

FSW 接合の 可能性を拓く 新技術



H-IIロケットの第1段液体水素タンク
©JAXA

今から約30年前に開発されたFSWは、
従来の接合では難しかった材料や製品を接合する技術として知られるようになった。
航空宇宙機器や鉄道、自動車をはじめ、その世界はますます広がろうとしている。
今後、FSW技術は私たちに何をを見せてくれるのだろうか。

固相接合の特徴を生かした FSW

摩擦攪拌接合（Friction Stir Welding、以下FSW）は、1991年に英国の溶接研究所（TWI）で開発された。金属を接合する方法とえば、よく知られているのが溶接である。溶接は、材料を溶融させて接合する。これに対し、材料を溶融させず固相のまま接合するのがFSWの特徴だ。

FSWでは、非消耗の接合ツールを回転させながら材料中に挿入し、接合線に沿って移動させて接合する。ツールと材料との間で発生する摩擦熱と、材料の加工発熱によって、軟らかくなった材料がツール周りを流動し、攪拌することにより接合する。溶接と異なり、材料は溶融しないので、その後凝固することもない。そのため凝固時の偏析、気孔の発生、高温割れなどが起きない。

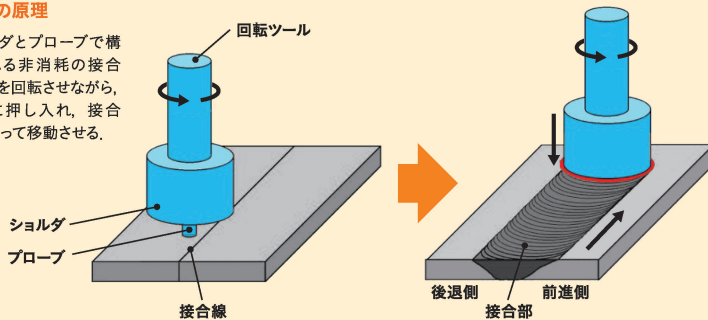
FSWは、作業をする上での利点も多い。接合速度が速い（溶接と同等以上）、脱脂や酸化膜除去などの前処理が不要、接合時にスパッタやヒュームなどが発生しない、などの点が挙げられる。

このように、多くの特徴を持つFSWは、溶接が難しいアルミニウムを始め、銅やマグネシウムなど融点が高い材料を中心に、適用の可能性が探られた。

早い時期からFSWの適用に取り組んだのは、欧米の航空宇宙機器メーカーであった。航空機や宇宙ロケットなどに使われる、ジュラルミンなどの2000系アルミニウム合金、超ジュラルミンや超々ジュラルミンなどの7000系アルミニウム合金は、溶接すると

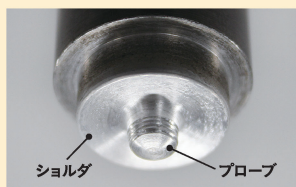
FSWの原理

ショルダとプローブで構成される非消耗の接合ツールを回転させながら、材料に押し入れ、接合線に沿って移動させる。



一般的なFSWの接合ツール

ショルダの中央は凹状になっている。アルミニウム合金やマグネシウム合金の場合、ツールは工具鋼で製作されており、接合時の摩擦はほとんどない。



高温割れが発生したり、疲労強度が落ちるなどの問題があるため、溶接ができず、リベット接合などが用いられてきた。FSWは、1999年に米国のデルタロケットの燃料タンクに初めて採用され、その後世界的に知られるようになっていった。

一方、日本で初めに適用されたのは、鉄道車両である。高速化のニーズに応えたアルミニウム合金製車体は、それまでの骨組みと外板とのシングルスキン構造*1から、大型中空押出材で構成されるダブルスキン構造*2へと移行した。これに適した接合技術として着目されたのがFSWである。溶接による熱ひずみが小さく、接合作業の効率化や品質向上に貢献することから、新幹線をはじめとする高速車両や地下鉄車両などで広く適用されるようになった。

ロケットタンクに適用されたポピンツール方式

これまで日本で作られたFSWの製品のうち、最も大きいのはロケットの燃料タンクではないだろうか。液体水素や液体酸素を積載する燃料タンクは溶接構造であり、接合部の信頼性を向上するための取り組みが行われていた。

一般的なFSWを用いた場合には、ツールから材料に対して数トン程度の加圧を行いながら接合しなければならないため、裏側にそれに耐えられる裏あて治具を設置する必要がある。しかし燃料タンクは密閉容器であるため、裏面に裏あて治具を設置して作業すると、作業した後で取り出すことが

*1 シングルスキン構造：1枚の外板の内側に骨組みを結合した構造

*2 ダブルスキン構造：2枚の外板の間に心材を設け、心材で2枚の外板を結合した構造

I N T E R V I E W

宇宙ロケットの信頼性のカギを握る接合技術



佐藤 広明 さん

三菱重工株式会社
総合研究所
製造研究部製造技術第二研究室
主席研究員

ロケットの燃料タンクは圧力容器であり、接合品質は極めて重要である。H-IIAロケットではTIG溶接を採用していたが、デルタロケットへのFSW適用を受けて、弊社でもロケットにFSWの適用を検討することになった。通常のFSWでは、タンク内面に裏あてが使用できないことから、ポピンツール方式用の装置を開発し、直径約1mの小型タンクを試作することで、本方式で裏あてなしに接合できることを確認した。その後、H-IIA用の治具

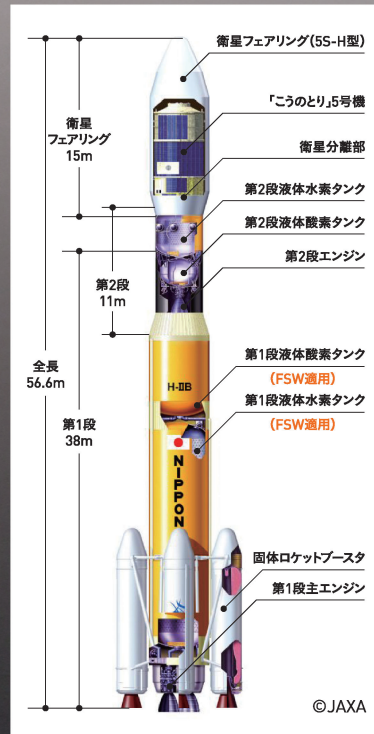
を利用してH-IIA相当の部品の試作も行った。これらの結果をもとにH-IIBロケットの1段の液体酸素/液体水素タンクにFSWを適用した。このような大きなものを安定して接合するために、それに適した工具や治具立てを考案できたことが、開発の重要なポイントとなった。現在開発中のH3ロケットではロケットの大型部品の製造、及び2段の液体水素/液体酸素タンクを含めて、すべてのタンクの組立にFSWを適用する予定である。

できないという問題があった。そこで考案されたのが、接合部の表裏の両面から材料を挟みこみながら接合する方式である。「ポピンツール方式」と呼ばれるこの方式では、裏面にあたかもミシンで使われるポピンのような形をした工具を設置し、材料を貫通して表裏両面の工具を同軸上に配置する。裏あて治具が不要な自己保持型のFSWであり、接合後は表と裏の両方からFSW接合したような強固な継手が得られた。ロケットに使用されている2219アルミニウム合金は、硬さが高く、比較的接合が難しい材料でありながら、最適温度条件などのコントロールにより、すぐれた接合品質を確保することができた⁽¹⁾。

2005年には、H-II/Bロケットのタンクの開発が始まった。H-II/Bロケットは国際宇宙ステーション (International Space Station, ISS) へ物資を輸送する宇宙ステーション補給機「こうのとりのり」(H-II Transfer Vehicle, HTV) を打ち上げるため、タンクの直径、板厚ともH-II/Aより大きくなった。そこでH-II/Bロケットへポピンツール方式FSWを適用するため、新たな治具や非破壊検査手法が開発された。こうして長手方向と円周方向のすべてをFSWで接合した第1段用のタンクが完成した。2009年の試験機打ち上げ以降現在まで実績を重ね、いまやロケットタンクの一般的な製造方法として定着している。

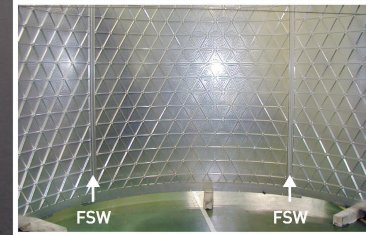
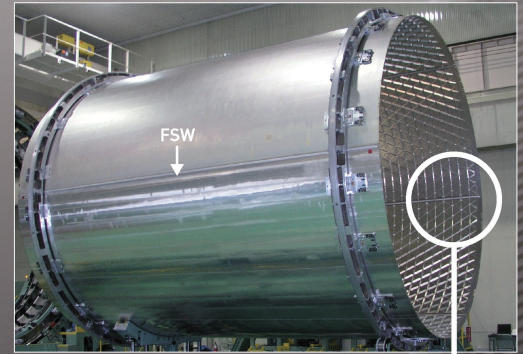


H-II/Bロケットの構造



H-II/BロケットのタンクのFSW接合箇所

直径5.2mのタンクで、長手方向と円周方向の全部をFSWで接合している。



タンク内側から見た長手方向のFSW (写真はH-II/A相当部品の試作品)

自動車マルチ材料化で重要な役割

自動車においても、FSW技術の適用が期待されている⁽²⁾。例えば、自動車ボディパネルの抵抗スポット溶接の代替である。ボディパネルには鋼板が使われているが、最近では軽量のアルミニウム合金板の採用が増えている。しかし、アルミニウム合金板は熱伝導性が高いため、溶接時に材料を溶融するには大電流を流す必要があり、溶接は難しかった。そこで注目されたのが摩擦攪拌点接合 (Friction Stir Spot Welding, 以下FSSW) 技術である。材料の上からツールを挿入し摩擦熱により材料を軟化、攪拌して、両方の材料を接合する。この技術はツールを移動させない点接合であるため、接合部にはプローブ穴が残る。その後、治具の工夫によりプローブ穴を埋め戻す複動式FSSW技術^{*3}も開発されている。

最近の自動車開発において、軽量化や最適設計を実現するため、素材を適材適

所に使い分けるマルチ材料化が大きなトレンドとなっている。FSWは溶接とは異なり異種材料同士を接合するのが容易であり、各部品への適用が検討されている。

例えば、マツダ・ロードスター [2005年発売] では、トランクリッドにおいて鋼板とアルミニウム合金板をFSSWした⁽³⁾。両方の材料は重ねて配置し、ツールをアルミニウム合金板側に挿入し、アルミニウム合金板とめっき層を軟化させる。さらにアルミニウム合金板の塑性変形によりアルミニウム合金表面の酸化膜が破壊され、めっきも除去されることにより、異材同士でも強固な接合を得ることができた。

またホンダ・米国向けアコード (2012年発売) では、自動車の骨格であるサブフレームで、鋼板とアルミニウムダイカストをFSWで接合した⁽⁴⁾。燃費向上を目的とした車両の軽量化を目指して、サブフレームのフロント側を鋼板、リア側をアルミニウムダイカストというハイブリッド構造とした。塗装した鋼板の上にアルミニウムダイカストを配置し、アルミニウムダイカスト側からツールを挿入

*3 複動式FSSW技術：接合ツールの中心にあるピン (プローブ) とショルダーが個別に駆動し、摩擦攪拌後にできた穴に材料を埋め戻すFSSW技術

優れた接合品質

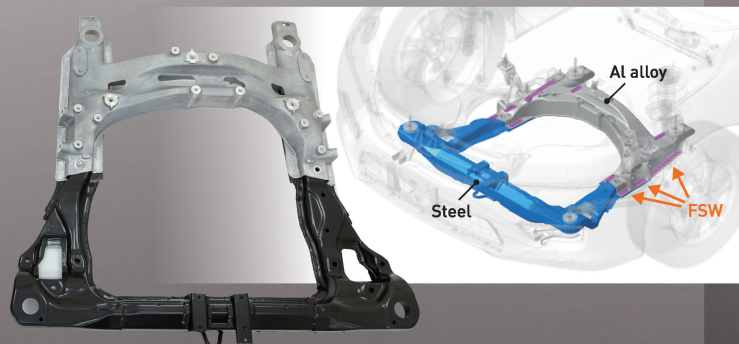


マツダ・ロードスターのトランクリッド部材

アルミニウム合金と鋼との異材同士のFSW。小型のプローブを用いて、アルミニウム合金側のみを攪拌し、接合することができた。

ホンダ・米国向けアコードのサブフレーム

鋼板とアルミニウムダイカストを重ね、FSWによる異材接合を行った。従来に比べ大幅な軽量化、剛性向上を実現した。



した。鋼板の表面には電食防止のシール材を塗布しており、鋼板の表面をツール先端で擦りながらFSW接合を行う。鋼板とアルミニウムダイカストの間の接合面の厚さはわずかに1 μm程度しかないが、十分な接合強度が得られている。この方法により、オール鋼製のサブフレームに比べ25%の重量削減を達成した。

高融点金属への適用の取り組み

現在盛んに研究が進められているのが、鋼やチタンなどの高融点金属へのFSWの適用である。中でも鉄鋼材料は、構造物の多くに使われており、溶接技術も確立している。しかし最近の高性能鉄鋼材料には、高度に組織制御が施された材料も多く、溶接により本来の特性が損なわれるおそれがある。また、従来の溶接で何回かの溶接パスが必要な場合でも、FSWなら1回の作業で接合でき、高い作業効率と安定した品質を保つことができる。

しかし大きな問題は、材料が高融点であることだ。アルミニウム合金の場合、材料が溶融する温度以下である400℃程度でFSWを行うことができ、工具鋼製のツールは消耗しない。しかし鉄鋼材料のFSWでは、ツールは約1000℃の高温でも十分な強度や耐摩耗性、靱性を保たなければならない。接合装置においても、ツール挿入時に加わる50 kN以上といわれる大荷重に耐えられるような剛性が必要となる。

ツールの開発は世界で進められており、代表的なものには、タングステン-25%レニウム合金、超硬質材 (pcBNなど) があるが、いずれも高価ながら耐久性に優れている。日本ではコバルト基合金、イリジウム基合金、ニッケル基超々合金、タングステン基合金などが開発されている。

このほか、自動車でも鉄鋼材料のFSWが期待されており、超ハイテン鋼板同士の

接合などへの可能性が研究されている。炭素量が多い超ハイテン鋼板は、溶接が難しい材料でもあり、この解決策としてFSWが期待されている。

今回は、日本でFSWが適用された宇宙ロケットや自動車の例を紹介した。海外に目を転じればこれにとどまらず、航空機、エレクトロニクス部品、パイプラインなどへの応用が進められているという。適用される材料も、アルミニウム合金や銅ばかりでなく、鋼板、樹脂などさらに広がりを見せ始めている⁽⁵⁾。最近では、FSWの規格化も進められており、アルミニウム合金のFSWについては2011年にISO国際規格が制定され、2016年にJIS規格が制定された。このような流れの中で、FSWはますます適用の範囲が広がることが期待されている。

(取材協力、画像提供：東北大学大学院工学研究科 佐藤裕教授、JAXA、三菱重工業(株)、マツダ(株)、本田技研工業(株))

文 献

- (1) 後藤智彦, 坂口秀明, 佐藤広明, 山田毅, 田中大輔, 原英統: 三菱重工技報, 42 (2005-12), 234-237.
- (2) 大石郁, 藤井英俊: まてりあ, 53 (2014), 603-607.
- (3) 庄司備平, 高瀬健治, 玄道俊行, 埴邦彦, 森川賢一, 野口竜弘: マツダ技報, No.24 (2006), 90-94.
- (4) ニュースリリース (2012.9.6), 本田技研工業ホームページ:
<https://www.honda.co.jp/news/2012/4120906b/html>.
- (5) ISMA新構造材料技術組合ホームページ: <http://isma.jp/provision.html> (参照日: 2018年9月28日).

を生かし新たな展開へ