② 摩擦攪拌接合 (FSW) の特徴と日本における適用状況*

岡 村 久 宣**

Character of Friction Stir Welding and Apprication in Japan*

by Hisanori OKAMURA**

キーワード：摩擦攪拌，塑性流動，アルミニウム合金，鉄道車両，超伝導コイル，パラボラアンテナ

1. 緒 言

昨今の地球の温暖化や環境破壊などに対してその対策が地球規模で取り組まれている。一方、物造りを本業とする製造メーカーでは、地球環境に優しい生産技術が求められている。ところが、生産技術の中でもその基盤技術である溶接はアーク、ヒューム、騒音などの点で悪環境の代表的職場である。このため、作業環境の改善や省エネが求められている。さらに製品価格の国際競争の中で当然、更なる高品質・低コスト化も同時に求められている。

以上のような厳しい状況を打破するためには、これまでの延長線上の技術ではなく、発想の転換が必要である。これに応えるかのように、1991年、イギリスの公立の溶接研究所 (TWI) において、これまでの溶接法とは全く溶接機構が異なる新しい接合法、Friction Stir Welding (FSW) つまり、摩擦攪拌接合法が開発された¹⁻³⁾。この接合方法は、特にアルミニウム合金の溶接上のこれまでの課題を一挙に解決できる可能性を秘めた接合法として、開発と同時に国内外で盛んに応用研究がなされ、すでに開発から7~8年の間に製品に適用されつつある⁴⁻¹¹⁾。現在、このFSW法はアルミニウム合金を主体に応用研究が進められている。また、開発途上の技術がゆえに公開されていない技術及び適用製品も多々あると推察される。このような状況の中で、本章では、製造メーカーで適用する観点からのFSW法の特徴、アルミ

ニウム合金の製品に適用する場合の接合施工さらに国内における適用状況並びに今後の展開などについて執者の経験も交えて述べてみたい。

2. FSW 法の特徴

FSW法の接合機構及び特徴は、TWIの福田氏が担当されているので詳細は省略する。本章では製造メーカーにおける観点からその特徴を述べる。

FSW法は図1に示すように、ボールペンほどの金属棒の先端にそれよりわずかに細いピンの付いている回転ツールを回転させながら接合材の突合せ部に挿入し、これを回転した状態で接合線に添って移動する。このとき、接合材は回転ツールとの摩擦熱により軟化し、更にツールの回転に引きずられるように塑性流動が生じて接合される。接合部の温度はアルミ合金の場合、500℃程度でアルミ合金の融点 (600~660℃) 以下で接合できる固相接合である。

以上のように、FSW法はこれまでの接合方法とは全

図1 FSW法の概要と接合機構

*原稿受付 平成12年7月12日

**正 員 ㈱日立製作所日立研究所 Member, Hitachi, Ltd.
Hitachi Research Laboratory

く接合機構が異なる。このため、技術面だけでなく、地球環境の面でも従来の溶接法では見られない特徴がある。図2に地球環境の観点からまとめたFSW法の特徴を示すが、環境及び省エネの点でも大きな効果が期待できる。

ただし、次のような短所もあるが、この短所を補うに余りある効果がある。さらに、この短所は今後の技術開発と知恵で対処できる可能性が十分にある。

- (1) 接合材を強固に拘束する治具が必要
- (2) 隅肉溶接などが困難で、継手構造が限定される
- (3) 継手部のギャップの許容範囲がアーク溶接に比べて小さい
- (4) 接合部の終端に孔が残る

図2 FSW法の特徴

3. 接合可能な材料系

表1にFSWで接合の可能な金属材料をまとめて示す。アルミ合金及びマグネシウム合金は全て接合可能である。また、銅系も接合できる。ただし、その組成及び機械的特性により、接合可能な条件範囲が広い材料と狭

い材料がある。なお、鉄系はTWIでは成功しているが、筆者の経験では極めて困難な材料である。

4. 接合部の形状

図3にFSWの接合部断面をMIG溶接部と比較して示す。FSW部の表面及び裏面はMIG溶接部に比べて極めて平滑である。従って、FSWの場合は接合のまま製品に適用できる可能性がある。これもFSWの大きなメリットの一つである。

5. 接合部の温度及びひずみ

FSW部の温度測定効果をMIG溶接部と比較して図4に示す。FSWの温度は最高でも480℃でMIG溶接部

図3 FSWとMIG溶接との断面形状の比較

表1 FSWによる各種金属の接合の可能性と条件範囲

		材 質	組 成	厚さ (mm)	接合性	
					接合の可否	条件範囲
アルミニウム	非熱 処理 材	1080 (O)	>99.8%Al	1～ 12.0	○ 可能	◎ 極めて広い
		1100 (H14)	>99.0%Al			
		3004 (O材)	Al-Mn系	4～ 12.0	○	△ 狭い
		5052 (O材)	Al-Mg系			
		5083 (O材)				
	熱 処理 材	6061 (T6材)	Al-Si-Mg系	4～6	○	◎
		6N01 (T5材)	Al-Si-Mg系			
		2017 (T4材)	Al-Cu-Mg系	6.0	○	△
		7075 (T6材)	Al-Zn-Mg系	6.0	○	△
		7N01 (T6材)	Al-Zn-Mg系	6.0	○	○
	アルミ 鋳物品	1200FD	>99.%	4.0	○	△
		5083FD	Al-Mg系	6.0	○	△
Mg系	MC1	Al-Mn-Zn系	3.0	○	△	
銅系	無酸素銅	>99.99%	5.0	○	△	
鉄系	炭素鋼	0.1C-0.3Si-0.5Mn-Fe	3.0	× 困難	—	
	ステンレス鋼	18Cr-8Ni-Fe				

の温度 (>660℃) に比べて極めて低い。
図5に同一条件で拘束して溶接した場合の FSWMIG、YAG レーザーの溶接角変形量の比較を示す。材質、厚さ、接合材料にもよるが、FSW の角変形は MIG の 1/20~1/30 程度小さい。これは図4に示したように接合部の温度が低いためで、これも大きな特長である。

図4 FSW と MIG との接合部の温度比較 (6 N 01-4 mm)

6. 接合部の金属的・機械的特性

日本では特に 6000 系のアルミ合金を FSW した接合部の金属的及び機械的特性が多く報告されている⁷⁻¹²⁾。その報告によると、この合金は熱処理合金のため、接合部の機械的特性は母材よりわずかに低下するが、アーク溶接部以上である。また、硬さ、組織などの金属的特性もアーク溶接部に比べて何ら劣る点が見られない。
一方、5000 系についても一部報告されているが、アーク溶接部に比べて何ら劣る点が見られない^{9,10)}。さらに 2000 系及び 7000 系についても同様に報告されている¹⁻⁴⁾。

7. 接 合 施 工

7.1 接合条件因子

FSW 法の接合条件因子を表2に示す。基本的な接合条件因子は、ツールの形状、ツールの回転数、接合速度、

長さ: 1m、厚さ: 3mm (6061材)

図5 FSW/MIG 溶接/YAG レーザ溶接部の変形状態及び角変形量の比較 (6061 材 厚さ 3 mm, 幅 200 mm, 長さ 1000 mm)

表 2 FSW の接合条件因子

条件因子		選定のポイント
ツールの形状 ショルダ径、ピン径 ピン長さ		材質、形状、厚さにより決定
ツールの 挿入深さ	ピン部	接合材の厚さと同等に挿入
	ショルダ部	接合材の表面からわずかに 挿入することが望ましい
ツール角度		若干前進角度を設けることが望ましい
ツール回転数		材質、形状、厚さにより決定
接合速度		
接合材の拘束

図 6 各アルミ合金の接合条件例 (厚さ: 5 mm)

接合材の拘束方法である。これらの条件は接合材の材質、形状、厚さなどにより適宜決定される。

図 6 にアルミ合金 6000 系及び 5000 系の場合の健全な接合部が得られる接合速度とツールの回転数との関係を示す。6000 系の場合は 5000 系に比べて健全な接合部が得られる条件範囲は極めて広い。ただし、製品に適用する場合の条件は、接合欠陥だけでなく、接合部の各種特性、信頼性、作業管理基準なども含めて厳密な選定が必要である。

7.2 接合部に発生する主な欠陥とその防止

FSW は接合材の融点以下で接合できる固相接合のため、従来の溶融接合部に発生するような割れやブローホールなどの欠陥は発生しない。しかし、次のような接合条件の場合には欠陥が発生することがある。

図 7 に FSW 部に発生する代表的な欠陥の例を示す。

図 7 FSW 部に発生する代表的な欠陥例

図 8 接合部の継手形状の例

(a) は攪拌不足の場合に発生しやすい代表的な欠陥である。これは接合速度に比べて回転数が小さい場合及び接合継手部の開先ギャップが大きい場合などに発生しやすい。(b) は摩擦攪拌が過剰の場合に発生しやすい代表的な欠陥である、これは接合速度に比べてツールの回転数が高い場合に発生しやすい。

しかし、接合材質の特性に応じて適正な接合条件であれば、欠陥のない接合部が再現性よく得られる。

7.3 接合部の継手形状

回転ツールはショルダ部とショルダ部より細いピン部からなっている。ピン部は接合材の中に完全に挿入されるが、ショルダ部もわずかに挿入される。このため、接合材の表面がショルダ部で切削されて凹みが生じる。凹みが生じると接合部の機械的強度の低下原因になるばかりでなく、製品価値も低下する。そこで、図 8 に示すように、予め接合部に凸を設け、接合中にショルダで切削して母材表面と同じ高さの平滑にすることが望ましい。

7.4 接合部の許容ギャップ

FSW は溶加材 (フィラワイヤ) を使用しないため、基本的にはギャップが無い状態で接合することが望ましい。しかし、接合材が長い場合や加工精度が悪い場合は接合中にギャップが生じることがある。

図9 加速器用超伝導磁石の製作及びFSWによる超伝導コイル同士の接合状況

継手部にギャップがあると欠陥が発生しやすくなる。前述の凸型継手はこのギャップを埋める効果もある。

7.5 接合材表面の管理

FSWは固相接合のため、接合材表面の酸化物は接合部に巻き込まれることが考えられる。しかし、酸化物はツールの回転により、接合部内に細かく分散されて機械的強度の低下や気泡などの欠陥に進展するような悪影響は見られない。このため、特にブラッシングなどによる酸化物の除去が不要である。なお、本FSW法は水中でも接合が可能である¹⁶⁾。この結果からも従来のアーク溶接のように、湿度などの作業環境の厳密な管理は不要であることが推察できる。

8. FSW装置

FSW装置はツールの回転及び上下駆動及び接合方向移動用の駆動機構、接合材の拘束機構が基本であるが、その他、必要に応じて各種の機構が設けられる。これらの駆動機構、駆動方法及び接合材の拘束用の治具機構は接合材の構造、形状、接合部に要求される特性などで最適に選定される。

9. 構造物への適用

以上述べたように、FSW部には欠陥の発生が見られないばかりでなく、ひずみ及び金属的、機械的特性は現状のアーク溶接部に比べて何ら劣る要因は見られず、FSW部の品質はアーク溶接部以上であると言える。さらに、アークやヒュームの発生が無く、作業環境の改善の点でも大きな効果が期待できる。また、フィラワイヤ及びシールドガスが不要など省資源効果も期待できる、

図10 FSWで接合した超伝導コイル導体接合の断面

以下、製品への適用例を紹介する。

9.1 超伝導コイル導体への適用

図9に加速器用の超伝導磁石に超伝導コイルが巻かれる作業状況及びこの超伝導コイル導体同士をFSWで接合する概要を示す。超伝導コイルはNb-Tiの超伝導線材が純アルミニウムの安定化材(8×15mm角)の中に収められている。この磁石の製作では直径が約3mの鉄心の周囲に約6kmの長さの超伝導コイルが巻かれる。このため、途中で超伝導コイル導体同士の接合が必要となる。この接合はNb-Ti超伝導線材の熱的劣化を防ぐため、純アルミの安定化材同士を400℃以下の温度で接合する必要があり、従来は、はんだ付が採用されていた。しかし、はんだ付部の強度が低い。はんだ付に銅めっきが必要であるなど作業が煩雑であるため、新しい接合方法が求められていた。そこで、この接合にFSWを採用することにより、Nb-Tiの超伝導線材近傍の温度が400℃以下で接合でき、かつ、この接合部の液体He中における超伝導線特性及び機械的強度は全て母材と同等以上であることを確認している。図10にFSWで接合した超伝導コイル導体同士の接合部断面を示すが、Nb-Tiの超伝導線材を損傷することなく接合されている。

9.2 鉄道車両への適用

鉄道車両構体は軽量化のためアルミ合金が多く使用されている。車両の場合は長尺のアルミ合金の板材を溶接で組立てる方法で製作され、図11に示すように接合部は直線が多い、また、アルミ合金車両の厚さは3~6mmと比較的薄いなどで、特にFSWに適した接合構造である⁵⁾。

図12にシングルスキン(リブの付いた平板)及びダブルスキン(中リブの付いた中空構造)構造の接合例と接合部の断面を示す。いずれも従来のアーク溶接で

組立られた車両に比べて接合部のみならず車両全体のひずみが大幅に減少し、見栄えのよい車両が製作できる。

図13にFSW法で接合した車両の外観を示す⁸⁾。なお、FSWの場合でもMIG溶接と同様に接合施工条件、品質管理などは厳しく管理される。

9.3 アルミ合金円筒管への適用

現在、図14に示すようなアルミ円筒管の溶接はMIG溶接で製作されている。この円筒管の接合にFSW法が適用されるならば、1パス接合が可能でひずみも小さいため大幅な製造プロセスの簡素化に伴う低コスト化が期待できる。図15は厚さ10mm、外径が500mm、長さが1000mmの5083-O材の円筒管をFSW法で接合した外観を示す。図に示すように軸方向及円周方向とも1パスで接合が可能である。

9.4 パラボラアンテナへの適用

現在、工業用のパラボラアンテナは、図16に示すように、幅1m、長さ3mのアルミ合金板材をMIG溶接で溶接されている。MIG溶接の場合、ひずみ取り作業後、曲げ加工でアンテナが製作される。これをFSW法で接合することにより、接合後のひずみが小さいため、ひずみ取り作業が省略できる。従って、高品質化と同時に低コスト化が期待できる。図16にFSW法で接合し

た工業用パラボラアンテナの外観を示す。

10. 品質管理

アーク溶接に比べて欠陥の発生がなく、高い品質が得られるFSWと言えども、接合施工条件の管理をはじめ超音波探傷試験やX線当科試験などの非破壊検査法により、その品質管理はアーク溶接と同等に厳しく管理することが望ましい。

図12 FSWによるアルミ合金車両部材の接合例

図11 アルミ合金車両の構造と接合部

図13 FSW法で接合した車両の外観⁸⁾

図14 アルミ合金円筒管の構造及びMIGとFSWとの製作プロセスの比較

図 15 FSW によるアルミ合金円筒管の接合例
(5083-O 材, 厚さ: 10 mm)

図 16 FSW 法によるパラボラアンテナの接合プロセスと外観

11. 今後の展開及び課題

FSW は誕生以来、わずか 8~9 年の歴史が故にまだその適用例が少ない。しかし、レーザ溶接に比べるとそのスピードは格段に早い。今後は国内でも自動車、航空機器、船舶、半導体機器、民生機器への急速な適用拡大が予想される。すでに、欧米では航空、船舶への適用例が紹介されている⁴⁾。

今後、FSW の適用拡大を図るための課題はさらに基礎的現象の解明及び工業的技術の開発である。基礎的には接合現象並びに接合部金属的・機械的特性やひずみなどのミクロ的解明が必要である。工業的には FSW の短所である接合終端部の孔の防止、接合材の拘束の合理化、隅肉形状などへ適用可能な技術開発が必要である。これらの一部はすでに開発されている技術もあり、今後も急速な勢いで開発されるであろう。

12. ま と め

以上述べたように、FSW はひずみ、金属的及び機械的特性、品質、信頼性は現状のアーク溶接部に比べて優れている。さらに、アークやヒュームの発生が無く、作業環境の改善の点でも大きな効果が期待できた。また、フィラーワイヤ及びシールドガスが不要など省資源効果も期待できる。しかし FSW と言えども FSW が故の本質的な短所もある。これらの短所をアーク溶接、レーザ溶接など従来の溶接法で補うことにより、トータルとして生産技術の一つの強い武器になることが予想される。この武器をいち早く、利用することが世界的な価格競争の中で生き残る条件の一つと考える。

参 考 文 献

- 1) C.J. Dawes and W.M. Thomas: Friction Stir Joining of Aluminium Alloys; Bulletin No. 6 1995
- 2) C.J. Dawes and W.M. Thomas: Friction Stir Process Welds Aluminium Alloys; Welding Journal No. 36 1995
- 3) 福田: TWI の摩擦撹拌溶接の実際; 溶接技術 7 月号 1999
- 4) M.R. Johnsen: Friction Stir Welding Takes off at Boeing; Welding Journal February 1999
- 5) NIKKEL MECHANICAL No. 539 1999.
- 6) 日本経済新聞: 1999 年 10 月 11 日
- 7) 熊谷正樹, 田中 直: 摩擦撹拌接合による大型アルミニウム素材の製作; 軽金属学会第 94 回春期大会講演概要, (1998)
- 8) 戸取, 岡村: アルミニウム合金の摩擦撹拌接合 (FSW) と鉄道車両への適用; 車両技術, 平成 12 年 3 月 No: 219
- 9) 岡村: アルミ合金の摩擦撹拌接合及び構造物への適用; 溶接学会 溶接法研究委員会資料平成 11 年 12 月 9 日
- 10) 生島, 堀: FSW の鉄道車両への適用とその品質・強度評価; 軽構造接合加工研究委員会資料 2000 年 1 月 20 日 8) 岡村: アルミ合金摩擦撹拌接合部の金属的・機械的特性及びひずみ; 溶接学会 溶接法研究委員会資料, 平成 12 年 6 月 9 日
- 11) 岡村, 青田, 江角: アルミ合金摩擦撹拌接合と構造物平成の適用; 軽金属 第 50 巻第 4 号 (2000)
- 12) 田中 直, 谷 正樹: 摩擦撹拌接合した 6 N 01 アルミニウム二及ばす時効処理の影響; 軽金属学会 第 95 回秋季大会講演概要, (1998)
- 13) Peter Ditzel John. C. Lpold: Microstructure Evolution Stir Welding of aluminum Alloy 6061-T 5; EWI Summary Repot SR 9709, November 1997
- 14) Philip Threadgill: Friction Stir welds in aluminium alloys-preliminary microstructural assessment Bulletin March/April 1997