

(解説)

摩擦攪拌接合 (FSW) 技術開発の動向

下田陽一朗*¹ (博士 (工学))・鈴木励一*² (博士 (工学))

Trends in Friction Stir Welding (FSW) Technology

Dr. Yoichiro SHIMODA · Dr. Reiichi SUZUKI

要旨

本稿は、①摩擦攪拌接合 (FSW) の基本的なメカニズム、②鉄道、自動車、航空宇宙分野への実用例、③同種金属、異種金属、高融点金属への適用課題、④FSW装置・接合ツールなどのシステム開発動向、⑤派生技術について幅広くレビューした。FSWを用いたアルミ材同士の接合は、制御装置やツール形状の開発とともに実用化が進んでいる。アルミ材/鋼材の異種材および鋼材同士の接合に関する実用化の検討も行われている。接合装置の開発や新しいFSW工法の提案により、FSWの適用範囲の拡大が期待される。

Abstract

This paper provides an extensive review of the following: 1) the fundamental mechanism of friction stir welding (FSW), 2) practical examples of its application in the railway, automotive, and aerospace industries, 3) challenges related to applying FSW to similar metals, dissimilar metals, and high-melting-point metals, 4) current trends in the system development of FSW equipment and joining tools, and 5) derivative technologies. Notably, the use of FSW for aluminum joining has progressed in practical applications, aided by the development of control devices and tool shapes. Additionally, practical applications of joints of dissimilar materials, such as aluminum and steel, as well as steel-to-steel, are being considered. As joining equipment continues to develop and new FSW methods are proposed, the range of FSW applications is expected to expand.

検索用キーワード

摩擦攪拌接合, FSW, 固相接合, 同種金属接合, 異種金属接合, アルミニウム

まえがき = 造船、自動車、鉄道車両、電気機器、産業機械、土木・建築などの各産業において、“金属材料同士の接合”は必須の生産技術である。代表的な金属接合法の分類を図1に示す。機械的締結法と冶金的接合法に大別できる。機械的締結法は接合する材料に熱影響を与えないことを特徴とする接合法であり、ボルトとナットを用いた締結法が有名である。また、冶金的接合法は金属同士を直接接合することを特徴とし、接合する金属同士を溶融させる融接法、融点以下で接合する固相接合

法、接合する金属よりも低融点な合金(ろう)を溶融させて浸透拡散により接合するろう付けなどがあり、用途に応じて使い分けられている^{1), 2)}。本稿では、近年新しい固相接合法として発明された摩擦攪拌(かくはん)接合(Friction Stir Welding : FSW)について取り上げ、接合のメカニズムおよび実用例や先進のFSWシステム動向を紹介する。

1. FSWの発明と基本的メカニズム

FSWは、1991年に英国溶接研究所(The Welding Institute : TWI)によって固相接合法の一種として発明された³⁾。図2にFSWの原理図、図3に接合後の断面組織と模式図、図4に塑性流動現象のイメージを示す。FSWは、回転ツール(以下、ツールという)を高速で回転させながら接合部材に加圧挿入させ、ツールと接合部材間で摩擦熱を発生させる。摩擦熱によって接合部材内部は軟化されるが、融点には達さない。その結果、ツールの回転にともない、塑性流動によって接合部材が攪拌される。それにより、突き合わせた材料の界面が消失することで金属結合を成す接合法である。ツールはプローブ(またはピン)とショルダーで構成されている。プローブは接合部材内部を直接攪拌する。ショルダーは、プローブが部材に挿入されたときに、部材が外部に排出

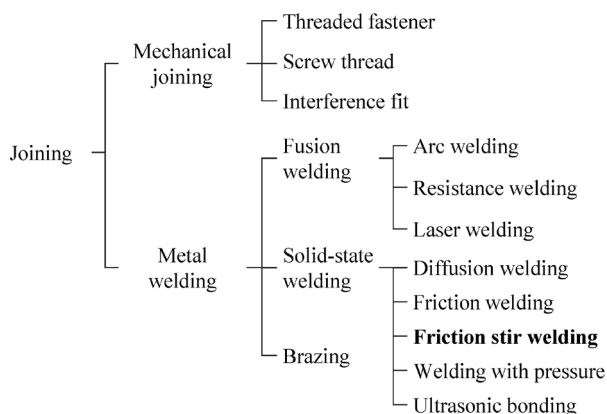


図1 金属接合法の分類
Fig.1 Metal joining methods

*¹ 技術開発本部 ソリューション技術センター (現 技術開発本部 企画管理部) *² 技術開発本部 ソリューション技術センター

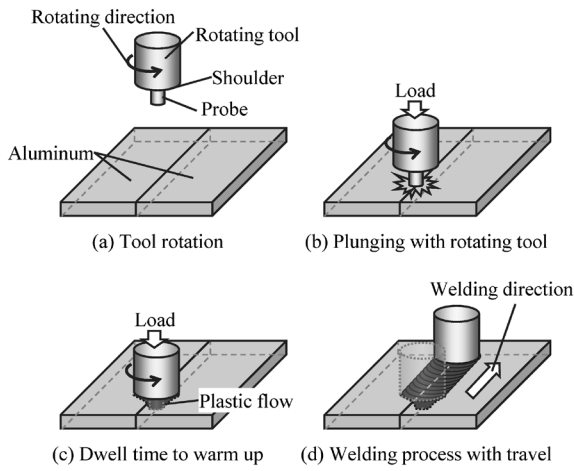


図2 FSWの原理
Fig.2 Mechanism of FSW

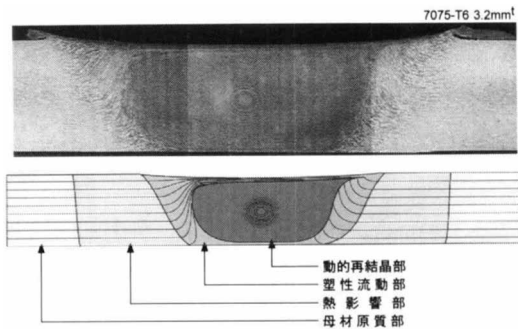


図3 FSWの断面組織⁴⁾
Fig.3 Cross-sectional structure of FSW

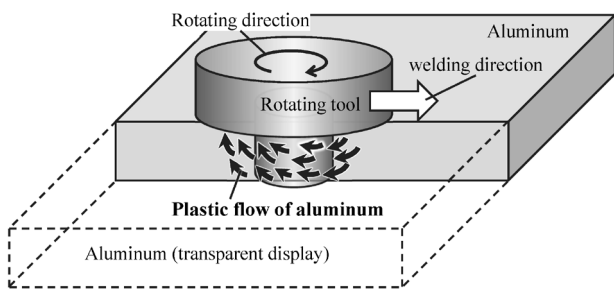


図4 FSW中の塑性流動現象のイメージ
Fig.4 Image of plastic flow phenomenon during FSW

されることを防止する機能と、部材表面から摩擦熱を与える役割を担う。接合する材料の種類や接合形状によって様々なツールの材質や形状が提案されており、詳細は6.2節で述べる。

2. FSWの特徴

FSWは材料の軟化と塑性流動を必要とするため、低融点金属の接合に向いており、工業的にはアルミニウム合金（以下、アルミ材という）同士の接合に最も適用が進んでいる。この場合に用いるツール材質は鋼（合金工具鋼）である。適用事例の詳細は3章で述べる。アルミ材同士を接合する手法として、融接法の代表である一般的なアーク溶接法、機械締結法であるボルト・ナット、ならびにFSWの3種類について比較した（表1）。①施工条件（作業環境）、②コスト（消耗材の必要性）、③量産を想定した自動化対応、④継手品質（マイクロ組織影響、熱歪（ひずみ）、塑性歪）と⑤補修対応の観点で整理した。FSWは、①施工環境がクリーン（光線、ヒュームが発生しない）、②安価（消耗材が不要）、③自動化可能、④高品質継手（固相接合のため熱歪が小さく、結晶粒が微細）などの長所を有している。いっぽう、⑤補修対応（手動施工）ができないことが短所である。材料を塑性流動させることが困難な鋼材同士や、異種金属接合を実現するための取り組み例については4章と5章で述べる。

FSWは、上記の長所①から④の中で、接合時の入熱が少なく接合後の変形が小さいことが特筆すべき特長とされている^{5)~7)}。この点について、FSWでも溶接条件によっては変形が生じることを著者は確認している。接合時に生じる変形の模式図を図5に示す。アーク溶接は冷却過程で溶融部が熱収縮する。いっぽう、FSWでは板厚4mmのA5058同士の突き合わせ接合時に約8kNのツール押し込み荷重が発生することを、谷らが確認している⁸⁾。このような押し込み荷重の反力により、溶融溶接で考慮する必要のない塑性歪が生じることがある。その抑止には、接合形状に応じた拘束方法の検討が重要であると考えられる。

表1 FSWと従来接合法との特徴比較
Table 1 Feature comparison between FSW and conventional joining methods

	Fusion welding (arc welding)	Non-fusion welding method		
	MIG (Metal Inert Gas)	Threaded fastener (bolt and nut)	FSW	
Construction conditions	Work environment harm	Fume, spatter, ultraviolet	Clean	Clean
	Shielding gas	Necessary	Unnecessary	Unnecessary
	Auxiliary materials	Necessary (welding wire)	Bolt & nut	Unnecessary
	Automated system	By robot	Difficulty	By robot or machining center
	Repair joint (handheld)	Possible	Possible	Impossible
	Joint shape	No restrictions	Fillet joining is difficult and pre-drilling required	Fillet welding is difficult
	Similar metal joining (steel)	Possible	Possible	Difficulty (need to high melting point tool material)
Joining quality	Dissimilar metal joining	Difficulty (formation of thick intermetallic compound layer)	Possible	Possible (need to control the position of the rotation tool)
	Process temperature	Above melting point	Room temperature	Below melting point
	Microstructure after joining	Melt-solidified structure (crystal grain coarsening)	Not effected	Crystal grain refinement
	Thermal strain	Large	Non	Little
	Plastic strain	Non	Little	Large

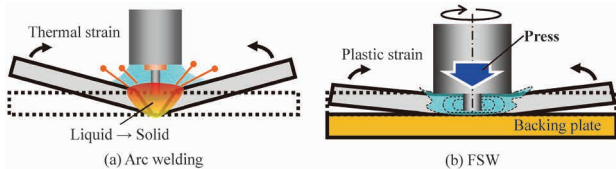


図5 アーク溶接とFSWの変形機構
Fig.5 Deformation mechanism of arc welding and FSW

3. アルミ材同士のFSWの実用例と提案例

FSWは鉄道車両、自動車、船舶といった産業で実用化されている。航空宇宙産業では事例は少ないものの、量産適用した報告がある²⁴⁾。米国では航空宇宙向けで実用化を目指した取り組みが活発に行われている。

3.1 鉄道車両

鉄道車両ボディは、炭素鋼製、ステンレス鋼製、アルミ製がある。例えば新幹線は全てアルミ製であり、長尺のアルミ押出材を接合して閉空間を形成することで、乗車用の大空間確保と安全性確保のための堅牢(けんろう)性の両立が達成されている(図6(a))。さらに構造部分に着目して分類すると、シンプルな板状の押出材を使ったシングルスキン構造(図6(b))と、立体的な押出材を組み合わせて二重構造としたダブルスキン構造(図6(c))が提案されている。後者はとくに静音性に利点があり、これらの長尺かつ直線的溶接線を有する押出材の組立には、通常は熔融溶接に代表されるアーク溶接が適用されている。しかし、表1に示したようにアーク溶接は光線やヒュームが発生するため作業環境が悪く、さらに溶接後の熱歪に起因した品質課題(変形)が残る。いっぽう、FSWは原理的にクリーンな施工環境が実現され、熱歪の懸念も極めて小さい。鉄道車両ボディは閉空間であることから、構造上拘束された状態で接合が行えるためにFSW特有の塑性歪の懸念も小さい。このようにFSWの利点を大きく活かすことができるため、鉄道車両は最もFSWの普及が進んでいる産業分野となっている^{10)~14)}。

3.2 自動車

これまでに、多くの自動車部品にFSWが適用されている^{9), 17)~19)}(表2)。車体の軽量化策には、①軽量素材への置換、②場所ごとの板厚最適化といった手段がある。②の一例として、テラードウェルドブランク²⁰⁾と呼ばれる、異なる板厚の素材を接合する手法がある。鋼材同士はレーザー溶接、アルミ材同士は低コストでエネルギー効率の高いFSWが選択されることがある²¹⁾。さらに、近年注目されているEV(電気自動車)に必要な電池は、外部からの衝撃に対して保護するため筐体に格納される。電池パック筐体(きょうたい)には種々の素材と接合法が適用されている。底板には大面積のアルミ平板を適用したものが多く接合組立の必要がないが、特殊な例として中空押出材を底板に用いる場合もある。幅広の押出材製造が困難なため、押出材同士をそれぞれ接合して大面積化する必要があり、その接合手段としてFSWが用いられている。その代表車種として、日産自動車(株)製のアリアが例に挙げられる(図7)。

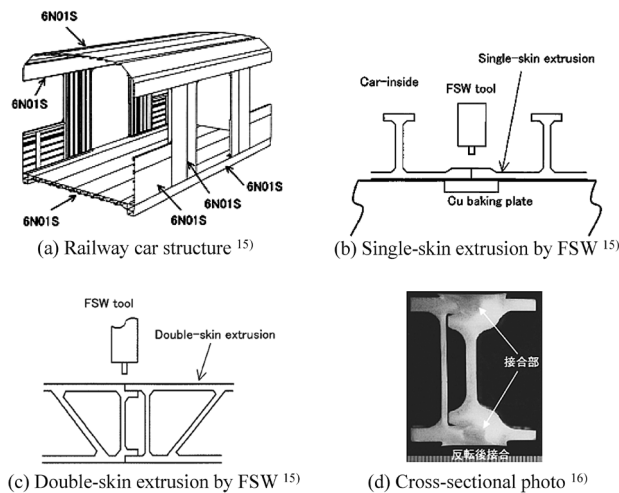


図6 車体構造とFSW適用部位
Fig.6 Railway car structure and FSW application parts

表2 FSW適用事例(自動車関連)

Table 2 FSW application examples (automobile manufacturers related)

Automotive manufacturer	Applicable models (release year)	Parts
Honda Motor Co., Ltd.	FCX Clarity	FC subframe
	ACCORD (2012)	Front subframe
Nissan Motor Co., Ltd.	CIMA (1991)	Suspension arm
	ARIYA (2020)	Battery housing
AUDI	R8	Center tunnel (crash relevant structure)
Mercedes-Benz	SL	Center tunnel (crash relevant structure) Floor structure

底板に対して垂直に立つサイドフレーム、クロスメンバとの接合には、すみ肉溶接対応性を長所とするMIG(Metal Inert Gas)溶接が一般的に用いられている。これに対し、筆者らはこれらの垂直部材をつば付き押出材とし、FSWを用いてつば部と底板を重ね接合した電池パック筐体を試作した(図8)。溶接品質の安定性、水密性の確保、生産性については今後の取り組み課題である。

3.3 航空宇宙

航空宇宙部品は、鉄道車両や自動車と比べてFSWの適用事例は少ないが、少しずつ実機適用部品が現れはじめている^{22)~25)}(表3)。富士重工業(株)(現:株SUBARU)は2004年に無人標的機(軍用ドローン)へFSWを適用した²²⁾。これは量産事例として国内初である。従来アルミ製航空宇宙部品の接合にはTIG(Tungsten Inert Gas)溶接が用いられているが、①接合前処理作業性、②安定施工維持(矯正、熱処理、補修)の難しさなどの短所があった。いっぽう、FSWは①接合前処理が不要、②安定した接合が可能という長所を持つため、外装だけでなくロケット推進薬タンクに適用された。この事実は、タンクの内圧や飛行中の高負荷に対して、FSWが気密性、継手特性といった高い信頼性を持った接合部が得られる手段として認められたことを示している^{23), 25)}。

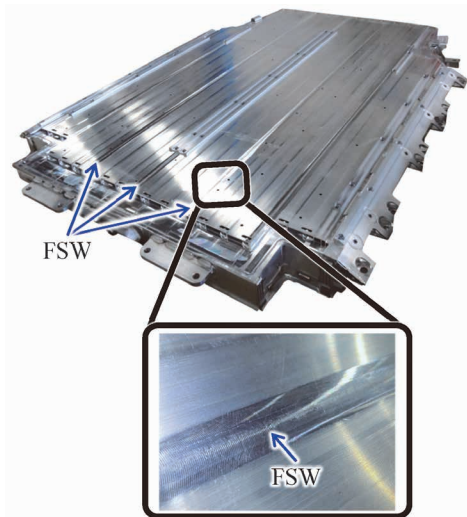


図7 電池パック筐体 (日産自動車㈱「アリア」)
Fig.7 Battery housing (Nissan Motor Co., Ltd.「ARIYA」)

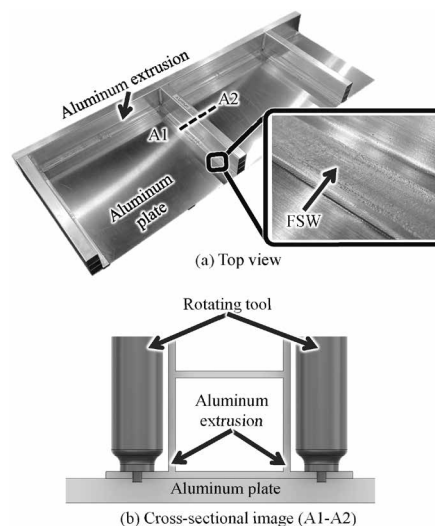
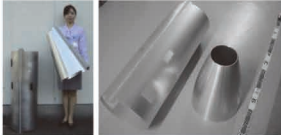

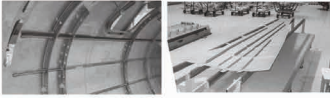



図8 FSWを用いた電気自動車向け電池パック筐体試作
Fig.8 Trial production of battery housing for electric vehicles applying FSW

表3 FSW適用事例 (航空宇宙関連)
Table 3 FSW application examples (aerospace related)

Manufacturer	Applicable models	Parts
Subaru Corporation	Target drone	Nose cover Engine rear nacelle  22)
Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.	Rocket (H-IIB)	Fuel tank  23)
Eclipse Aviation	Airplane (Eclipse500)	Body Main wing  24)
Boeing	Rocket (Delta IV)	Fuel tank  25)

4. 異種材のFSWの実用例と適用検討

自動車などの輸送機器の軽量化がいつそう強く求められるようになっており、軽量なアルミ材と安価で高強度な鋼材を組み合わせたマルチマテリアル車体構造が提案されている²⁶⁾。この実現に必要な異種金属材料接合が新たな技術課題として浮上した。アルミニウムと鋼は機械的・物理的諸特性が異なり、一般的な溶融溶接では脆弱な金属間化合物相が厚く形成するために、良質な継手を形成することが困難である^{27), 28)}。これまでに実用化された異種材接合法としては、ボルト・ナット、SPR (Self-Pierce Riveting), FDS (Flow Drilling Screw) といった機械締結法、または接着剤が挙げられるが、さら

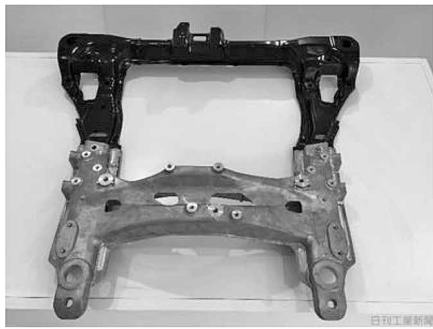
なるコスト低減や生産性向上および継手特性の改善が望まれている。

4.1 アルミ材／鋼材の重ね接合の実用例

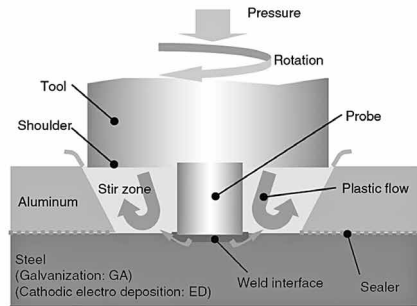
本田技研工業㈱は2012年型アコード用として、アルミダイキャストと鋼材を組み合わせたフロントサブフレームの異種金属接合を、ボルト締結とFSWの組み合わせで実用化した。このような構造と接合法は世界初である²⁹⁾ (図9)。

4.2 アルミ材／鋼材の突き合わせ接合の適用検討

アルミ材と鋼材を突き合わせてFSWにより直接接合した実用化例は現在のところないため、ここでは検討例を紹介する。福本らは板厚5 mm同士のアルミ材と鋼材の突き合わせFSWの可能性を検討した。プローブは鋼



(a) Appearance of aluminum diecast and steel mixed sub-frame³⁰⁾



(b) FSW mechanism of steel and aluminum²⁹⁾

図9 アルミダイキャストと鋼板のFSW例
(本田技研工業(株)「アコード」)

Fig.9 FSW example of aluminum die-cast and steel plate
(Honda Motor Co., Ltd.「ACCORD」)

材より硬質な超硬合金とし、プローブをわずかに鋼材に接触させ、鋼材は接合方向に対してツールの回転方向が一致する側に配置することで接合ができることを明らかにした³¹⁾。さらに、安井らはツール形状を最適化することで、アルミ材と鋼材の突き合わせFSWを工業的許容速度(1m/min)でおこない、継手強度試験においてアルミニウム母材破断を成す継手の試作に成功した^{32), 33)}。ただし、プローブの狙い位置がわずかにずれるだけで継手強度が低下するといった健全な接合条件範囲の狭さの課題があり、工業的実用化に向けての取組が必要であると筆者らは考えている。

4.3 樹脂/金属の接合

金属と高分子材料の直接接合は、材料構造が基本的に異なるために原理的に困難であり、ボルト・ナットなどの機械締結法が適用されている³⁴⁾。したがって、樹脂と金属のFSWが量産適用された報告例は見当たらない。実用化に向けては樹脂と金属の接合界面形成技術が重要であり、これまでに樹脂とアルミ材をFSWにより直接接合する研究がなされている。接合を行うためには、極性官能基を有する樹脂母材あるいは表面に極性官能基を付与した樹脂を用いる必要がある。この樹脂とアルミ材のFSWを行うことで、アルミニウムの表面酸化皮膜(Al_2O_3)と極性官能基が結合して接合できることが報告されている³⁵⁾。ただし、実用化に向けた生産性や継手の信頼性にはまだ課題が残る。

5. 鋼材同士の接合の適用検討

鋼材同士の接合にFSWが量産適用されたとの報告例は見当たらない。その理由は、鋼材同士をFSWすると

接合部の温度が約1,100~1,200℃まで上昇するといわれており、一般的な鋼製ツールでは耐熱性、耐摩耗性が不足するためである。実用化するためには、ツール特性の向上が必要である。これまでに研究されているツール素材については6.2節で述べるが、超硬合金製ツールを用いて引張強さ590~1,180 MPa級の高張力鋼板同士を突き合わせてFSWした報告がある³⁶⁾。引張強さ980 MPa級までの鋼板同士のFSW継手は母材とほぼ同じ引張強度を示し、1,180 MPa級の鋼板同士の接合においては約84%の継手効率を示した³⁶⁾。また、大幅な接合速度の向上を目的として、上下両面にFSWツールを配置して独立に回転させることが可能なシステム開発の報告がある³⁷⁾。しかし、設備コストとツールのランニングコスト、そしてアークやレーザなどほかの溶接法に対するメリットが明確でないため、次世代技術としての位置付けが適切であろうと筆者は考えている。

6. FSWシステムの発展

FSW装置はツールを保持して回転させるための主軸モータ、およびツールの位置決めを行うための駆動軸が必要である。TWIは当初大型のフライス盤を使用していたが、開発が進むにつれてツール押し込み時の反力に耐える装置剛性や長尺のアルミ押出材接合の必要性から、装置のさらなる大型・長尺化が図られるようになった。また、接合中のツール挿入深さが表面のバリや欠陥の発生といった接合品質に影響することから、挿入深さを制御する方法として、①位置制御、②荷重制御、③主軸負荷制御などが開発されている。②、③は接合温度や材料の影響を受けやすいが、形状対応性(曲面接合)が良いという特長を持つ³⁸⁾。

6.1 接合装置




FSWシステムはマシニングセンターとロボットの2種類に大別され実用化されている^{39)~42)}(表4)。マシニングセンターは高剛性であり高い位置決め精度を有するが、設置スペースや接合自由度に制約がある。いっぽう、多関節ロボットは形状面での高い接合自由度(曲面接合可能)を有するが、剛性やツールの位置決め精度に課題が残る。

6.2 接合ツール形状・素材

FSWに用いるツールは、①接合する材料との摩擦発熱、②接合する材料同士を攪拌により混合させる役割があり、その材質と形状は継手品質に大きな影響を及ぼす。図10にツール例を示す。材料内部の攪拌を促進するために、プローブにネジ(螺旋)加工したものがある。ショルダーは、外部への材料排出抑制と摩擦熱を増大するために、凹面形状やスクロール形状に加工したものが多い。ツール形状は、接合する材料の種類、板厚、継手形状などによって異なるため規格化されていない。

ツールの素材は、アルミ材のような低融点金属の接合に用いる場合には、コストや入手性の観点でSKDなどの合金工具鋼が一般的に使われている。いっぽう、鋼材同士のFSWでは接合部が高温となるため合金工具鋼では寿命が短く、①高融点合金系(W, Co, Ni, Ir)、②

表4 FSWシステム
Table 4 FSW systems

	Specification		
	Machining center type		Robot type
	Gantry	Vertical	
Example photo			
Placement area	Wide	Middle	Small
Machine rigidity	High	High	Low
Positioning accuracy	Low	High	Low
Welding speed	Middle	High	Low to middle
Machine price	High	Middle	Low to middle
Welding shape	Three dimensions (3-axis welding)	Three dimensions (3-axis welding)	Three dimensions (5-axis welding)

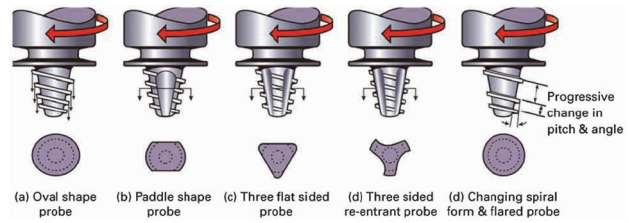
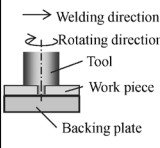
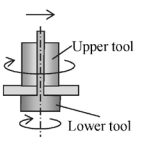
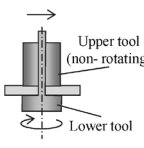
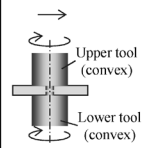
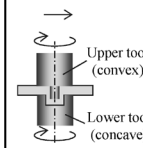


図10 FSW ツール例⁴³⁾
Fig.10 Examples of FSW tool

表5 新しいFSW工法の提案
Table 5 Proposal of new FSW processes

	One side tool			Double side tool	
	Conventional FSW	Bobbin tool		—	TATSUMAKI
		Conventional type	Stationary shoulder		
Mechanism					
Backing plate	Necessary	None	None	None	None
Upper shoulder	Rotating	Rotating	Non-rotating	Any direction of rotation	Any direction of rotation
Lower shoulder	—	Rotating	Rotating		
Welding defect (kissing bond)	Unavoidable	None	None	None	None
Surface burr	Unavoidable	Unavoidable	None	Unavoidable	Unavoidable
Axial load	Heavy	Almost none	Almost none	Heavy	Heavy
Plate thickness correspondence	Tool change required	Tool change required	Tool change required	Tool change required	Unnecessary tool change

超硬合金系 (WC-Co), ③セラミックス系 (PCBN, Si₃N₄), ④高融点合金+セラミックス複合系の四つの分類が提案されている。なかでも, コストと耐久性の観点で, 近年とくに④が注目されている⁴⁴⁾。

6.3 接合ツールシステム

一般的なFSW ツールは一つのショルダーと一つのプローブから構成され, 接合は材料上面から施工されるためワンサイドツールと呼ばれている。ワンサイド接合では, ツール押し込み荷重を受けるために裏板を用いる。裏板との接触を避けるために, プローブは接合する材料の板厚よりわずかに短く設計されている。この幾何学的問題により, キッシングボンドと呼ばれる初期突き合わせ面が残存する欠陥が発生しやすい課題があった。この課題に対し, 二つのショルダーと一つのプローブからなるポピンツールと呼ばれる工法が開発された⁴⁵⁾ (表5)。本工法は, 原理的にキッシングボンドが発生しない長所がある。ステーションナリーショルダータイプは鉄道車両の側パネル製造で実用化されている⁴⁵⁾。また, キッシン

グボンド抑止に加えて高速接合を目的に接合上下両面にFSW ツールをそれぞれ配置し, 独立して回転させる両側ツールシステムが開発されている⁴⁶⁾。しかし, 実用化に向けて設備コストにまだ課題があるものと筆者らは考えている。

7. 接合以外への応用 (冷却流路形成)

FSW はツールを材料に押し込みツールの回転と移動によってツール通過後の空洞を埋め戻す原理であり, 接合条件によって様々な欠陥が発生することが知られている⁴⁷⁾。下田は, 連続的に発生する内部欠陥 (トンネル空洞) は冷却水路として活用できるのではないかと考えた⁴⁸⁾。同様にTWIではこのトンネル欠陥を確実に実現するために, 図11に示すようにプローブの回転に伴って材料内部をスパイラル状に上昇させ, ツール上部に設けた非回転の穴からアルミ材を積極的に外部に排出させる機構を発明した⁴⁹⁾。ただし, 実用化されているかは不明である。

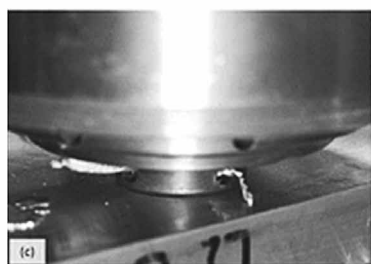
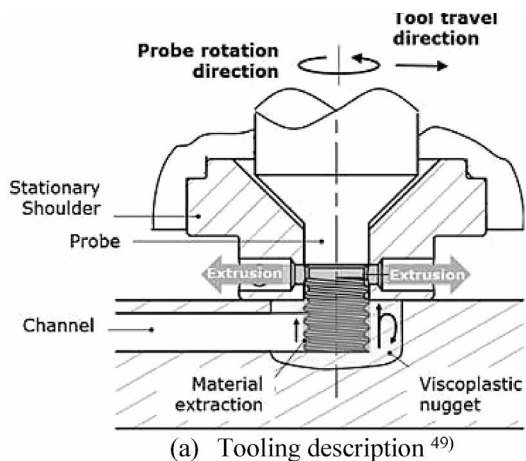


図11 TWI社のプロセスCoreFlowの概略図および写真
Fig.11 Schematic and photo of CoreFlow process by TWI

むすび = FSWはアルミ材同士の接合のみならず、接合ツール素材の開発によって高融点の鋼材同士やアルミ材／鋼材といった異種金属まで接合可能という報告が多数発表されており、研究活動が活発である。いっぽうでFSWの適用事例はまだ少なく、実用化するうえでの様々な技術的課題があるものと感じている。当社は国家プロジェクト「新構造材料技術研究組合」(ISMA)の一員として、産学連携研究活動を行ってきた。本プロジェクトは2022年度をもって研究活動を終了したが、2023年度以降はFSWの実装化を見据えたフェーズへ進展する。引き続きISMA活動に用いた高剛性FSW装置ならびに当社保有FSWロボットを活用して、各種産業の発展へ貢献する研究活動を行う所存である。

参考文献

- 1) 産報出版. SAMPO web スキルアップ講座 溶接材料編. 2023. https://www.sampo-pub.co.jp/omoshiro/skillup/post_428.html, (参照2023-03-27).
- 2) 溶接情報センター. 接合・溶接技術Q&A. 日本溶接協会, 2012, Q07_01_01. https://www-it.jwes.or.jp/qa/details.jsp?pg_no=0070010010, (参照2023-03-27).
- 3) W.M. Thomas. Friction Stir Butt Welding. International Patent Application No. PCT/GB92/0223. GB Patent Application No. 9125978.8. 1991-12-06.
- 4) 古賀信次. 川崎重工業溶接学会誌. 2000, Vol.69, No.3, p.201-205.
- 5) 藤井英俊. 溶接学会誌. 2008, Vol.77, No.8, p.731-744.
- 6) 廣瀬ほか. 軽金属. 2006, Vol.56, No.3, p.184-188.
- 7) 森久史ほか. 軽金属. 2007, Vol.57, No.11, p.506-510.
- 8) K. Tani. Quality Assurance of Friction Stir Welds. Preprints of the National Meeting of JWS. 2011, Session ID 215.
- 9) 大石ほか. まてりあ. 2014, Vol.53, No.12, p.603-607.
- 10) 宮本俊治ほか. 日立評論. 2001, Vol.83, p.11-14.
- 11) 水村武司ほか. 特許庁技術懇話会tokugikon. 2010, No.258, p.41-46.
- 12) 岡田俊哉. 溶接学会誌. 2012, Vol.81, No.7, p.38-45.

- 13) 橋本健司ほか. 総合車両製作所技報. 2013, No.2, p.48-53.
- 14) 吉澤正皓ほか. 車両製作所技報. 2015, No.4, p.38-45.
- 15) 宮道知典. 電気製鋼. 2007, Vol.78, No.2, p.141-147.
- 16) 和嶋武典. 日本機械学会. 2009, Vol.112, No.1084, p.70.
- 17) 小林努ほか. Honda R&D Technical Review. 2009, Vol.21, No.1, p.46-54.
- 18) 軽金属溶接協会. 軽金属溶接. 2012, Vol.50, No.10, p.383-388.
- 19) A.B. Attar. Generalities and activities at institut de soudure. https://indico.cern.ch/event/749801/attachments/1703217/2743651/180628_FSW_vENG.pdf, (参照2023-03-27).
- 20) 蒔野秀忠ほか. R&D神戸製鋼技報. 2002, Vol.52, No.3, p.28-31.
- 21) 熊谷正樹. FSWの工業応用. WE-COMマガジン. 日本溶接協会, 2012, Vol.6, 12p.
- 22) SUBARU. 富士重工業アルミ合金薄板の摩擦かくはん(攪拌)接合(FSW)技術を実用化. ニュースリリース. 2004-08-31.
- 23) 後藤智彦ほか. 三菱重工技報. 2005, Vol.42, No.5, p.234-237.
- 24) 武久浩之. 軽金属. 2006, Vol.56, No.3, p.178-183.
- 25) ESAB. Friction Stir Welding, Technical Handbook.
- 26) 内藤純也ほか. R&D神戸製鋼技報. 2019, Vol.69, No.1, p.60-64.
- 27) 古川一敏. 溶接技報. 2005, No.2005-8, p.94-102.
- 28) 小椋智ほか. 軽金属. 2016, Vol.66, No.9, p.503-511.
- 29) 宮原哲也ほか. Honda R&D Technical Review. 2013, Vol.25, No.1, p.71-77.
- 30) 日刊工業新聞. 地平を拓く・車部品メーカーの挑戦(1) エフテック-新技術へたゆまぬ努力, 鉄とアルミ, 摩擦で接合/サブフレーム軽量化. 2016-07-07, <https://www.nikkan.co.jp/articles/view/00391818/0>, (参照2023-03-27).
- 31) 福本昌宏ほか. 溶接学会論文集. 2004, Vol.22, No.2, p.309-314.
- 32) 安井利明ほか. 溶接学会論文集. 2005, Vol.23, No.3号, p.469-475.
- 33) 安井利明ほか. 溶接学会論文集. 2007, Vol.25, No.3号, p.426-430.
- 34) 中田一博. 表面技術. 2021, Vol.72, No.12, p.642-648.
- 35) 中田一博. スマートプロセス学会誌. 2015, Vol.4, No.2, p.64-72.
- 36) 松下宗生ほか. 溶接学会論文集. 2009, Vol.27, No.4, p.360-370.
- 37) 保田雄亮. 革新的FSWによる超ハイテン接合部材の開発. ISMA REPORT. 2022, No.16, 2p.
- 38) 溶接情報センター. 接合・溶接技術Q&A. 日本溶接協会, 2012, Q07-13-07, https://www-it.jwes.or.jp/qa/details.jsp?pg_no=0070130070, (参照2023-03-27).
- 39) 日刊工業新聞. 【特集】主要工作機械メーカーの推し製品. 2021, https://biz.nikkan.co.jp/brand/mect2021/recommend_shibaura-machine.html, (参照2023-03-27).
- 40) 芝浦機械. 製品情報 門形マシニングセンタ MPF-FS series. https://www.shibaura-machine.co.jp/jp/product/machinetool/lineup/m_new/spec.html#mpf_fs, (参照2023-04-13).
- 41) Mazak. FSW(摩擦攪拌接合)技術. <https://www.mazak.jp/machines/technology/hybrid-multi-tasking-machine/fsw/>, (参照2023-03-27).
- 42) 日立パワーソリューションズ. 摩擦攪拌接合(FSW)装置. <https://www.hitachi-power-solutions.com/product/equipment/production-line-solutions/core/fsw/index.html>, (参照2023-03-27).
- 43) P.M. Mashinini. Research dissertation for process window for friction stir welding of 3 mm Titanium (Ti-6Al-4V). Nelson Mandela Metropolitan University, 2010, 123p.
- 44) 松下宗生. 高強度鉄鋼材料の摩擦攪拌接合(FSW). WE-COMマガジン. 日本溶接協会, 2020, Vol.36, 15p.
- 45) 宮道知典ほか. 鉄道車両へのFSW実用化. WE-COMマガジン. 日本溶接協会, 2020, Vol.36, 2p.
- 46) 朴勝煥ほか. 両面摩擦攪拌接合法による薄板接合性 両面同時摩擦攪拌接合法の開発(第2報). 溶接学会 平成22年秋季全国大会講演概要. 溶接学会. 2010, Session 335, 2p.
- 47) 藤井英俊. 溶接学会誌. 2009, Vol.78, No.4, p.38-46.
- 48) 下田陽一朗. 冷却路内蔵部材および冷却路内蔵部材の製造方法. 特開2010-253534. 2021-11-01.
- 49) TWI COREFLOW™: A SUB-SURFACE MACHINING PROCESS. <https://www.twi-global.com/media-and-events/insights/coreflow-a-sub-surface-machining-process>, (参照2023-03-27).