

展望

摩擦攪拌接合 (FSW) の最近の動向

Recent Trend of Friction Stir Welding

(株) 日立製作所 日立研究所
エネルギー材料研究部 主幹研究員

稲垣正寿 Masahisa Inagaki

同上

平野 聡 Satoshi Hirano

同上 研究員

岡本和孝 Kazutaka Okamoto

日立設備エンジニアリング (株)
主任技師

小田倉富夫 Tomio Odakura

(株) 日立ハイテクノロジーズ
生産システム部 部長

益富和人 Kazuto Masutomi

1 はじめに

1991年、TWI (The Welding Institute、英国) で開発された摩擦攪拌接合 (以下、FSW : Friction Stir Welding) 技術は、開発後わずか11年で鉄道車両、船舶、航空機の生産技術として実用化され、急速に適用分野が拡大しつつある。従来、これらの適用部材における主要対象材料はアルミ合金であったが、最近アルミ合金以外の材料へもFSW技術の適用が研究レベルおよび生産技術レベルで検討されるようになった。FSWは、図1にその接合原理および接合状況を示すように、回転する工具を被接合材料の接合界面に挿入し、被接合材料と回転工具との摩擦熱で材料を加熱すると同時に、軟化した材料を回転工具で攪拌して塑性流動させることで接合する技術である。アルミ合金の場合、比較的低温で塑性流動させ接合できることから、その実用化が促進されたが¹⁾、FSWの接合原理はアルミ合金のみならず、広く他の材料にも適用可能である²⁾。

本報告では、FSWの特徴、当社における適用事例および第3回FSW国際会議³⁾における発表をレビューし、適用製品分野、適用対象材料に関するFSW技術の最近の動向を紹介する。またアルミ合金以外の材料への適用可能性と課題についてまとめた。

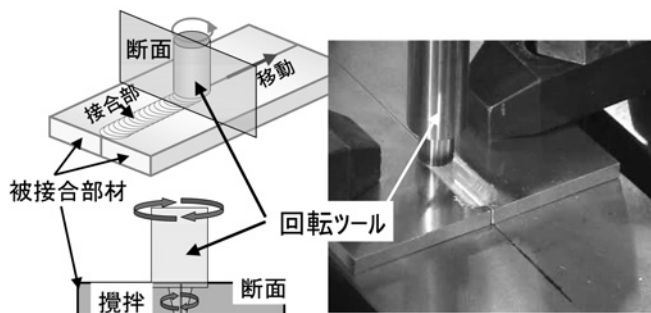


図1 摩擦攪拌接合の概要

2 摩擦攪拌接合の特徴

FSWにおいては、回転工具を接合界面に挿入し、回転ツールと被接合材料の間に発生する摩擦熱を熱源として材料は塑性流動が容易になる温度に加熱される。この温度領域で、回転工具により被接合材料の界面は攪拌され接合が可能となる。図2にFSWの特徴を示す。その特徴は、(1) アーク溶接に比べて接合による歪み/変形が小さい、(2) 溶融溶接ではデンドライトの凝固組織となり結晶粒の粗大化が起こるのに対し、FSWではむしろ結晶粒が母材より微細化し、溶融溶接に比べて機械的性質の優れた接合部が得られる、(3) 接合部の結晶粒は大傾角粒界となるため、接合後の塑性加工に対する変形能が高い、(4) アーク、ヒューム、スパッタ等が発生せずクリーンな作業環境が実現する、(5) 自動化が容易であり熟練工を必要としない等である。佐藤らの一連の研究⁴⁻⁶⁾で明らかにされているように、これらの特徴は (a) FSWが固相接合であり、(b) 動的な再結晶と静的な再結晶とが混在した特有の金属組織となることに起因する。表1に、その特徴をまとめて示した。

画期的ともいえるFSW技術の特徴は、従来の接合技術を

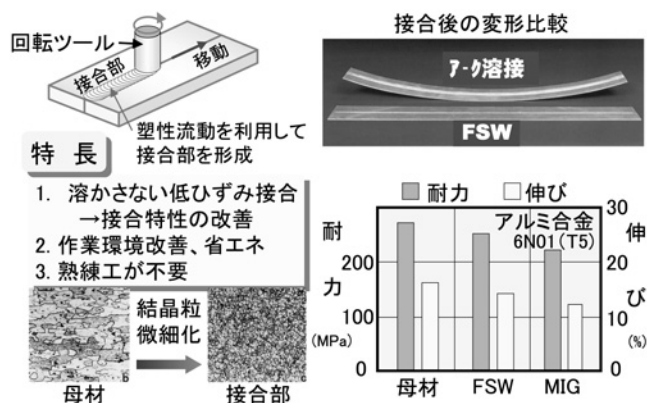


図2 摩擦攪拌接合の特長

革新する製造技術となる可能性を示唆しているが、図3に示すいくつかの課題もある。(1) 回転工具による押付け力が大きいため、その力に耐える支持構造を工夫する必要がある。支持構造を持たない中空体は、この押付け力により座屈変形が発生する。(2) 回転工具の材料中への挿入量を0.2 mm程度の精度で制御する必要がある。(3) 被接合材料の間のギャップを出来るだけ小さく管理するために、被接合材料の固定を工夫する必要がある。ギャップが大きいと接合部に充填する金属の体積が不足し、ボイド欠陥が発生する。(4) 接合界面の汚れ、コンタミネーションが接合部の機械的性質に及ぼす影響が大きい。(5) 鉄基、ニッケル基などの高融点合金の接合に耐える回転工具材料が開発されていない、等である。実生産ラインへの適用に際しては、これらの課題を何らかの方法で解決する必要がある。また課題(5)が解決されると、凝固割れの発生、ブローホールの発生などで従来溶接出来なかった材料の接合が可能となり、FSWはアルミ合金のみならず難溶接材料の接合技術として普及する可能性が高い。

3 摩擦攪拌接合の適用事例

本章では2つの適用事例について紹介する。航空機、船舶・海洋構造物、自動車等への事例については他の解説記事^{1,7)}に譲る。

3.1 鉄道車両への適用

図4に鉄道車両への適用事例を示す。鉄道車両の軽量化を目的として、構体に中空形状のアルミ合金押出し材パネルが採用されてきた。従来、構体の組立てには溶融溶接が採用されていたが、接合後の溶接変形を修正するために多くの工数が必要であった。FSW適用の着目点は、変形修正工数の低減にある。適用における課題は、(1) 押付け力を支持する中空押出し材の形状の最適化、(2) 中空押出し材パネル間のギャップ管理である。課題(1)は、押出し材の製造段階で押

付け荷重に耐える支持構造を造込み、課題(2)は、欠陥が発生しないパネル間ギャップと回転工具の挿入量を定量化し、接合条件を制御することにより解決された。

3.2 銅バックングプレートへの適用

図5は、バックングプレートの形状、接合装置および回転工具の制御方式を示す。バックングプレートはスパッタリングのターゲット材料に通電およびそれを冷却する裏板である。溝付きのベース板に蓋を被せ、ベース板と蓋を接合することで内部に冷却水路が形成される。FSW適用の動機は接合時の変形を従来の電子ビーム溶接に比べて低減することにある。このために、主軸モーターの回転トルクを適正範囲内に管理し材料中への入熱を適正化する工夫が施された。図中のバックングプレートは接合後ほとんど変形していない。FSWされたベース板と蓋の継手強度は従来の電子ビームに比べて高く、また水路シール性にも優れる。接合速度は400 mm/min程度であり、また接合温度は600℃以上と報告されている⁸⁾。FSWによる接合はすでに実用量産ラインとして日立伸材(株)にて適用されており⁹⁾、銅製品へのFSW適用は世界初である。

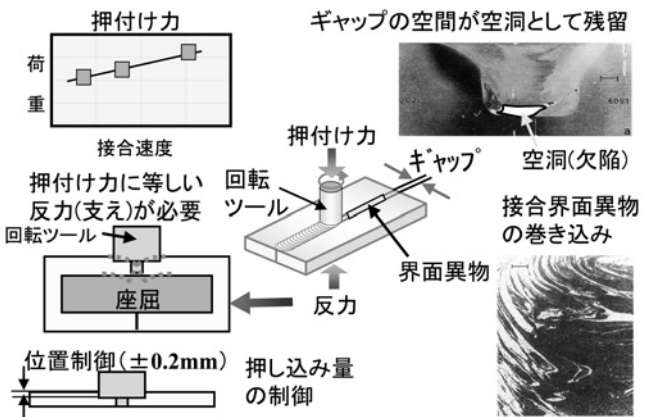


図3 摩擦攪拌接合の課題

表1 摩擦攪拌接合と溶融溶接との比較

特性他	溶融溶接	FSW
接合温度	融点以上	~0.75・Tm(非溶融)
金属組織	溶融凝固組織(結晶粒粗大化)	微細結晶組織(偏析なし)
変形	熱変形大	変形小(1/10)
機械的性質(塑性加工性)	伸び低下	良好
消費電力	大	溶融溶接の約2/3
技能者	熟練工が必要	不要

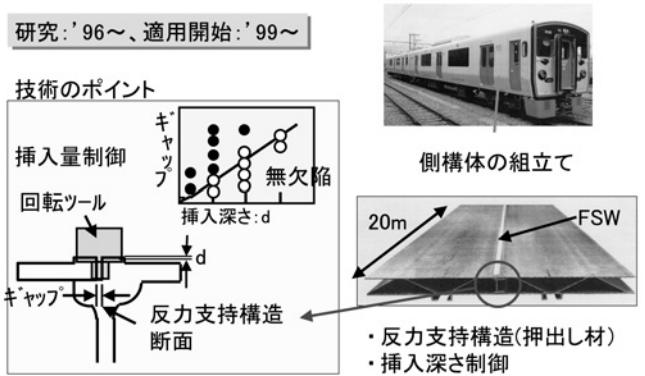


図4 鉄道車両への適用

4 適用対象の拡大

4.1 FSW国際会議の発表から見た最近の動向

2001年9月、神戸国際会議場にて開催された第3回FSW国際会議の発表内容を適用製品分野および適用材料の観点で分類した結果を表2と表3にまとめた。適用対象材料および製品については、実用化前の研究レベルの発表が多く含まれており、今後FSWの適用対象が拡大する分野を示唆するものとする。表において比率とは、関連する発表件数34件に対する該当分野、該当材料の発表件数の比である。

表より航空機と自動車が主要適用製品分野であることが分かる。注目される点は、米国および欧州では航空機、船舶の分野において軍および国のスポンサーシップにより体系的に研究が推進されていることであり、欧米は製造技術としてのFSWの革新性に着目している結果と考える。民間企業が独自の思惑で研究を推進している日本と異なる。またFSW装置に関連する発表が航空機、自動車に次いで高い発表件数比率となり、3次元形状部品の接合装置、ロボット、回転ツ

ル材料など装置産業としてFSWはその裾野を拡大しつつあることを伺うことが出来る。

FSW適用対象材料としては、アルミ合金が圧倒的に高い発表件数比率を示している。しかし、回転ツール材料の開発と並行してチタン合金、ステンレス鋼、低合金鋼、銅、マグネシウム合金へと適用対象材料が拡大していることが分かる。今後この傾向は加速され、FSWの適用範囲は大幅に拡大することが予測される。

4.2 鉄およびチタン系材料への適用における課題

図6は、メカニカルミリング法で結晶粒を微細化したオーステナイト系ステンレス鋼のFSWの状況と接合前後の金属組織である¹⁰⁾。母材の結晶粒径は約200nmである。接合部の結晶粒の成長は約2μmに抑制されており、溶融溶接では実現できない微細結晶の接合部が可能となる。スーパーメタル、超鉄鋼材料と呼ばれる超微細粒材料の接合技術としての可能性を示唆している。ただし接合時に工具が赤熱され過酷な環境下に晒されるため、磨耗や欠損が発生し工具寿命が短

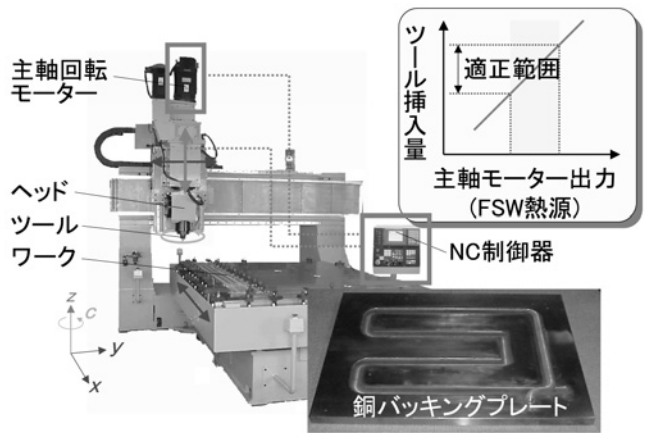


図5 銅製バックングプレートへの適用

表3 適用動向：適用材料による分類

適用材料	内容	比率(%)
アルミ合金	表1記載の多岐にわたる製品分野	73
ステンレス、低合金鋼	FSW用回転ツールの開発、接合部特性評価	9
チタン合金	FSW用回転ツール材料、航空機への適用	6
銅	スパッタ装置用バックングプレート	3
ニッケル基合金	航空機用耐熱材料への適用	3
マグネシウム合金	チクソモルト®部材の接合	3
異材接合	Fe/Alの接合	3

’01 FSW国際会議(神戸)発表より

表2 適用動向：適用製品分野による分類

適用製品分野	内容	比率(%)
航空機	ウイングボックス、カーゴフロア、ドア、リベット代替	24
自動車	Mg合金、ホイール、サスペンションアーム、他	18
FSW装置	3次元形状対応装置、スポット接合ロボット、FSWツール	15
鉄道車両	ダブルスキン構体、コストリット	6
電力・エネルギー	電力輸送管、鉄道電力線用電柱	6
船舶	軍用船低合金鋼	3
その他	特性評価、金属組織、超塑性加工、応力解析、他	28

’01 FSW国際会議(神戸)発表より

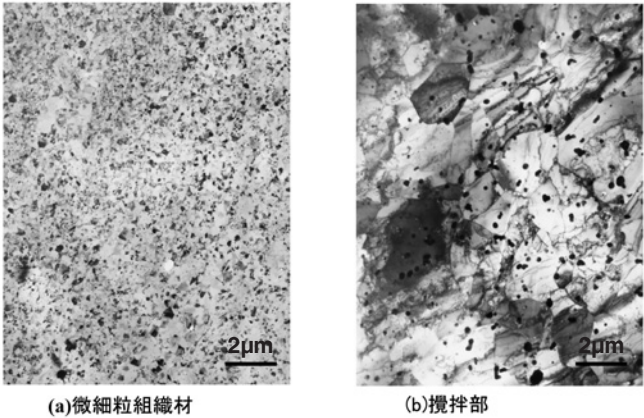


図6 超微細結晶ステンレスへのFSWの適用検討

く、実生産に使用できる状況にない。接合時の温度は、アルミ合金、銅合金の場合に比べて約2倍以上に達する。

このように溶融溶接が適さない材料で、かつアルミ、銅に比べて高融点の材料に対するFSWの課題は、回転工具材料の開発である。図7に各種工具材料の高温硬さと靱性との相関を示す。図において右下に位置するハイス、超硬工具、各種表面コーティング等では磨耗に対する特性が不足する。今後、高温での耐磨耗性に優れた左上に位置する材料の靱性改良あるいは複合化により、回転工具材料を開発する必要がある。

5 おわりに

摩擦攪拌接合は、自動車、船舶、航空機およびそれらの部品製造技術として普及することが期待される。そのためには適用対象材料としてアルミ合金以外の材料へも適用できる技術を確立する必要がある。また各種材料の接合条件、金属組織、機械的性質の相関に関するデータベースの蓄積が望まれる。

参考文献

- 1) 岡村久宣：摩擦攪拌接合 (FSW) の特徴と日本における適用状況，溶接学会誌，69，7 (2000)
- 2) 稲垣正寿ほか：摩擦攪拌接合 (FSW) の最近の動向，溶接技術，50，1 (2002)
- 3) Proc.3rd Int. Symp. on FSW, Kobe, Japan, 27&28 Sept (2001)
- 4) Yutaka S. Sato, et al.: Microstructural Factors Governing Hardness in Friction-Stir Welds of Solid-Solution-Hardened Al Alloys, METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS A, 32 (2002), 3033.
- 5) Yutaka S. Sato, et al.: Microstructural Evolution of 6063 Aluminum during Friction-Stir Welding, METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS A, 30A (1999), 2429.
- 6) Yutaka S. Sato, et al.: Parameters Controlling Microstructure and Hardness during Friction-Stir Welding of Precipitation-Hardenable Aluminum Alloy 6063, METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS A, 33A (2002), 625.
- 7) 石丸靖男：世界のFSW法適用の現状と動向，溶接技術，50，6 (2002)，73.
- 8) K. Okamoto, et al.: Fabrication of backing plates of copper alloy by friction stir welding, 3rd Int. Symp. on FSW, Kobe, Japan, 27&28 Sept (2001)
- 9) 日立伸材 銅へのFSW適用で高性能・精密接合実現，溶接技術，49，6 (2001)，108.
- 10) 石橋良ほか：微細結晶ステンレス鋼への摩擦攪拌接合法の適用，日本金属学会春期大会後援概要，(2002)，230.

(2002年6月7日受付)

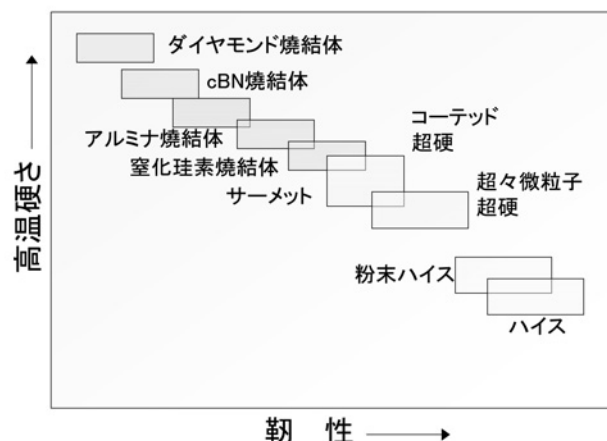


図7 FSW用工具候補材料