

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 7 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06465

研究課題名(和文) レーザブレイジングによる難接合材同士の異種金属接合法の確立とそのモデルの構築

研究課題名(英文) Establishment of dissimilar metal joining with difficult situation using laser brazing and construction of its model

研究代表者

小椋 智 (OGURA, TOMO)

大阪大学・工学研究科 ・准教授

研究者番号：90505984

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：レーザブレイジングによるアルミニウム合金とマグネシウム合金の異種金属接合法を確立した。直接接合では、出力を最適化することで、ろう材の濡れ角、ビード幅、金属間化合物を制御され継手強度が向上することがわかった。界面反応を抑制する手法として、インサート材が有効であることがわかった。チタンをインサート材として使用することで、アルミニウムとマグネシウムの相互拡散が抑制され、接合界面部に非常に薄いAl-Ti系金属間化合物が形成されることで接合が達成されることがわかった。引張せん断試験の結果、アルミニウム合金母材破断を示し、従来の強度を大幅に上回る高強度接合が達成された。

研究成果の概要(英文)：Dissimilar metal joining between the aluminum alloy and the magnesium alloy by laser brazing was established. In the direct joining, it was found that a weld toe angle of the filler wire, a bead width and intermetallic compounds were controlled by optimizing the laser heat output, and joint strength improved. We have found out that insert materials were quite effective to control an interface reaction. Mutual diffusion of aluminum and magnesium at the interface was suppressed by using titanium as insert materials and the joining was accomplished due to a very thin Al-Ti series intermetallic compound. Tensile shear testing showed that fractured occurred at aluminum base metal and we revealed that the high-strength joining to largely exceed conventional strength was accomplished.

研究分野：溶接・接合

キーワード：異材接合 アルミニウム合金 マグネシウム合金 レーザブレイジング

1. 研究開始当初の背景

最終製品を生産する過程では個々の部品を溶接・接合して最終製品にする。その際には種々の産業分野で構造物の高機能化、省コスト化のために、複数の材料を適材適所に適用したマルチマテリアル化が指向されており、それを実現するための異種金属の接合技術開発はものづくりには欠かせないものとなっている。特に近年、輸送機器産業においては車体の軽量化かつ衝突安全性の向上が求められ、鉄鋼材料と軽量のアルミニウム合金やマグネシウム合金とを接合する、鉄鋼材料/軽金属材料のハイブリッド異種金属接合技術の研究開発が促進され、一部で実用化レベルに達している。申請者はこれまでに鋼/アルミニウム合金を主体に種々の異材接合の接合界面の組織制御に着目し、接合時の界面反応層をナノメートルサイズまで抑制することに成功し、異種金属の母材強度を有する界面構造制御法を確立している。

次世代の輸送機器においては更なる軽量化・高性能化のため、アルミニウム合金やマグネシウム合金などの軽金属材料同士の異種金属接合技術の開発が工業的に強く求められる。しかしながら、工業用アルミニウム合金とマグネシウム合金はお互いの固溶度が低い物理的性質を有しており、接合時には拡散により界面反応層(金属間化合物)を接合界面部に形成する。この界面反応層が非常に脆弱なために接合部において十分な強度を得ることが困難なのが現状である。さらにこれら軽金属材料は鉄鋼材料に比べて融点が500以上低い特徴を有し、従来の溶接・接合法では入熱により母材の材質劣化や変形を引き起こす。そのため、アルミニウム合金とマグネシウム合金は共に難接合材と称されており、これら難接合材の工業的接合技術は同種金属接合のみで、異種金属接合技術はまだ確立されていない。難接合材同士に対して高い信頼性を有する異種金属接合を行うには、低入熱・局所加熱な溶接・接合プロセスを確立する必要がある。

低入熱・局所加熱な溶接・接合プロセスとしてレーザーブレイジングがある。レーザーブレイジングは接合部を局部加熱、急熱/急冷による母材の材質劣化や変形制御が行える特徴を有しており、ろう付け品質の安定化・高信頼性が図れる。アルミニウム合金と鋼のレーザーブレイジング部では、入熱による界面反応層の生成が2~3 μm まで抑制されている。これはろう材のみが溶融し、母材が熱損傷していないことを示している。このことは、レーザーブレイジングがろう材のみを溶融させることで、母材を熱損傷させない難接合材同士の接合に適用可能なことを示している。

2. 研究の目的

本研究は、難接合材である異種金属同士の信頼性の高い接合継手を開発することを全体構想とする中で、レーザーブレイジングによ

る難接合材同士の異種金属接合法の確立することを目的とする。

3. 研究の方法

供試材料にはアルミニウム合金には A5052、マグネシウム合金には AZ31 を、ろう材には AZ92、AZ125 ワイヤーを用いた。インサートには純 Ti 箔(厚さ 50 μm)を用いた。レーザーブレイジングには 6kW ファイバーレーザー溶接装置を用いてレーザー出力: 600-1000W、レーザー走行速度: 5mm/s、ワイヤー供給速度: 21mm/s、Ar 雰囲気にてブレイジングを行った。ブレイジング継手の機械的特性には引張せん断試験を行い、継手の破断強さは破断強度を試験片の幅で除した値で評価した。組織観察、解析には SEM、EPMA および TEM を用いて評価した。

4. 研究成果

図 1 に A5052/AZ31 レーザーブレイジング継手におけるレーザー出力と引張せん断強度の関係を示す。レーザー出力が 480W~620W の範囲において強度を有する継手が得られることがわかった。これはアルミニウム合金/鋼のレーザーブレイジング継手のもの(1000W-1500W)に比べて範囲が小さく、A5052/AZ31 レーザーブレイジング継手におけるブレイジング適性範囲が小さいことを示している。レーザー出力が増加するにつれて引張せん断強度は増加し、レーザー出力 600W で強度は最大となった。一方、レーザー出力がさらに増加すると引張せん断強度は低下した。

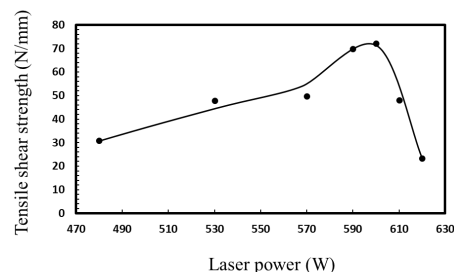


図 1 Tensile shear strength of the A5052/AZ31 joints with various laser power.

図 2 に引張試験前の継手断面のミクロ組織の一例を示す。レーザー出力 590W までは A5052 と AZ125 との界面に金属間化合物層である $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ および Mg_2Al_3 が比較的薄く生成し、レーザー出力の増加に伴い接合面積が増加していた。一方、レーザー出力 610W の場合は、金属間化合物層が急激に厚く成長し、ろう材内部でろう材と金属間化合物層が混合していることがわかった。また、ポイドも生じていた。

組織観察と破断形態の結果により、引張せん断強度変化は以下のように考えられる。重ね継手にせん断荷重が加わると、主として

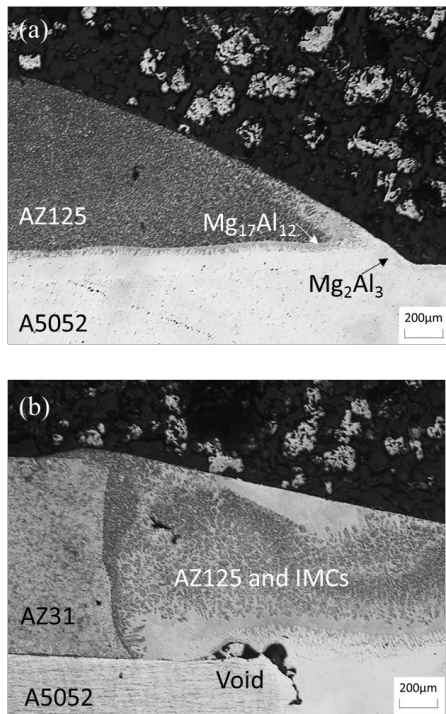


図 2 Macrostructure of cross section of the weld bead of the A5052/AZ31 laser brazed joints with (a) 520W and (b) 610W.

応力集中源はビード端部となることが知られている．そのため，レーザ出力 590W までは応力集中部であるビード端部が破断の起点となり，端部の Mg_2Al_3 にて破断が生じたものと考えられ，接合面積の増加に伴い，強度が増加したと考えられる．一方，レーザ出力 610W 以上ではろう材内での破断であった．ルート部では，ろう材と混合するほどの過剰な金属間化合物が生成しており，さらに，ポイドも発生していた．そのため，これらが破断の起点となっておりろう材内破断となり，低強度を示したものと考えられた．

次に界面反応をより抑制させるために Ti 箔をインサートとして適用した．図 3 にレーザ出力 780W における A5052/AZ31 継手の断面組織を示す AZ92 ろう材が母材 AZ31 に溶け，また Ti インサート材上に適切にブレイジングされていることが確認された．また，A5052 の溶け落ちも認められなかった．マクロ組織においては，AZ92 ワイヤー/Ti インサートおよび Ti インサート/A5052 界面における金属間化合物の形成および Ti インサートの溶融も認められなかった．

図 3 の Ti インサート界面である白枠部において EPMA マッピングを行った．その結果を図 4 に示す．Ti インサート厚さは 50µm のままであった．そのため，本研究のレーザ出力内ではレーザブレイジングによって Ti インサートは溶融しないことがわかった．Ti/A5052 界面においては，約 5µm 程度の厚さを有する舌状の IMC が観察され，組成分析結果より Al_3Ti と同定された．この IMC はブレイジング時の溶融したろう材 AZ92 から

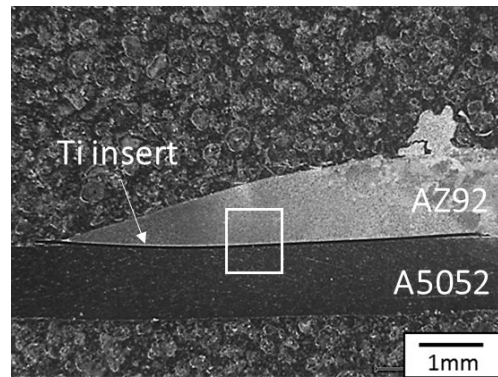


図 3 Cross sectional image of an A5052/AZ31 laser-brazed joint with Ti insert.

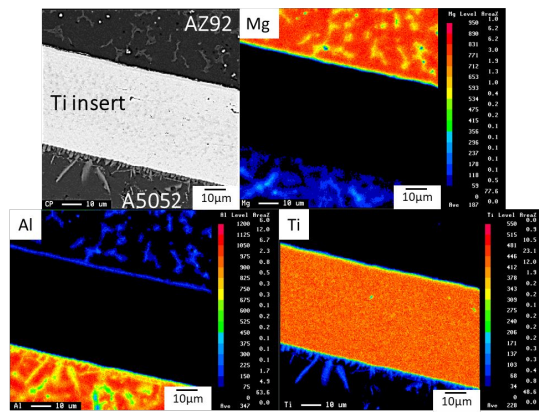


図 4 EPMA mappings of the interface in the A5052/AZ31 joint with Ti insert at 780W.

Ti/A5052 の界面部に熱伝導が生じ，Ti は溶融せずに融点の低い A5052 表面が局所的に溶融することで Ti と Al が反応して形成したと考えられる．一方，AZ92/Ti 界面では，EPMA では IMC は明瞭には観察されなかったが Al の濃化が認められた．

AZ92/Ti インサート界面を詳細に調べるために TEM 観察を行った．その結果を図 5 に示す．界面部において 200nm 程度の厚さの IMC が観察された．界面で形成した IMC は主に Ti-Al 系化合物であることがわかった．Mg と Ti は二相分離型の状態図を示し，相互拡散による IMC 形成は生じにくいいため，Mg 合金と Ti 合金の異材接合は非常に困難とされている．しかしながら，本研究では AZ92 ワイヤーに 9%程度含まれる合金元素である Al が Ti と反応し，非常に薄い IMC を形成することで接合が達成されることが明らかとなった．図 6 に Ti インサートの有無による界面で形成された IMC 厚さの変化を示す．Ti インサートがない AZ125 ワイヤーを用いたレーザブレイジングによる直接接合では 200µm の Al-Mg 系 IMC が形成される．一方，Ti インサートを用いることで，接合界面部は AZ92/Ti および Ti/A5052 と 2 か所になるが，それぞれ 5µm，200nm と非常に薄い IMC が形成された．そのため Ti インサートを用いたレーザブレイジ

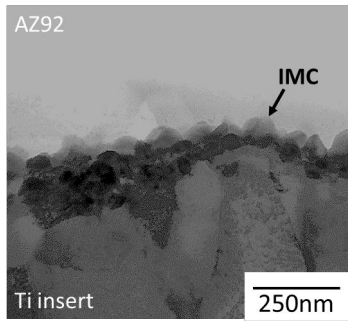


図 5 TEM image between AZ92 filler metal and Ti insert in A5052/AZ31 joint with Ti insert at 780W.

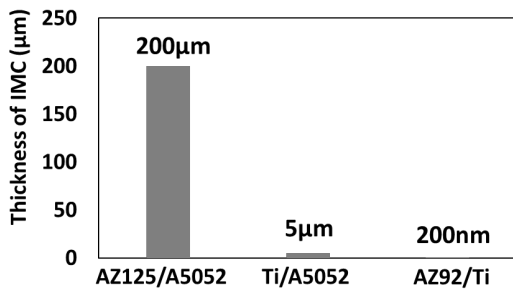


図 6 Thickness of IMC in A5052/AZ31 joint with/without Ti insert.

ングでは、直接接合と比べてインサート材が溶融ろう材と母材の界面反応を抑えることで、IMC の形成を著しく抑制することがわかった。

図 7 に各レーザー出力における引張せん断強度とその破断形態を示す。比較として A5052 の引張せん断強度も示す。インサートなしでのレーザーブレイジングでは最高強度が 70N/mm 程度であったことに対し、インサートを用いることで強度が著しく増加することがわかった。また、レーザー出力が小さい場合には界面部で破断が生じ、レーザー出力の増加に伴い強度は増加し、A5052 母材破断となった。さらに出力が増加になると強度が減少し、ろう材内破断となった。

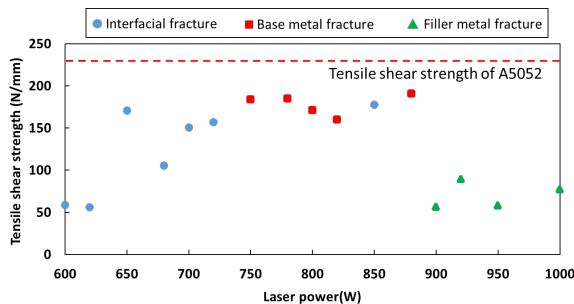


図 7 Tensile shear strength of A5052/AZ31 joints with Ti insert produced with various laser powers.

破断部のマクロ組織により、低出力では破断は Ti/A5052 界面部で生じたことがわかった。そのため、出力が小さい場合には Ti への入熱が小さく、Ti/A5052 の界面反応が生じずに接合が不十分となり、低強度であることが考えられる。また、出力が過剰になると、ビード形状が凹み型となり、ろう材内部で Al-Mg 系 IMC の形成量が多いこともわかった。そのため、高出力側では接合は達成されるが、これらの影響でろう材内で破断し低強度となったものと考えられる。レーザー出力 750-900W においては A5052 母材破断となり、その強度は母材強度の 80%程度を示した。

A5052/AZ31 異材接合継手の A5052 内部の硬さ試験結果より、接合部近傍では A5052 の硬さが 20%程度減少し、レーザーブレイジングでの入熱による軟化が認められた。そのため、A5052 母材破断で継手効率が 80%程度となったことは母材部の軟化に起因していることが明らかとなった。

以上より、Ti インサートを用いたレーザーブレイジングプロセスは以下のように考えられる。レーザー出力の増加に伴い、AZ92/Ti および Ti/A5052 の界面反応が生じ、接合が達成される。この際、AZ92/Ti 側では反応する Al 量が少ないこと、Ti/A5052 側では熱量が減少することから、形成される IMC は直接接合に比べて著しく減少する。そして、界面反応が十分に生じると、A5052 母材破断となる。この時、A5052 は熱影響により軟化するため、その強度は母材強度の 80%程度となる。さらにレーザー出力が増加すると、ろう材内に形成される Al-Mg 系 IMC のサイズが大きくなるとともに凹み型のビードになるため、ろう材内破断となり継手強度が低下する。本研究においては、レーザー出力が 750-880W において、良好な継手特性が得られることが明らかとなった。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 2 件)

Tomo Ogura, Syunsuke Netsu, Tetsuya Yokochi, and Kazuyoshi Saida, Dissimilar Metal Joining of A5052 Aluminum Alloy and AZ31 Magnesium Alloy using Laser Brazing, Materials Science Forum, 879, pp.2532-2536 (2017).

doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.879.2532

Tomo Ogura, Tetsuya Yokochi, Shunsuke Netsu and Kazuyoshi Saida,

Microstructure and mechanical properties in laser brazing of A5052/AZ31 dissimilar alloys, Welding in the world, 60, 1047-1054 (2016).

DOI 10.1007/s40194-016-0363-3

[学会発表](計9件)

Tomo Ogura, Shunsuke Netsu, and Kazuyoshi Saida, Effect of insert metal on dissimilar metal joining between A5052 aluminum alloy and AZ31 magnesium alloy using laser brazing, 70th Annual Assembly of International Institute of Welding (IIW2017), The Chinese Mechanical Engineering Society (CMES) and Chinese Welding Society (CWS), The Chinese Mechanical Engineering Society (CMES) and Chinese Welding Society (CWS), Shanghai China, Jun. 25-30, 2017.

Tomo Ogura, Shunsuke Netsu and Kazuyoshi Saida, Dissimilar laser brazing of A5052 aluminum alloy and AZ31 magnesium alloy, International Welding & Joining Conference Korea (IWJC Korea), Gyeongju, Korea, 11-14, 2017

小椋 智, 祢津 俊介, 才田 一幸, レーザブレイジングによるアルミニウム合金とマグネシウム合金の異種金属接合におけるインサート材の効果, 第160回大会, (公社)日本金属学会, 首都大学東京南大沢キャンパス, 3月15-17日, 2017.

小椋 智, 祢津 俊介, 才田 一幸, レーザブレイジング用いた A5052 合金と AZ31 合金の異種金属接合におけるインサート材の効果, 第131回軽金属学会秋期大会, (一社)軽金属学会, 茨城大学水戸キャンパス, 11月5-6日, 2016.

小椋 智, 祢津 俊介, 才田 一幸, レーザブレイジングを用いたアルミニウム合金とマグネシウム合金の異材接合におけるチタンインサート材の効果, 平成28年度秋季全国大会, (一社)溶接学会, 伊香保温泉 HOTEL 天坊, 9月14-16

日, 2016.

Tomo Ogura, Tetsuya Yokochi, Shunsuke Netsu and Kazuyoshi Saida, Dissimilar metal joining of A5052 aluminium alloy and AZ31 magnesium alloy using laser brazing, International Conference on PROCESSING & MANUFACTURING OF ADVANCED MATERIALS (THERMEC '2016), Messe Graz, Graz, Austria, May 29-June 3, 2016 [Invited talk].

小椋 智, 祢津 俊介, 横地 徹哉, 才田 一幸, レーザブレイジングによる A5052 合金と AZ31 合金の異種金属接合, 第129回軽金属学会春期大会, (一社)軽金属学会, 日本大学生産工学部津田沼キャンパス, 11月21-22日, 2015.

祢津 俊介, 小椋 智, 才田 一幸, レーザブレイジングによるアルミニウム合金とマグネシウム合金の異種金属接合, 平成27年度秋季全国大会, (一社)溶接学会, 北海道科学大学, 9月2-4日, 2015.

小椋 智, 横地 徹哉, 祢津 俊介, 西本 和俊, 才田 一幸, アルミニウム合金とマグネシウム合金の異種金属接合におけるレーザブレイジングの適用 第156回春期講演大会, (公社)日本金属学会, 東京大学駒場キャンパス, 3月18-20日, 2015.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小椋 智 (OGURA Tomo)
大阪大学 大学院工学研究科 准教授
研究者番号: 90505984

(2) 研究分担者

才田 一幸 (SAIDA Kazuyoshi)
大阪大学 大学院工学研究科 教授
研究者番号: 30178470