

接合界面制御による異種金属接合技術の確立

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 創造技術工学科 機械コース
准教授 西本 浩司

(平成 26 年度一般研究開発助成 AF-2014203)

キーワード：レーザー，異種金属，接合

1. 研究の背景と目的

異種金属接合は、各種構造部材等の軽量化、低コスト化、高機能化および高性能化などの観点から、様々な工業分野において望まれている。特に、輸送機器分野においては地球環境保護、省エネルギーおよびCO₂排出削減などの実現のために期待されている。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、異種金属の溶融溶接では、異なる物性（融点や熱伝導率）のために入熱制御を行い、一方の金属のみを溶融させ、その熱で他方を溶融させるなどの工夫が必要である¹⁾。また、多くの異種金属の組み合わせにおいては、接合界面に硬くて脆い金属間化合物が形成されてしまう。金属間化合物形成の抑制においても入熱制御は有効であるが、突合せ継手、重ね合わせ継手ともに熱源を接合部材上方から与えるため、接合界面を一樣に入熱制御することは困難である。また、接合に寄与しない母材部の溶融や熱影響を伴うため、エネルギーロスや溶接欠陥の原因となる。

そこで本研究では、両金属板の合せ面側へレーザーを照射することで、接合界面のみを加熱・溶融可能な溶接法を提案した²⁾⁻³⁾。これまでに、低炭素鋼とアルミニウムおよび亜鉛めっき鋼板とアルミニウムの組み合わせで、引張せん断試験においてアルミニウムから破断する高強度な継手を得ることに成功している³⁾。しかしながら、得られる継手は接合材を全面張り合わせた面接合となっており、実用継手に対して適用することが困難であった。そこで、接合材の一部分のみを重ね合わせて接合させることで、重ね合わせ継手の形成を可能にした。

本報告では、自動車用鋼板として用いられている亜鉛めっき鋼板とアルミニウムの組み合わせにおいて、接合材の一部を重ね合わせ、合わせ面（接合界面）にレーザーを照射して重ね合わせ接合を行った。得られた継手に対して引張せん断試験を行い、各種接合条件と接合界面に形成される化合物層および継手強度との関係を調査した。また、疲労試験を実施し動的強度評価による異種金属継手の信頼性評価を行った。

2. 実験方法

接合材には、合金化溶融亜鉛めっき鋼板と工業用純アルミニウムA1050を用いた。主要な合金元素の化学成分（規格値）を表1に示す。接合材は、厚さ1 mm、幅55 mm、長さ300 mmの帯材である。亜鉛めっき鋼板のめっき付着量は、両面等厚めっきの3点平均最小付着量（両面合計）80 g/m³である。接合材は、接合面をエタノールで脱水・脱脂して用いた。

実験装置の概略図を図1に示す。接合は、重ね合わせ幅を5 mmとして圧接ローラ間に挿入し、両接合材の開き角度を60°として、その合わせ面にレーザーを照射し重ね合わせ接合を行った。レーザーには、最大出力3 kWの連続発振半導体レーザー（Laserline社製、波長800 / 940 ± 10 nm）を用いた。本レーザー装置は、レーザーヘッド内に0.5 × 3 μm²のエミッターが並んだレーザーバーを積層したスタックを持つダイレクトタイプである。発振されたレーザー光はコリメーションレンズを通過して、焦点距離100 mmのレンズにより集光される。本研究では、コリメーションレンズと集光レンズの間にホモジナイザー（短形光学系）を挟むことで、ビームの長軸および短軸の長さを変化させ、レーザースポット径0.6 × 11 mmのラインビーム形状として用いた。

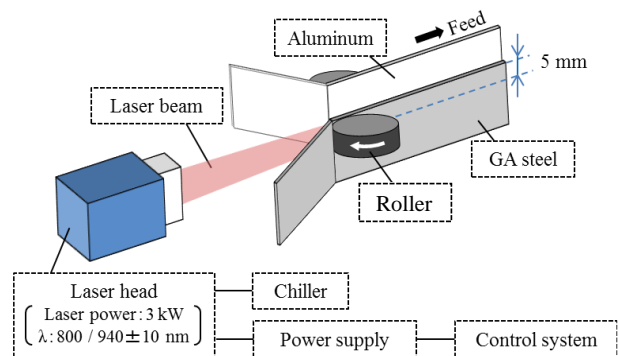


図1 実験装置の概略図

表1 亜鉛めっき鋼板とアルミニウムの化学成分（規格値）

	Fe	Al	C	Mg	Si	Mn	P	S
GA steel	Rem	—	≤0.15	—	—	≤0.80	≤0.05	≤0.05
A1050	≤0.4	Rem	—	≤0.05	≤0.25	≤0.05	—	—

圧接ローラは、サイズφ 24 mmおよび幅14 mmであり、最大5 kNの荷重を負荷することが可能であり、負荷した荷重はロードセルにより測定され、デジタル表示器により読み取ることができる。

実験条件として、レーザ照射位置は両接合材の合わせ面の中心、送り速度を10 mm/min一定として、レーザ出力1000~1200 W、圧接ローラ荷重1.96~2.94 kNと変化させて接合実験を行った。

3. 実験結果

3.1 亜鉛めっき鋼板とアルミニウムの重ね合わせ接合

各種接合条件において、亜鉛めっき鋼板とA1050の重ね合わせ接合を行った結果、全ての接合条件において接合が可能であった。得られた継手の外観写真を図2に示す。重ね代5 mmで重ね合わせ溶接が可能であったが、圧接ローラ荷重により若干湾曲した継手形状となっていた。代表的な接合部断面の顕微鏡観察写真を図3に示す。



図2 溶接継手の外観写真

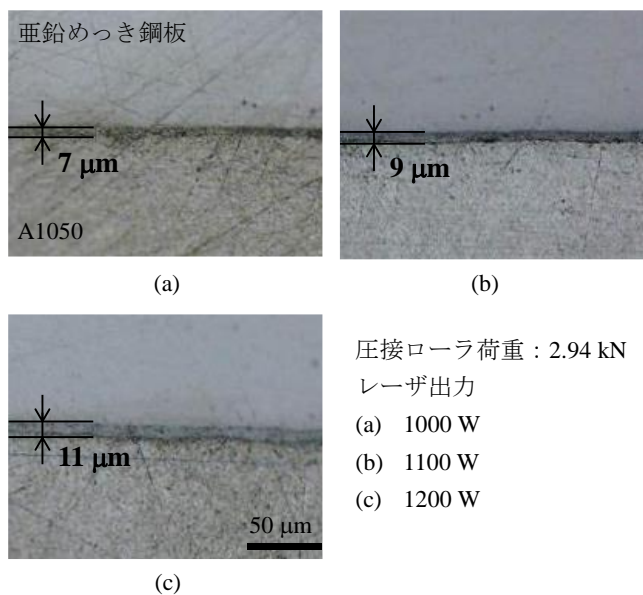


図3 接合部断面の光学顕微鏡観察写真

いずれの接合条件においても、接合界面に層状の化合物層が確認できるが、割れ、ポロシティなどの溶接欠陥は認められず良好な異種金属継手が得られた。化合物層は、レーザ出力1000 Wの場合では平均で約7 μm、レーザ出力1100 Wの場合では平均で約9 μm、レーザ出力1200 Wの場合では平均で約11 μmの厚さで形成されていた。化合物厚さは、レーザ出力の増加により入熱量が増大し、化合物層の成長が促進されたためであると考えられる。また、圧接ローラ荷重が増加しても化合物層厚さには変化は見られず、同程度の厚さで化合物層が接合界面に一樣に形成していた。

3.2 引張せん断試験結果

各種接合条件で得られた異種金属継手の引張せん断試験を実施した。これまでに行ってきた亜鉛めっき鋼板とアルミニウムの面接合³⁾により得られた継手では、接合部面積が広いこと引張せん断試験に用いる継手の切り出しが困難であった。本研究では、得られた重ね合わせ継手から引張せん断試験片を採取できるため、図4に示すような試験片を放電加工機により切り出して、引張せん断試験を行った。

引張せん断試験結果を図5に示す。引張せん断試験では、全ての接合条件において、接合部近傍のA1050母材部から破断し、広範囲な条件下で高強度な異種金属継手が得られた。また、引張せん断試験と同形状の試験片を用いたA1050母材の引張試験で得られた最大引張荷重が約770 N(実測値)であるのに対し、レーザ出力1000 Wおよびローラ加圧力1.96 kNの場合では、引張せん断荷重が平均で約520 NとA1050母材の約70%相当であった。

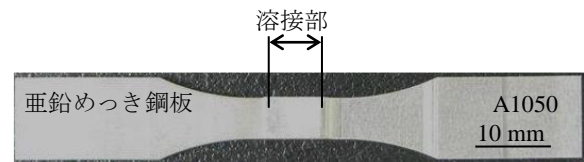


図4 引張せん断試験片

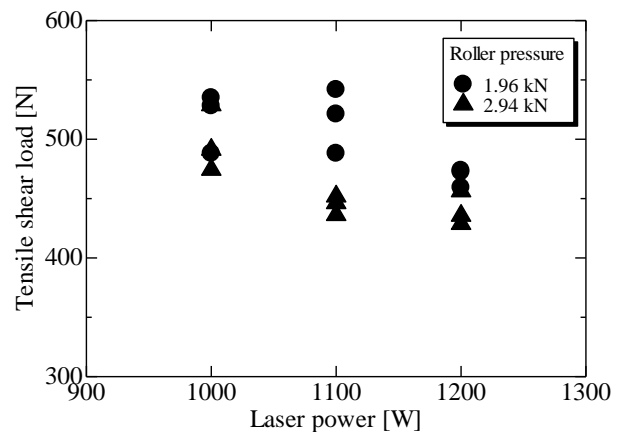


図5 引張せん断試験結果

鉄鋼材料とアルミニウムの接合では、接合界面に形成される金属間化合物の厚さが層状に1 μm を越えると継手強度を大きく低下させると報告されている⁴⁾。しかし、亜鉛めっき鋼板とアルミニウムの重ね合わせ継手においても、接合界面に形成されている化合物層が層状に7 μm 以上と厚く形成されている場合でも、A1050母材部から破断する高強度な異種金属継手を得ることができた。

3.3 疲労試験結果

次に、異種金属継手の疲労強度特性について調査するために、疲労試験を実施した。レーザ出力1000, 1100, 1200 Wで圧接ローラ荷重2.94 kNでの疲労試験結果を図6に示す。

疲労試験では、全ての繰返し荷重条件において、引張せん断試験と同様に図7に示すように接合部近傍のA1050母材部からの破断が確認できた。疲労試験結果から、高荷重側における疲労強度は、ばらつきはあるものの、引張せん断試験と同様にレーザ出力が増加するにつれて小さくなっていった。一方、低荷重側における疲労強度は、レーザ出力1000 Wおよび1100 Wの場合では顕著な差はなく、レーザ出力1200 Wの場合が最も大きかった。しかし、疲労試験と同形状の試験片を用いたA1050母材の疲労試験で得られた疲労強度と比較すると、異種金属継手の疲労強度は最大で約30 %程度まで減少していた。これは、図8に示すようにA1050母材破断部付近では、亜鉛めっき鋼板とアルミニウム重ね接合時の圧接ローラ加圧により、接合部近傍のA1050の塑性変形が生じ、A1050母材が初期板厚に比べて減少するとともに、A1050母材の一部が亜鉛めっき鋼板母材端部に食い込んでいた。一般に溶接継手のような強度特性に分布がある場合、荷重を負荷すると低強度部に応力が集中することが広く知られている。

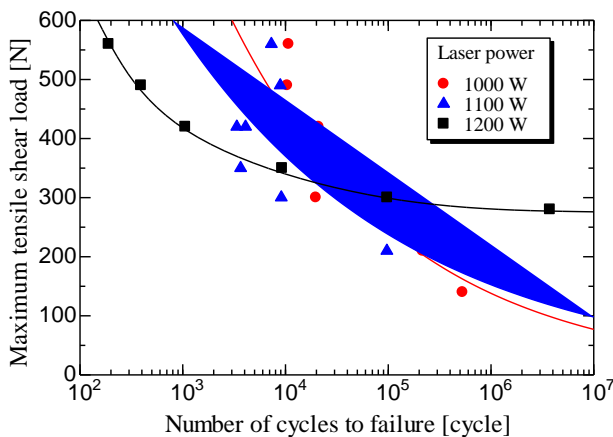


図6 疲労試験結果

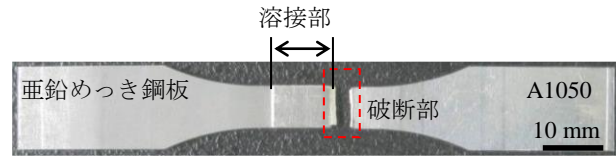


図7 引張せん断試験および疲労試験後の継手外観写真

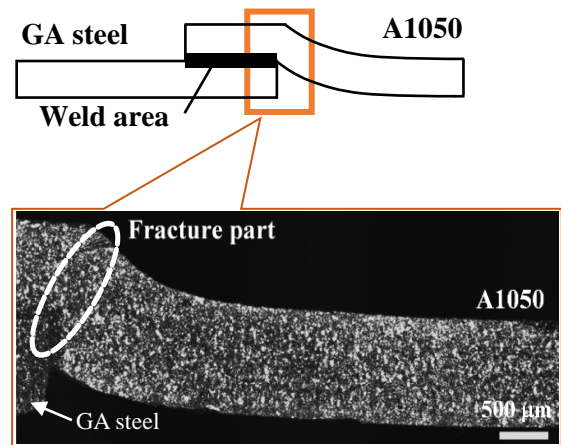


図8 接合部近傍のA1050母材の変形

したがって、疲労試験では引張試験に比べて応力集中の影響が大きいことから、異種金属継手はA1050母材部から破断したにもかかわらず、A1050母材の疲労強度に比べて大幅に低下したと考えられる。

3.4 接合部断面のSEM観察およびEDX組成分析結果

接合部に形成する化合物層について検討するために、レーザ出力1200 W、圧接ローラ荷重2.94 kNでの接合部断面に対し、SEM観察およびEDX分析を行った。

接合部断面のSEM観察およびEDX面分析結果を図9に示す。また、図9のSEM観察写真中の線上に沿って、約2 μm 間隔で点分析を行った。接合部断面のEDX点分析結果を図10に示す。なお、A1050母材表面を接合界面とし、GA鋼板母材側を一方、A1050母材側を+方向としてX軸を表記した。

SEM観察、EDX面分析および点分析結果より、化合物層は約12 μm と厚く層状に形成していることが確認できる。EDX点分析結果では、化合物層内の原子濃度はFeが約22 at%, Alが約48 at%, Znが約30 at%であり金属間化合物層の形成も考えられるが、約12 μm と厚く層状に形成されているにもかかわらず、引張せん断試験および疲労試験において、A1050母材から破断しており、全ての層が金属間化合物で形成されているとは考えにくい。したがって、亜鉛めっき鋼板とアルミニウムの面接合同様な接合機構³⁾により接合されているものと推察される。

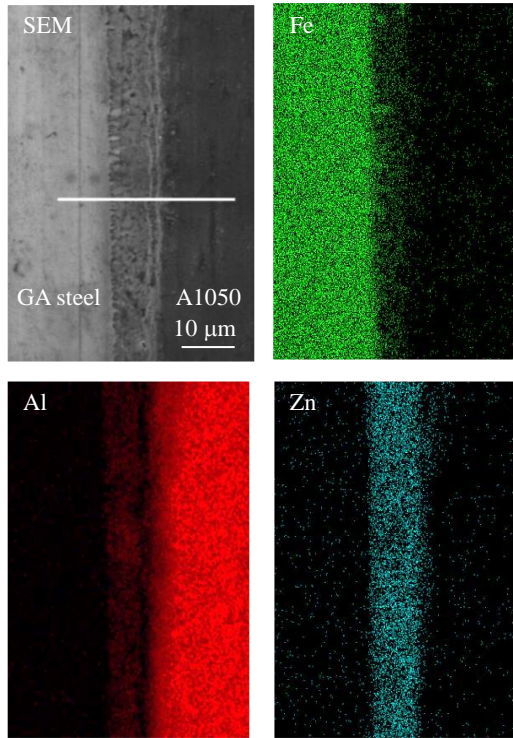


図9 接合部断面のSEM観察およびEDX面分析結果

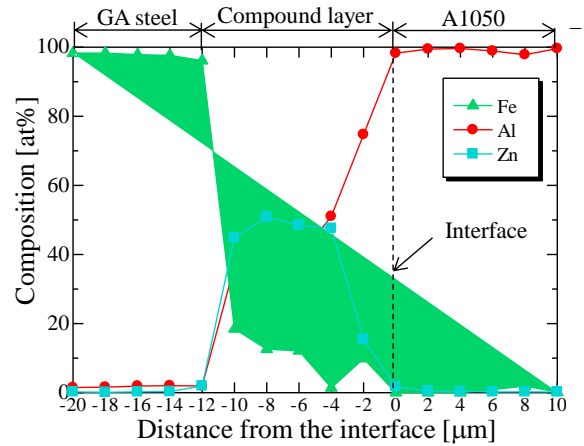


図10 EDX点分析結果

謝辞

本研究は公益財団法人天田財団一般研究開発助成（AF-2014203）より行われました。同財団からの研究助成に対し厚く謝意を表します。また、阿南工業高等専門学校専攻科構造設計工学専攻の原田京典君にご協力を頂きました。厚く御礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 片山聖二, 異種材料のレーザー接合技術, レーザー研究, Vol. 38, No. 8, 「自動車分野におけるレーザー利用の新展開」特集号, (2010), 594-602
- 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
- 3) 西本浩司, 原野智哉, 奥本良博, 安宅健, 藤井洋郎, 片山聖二, レーザ圧接された合金化溶融亜鉛めっき鋼板と工業用純アルミニウム異材接合部の微細組織観察, 溶接学会論文集 第26巻 第2号, (2008), 181-186
- 4) 泰山正則, 小川和博, 高隆夫: アルミクラッド鋼インサート抵抗溶接法の検討, 溶接学会論文集 第14巻 第2号, (1996), 314-320

4. 結言

自動車用鋼板として多用されている亜鉛めっき鋼板とアルミニウムの異種金属接合において、接合材の一部を重ね合わせ、合わせ面（接合界面）にレーザーを照射して重ね合わせ接合を行った。得られた継手に対して引張せん断試験を行い、各種接合条件と接合界面に形成される化合物層および継手強度との関係を調査した。また、疲労試験を実施し動的強度評価による異種金属継手の信頼性評価を行った。得られた結果は以下のとおりである。

- 1) 亜鉛めっき鋼板とA1050の重ね合わせ継手において、重ね合わせ面の接合界面にレーザーを照射して接合を行い、広範囲な条件下で接合可能であった。
- 2) 接合部断面観察結果より、化合物層が約7～11 μmと厚く形成しており、レーザー出力が増加するにつれて化合物層が厚く形成されていた。
- 3) 引張せん断試験結果より、全ての接合条件においてA1050母材部から破断する高強度な異種金属継手が得られた。
- 4) 疲労試験結果より、レーザー出力1000, 1100, 1200 Wおよびローラ加圧力2.94 kNでは、全ての繰返し荷重条件においてA1050母材部からの破断が確認された。