

令和 3 年 6 月 18 日現在

機関番号：56101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04738

研究課題名（和文）接合界面へのレーザー照射による超高効率な亜鉛めっきゼロギャップ重ね溶接技術の開発

研究課題名（英文）Development of high-efficiency zero-gap lap welding for zinc-coated steel sheet by laser irradiation to joining interface

研究代表者

西本 浩司（NISHIMOTO, KOJI）

阿南工業高等専門学校・創造技術工学科・教授

研究者番号：40501169

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：亜鉛めっき鋼板のレーザー重ね溶接において、接合界面へのレーザー照射により亜鉛めっきを溶接直前に除去した後、本溶接を行う手法の開発を行った。レーザーをデフォーカスしてスポット径を拡大することで亜鉛めっきを事前に除去する手法およびレーザーを亜鉛めっき除去用と本溶接用に分岐させて接合界面へ照射する手法において、種々のレーザー照射条件で接合性や機械的強度特性について調査した。レーザーをデフォーカスした場合には、適正なデフォーカス量によりポロシティを抑制可能であった。レーザーを分岐させた手法では、ポロシティを抑制して20 m/min以上の高速で溶接可能であり、高強度な継手を得ることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、ものづくりの基盤である溶接技術の基盤研究であることと、自動車産業で多用されている亜鉛めっき鋼板の重ね溶接を対象としており、従来技術よりも高品質且つ高効率な溶接技術が求められていることから、本研究の社会的意義は大きい。また、本手法は接合界面を直接溶融可能な溶接法であり、従来の溶接法よりも数倍以上の溶接速度で溶接可能であることと、接合界面へのレーザー照射法により溶融制御も期待でき、学術的にも意義の大きい研究である。

研究成果の概要（英文）：Development of galvanized steel sheet laser lap joining method without gap at joining interface by directly irradiate laser into joining interface, and investigated about weldability and joint strength. In this study, an optical system to split and irradiate the laser beam for the purpose of galvanization removal and welding was designed and fabricated. It was able to galvanization removal and main welding in one pass. From the results of x-ray transmission observation, the formation of porosity could be suppressed, and because of the tensile shear test, a high strength joints that fracture from the base metal was obtained.

研究分野：溶接・接合、レーザー加工

キーワード：レーザー 亜鉛めっき鋼板 重ね溶接

### 1. 研究開始当初の背景

近年、自動車産業においては環境問題の観点から車体の軽量化や省エネルギー化が進められるとともに、衝突安全性確保のため車体強度の向上が求められている。軽量化と高強度化を同時に達成するために、高張力鋼板の適用と車体特性に応じた鋼種や板厚の選定と配置が重要である。板厚や異なる材質の鋼材等をプレス加工前に溶接を行い、1枚のブランク材とするテーラード・ブランクは、構造部材を適材適所に配置することが可能であり、車体の軽量化と高剛性を両立できるため適用範囲は拡大している。テーラード・ブランクを生産するための溶接法として、レーザ溶接が用いられている。

レーザ溶接は、低ひずみ・高速・深溶込み可能な接合法であり、システム化・自動化・ロボット化が容易であることから、各種産業分野において利用されている。テーラード・ブランクは突合せ溶接および重ね溶接が適用されるが、レーザ突合せ溶接ではレーザスポット径が小さいため、突合せ部に隙間がある場合や突合せ線の倣い不良が生じると溶接できなくなるといった問題があり、接合材突合せ部の端面精度は非常に重要であることと、きわめて正確な位置決め精度が要求されるため、生産性が著しく低下する。一方、重ね溶接では、接合材上部側からレーザを照射し、接合材上部を貫通させ下部まで熔融させることで接合を行う。このため接合に寄与しない部位の熔融を伴い、エネルギーロスおよび広範囲な部位への熱影響が生じ機械強度低下の原因となる。また薄板の場合、高速化のために出力を向上させると接合材上部が蒸発し、その蒸気圧と重力で材料の溶落ちが生じ切断されてしまうなどの問題がある。さらに、防錆鋼板として多用されている亜鉛めっき鋼板の重ね溶接では、亜鉛めっき層がレーザ溶接時に蒸発し熔融金属内に取り残されポロシティを形成<sup>1)</sup>し健全な継手を得ることができない。そのため、欠陥防止のために上側の亜鉛めっき鋼板と下側の亜鉛めっき鋼板に数十 $\mu\text{m}$ ～数百 $\mu\text{m}$ の間隙を設けることでZn蒸気を逃がすなどの工夫がされている<sup>2)</sup>。しかしながら、実際の製造現場においては間隙の管理が難しいことと工程数が増加するなどの問題がある。

### 2. 研究の目的

亜鉛めっき鋼板のレーザ重ね溶接において、間隙を設けることなくポロシティなどの溶接欠陥を形成させずに高速に溶接可能な手法を考案した。本手法では、貼り合わせた接合材の合わせ面にレーザを照射した後、ローラで圧接することで接合させるレーザ重ね溶接であり、レーザ重ね溶接における欠点であるエネルギーロスをなくし、全てのエネルギーを溶接に使うことで高効率な溶接が可能である。これまでに、接合界面のみを加熱・熔融可能な本溶接手法による、低炭素鋼のレーザ重ね溶接において、接合界面のみをわずかに熔融させて接合することで、100 m/min以上の超高速での溶接を可能にしている<sup>3)</sup>。本手法を用いて、貼り合わせた亜鉛めっき鋼板を接合する直前で亜鉛めっき層を除去することができれば、亜鉛めっきの蒸発に伴う欠陥を生じさせない重ね溶接が期待できる。

本研究では、亜鉛めっき鋼板のレーザ重ね溶接において高速且つポロシティなどの欠陥を生じさせずに溶接する手法として、接合界面へのレーザ照射により接合直前で亜鉛めっきを除去した後、本溶接を行うレーザ重ね溶接を提案し、各種実験条件でレーザ重ね溶接実験を行い接合性について検討を行う。また、溶接前に亜鉛めっき層を除去可能な溶接条件および欠陥のない健全な継手が得られる条件について検討するとともに、各種接合条件と接合性および各種機械的強度特性との関係について明らかにすることを目的とした。

### 3. 研究の方法

供試材として、亜鉛めっき鋼板 SGCC を用いた。供試材料の寸法は、厚さ 0.7 mm、幅 40 mm、長さ 1000 mm である。レーザには最大出力 6 kw のファイバーレーザを用いた。実験装置の概略図を図 1 に示す。接合は、図 1 に示すように供試材を 1 対のローラ間に送り込み貼り合わせた後、張合わせ面を開口させる。開口角度は 60°とし、供試材の合わせ面にスポット径 200  $\mu\text{m}$  のレーザを集光し、接合材を熔融させローラにより圧接されて接合が完了する。またレーザは、接合界面より手前で亜鉛めっき層を除去するためにレーザ照射エリアを拡大する目的でアウトフォーカスして接合界面に照射した。アウトフォーカスによりスポット径を広くすることで、接合界面より手前で亜鉛めっき除去後の溶接可否、接合性、欠陥の形成状況および機械的強度について検討した。さらに効率よく亜鉛めっき除去と本溶接をワンパスで行うた

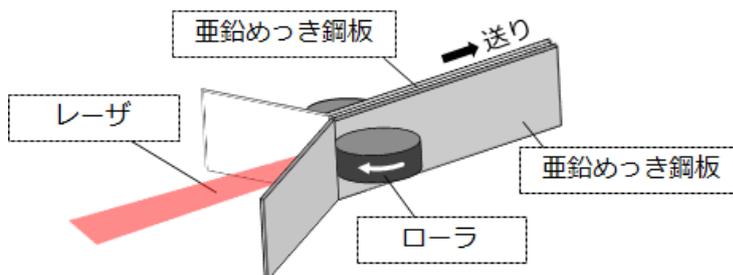


図 1 実験装置の概略図

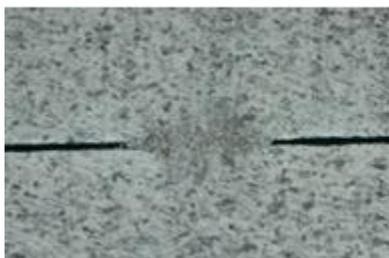
めに、光学系を用いて種々のパターンでレーザを分岐して亜鉛めっき鋼板および接合界面に集光した。分岐させた亜鉛めっき除去用のレーザは、接合界面より手前側に照射されて亜鉛めっきを除去し、分岐させた本溶接用のレーザにより、亜鉛めっき除去後の鋼板を溶融した後、ローラにより圧接・配送されて接合を完了させる。光学系によりレーザを分岐させたレーザ重ね溶接実験においても、接合性、欠陥の形成状況および機械的強度について検討を行った。

実験条件は、ローラ荷重 200 kgf 一定として、レーザ出力 1~6 kW, レーザ照射位置 JF~+30 mm, 溶接速度 10~100 m/min と変化させて実験を行った。

#### 4. 研究成果

供試材の合わせ面に 200  $\mu\text{m}$  のレーザスポット径でレーザを照射しながら、送り速度 10~100 m/min と変化させて接合実験を行った結果、全ての条件で接合可能であった。本手法では接合界面のみを溶融させるため、接合された継手の外観からは欠陥等を確認することはできないため、送り方向に対して垂直断面の組織観察を行った。図 2 に接合部断面の光学顕微鏡観察結果を示す。写真の中央付近に約 400  $\mu\text{m}$  程度の幅で溶融層が形成されており、接合界面のみを溶融して接合していることがわかる。溶融範囲も狭いため、熱影響部も小さく母材に与える影響も少ない高効率な溶接が可能であった。接合部断面観察写真では溶接部にポロシティなどの欠陥は見られなかったため、欠陥の形成状況について検討するために、継手全体に対して X 線透過観察を行った。図 3 に X 線透過観察結果を示す。X 線透過観察結果から、接合線に沿って断続的にポロシティが多数形成されており、亜鉛めっき層の事前除去がない場合には、従来の溶接法と同様にポロシティが多数形成されることがわかった。

次に、レーザをデフォーカスさせてレーザ照射範囲を拡大させ、接合界面より手間で亜鉛めっきを除去後に溶接を試みた。焦点位置をローラから遠ざける方向を+方向とし、デフォーカス量を +16~24 mm と変化させて実験を行った。なお、レーザ出力は 4 kW, 送り速度 10 m/min 一定とした。いずれの条件においても接合は可能であり、外観上には大きな変化は見られなかった。代表的な継手の X 線透過観察結果を図 4 にまとめて示す。デフォーカス+16 mm の場合では、2 mm 以上の比較的大きなポロシティが形成し、デフォーカス+24 mm の場合では、1 mm 程度のポロシティが接合線に沿って断続的に形成されていた。+19 mm においては、接合長 300 mm に対して 1 mm 以下のポロシティが 2 つ形成されていたが、比較的良好な結果を得ることができた。デフォーカスすることで、レーザ照射面積は広くなり、レーザスポット径の裾野の範囲においては接合界面よりも手前の亜鉛めっき鋼板に照射されることになり、接合界面より手前で亜鉛めっきを除去可能であったと考えられる。デフォーカス+24 mm の場合では、レーザ照射範囲も+16 mm と比較すると広くなり亜鉛めっき除去範囲も広くなると考えられるが、一方でエネルギー密度も低下してしまうため、亜鉛めっき除去は可能であったものの、亜鉛めっき除去後の本溶接において溶融不足となったため融合不足が発生し、小さなポロシティが形成された可能性が考えられる。デフォーカス+16 mm の場合では、+19 mm の場合に比べてデフォーカス量が少ないため、亜鉛めっき除去部および接合部の溶融量が増加するため、溶融した金属が亜鉛めっきの除去されていない箇所に触れ、亜鉛めっき層が蒸発するとともに溶融金属を吹き飛ばしスパッタとなって飛散する。このためスパッタが飛散して溶融金属が不足した状態で接合が完了してしまうため、比較的大きくいびつな形状のポロシティが形成されたものと考えられる。これらの結果から、接合界面の手前で亜鉛めっき層を除去することができればポロシティを形成させずに溶接可能であることが明らかとなった。また、継手の強度を調べ



100  $\mu\text{m}$

図 2 接合部断面の光学顕微鏡写真

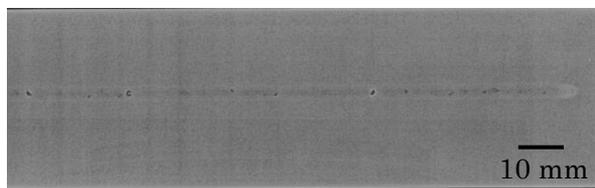
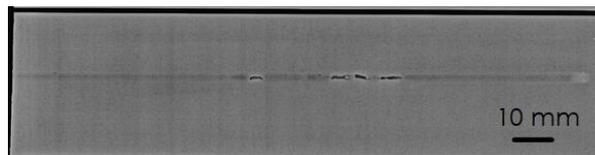
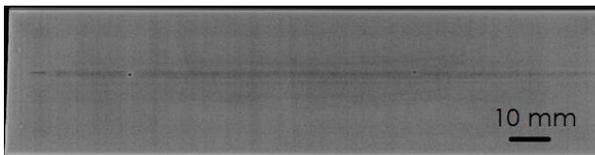


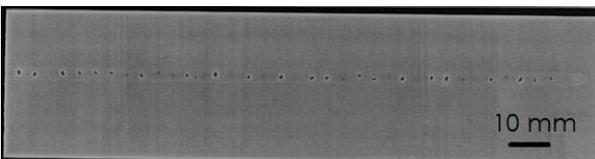
図 3 接合継手の X 線透過観察結果 (JF 時)



(a) DF+16 mm



(b) DF+19 mm



(c) DF+24 mm

図 4 レーザをデフォーカスさせて得られた継手の X 線透過観察結果

るために、接合部幅が 5 mm となるように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。デフォーカス+19 mm の継手では引張せん断荷重 1150 N 程度で母材破断する高強度な継手が得られた。

デフォーカスさせてレーザ照射範囲を広くすることで、接合界面の手前で亜鉛めっき層を除去可能でありポロシティの形成を抑制できたが、デフォーカスすることによりエネルギー密度が低下してしまうことによる融合不良が認められたため、エネルギー密度を低下させることなく効率よく亜鉛めっき層を除去しながら本溶接可能な手法について検討した。

レーザのデフォーカス量を小さくして亜鉛めっき除去と本溶接を行うためには、レーザを亜鉛めっき除去用と本溶接用とに分岐させることができれば、小さいデフォーカス量でポロシティの形成を抑制しつつ高速溶接が期待できる。図 5 に亜鉛めっき除去と本溶接にレーザを分岐させた亜鉛めっき鋼板のレーザ重ね溶接の概略図を示す。図 5 に示すようにレーザを分岐させて、亜鉛めっき鋼板のレーザ重ね溶接実験を行った。レーザは 4.8 kW 一定とし、亜鉛めっき除去部は 1.9 kW、本溶接部は 1 kW となるよう分岐した。このときレーザ焦点位置は、ローラ中心部で JF となるよう設定しているため、亜鉛めっき除去部ではデフォーカス状態となってしまう。図 6 に 3 次元 CAD を用いたレーザの照射位置と照射エリアの確認結果を示す。レーザ照射位置から照射面積を算出し、各種デフォーカス時のエネルギー密度を算出した。エネルギー密度を算出した結果、亜鉛めっき除去用レーザは、JF 時よりもデフォーカス側でエネルギー密度が高くなるのがわかった。また、本溶接用レーザにおいては、デフォーカス側+4 mm でエネルギー密度は高くなるが、それ以降はデフォーカス量に伴いエネルギー密度が低下することがわかった。本溶接レーザがデフォーカス+4 mm 時にエネルギー密度が高くなる理由は、デフォーカスすることで両接合材の張り合わせ部に集光される位置となるためである。これらの結果から、本溶接用レーザは若干デフォーカス気味になるものの、亜鉛めっき除去のエネルギー密度を確保するためデフォーカス+8 mm とし、送り速度 10~30 m/min でレーザ分岐による亜鉛めっき鋼板のレーザ重ね溶接実験を行い、亜鉛めっき除去と接合性および機械的強度特性について検討を行った。

分岐したレーザにより亜鉛めっき除去が可能であるか検討するために、接合界面より手前で分岐させたレーザが照射された亜鉛めっき鋼板部分の SEM 観察および EDX 面分析を行った。SEM 観察および EDX 面分析結果を図 7 にまとめて示す。SEM 写真から亜鉛めっき除去用のレーザ照射部は亜鉛めっき層が除去され、鋼板の素地が確認されるとともに EDX 面分析結果からレーザ照射部には Zn は検出されておらず、分岐レーザ照射により亜鉛めっき層を除去可能であることがわかった。

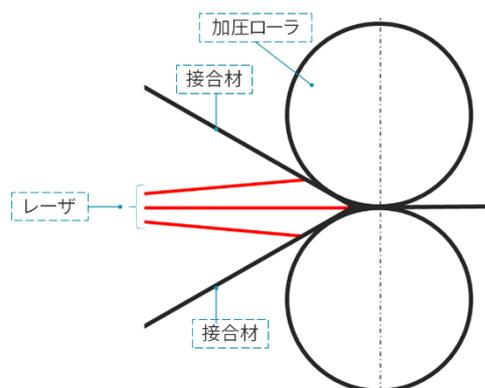


図 5 レーザ分岐による亜鉛めっき鋼板のレーザ重ね溶接の概略図

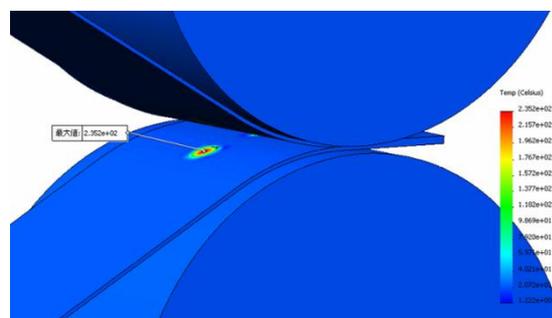
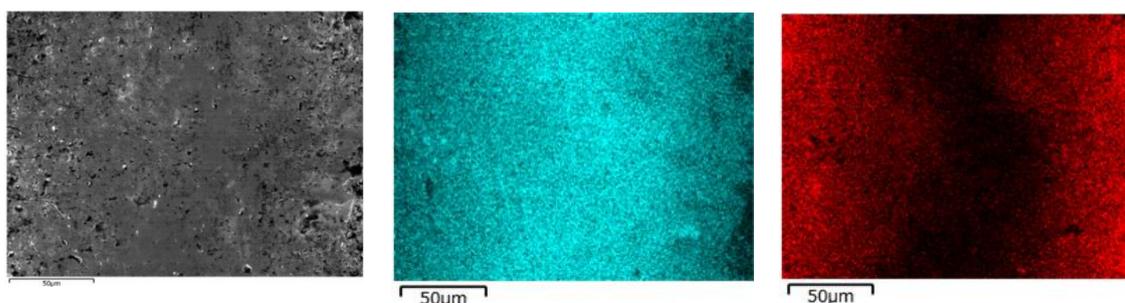


図 6 3次元 CAD によるレーザ照射位置と照射エリアの確認結果



(a) SEM

(b) Fe

(c) Zn

図 7 亜鉛めっき除去部の SEM 観察および EDX 面分析結果



図 8 レーザ分岐による亜鉛めっき鋼板  
レーザ重ね溶接部の断面観察結果

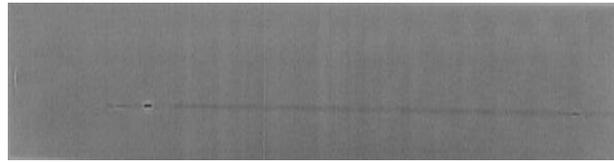


図 9 レーザ分岐による亜鉛めっき鋼板  
レーザ重ね溶接継手の X 線透過観察結果

次に、亜鉛めっき層を除去するレーザと本溶接を行うレーザとに分岐させたレーザを用いることにより接合された継手の接合部断面観察および X 線透過観察を行った。送り速度 20 m/min で溶接した接合部断面の光学顕微鏡観察結果を図 8 に、継手の X 線透過観察結果を図 9 に示す。接合部断面観察結果からポロシティ等の溶接欠陥は認められなかったが、X 線透過観察結果ではわずかにポロシティの形成が認められた。

得られた継手の機械的強度を調べるために引張せん断試験を行った。引張せん断試験結果を図 10 に示す。送り速度の増加とともに引張せん断荷重が低下しているが、いずれの条件においても母材破断する高強度な継手を得ることができた。引張せん断荷重の低下は、入熱量の低下に伴い接合部幅が減少するためであると推察される。接合部が小さい場合、引張せん断時に接合部を中心に回転変形するため、接合部近傍に曲げ応力が加わり、早期にき裂が発生し破断したためであると考えられる。

以上のように、本研究課題では間隙を設けずに亜鉛めっき鋼板を溶接する手法として、接合する直前で亜鉛めっきを除去し本溶接することで、従来のレーザ重ね溶接と比較してポロシティ等の欠陥を抑制しつつ高速に溶接可能な新しい知見と基礎的データをすることができた。本研究課題終了後も引き続き検討を実施する予定である。

#### 参考文献

- 1)小野守章, 梅津享, 大村雅紀, 樺澤真事, 森清和, 亜鉛めっき鋼板のレーザ重ね溶接性, 溶接学会論文集, 第 15 巻, 第 3 号, pp. 438-444 (1997)
- 2)門格史, 大川正巳, 篠崎賢二, 山本元道, 亜鉛めっき鋼板重ねレーザ溶接時のレーザ加熱による間隙制御とその溶接性への影響, 溶接学会論文集, 第 36 巻, 第 3 号, pp. 199-205 (2018)
- 3)立石学, 西本浩司, 中尾敬一郎, 前田真吾, 接合界面へのレーザ照射による高速接合, 溶接学会全国大会講演概要, 第 101 集(2017-9), pp. 346-347

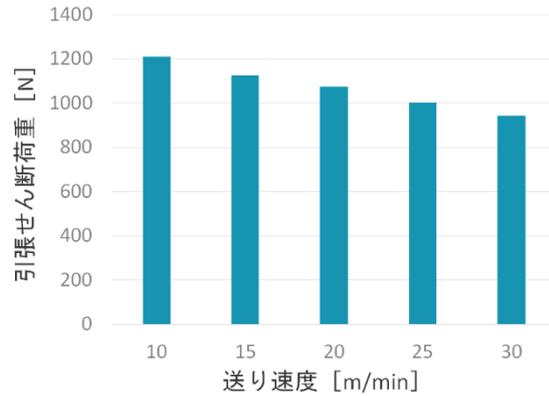


図 10 引張せん断試験結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 東尾奏希, 立石学, 西本浩司, 安田武司, 西野精一
2. 発表標題 レーザー圧接法による垂鉛めっき鋼板の重ね溶接におけるめっき事前除去の影響
3. 学会等名 第25回溶接学会四国支部講演大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	西野 精一  (NISHINO SEIICHI)  (00218174)	阿南工業高等専門学校・創造技術工学科・教授    (56101)	
研究分担者	安田 武司  (YASUDA TAKESHI)  (70610468)	阿南工業高等専門学校・創造技術工学科・准教授    (56101)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------