設置してレーザー重ね溶接を実施し、継手強度が向上したことを報告している。また、竹本ら⁴⁾はレーザー溶接にZn系の箔をインサート材として適用し、フラックスレスでアルミニウム合金と亜鉛めっき鋼をレーザー重ね溶接し、比較的高い強度が得られたことを報告している。これらは、フラックスを用いてはいないが、金属をインサート材として用いており、その設置のための作業性および使用量の制御に関する課題は依然として残る。

本研究では上記の課題を解決するため、フラックス粉末の代替として、鉄鋼—アルミニウム合金異材溶接用フラックスコアードワイヤが利用できないかと考えた。このワイヤは、アルミニウム合金と鉄鋼との異材ブレーズ溶接用に市販されているもので、コアがフラックス、皮材がアルミニウム合金で構成されている。そこで、当該ワイヤのコアのフラックスに着目し、ワイヤをインサート材として接合面に設置し、置きろう付のろう材のように使用すれば、前述の作業性と塗布量の問題をクリアできるのではないかと考えた。

ここで、通常のレーザーロール溶接ではデフォーカスしたレーザー光を鋼表面に照射し、鋼からの熱伝導によりアルミを加熱するため、上述のようにワイヤを接合面に設置すると、鋼とワイヤ、およびアルミとワイヤが線接触となってしまうため、熱伝導の面では不利となる。しかし、レーザーロール溶接ではローラにより接合部を1kN程度加圧するため、鋼からワイヤへの熱伝導が促進され、加熱されて溶融もしくは軟化したワイヤを媒介としてアルミへの熱伝導が起り、継手を作製できるのではないかと考えられる。また、ろう付では接合部のすき間を狭小にすることで、ろう材の濡れが促進されることが知られており、その点でもローラによる加圧は有利であると考えられるが、ワイヤがレーザーロール溶接性におよぼす影響の詳細については明らかでない。また、ワイヤをインサート材として使用する溶接法については、一部抵抗溶接において例⁵⁾が見られるのみであり、不明な点が多い。

そこで本研究では、ワイヤをインサート材として用いるアルミニウム合金と鋼とのレーザーロール溶接継手について、溶接部組織や継手強度等の継手性能を調査することで、溶接条件と継手性能との関係を実験的に明らかにすることを目的とする。

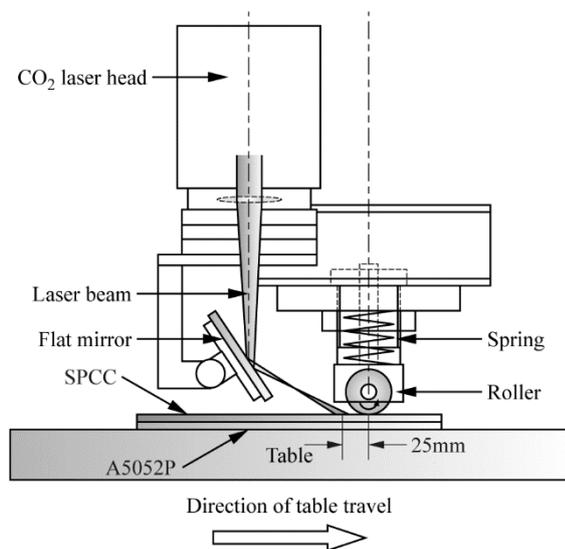


図1 レーザーロール溶接装置

2. 実験方法

2.1 供試材

供試材として、板厚 0.8mm の低炭素鋼板 SPCC および板厚 1mm のアルミニウム合金板 A5052P を使用した。供試材の寸法はいずれも 40×150mm とした。また、インサート材としてφ1.2 の異材溶接用フラックスコアードワイヤ Alu S4Le を長さ 150mm に切断して使用した。SPCC および A5052P の化学組成を表 1 に示す。

表 1 供試材の化学組成

Materials	Elements (mass%)									
	C	Si	Mn	P	S					
SPCC	0.05	0.01	0.21	0.015	0.010					
A5052P	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al	
	0.12	0.23	0.03	0.07	2.39	0.18	0.01	0.02	Bal.	

表面前処理として、両板材の接合面を 400 番のエメリー紙で研磨し、酸化膜除去を行った後、エタノールで脱脂処理をした。レーザを照射する鋼表面には、レーザの吸収率を高めるためにグラファイトスプレーを塗布した。ワイヤは A5052P の端部から 2mm の位置に設置した。

2.2 レーザロール溶接実験

本実験では、定格出力 2kW、波長 10.6μm、連続発振型の CO₂レーザ発振器を用いた。図 1 に示したように、レーザ装置に平面反射ミラーとローラ加圧装置を組み合わせた装置を用いて実験を行った。発振されたレーザ光を、焦点距離 200mm の ZnSe 製集光レンズによって集光し、平面反射ミラーにて反射させた後、角度をつけて板材へと照射した。供試材の設置方法については、図 2 に示すように SPCC が上、A5052P が下になるようにし、その接合面にワイヤを設置した。

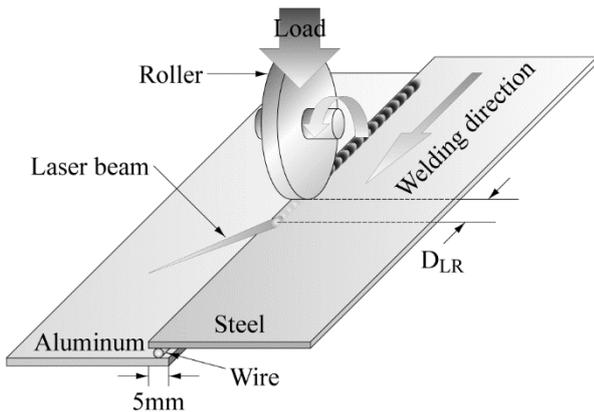


図 2 供試材の設置方法

2.3 溶接条件

溶接条件を表 2 に示す。レーザ出力は 2kW、ローラ加圧力を 1kN で一定として実験を行った。SPCC と A5052P との重ね代は 5mm とした。また、シールドガスに Ar を用い、流量を 20l/min とした。本研究の実験条件として、溶接速度を 5～35mm/s の範囲で変化させて実験を行った。

表 2 レーザロール溶接条件

Laser type	CO ₂ laser (CW)
Laser power	2 kW
Beam spot shape	Quasi-elliptical
Beam spot size	Minor axis : 2.5 mm Major axis : 3.5 mm
Welding speed	5 ~ 35 mm/s
Roller pressure	1 kN
DLR	25 mm
Overlapped width	5 mm
Shielding gas	Ar : 20 l/min
Insert	Flux-cored wire

DLR : Distance between laser and roller

3. 実験結果および考察

3.1 溶接可否

図 3 に、プロセスウィンドウを示す。○印は継手が得られたことを示し、▲印は継手が過剰に溶融したことを示し、×印は継手が得られなかったことを示している。

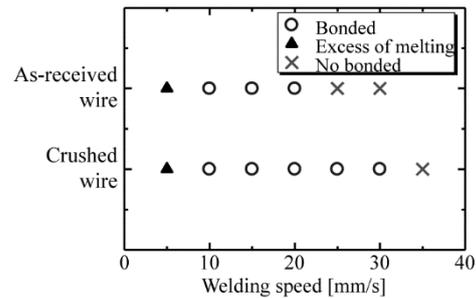


図 3 プロセスウィンドウ

まず、上段の結果に着目すると、溶接速度 5mm/s では入熱量が過剰であったためか継手に貫通孔が発生した。溶接速度 25 および 30mm/s の場合、入熱が不足したためか継手は得られなかった。したがって、レーザロール溶接継手は 10～20 mm/s の溶接速度で作製可能であった。

この場合、鋼板とワイヤが線接触しているため、鋼板からワイヤへの熱伝導が抑制されている可能性がある。そこで、鋼板とワイヤとの接触面積を拡大するために、0.65mm の厚さに圧潰したワイヤも比較のために使用した。

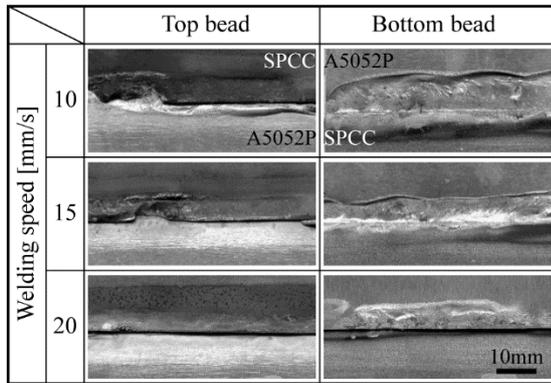
図 3 の下段に、ワイヤを圧潰して用いた場合のプロセスウィンドウを示す。溶接速度 5mm/s では継手に貫通孔が生じ、この結果はワイヤを圧潰せず用いた場合と同様であった。ワイヤを圧潰して用いた場合、レーザロール溶接継手は 10～30mm/s の溶接速度で作製可能であった。よって、ワイヤを圧潰して用いた場合の方が、溶接可能な速度が広範であった。以降は、ワイヤを圧潰せず用いた場合と圧潰して用いた場合との継手性能を比較する。

3・2 レーザロール溶接継手のビード外観

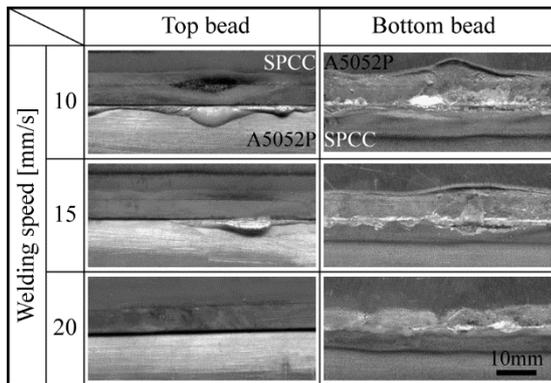
図 4 に溶接速度 10~20 mm/s のレーザロール溶接継手の表裏両面のビード外観を示す。(a)はワイヤを圧潰せずを用いた場合、(b)は圧潰して用いた場合を示している。

ワイヤを圧潰せずを用いた場合の表面のビード外観に関して、10 および 15mm/s の低い溶接速度では、写真左側においてレーザ照射の開始位置に近接していたためか、鋼板が部分的に溶損している。これは、鋼板とワイヤとが線接触であったため、鋼板からワイヤへの熱伝導が抑制されていたためと考えられる。一方、このような鋼板の溶損はワイヤを圧潰して用いた場合には観察されなかった。

また、ワイヤを圧潰して用いた場合の溶接速度 10 および 15mm/s において、接合面からはみ出したワイヤが部分的に観察された。これは、鋼板とワイヤとの接触面積が増加することによりワイヤの溶融が促進され、ローラの圧力によりワイヤが接合面から外部に押し出されたためと考えられる。



(a) ワイヤを圧潰せずを用いた場合



(b) ワイヤを圧潰して用いた場合

図 4 レーザロール溶接継手のビード外観

3・3 レーザロール溶接継手のビード断面

図 5 にレーザロール溶接継手のビード断面を示す。左側はワイヤを圧潰せずを用いた場合、右側は圧潰して用いた場合を示している。

ワイヤを圧潰せずを用いた場合に関して、ワイヤの接合面への残留は巨視的レベルでは観察されなかった。この結果は、ワイヤを圧潰して用いた場合も同様であった。

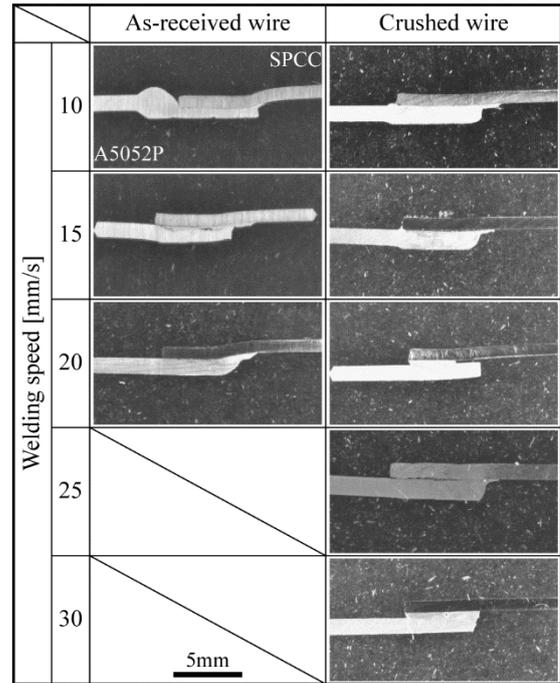


図 5 レーザロール溶接継手のビード断面

図 6 にワイヤを圧潰して用いた場合のビード断面を光学顕微鏡で観察した例を示す。この場合、溶接速度 20mm/s 以上のとき、ワイヤが接合面に残留していることが確認されたが、A5052P と一体となっていた。

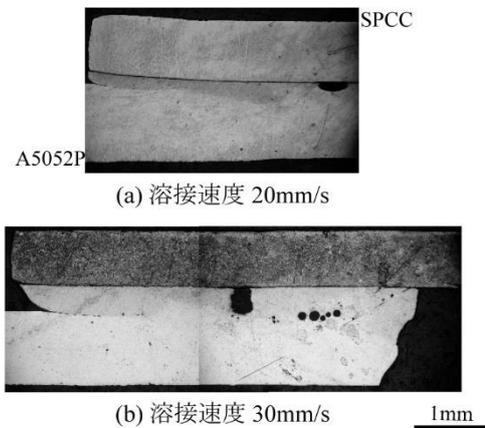
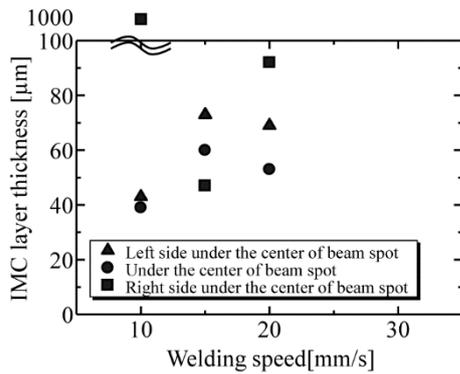


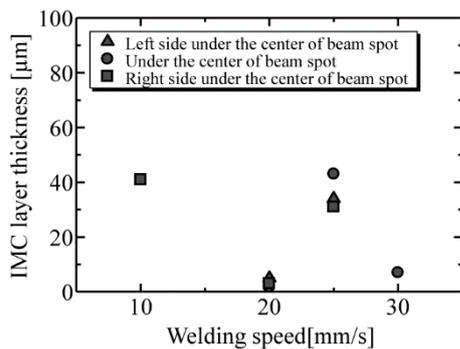
図 6 ワイヤを圧潰して用いた場合のビード断面

3・4 接合界面の金属間化合物層の厚さ

前述のビード断面について、接合界面のマイクロ組織を光学顕微鏡で観察し、金属間化合物層（以下 IMC 層）の厚さを測定した結果を図 7 に示す。(a)はワイヤを圧潰せずを用いた場合、(b)は圧潰して用いた場合を示している。●印、▲印、および■印はそれぞれ測定された位置を示す。



(a) ワイヤを圧潰せずを用いた場合



(b) ワイヤを圧潰してを用いた場合

図7 金属間化合物層の厚さ

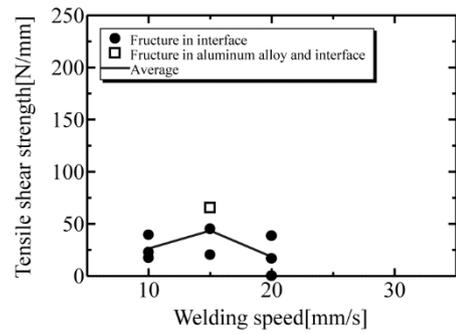
ワイヤを圧潰せずを用いた場合、厚さ約 40~1000 μm の IMC 層が確認された。また、IMC 層の厚さは板幅方向に対して不均一であった。一方、ワイヤを圧潰してを用いた場合の溶接速度 20 および 30mm/s において、IMC 層の厚さは 10 μm 未満であった。また、ワイヤを圧潰せずを用いた場合よりも板幅方向に対して均一に生成していた。さらに、ワイヤの圧潰の有無に関わらず、10 または 15 mm/s の低い溶接速度において、IMC 層内に亀裂が観察された。

3・5 継手の引張せん断強さ

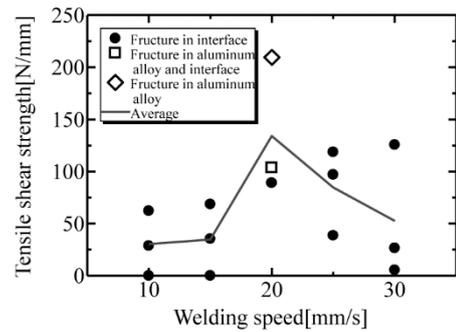
接合部の強度を評価するために引張せん断試験を実施した。試験片の形状は幅 10mm の矩形とした。図 8 に溶接長 1mm あたりの引張せん断強さを示す。(a)はワイヤを圧潰せずを用いた場合、(b)は圧潰してを用いた場合を示している。●印、□印、および◇印は、引張せん断試験後の試験片の破壊位置を示している。

ワイヤを圧潰せずを用いた場合、継手強度は全体的に低く、引張せん断強さは 30N/mm 程度であった。一方、ワイヤを圧潰してを用いた場合の引張せん断強さの平均値は全体的に高く、継手強度は最大で 209N/mm であり、A5052P 母材中で破断していた。

そのため、ワイヤをインサート材として使用した鋼とアルミニウム合金とのレーザロール溶接では、ワイヤを圧潰して用いることで、溶接可能範囲が高速化され、継手強度が全体的に向上した。



(a) ワイヤを圧潰せずを用いた場合



(b) ワイヤを圧潰してを用いた場合

図8 継手の引張せん断強さ

4. 結言

フラックスコアードワイヤをインサート材として鋼とアルミニウム合金とのレーザロール溶接を行った結果、以下の結論を得た。

- 1) ワイヤを圧潰して用いることにより、溶接可能範囲がより高速側に拡大する。
- 2) 金属間化合物層は、ワイヤを圧潰せずを用いた場合は厚く不均一に生成するが、ワイヤを圧潰してを用いた場合は薄く均一に生成する。
- 3) ワイヤを圧潰してを用いた場合、圧潰せずを用いた場合と比較して、全体的に高い引張せん断強さが得られる。

謝辞

本研究は、公益財団法人天田財団 2018 年度 レーザプロセッシング 一般研究開発助成 AF-2018211-B2 の助成を受けたものです。ここに深く感謝いたします。

参考文献

- 1) M. J. Rathod and M. Kutsuna: Joining of Aluminum Alloy 5052 and Low-Carbon Steel by Laser Roll Welding, *Welding Journal*, 83-1(2004), 16s-26s.
- 2) 大石拓哉, 鈴木実平, 川上博士, 尾崎仁志: 低炭素鋼とアルミニウム合金のレーザロール溶接継手強度に及ぼすフラックスの影響, *日本機械学会東海支部第 63 期総会講演会講演論文集*, 143-1(2014), 232-233.
- 3) J. Long, W. Huang, J. Xiang, Q. Guan, Z. Ma: Parameter optimization of laser welding of steel to Al with pre-placed metal powders using the Taguchi-response surface method,

Optics and Laser Technology, 108(2018), 97-106.

4) 竹本正, 木村幸生, 川人洋介, 西川宏, 片山聖二: レーザ照射法によるアルミニウム合金と鉄鋼のフラックスレス接合, 軽金属溶接, 46-7(2008), 300-308.

5) 寺島岳史, 黒田敏雄: ワイヤーをインサート材として用いた二相ステンレス鋼の抵抗溶接, 溶接学会全国大会講演概要, 78(2006), 172-173.