

各種材料のFSWの特徴と適用

第3回

鉄鋼，ニッケル合金および高融点金属のFSW

中田 一博

大阪大学 接合科学研究所

1 はじめに

本連載講座では、9月号でAl合金、10月号でMgおよび銅合金について、そのFSWの特徴について述べた。これらの一般的な軟質材料に対するFSWの適用性はすでに明らかにされている。

一方、FSWに対する最近の興味は、鉄鋼材料にFSWが適用可能なかどうか、あるいは適用可能ならば既存溶接プロセスに比してどのようなメリットが期待できるのか、などに移ってきている。

本稿では、FSWに関して現在もっともホットな話題である鉄鋼材料へのFSWの適用性について、ニッケル合金や高融点金属と比較しながら述べる。

2 鉄鋼材料

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400~450℃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超硬(WC-Co)、W-Re合金、さらにセラミックスである多結晶立方晶窒化ボロン(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。

写真1は鉄鋼材料のFSW接合中の外観写真であり、ツールは赤熱状態にあることが分かる。また写真2はこの時に用いられた市販のPCBNツール先端の外観写真であり、薄板用であり、プローブは円柱形状を呈している。

PCBNツールの耐久性についてツールメーカーは鋼に対して60~90m長のFSWが可能としている。しかし一般的にはまだ実用に供するに十分な耐久性を有しているとは言えないようである。P.J.Konkolらの最近の報告¹⁾では、

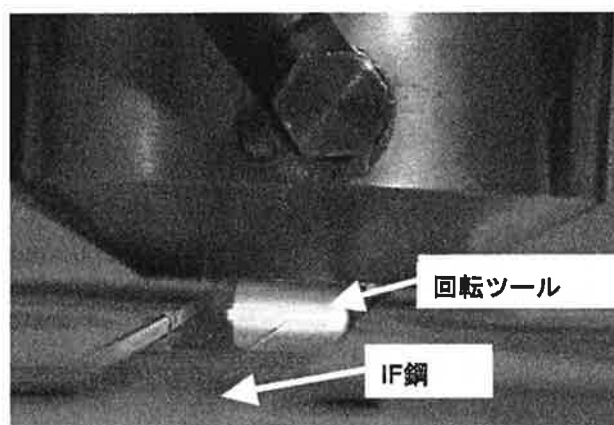


写真1 PCBNツールによるIF鋼のFSW中の外観
(大阪大学藤井准教授提供)



写真2 市販PCBNツール外観

板厚6mmの造船用低合金高張力鋼HSLA-65(引張強さ448MPa)のFSW試験を行い、PCBNツールでは接合長が3mのFSW接合はツール損傷のために困難であったが、W-25%Re製ツールを用いて同じ鋼材に対して3m長のFSW接合がツール回転速度400rpm、接合速度76.2mm/minの条件で得られたことを報告している。また同時に、板幅30cmで1.8m長さのFSW接合部材のFSW

接合前後の変形量を測定しており、長手（縦）方向の変位量は約29.2mmであり、サブマージアーク溶接部と同程度の変位量を示したが、板幅（横）方向の変位量はサブマージアーク溶接部は約2.3mmであったのに対してFSWではほとんど平坦であったと報告している。この時の攪拌部の硬さは約HV240（母材は約HV200）であり、サブマージアーク溶接金属部の約HV280よりも低い値であり、かつシャルピー衝撃値（-29℃）も約75Jとサブマージアーク溶接金属部の約18Jよりも高い値を示した。

図1²⁾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攪拌部の引張強度と接合速度の関係を示す。いずれの炭素鋼でもツール回転速度が400rpmと一定で、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した。図1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1,000~1,200MPaに達する高い引張強度を示した。さらに炭素量が1mass%以上の高炭素鋼もFSW接合が可

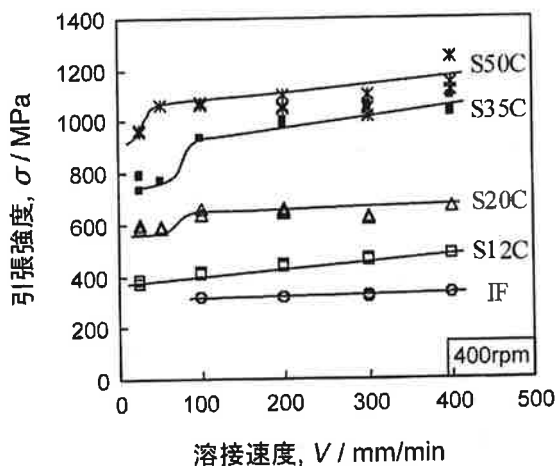


図1 炭素鋼FSWの攪拌部の引張継手強度と接合速度との関係

能とされている³⁾。

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（723℃）以下の比較的低温の接合温度でのFSW接合も可能となっている。図2⁴⁾は炭素量約0.7mass%の高炭素鋼のFSW継手部の硬さ分布を示す。HV800-900の高硬度は写真3⁴⁾に示すFSW組織がマルテンサイト(M)を形成した場合であるが、例えばツール回転速度を200rpmに低下して、加熱温度をA1点以下になるように接合条件を制御すると、図2に示すように硬化の程度を抑制した状態での接合が可能である。この場合の形成組織は写真3(a)に示す微細なフェライトと球状化したセメンタイトの混合組織とすることができ、じん性に富むマイクロ組織を得ることができる。

このようにFSWでは、従来の溶接法ではマルテンサイト形成による著しい硬化のために低温割れやじん性低下により溶接が困難な高炭素鋼の接合が可能であり、かつ接合と同時に接合部の形成組織を改質することができる。これらの事実は、同様に溶接が困難な鋳鉄や鋳鋼へのFSW適用の可能性も示唆している。

実用的な観点からは、接合速度も重要な因子である。

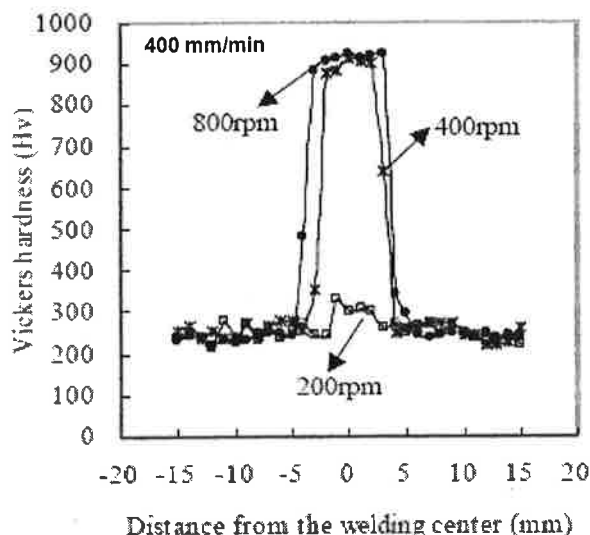


図2 S70C高炭素鋼FSW部の硬さ分布

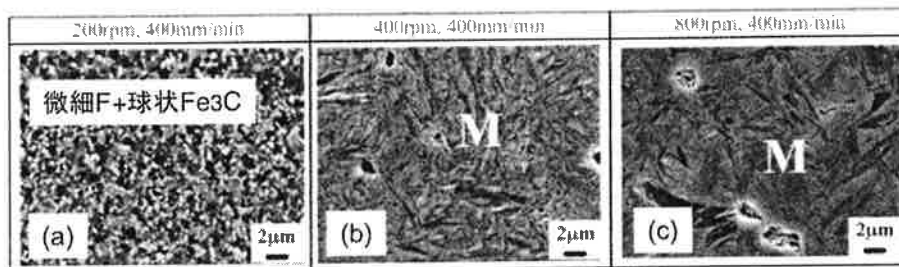


写真3 S70C高炭素鋼FSW攪拌部の形成組織

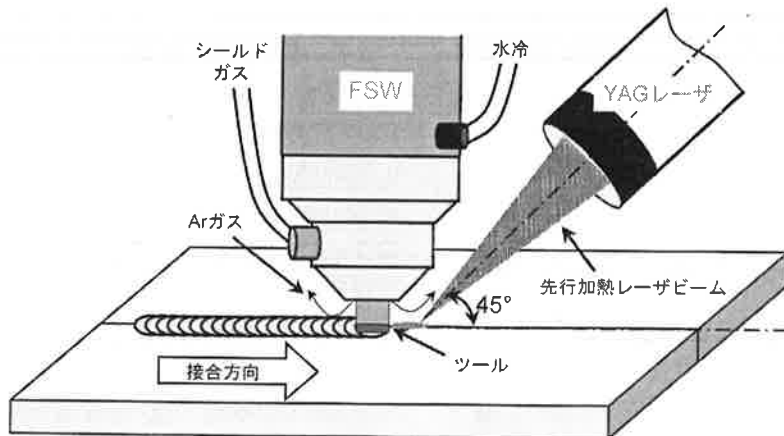


図3 ハイブリッド摩擦攪拌接合法の概念図

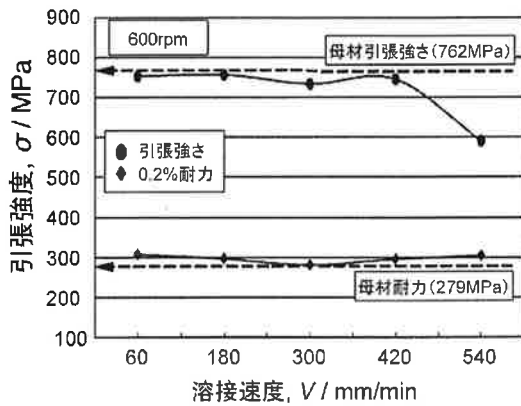


図4 SUS304のFSW継手引張強度と接合速度との関係

例えばSS400の薄板では超硬 (WC-Co) ツールを用いた場合ではツール (プローブ部の根元) 破断により400mm/min程度の接合速度が限界である。しかし接合速度の増加を図るための検討もなされてきており、例えば別の熱源を補助的に追加する方法などがある。図3⁵⁾はレーザービームをFSW接合中のツール直前に照射する「ハイブリッドFSW」であり、これにより同じFSWツール回転速度でも、最高接合速度を2倍の800mm/minまで増加できている。もちろん得られた継手は良好であり、母材破断を示す。

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、SUS316L、SUS310L、二相ステンレス鋼等が報告されている⁶⁾。いずれも攪拌部は結晶粒が微細化した組織を呈し、硬さは一般に母材よりも高くなる。このため例えば図4⁷⁾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。しかし攪拌部では局部的に耐食性が劣化した部分が存在することが報告されており⁸⁾、接合条件の最適化とともにツール材質の攪

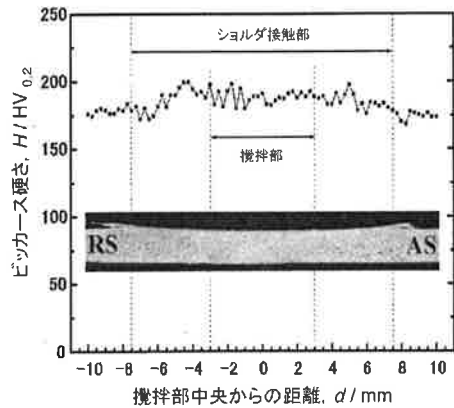


図5 インコネル600合金のFSW継手断面硬さ分布

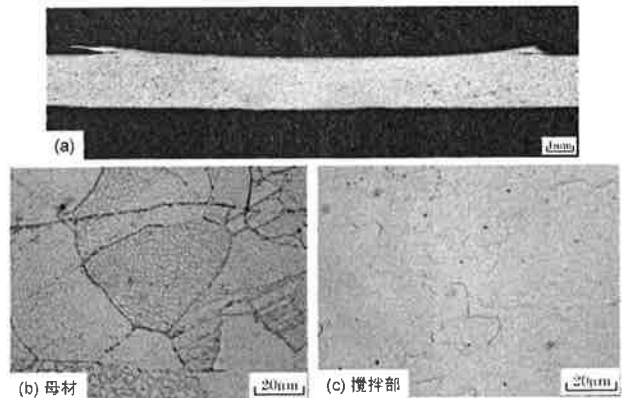


写真4 インコネル600合金のFSW継手断面組織

拌部への混入や母相との反応現象を含めた詳細な検討が必要とされている。

3 ニッケル合金

インコネル合金を含むニッケル合金は溶接時に高温割れの発生が問題となる場合が多く、FSWの適用性が注目されている。ニッケル基耐熱合金であるインコネル600材 (板厚2mm) も上記オーステナイト系ステンレス鋼と

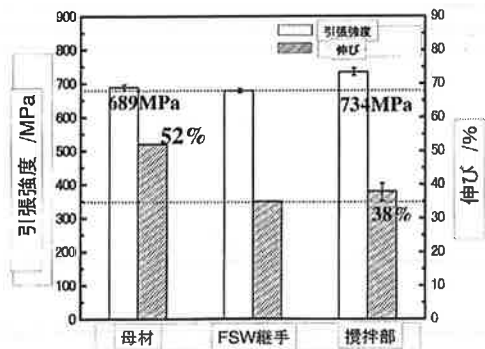


図6 インコネル600合金のFSW継手および攪拌部の引張強度および伸び

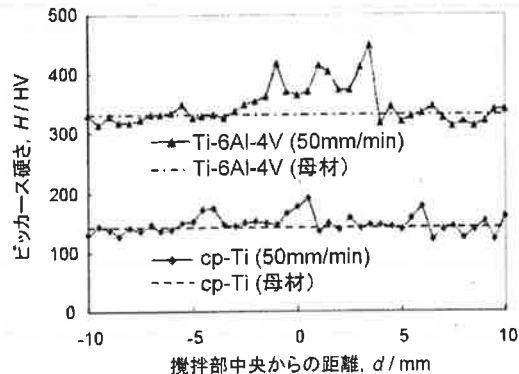


図7 工業用純チタン(cp-Ti)とTi-6Al-4V合金のFSW継手断面硬さ分布 (200rpm, 50mm/min)

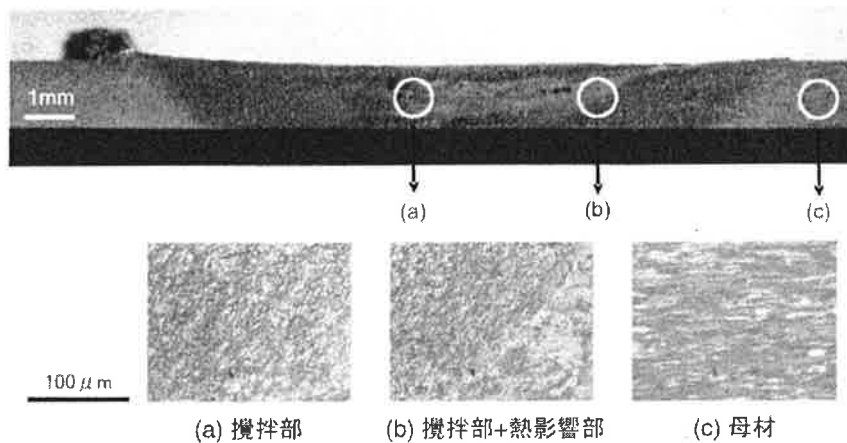


写真5 工業用純モリブデン材のFSW継手断面組織

同様にFSWが可能である。写真4⁹⁾は超硬ツールを用いたFSW継手の断面組織を示すが、攪拌部は母材よりも微細化し、硬さは図5⁹⁾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図6⁹⁾に示すように母材700MPaよりも高い約734MPaを示した。

4 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)を用いることによりFSW継手が得られている。写真5¹⁰⁾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1,000rpm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7¹¹⁾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。

5 おわりに

本稿では鉄鋼材料、ニッケル合金および高融点金属材料の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ある。最後に資料を引用させて頂いた関係各位に誌面をお借りしてお礼申し上げます。

参考文献

- 1) P.J.Konkol et al:Weld.J.,86-7(2007)187s-195s.
- 2) L.Cui et al:ISIJ International, 47-2 (2007), 299-306.
- 3) 佐藤ら:溶接学会全国大会講演概要, 81 (2007), 152-1153.
- 4) 藤井ら:溶接学会全国大会講演概要, 80 (2007), 188-189.
- 5) 立野ら:溶接学会全国大会講演概要, 79 (2006), 58-59.
- 6) (社)溶接学会編:摩擦攪拌接合, 産報出版 (2006), 134-141.
- 7) 石川ら:溶接学会論文集, 24-2 (2006), 174-180.
- 8) S.H.C.Park et al:Scripta Mater.,51-2(2004),101.
- 9) 叶ら:溶接学会全国大会講演概要, 78 (2004), 74-75.
- 10) 加藤ら:溶接学会全国大会講演概要, 79 (2004), 50-51.
- 11) 藤井ら:溶接学会全国大会講演概要, 78 (2004), 76-77.