

Title	異種金属材料薄板のレーザ重ね溶接に関する基礎研究
Author(s)	李, 修真
Citation	大阪大学, 2014, 博士論文
Version Type	VoR
URL	<a href="https://doi.org/10.18910/34467">https://doi.org/10.18910/34467</a>
rights	
Note	

*Osaka University Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

## 論文内容の要旨

〔 題 名 〕

## 異種金属材料薄板のレーザ重ね溶接に関する基礎研究

学位申請者 李 修眞, Su-Jin LEE

最近、産業の急速な発展に伴って、各種金属や合金の溶接技術と施工法の開発が必須である。特に、省エネルギーと環境保護の観点から製品の更なる軽量化と高機能化が要望されている。金属や合金の短所をお互いに補完する異種材料溶接・接合の重要性が増している。異材の溶接は、軽量化や高機能化などに有効な方法の一つであり、広範囲の分野で適用が増加している。しかし、異種金属材料の溶接は、熔融溶接部に金属間化合物が形成して割れが発生することがあるため困難であると言われている。このような異種金属材料溶接の難しさを乗り越える溶接・接合が可能になると、多くの分野で多様に適用されることが期待される。

そこで、本研究では、これまでの異材溶接の限界と問題点を解決するため、最近開発された高品質・高輝度のファイバーレーザまたは一部ディスクレーザとそのビームスキャンの集光光学系を用い、異種材料の高速レーザ重ね溶接法について検討し、溶接品質と機械的特性に及ぼす溶接速度の影響を評価した。使用した金属材料は、Al, Cu, Ni, TiおよびSUS 304 (約70% Fe)など、産業界で使われている材料であり、上下の組合せを変えてレーザ重ね溶接を行い、溶接性に及ぼす上下位置の影響についても検討した。また、熔融池表面と裏面のブルームやスパッタの発生挙動等の溶接現象を高速ビデオカメラで観察し、溶接金属部の合金元素分布をEDX法で分析して溶接メカニズムを推察した。一方、めっきされた金属材料も母材とめっき層の物性差によって溶接が難しい。特に、自動車産業でよく使われる亜鉛めっき鋼板の場合、亜鉛の沸点が鋼の融点よりも低いため、ポロシティもしくはピットまたはアンダフィルと呼ばれる溶接欠陥が発生しやすい。亜鉛めっき鋼板2枚のレーザ重ね溶接は実用化されているが、亜鉛めっき鋼薄板3枚重ねの高速リモートレーザ溶接は、日本では実用化例がなく、溶接法の確立が要望されている。このため、亜鉛めっき鋼薄板3枚重ねに対してリモートレーザ溶接を行い、良好な溶接部を得るための条件、溶接性および溶接現象について検討した。

金属間化合物が存在しない組合せと金属間化合物が形成する組合せの同種または異種の材料に対して、シングルモードファイバーレーザを用いて、今まで実現できなかった超高速での重ね溶接実験を実施した。シングルモードファイバーレーザによる重ね溶接をレーザ出力1 kW, 5 m/min~50 m/minの溶接速度で行った。金属間化合物が存在しない組合せの場合はSUS304-Cu, SUS304-Ni, および Cu-Niであり、Cu-NiとSUS 304-Niの重ね溶接を行った結果、いずれの条件でも割れが発生しない良好な溶接ビードが得られた。しかし、SUS304-Cuの重ね溶接の場合、SUS304が上板のものではすべての溶接速度で溶接ビードの表面に微細な割れがあり、Cuが上板の場合は20 m/min以下の溶接速度で裏面ビードに割れの発生した。割れはSUS 304にCuが溶融し、広い凝固温度範囲で凝固したため起こったものと推察される。Cu-SUS304の溶接速度10 m/minでは、継手を中心に破断されるがSUS304試料側の溶接金属部で大きく口が開いて割れた。この条件以外はすべての接合部は重ね部の界面で引張せん断破断が起こったことが確認された。また、金属間化合物を形成しない金属材料の組合せにおいて、超高速重ね溶接継手の強度は同種溶接の低い組合せより高く、高い組合せより低いことがわかった。以上の結果から、金属間化合物を形成しない金属材料の組合せにおいて、超高速重ね溶接継手の強度は、重ね部近傍の硬度が双方の中間的な値であるため、すべての溶接条件で同種溶接の低い組合せより高く、高い組合せより低いことが判明した。

次に、金属間化合物が存在する異種材料Al-Cu, Al-Ni, Al-Ti, Al-SUS304, Cu-Ti, Ni-TiおよびSUS304-Tiに対してレーザによる重ね溶接性について検討した結果、低速の溶接金属部で割れの発生が認められ、通常、高速で割れが見られないものもあることが確認された。Alに対するCu, Ni, TiまたはSUS304のレーザ異材接合部は、20 m/minで高強度の継手が得られた。Tiに対する異材継手では、SUS304との継手の引張せん断荷重が低く、Niとの異材継手は高強度であった。異材接合継手の場合、低溶接速度の方が接合部幅は広いが引張せん断荷重は低強度同士の同種材より

低い場合があった。この原因は、溶接金属部に割れが発生していたためであった。Al-Tiの異材溶接部の引張せん断試験の場合、破断がAl側で起こるほど強い継手が得られた。この組合せ以外はほぼ溶接金属継手界面近傍で破断した。いずれの材料の組合せでも、20~30 m/minの条件で、高引張せん断荷重で強度特性の優れた継手が得られた。それは高速度では元素の混合が抑制され、金属間化合物の生成が抑制されて割れの発生が抑制・防止されたためであることがわかった。以上の結果より、金属間化合物が形成する異材溶接は困難であると予想されたが、本研究で非常に速い速度でレーザー溶接を行った結果、SUS304とTiの異材溶接以外の異種材料では、レーザー溶接性は超高速度で改善されることがわかった。そして、すべての組合せにおいて溶接速度が速いほど継手強度は高くなることがわかった。

さらに、Al-Ti薄板の異材重ね継手に対してシングルモードファイバーレーザーによる超高速溶接を行い、溶接部の組成を詳しく分析し再度明確にすると共に、溶接中の溶融池の挙動、レーザー誘起ブルームの挙動およびスパッタの発生状況を高速度ビデオで観察し、ブルームの発光成分を分光分析法により同定して、上板および下板の溶融・蒸発挙動について推察し、溶接金属の生成機構について考察した。その結果、Ti-AlおよびAl-Tiの表面での溶融池は、溶接速度が速いほど幅がせまく長くなり、Al上板の方がTi上板の場合より広くて長く、大きかった。特に、キーホール口は溶接速度の速さにかかわらず常に安定であることが観察された。また、Al-Ti異材のレーザー溶接部中の成分を分析した結果、Tiリッチ部へのAlの固溶がAlリッチ部へのTiの固溶より多かった理由は、キーホールにおいて発生した上部Alの蒸発が下部Tiの蒸発を押えて下部に浸入し、下部Tiによく固溶されたためであることが理解された。以上の結果から、シングルモードファイバーレーザーによる高速異材重ね溶接機構について、レーザー溶接現象から理解でき、溶接部のマイクロ組織と金属間化合物の生成状況、合金元素の固溶状態などとの関連性について解明できた。

ディスクレーザーとそのスキャナヘッド光学系により、亜鉛めっき鋼板3枚重ねのリモートレーザー溶接性について詳細に検討した。上下のギャップをそれぞれ変化させてレーザー溶接を行った結果、上下とも適度にギャップが空いている時には、上下ともギャップが0 mmでなく、上下のギャップの合計が0.2~0.3 mmの時に最も良い溶接結果が得られた。ギャップの合計が約0.6 mm以上に広い場合、未溶接となることがわかった。また、亜鉛めっき鋼板3枚重ね継手のレーザー溶接中のキーホール挙動および気泡・ポロシティの生成状況をX線透視リアルタイム観察を行った結果、ギャップのない亜鉛めっき鋼板3枚重ねの場合、キーホール部分が亜鉛めっき層の蒸発亜鉛により膨張してそれが気泡となり、キーホールから分離されて融液中に存在し、その気泡が溶接部周辺の亜鉛めっき層が亜鉛蒸気となり気泡中に入り込んで気泡は膨張した。その拡大した気泡は溶接金属部に大きなポロシティとして残る状況が観察された。一方、ギャップ0.1-0.1 mmの亜鉛めっき鋼板3枚重ねの場合、キーホールがギャップのない条件より安定であり、気泡およびポロシティの発生は認められなかった。特に、亜鉛めっき層の亜鉛蒸気が重ね部のギャップを通じて外部に排出されるため溶融池内に入らなく、気泡を発生しないため、ポロシティを生成しないことが確認された。以上の結果より、亜鉛めっき鋼板3枚重ねのレーザー溶接の場合、試料の重ねた部分にギャップがあるとそのギャップを通じて発生した亜鉛蒸気が溶融池内に浸入せずに、安定なキーホールが形成されることがわかった。一方、試料の重ねた部分にギャップがない条件ではキーホールは不安定となり、重ね部から気泡が発生し、一部、周囲の蒸気を取り込んで大きくなり、大きなポロシティが生成することがわかった。以上の結果より、亜鉛めっき鋼板3枚重ね溶接に関する良好な溶接部を得るための条件と溶接法の理解ができた。

## 論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 ( 李 修 眞 )		
論文審査担当者	(職)	氏 名
	主 査	教 授 片 山 聖 二
	副 査	教 授 高 谷 裕 浩
	副 査	教 授 近 藤 勝 義
	副 査	教 授 廣 瀬 明 夫
	副 査	准教授 川 人 洋 介

## 論文審査の結果の要旨

最近、省エネルギーと環境保護の観点から製品の軽量化と高機能化が要望され、金属や合金の短所を補完する異種材料溶接・接合の重要性が増している。異材の溶接は、製品の軽量化や高機能化などに有効な方法の一つであり、広範囲の分野で適用が期待されているが、熔融溶接部に金属間化合物が形成して割れが発生することがあるためきわめて困難であると考えられている。この異種金属材料の溶接・接合が可能になると、多くの分野で適用されることが期待される。

そこで、本研究では、これまでの異材溶接の課題を解決するため、最近開発された高品質・高輝度のファイバーレーザーまたは一部ディスクレーザーとそのビームスキャンの集光光学系を用い、異種金属材料の高速レーザー重ね溶接法について検討し、溶接品質と機械的特性に及ぼす溶接速度の影響を評価している。使用した金属材料は、Al、Cu、Ni、Ti および SUS 304 (約 70% Fe) など、産業界で使われているものであり、上下の配置の組合せを変えてレーザー重ね溶接を行い、溶接性に及ぼす上下配置の影響についても検討している。また、熔融池表面と裏面のブルームやスパッタの発生挙動等の溶接現象を高速ビデオカメラで観察し、溶接金属部の合金元素分布を EDX 法で分析して溶接メカニズムを推察している。一方、自動車産業でよく使われている亜鉛めっき鋼板のレーザー重ね溶接の場合、亜鉛の沸点が鋼の融点よりも低いため、ポロシティもしくはピットまたはアンダフィルと呼ばれる溶接欠陥が発生しやすい。亜鉛めっき鋼板 2 枚のレーザー重ね溶接は板間にギャップを設けることにより実用化されているが、亜鉛めっき鋼薄板 3 枚重ねの高速リモートレーザー溶接は、日本では実用化例がなく、溶接法の確立が要望されている。このため、亜鉛めっき鋼薄板 3 枚重ねに対してリモートレーザー溶接を行い、良好な溶接部を得るための条件、溶接性および溶接現象について検討している。

金属間化合物が存在しない組合せと金属間化合物が形成する組合せの同種または異種の金属材料に対して、シングルモードファイバーレーザーによる重ね溶接をレーザー出力 1 kW、5~50 m/min の溶接速度で行っている。金属間化合物が存在しない組合せの Cu-Ni と SUS 304-Ni では、いずれの条件でも割れが発生しない良好な溶接ビードが得られている。一方、SUS304-Cu では、SUS304 が上板のものではすべての溶接速度で溶接ビードの表面に微細な割れが発生し、Cu が上板の場合は 20 m/min 以下の溶接速度で裏面ビードに割れが発生することを明らかにしている。割れは SUS 304 に Cu が熔融し、広い凝固温度範囲で凝固したため発生したと推察し、引張せん断試験ではほとんどすべてにおいて重ね部の界面で破断が起こることを確認している。そして、溶接継手の強度は、重ね溶接部の幅とその近傍の硬度レベルおよび割れの程度から解釈でき、金属間化合物を形成しない異種金属材料の組合せでは、その継手強度は、重ね溶接部の硬度が低強度の同種接合部の硬度より高いため、すべての溶接条件で同種溶接継手の低い組合せより高いことを明らかにしている。

次に、金属間化合物が存在する異種金属材料 Al-Cu、Al-Ni、Al-Ti、Al-SUS304、Cu-Ti、Ni-Ti および SUS304-Ti に対してレーザーによる重ね溶接性について検討している。その結果、低速度の溶接金属部で割れの発生が認められ、通常、高速度で割れが見られないものが作製できることを確認している。Al に対する Cu、Ni、Ti または SUS304

のレーザ異材接合部では、20 m/min で高強度の継手が得られている。Ti に対する異材継手では、SUS304 との継手の引張せん断荷重が低い、Ni との異材継手は高強度であることを明らかにしている。異材溶接継手の場合、低溶接速度では、溶接金属部に割れが発生し、接合部幅は広いが引張せん断荷重は低強度同士の同種材より低くなることを確認している。一方、いずれの材料の組合せでも、20~30 m/min の高速溶接の条件で、高引張せん断荷重で強度特性の優れた継手が得られ、Al-Ti の異材溶接部の引張せん断試験の場合、破断が Al 側で起こるほど強い継手が得られている。これは高速度で元素の混合が抑制され、金属間化合物の生成が抑制されて割れの発生が抑制・防止されたためであることを解明している。この結果より、金属間化合物が形成する異材溶接は困難であると予想されたが、本研究では、非常に速い速度でレーザ溶接を行った結果、レーザ溶接性は超高速度で改善され、ほとんどすべての組合せにおいて溶接速度が速いほど継手強度は高くなることを明らかにしている。

さらに、Al-Ti 異材薄板の重ね継手に対して、シングルモードファイバーレーザによる超高速溶接を行い、溶接中の溶融池の挙動、レーザ誘起プラズマの挙動およびスパッタの発生状況を高速度ビデオで観察し、プラズマの発光成分を分光分析法により同定して、上板および下板の溶融・蒸発挙動について推察し、溶接部の元素分析と透過電子顕微鏡観察による微細生成相を同定し、溶接金属の形成機構について考察している。その結果、Ti-Al および Al-Ti の表面での溶融池は、溶接速度が速いほど幅が狭くなって長くなり、Al 上板の方が Ti 上板の場合より広くて長いことを確認している。特に、キーホールは溶接速度の速さにかかわらず常に安定であることが観察され、Al-Ti 異材のレーザ溶接部中の成分を分析した結果、Ti リッチ部への Al の固溶が Al リッチ部への Ti の固溶より多いことを明らかにしている。この理由は、キーホールにおいて上板 Al の蒸発が下板 Ti の蒸発を押えて下部に浸入し、下板 Ti によく固溶されたためであると解釈している。以上の結果から、シングルモードファイバーレーザによる高速異材重ね溶接機構について、レーザ溶接現象から理解し、溶接部のマイクロ組織と金属間化合物の生成状況、合金元素の固溶状態などとの関連性から解明している。

ディスクレーザとそのスキャナヘッド光学系により、亜鉛めっき鋼板 3 枚重ねのリモートレーザ溶接性について詳細に検討している。上下のギャップをそれぞれ変化させてレーザ重ね溶接を行った結果、上下とも適度にギャップが空いている時には、上下ともギャップが 0 mm でなく、そのギャップの合計が 0.2~0.3 mm の時に最も良い溶接結果が得られること、ギャップの合計が約 0.6 mm 以上に広い場合、未溶接となることを明らかにしている。また、亜鉛めっき鋼板 3 枚重ね継手のレーザ溶接中のキーホール挙動および気泡・ポロシティの生成状況を X 線透視リアルタイム観察法により観察を行った結果、ギャップのない亜鉛めっき鋼板 3 枚重ねの場合、キーホール部分が亜鉛めっき層からの蒸発亜鉛により膨張して気泡となり、キーホールから分離されて融液中に存在し、大きなポロシティとして残る状況を観察している。一方、ギャップ 0.1-0.1 mm の亜鉛めっき鋼板 3 枚重ねの場合、キーホールがギャップのない条件より安定であり、気泡およびポロシティの発生が認められないことを観察している。特に、亜鉛めっき層からの亜鉛蒸気が重ね部のギャップを通じて外部に排出されるため溶融池内に入らなくて気泡を発生しないため、ポロシティを生成しないことを確認している。以上の結果より、亜鉛めっき鋼板 3 枚重ねのレーザ溶接の場合、重ね板間にギャップがあると、発生した亜鉛蒸気が溶融池内に浸入しないため安定なキーホールが形成されることが確認されている。一方、試料の重ねた部分にギャップがない条件ではキーホールは不安定となり、重ね部から気泡が発生し、大きなポロシティが生成することを確認している。以上の結果より、亜鉛めっき鋼板 3 枚重ね溶接に関する良好な溶接部を得るための条件と溶接法についての知見を得ている。

本論文では、異材レーザ溶接に関連して多くの知見を得ており、今後の展開に多大な寄与が期待される。よって、本論文は博士論文として価値あるものと認める。