

論文

アルミニウムおよびジルコニウムインサート材を用いた 純チタンと純マグネシウムとの抵抗溶接

青沼 昌幸*

Resistance Spot Welding of Titanium to Magnesium using Aluminum and Zirconium Insert Metals.
Masayuki Aonuma*

This paper deals with resistance spot weldability of pure titanium to pure magnesium plates using aluminum and zirconium insert metals. Materials used in resistance spot welding were a 0.8mm thick magnesium plate and a 0.6mm thick titanium plate. The effect of an insert metal, which was put into the bonding interface, on the joint strength was examined. Tensile shear test and peel test were done at an as-welded condition. In Ti/Al/Mg joints using aluminum insert metal, the Al-Mg intermetallic compound layer was formed on the interface and the strength of these joints was remarkably low. In Ti/Zr/Mg joints using zirconium insert metal, the Ti-Zr intermediate layer was formed on the Ti/Zr interface and the joining area at Mg/Zr interface was larger than those of Ti/Mg direct joints under equal welding conditions. The intermetallic compound layer was not observed on the interface by a scanning electron microscope. Consequently the strength of Ti/Zr/Mg joints was much higher than those of Ti/Mg joints. This suggests that using zirconium insert metal was effective for increasing the joint strength.

キーワード：抵抗スポット溶接，純チタン，純マグネシウム，異種金属接合，インサートメタル

Keywords：resistance spot welding, pure titanium, pure magnesium, dissimilar metal joining, insert metal

1. 緒言

近年，構造物の軽量化を目的としたチタン合金，マグネシウム合金などの高比強度金属材料の実用化が進んでおり，高比強度金属材料の異種金属間の接合が望まれている。しかしチタン合金と異種金属との溶接法による接合は困難なことが多く，これまで摩擦圧接法など固相接合法の適用が多く検討されてきた⁽¹⁾⁻⁽³⁾。またマグネシウム合金と異種金属材料の接合については，アルミニウム合金との摩擦攪拌接合などが報告されているが，マグネシウム合金とチタン合金との溶接法による接合については報告が少なく，不明な点が多いのが現状である^{(4),(5)}。そこで本研究では，熔融状態で二相分離となり溶接が困難とされているチタンとマグネシウムとを，インサート材を用いて抵抗溶接法により接合し，チタンとマグネシウムの抵抗溶接部の接合強さに及ぼすインサート材の影響について検討を行った。

2. 実験方法

図1に本研究で用いた試験片の形状を示す。供試材には純チタン（以下Tiと表記）および純マグネシウム（以下Mgと表記）の圧延材を使用した。供試材はSiC紙による研磨を行

って酸化皮膜を除去した後，アセトン脱脂を行い実験に用いた。インサート材にはTiのろう付に用いられるAlおよびTi-Zr基ろうとして用いられるZrを用いた⁽⁶⁾。いずれも厚さは0.1mmとし，表裏ともアセトン脱脂を行ってから実験に用いた。抵抗溶接用電極にはクロム銅製のR型電極（12mm）

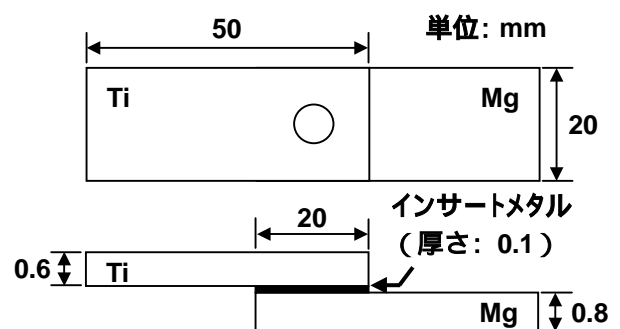


図1. 抵抗溶接試験片の形状

表1. 抵抗溶接条件

溶接電流	8.0 kA
通電時間	0.2~0.8s (50Hz)
電極加圧力	2.2kN
使用電極	12 クロム銅 R型

* 先端加工グループ

を用いた。

表1に溶接条件を示す。溶接機は単相交流式抵抗溶接機(最大10kA)を用いた。溶接条件は溶接電流8.0kA,電極加圧力2.2kNとし,通電時間を0.2s,0.4s,0.6sおよび0.8s(50Hz)とした。MgおよびAlは電気伝導度と熱伝導度が大きいため,抵抗溶接条件は一般に大電流・短時間が適するとされている⁷⁾。しかし,予備検討において9.0kA以上の電流値にてTiとMgとの直接接合を行ったところ,Mgの中散りが発生しやすく,接合部の作製が困難であった。そのため本研究では,中散りが発生しない最大溶接電流であった8.0kAに溶接電流を固定し,長通電時間を適用して接合部を作製した。

試料作製後,接合部断面の光学顕微鏡観察および走査型電子顕微鏡(SEM)による観察を行い,エネルギー分散型X線分光分析器(EDS)を用いて,接合状態について検討を行った。また,引張せん断試験およびピール試験により,直接接合部とインサート材を用いた接合部の静的強度について比較検討を行った。

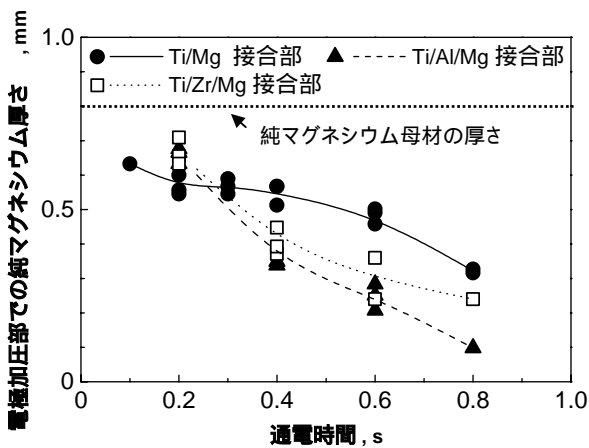


図2. 電極加圧部のマグネシウム板厚と通电時間との関係(溶接電流 8.0kA)

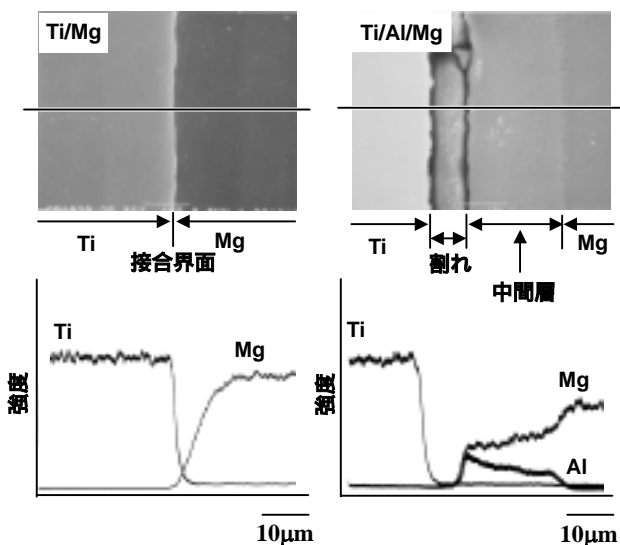


図3. 接合部断面のSEM像およびEDSによる元素線分析結果(Ti/Mg接合部およびTi/Al/Mg接合部)

3. 結果および考察

3.1 接合界面の形成に及ぼすインサート材の影響

図2に接合後のMg板厚と通电時間の関係を示す。全ての接合部において通电時間の増加によりMgの板厚は減少し,特にインサート材を用いた場合には,直接接合部(以下,Ti/Mg接合部と表記)と比較して,板厚の減少が顕著となった。これはインサート材を用いることで電気抵抗が増加し,発生するジュール熱量が増加するためにMgが軟化しやすくなり,加圧力による変形量が増加したためと考えられる。また,Zrをインサート材とした接合部(以下,Ti/Zr/Mg接合部と表記)では,同じ通电時間でのTi/Mg接合部と比較して,Mg側のナゲット径が増加しているのが,断面組織観察により認められた。このことから,Ti/Zr/Mg接合部では,コロナボンドを含む継手全体の接合面積が,Ti/Mg接合部と比較して増加しているものと考えられる。

図3に通電時間0.4sでのTi/Mg接合部およびAlインサート材を用いた接合部(以下,Ti/Al/Mg接合部と表記)断面のSEM像および元素線分析結果を示す。Ti/Mg接合部ではTiとMgが分かれた直線的な接合界面となり,SEM観察およびEDSによる元素線分析からは,TiとMgの中間層は認められなかった。Ti/Al/Mg接合部では,MgとAlとの接合界面において中間層が認められ,元素線分析を行った結果,この層からはAlとMgのみが検出された。また,この中間層とTiとの界面では割れを生じているのが認められた。TiとAlとの抵抗溶接においてTi-Al系金属間化合物が生成したとの報告があるが,本研究ではAl-Mg系の金属間化合物を含むと考えられる

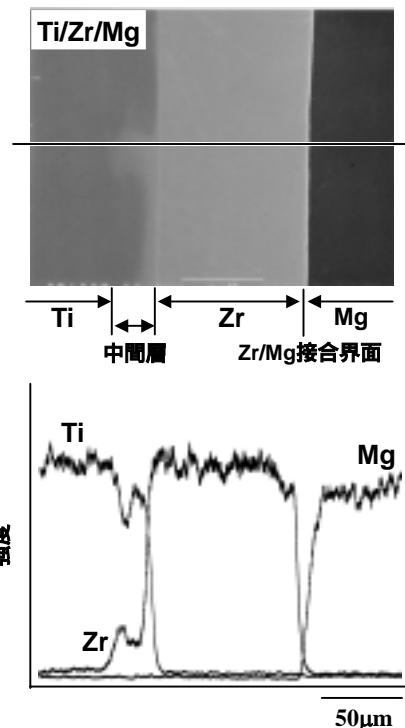


図4. 接合部断面のSEM像およびEDSによる元素線分析結果(Ti/Zr/Mg接合部)

中間層のみが認められ，この中間層からはTiが検出されなかった⁽⁸⁾。これはMgとAlが溶融する温度に上昇しても，融点が高いTiとの反応が十分に生じずに，AlとMgが優先的に反応したためと考えられ，通電時間を0.8sまで増加した接合部でも，Tiを含む中間層はSEMによる断面観察からは認められなかった。これらのことから，Ti/Al/Mg接合部ではTi-Al系金属間化合物よりも，Tiを含まないAl₁₂Mg₁₇あるいはAl₃Mg₂などのAl-Mg系金属間化合物が生成しやすく，溶接時の冷却過程において割れを生じやすいと考えられる。

図4にTi/Zr/Mg接合部の断面のSEM像および元素線分析結果を示す。Zrをインサート材とした場合では，TiとZrとの接合界面全体で中間層が認められ，その厚さは最大で約20μmとなった。二元系平衡状態図より，高温状態においてTiとZrは固溶体を生成するとされており，この中間層はTiとZrとの固溶体と推測され，脆弱な金属間化合物が生成していないために接合状態は良好であると考えられる⁽⁹⁾。一方，ZrとMgとの接合界面においては，明確な中間層は認められなかった。

図5に通電時間0.4～0.8sにおけるTi/Zr/Mg接合部断面のSEM像を示す。通電時間を0.4s以上としたTi/Zr/Mg接合部において，Zrインサート材の割れによる間隙が生じており，その間隙にはMgが進入して凝固しているのが確認された。そのため接合界面は直線的ではない噛合界面となっており，この現象は通電時間の増加とともに顕著となった。また，Zrインサート材に生じた割れの幅はMg側で広く，これらの割れの形状から，割れの起点はMg側と推測される。以上の特徴から，Mgの熱膨張や電極での加圧による板面方向への変形にZr/Mgの接合界面が引きずられることにより，Zrインサート材に板面方向の応力を生じて，いわゆるモードの破壊を生じたと推測される。溶接通電時には，ZrとMgとの界面に存在するMgが溶融あるいは半溶融状態となっており，これらのMgがZrインサート材の割れに進入して，通電終了後に凝固するものと考えられる。そのため，溶接終了後には噛合界面を形成し，直線的な接合界面となったTi/Mg

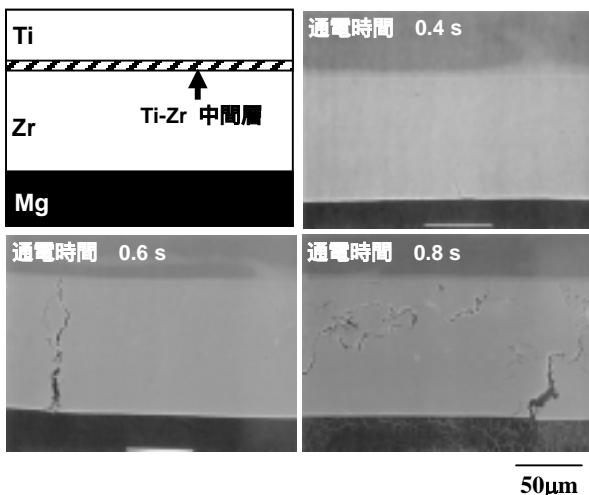


図5. 各通電時間におけるZrインサート材を用いた接合部断面のSEM像

接合部と比較して，接合面積は増加すると考えられる。これらのことからTi/Zr/Mg接合部では，Zrインサート材の挿入による発生熱量の増加によって，Ti/Mg接合部と比較して接合面積が増加するとともに，Zrインサート材の割れにMgが進入して凝固することで噛合界面を形成し，更に接合面積が増加すると考えられる。

3.2 接合部の静的強度に及ぼすインサート材の影響

表2に，接合部の引張せん断試験における破断位置を示す。破断位置は各接合界面で剥離したものを界面破断とし，ナゲット周辺で破壊しているものをプラグ破断として分類した。ここで示すプラグ破断とは全てMgでの破断である。Ti/Mg接合部は通電時間0.2sで界面破断となったが，0.4s以上ではプラグ破断となった。またTi/Al/Mg接合部は，通電時間0.2s～0.6sでは，金属間化合物と考えられるMgとAlとの中間層あるいは中間層とTiとの接合界面で破断したが，通電時間を0.8sと増加した場合にはプラグ破断となった。通電時間を0.8sとした場合には，Alインサート材と中間層は，加圧によって接合界面から排出されており，接合界面はTi/Mgとの直接接合部と同様にTiとMgが直接接触する直線的な界面となった。一方，Ti/Zr/Mg接合部は，通電時間0.2sで界面破断，0.4s以上ではプラグ破断となり，破断位置はTi/Mg接合部と同様であった。

図6に接合部1点あたりの引張せん断強さと通電時間との関係を示す。Ti/MgおよびTi/Zr/Mg接合部の引張せん断強さは通電時間0.4sで最大となった。Ti/Al/Mg接合部では，インサート材と中間層が排出された通電時間0.8sの接合部で，最大引張せん断強さ877Nを示したが，中間層が残留している接合部の引張せん断強さは800N以下の低い値を示した。Ti/Zr/Mg接合部の引張せん断強さは，全ての条件でTi/Mg接合部と比較して高い値となったが，通電時間を0.6s以上とすることにより，Mgの板厚の減少による引張せん断強さの低下が認められた。界面破断となった通電時間0.2sの接合部においても，Ti/Zr/Mg接合部の引張せん断強さはTi/Mg接合部よりも高いことから，溶融したMgがZrに対して凝着しやすいことなどが強度の増加要因と考えられるが，これらについては詳細な検討が必要である。以上のことから，入熱量が過剰となることでMgの板厚が減少して継手としての強度が低下するものの，Zrインサート材の適用が接合部の引張せん断強さの増加に効果的であることが判

表2. 引張せん断試験による接合部の破断位置

	通電時間, s			
	0.2	0.4	0.6	0.8
Ti/Mg 接合部	界面破断 (Ti/Mg)	プラグ破断 (Mg)	プラグ破断 (Mg)	プラグ破断 (Mg)
Ti/Al/Mg 接合部	界面破断 (Ti/Al)	界面破断 (Ti/Al)	界面破断 (Ti/Al)	プラグ破断 (Mg)
Ti/Zr/Mg 接合部	界面破断 (Zr/Mg)	プラグ破断 (Mg)	プラグ破断 (Mg)	プラグ破断 (Mg)

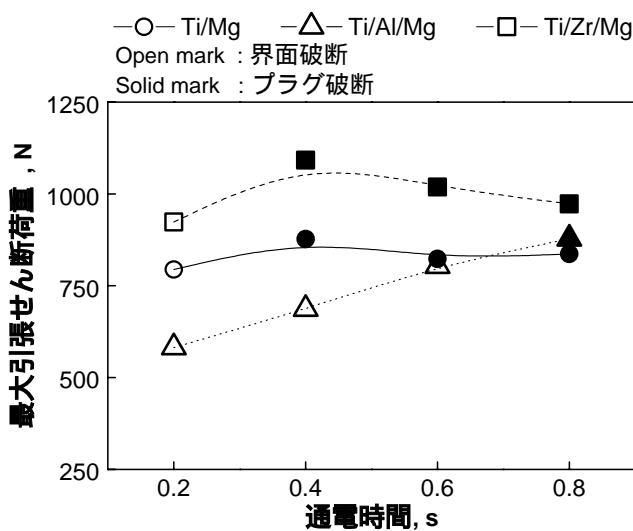


図6. 接合部1点あたりの引張せん断荷重と通电時間との関係

表3 ピール試験による接合部の破断位置

	通电時間, s			
	0.2	0.4	0.6	0.8
Ti/Mg 接合部	界面破断 (Ti / Mg)	界面破断 (Ti / Mg)	界面破断 (Ti / Mg)	界面破断 (Ti / Mg)
Ti/Al/Mg 接合部	界面破断 (Ti / Al)	界面破断 (Ti / Al)	界面破断 (Ti / Al)	プラグ破断 (Mg)
Ti/Zr/Mg 接合部	界面破断 (Zr / Mg)	プラグ破断 (Mg)	プラグ破断 (Mg)	プラグ破断 (Mg)

明した。

表3に各接合部のピール試験での破断位置を示す。Ti/Mg接合部は、引張せん断試験では、通电時間0.4s以上で全てプラグ破断となったが、ピール試験においては、全て接合界面での破断となり、引張せん断強さは高いものの、ピール強さは低いことが判明した。Ti/Al/Mg接合部は、Alインサート材および中間層が加圧力により排出された通电時間0.8sの条件でのみプラグ破断となったが、その他の条件では接合界面での破断となり、引張せん断強さだけでなく、ピール強さも低いことが判明した。一方、Ti/Zr/Mg接合部のピール試験による破断位置は、引張せん断試験での破断位置と同様であり、通电時間0.4s以上でプラグ破断となった。これは接合界面でのZrによる凝着の向上、Zrインサート材の割れにMgが進入して凝固することによる接合面積増加および噛合界面によるアンカー効果によって、剥離方向への強度が増加したためと考えられる。また、Zrインサート材の割れによる接合部強さの低下が懸念されたが、母材であるMgの強度が低いため、インサート材の割れが接合部の静的強度に与える影響よりも、ZrによるMgとの接合強さの増加の影響が大きく、Zrインサート材の割れによる接合強さの低下は認められなかったと推測される。以上のことから、Ti/Zr/Mg

接合部では、ZrによるMgの凝着促進、熱量の増加および噛合界面による接合面積増加とアンカー効果により、直接接合部と比較して静的強度が増加していると考えられ、Zrインサート材を用いて接合することで、引張せん断強さ、ピール強さともに優れた接合部を得られることが明らかとなった。

4. 結言

純Tiと純MgとをAlおよびZrインサート材を用いて抵抗溶接し、接合部へ及ぼすインサート材の影響について検討した結果、以下の結論を得た。

- (1) インサート材にAlを用いた場合、低融点のAlとMgとが脆弱な金属間化合物層を接合界面で生成して割れを生じ、直接接合部と比較して接合強さは低下する。
- (2) 高融点のZrをインサート材とした場合、Tiとの接合界面ではTiとZrとの中間層が生成する。ZrとMgとの接合界面では、加圧力によってZrインサート材に生じた割れにMgが進入し、噛合界面を形成する。
- (3) Zrをインサート材として用いることで、ZrとMgとの接合界面では、Mgの凝着向上とともに、接合面積の増加と噛合界面によるアンカー効果が得られる。その結果、直接接合部と比較して、引張せん断強さとピール強さが増加した接合部を得られる。

(平成19年6月21日受付、平成19年8月9日再受付)

文 献

- (1) 金裕哲,富士明良,T.H.North:「チタン/AISI 304L ステンレス鋼の摩擦圧接で生じる残留応力・ひずみ分布の特徴とそれらの生成機構」,溶接学会論文集,Vol.12, No.2, pp.243-248 (1994)
- (2) 加藤 数良, 時末 光 :「5052 アルミニウム合金 / 純チタン摩擦圧接継手の機械的性質に及ぼすインサートメタルの影響」, 軽金属, Vol.54, No.10, pp.430-435 (2004)
- (3) 諸住正太郎,武田裕正,菊地迪夫:「摩擦圧接および爆発圧接したアルミニウムとチタンの接合界面」, 軽金属, Vol.39, No.7, pp.501-506 (1989)
- (4) 平野聡,岡本和孝,土井昌之,岡村久宣,稲垣正寿,青野泰久:「摩擦攪拌接合によるマグネシウムとアルミニウム異材接合界面のミクロ組織」,溶接学会論文集,Vol.21, No.4, pp.539-545 (2003)
- (5) FRANK W.McBEE, Jr., JIMMY HENSON and L.R.BENSON: "PROBLEMS INVOLVED IN SPOT WELDING TITANIUM TO OTHER METALS", Welding Journal, Vol.35, No.10, pp.480-s-487-s (1956)
- (6) N.A.Dececco and John M.Parks: "The Brazing of Titanium", Welding Journal, Vol.32, No.11, pp. 1071-1081 (1953)
- (7) W.F.Hess, T.B.Cameron, D.J.Ashcraft and F.J.Winsor: "Optimum Welding Conditions and General Characteristics of Spot Welds in Magnesium Alloy Sheet", Welding Journal, Vol.26, No.5, pp. 268-s-282-s (1947)
- (8) 市川理衛, 大橋照男:「工業用純チタンと二,三のアルミニウム合金との異種金属抵抗溶接」,溶接学会論文集,Vol.48, No.10 pp. 763-769 (1979)
- (9) Max Hansen: Constitution of binary alloys, McGraw-Hill Book Company, Inc (1958).