

各種材料のFSWの特徴と適用

第2回

マグネシウム合金および銅合金のFSW

中田 一博

大阪大学 接合科学研究所

1 はじめに

第1回連載講座¹⁾のAl合金のFSWに引き続き、本稿の第2回ではFSWの適用がAl合金に次いで比較的容易なマグネシウム (Mg) 合金と銅 (Cu) およびこれらの合金を取り上げ、そのFSWの特徴について紹介する。

2 Mg合金

2.1 各種Mg合金の適正FSW接合条件範囲

Mg合金は結晶構造が六方晶のために室温では塑性加工性がきわめて悪いが、温間では加工性は比較的良くなる。このため、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1²⁾に代表的なMg合金であるAZ31, AZ61およびAZ91DのFSW適正接合条件域を示す。いずれも板厚は5mmである。

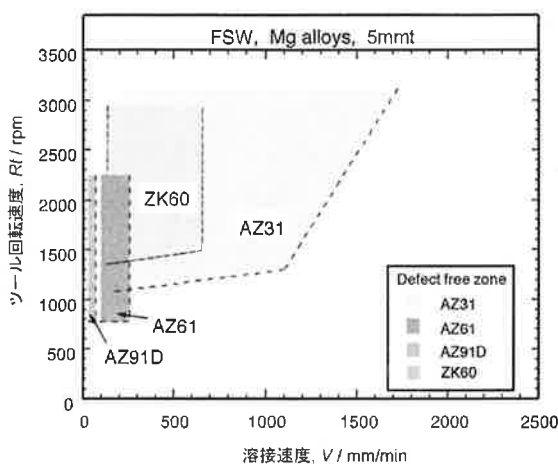


図1 AZ系Mg合金のFSW適正条件範囲

前2者は押出材、後者は鋳造材である。Alを主たる合金元素とするAZ系Mg合金の中ではAZ31は6000系Al合金と同等の良好な接合性を示す。しかし他の合金ではAl量の増加にともない接合性は急激に悪くなる。とくにAZ91Dでは接合速度は50~100mm/min程度の低速度に限定される。

この理由は、Mg合金の高温における塑性変形抵抗が固溶Al量に依存して大きくなるためである。したがってAl量が同程度のMg合金AM60もAZ61とほぼ同等となると考えられる。このような傾向はAl合金の接合性がMg量の増加とともに低下することと同様である。

また図1中にはMg合金ZK60の押出材 (板厚5mm) に対する結果³⁾も示しているが、適正FSW接合条件範囲は比較的広い。ZK60は溶接凝固割れ感受性が高いため溶融溶接は困難とされている⁴⁾が、FSWでは良好な継手が得られる。

さらに最近ではAM60やAZ91Dをベースとしてこれらに合金元素としてカルシウム (Ca) を添加した難燃性Mg合金が注目されている。これらの難燃性Mg合金もFSW接合が可能であり、適正FSW接合条件範囲はそれ

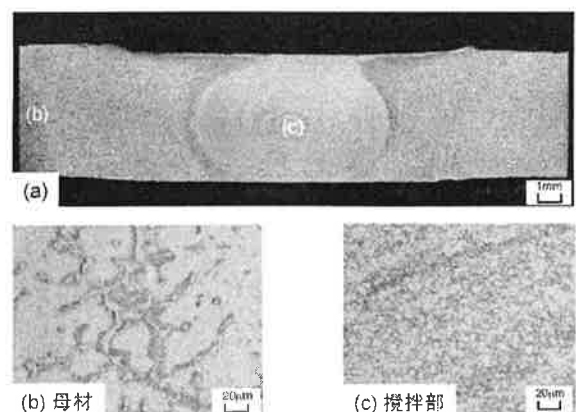


図2 AZ91D合金のFSW継手断面マイクロ組織

それぞれのベース合金よりもむしろ広がる傾向を示す⁵⁾。

また、さらに粉末焼結-押出プロセスによる超微細結晶粒を持つ高強度Mg合金に対しても良好なFSW継手が得られることが報告されている⁶⁾。

2.2 接合部形成組織と硬さ分布

Mg合金展伸材のFSW接合部の形成組織は基本的にはAl合金の場合と同様であり、攪拌部SZと熱加工影響部TMAZ、熱影響部HAZからなる。攪拌部は動的再結晶により微細等軸晶化する。Mg合金はこれまで実用的には鋳造材（ダイカスト材）が主として用いられてきたが、FSWはそれらの材料に対して有効な接合法である。図2はAZ91Dダイカスト材のFSW継手部の組織を示す。ダイカスト材のアーク溶接やレーザー溶接では多数の気孔が発生して溶接不可能となる⁴⁾が、FSWでは良好な継手が得られる。

また攪拌部では母材中の粗大な鋳造組織（粗大結晶や

金属間化合物 β -Mg₁₇Al₁₂相）が微細化され、とくに β 相は大部分が分解されて消滅する。このため攪拌部の機械的性質は母材部よりも大幅に改善される。

なお、六方晶金属では結晶面の底面すべり面である0001面が塑性流動方向に平行にそろって集合組織を形成する傾向を示すが、Mg合金のFSW継手においても攪拌部とTMAZの境界部近傍で同様の集合組織が形成される傾向が見られる。したがって継手断面における攪拌部の形状（楕円形や逆三角形など）により継手強度は影響を受けることを考慮する必要がある。

図3²⁾はAZ系Mg合金のFSW継手の硬さ分布を示す。攪拌部の結晶粒は微細化するために硬さは若干増加する。とくに合金量の多いAZ91Dでは硬さ増加の程度は大きい。これは結晶粒微細化以外に β 相が分解してAlがMg相中に再固溶することも関係する。このような硬さ分布と形成組織のために継手引張試験においてはHAZからTMAZにかけての部分破断部となる。

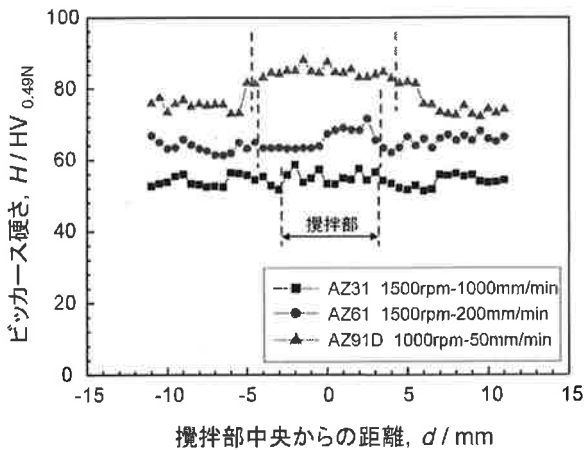


図3 AZ系Mg合金のFSW接合部断面硬さ分布

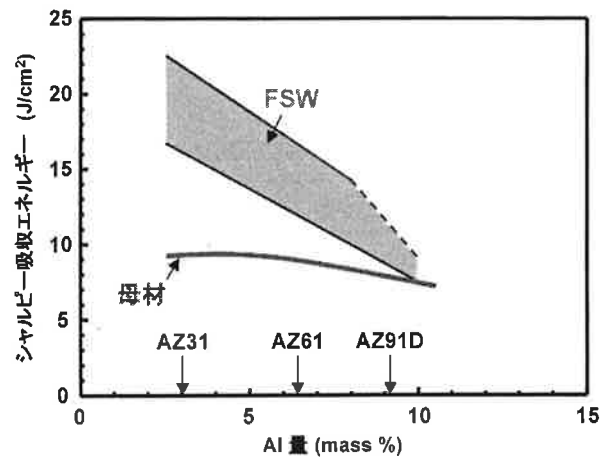


図4 AZ系Mg合金のFSW接合部のシャルピー衝撃値

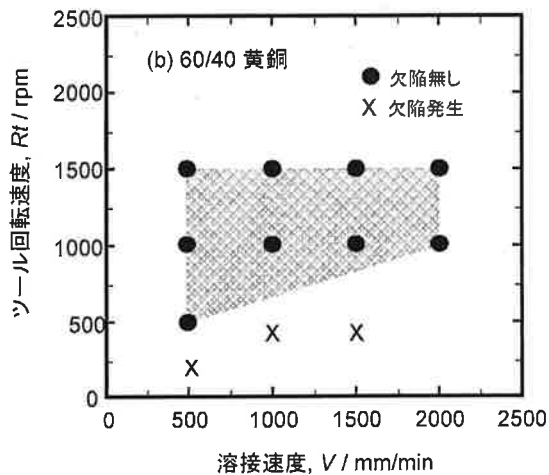
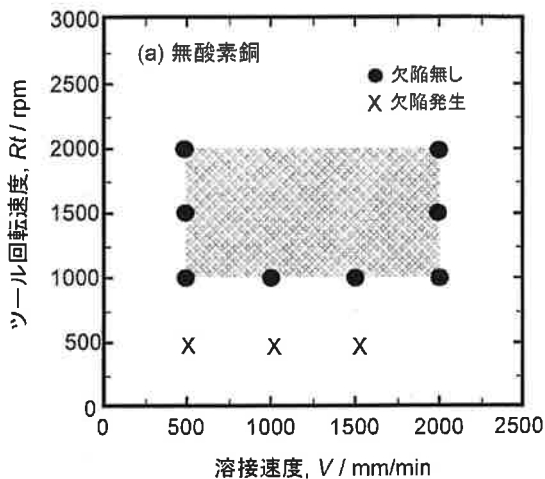


図5 無酸素銅および60/40黄銅のFSW適正条件範囲

2.3 機械的性質

代表的なFSW継手の引張特性を表1^{2),5),7)}に示す。継手効率は合金や接合条件により若干の違いはあるが、87%から100%であり、いずれも高い値を示す。

また、AZ系Mg合金の攪拌部の室温におけるシャルピー衝撃値を母材と比較して図4²⁾に、Al量をパラメータとして示す。FSW攪拌部の衝撃値は母材よりも高い値を示し、優れた靱性を示すことが分かる。

3 銅および銅合金

3.1 各種銅合金の適正接合条件範囲

残念ながらこれまで銅およびその合金の適正接合条件に関するまとまった研究報告は限られている。

図5⁸⁾に無酸素銅および60/40黄銅圧延材のFSW適正接合条件範囲(板厚2mm)を示す。ツールはSKD61である。

いずれも比較的広い接合領域範囲を示す。もちろん板厚が厚くなれば接合速度は遅くなり、板厚5mmの無酸

素銅では50mm/min程度である。また板厚50mmの極厚無酸素銅に対して接合速度80~100mm/minでの成功例があるが、ツールにはニッケル基超合金が用いられている⁹⁾。また高強度のアルミ青銅やキュプロニッケルなどに対しては鉄鋼製ツールは適用不可であり、耐熱高強度のツール(PCBNなど)が必要とされている。

3.2 接合部形成組織および機械的性質

図6⁸⁾は60/40黄銅のFSW接合部断面の組織である。攪拌部はいちじるしく微細化し、その結晶粒径は接合時の入熱が減少するにともない小さくなり、2~3μmの微細結晶粒になる。このため攪拌部の硬さは図7⁸⁾に示すように母材よりもいちじるしく高くなる。無酸素銅も攪拌部は母材圧延材に比して微細な再結晶粒組織となるが、その微細化の程度は小さい。このため、硬さ分布を図8¹⁰⁾に示すように攪拌部は母材よりも若干軟化する。もちろん接合条件の影響を受け、入熱が小さいと結晶粒も小さくなり、硬さは増加する。このような攪拌部の硬さの変化傾向はAl合金やMg合金と同様であり、ホールペッチの法則による。

表1 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 5mmt
AZ61	269	9.6	87	押出材 5mmt
AZ91D	250(平均)	4	100	チクソモールド材 2mmt
AMC602	235	10	94	押出材 2mmt 難燃性Mg合金

表2 無酸素銅及び60/40黄銅のFSW継手引張強度特性

銅合金	引張強さ(MPa)	伸び(%)	継手効率(%)	備考
無酸素銅 OFC	225	10	98	圧延材 2mmt 攪拌部破断
60/40 黄銅	380	52	100	圧延材 2mmt 母材破断

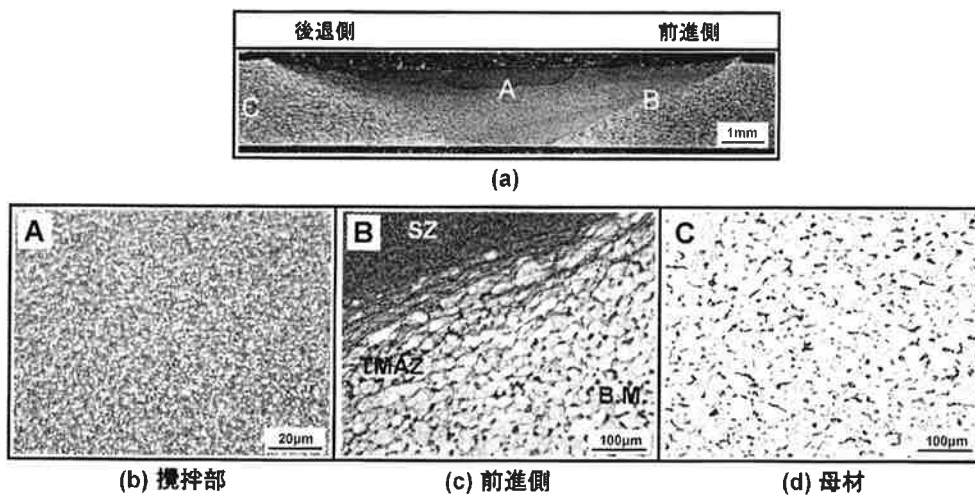


図6 60/40黄銅のFSW継手断面ミクロ組織

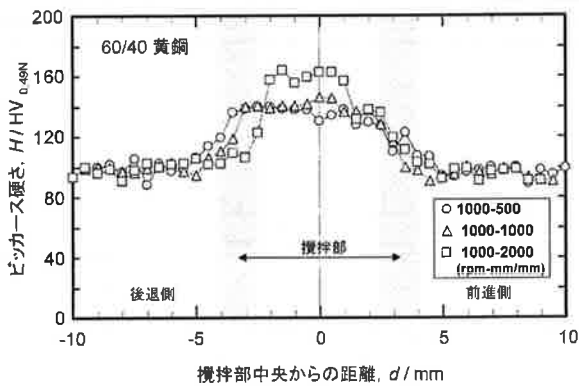


図7 60/40黄銅のFSW継手断面硬さ分布

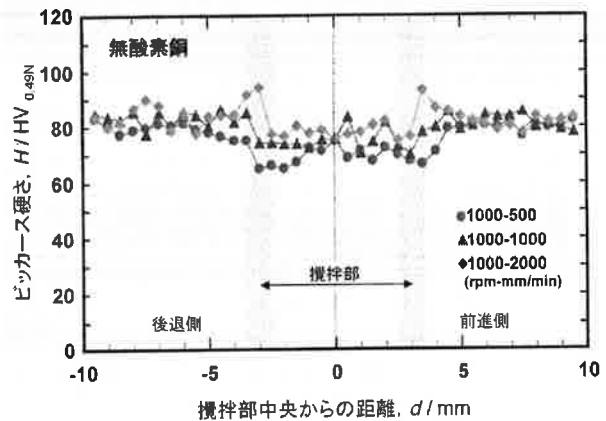


図8 無酸素銅のFSW継手断面硬さ分布

表2に無酸素銅および60/40黄銅についてFSW継手引張強度特性例を示す。60/40黄銅のFSW継手は図7の硬さ分布より母材破断となり、継手効率は100%となる。無酸素銅では攪拌部が軟化するために攪拌部破断であり、継手効率は約98%であった。いずれも良好なFSW継手が得られている。

なお、銅は熱伝導度が大きいために板裏面のルート面における接合不良（キッシングボンド）が発生しやすいので、接合条件の設定にはとくに注意をする必要がある。

4 おわりに

Mg合金の構造部材としての適用はまだ限定されており、このためMg合金製品へのFSWの適用例はほとんど無い。一方、銅に対しては軟質材である無酸素銅を用いた大型パッキングプレート材の重ねシール接合など

に実用化されている¹¹⁾。

いずれも今後の展開が期待されるものである。なお詳細は参考文献を参照されたい。また資料を引用させて頂いた関係各位に紙面をお借りしてお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 中田：溶接技術, 55-9 (2007), 138-143.
- 2) K.Nakataら：Trans.JWRI,31-2(2002),141-146 (大阪大学接合科学研究所英文紀要) .
- 3) 中田：未発表
- 4) 中田：溶接技術,53-4(2005),135-142.
- 5) 坂井ら：溶接学会全国大会講演概要集, 78(2006), 70-71.
- 6) ㈱栗本鐵工所：日刊工業新聞, 2007年4月26日.
- 7) 中田ら：軽金属,51-10 (2001), 528-533.
- 8) 中田：溶接学会誌, 74-3(2005),148-151.
- 9) L.Cederqvist:5th Int.Symp.of FSW,2004 Sept.,Metz, France, CD-ROM.
- 10) 朴, 中田ら：溶接学会第184回溶接法研究委員会資料, SW-2944-03(2003).
- 11) 日立伸銅：溶接技術, 49-9(2001),108-111.