研究論文

摩擦攪拌接合技術に関する研究

田辺　寛*　天城　和哉**　折笠　仁志**　岡田　英樹**

A Study on Friction Stir Welding of Magnisium Alloy

TANABE Hiroshi *, AMAKI Kazuya **, ORIKASA Hitoshi** and OKADA Hideki**

抄　　録

回転プローブを用いたAZ31Bマグネシウム合金の摩擦撹拌接合を行い，製作した継ぎ手の機械的性質やミクロ組織等について検討を行った。摩擦攪拌接合による継ぎ手は，継ぎ手強さが接合母材の82%で，母材強度には達しなかった。また，プローブにより撹拌された部位は，結晶粒の微細化が確認され，プローブによるせん断応力の付与とショルダからの摩擦熱で動的再結晶を起こしたものと推察された。

1. 緒　　言

近年，顕在化する環境問題から自動車や鉄道車両などの輸送機器の軽量化が求められている。また，輸送機器と同様にパソコンや携帯電話等の携帯用電気製品も，その製品としての性質上，常に軽量化が要求されている。製品の軽量化には，製品設計を見直すとともに，構造材料を比重の大きい材料から比重の小さい金属材料に代替することが効果を上げるため，実用金属中で最も比重の小さいマグネシウム合金が注目されている。

一方，接合分野においては，近年，アルミニウム合金やマグネシウム合金などの低融点の金属で，溶融させずに接合する固相接合法に関心が集まっている。固相接合法には，大別して，拡散接合法，摩擦圧接法，摩擦撹拌接合法，常温接合法（冷間圧接法），爆発圧接法（爆着法），ガス圧接法，超音波接合法，電磁圧接法，熱間圧接法[1)]などがある。中でも，摩擦撹拌接合（Friction Stir Welding, FSW）は，英国のThe Welding Institute（TWI）で発明され，特許出願された新しい固相接合法であり，継ぎ手の機械的性質に優れ，熱による歪みが少なく，接合時の欠陥も生じにくい接合法として，すでに鉄道車両や航空宇宙分野におけるロケットの燃料タンクの接合に用いられ，実用化が進んでいる。

＊　県央技術支援センター　加茂センター
＊＊　県央技術支援センター

そこで，本研究では，軽量化材料として注目されるマグネシウム合金への摩擦撹拌接合の適用と実用化への知見を得ることを目的に，技術の機能性について調査するとともに，その継ぎ手の引張強さ，硬さ等の機械的特性や金属組織の評価を行った。

2. 実験方法

2.1　供試材

供試材は，大阪富士工業㈱製AZ31B-Oマグネシウム合金で，板厚は2.0mmの圧延材である。材料のミクロ組織を図1に示すが，大小の

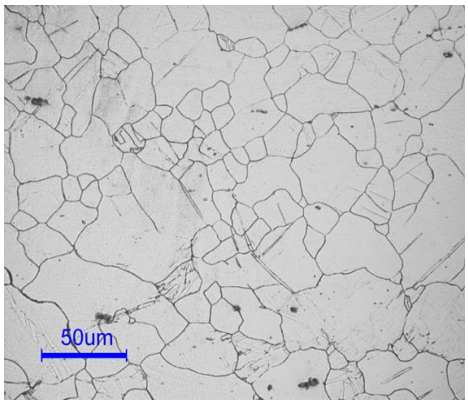

図1　母材のミクロ組織

表1　母材の化学組成　(mass%)

	Al	Zn	Mn	Fe	Si	Mg
AZ31-O	2.6	0.68	0.3	0.01	0.01	bal.

表 2　母材の機械的性質

	引張強さ（MPa)	0.2%耐力（MPa)	伸び（%）	ビッカース硬さ（HV）
AZ31B-O	229	150	6.9	63

等軸晶が混在する混合組織となっている。化学組成を表 1 に，機械的性質を表 2 に示す。

2.2　接合方法

接合には，万能フライス盤（㈱春日製作所 RNC-80）を使用し，フライス盤のテーブル上に突き合わせ治具を固定して，供試材の長さ方向が接合面となるようにした。回転工具は，焼き入れを施していない高速度工具鋼により作製し，ショルダ径 20mm，プローブ部は直径 3 mm×高さ 1.8mm のストレートプローブとした。なお，プローブ部にはネジは施されていない。

接合に供する試験片の寸法は，幅 47mm×長さ 140mm の矩形形状で，長さ方向が圧延方向と平行になるように切断した。接合する端面はフライス加工後に，＃500 のエメリー紙で研磨し，エタノール洗浄して接合に供している。接合端面の表面粗さは，Ra 1.04μm 程度である。

接合する際の工具回転数は 400rpm，800rpm，1200rpm，1600rpm，2000rpm と変化させ，接合速度は 100mm/min と一定した。また，ショルダー部の試験片への挿入量は 0.05mm で一定とし，工具挿入時は材料の予熱のため，ショルダーが試験片に接触した後に 30 秒間の保持時間を設けた。引張試験片は，フライス盤にて表裏を平坦にした後に接合方向と直角に試験片を切り出した。引張試験片の寸法は幅 10mm×長さ 94mm×厚さ 1.8mｍで，引張試験における試験速度は 0.5mm/min で行った。引張試験以外での継ぎ手の評価としては，外観の評価，光学顕微鏡による組織観察，引張試験片の破断面の SEM 観察，接合断面のビッカース硬さの測定を行った。実験前の接合治具の外観を図 2 に示す。

図 2　接合治具の外観

3.　実験結果

3.1　外観の評価

接合した継ぎ手の外観を図 3 に示す。工具回転数 400rpm では，ショルダから材料への入熱不足から溝状の欠陥が発生したが，800rpm から 2000rpm の間では継ぎ手外観に欠陥は見られなかった。図 3 において，工具回転方向は，時計回りの方向であるが，接合方向と工具回転方向が逆であるリトリーティングサイド（写真中の継ぎ手下側）でバリの発生が顕著となった。

3.2　引張試験の結果

摩擦撹拌接合を行ったマグネシウム合金の継ぎ手の引張試験結果を図 4 に示す。なお，工具回転数 400rpm の試験片は，前記の通り，溝状

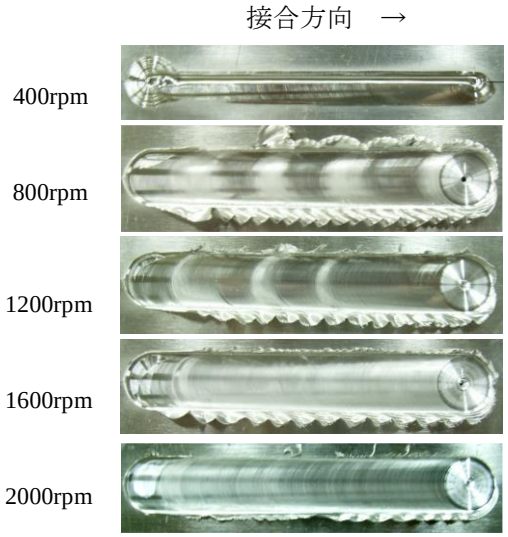

図 3　継ぎ手の外観

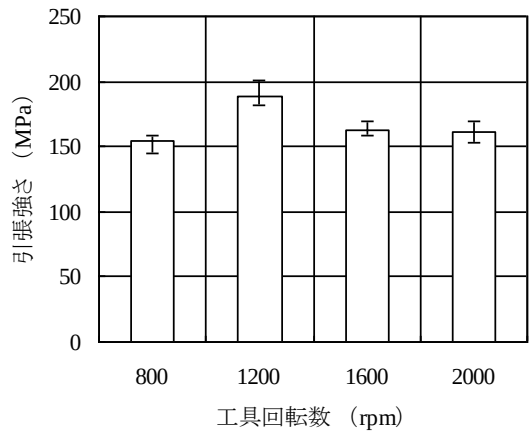

図 4　接合継ぎ手の引張試験の結果

の欠陥が発生しており，有効な試験結果を得ることができなかったため，図には表示していない。工具回転数が 800rpm から 1200rpm までは引張強さが増加する傾向にあるが，1200rpm から 1600rpm までは引張強さが減少し，1600rpm から 2000rpm ではほぼ横ばいとなる。また，最大引張強さは，工具回転数 1200rpm で発生し，平均で 188MPa，最大では 200MPa が得られた。平均の引張強さを基準とした場合，継ぎ手効率は 82％となり，母材の引張強さには及ばなかった。

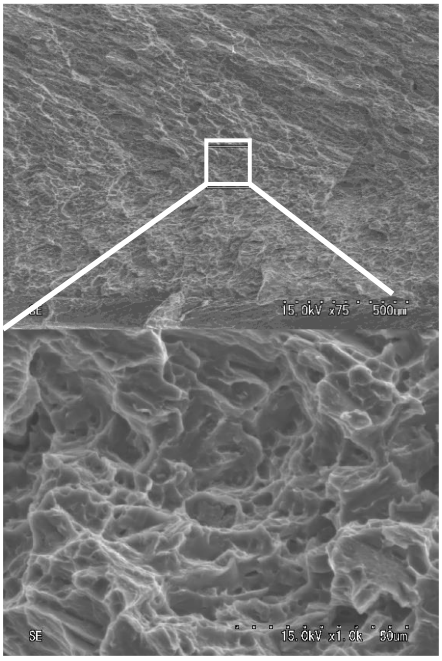

図 5　引張試験片の破断面の写真

3.3　引張試験片の破断面の SEM 観察

図 5 に工具回転数 1200rpm における引張試験片の破断面における SEM 写真を示す。写真上部に破断面の全体を示し，中段部の四角印を拡大したものを下部に表示した。下部拡大写真に示す様に，微細なディンプル形状が観察され，延性的な破断形態となっていることが分かる。

3.4　継ぎ手断面のミクロ組織

図 6 及び図 7 に継ぎ手中央部（攪拌部）と TMAZ（熱機械的影響部）におけるミクロ組織写真を示す。交差線分による結晶粒径の測定方法（直線交差線分法,JIS G 0552）により，マグネシウム合金の母材の結晶粒径は，約 25μm であるのに対し，図 6 で示される継ぎ手中央部（攪拌部）における平均結晶粒径は約 10μm と結晶粒の微細化が顕著に見られた。これは，回転攪拌によりマグネシウムの結晶粒にはせん断ひずみが付与され，それらがショルダからの熱

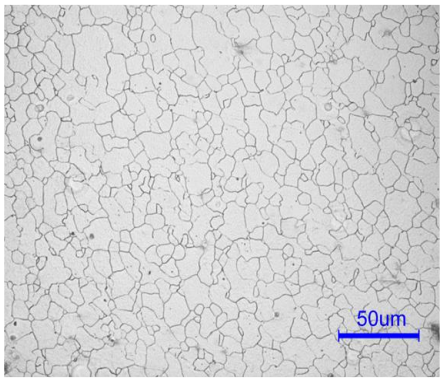

図 6　継ぎ手中央部（攪拌部）のミクロ組織

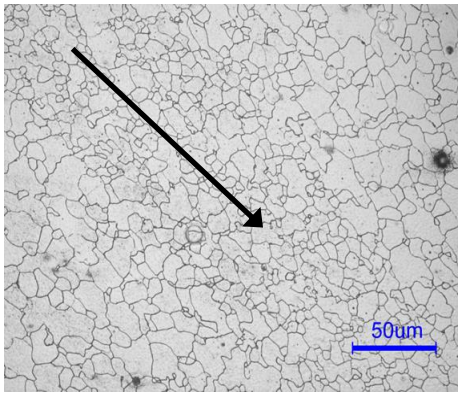

図 7　TMAZ 部（熱機械的影響部）のミクロ組織

で動的に再結晶した結果であると考えられた。また，図 7 の TMAZ 部におけるミクロ組織では，矢印の方向に向かって，塑性流動が生じているものと考えられるが，その部位を中心に結晶粒の微細化が起こっていることが分かる。

3.5 継ぎ手断面のビッカース硬さ

図 8 に継ぎ手断面のビッカース硬さの分布を示す。図中の測定位置において，0 は突き合わせ位置，マイナス表記はアドバンシングサイド，プラス表記はリトリーティングサイドを表している。図 8 から,マグネシウム合金母材のビッカース硬さは HV63 相当（表 2）であるのに対し，接合後の断面の硬さ値は，すべからく高くなっていることが分かる。これは前記のミクロ組織で示した通り，結晶粒の微細化の効果が現れたものと推察される。また，各工具回転数において，測定位置約-3.0mm の場所に硬さの低下が見られた。S.Lim ら [2)]によれば，アドバンシングサイド側の攪拌部と熱機械的影響部の境界で酸化物層様の接合欠陥が形成されるため，引張試験の破断伸びの値が急激に低下するとの指摘がある。この硬さの低下については，明らかな接合欠陥であるとの判断はできなかったが，引張試験の破断もほぼ同じ位置で生じていることから考えて，硬度低下が原因となり引張強さが母材強さに及ばなかったものと考えられる。

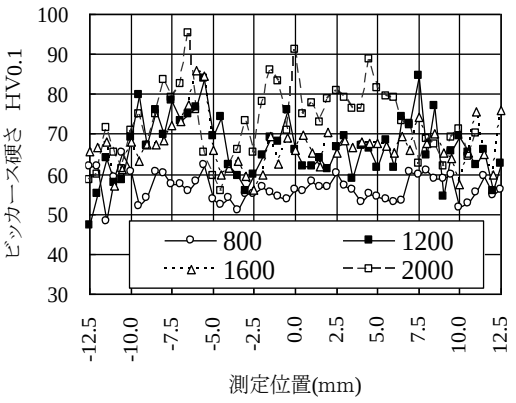

図 8　継ぎ手断面のビッカース硬さ

4. 結　　言

AZ31B マグネシウム合金の摩擦攪拌接合について以下の知見を得た。

(1) AZ31B マグネシウム合金の摩擦攪拌による接合は，容易に行える。

(2) 摩擦攪拌接合による継ぎ手の引張強さは，工具回転数 1200rpm で最高となり，最大引張強さは 200MPa となったが，母材の強さには及ばなかった。

(3) 引張試験における継ぎ手の破断面は，微細なディンプルパターンが見られ，延性モードの破壊形態を呈していた。

(4) 継ぎ手断面のミクロ組織では，攪拌部において顕著な結晶粒微細化が見られた。

参考文献

1) 溶接学会編,“溶接・接合便覧”, 丸善, 1990,465.

2) S.Lim,S.Kim,C.G.Lee,C.D.Yim and S.G.Kim, “Tensile behavior of friction-stir-welded AZ31-H24 Mg alloy”, Metallurgical and Materials Transactions, 36A,2005,1609-1612.