

マグネシウム合金の接合と接合材の加工技術に関する調査研究

行武 栄太郎* 上田 聖* 広瀬 純*

1. はじめに

摩擦攪拌接合技術^{1), 2)}は、主に非鉄金属材料（アルミニウム合金³⁾、マグネシウム合金⁴⁾、銅合金等）の接合技術として、自動車、高速車輛⁵⁾、高速船舶、航空宇宙産業の輸送機器など幅広い分野での応用が進んでいる。特に、アルミニウム合金に関する研究は盛んであり、既に新幹線の車体への適用が実現している。また、一般的に摩擦攪拌による接合は困難であるといわれている鉄鋼材料⁶⁾についての研究も進んでおり実用化が近い段階である。しかし、マグネシウム合金は、燃焼し易いというイメージからか実用化が鈍化している。

そこで、カルシウムを添加し燃焼しにくい難燃性マグネシウム合金⁷⁾が開発された。しかし、難燃性マグネシウム合金に関する加工条件（プレス加工、接合等）のデータは少なく、摩擦攪拌接合に関する研究報告はない。

本研究では、輸送機器等の軽量化を必要とする構造物への適応を検討するため、難燃性、圧延性に優れた市販材のAZX411 難燃性マグネシウム合金圧延材を用いて摩擦攪拌接合部の機械的性質を評価することを目的とした。

2. 実験方法

2.1 供試材

供試材には市販材（日本金属株式会社）の難燃性マグネシウム合金AZX411 の圧延材を用いた（幅 200mm、板厚 2.0mm、表面研磨済み）。表 1 にその化学組成を示す。図 1 には圧延面、板厚断面、圧延側面の組織観察写真を示す。どの面にもカルシウムの析出相が観察され、そのサイズは数 μm であり、板内に微細均一に分散している。また、平均結晶粒径は 25 μm であり、圧延方向に伸びている様子が観察された。

表 1 化学組成 (mass%)

	Al	Zn	Mn	Si	Ca	Mg
AZX411	3.85	0.99	0.2	0.02	1.1	Bal

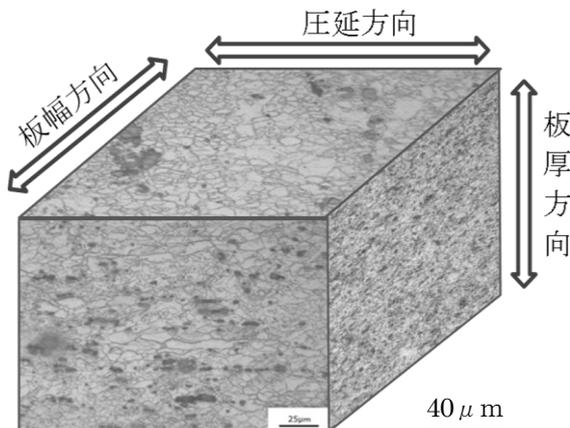


図 1 圧延材の組織観察 (AZX411)

2.2 摩擦攪拌接合

摩擦攪拌接合は、中心部に突起（プローブ）のある回転ツールを高速で回転させながら被加工材へ挿入し接合部に沿ってツールを移動させ接合する方法で、固相状態で接合が可能である。その結果、凝固割れがなく、熱ひずみも小さい特徴がある。摩擦攪拌接合の原理を図 2 に示す。ツール移動方向とツール回転方向が一致する側を AS、ツール回転方向が一致しない側を RS と呼ぶ。

図 3 に本研究に用いた摩擦攪拌接合装置（日東制機株式会社:FF-20IV-FSW）を示す。ツール材質はSKD61 とし、シオルダ径 $\phi 20\text{mm}$ 、シオルダ角 4° 、プローブ径 $\phi 8\text{mm}$ 、長さ 1.9mm の接合ツールを用いた。プローブには M8 のネジ加工を施した。

接合条件は、ツール回転数 1000rpm, 1500rpm, 2000rpm の 3 条件とし、ツール移動速度 5mm/s, 10mm/s, 50mm/s の 3 条件とした。ツール挿入後の予熱時間は 10sec, 前進角度約 3° とし、接合距離（長さ）200mm で摩擦攪拌接合を行った。試験環境は大気雰囲気とした。接合方向は圧延方向と平行（圧延方向同士を向い合せて突き合せたもの）とし、接合突き合せ面は接合直前にエメリー紙 #1000 で研磨した。

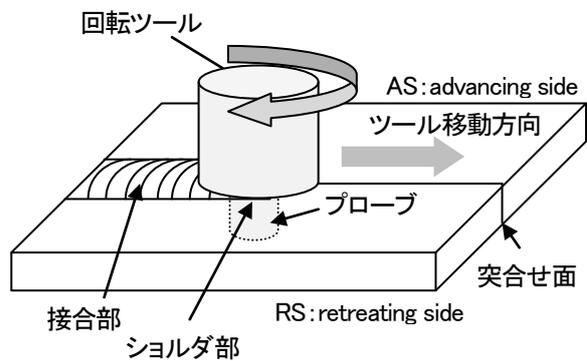


図 2 摩擦攪拌接合の原理



図 3 摩擦攪拌接合装置

*先端材料部門

2.3 組織観察, 硬さ試験, 引張り試験

接合部の機械的性質を評価するため, 組織観察, 硬さ試験, 引張り試験を行った。

硬さ試験は微小ビッカース硬さ試験機で, 接合突き合わせ面から AS, RS 方向に範囲 15mm, 間隔 1.0mm で接合方向に対して直角断面を測定面とした。

引張試験片は接合方向と直角方向に採取(図 4)し, 平行部 50mm, 幅 12.5mm とした。なお, 接合部幅は接合ツール径 ϕ 20mm と同様に 20mm であり, 接合部表面は研削せず接合したままの状態を評価した。

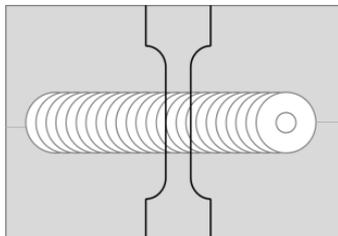


図 4 引張試験片採取方法

3. 実験結果

3.1 接合部評価

図 5 に回転数 1000rpm, 速度 5mm/s で約 200mm 突き合わせ接合した AZX411 合金接合部外観を示す。接合方向は下から上であり, ツール回転数は写真に向かって半時計回りである。接合部表面にはささくれ状のバリが観察されるが, 接合時に発生する連続的なリボン状バリは少ない。



接合部裏面にはマクロ的な接合欠陥は観察されず, 平滑な接合面であるが, 熱影響による材料表面の変色が観察された。

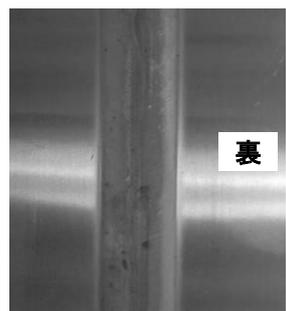


図 5 接合部外観 (1000rpm, 5mm/s)

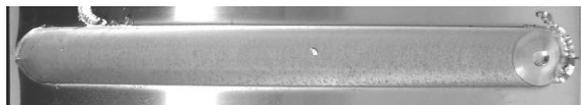
バリの発生も少なく良好な接合状態であるが, 接合強度は約 195MPa で, 母材強度 (約 280MPa) の約 70% 程度である。

接合速度を 50mm/s にすると, ツールとの接触面の肌荒れが著しくなるが, 継手効率は約 80% に向上した。これは, 接合速度が遅いと総入熱量が増加するため, 結晶組織の粗大化による強度低下が考えられる。また, 接合時のツールと材料との摩擦攪拌部温度は約 300°C~400°C であり, 本研究で用いているマグネシウム合金 (AZX411) の再結晶温度と同等であることから, ツールによる強加工 (摩擦攪拌による大きな塑性ひずみ) による動的な再結晶が積極的に発現すると考えられる。再結晶により微細な結晶粒が無数に発現することが予想されるが, 入熱量が多い (ツールの移動速度が遅い) と, 過入熱になり, 再結晶粒が大

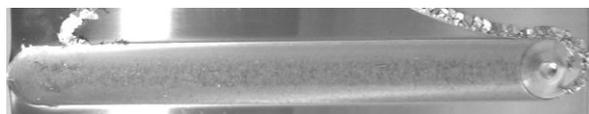
きく成長することも考えられるため, 回転数, 接合速度の最適化が重要である。

図 6 に接合速度の影響を評価するため, 回転数 1000rpm における接合速度の違いによる接合部表面状態を示す。

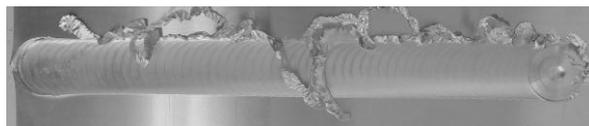
接合速度 5mm/s の場合, バリも少なくツール走行後の表面も良好であるが, 接合速度が速く (50mm/s) になると, 連続的にリボン状のバリの発生量が増加した。また, 表面は多少荒れる傾向がある。バリの発生は, ツール進行方向 (ツール回転方向: 反時計回り) に対して左側 (RS) に発生する。また, 摩擦攪拌接合において過入熱の場合よく観察される, 接合部表面のささくれが接合速度 5, 10 mm/s の接合条件で観察された。よって, 過入熱により組織が粗大化し接合強度が低下することが考えられる。



接合速度 : 5mm/s



接合速度 : 10mm/s



接合速度 : 50mm/s

図 6 接合部外観の接合速度の影響

図 7 に回転数 1000rpm での接合速度の違いによる継手効率の変化を示す (引張速度 : 5mm/min)。各接合条件下における継手効率は, 母材以下であったが, 接合速度が速くなると継手効率が向上し, 接合速度 50mm/s において母材の約 80% を示した。また, いずれの場合も摩擦攪拌部で破断した。5mm/s では過入熱により結晶粒が粗大化し接合強度が低下したと考えられる。

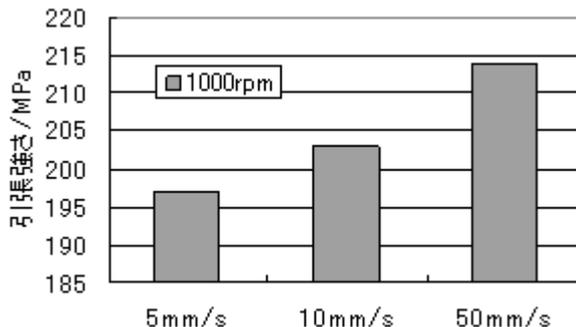


図 7 接合強度の接合速度の影響

図 8 に回転数の違いによる接合部表面状態 (接合速度 : 10 mm/s) の変化を示す。回転数が大きくなるにつれ接合部表面の荒れがひどくなり, 熱影響による裏面の変色が著しい。1000rpm では連続でリボン状のバリが発生したが, 1500rpm, 2000rpm では層状のバリが発生し, 接合部表面が熔融したような状態が観察された。また, 回

転数2000rpmでの接合部の板厚減少が著しい(約20%減)。

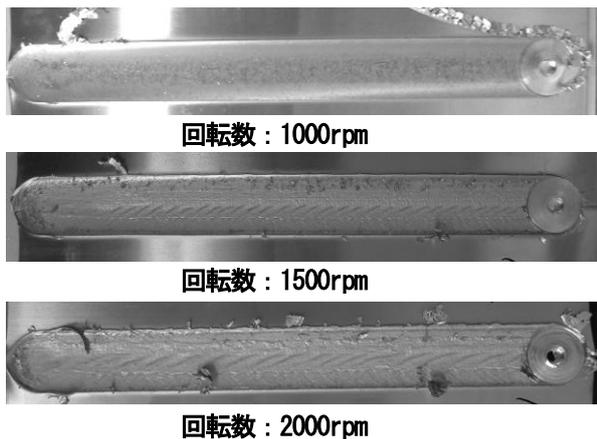


図 8 接合部外観のツール回転数の影響

図 9 に回転数 2000rpm で接合後のツール先端の外観写真を示す。材料との接触部(摩擦攪拌部)に多くの材料凝着が観察される。接合温度は400℃以下であることから一般的に材料の融点(約 650℃)以下である



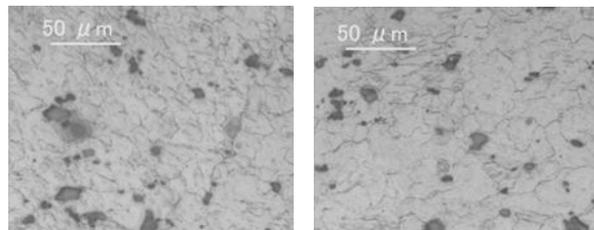
図 9 ツールへの凝着

ため、材料が溶解したとは考えられないが、摩擦攪拌接合時には2kN以上の材料への垂直方向への負荷もあり、高温、高圧、高ひずみにより部分的に摩擦攪拌部が半凝固状態である可能性があるため、EBSD(電子線後方散乱回折法)等により詳細調査を進める必要がある。今回の2000rpmでの接合試験では光学顕微鏡による組織観察で凝固組織は観察されなかった。

図 10 に回転数 1500rpm, 速度 50mm/min で AS(突き合せ面から幅方向に 10mm の箇所), RS(突き合せ面から幅方向に 10mm の箇所) 及び中心(付き合せ面:プローブ挿入部)の光学顕微鏡による組織観察写真を示す。接合部中心はプローブによる大きな熱エネルギーと攪拌によるせん断ひずみで、大きな塑性変形(塑性流動)が加えられているが、母材と同等の結晶粒径である平均粒径約 20 μm 以下の等軸の再結晶した結晶粒が観察された。また、添加剤であるカルシウムとアルミニウムとの化合物の粒子がマトリクス中に均一に分散しており、その平均粒径は約 3 μm である。動的再結晶が比較的容易に発現するマグネシウム合金では、接合中央部(摩擦攪拌部)は大きな塑性変形と熱により再結晶粒が母材より大きくなる傾向がある。しかし、難燃性マグネシウム合金 AZX411 では攪拌部結晶組織が大きく成長していない。これは、プローブの攪拌によりカルシウムとアルミニウムの化合物が微細に粉碎され均一にマトリクス中に分散したことに起因すると考えられる。

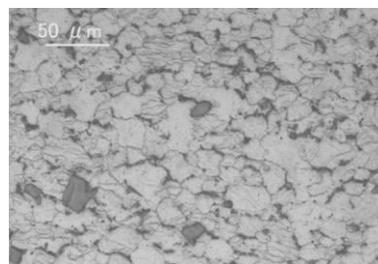
AS では等軸で平均粒径約 20 μm 以上の結晶組織が観察された。これは、ショルダ部による摩擦熱により結晶粒が再結晶したためであり、接合時の材料温度が 300℃以上になったと推察できる。

RS では AS と同様に結晶粒径が再結晶し接合前より成長しており、かつ AS と比べ平均粒径約 30 μm 以上と大きい。これは、RS ではツール回転方向とツール移動方向が対向するため、相対速度がツール移動速度より増加し、AS では移動方向とツール回転方向が同一のため、相対速度が減少する。よって、入熱量の多い RS の結晶組織が AS より大きく成長したと考えられる。



AS 部

RS 部



中央部

図 10 接合部組織写真 (AZX411)

3.2 接合部硬さ試験

図 11 に硬さ試験に用いた微小ビッカース硬さ試験機(株式会社ミットヨ:HM-220)を示す。

図 12 に回転数 1500rpm, 速度 50mm/s で接合した接合部直角断面の硬さ変化を示す。

摩擦攪拌部は AS, RS と比べ硬さが 10HV 程度上昇している。これは、図 10 の組織観察結果と一致しており、一般的に結晶粒径が小さいと硬さ、強度は向上する(ポールペッチの法則)ため、平均結晶粒径が小さい接合部中心が AS, RS と比べ硬さが向上したと考えられる。また、接合中心部硬さは母材より数 HV 高い値を示した。これは、図 10 でも示したように、微細均一に分散した析出物が起因していると考えられる。特に粒界に集まった化合物が影響していると考えられる。



図 11 硬さ試験機

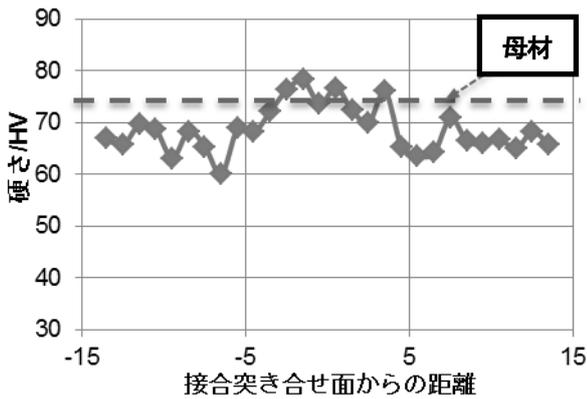


図 12 接合部の硬さ変化 (HV)

3.3 接合部引張試験

図 13 に回転数 1000~2000rpm, 速度 5~50mm/s での引張強さの関係を示す。引張速度は 5mm/min とし大気雰囲気・室温で接合方向と垂直方向に試験した。

回転数が大きくなると接合強度が低下する。しかし、接合速度が大きくなると接合強度が向上する。ツール回転数 1500rpm, 接合速度 50mm/s で最大強度 230MPa を示し、継手効率約 80% を実現した。さらに、接合部の硬さ試験結果から接合部硬さが母材以上に向上することが確認されており、継手効率 100% 以上が期待できる。しかし、硬さと強度の関係では一般的には硬さが向上すると強度も向上するが、今回の結果ではその逆である。これは、摩擦攪拌接合内部の外観からでは確認できない微細な欠陥が起因していると考えられるため、今後内部欠陥の形状及び分布観察を行いたい。また、結晶粒界に分散している析出したカルシウム析出物が接合強度に与える影響についても検討したい。

数枚の試験片からは、初期亀裂の発生が裏側の突き合せ部より確認された。これは、接合欠陥による破壊現象である。安定した接合条件を確立するため、接合方法(治具、取り付け方法等)の検討が必要である。

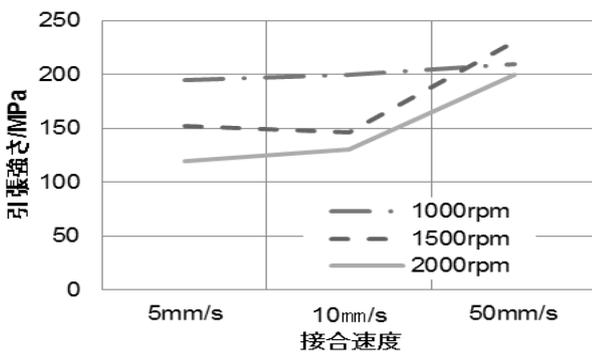


図 13 接合部引張強度 (AZX411)

図 14 に接合後(接合条件:回転数 1000rpm, 速度 50mm/s)の試験片を、温間 (150°C, 200°C) で引張試験を行った結果を示す。図 15 に 200°C での引張試験後の試験片外観写真を示す。温間引張試験では摩擦攪拌接合部ではなく母材部で破断した。これは摩擦攪拌接合部の温間特性が良好であることを示唆しており、図 10 で観察されるように、粒界に分散したカルシウムの析出物が温間強度向上に寄与していると考えられる。

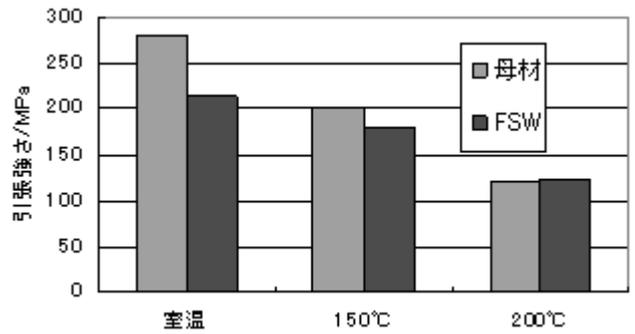


図 14 温間引張試験

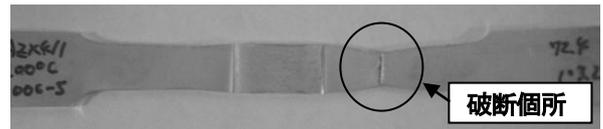


図 15 引張試験後の試験片形状

4. 結言

本研究では難燃性マグネシウム合金 AZX411 の摩擦攪拌接合と機械的特性について評価した。評価結果を以下に示す。

- (1) 摩擦攪拌接合により AZX411 マグネシウム合金圧延材の接合は可能である。
- (2) 接合条件回転数 1500rpm, 接合速度 50mm/s で継手効率約 80% を示した。
- (3) 摩擦攪拌接合部の攪拌部硬さは母材に比べ向上する。
- (4) 摩擦攪拌接合部のカルシウムとアルミニウムの化合物は、微細に粉碎されマトリクス中に均一に分散する。

参考文献

- 1) W. M. Thomas, E. D. Nicholas, J. C. Needhan, M. G. Murch, P. Temple-Smith, and C. J. Dawes: International Patent Application PCT/GB92/02203 and GB Patent Application 9125978.8, UK Patent Office, London, December 6, 1991.
- 2) C. J. Dawes and W. M. Thomas: Friction Stir Process Welds Aluminum Alloys; Welding Journal, 36 (1995).
- 3) 岡村久宣ほか: 軽金属, 50 (2000) 166-172
- 4) 加藤数良ほか: 軽金属溶接, 42 (2004) 130-139
- 5) 森久史, 野田雅史, 富永誉也: 軽金属 57 (2007) 506-510
- 6) 藤井英俊: 軽金属 57 (2007) 499-505
- 7) 島崎洋明, 坂本満ほか: 日本機械学会九州支部講演論文集 57 (2004) 7-8