

# 特集 FSW読本

## 各種材料へのFSWの適用性

中田 一博  
大阪大学 接合科学研究所

### 1 はじめに

FSW（摩擦攪拌接合法）は1991年に出現した新しい固相接合法であり、現在は、アルミニウム合金と一部の銅において実用化されているが、その他の金属材料への適用の実用化が待たれるところである。

本稿では各種金属材料へのFSWの適用性について紹介するが、アルミニウム合金のFSW継手の諸特性についてはすでに多くの解説があるので本稿では簡単な説明に留めることとする。

### 2 アルミニウム合金

ここでは他の材料との比較の為に図1<sup>1)</sup>に代表的なAl合金のFSW適正接合条件範囲（板厚6mm）を示す。一般に6000系合金は条件範囲が広く、接合性は良好であり板厚にもよるが2m/minもの高速接合が可能である。これに対して2000、5000、7000系合金では接合条件範囲は

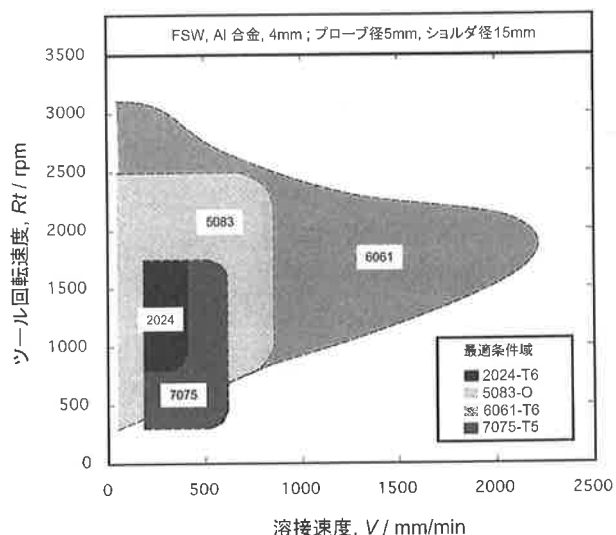


図1 代表的なAl合金のFSWの適正条件範囲

狭くなる。このような傾向は合金の押出加工性と相関性があり、高温における塑性変形抵抗の大小による。

適正条件外のツール回転速度が小さく接合速度が速い条件では、入熱不足のために内部空洞や溝状欠陥あるいはツール先端のプローブ破断が発生する。また、回転速度が速すぎても攪拌異常による空洞欠陥や、固相線温度（共晶温度）の低い2000や7000系では粒界液化によるいちじるしい接合部表面荒れが見られる。

### 3 マグネシウム合金

図2<sup>2)</sup>は代表的なマグネシウム合金であるAZ31、AZ61およびAZ91DのFSW適正接合条件域を示す。前2者は押出材、後者は鍛造材である。AZ系合金の中ではAZ31は6000系アルミニウム合金と同等の良好な接合性を示す。しかし、他の合金ではアルミニウム量の増加にともない接合性は急激に低下する。

このような傾向はアルミニウム合金の接合性がマグネシウム量に依存して低下することと同様であり、合金の

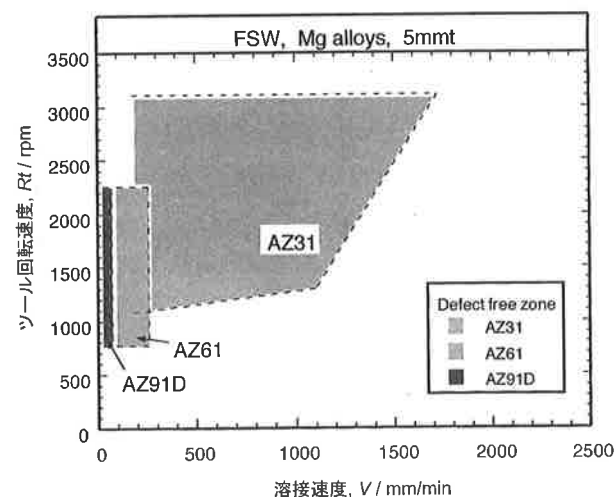


図2 AZ系Mg合金のFSWの適正条件範囲

高温における塑性変形抵抗に関係している。したがってAM60もAZ61とほぼ同様である。

図3<sup>2)</sup>はAZ系の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し、とくに図4<sup>2)</sup>に示すように合金量の多いAZ91Dではその傾向は顕著である。このために継手部は母材破断となる。

#### 4 鋳物・ダイカスト・チクソモールディング材

これらの材料では材料内に必然的に内包されたガスにより、溶融溶接に際して溶接部には図5<sup>3)</sup>に示すようなブローホールや大きな空洞が発生しやすく、内包ガス量やガス圧によっては溶融溶接がほとんど不可能となる。

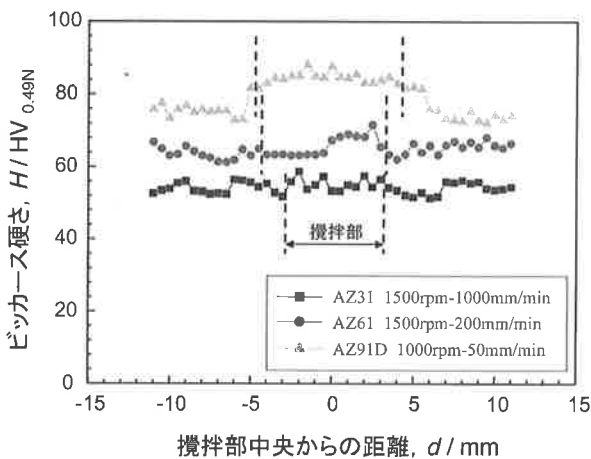


図3 AZ系Mg合金のFSW接合部断面硬さ分布

このような材料に対しては、固相接合であるFSWがきわめて有利であり、材質に依らず接合が可能である。それだけにとどまらず、接合部では鋳造組織の改質（組織微細化、鋳造欠陥除去）も同時に行える利点がある。

図6<sup>4)</sup>にADC12ダイカストアルミニウム合金FSWの組織を示す。攪拌部では粗大なシリコン粒子は微細分散し、ダイカスト材特有の欠陥である破断チル層も消滅する。このため接合部の機械的性質は著しく改善され、図7<sup>4)</sup>および図8<sup>4)</sup>に示すように引張強度及び疲労強度も増加する。このような効果のために摩擦攪拌プロセス（FSP）の名称で鋳造組織改質法としても注目されている。

#### 5 複合材料

金属基複合材の溶融溶接は一般に困難であり、強化材の分解による気孔、空洞の発生や強化材の凝集による劣

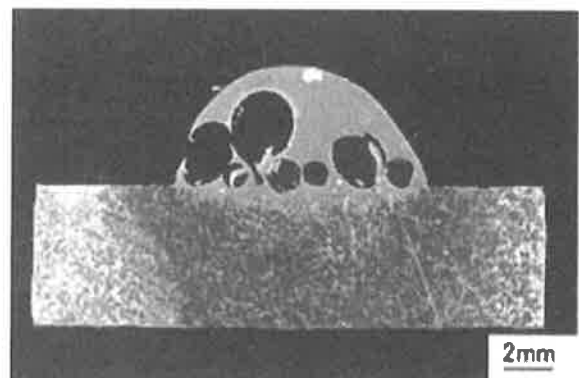


図5 ダイカスト合金ミグ溶接部断面におけるブローホール発生例

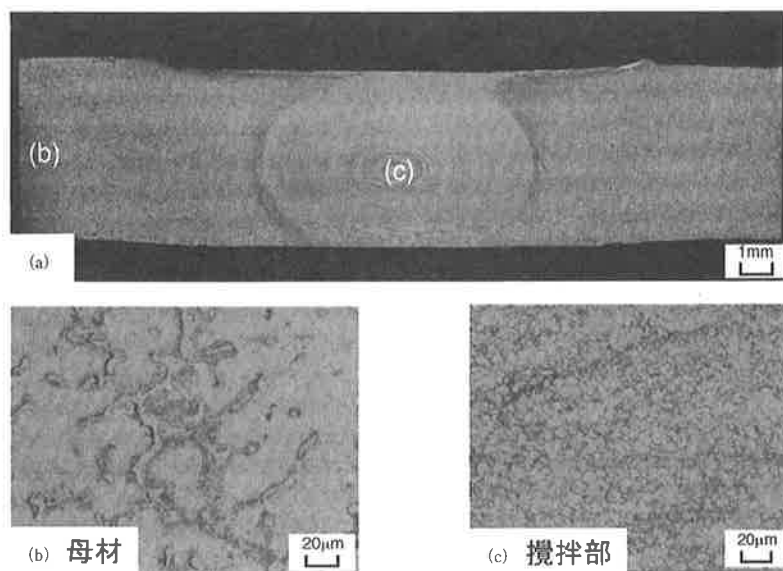


図4 AZ91D合金のFSWマイクロ組織

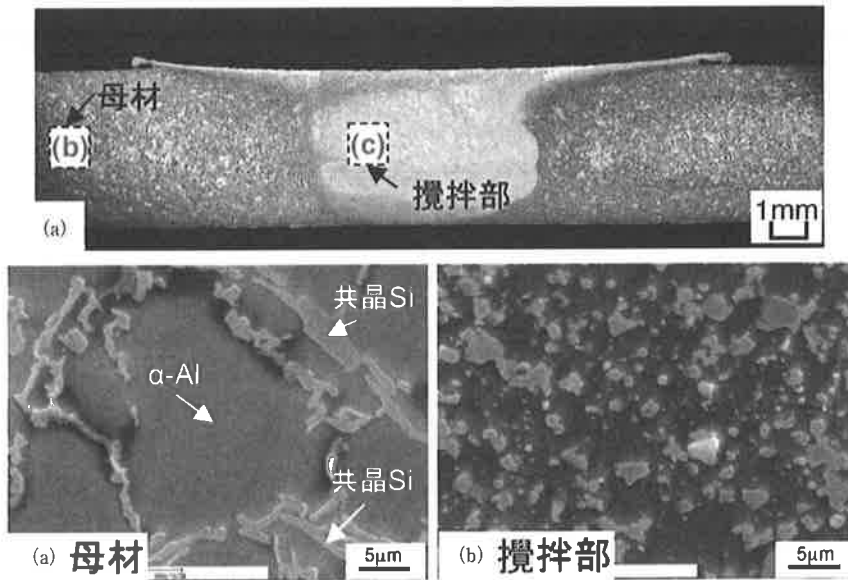


図6 ADC12ダイカスト材のFSW部マイクロ組織

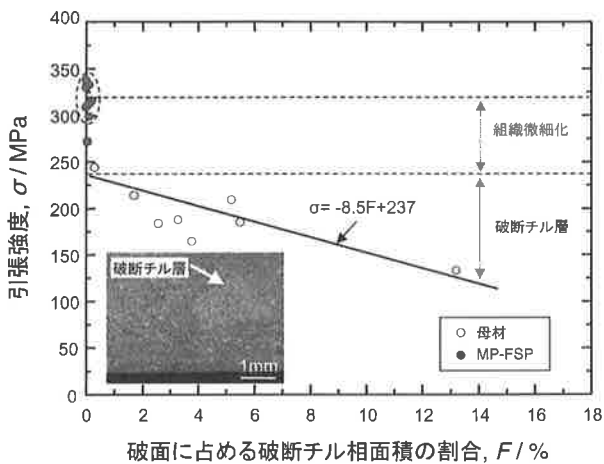


図7 ADC12ダイカスト材の多層FSW部の引張強度と破断チル層の関係

化等が避けられない。粒子分散型複合材に対しては、FSWが適しており、図9<sup>3)</sup>に示すように、粒子が均一に分散した接合部が得られる。

図10<sup>5)</sup>は代表的なアルミナ粒子分散6061合金のFSW適正条件範囲を示す。マトリックス材である6061アルミニウム合金に比して複合材では条件範囲は狭くなる。図11<sup>5)</sup>はFSW断面での硬さ分布を示すが、接合後の時効処理により攪拌部およびHAZの硬さは増加する。これは時効性アルミニウム合金である6061の特性によるものである。FSW時の冷却速度が十分に早いため接合部は再固溶状態からの焼入組織となり、その後の時効処理で硬さが回復する現象であり、マトリックス材が6000系や7000系で認められる。継手引張試験ではHAZ軟化部で破断す

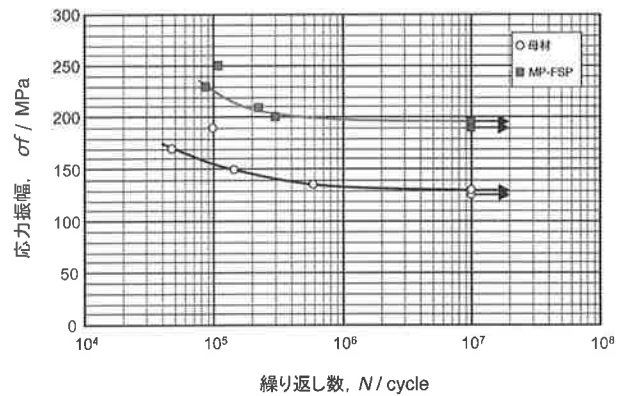


図8 ADC12ダイカスト材の多層FSW部の疲労強度

るが、引張強度は母材約320MPaに対して接合のままでは230~250MPa、接合後の時効材では280~300MPaまで回復する。強化粒子の種類や含有体積率によっては、FSWのツールの摩滅が著しくなり、この問題の解決が今後の課題である。

## 6 銅合金

軟質材である純銅は既にバックグプレート材などに実用化されている<sup>6)</sup>。図12<sup>7)</sup>は板厚2mmの無酸素銅と60/40黄銅の適正接合条件範囲を示す。ツールはSKD61であり、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。

図13<sup>8)</sup>は60/40黄銅のFSW接合部断面の組織である。

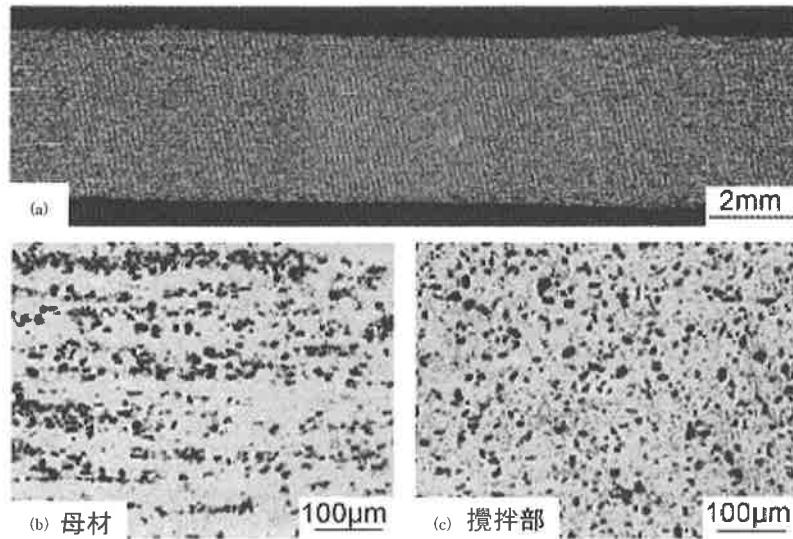


図9 アルミナ粒子分散型6061複合材のFSW継手断面組織

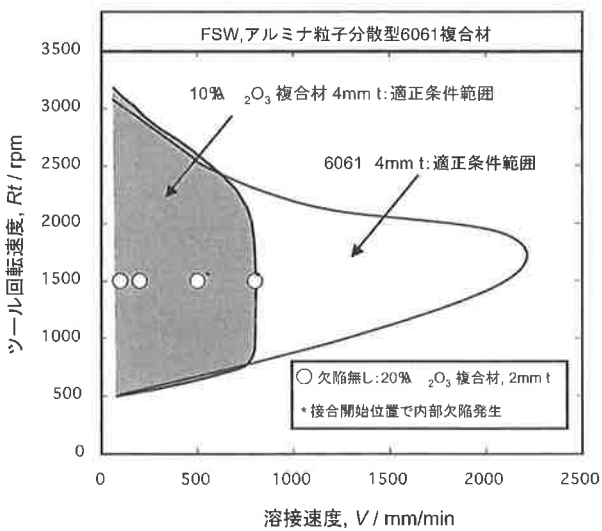


図10 アルミナ粒子分散型6061複合材のFSW適正条件範囲

攪拌部はいちじるしく微細化し、硬さは図14<sup>8)</sup>に示すように母材よりも高くなり、継手は母材破断となる。高強度のアルミ青銅やキュプロニッケルなどでは鉄鋼製ツールは適用不可であり、後述するような耐熱高強度のツールが必要とされる。

## 7 鉄鋼材料・耐熱合金

鉄鋼材料へのFSW適用の最大の壁は、使用に耐え得るツールの開発である。すなわち、軟質金属に対しては接合部の温度は、例えばAl合金では450~500℃であり、既存のSKD61等の工具鋼製のツールで十分に接合に耐え得

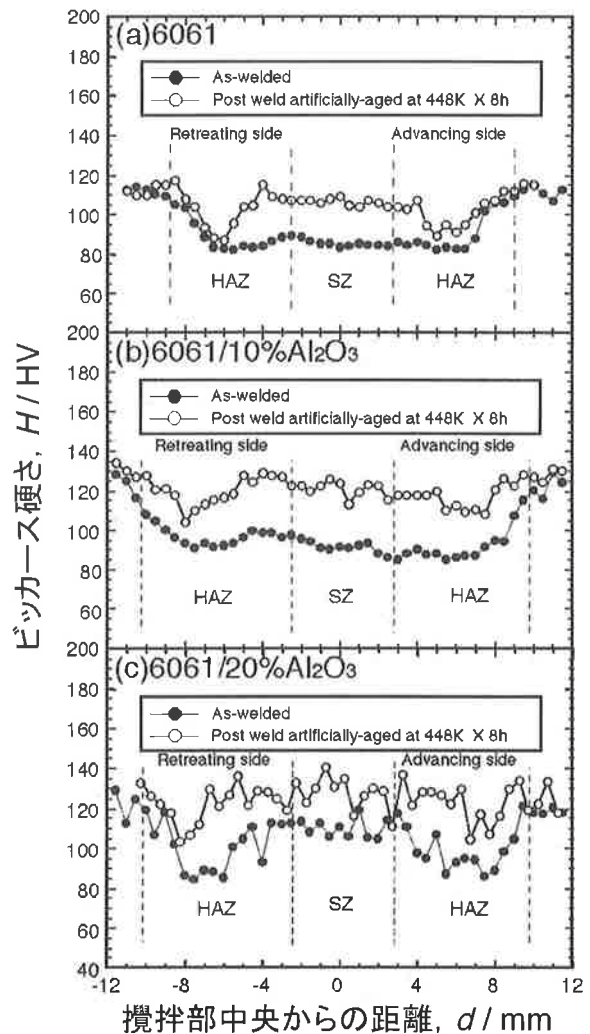


図11 アルミナ粒子分散型6061複合材のFSW継手断面における硬さ分布とFSW後の時効処理効果

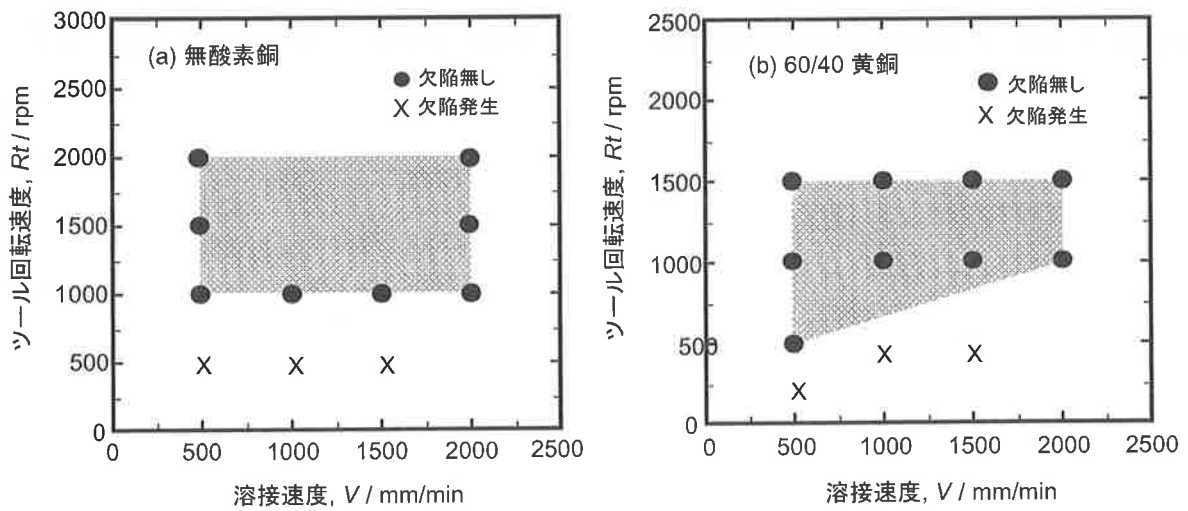


図12 無酸素銅及び60/40黄銅のFSW適正条件範囲

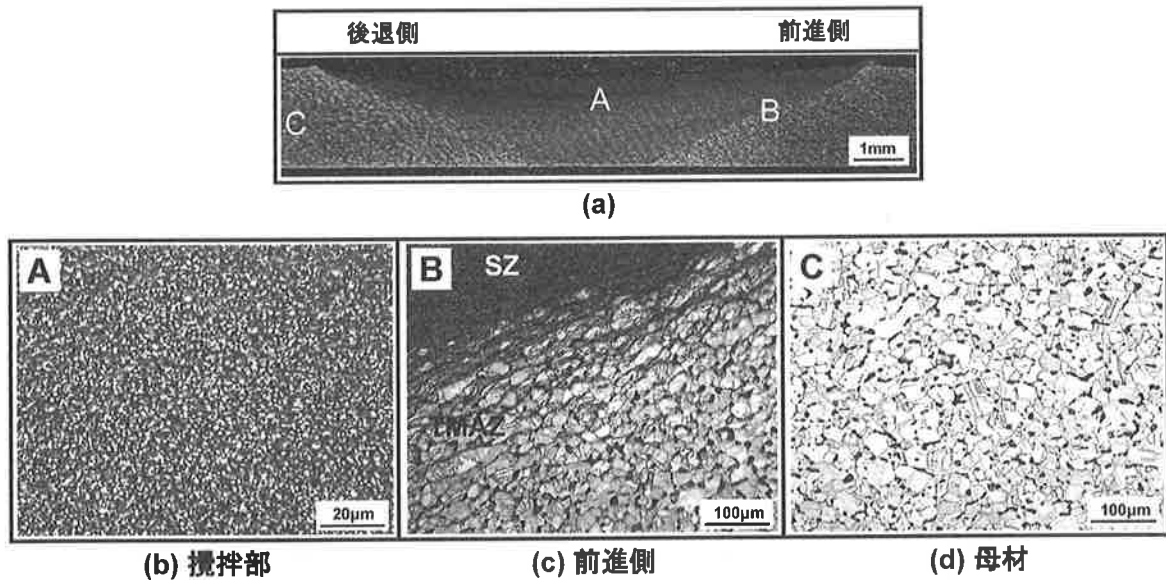


図13 60/40黄銅のFSW継手断面組織

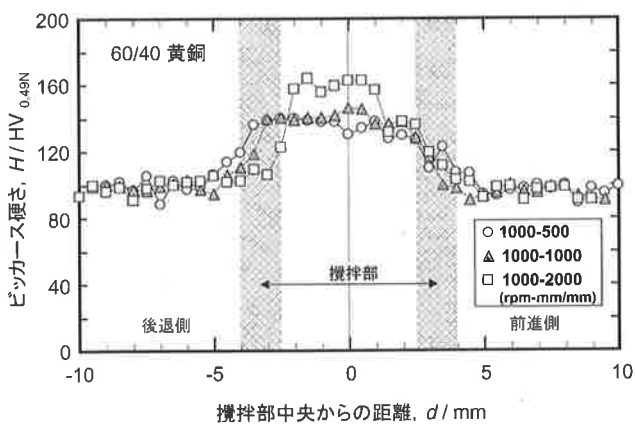


図14 60/40黄銅のFSW継手断面硬さ分布

る。一方、鉄鋼材料では、接合時の温度は1,000～1,200℃の高温と推定されており、鋼製のツールでは高温強度が不足する。したがって、現状ではこれに耐え得るツール材質としてWC-Coやセラミックスである多結晶立方窒化ボロン (PCBN) 製が試作され、その適用性に関する検討が進められている。

図15<sup>9)</sup>は極低炭素鋼 (IF鋼) と炭素量が約50mass%までの各種炭素鋼薄板 (板厚1.6mm) のFSWの結果である。ツール回転速度が400rpm一定で、接合速度が25mm/minから400mm/minの範囲で良好な継手が得られている。接合部の硬さは母材よりも高くなり、継手引張試験ではいずれも母材破断を示す。図15は攪拌部のみの引張試験結果であるが、高炭素鋼では接合速度の増加

と共にマルテンサイト生成量が増加し、これにともない強度も増加して1000~1200MPaに達する高い引張強度を示した。また、接合条件の制御によりマルテンサイトが生成しないA1点以下の接合温度での接合も可能となってきた。

ステンレス鋼もFSW接合が可能であり、フェライト系SUS430、オーステナイト系SUS304L、SUS310L、二相ステンレス鋼等が報告されている。いずれも攪拌部は微細組織を呈し、硬さは母材よりも高くなる。このため例えば図16<sup>10)</sup>にSUS304の接合速度と継手引張強度との関

係を示すが、欠陥が無い条件では母材破断となる。

Ni基耐熱合金であるインコネル600材(板厚2mm)のFSWも可能である。図17<sup>11)</sup>は断面組織を示すが、攪拌部は母材よりも微細化し、硬さは図18<sup>11)</sup>に示すように母材よりもHV15程度増加する。このため継手引張試験では母材破断を示すが、攪拌部のみの引張試験では母材700MPaよりも高い約734MPaを示した。

## 8 高融点材料

従来FSWが不可能と考えられてきたモリブデンや白金も特殊なツール材質(イリジウム合金)を用いることに

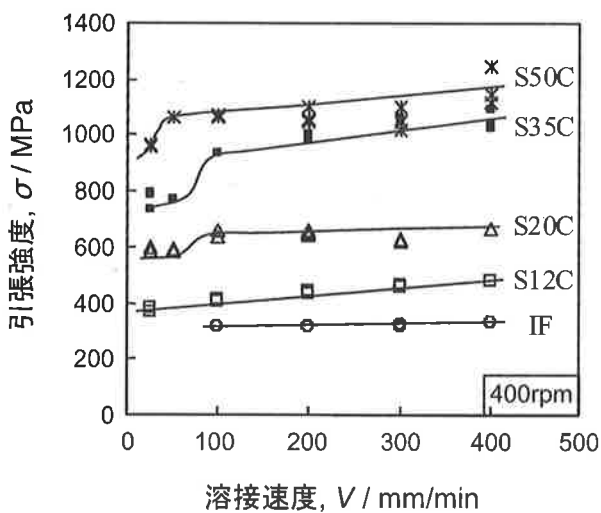


図15 炭素鋼FSWの攪拌部の引張継手強度と接合速度との関係

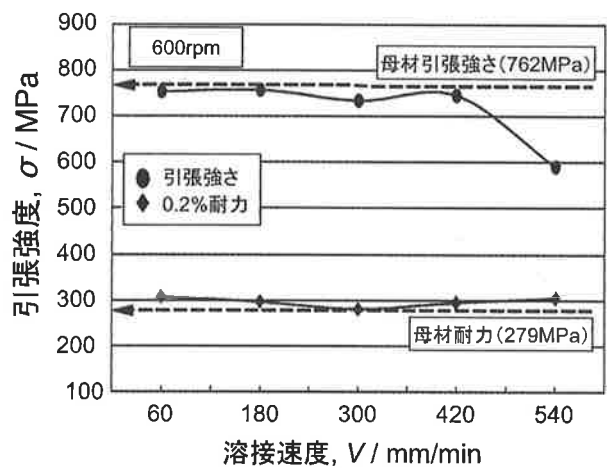


図16 SUS304のFSW継手引張強度と接合速度との関係

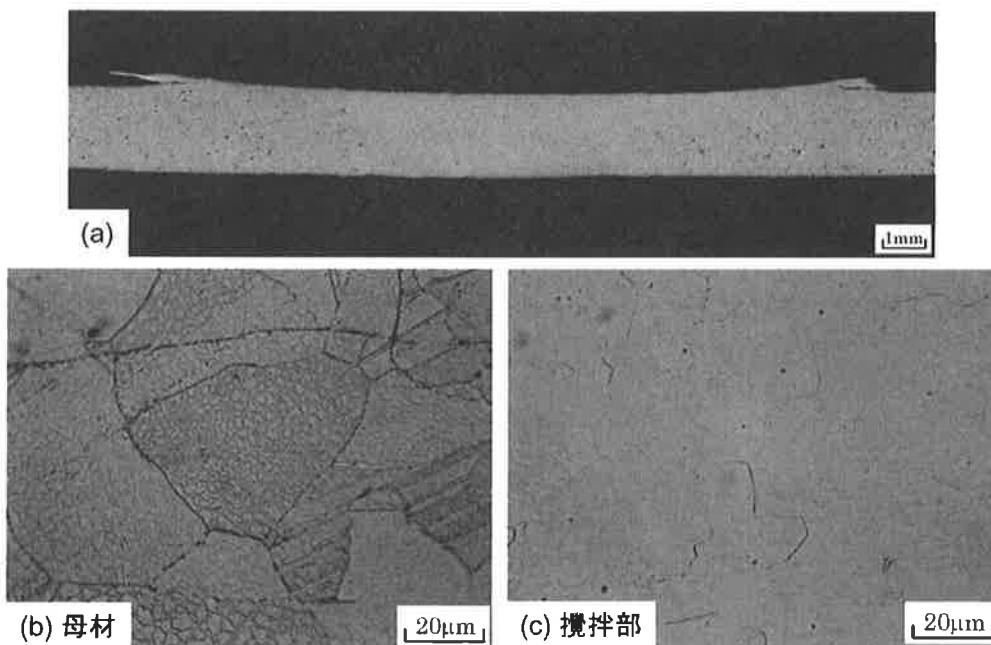


図17 インコネル600合金のFSW継手断面組織

よりFSW継手が得られている。図19<sup>12)</sup>は工業用純モリブデンのFSW継手断面組織を示す。ツール回転速度1000rpmでは100~600mm/minの範囲で良好なFSW継手が得られた。攪拌部は微細再結晶粒となっており、継手引張試験ではHAZ軟化部で破断し、母材の約80%の強度を示した。

チタン合金のFSW接合も可能であり、図20<sup>13)</sup>は板厚2mm材の工業用純Ti(cp)およびTi-6Al-4V合金の接合条件200rpm, 50mm/minにおけるFSW継手断面の硬さ分布を示す。攪拌部は組織微細化と転位密度の増加により母材よりも硬化し、継手引張試験では母材破断となる。

## 9 おわりに

本稿ではAl合金以外の各種金属材料のFSW適用性の現

状について概観した。読者諸兄に少しでもお役に立てれば幸いです。

最後に多くの資料を引用させて頂きました。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) 中田ら：摩擦攪拌接合，(社)溶接学会編，産報出版(2006)，18.
- 2) K.Nakata et al: Trans.JWRI, 31-2 (2002), 141-146.
- 3) 中田：溶接学会誌，72-1 (2003) 12-15.
- 4) 金ら：鑄造工学78-9 (2006) 451-456.
- 5) K.Nakata et al: Mater.Sci.Forum, 426-432 (2003), 2873-2878.
- 6) 日立伸銅：本誌，49-9 (2001), 108-111.
- 7) 中田：溶接学会誌，74-3 (2005)，148-151.
- 8) H.S.Park et al: Mater.Sci.Eng.A, 371 (2004) 160-169. 9) L.Cui et al: ISIJ International, 47-2 (2007)，299-306.
- 10) 石川ら：溶接学会誌，24-2 (2006)，174-180.
- 11) 叶ら：溶接学会全国大会講演概要，78 (2004)，74-75.
- 12) 加藤ら：溶接学会全国大会講演概要，79 (2004)，50-51.
- 13) 藤井ら：溶接学会全国大会講演概要，78 (2004)，76-77.

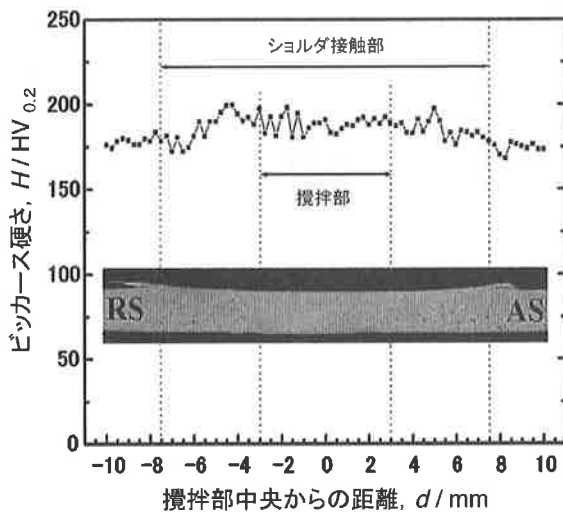


図18 インコネル600合金のFSW継手断面硬さ分布

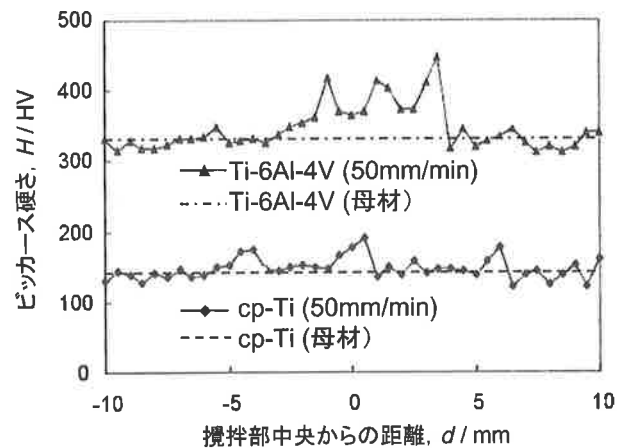


図20 工業用純チタン(cp-Ti)とTi-6Al-4V合金のFSW継手断面硬さ分布(200rpm, 50mm/min)

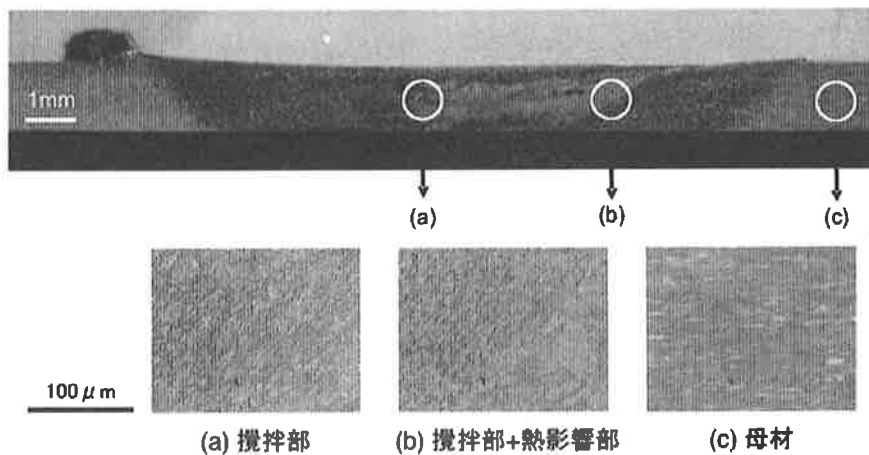


図19 工業用純モリブデン材のFSW継手断面組織