

## マグネシウム合金の溶接

第2回

## 摩擦攪拌接合 (FSW) 編

中田 一博

大阪大学 接合科学研究所

## 1 はじめに

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、その特徴を生かし軟質金属であるアルミニウム (Al) 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 (Mg) 合金材料は実用金属材料の中でもっとも軽い金属であり、Al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Mg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とその装置

図1にFSWの原理を示す<sup>1)</sup>。棒端にプローブと呼ばれる突起部を有するツールを高速回転させながら、2枚の板材の突合せ開先部にプローブ先端を押付けると、摩擦発熱で加熱されて軟らかくなりプローブは開先内に挿入

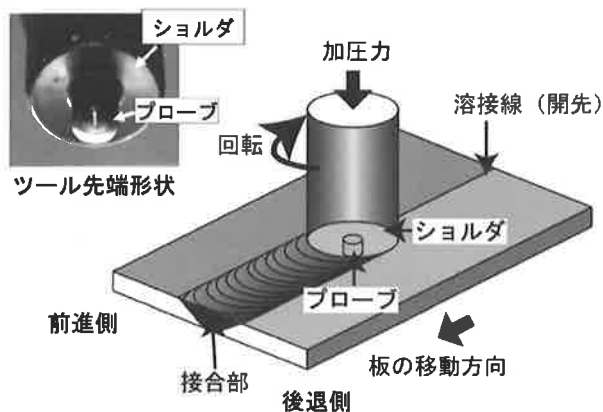


図1 摩擦攪拌接合FSWの原理図

される。プローブ長を板材の板厚相当としておくと、ショルダと呼ばれる棒端部が板材表面に接触した時に大きな発熱があり、温度が急速に高くなる。このタイミングでツールを開先線に沿って移動させると開先部の金属がプローブの周囲を塑性流動し、攪拌混合され、同時に拡散現象などにより一体化されて接合される。

図2に接合部の代表的な温度履歴を示すが、最高温度は400℃から500℃程度であり、かつ、わずか数十秒で100℃以下にまで自然に冷却され、接合が完了する<sup>5)</sup>。

## 3 FSW接合条件と継手形成

Mg合金は稠密六方晶の結晶構造をとるために、室温では塑性加工性が極めて悪いが、温間では加工性は比較的良くなる。FSWにおいても接合条件を適当な条件に設定することにより、合金によってはAl合金なみのFSW接合性を示すことが分かってきている。

図3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速度（試片移動速度）を変化させた場合の接合欠陥の無い適正接合条件範囲を示す。接合後に外観検査および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ものである。合金の板厚は

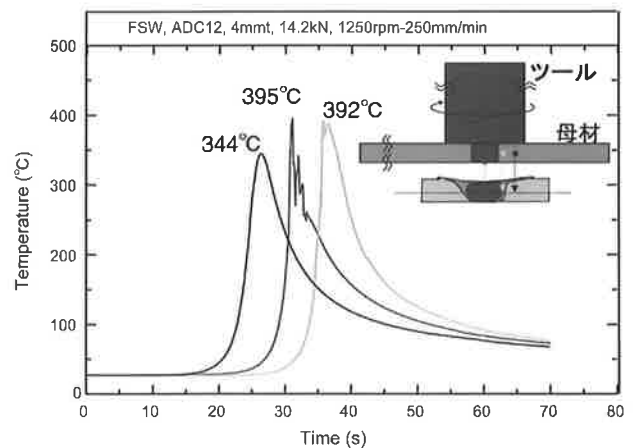


図2 FSW接合中の接合部の温度サイクル (Al合金の例)

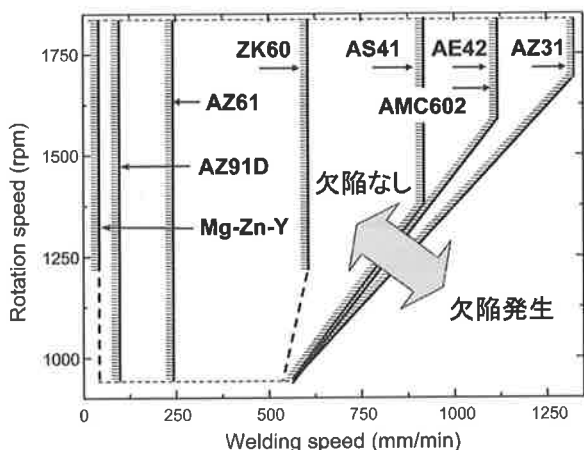


図3 各種Mg合金FSWの適正接合条件

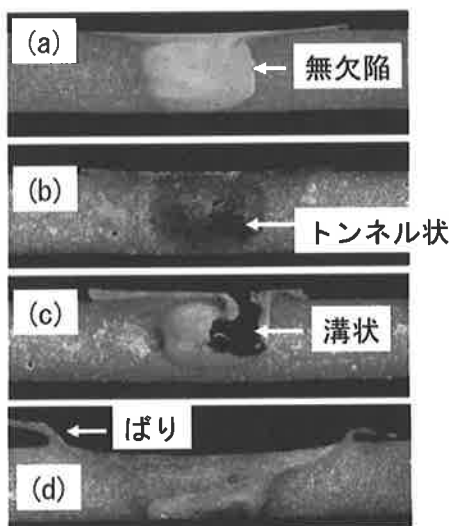


図4 FSW接合部断面における代表的な接合欠陥例 (Al合金ダイカスト材)

2～5 mmであり、ツール形状は概ねショルダー径15mm、プローブ径5あるいは6 mm (ねじ付き)、ツール材質は工具鋼SKD61である。いずれも著者の研究室の荷重制御型FSW装置で得られたものである。接合条件範囲は回転速度が1,000～1,750rpm (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。

一方、入熱過多の条件では大きなばりの発生や、プローブ先端と裏当板の接触によるプローブ欠損などがある。代表的な接合部断面組織例を図4に示す。これら接合欠陥の発生傾向と健全な接合部形成条件範囲を模式的

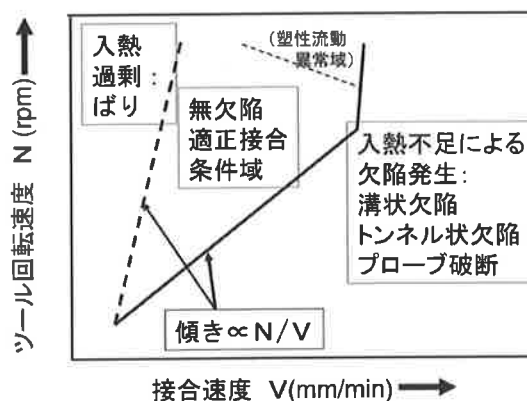


図5 FSWにおける接合欠陥発生と適正接合条件域の模式図

にまとめると図5のようになる。接合性を支配する入熱量 $Q$ は、主にツールショルダー部の摩擦発熱に依存すると仮定すると、基本的には次式で表される。すなわち、

$$Q \propto (4/3) \pi^2 (\mu PNR^3) / V \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $Q$ : 単位接合長当りの入熱量、 $\mu$ : 摩擦係数、 $P$ : ツール加圧力、 $N$ : ツール回転速度 (単位時間当たりのツール回転数)、 $V$ : 接合速度、 $R$ : ツールショルダー径

ここで、接合条件の変数を $N$ と $V$ のみとすれば、

$$Q \propto N/V \dots\dots\dots (2)$$

すなわち、単位接合長当りの入熱量 $Q$ はツール回転速度 $N$ を接合速度 $V$ で除した値に比例することになり、図5の各領域の境界線に相当する。

図3において、Mg合金の接合性を比較すると以下のようなようになる。

(1) AZ系Mg合金およびZK系Mg合金

まず、AZ系合金 (Mg-Al-Zn合金) に注目するとAl量がそれぞれ3%および6%のAZ31およびAZ61は押出材であり、Al量が9%の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、とくにAZ31では1,000mm/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100～150mm/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Al量に大きく依存するが、これはAl量の増加とともにMg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。また、Mg-Zn系合金であるZK60押出材の臨界接合速度は約600mm/minであり、AZ系に比して亜鉛 (Zn) 量が約6%と多い割には大きな値を示す。AM系合金 (Mg-Al-Mn合金) もAZ系合金と同様の傾向を示す。

(2) 難燃性Mg合金

新しいMg合金であるカルシウム (Ca) が約2%添加されたAMC602合金 (押出材) は難燃性Mg合金として

注目されており、その臨界接合速度は約1,000mm/minであり、Al量が6%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<sub>2</sub>Caを形成するために、Mg合金固溶体中の高温変形抵抗に直接関係する固溶Al量が減少するためである。

(3) 耐熱Mg合金

耐熱Mg合金であるAS41 (4% Al, 1% Si) とAE42 (4% Al, 2.5% RE (Ce+Nd)) はいずれも固液共存温度領域での射出成型法によるチクソモールディング材のデータであるが、Al量が約4%と比較的少なく、このためにこれら合金はAZ31に近い接合性を示している<sup>6),7)</sup>。

(4) 新規開発高強度Mg合金

Mg合金の高温強度を高めるための合金開発も進められており、その一例として鋳造-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>8)</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50mm/min程度と遅苦なるが良好な継手が得られている。また、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を基本組成とした合金でも350MPa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600mm/minと早い臨界接合速度での接合が可能となっている<sup>9)</sup>。

粉末焼結法や押出強加工法を用いたこれらの新規高強度Mg合金に対してアーク溶接やレーザー溶接などの熔融溶接法を適用すると、特徴的な組織が消滅して溶接部の強度は大きく低下する。このため、これらの新規高強度Mg合金の接合法としては固相接合法であるFSWが注目されることになる。

## 4 FSW形成組織

### 4.1 押出材

図6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<sub>2</sub>Caは微細に分散していた。また、狭い領域ではあるが熱影響部 (HAZ) およびFSWに特有

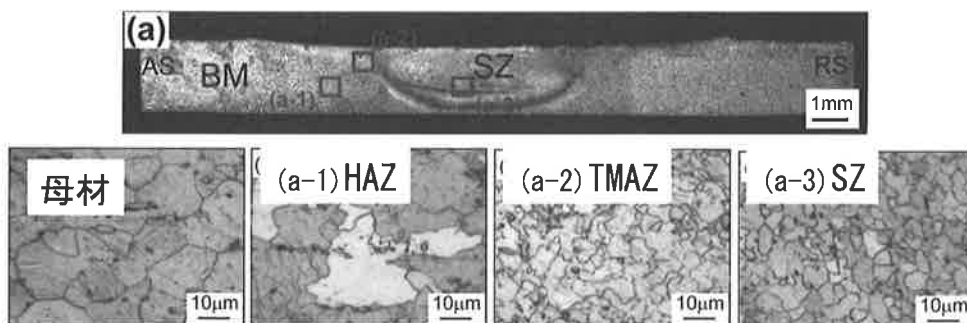
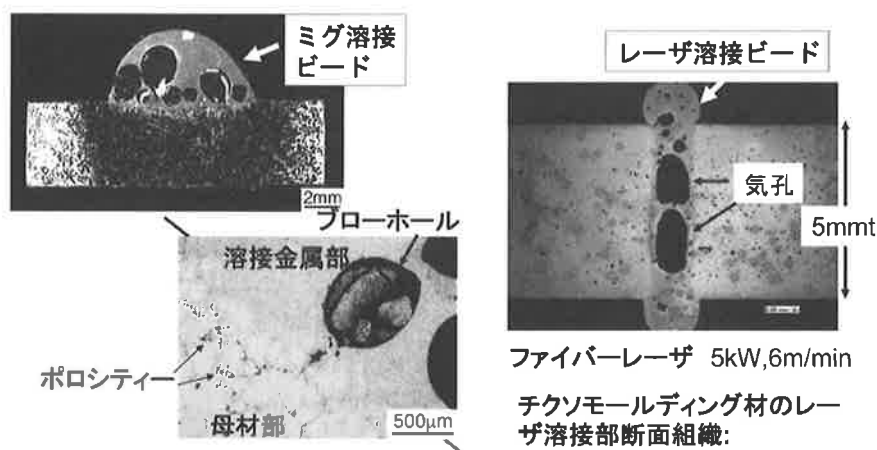


図6 難燃性Mg合金AMC602のFSW継手断面における形成組織



ダイカスト材ミグ溶接部断面組織:  
溶接ビード部にブローホール発生  
母材中の水素ガス突出により  
アークが不安定化

ファイバーレーザー 5kW,6m/min  
チクソモールディング材のレーザー溶接部断面組織:  
母材中の窒素, 水素ガスが気孔を形成する

図7 鋳造材の熔融溶接部におけるブローホールの発生

の熱影響と塑性加工の影響を同時に受けた熱加工影響部 (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。

また、Mg合金の特徴として、塑性流動にともな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沿って (0002) 集合組織が形成されやすく、引張せん断方向と一致する方向のために継手の機械的性質に悪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<sup>10)</sup>。

## 4.2 鋳造材

FSWの特徴は鋳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。Mg合金は実用的にはダイカスト材やチクソモールディング材として用いられることが多く、図7に示すように熔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<sup>11)</sup>。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。

図8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) に示した母材の鋳造組織と粗大な共晶生成物である  $\beta$  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、母材中の鋳造欠陥であるマイクロポロシティー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>5)</sup>。

## 4.3 粉末焼結材

また、攪拌部が微細結晶化することから、先に述べた

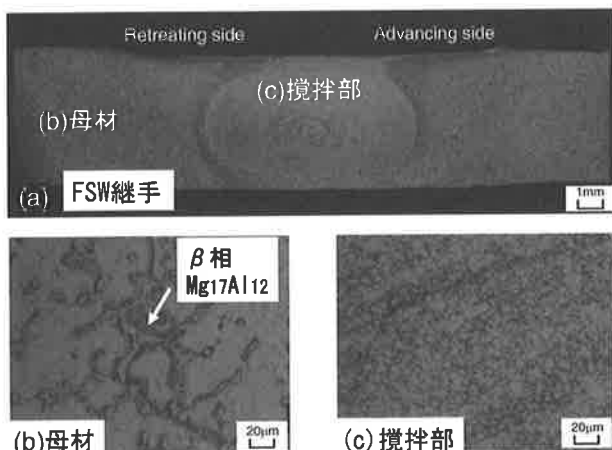
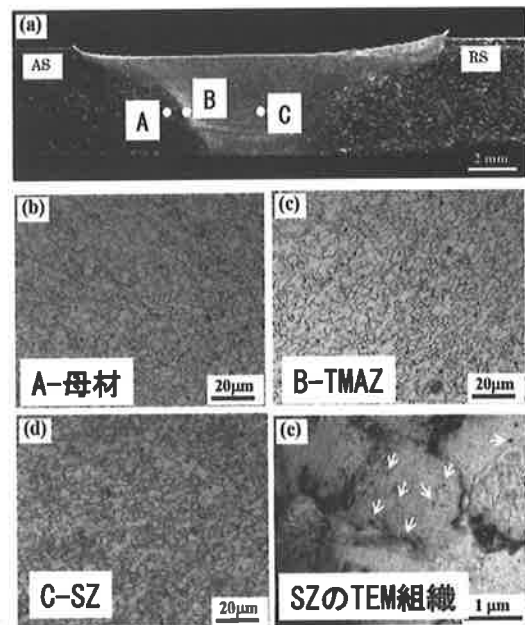


図8 AZ91Dダイカスト材のFSW継手断面組織

ように微細組織を有する粉末焼結-押出材RCP-AZ31材に対しても図9に示すように母材が有する微細結晶粒構造を接合部 (攪拌部) でも維持した状態での接合が可能である<sup>9)</sup>。

## 5 FSW継手特性

図10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<sup>12)</sup>。これは、図8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・



1500rpm, 500mm/min  
母材: 367MPa、伸び10%  
FSW 継手: 338MPa、伸び8%

図9 微細結晶粒高強度Mg合金RCP-AZ31材のFSW形成組織

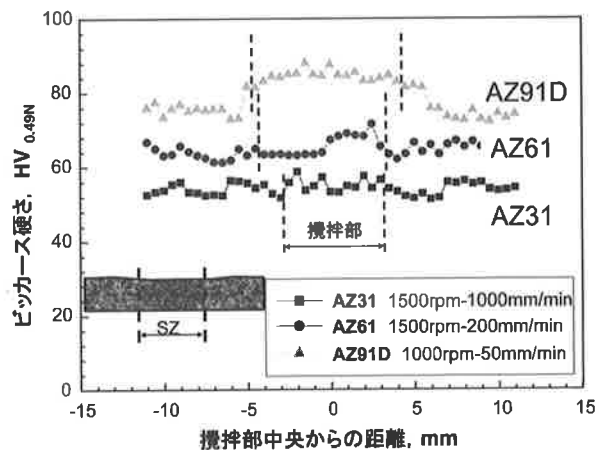


図10 AZ系Mg合金のFSW接合部断面硬度分布

表 Mg合金のFSW継手引張強度特性例

Mg合金	引張強さ (MPa)	伸び (%)	継手効率 (%)	備考
AZ31B	231	9.4	92	押出材 5 mmt
AZ61	269	9.6	87	押出材 5 mmt
AZ91D	250 (平均)	4	100	チクソモールド材 2 mmt
AMC602	235	10	94	押出材 2 mmt 難燃性Mg合金

ペッチ則により耐力が増加し、硬さも増加すること、第2相が分解して固溶Al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。

表にFSW継手強度の代表的な数値をまとめて示す。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。

図11はAZ91Dチクソモールディング材の母材、FSW継手及び攪拌部 (SZ) のみの引張強度と伸びを示す<sup>13)</sup>。攪拌部のみの強度は約340MPaを示し、図10の硬さ増加と同様の理由により母材強度約250MPaよりも著しく増加しており、鋳造材のFSW継手では一般に母材破断を呈することになる。

## 6 おわりに

Mg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 (FSW) を適用した結果について概説した。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

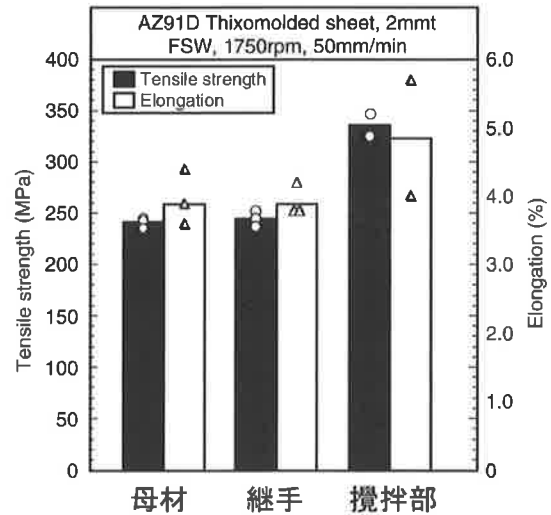


図11 FSW継手および攪拌部引張強度

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) 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。
- 6) L.Yu,K.Nakata：Weldability of Thixo-molded AS41 alloy with FSW，溶接学会全国大会講演概要，82 (2008-4) 94-95。
- 7) L.Yu,K.Nakata,J.S.Liao：Microstructural modification and mechanical property improvement in friction stir zone of thixo-molded AE42 Mg alloy，J. Alloys and Compound，480 (2009) 340-346。
- 8) Y.Kawamura,K.Hayashi,A.Inoue,T.Masamoo：Mater.Trans.,42 (2001)，1172-1176。
- 9) J.S.Liao,N.Yamamoto,K.Nakata：Effect of Dispersed Intermetallic Particles on Microstructural Evolution in the Friction Stir Weld of a Fine-Grained Magnesium Alloy, Metallurgical and Materials Transactions A, 40A (2009)，2212-2218。
- 10) 山本尚嗣，廖金孫，中田一博：微細結晶粒を持つMg-Al-Zn系Mg合金の摩擦攪拌接合継手強度に及ぼすツール形状の影響，日本金属学会誌，75 (2011)，91-96。
- 11) L.Yu,K.Nakata,J.Liao：Weld Porosity in fiber laser weld of thixomolded heat resistant Mg alloys，Science and Technology of Joining and Welding,14 (2009)，554-558。
- 12) K.Nakata,Y.G.Kim,M.Usho：Friction Stir Welding of Mg-Al-Zn Alloys，Transactions of JWRI, 31-2 (2002)，141-146。
- 13) 中田一博，居軒征吾，長野善隆，橋本武典，成願茂利，牛尾誠夫：AZ91Dマグネシウム合金チクソモールド薄板の摩擦攪拌接合性，軽金属，51 (2001)，528-533。