



## マグネシウム合金の摩擦攪拌接合

### Friction Stir Welding of Magnesium Alloys



中田 一博\*  
Kazuhiro Nakata\*

#### 1. 緒言

摩擦攪拌接合法 (FSW) は、熔融溶接よりも遥かに低い温度での接合が可能な固相接合法としてその特徴を生かして、軟質金属であるアルミニウム合金の接合に実用化されており、最近では硬質、あるいは高強度材料である鉄鋼材料やチタンなどへの展開も視野に入っている<sup>1)</sup>。一方、マグネシウム合金材料は実用金属材料の中では最も軽い金属であり、アルミニウム合金とともに軽量構造用材料として大きな期待が掛けられている。しかし実用材料としてはまだその使用実績が少ないために、基本的な材料技術に関するデータが不足しており、溶接技術に関しても同様の現状である<sup>2)~4)</sup>。

本稿では、各種マグネシウム合金にFSWを適用した場合の基本的な現象と機械的性質などについて述べる。

#### 2. FSW 接合条件と継手形成

Fig. 1は各種マグネシウム合金に対して、FSW条件であるツール回転速度と接合(溶接)速度を変化させて接合を行い、その後、外観検査及びX線透過試験により接合欠陥発生の有無を検査して得られた、接合欠陥のない適正接合条件

範囲を示す。合金の板厚は2~5 mmであり、ツール形状は概ねショルダー径15 mm、プローブ径5あるいは6 mm (ねじ付き)、ツール材質はSKD61である。いずれも著者の研究室のFSW装置で得られたものである<sup>5)</sup>。接合条件範囲は回転速度が1000~1750 rpm (装置のmax.) の範囲では、主に接合速度で決まる傾向にあり、接合速度が臨界値を越えると入熱不足により温度上昇が十分ではなくなり、塑性流動がし難くなって攪拌部 (SZ) 内にトンネル状の欠陥やそれが表面にまで達した溝状欠陥が発生する。また、場合によってはプローブ破断に至る場合もある。またツール回転速度が不足した場合にも同様に入熱不足による欠陥が発生する。

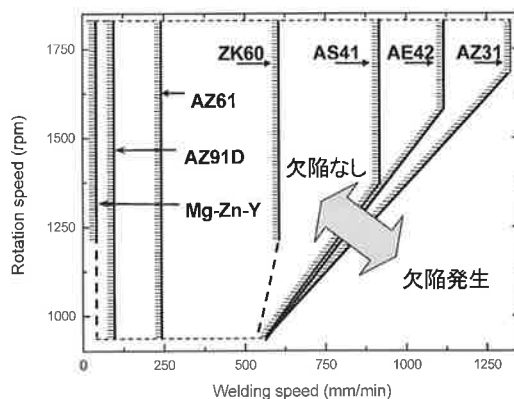


Fig. 1 各種マグネシウム合金の最適FSW接合条件域

\* 大阪大学 接合科学研究所  
Joining and Welding Research Institute, Osaka University  
原稿受付: 2008年6月5日

まずAZ系合金に注目するとAZ31及びAZ61は押出材であり、AZ91Dはダイカスト材であるが、臨界接合速度はAZ91D<AZ61<AZ31の順に大きくなり、特にAZ31では1000 mm/minを越える接合速度でも良好な接合が可能である。逆にAZ91Dは100~150 mm/min程度が限界である。このように臨界接合速度は合金中のアルミニウム量に大きく依存するが、これはアルミニウム量の増加とともにマグネシウム合金の高温変形抵抗が増加して塑性流動が困難になるためである。耐熱マグネシウム合金であるAS41とAE42はいずれもチクソモルディング材であるが、アルミニウム量が約4 mass%と比較的少なくこれらはAZ31に近い接合性を示している。Mg-Zn系合金であるZK60押出材の臨界接合速度は約600 mm/minであり、AZ系に比して亜鉛量が約6 mass%と多い割には大きな値を示す。

新しいマグネシウム合金であるカルシウム(Ca)が添加されたAMC602合金(押出材)は難燃性マグネシウム合金として注目されており、その臨界接合速度は約1000 mm/minであり、アルミニウム量が6 mass%と多いにも関わらず臨界接合速度は大きい。これは、カルシウムがアルミニウムと結合して化合物 $Al_2Ca$ を形成するために、マグネシウム合金固溶体中の高温変形抵抗に直接関係する固溶アルミニウム量が減少するためである。また高温強度を高めるための合金開発も進められており、その1例として鑄造-押出プロセスにより特殊な結晶構造を析出させたMg-

Zn-Y合金がある<sup>6)</sup>。その合金の臨界接合速度は、高温強度が高い故に当然ではあるが50 mm/min程度と遅い。一方、粉末焼結-押出の新しいRCPプロセスによる結晶粒微細化合金ではAZ31ベースで350 MPaの引張強度を有しており、FSWでは微細構造を維持した状態で約600 mm/minと早い臨界接合速度での接合が可能となっていることから<sup>7)</sup>、このような新規高強度マグネシウム合金材の接合法として注目される。

### 3. FSW 形成組織

Fig. 2に代表的なFSW形成組織例として、AMC602押出材のFSW継手横断面組織を示す。攪拌部SZは動的再結晶により微細等軸晶化しており、また母材中にみられた金属間化合物 $Al_2Ca$ は微細に分散していた。また狭い領域ではあるがHAZ及びTMAZがSZと母材との間で認められた。組織が $\alpha$ -Mg単相からなる合金(AZ31やAZ61など)でも同様な組織形態を示す。マグネシウム合金の特徴として、塑性流動に伴う最密六方晶構造特有の(0002)集合組織の形成がよく知られており、FSWにおいてもTMAZでは板表面に対して斜め方向の塑性流動の方向に(0002)集合組織が形成されやすく、機械的性質にも影響を及ぼす場合があり、攪拌部の形状制御も必要である。

FSWの特徴は鑄造材に対しても特段の注意を払うことなく展伸材と同様のプロセスで適用が可能なことである。マグネシウム合金は実用的にはダイカスト材やチクソモルディング材として用

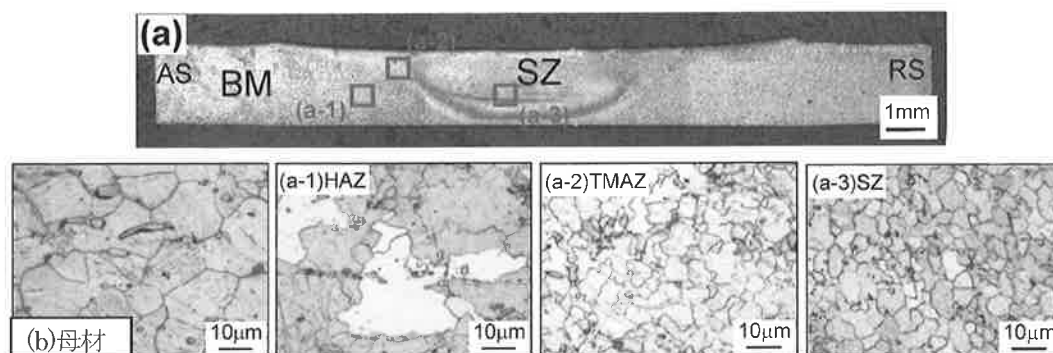


Fig. 2 難燃性マグネシウム合金AMC602のFSW継手断面におけるマイクロ組織

いられることが多く、Fig. 3 に示すように溶融溶接法では著しいポロシティの発生のために溶接はほとんど適用不可能である。このため、FSW はこれらの合金の適用拡大において重要な役割を果たすと期待される。Fig. 4 は AZ91D ダイカスト材の FSW 継手横断面のマクロ及びミクロ組織を示す。(a)中の攪拌 (SZ) 部(c)は典型的なオニオンリング模様を呈しており、ミクロ組織(b)に示した母材の铸造組織と粗大な共晶生成物  $\beta$  相 ( $Mg_{17}Al_{12}$ ) はほとんど消滅して、(c)に示すような微細な再結晶粒に変化する。また母材中の铸造欠陥であるマイクロポロシティや破断チル層も接合と同時に除去することが可能である<sup>8)</sup>。また攪拌部が微細結晶化することから、先に述べたように粉末焼結材などによる母材が有する微細結晶粒構造を維持した状態での接合も可能である。

Fig. 5 に示すように攪拌部の硬さは組織が  $\alpha$ -Mg 単相からなる AZ31 などの合金では母材に比してわずかに増加する程度であるが、母材中に金属間化合物や共晶生成物が存在する AZ91D などの 2 相合金では硬さの増加はより大きくなる傾向にある。これは Fig. 4 に示したように、攪拌部の結晶粒径が微細化し、いわゆるホール・ペッチ則により耐力が増加し、硬さも増加することと、

$\beta$  相が分解して固溶アルミニウム量が増加することによる耐力・硬さ増加との相乗効果と考えられる。

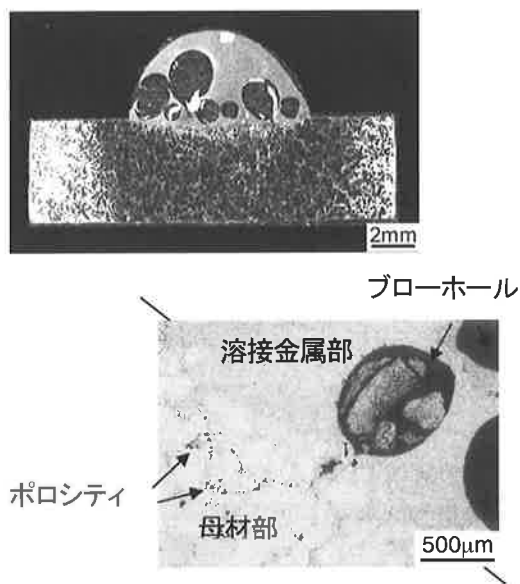


Fig. 3 AZ91D ダイカスト材の MIG 溶接部におけるブローホール発生状況；母材中のポロシティ内の残留ガスが溶接金属部に噴出してブローホールを形成する

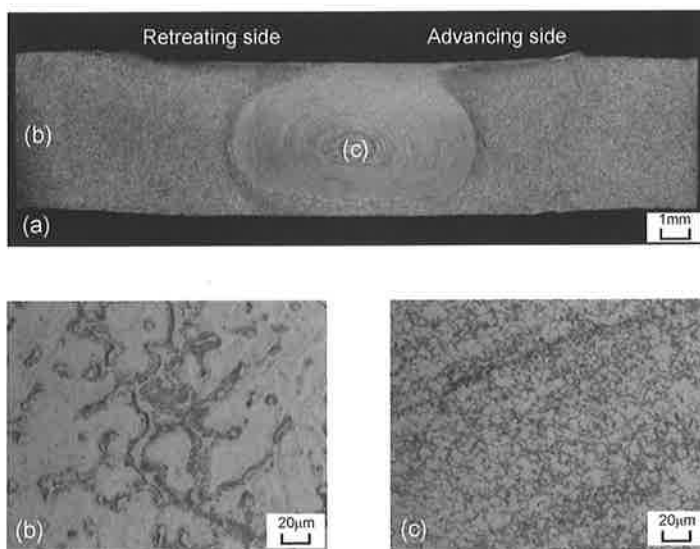


Fig. 4 AZ91D ダイカスト材の FSW 継手断面の (a) マクロ組織、(b) 母材の粗大な铸造組織とベータ相及び (c) 攪拌部の微細再結晶組織

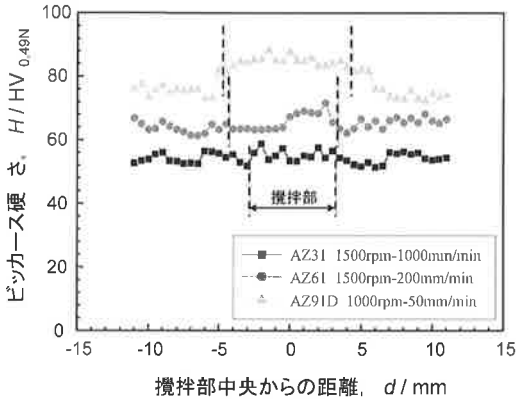


Fig. 5 AZ系マグネシウム合金のFSW継手断面における硬さ分布

#### 4. FSW 継手特性

Fig. 6 に難燃性マグネシウム合金 AMC602 合金の FSW 継手強度を溶融溶接法であるティグ、ミグ及びファイバーレーザ溶接継手強度（余盛付継手引張試）と比較して示す<sup>9)</sup>。アーク溶接では合金ワイヤを用いたが、いずれも割れや気孔などの溶接欠陥のない健全な溶接部が得られた。継手効率はいずれも 90～95% と高い値を示した。FSW では、展伸材の破断位置は TMAZ 近傍であり、また鋳造材では母材部破断を示す傾向にあった。継手伸びを溶融溶接継手と比較すると FSW 継手の伸びはより大きな値を示した。他の AZ 系合金や耐熱合金でも同様に良好な継手強度が得られている。また Fig. 7 は AZ 系合金攪拌部のシャルピー衝撃試験（室温）における吸収エネルギーを示すが、攪拌部の吸収エネルギー値は母材及びティグ溶接部よりも大きな値を示す傾向にある<sup>10)</sup>。

#### 5. 摩擦攪拌点接合

抵抗スポット溶接に代わる固相接合法として摩擦攪拌点接合法（Friction Spot Joining-FSJ, Friction Stir Spot Joining-FSSJ あるいは Spot Friction Welding-SFW などとも呼ばれる）が注目されており、既にアルミニウム合金に対して一部の自動車部品組み立て工程で実用化されている。電気抵抗スポット溶接に比して大幅な省エネルギー効果

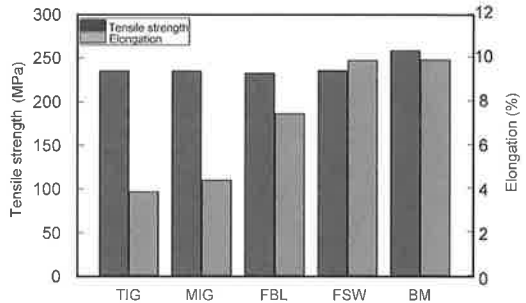


Fig. 6 難燃性マグネシウム合金 AMC602 の各種溶融溶接継手（ティグ溶接、ミグ溶接、ファイバーレーザ溶接（FBL））と FSW 継手の引張継手強度特性の比較；母材 BM

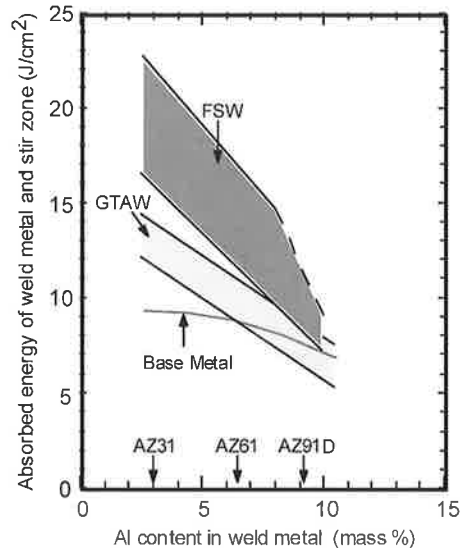


Fig. 7 AZ系マグネシウム合金のFSW攪拌部のシャルピー衝撃吸収エネルギー値（室温）の母材及びティグ溶接部（GTAW）との比較

と作業環境改善効果をもたらしている。このプロセスは、当然のことながらマグネシウム合金に対しても適用可能である。Fig. 8 は AZ31 シート材の重ね点接合継手の引張せん断強度と接合時間との関係を示したものであり<sup>11),12)</sup>、一般にある接合時間でピーク強度を示す。最も高い継手強度は、抵抗スポット溶接継手（RSW）と同等、あるいは若干高い値を示す。比較のために6000系ア

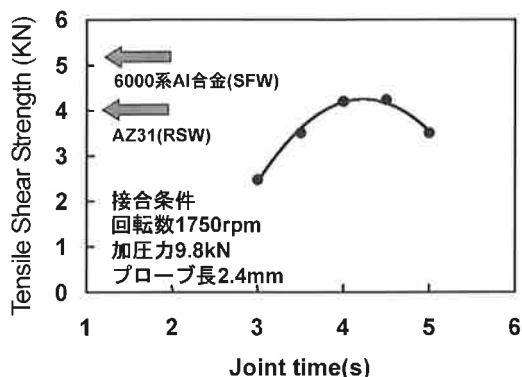


Fig. 8 AZ31 シート材の摩擦攪拌点接合継手 (SFW) の引張継手せん断強度と接合時間との関係及び抵抗スポット溶接継手 (RSW) との比較

ルミニウム合金の摩擦攪拌点接合継手 (SFW) の値を示しておく。

## 6. まとめ

マグネシウム合金に対して今後の適用が大いに期待されている代表的な固相接合法である摩擦攪拌接合法と、その点接合法について紹介した。詳細は参考文献を参照されたい。

## 参考文献

1) (社)溶接学会：摩擦攪拌接合—FSW のすべて—，

産報出版，(2006)。

- 2) 中田一博：マグネシウム合金の溶接・接合，軽金属溶接，39-12 (2001) 582-591。
- 3) 中田一博：マグネシウム合金の材料特性と溶接プロセス，溶接技術，53-5 (2005)，135-142。
- 4) 中田一博：連載講座，各種材料の FSW とその特徴と適用，溶接技術，55-10 (2007) 124-127。
- 5) L. Yu, K. Nakata: Weldability of Thix-molded AZ41 alloy with FSW, 溶接学会全国大会講演概要，82 (2008-4) 94-95。
- 6) Y. Kawamura, K. Hayashi, A. Inoue, T. Masamoo: Mater. Trans., 42 (2001), 1172-1176。
- 7) 日刊工業新聞，2007年4月26日，高強度マグネ合金の接合。
- 8) 金 永坤，藤井英俊，津村卓也，駒崎 徹，中田一博：マルチパス摩擦攪拌プロセスによる ADC12 ダイカスト材の組織と機械的特性の改善，鋳造工学，78-9 (2006) 451-456。
- 9) 坂井祐司，中田一博，津村卓也，上田光二，上山智之：難燃性マグネシウム合金の熔融溶接特性，溶接学会全国大会講演概要，81 (2007-9) 18-19。
- 10) K. Nakata, Y. G. Kim, M. Usho: Friction Stir Welding of Mg-Al-Zn Alloys, Transactions of JWRI, 31-2 (2002), 141-146。
- 11) 池上紘央，津村卓也，叶 福興，中田一博：Mg 合金の摩擦点接合における継手強度に及ぼすツール形状の影響，溶接学会全国大会講演概要，79 (2006-9) 84-85。
- 12) K. Nakata, H. Ikegami, T. Tsumura: Effect of Probe Thread on Friction Stir Spot Joint Strength of AZ31 Mg Alloy, Materials Science Forum, 580-582 (2008), 351-354。