

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 5 月 24 日現在

機関番号：14101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26870281

研究課題名(和文) レーザロール溶接によるマグネシウム合金と鉄鋼の接合メカニズム及び最適条件の解明

研究課題名(英文) Clarification of Joining Mechanism and Optimum Conditions in Laser Roll Welding of Magnesium Alloy to Steel

研究代表者

尾崎 仁志(OZAKI, Hitoshi)

三重大学・工学研究科・助教

研究者番号：90515660

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：マグネシウム合金と鉄鋼との接合は、従来の接合法では困難である。本研究ではレーザーロール溶接法によりそれを試みた。その結果、接合界面のEPMA分析により、主にFeおよびAl元素から成る界面層の存在が確認され、接合への寄与が示唆された。また、ローラ加圧力の増加または溶接速度の減少により継手の接合面積は増加し、接合面積の増加により継手強度が増加することを明らかにした。さらに、引張せん断試験において、接合界面ではなくマグネシウム合金中で破断する高強度の継手を得ることができた。

研究成果の概要(英文)：It is well known that joining of magnesium alloy to steel by conventional joining processes is difficult. In the present work, laser roll welding of magnesium alloy to steel was tried. As a result, existence of the interface layer consisting mainly of Fe and Al was confirmed, and contribution of the layer to joining mechanism was suggested. Moreover, increasing of roller pressure or decreasing of welding speed led to increase of bonding area at the joint interface. Increasing of the bonding area led to increase of the joint strength. In addition, high strength joints, which were not fractured along the interface but in the magnesium alloy sheet, were obtained in tensile shear test.

研究分野：レーザー加工

キーワード：レーザーロール溶接 異種金属接合 材料ハイブリッド構造 マグネシウム合金 低炭素鋼

### 1. 研究開始当初の背景

近年、地球環境の問題から、自動車をはじめとする輸送機器の軽量化が求められている。そのための新たな切り札として、マグネシウム合金の利用が期待されている。マグネシウムは構造用材料として使用される金属材料中、最軽量材料であり、高比強度、高リサイクル性など優れた特性を持つ。一方、マグネシウムは燃焼しやすいという欠点もあるが、最近では高い機械的性質を持ちながら、耐熱性や不燃性を有している KUMADAI マグネシウム合金が開発され、今後、マグネシウム合金の利用が拡大することが予想される。

さて、実際にマグネシウム合金を輸送機器に用いる際は、マグネシウム合金と鋼を適材適所に配置した、材料ハイブリッド構造が有効であると考えられる。そのため、マグネシウム合金と鋼との接合部の増加が見込まれることから、それらを高い信頼性と生産性で接合する技術が必要不可欠となる。しかし、この2つの金属は融点差が大きく、熱伝導率等の物性値も異なることから、両金属を均一に溶解できず接合が困難であることが知られている。そこで、これまでに抵抗スポット溶接、拡散接合、レーザー溶接、摩擦攪拌接合などにより両金属の接合が試みられているが、マグネシウム合金と鋼の接合方法は未だ確立されていない。

そこで、本研究ではマグネシウム合金と鋼との難接合異種金属継手にレーザーロール溶接法の適用を試みた。すでに、本溶接法による鋼とアルミニウム、および鋼とチタンなどの組合せの異材接合について研究されており、接合に供する金属の組合せにより、これまでに2種類の接合機構が確認されている。一つ目として、両金属の融点が大きく異なる組合せが挙げられ、例えばアルミニウム合金と低炭素鋼、アルミニウム合金と純チタンの組合せがこれに該当する。このときは、接合面において低融点の金属のみが溶解し、高融点の金属と反応して界面層が形成され、接合する。二つ目は、2つの金属の融点よりも低い温度で共晶反応が起こる組合せであり、例えば純チタンと低炭素鋼の組合せがこれに該当する。この場合、接合面において共晶反応が起こることにより、共晶相による界面層が形成され、接合する。

ここで、マグネシウム合金と鉄鋼とのレーザーロール溶接においては、両金属の融点が大きく異なるため、前述の一つ目の接合機構に該当する可能性がある。しかし、Fe-Mg系の平衡状態図を参照すると、二相分離型の系を示しており、両者間で金属間化合物を生成しないことが分かる。よって、マグネシウム合金と鉄鋼のレーザーロール溶接の接合機構は、前述の2種類のそれとは異なることが予想される。

### 2. 研究の目的

本研究では、異種金属接合に有効なレーザーロール溶接法という新しいアプローチでこれらの接合を試み、溶接速度等の溶接条件を変化させて作製した継手の組織観察や強度試験を実施することにより、レーザーロール溶接によるマグネシウム合金と鉄鋼の接合メカニズムおよび高性能な継手を得るための最適条件について解明することを目的とした。

### 3. 研究の方法

供試材として、冷間圧延鋼板 SPCC (以下 SPCC) およびマグネシウム合金圧延板 AZ31B (Mg-3%Al-1%Zn) (以下 AZ31B) を用いた。試験片形状は、SPCC が 40×150×0.8mm、AZ31B が 40×150×1mm のものを使用した。

これら供試材の表面処理方法として、レーザーを照射する SPCC の表面には、レーザーの吸収率を高めるためにグラファイトスプレー (溶接スパッタ付着防止剤) を塗布し、自然乾燥させた。また、SPCC および AZ31B の接合面は、#400 のエメリー紙で研磨した後、エタノールで脱脂した。

図1に示すように、レーザー加工ヘッド、平面反射ミラー、およびローラ加圧装置を組み合わせたレーザーロール溶接装置を用いて実験を行った。

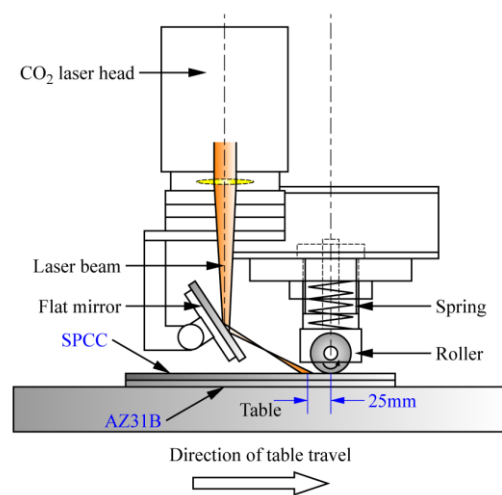


図1 レーザロール溶接装置

レーザー発振器には定格出力 2kW、波長 10.6 μm の高速軸流型 CO<sub>2</sub> レーザを用いた。発振されたレーザー光を焦点距離 200mm の ZnSe 製レンズによって集光し、平面反射ミラーにて反射させた後、角度をつけて板材へと照射した。なお、レーザー光とローラとの干渉を避けるため、平面反射ミラーの角度は板材表面に対し 56.5 度とした。また、この際のビームスポットは溶接方向に対し長辺が 3.5mm、短辺が 2.5mm の楕円に近い形状である。

ローラは高温強度が必要なため SUS304 ステンレス鋼で作製し、直径を 55mm、加圧部

の幅を 4mm とした。ビームスポットの中心とローラの加圧軸との距離（レーザーローラ間距離）は 25mm で一定とした。

異材のレーザーロール溶接状況を図 2 に示す。供試材については SPCC を上部に、AZ31B を下部に置き、その重ね代を 4mm として設置し、溶接長は 120mm とした。

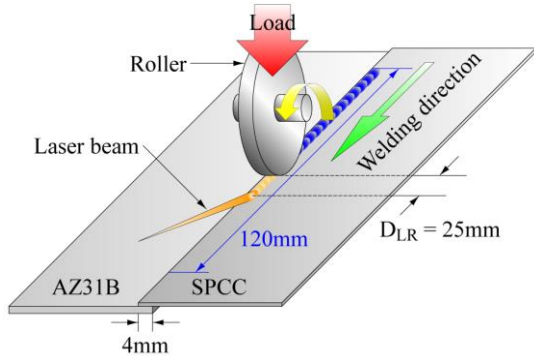


図 2 レーザロール溶接状況

溶接条件として、レーザー出力 2kW、レーザーローラ間距離 (=D<sub>LR</sub>) 25mm は一定とし、レーザー照射位置は重ね代の中央とした。また、レーザーロール溶接継手の酸化を防止することを目的として、シールドガスとして Ar ガスを用い、その流量を 20l/min とした。実験条件として、溶接速度を 0.5~1.9m/min、ローラ加圧力を 0.5~1kN の範囲で変化させた。

作製した継手に対し、ビード断面を腐食液でエッチングした後、断面マクロ観察および顕微鏡組織観察を行った。EPMA 分析により Fe および Mg 元素等の分析を行い、接合界面付近に生成した相の組成を推定した。また、それぞれの継手から幅 10mm の試験片を採取し、JIS Z3192 (3号 B 試験片) に準拠した引張せん断試験を行った。

#### 4. 研究成果

##### (1) 作製した継手の断面マクロおよび顕微鏡組織

ローラ加圧力 1kN、溶接速度 0.6m/min でレーザーロール溶接を行った継手の断面マクロ写真、および AZ31B 側の典型的な顕微鏡ミクロ組織写真を図 3 に示す。(a)より、上側の SPCC はローラ加圧により板厚がわずかに減少した以外に大きな変化はなく、下側の AZ31B の端部は丸みを帯びた形状となった。溶接前の AZ31B 母材の断面は矩形であったため、溶接中の加熱により AZ31B の端部まで溶融したものと考えられる。

次に、(b)に示した AZ31B 母材では、粒状結晶が観察された。(d)のビード中央付近においては、AZ31B の凝固組織が観察されたことから、AZ31B が溶接中に一旦溶融したことが分かる。また、(c)の SPCC 端部付近の下部においては、左側に粒状結晶、右側に凝固組織が観察される。なお、このときの粒状結晶は (b)の結晶粒と比較して粗大化していることから、AZ31B の熱影響部であると考えられる。

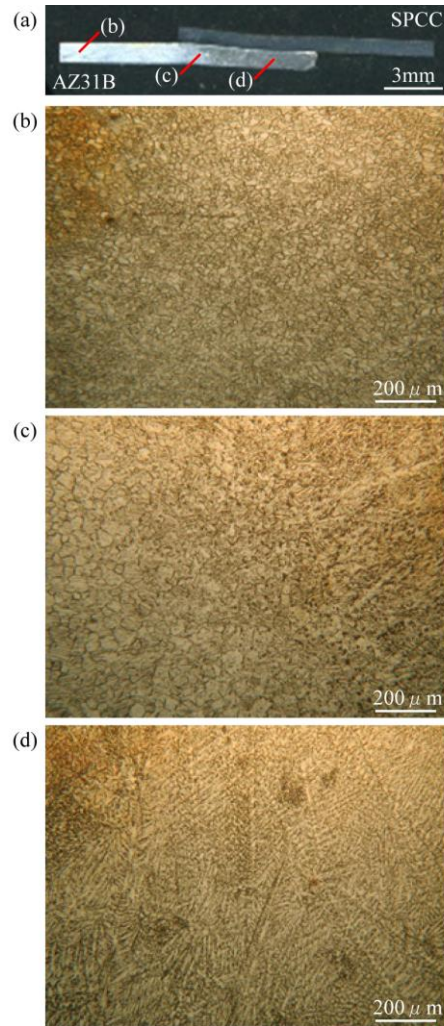


図 3 (a)継手の断面マクロ、AZ31B 側の(b)母材、(c)ボンド部付近、および(d)溶接金属の顕微鏡組織

##### (2) 接合界面の EPMA 分析結果

ローラ加圧力 1kN、溶接速度 0.5m/min の継手について、重ね代の中央付近における接合界面の SEM 像および EPMA 面分析結果を図 4 に示す。(a)の SEM 像を見ると、接合界面付近に白色の層状の箇所が確認されるが、これは観察試料の研磨時に、柔らかい AZ31B 側が硬い SPCC 側よりもわずかに多く研磨された結果、SEM 像において SPCC 側のエッジ部が白色となった可能性がある。次に、(b)~(d)の EPMA 分析結果について Fe および Al 元素に着目すると、接合界面に SPCC 母材中よりも Fe 濃度が低く、AZ31B 母材中よりも Al 濃度が高い層が存在していた。これは AZ31B が凝固する際、Al が接合界面に偏析したためであると考えられる。このことから、接合界面には主に Fe および Al 元素から成る界面層が存在しているものと考えられる。なお、SPCC 母材部の EPMA 定量分析を実施したところ、Al の濃度は高くても 0.1%程度であり、SPCC 母材中に Al はほとんど存在しないことが確かめられたため、上述した層中の Al 元

素は AZ31B 母材中の添加元素であると推定される。

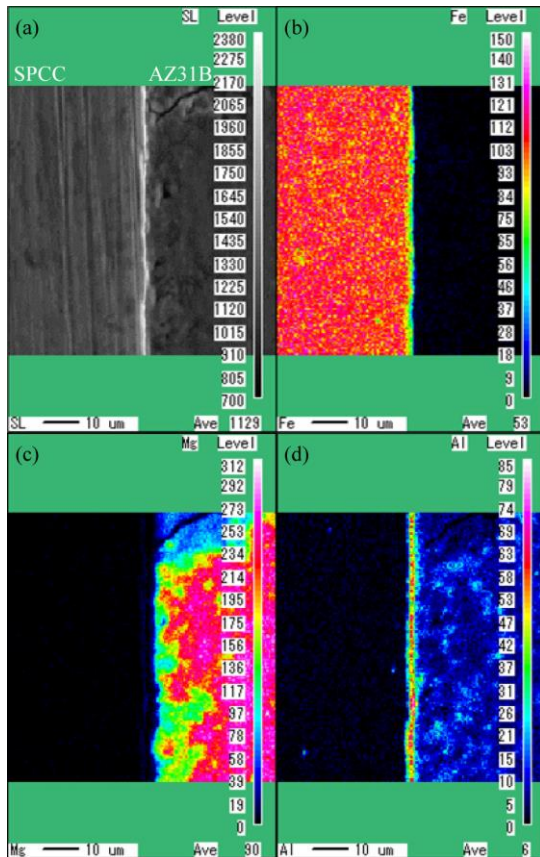
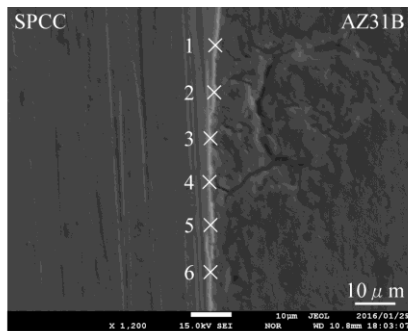


図4 接合界面周辺の EPMA 面分析結果,  
(a)SEM 像, (b)Fe, (c)Mg, (d)Al



No.	Fe	Al	Mg	(at%)
1	60.9	30.7	8.4	
2	55.7	34.8	9.5	
3	54.6	35.9	9.5	
4	65.1	27.6	7.4	
5	65.4	27.7	7.2	
6	61.6	32.5	5.8	

図5 接合界面における EPMA 定量分析結果

この界面層についてより詳細に検討するため、EPMA 定量分析を行った。その結果を図5に示す。表より、界面層は主に Fe および Al 元素から構成されており、Mg も少量検出された。ただし、分析時の電子ビーム径が  $1\mu\text{m}$  程度であり、分析箇所周囲の元素も検出される可能性を考慮すると、検出された Mg 元素が界面層に由来するか、AZ31B の凝

固部に由来するかの判断は難しい。そこで、前述のように Fe-Mg 系が二相分離型であり、Fe と Mg は相互にほとんど固溶せず、接合界面において固溶体や金属間化合物を生成する冶金的な接合は期待されないことから考察すると、本実験においては AZ31B 中の添加元素である Al が接合界面に偏析し、Fe と Al との固溶体もしくは金属間化合物を生成したものと考えられる。

ここで、他の溶接法において界面層に生成する相について調査すると、 $\text{Fe}_2\text{Al}_5+\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ <sup>1)</sup>、 $\text{FeAl}_3+\text{Al}_3\text{Mg}_2$ <sup>2)</sup>、 $\text{Fe}_3\text{Al}$ <sup>3)</sup>が生成する等の報告がある。本溶接法においては、Fe-Al 系の金属間化合物として Fe リッチな  $\text{Fe}_3\text{Al}$  が存在していることが上記の分析結果より予想される。

### (3) 界面層形成におよぼす溶接速度の影響

ローラ加圧力  $1\text{kN}$ 、溶接速度を  $1.1$  および  $1.8\text{m/min}$  としたときの継手について、重ね代の中央付近における接合界面の SEM 像および EPMA 面分析結果を図6に示す。なお、いずれの溶接速度においても重ね代の中央付近では、接合界面の AZ31B 側が溶融・凝固したことを確認している。

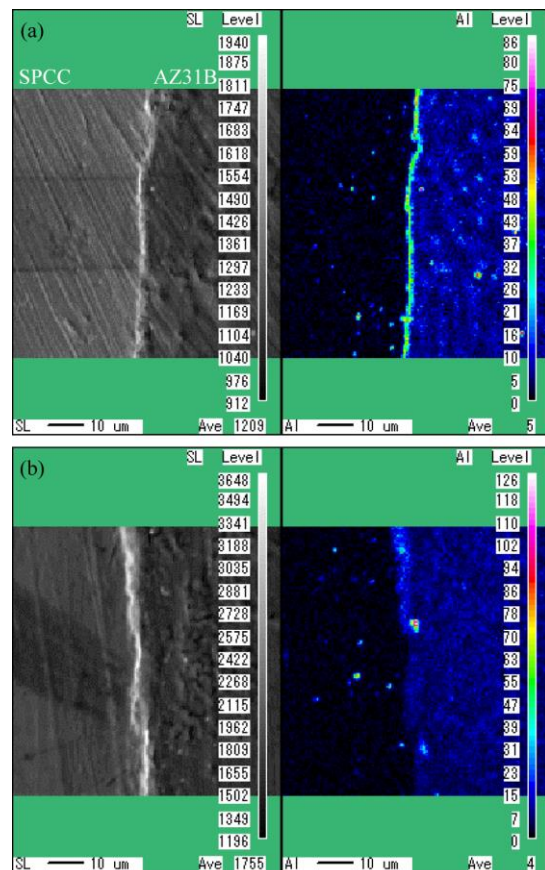


図6 接合界面周辺の EPMA 面分析結果, (a) 溶接速度  $1.1\text{m/min}$ , (b) $1.8\text{m/min}$

前節において、Al 濃度が高い層が界面層であることが判明したため、ここでは EPMA 面分析の Al 濃度の結果に注目する。図4(d)に示した溶接速度が  $0.5\text{m/min}$  では界面層の厚さ

が4 $\mu\text{m}$ 程度であったのが、図6(a)に示した溶接速度1.1m/minでは厚さ2 $\mu\text{m}$ 程度に減少し、同図(b)に示した溶接速度1.8m/minになると界面層が観察されなくなった。つまり、溶接速度の増加とともに界面層の厚さが減少したことになる。これは、溶接速度の増加による入熱の減少により、接合界面における相互拡散による界面層の形成が抑制されるためであると考えられる。一方、SPCCおよびAZ31B中にAlの濃度が局所的に高い箇所が存在するが、これは分析試料のバフ研磨において使用したアルミナ粉末の残留によるコンタミネーションであると思われる。

#### (4) 引張せん断試験結果

作製した継手を引張せん断試験により評価した。破断形態には①AZ31B合金での破断、②界面破断、および③両方の破断形態を含む複合型破断の3種類が存在した。

各ローラ加圧力において溶接速度を変化させたときの溶接継手から3本の試験片を採取し、引張せん断試験を実施した結果を、ローラ加圧力1kNの場合を例として図7に示す。本研究では、引張せん断試験における最大荷重を試験片幅10mmで除した商を、溶接長1mm当たりの引張せん断強さN/mmとした。○印はAZ31B合金での破断、□印は界面破断、および△印は複合型の破断を示す。なお、AZ31B母材(板厚1mm)の引張強さは試験片幅1mm当たり278N、SPCC母材(板厚0.8mm)では232N(図中に破線で示す)であり、ばらつきはほぼなかった。

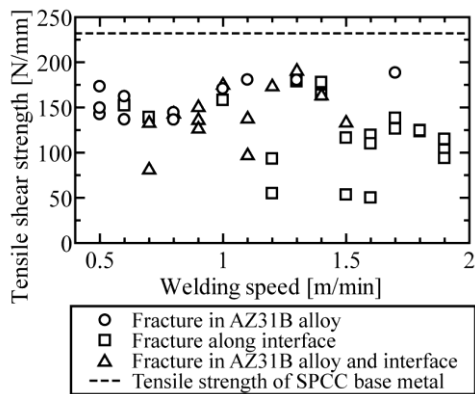


図7 引張せん断試験結果の例(ローラ加圧力1kN)

低速度側においてAZ31B合金中破断および複合型の破断が多く発生した。一方、高速度側において界面破断が多く発生している。また、全体としてローラ加圧力0.75kN、溶接速度0.8m/minにおいて最大の引張せん断強さ213N/mmが得られた。これは、板厚0.8mmのSPCC母材の引張強さの91%程度に相当する。

ここで、界面破断が生じた試験片において、破断後にSPCC側接合部表面を外観観察した一例を図8(a)に示す。図中の矢印で示す箇所のように、光沢を有する付着物が確認された。

この付着物に対しFe、MgおよびAlのEPMA面分析を行った結果をそれぞれ同図(b)~(d)に示す。(b)より、付着物にはMg元素を多く含むことから、SPCC表面に付着したAZ31Bであると推定した。よって、本継手においては、付着物が存在する箇所では接合が行われていたと考えられる。

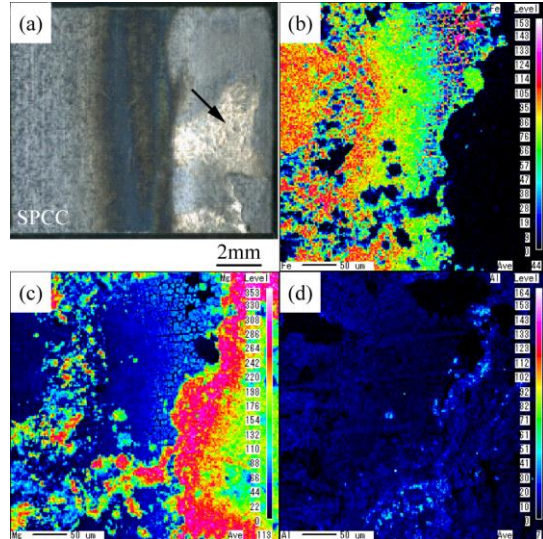


図8 界面破断後のSPCC側接合部表面におけるEPMA面分析、(a)外観観察、(b)Fe、(c)Mg、(d)Al

#### (5) 接合面積におよぼす溶接条件の影響

前節の結果をもとに、界面破断した試験片のSPCC側破面に存在する付着物の領域を接合面積として測定した。また、界面破断以外の破断形態においては接合面積が測定できないため、引張せん断試験片の幅10mmと重ね代4mmとの積40mm<sup>2</sup>を、その試験片の接合面積として仮定した。各溶接条件における接合面積その平均値を図9に示す。図より、ローラ加圧力によらず溶接速度が増加すると接合面積が減少する傾向があることを確認した。また、ローラ加圧力の高い方が全体的に接合面積も大きいことが分かった。

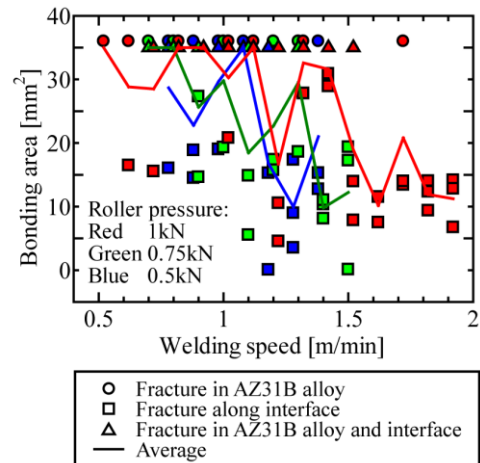


図9 溶接条件と接合面積との関係

また、得られたすべての試験片について、接合面積と引張せん断強さとの関係を図 10 に示す。なお、前述のように界面破断以外の破断形態においては接合面積が測定できないため、その場合の接合面積は 40mm<sup>2</sup> としてプロットした。まず、接合面積 40mm<sup>2</sup> にプロットした界面破断以外の引張せん断強さに着目すると、ローラ加圧力によらず引張せん断強さは 130N/mm 以上に集中しており、界面破断以外の試験片が全体的に高強度であることが分かる。一方、接合面積 40mm<sup>2</sup> 未満にプロットされている界面破断した試験片では、接合面積と引張せん断強さはおおむね比例の関係にあることが分かる。

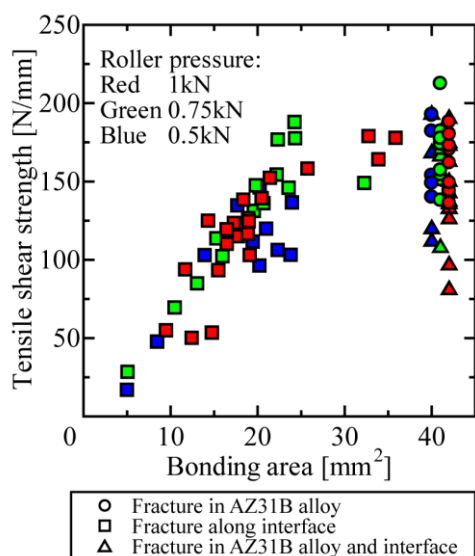


図 10 接合面積と引張せん断強さとの関係

(6) 接合メカニズムおよび高性能な継手を得るための最適条件

以上のことから、マグネシウム合金と鉄鋼とのレーザーロール溶接では、マグネシウム合金中の Al 元素と鋼中の Fe 元素との固溶体または金属間化合物による界面層が接合面において形成され、接合している可能性が示唆された。また、本継手において引張せん断強さを向上させるためには、接合面積を増加させる必要があることが分かった。よって、今回の実験条件において高い継手性能を得るためには、高ローラ加圧力かつ低溶接速度が望ましいと考えられる。

<引用文献>

1) 宮本健二, 中川成幸, 坂元宏規, 岩谷信吾, 北條慎治, 立花隆浩, 小椋智, 廣瀬明夫, 小林紘二郎: 抵抗スポット溶接による Mg 合金と鋼との異種材接合, 自動車技術会論文集, 43-6 (2012), 1413-1418.  
 2) T. Tachibana, S. Hojo, S. Iwatani, T. Ogura, S. Nakagawa, K. Miyamoto and A. Hirose: Effects of Zinc Insert and Al Content in Mg Alloy on the Bondability in Dissimilar Joints of Steel and Magnesium Alloys, Quarterly

Journal of the Japan Welding Society, 27-2 (2009), 183s-186s.

3) M. Wahba and S. Katayama: Laser Welding of AZ31B Magnesium Alloy to Zn-Coated Steel, Materials and Design, 35 (2011), 701-706.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① 尾崎仁志, 海道和貴, 齋藤健伍, 川上博士, 鈴木実平, 杓名宗春, レーザロール溶接法によるマグネシウム合金と低炭素鋼との異種金属接合, 溶接学会論文集, 査読有, 掲載確定
- ② 尾崎仁志, 海道和貴, 齋藤健伍, 川上博士, 鈴木実平, レーザロール溶接によるマグネシウム合金と低炭素鋼の異種金属接合(第 2 報), 溶接学会全国大会講演概要, 98 (2016), 6-7, 査読無
- ③ 海道和貴, 尾崎仁志, 川上博士, 鈴木実平, 杓名宗春, レーザロール溶接によるマグネシウム合金と低炭素鋼の異種金属接合, 溶接学会全国大会講演概要, 97 (2015), 332-333, 査読無

[学会発表] (計 3 件)

- ① 尾崎仁志, 海道和貴, 齋藤健伍, 川上博士, 鈴木実平, マグネシウム合金と低炭素鋼のレーザーロール溶接, 溶接学会第 82 回高エネルギービーム加工研究委員会, 東京八重洲ホール(東京都中央区), 2016 年 6 月 28 日
- ② 尾崎仁志, 海道和貴, 齋藤健伍, 川上博士, 鈴木実平, レーザロール溶接によるマグネシウム合金と低炭素鋼の異種金属接合(第 2 報), 溶接学会春季全国大会, ATC(アジア太平洋トレードセンター) (大阪府大阪市), 2016 年 4 月 12 日
- ③ 海道和貴, 尾崎仁志, 川上博士, 鈴木実平, 杓名宗春, レーザロール溶接によるマグネシウム合金と低炭素鋼の異種金属接合, 溶接学会秋季全国大会, 北海道科学大学(北海道札幌市), 2015 年 9 月 4 日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

尾崎 仁志 (OZAKI, Hitoshi)  
 三重大学・大学院工学研究科・助教  
 研究者番号: 90515660

(2) 研究協力者

杓名 宗春 (KUTSUNA, Muneharu)  
 海道 和貴 (KAIDO, Kazuki)  
 齋藤 健伍 (SAITO, Kengo)