

レーザー圧接法を用いた異種金属表面活性化接合技術に関する研究

独立行政法人国立高等専門学校機構 阿南工業高等専門学校 技術室

技術職員 西本浩司

(平成 16 年度奨励研究助成 AF-2004023)

キーワード：レーザー，異種金属，接合

1. 研究の背景と目的

近年，地球環境保護や省エネルギーの観点から，各種輸送機器への構造部材としてアルミニウム合金をはじめとする軽量金属の適用が積極的に進められている．しかしながら，これらを有効的に使用する際，多くの場合異種金属材料との接合が不可欠である．しかし，従来の熔融溶接法では，両金属をともに大きく熔融混合してしまうため，異材接合界面に生成する金属間化合物層が厚くなり，また高温割れ等が発生し，十分な継手強度を得ることができない．また，融点や熱伝導率など異なる物性差のため，例えば融点が大きく異なる場合，そのまま熔融接合すると融点が低い側が溶け落ちてしまうなどの問題が生じる．このように融点が大きく異なる異種金属の組合せにおける接合では，両金属の熔融を極力抑制するか一方の金属のみを熔融し，他方の熔融を抑制するような手法が有効である¹⁾．したがって，異種金属接合では両金属間の異なる物性差をカバーしつつ，接合界面に生成する金属間化合物層を薄く抑制できるような溶接法が望まれる．

本研究では，構造部材の軽量化を目的にアルミニウム合金と鉄鋼材料との組み合わせにおいて，両金属板の合せ面側へレーザーを自在に照射することで両金属の接合界面温度を制御し，その外側に配した一對のローラで加熱直後の両金属を圧接することにより，接合材表面を接合させる直前で効率よく加熱し，すぐさまローラにより加圧することで塑性変形させ，酸化皮膜を破壊・新生面の創出および両金属の相対すべりを促進させることで，接合材表面を活性化させ固相状態で接合，またはわずかに熔融させるかして接合を行う異種金属表面活性化接合技術を確立することを目的とする．本報告では，自動車で用いられる低炭素鋼板（SPCC鋼板）および防錆鋼板である亜鉛めっき鋼板とA6061アルミニウム合金の組み合わせにおいて，接合条件と金属間化合物生成および継手強度との関係を調査した結果を報告する．

2. レーザー圧接法

レーザー圧接法の概略図を図1に示す．接合には2kW YAGレーザー（FANUC社製 Y2000A）を用い，発振器から出射したビームは，ビームスキャナ（SCANLAB社製 SK1020）に導光される．導光されたビームはコリメータレンズにより平行光となり，X-Y軸の振動ミラーによりスキャンされ， f, θ レンズを通り帯材の合わせ面に集光される．レーザーは帯材に対して平行になるようにスキャ

ンし，一對のローラにより加圧され配送される．レーザーはスキャナによって自由な軌跡で照射できるため，両金属の合わせ面へ照射し両金属を加熱または熔融，どちらか一方の金属側へのみ照射し加熱または熔融させて接合を行うことができるため，接合における両金属の組成制御を行うことが可能であり，レーザーによる急熱急冷効果と併せて金属間化合物の生成を抑制することができる．また，レーザーは合わせ面V字ギャップへ照射するため，反射率の高い金属であっても，レーザーは多重反射により合わせ面へ集光されることから，レーザー照射入熱を有効に使うことができる．

3. 実験方法

3.1 SPCC鋼板とA6061アルミニウム合金の接合

接合材には，Al-Mg-Si系アルミニウム合金A6061のT6処理材とSPCC鋼板を用いた．主要な合金元素の化学組成（規格値）を表1に示す．接合材は，厚さ1 mm，幅12 mm，長さ300 mmの帯材である．接合はこれら2枚を合わせ，その合わせ面にレーザーを照射して張り合わせる面接合である．

実験条件を表2に示す．接合材表面は#1500番のエミリー紙により研磨し，板表面の油分や酸化物を除去し，アセトンにて脱脂した後，接合実験を行った．接合部が酸化するとSPCC鋼表面にFeOが形成し，接合不能または強度低下の原因になることが明らかになったため²⁾ 溶接部を覆うようにアルゴンガス雰囲気を作製した．

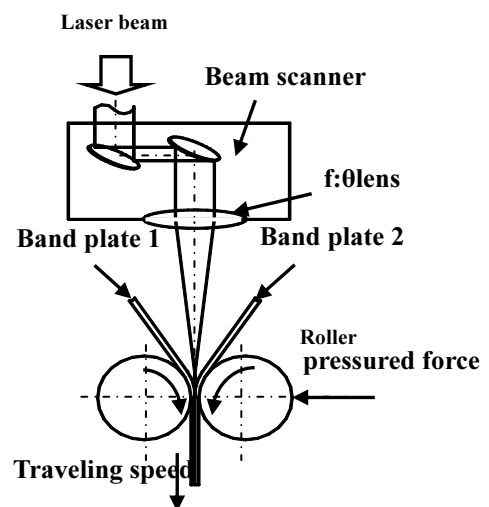


図1 レーザー圧接実験装置の概略図

表 1 SPCC 鋼と A6061 アルミニウム合金の化学組成 (基準値)

	Fe	Al	C	Mg	Si	Mn	P	S
SPCC	Rem	—	0.12 max	—	—	0.50 max	0.040 max	0.045 max
A6061	0.7 max	Rem	—	0.8-1.2	0.40-0. 8	0.15 max	—	—

金属間化合物生成におよぼすローラ加圧力の影響について、接合部断面の光学顕微鏡観察を行い、界面層の平均厚さを3箇所での測定値の平均から求めた。また、異材接合界面を走査電子顕微鏡 (SEM) により高倍率で観察し、SEMに装着されたEDX (Energy Dispersive X-ray Spectrometer) により組成分析を行った。さらに透過電子顕微鏡 (TEM: Transmission Electron Microscope) を用いて詳細に観察した。

TEM観察用試料は、試料の任意部を選択的に薄膜化できるマイクロサンプリングFIB (Focused Ion Beam) 装置を用いて厚さ150 nmまで薄膜化し、300 kVで観察を行った。

3.2 亜鉛めっき鋼板とA6061アルミニウム合金の接合

接合材には、A6061と亜鉛めっき鋼板を用いた。接合材は、厚さ1 mm、幅12 mm、長さ300 mmの帯材である。実験条件を表3に示す。本手法では、レーザを異種金属板の合わせ面へ自在に照射できることから、亜鉛めっき鋼板側へレーザを照射し、接合させる直前で沸点が907℃と低い亜鉛めっき層のみを除去し、必要とされる部分の亜鉛めっきを残したまま、鋼板とアルミニウム合金の接合が可能であると考えた。接合材表面はA6061側のみ#1500番のエミリー紙により研磨し、両接合材をアセトンにて脱脂した後、アルゴンガス雰囲気中で接合実験を行い、溶接条件と亜鉛めっき層の除去や金属間化合物の生成および機械的強度について調査した。

接合界面および接合部はく離面はSEMにより観察し、EDXを用いて化学組成分布を測定した。継手の機械的性質は、引張せん断試験で評価した。試験片形状は、幅12 mmのレーザ圧接のままの継手形状である。

4. 実験結果および考察

4.1 SPCC鋼板とA6061アルミニウム合金のレーザ圧接

光学顕微鏡観察により、界面層厚さを測定したところ、ローラ加圧力82 MPaでは、接合界面に明確な化合物層はみられなかった。化合物層の平均厚さは、ローラ加圧力164 MPaで約4 μm、245 MPaで約2.5 μm、325 MPaで約1.5 μm程度であった。図2にローラ加圧力327 MPaでの接合界面の光学顕微鏡写真を示す。金属間化合物層は厚くても5 μm以下と非常に薄く抑制することができた。加圧力が増

表 2 SPCC 鋼板と A6061 アルミニウム合金の接合実験条件

Laser power	1800 W
Laser beam scanning speed	30 Hz
Laser irradiation position	Center
Defocused distance	+7 mm
Traveling speed	0.5 m/min
Roller pressure	82 ~ 327 MPa

表 3 亜鉛めっき鋼板と A6061 アルミニウム合金の接合実験条件

Laser power	1000~1700 W
Laser beam scanning speed	10 Hz
Laser irradiation position	Center
	Zn-coated steel side 1.0~2.5 mm
Defocused distance	±0 mm
Traveling speed	0.6 m/min
Roller pressure	245 MPa

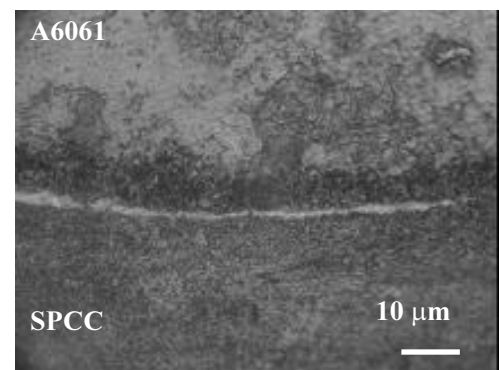


図 2 接合部断面の光学顕微鏡写真

加することにより両金属板はより密着して、合金元素の拡散が促進され、金属間化合物層の厚さが増加することが予想されたが、ローラ加圧力が327 MPaと高いとき、金属間化合物の厚さは薄かった。これは、ローラ加圧力が高い場合、発生した熱がローラへ拡散して接合部が急

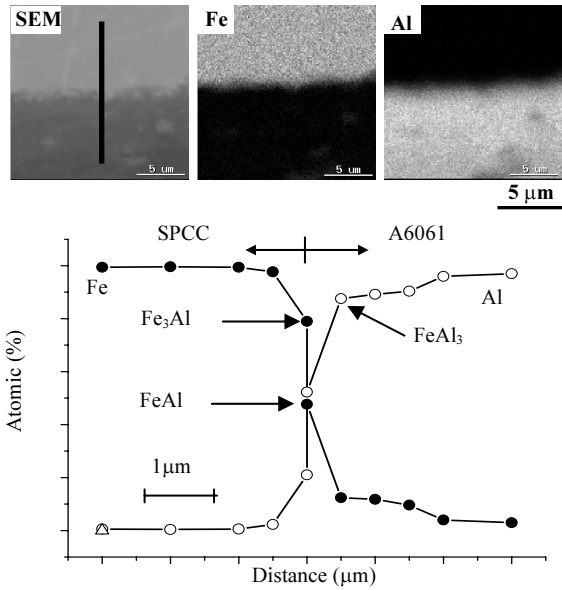


図3 接合界面のSEM写真とEDX分析結果

冷されたため、金属間化合物層の生成が抑制されたものと考えられる。

図3にローラ加圧力327 MPaにおける接合部断面のSEM写真、EDX面分析・点分析結果をまとめて示す。SEM写真およびEDX面分析結果から、明確な化合物層は認められず、SEM写真上のラインに沿って点分析を行ったところ、金属間化合物は界面SPCC鋼側で Fe_3Al が、A6061側では $FeAl_3$ の生成が推察された。そして、その層厚さは1 μm程度と薄かった。

図4にローラ加圧力327 MPaにおける接合界面のTEM観察による明視野像を示す。接合界面にはほぼ一定の層状に中間層が生成していることがわかる。アルミニウム合金の結晶粒径は2~3 μmと母材より微細化している。中間層の厚さは約800~900 nm程度であった。SPCC鋼と中間層の界面は比較的平坦であるが、アルミニウム合金はやや波打った形状となっている。中間層の電子回折パターンから細かな結晶パターンを得ることができたが、結晶相の同定を行うことはできなかった。

4.2 亜鉛めっき鋼板とA6061アルミニウム合金のレーザー圧接

レーザー照射位置が接合材の合わせ面の中心および亜鉛めっき鋼板側へ1 mm寄せた場合では、レーザー出力が1400 W以下で接合可能であったが、それ以上ではアルミニウム合金側が溶け落ちて接合することが出来なかった。レーザー照射位置が亜鉛めっき鋼板側へ2 および2.5 mm寄せた場合ではレーザー出力が1200 W以下では入熱不足により接合できず、1600 W以上でアルミニウム合金側に割れが生じた。レーザー出力1500 Wでアルミニウム合金側の割れもなく良好な接合部を得ることができた。図5に引張

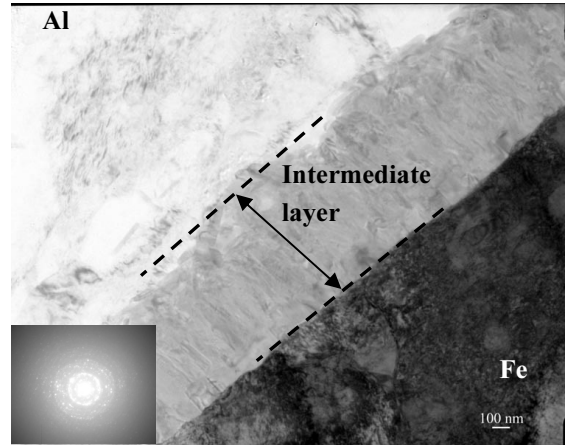


図4 SPCCとA6061 アルミニウム合金接合界面のTEM観察写真

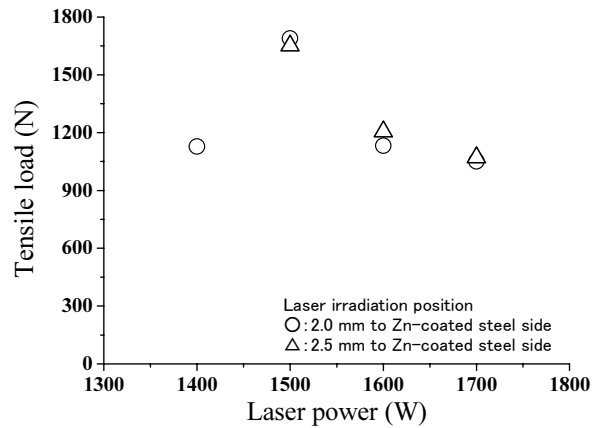
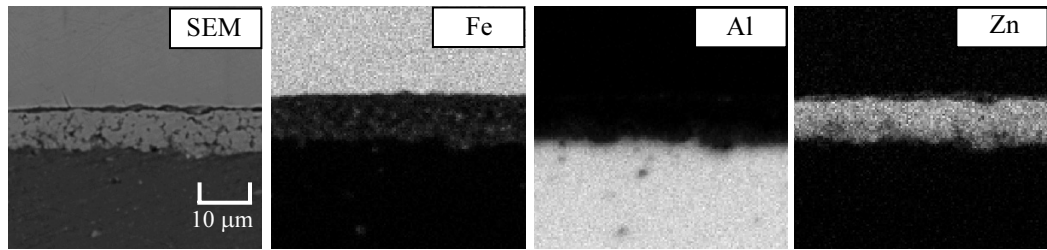
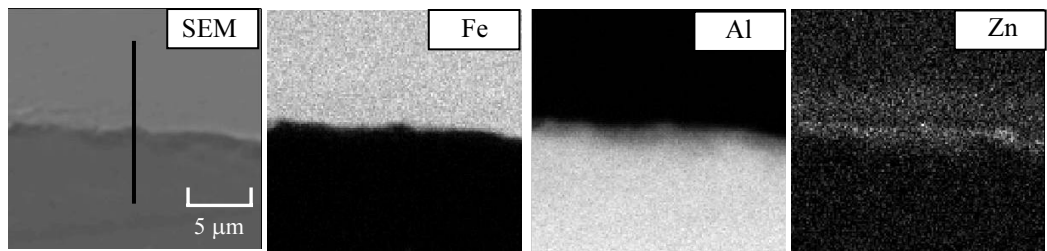


図5 引張せん断試験結果

りせん断試験結果を示す。レーザー出力1400 Wでは接合部よりせん断破断し、1600および1700 Wではアルミニウム合金側に生じた割れから破断した。レーザー出力1500 Wではアルミニウム合金母材から破断する高い継手強度を得ることができた。レーザー出力1000 および1500 Wでの接合部断面のSEM写真とFe、AlおよびOのEDX面分析結果を図6に、図6(b)のSEM写真上のラインに沿って点分析を行った結果を図7に示す。また、図8にレーザー出力1500 Wで接合部剥離後の亜鉛めっき鋼板側の剥離面SEMおよびEDX面分析写真を示す。図6(a)のレーザー出力1000 Wでは、レーザー照射入熱不足により亜鉛めっきを除去することができず厚い層状に残存している。層厚さを測定したところ約9 μmであった。図6(b)のレーザー出力1500 Wでは、接合界面付近に薄く層状に残っているが、亜鉛めっき鋼板母材に比べて薄くなっていることが分かる。点分析の結果からZnは接合界面付近にのみ認められ、その層厚さは2 μm以下と薄くなっている。図8からもわずかにZnが



(a) 1000 W



(b) 1500 W

図 6 接合部断面の SEM 写真および EDX 分析結果

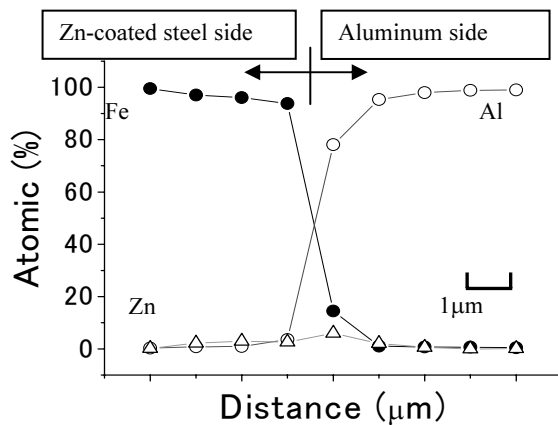


図 7 点分析結果

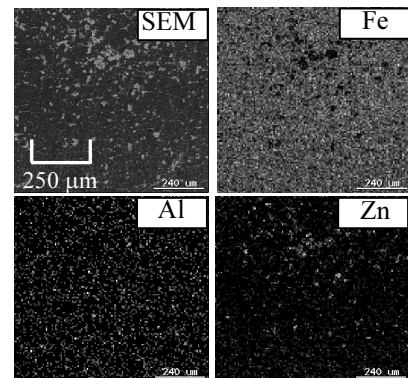


図 8 はく離面の SEM 写真と EDX 面分析結果

点在しているだけで、Znが除去されていることが分かった。以上の結果から、残存したZnがアルミニウム合金側へ拡散し、化合物または固溶体を形成し接合している可能性があることが分かった。

5. 結言

異種金属接合法の一つとして、柔軟なレーザー照射とローラ加圧によるレーザー圧接法を提案し、SPCC鋼とA6061アルミニウム合金の接合を行い、接合界面に生成する金属間化合物に及ぼすローラ加圧の影響を調べるとともに、異材接合界面を透過電子顕微鏡で詳細に観察した。また、亜鉛めっき鋼板とA6061アルミニウム合金との接合を行い、溶接条件と亜鉛めっき層の除去や金属間化合物の生成および機械的強度について調査し得られた結果を要約すると以下のとおりである。

- 1) SPCC 鋼板と A6061 アルミニウム合金の接合
 - ①ローラ加圧力の増加に伴い、金属間化合物層は薄くなった。
 - ②TEM 観察結果から、SPCC 鋼と A6061 アルミニウム異材接合界面には約 800~900 nm の中間層が形成し接合していることがわかった。
- 2) 亜鉛めっき鋼板と A6061 アルミニウム合金の接合
 - ①レーザー照射位置が亜鉛めっき鋼板側で、レーザー出力が高くなると、亜鉛めっき層を除去できるが、アルミニウム合金側表面に割れが生じた。
 - ②適切なレーザー照射条件で固溶層または化合物層の狭い継手の作製が可能であった。
 - ③接合界面に亜鉛めっき層が 2 μm 程度残存していても、引張せん断試験においてアルミニウム合金で母材破断する高い継手強度を得ることができた。

謝辞

本研究を遂行するに当たって、TEM観察用薄膜作製のためのFIB加工にご協力いただいた大阪大学接合科学研究所助手の高橋 誠 博士、TEM観察にご協力いただいた産業総合技術研究所四国センターの榎田洋二氏に深い謝辞を表します。

本研究は財団法人天田金属加工機械技術振興財団に奨励研究助成として採択されたものであり、同財団からの研究助成に対し厚く謝意を表します。

参考文献

- 1) 片山聖二, レーザ異材接合, 溶接技術, 50-2, (2002), 69-73
- 2) 西本浩司, 藤井洋郎, 片山聖二, レーザ圧接法によるアルミニウム合金と低炭素鋼の接合, 溶接学会論文集, 22-4, (2004), 572-579