

FSW の工業応用

住友軽金属工業株式会社
熊谷 正樹

1. はじめに

摩擦攪拌接合 (Friction Stir Welding ; 以下 FSW と略) は 1991 年に The Welding Institute (TWI) で考案され、1996 年ごろから欧州でアルミ船に適用され始め、日本では鉄道車両分野で、米国では航空宇宙分野で適用が拡大した¹⁾。その後、点接合など各種派生技術の開発と共に発展し、最近では自動車分野でも多用されるようになってきた。FSW はアーク溶接と異なり溶加材や不活性ガスが不要なので安価であり、閃光やスパッタが生じないため作業環境がクリーンで製品を汚すことも無くメリットが大きい。低融点で塑性加工性に優れるアルミニウム合金に向いている固相接合法であり、アーク溶接や抵抗スポット溶接では接合できなかった 2000 および一部の 7000 系合金や鋳物も容易に接合できるため、アルミニウムの用途拡大にも繋がる²⁾。ここでは、FSW の工業的な利用につき、適用例を交えながら解説する。

2. 広幅形材への適用

FSW がまず適用されたのは、アルミニウム合金の押出形材を幅方向に接合し、通常の押出機では生産できない広い幅の形材を供給する分野である。図 1 にその模式図を示すが、リブの付いた広いベース幅を持った押出形材を並列に並べ、長手方向に突合せ接合する。従来のアーク溶接では、歪みが大きく膨大な歪み修正作業を伴い、意匠面に使われる場合は余盛削除の作業も必要であったが、それらの工程の省略により大幅なコストダウンが可能になる場合がある。

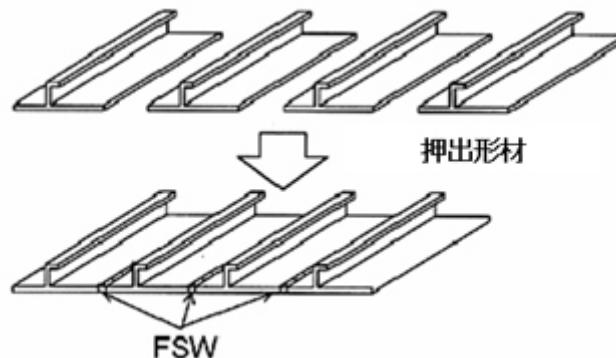


図 1 FSW 広幅形材模式図

図 2 に日本で最初に鉄道車両に適用された 700 系新幹線用床材を示す³⁾。ベース厚さが 2.3mm と薄い 4 枚の 6N01-T5 押出形材を 3 箇所同時に FSW で接合し、幅約 1500mm、長さ 5000mm の歪みの

少ない平坦なフロアパネルを生産した。接合部は、熱影響部を含む継手に応力が集中しないように厚さを 4mm とし、接合直前に突合せ面が離れないよう鋼製裏当て治具に溝を設け、厚くした型材の端部がジグにはまり込んで突合せ状態が変わらないようにして、裏面まで完全に接合した。従来の MIG 溶接では歪みが大きく、強固に拘束しないと後工程の組立ができなかったものが、簡単な重りでの拘束で後の周辺部との MIG 溶接が可能となった。その後も鉄道車両への適用は特に日本で進み、ダブルスキン型材のかん合継手による車両が多数生産されている。また、シングルスキンの広幅型材が **図 3** に示すリニアモーターカーの外板のほぼ全構体外板に採用され、流麗な表面を有する車両は 550km/h の高速走行でも良い結果を残している。



図 2 700 系新幹線用 FSW 床材



図 3 リニア実験車両

船舶の分野では北欧で大型フェリーボート等に 6082 合金の広幅型材が多用されている。日本では船舶用の材料として 5083-O 材が主流であり、消防艇の上部構造に FSW 広幅型材が用いられた例を

示す³⁾。5083 合金は 6000 系合金に比べて、FSW 時の温度である融点の 8 割程度では変形抵抗が高く、塑性流動性が悪いので最適接合条件範囲が狭い。6000 系合金より若干接合速度は遅かったが、**図 4** の消防艇のように、1250mm 幅、5000mm 長さの FSW パネルを MIG 溶接で繋ぐことにより平坦な上部構造の船体が得られ、造船工場での MIG 溶接及び歪み取りの工数が大幅に削減された。その後、FSW はテクノスーパーライナー等の大型アルミ船舶に適用されている。

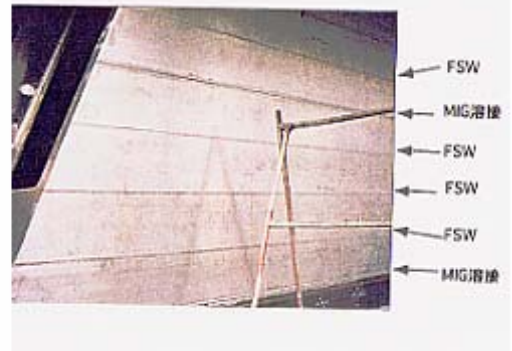
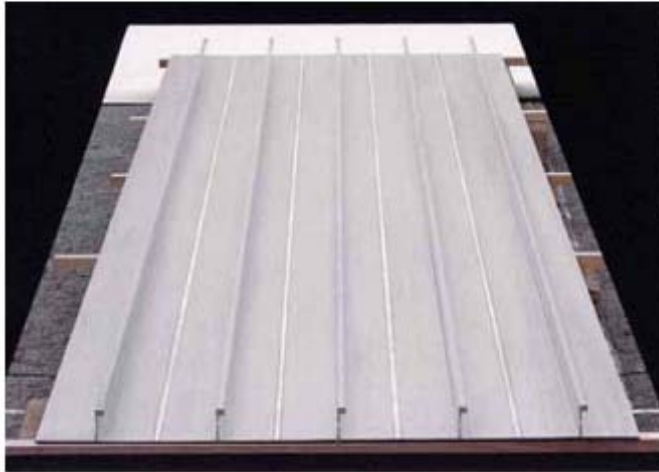


図 4 消防艇上部構造への FSW パネルの適用

次に大きな FSW の需要としては、橋梁床版が挙げられる⁴⁾。日本ではまず歩道橋に採用された。**図 5** は主桁部に FSW パネルが採用された J R 鉄道線を跨ぐ西唐津跨線橋の生産工程である。6N01-T5 形材を幅方向に FSW して広幅形材とし、それらを筒状に MIG 溶接し、さらに双胴構造に MIG 溶接して桁を製作する。現地の線路脇の広場で組み付けた桁を、一度に橋脚に乗せて一晩で工事を終えた。従来の鉄の跨線では、重いので一度に架橋できず、両端から施工するため路線を止める時間が長く問題があった。以降、アルミの歩道橋は毎年の塗装が要らない等、LCA (Life cycle assessment)、LCC (Life cycle cost) の点でも評価され、多数の適用例が見られる。鉄より耐食性に優れるため、海沿いの歩道にも多用されており、その後の調査でも腐食などの問題は少ない。また、自動車専用道路等で渋滞が起りやすい場所では、歩道を車道に変えて路線を増やす改善がなされる。歩道を新設せねばならないが、鉄やコンクリートでは重いため橋脚の補強が必要となる。軽量のアルミの歩道であれば橋脚工事を必要とせず、工事の簡素化が可能である。**図 6** は加古川バイパスの新加古川大橋北側の歩道である。台形の中空部を有する 6N01 合金の FSW 広幅形材が約 600m の歩道に敷き詰められている。歩行面は FSW の裏側で、この後舗装されたため表側からは直接見ることはできない。



図 5 歩道橋の製作過程
 (提供：株式会社 住軽日軽エンジニアリング)



図 6 新加古川大橋 FSW 橋梁床版
 (提供：株式会社 住軽日軽エンジニアリング)

構造部材ではなく、機能部材でも広幅形材の適用が盛んである。図 7 は一度の押出では困難なくし形の形材を幅方向に FSW 接合した例である。3 本のフィンを有する 6063-T5 押出材のベース部を多数 FSW し、広幅のヒートシンクを供給する。FSW で接合することにより接合したことが判別でき

ない位の平坦度のベース面となり、少量の面削で電子部品等が搭載される面品質を得ることが可能である。肉厚バランスの悪い押出や、精密な断面形状を持つ大断面の押出は難しく、小さく押出して FSW で接合した方が、押出工具が簡素化でき、製品精度に優る場合がある。

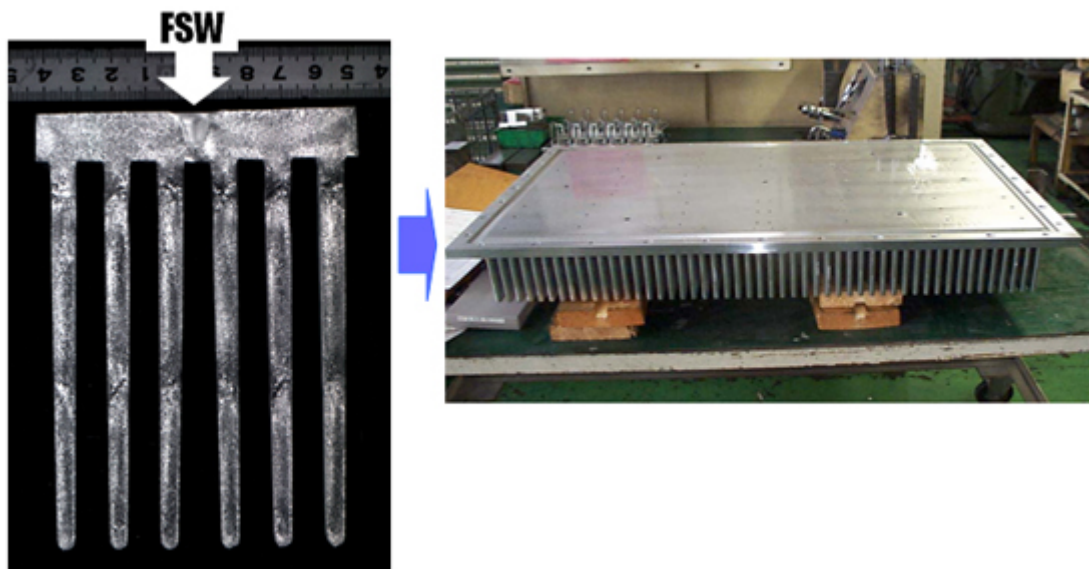


図7 広幅くし形ヒートシンク

3. アルミニウム合金板への応用

アルミ素材メーカーから見た FSW の利点は、押出材や鋳物の接合はもちろんであるが、圧延板についても圧延設備に制限されることのない大板の供給が可能になる点である。図 8 のパラボラアンテナへの適用はその好例である³⁾。TV放送の地上派デジタル化に伴い、中型のパラボラアンテナの需要が急増したが、従来は純アルミの圧延材を MIG 溶接により接合し、その後ドーム状に金型成形していた。接合工法を FSW に変えることにより、成形時の割れが一切無くなり、余盛の処理も軽減された。図は 1100mm 幅の厚さ 4mm の 1100-O 板を 3 枚突合せ接合したものである。

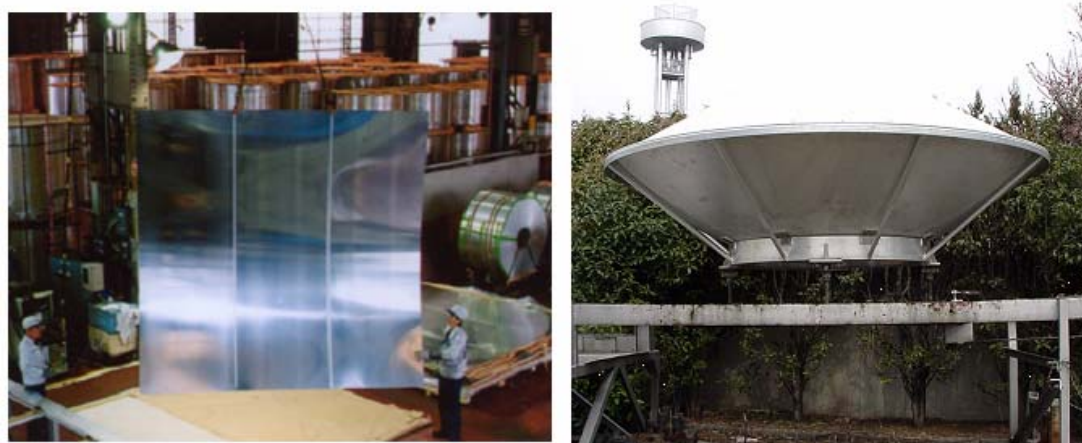


図8 FSW 大板のパラボラアンテナへの適用

自動車の軽量化ニーズが高まるにつれ、アルミニウム合金板は自動車ボディのクロージャー部品に多用されるようになってきた。テーラードブランクは予め板厚や強度の異なる板を接合してからプレス成形する技術で、材料の歩留り改善やプレス金型費やアSEMBリ費を軽減できるため、鋼板ではレーザー溶接が採用されている。アルミニウム合金では、レーザー光の吸収率の低さ等からレーザー溶接での適用例はほとんど無かった。FSW をテーラードブランクに適用するため、薄板や差厚部材の接合の検討を進めたところ他の接合法に比べてプレス成形性に優れることが明らかになった⁵⁾。また、熱処理をうまく利用することによりボディシート材である 6016 合金でも、熱影響部の無い FSW 継手が得られることも分かった。海外では Audi R8 のギアボックス周辺に既に使用されており、今後適用範囲が広がるものと予想される。

4. 複雑な形状の FSW

図 9 に各種継手形状の FSW 試作例を示す。角パイプ同士の突合せ接合（左上）、円筒シーム接合（左下）、管と棒の円周接合（右上）、管に蓋をはめ込み接合（右下）、等複雑な形状の接合も可能である。FSW は基本的に裏当てジグを必要とするが、型材の壁やリブ、または嵌め合わせにより母材を永久裏当てのように活用し、裏当てジグ無しで接合する場合もある。



図 9 各種 FSW 継手形状

図 10 は燃料電池車用サブフレームの FSW 例であるが、角パイプを主とするアルミ押出材を上手く組み合わせて、製品をロボットで動かしながら接合している⁶⁾。図 11 は八つ橋状に曲げた 2024-T3 板を円筒の内側からツールを差し込んで FSW 接合しているロケット燃料タンクの生産例であるが、

突合せ部を長手方向に強固に拘束して接合している。図 12 は押出ではできない大きさの角パイプを 2 枚のコ形に曲げた純アルミ板を FSW 接合することにより製作した粒子加速器用導波管である。これは突合せ部の内面に裏当てジグを当てた状態で FSW を行っている。図 13 は米国の Eclipse Aviation で生産されていたビジネスジェット機で、胴体や翼を曲げたスキン板にリブ材を重ね FSW 接合することにより製作した、従来のリベット構造を覆す構造の航空機である。

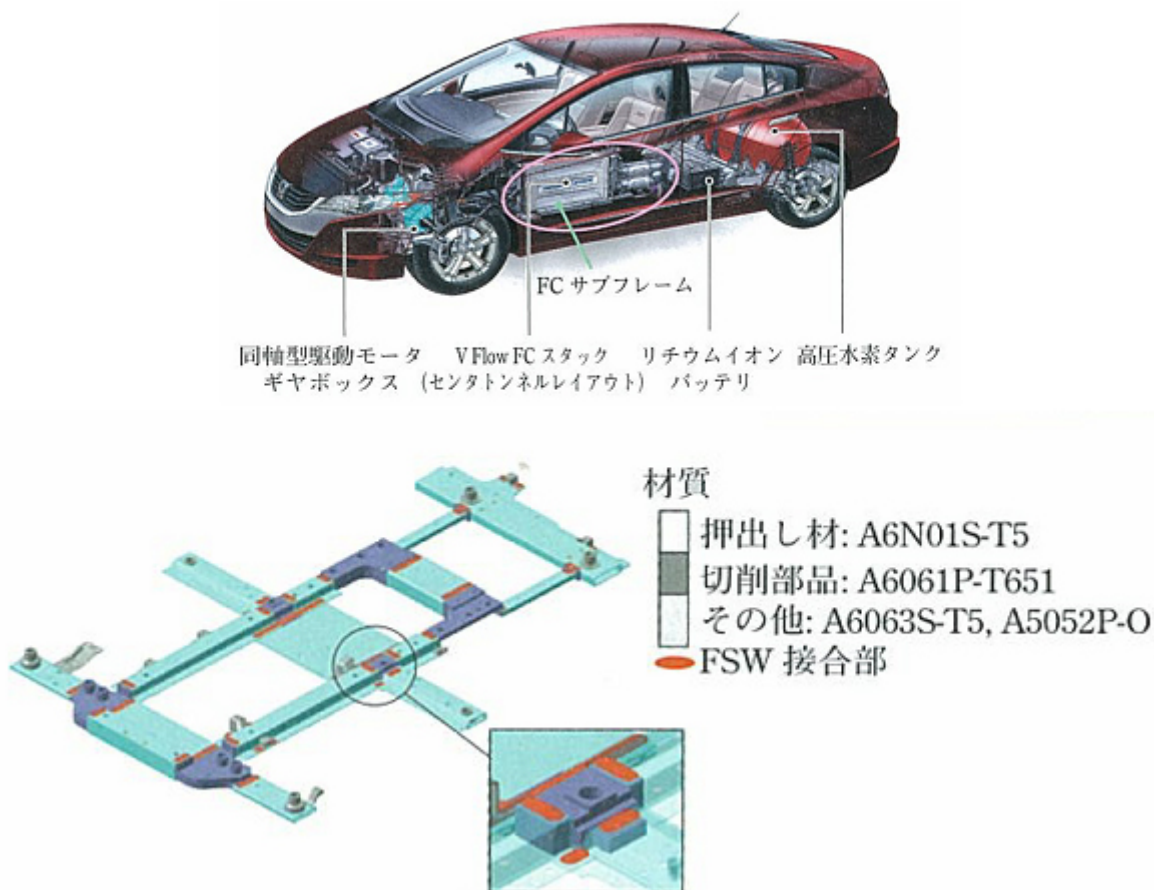


図 10 自動車フレーム部品への FSW の応用



FSW 装置

タンク円筒 FSW 状況

図 11 ロケット燃料タンクの FSW 装置と接合状況

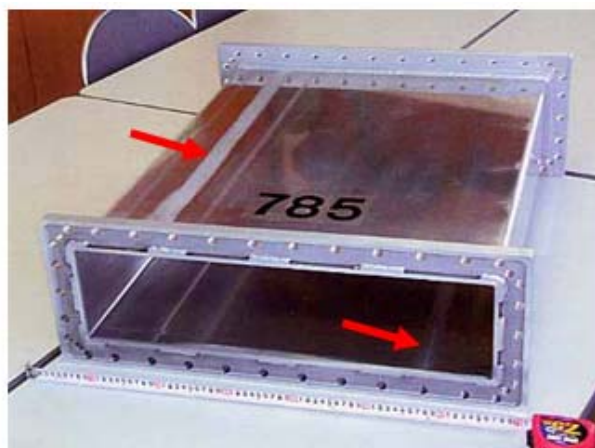


図 12 大型 FSW 角管の粒子加速器用導波管への適用



FSW ビジネスジェット機



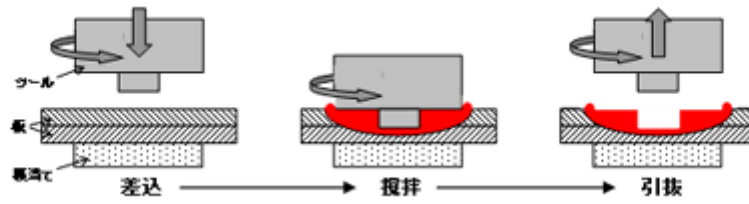
組立中の胴体



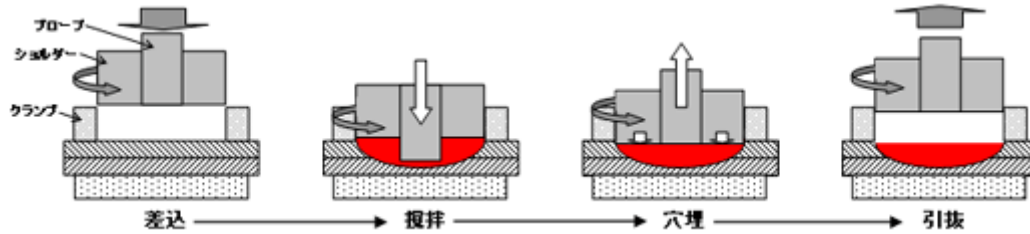
図 13 航空機構体への FSW の応用

5. 点接合への応用

FSW 点接合 (Friction Stir Spot Welding ; 以降 FSSW と略) の応用が日本で進んだ⁷⁾。図 14 に FSSW の原理を示す。図中(a)の従来法 (一体式ツール) とは、ツールを回転させながら重ねた板に差し込んで攪拌し、抜くだけで強度の高い継手が得られる方法である。抵抗スポット溶接のような、大電流、電極の冷却水、加圧のためのエアを必要とせず、スパッタが生じないため作業環境も良い。また、アルミニウム合金の FSSW ツールの寿命は数十万点ともいわれ、抵抗スポット溶接の電極より圧倒的に寿命が長い。図 15 に示すようにマツダスポーツカーRX-8 のフードおよびリアドアに適用され、その後多数の自動車の外板部品に適用されている。



(a) 従来法：一体式ツール (Fixed pin tool)



(b) 開発法：複動式ツール (Adjustable pin tool)

図 14 FSW 点接合の概念図



図 15 FSW 点接合の自動車への応用

図 14(b) の開発法 (複動式ツール) は、周辺のバリと穴を無くす FSSW 法であり、塗装性が良く、厚板になると継手強度が高く、接合面に他の部品が付く場合に密着できる等、種々の利点がある⁸⁾。まず回転しないクランプで外周部を押さえ、ピンを下板まで差し込んで攪拌し、ピンを抜き去ると同時にショルダーを押し込むことにより、穴の周辺の母材が塑性流動し穴を埋める。この工法では、下

側の攪拌が促進されるため、複数枚の重ね接合に効果がある。複動式ツールを用いた FSSW は世界的に研究開発が盛んに行われている。

図 16 にアルミニウム合金板と鋼板の FSSW について示す⁹⁾。アルミ側だけにツールを差し込み、界面に強い攪拌を生じさせて酸化皮膜や汚れを掃き上げ、界面に脆い金属間化合物が形成される前に接合を終わる。界面ではアルミ中に鉄が拡散し、広範囲にナノオーダーの非晶質層が形成されており、強固な接合状態が得られる。同様の方法が図 17 に示すにマツダロードスターのトランクに適用された。アルミニウムと鋼の溶接は不可能とされていたが、この方法が開発されたことにより、自動車のマルチマテリアル構造がより実現しやすくなった。最近では、アルミニウムと樹脂の異種材料の FSSW も可能になってきている。

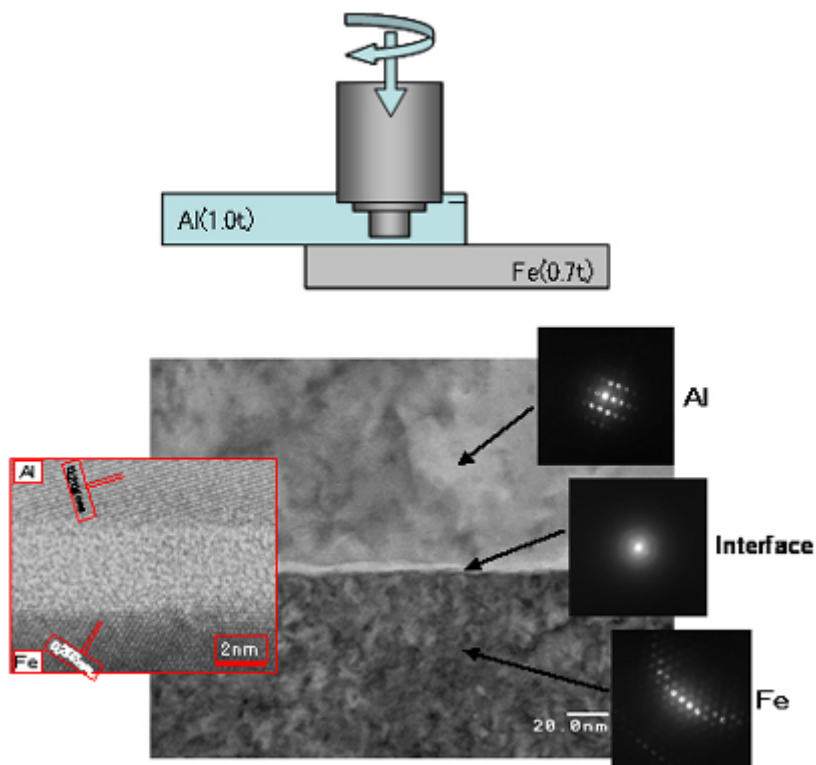


図 16 FSW 点接合による Al/Fe 異種金属接合



図 17 FSW 点接合による異種金属接合の自動車への応用

6. 先進のFSW技術

FSWの派生技術は枚挙にいとまがないが、最近注目されているのが糸巻き型ツールである。図18に糸巻き型ツールの応用例を示す¹⁰⁾。ツールが複動になっており、上側のショルダーの中のピンを突き出して先端にもショルダーを取り付ける。母材を上下からショルダーで挟んで荷重を掛けながら接合することにより、中空の継手でも裏当てジグ無しでFSW接合することができる。この方法によると、ツールの差込不足等による裏面の不完全が生じない、ツールの押し付け荷重が小さくてすむ、等の利点がある。鉄道車両用のダブルスキン形材同士の接合や、図19に示すH-II Bロケットの燃料タンクのドームの円周接合に実用化されている。

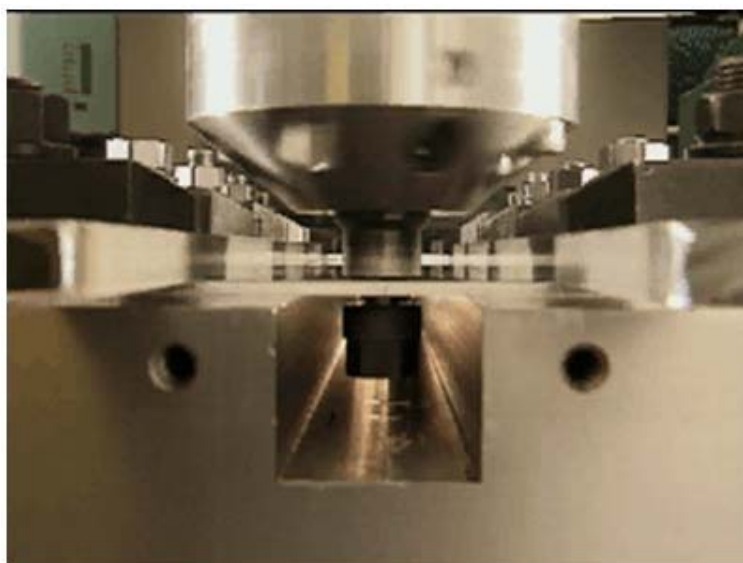


図18 ポピンツールによる中空FSW

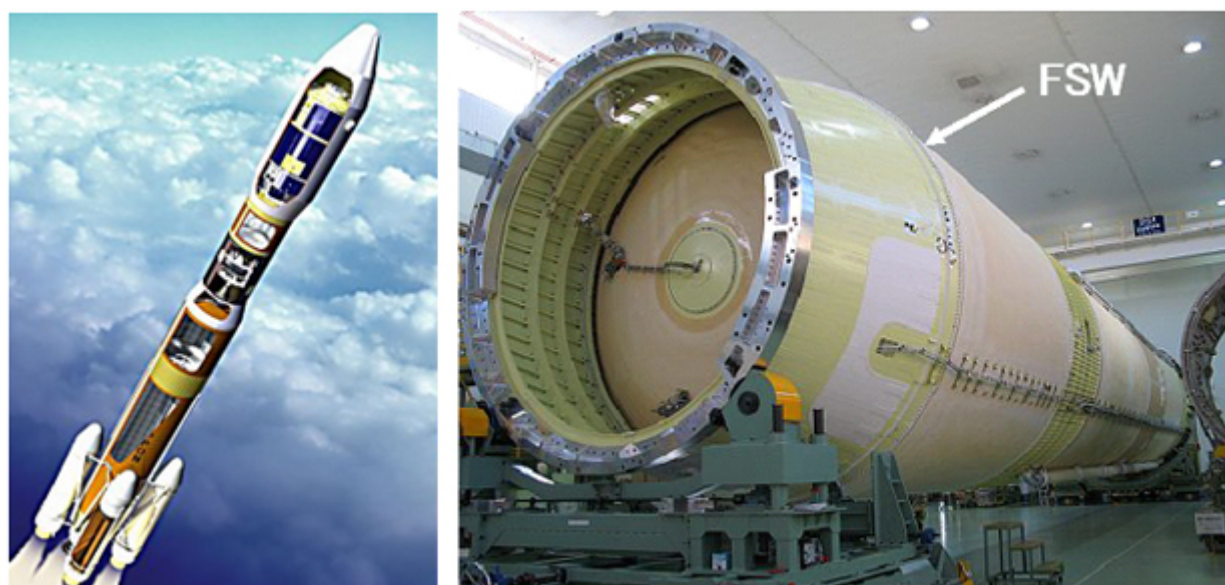


図19 ポピンツールによるFSWのロケットタンクへの応用

7. おわりに

FSW はここ 10 年余で大きく発展し、アルミニウム合金の一般的な接合技術となってきた。今後、ロボットによる複雑な 3D-FSW 製品、ショルダーが回転しないステーションナリーツールを用いた隅肉 FSW 製品等、さらに進化を遂げるであろう。接合に留まらず、鋳物の表面改質や Friction Stir Processing と称する材料組織改質や複合材の創製にも発展している。

2015 年に TWI の基本工業所有権が切れることから、爆発的に利用が拡大する可能性がある。また、軽金属溶接協会の尽力により FSW の ISO 化も進み、世界的に広く認知されるようになった。本技術によりアルミニウム合金の需要がますます増大することを期待する。

参考文献

- 1) C. J. Dawe:Welding & Metal Fabrication, (1995), 1.
- 2) 時末 光：FSW の基礎と応用，日刊工業新聞社，(2005)，188.
- 3) 熊谷正樹，田中 直：軽金属溶接，39（2001）, 22.
- 4) 大隅心平，山口進吾，熊谷正樹，田中 直，林 典史，喜田 靖:住友軽金属技報，44(2003)，147.
- 5) 熊谷正樹，箕田 正，田中晃二，浅野峰生：自動車技術会秋季学術講演会，(2005)，13.
- 6) 小林努，佐山満，矢羽々隆憲，加藤高士：Honda R&D Technical Review, 21-1(2009),46.
- 7) 熊谷正樹，田中晃二：軽金属学会第 102 回春期大会講演概要，(2002)，247.
- 8) 熊谷正樹，青木健太：溶接学会春季全国大会講演概要，76（2005）, 98.
- 9) 田中晃二，熊谷正樹，吉田英雄：軽金属，56(2006)，317.
- 10) 田中 直，熊谷正樹：溶接学会論文集，29(2011)，353.

<略歴>

1983 年 大阪大学工学部 冶金工学科 卒業
1983 年 住友軽金属工業株式会社入社 技術研究所配属
1997 年 博士（工学） 取得
2012 年 研究開発センター 主席研究員 現在に至る