

## FSW 技術と自動車への適用例

大石 郁\* 藤井 英俊\*\*

## 1. 摩擦攪拌接合とその特徴

摩擦攪拌接合(FSW: Friction Stir Welding)および摩擦攪拌点接合(FSSW: Friction Stir Spot Welding)は、今からおよそ20年ほど前にできた比較的新しい接合法であるが<sup>(1)</sup>、その優れた特性から、自動車だけでなく、鉄道車両、土木構造物、船舶等の様々な産業分野で幅広く実用化されている<sup>(2)~(9)</sup>。

本手法は、 $\phi 10\sim 20$  mm 程度の円柱状の工具(回転ツール)を材料に押し当てることにより摩擦熱を発生させ、この回転ツールを界面に沿って移動させながら接合する方法である(図1)。自動車産業では、重ね接合にこれを用いることが多く、後述するように(図4)、回転ツールを試料に押し当てたのち、移動させずに接合を完了させる摩擦攪拌点接合を用いることが多い。

本手法は、融点以下、すなわち固相の状態での接合可能であ

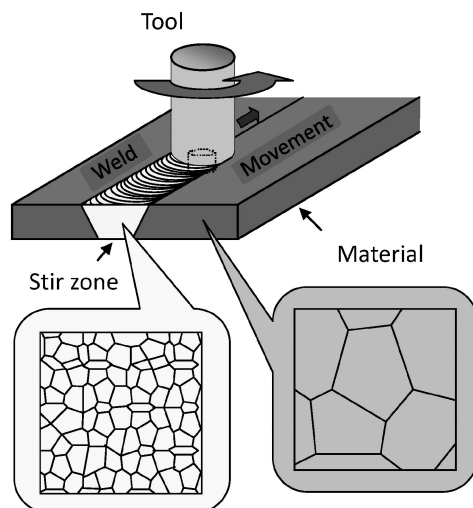


図1 FSW(摩擦攪拌接合)。

る点が最大の特長であるが、鉄鋼材料では、それに留まらず、 $A_1$ 点(変態温度)以下での接合が可能であることが明らかになってきた<sup>(10)(11)</sup>。この場合、変態を伴わないため、炭素量に関係なく接合可能であることから、炭素を多く含む高強度な高炭素鋼の接合を可能にする技術として注目されている。

FSWは固相で接合するため、以下のような種々の優れた特徴を有する。

- (1) 接合部における結晶粒の粗大化が抑制され、強度低下が小さい。また、回転ツールによる攪拌効果のため、結晶粒を微細化することも可能で、母材より強度が向上する場合もある。
- (2) 変形が小さい。アーク溶接(ミグ)の数分の1以下である。
- (3) これまで接合が困難であった2000系や7000系のアルミニウム合金、あるいは鋳造材や複合材料の接合も可能である。
- (4) 異種材料の接合に適している。
- (5) 開先加工や接合時の前処理が不要である。
- (6) 接合中にヒューム、スパッタ、紫外線等の発生がない。
- (7) 気孔、割れなどが発生しにくい。
- (8) アルミニウム合金の接合の場合には、シールドガスが不要である。鉄鋼材料の場合は必須ではないが、接合表面の酸化を防ぐために、シールドガスの使用が望ましい。
- (9) 原則、フィラーが不要である。
- (10) 接合部から合金成分の蒸発がほとんどない。
- (11) 熟練技術が不要である。ただし、実施工のためには、FSWオペレータの認証を受ける必要がある。
- (12) 鉄鋼材料では、高張力鋼など一部の材料を除いてHAZ軟化が生じにくい。
- (13) 鉄鋼材料の場合、 $A_1$ 点以下での接合が可能であり、鋼材の炭素量に依存することなく接合できる。

一方、以下のような問題点がある。

- (1) 剛性のある拘束治具が必要である。
- (2) ギャップの許容範囲が狭く、接合部の目違い、ギャップ

\* 広島県立総合研究所；副主任研究員(〒737-0004 呉市阿賀南2丁目10-1)

\*\* 大阪大学接合科学研究所；教授

Technical Topics and Automobile Applications of Friction Stir Welding; Kaoru Ohishi\* and Hidetoshi Fujii\*\* (\*Hiroshima Prefectural Technology Research Institute, Kure. \*\*Joining and Welding Research Institute, Osaka University, Ibaraki)

Keywords: friction stir welding (FSW), friction stir spot welding (FSSW), solid phase welding, aluminum alloy, dissimilar metals

2014年8月4日受理[doi:10.2320/materia.53.603]

の制御が必要である。

- (3) 接合終端部に穴が残る。
- (4) 裏面にキッシングボンドといわれる未接合部が生成しやすい。
- (5) すみ肉継手などの複雑形状の部材の接合が困難である。
- (6) 高融点金属の材料に対しては、ツールの寿命等の課題が残る。

しかし、これらの問題点に関しても解決の方向にある。(2)に関しては、FSWでは約1mm程度のギャップ裕度しかなく、ギャップが2mm以上になると欠陥が発生するが、ギャップに粉末を充填しながらFSWを行うことにより、3mm程度まで裕度が広がると報告されている<sup>(12)</sup>。

(3)、(4)に関しては、ツールのプローブとショルダが別々に駆動する複動式ツールが有効である<sup>(13)</sup>。FSSWにおいても、ショルダ部の外側にバリの発生を防止する治具を備え、ショルダ部から試料内に挿入することで、接合穴を残さない、フラットな接合部が得られる手法も開発されている。また、(5)に関しては、プローブのみを回転させて接合する方法が、すみ肉溶接には有効であるとされている<sup>(14)</sup>。(6)に関しては、種々のツールの開発により鋼等のFSWも可能となってきた。

図2に接合部の模式図を示すが、接合部中央には、攪拌部と言われる微細な等軸晶からなる再結晶組織が存在する。攪拌部の外側には、塑性変形により結晶粒が伸びた形状を持つ熱加工影響部(Thermo-Mechanically Affected Zone, TMAZ)、その外側には、塑性変形は受けていないが、熱の影響を受けた熱影響部(Heat Affected Zone, HAZ)が存在する。

強加工後に、摩擦による昇温を伴うのがFSW、FSSWの特徴で、これにより、一般に数100nm~数 $\mu$ mの微細な等軸晶が得られる。このような微細な組織によって得られる機械的特性は良好であるため、本プロセスは、接合のみならず、素材の改質にも使用可能である。

## 2. 自動車への適用例

近年、自動車業界では排出ガスに対する規制が厳しくなっており、また市場の環境保全意識の高まりからCO<sub>2</sub>排出削減、燃費向上が急務となっている。対策としてエンジン性能の向上、アイドリングストップ機能の付加など様々な技術が導入されている。さらに、これらの対策と並行して自動車車両の軽量化が注目を集めており、その軽量化の材料の一つとしてアルミニウム合金が用いられている。日本では抵抗

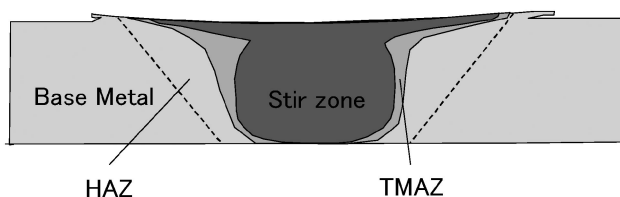


図2 断面組織の模式図。

スポット溶接を実施している工場が多く見られる。しかし自動車の軽量化のためにアルミニウム合金を抵抗スポット溶接するには大電流が必要であり、そのための設備の新設(増設)が必要となってしまう。またリベットなどの接合方法もあるが副資材が増えることによる管理負担やコストの問題、接合部の強度、施工能率などの面で一部の適用となっている。そうした問題を解決するために前章で説明した摩擦攪拌接合FSWや摩擦攪拌点接合FSSW(SFW, FSJ)が開発され、有力な接合技術として導入されてきている。以降に自動車に適用された実用例を示す。

### (1) マツダ株式会社における適用例

#### (a) RX-8(アルミニウム合金同士の接合)

開発された摩擦攪拌点接合は図3に示す2003年販売のマツダ・RX-8のボンネットおよびリアドアにて採用された<sup>(15)(16)</sup>。このボンネットやリアドアを製造する工場では図4に示すSFWロボットシステムによる接合が実施されている。これは回転する接合ツールがリアドアなどの接合箇所へ動き、挿入して、接合時の圧力を制御して接合するプロセスを採る。接合ツールがワークを把持する際、付加する加圧力はその姿勢による駆動部にかかる重力の影響により変化するため、姿勢変化に対する補正機能付加など制御するための工夫が施されている。



図3 FSSW(SFW)を採用したRX-8とリアドア。

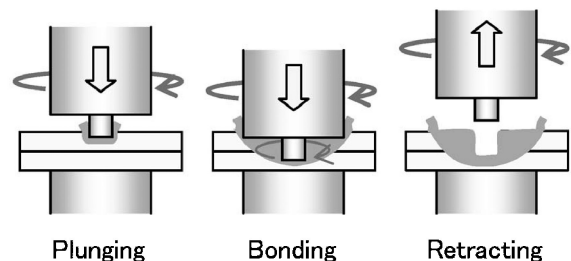


図4 FSSW(SFW)接合の概略図とロボット写真。

このように開発された FSSW は、抵抗スポット溶接のようなスパッタやヒュームなどが発生しないため工場内の作業環境が向上した。また付帯設備が少ないため、抵抗スポット溶接機と比較して工場内の省スペース化を実現した。コストについては電力が約 1/80 に抑えられており、また接合時間への影響についても生産効率の低下に影響は与えていない状況である。接合ツールも消耗が極めて少なく長寿命であるため、ツール交換の手間などを省くことができた。

現在、マツダ㈱だけではなくトヨタ自動車㈱のプリウス、クラウン、SAI、レクサス(GS, IS, LS, HS, CT)などでも摩擦攪拌点接合が適用され、用途先が拡大しつつある<sup>(17)</sup>。

(b) ロードスター(アルミニウム合金/鋼板の接合)

現在、自動車の軽量化に対してアルミニウム合金だけで構成すると強度とコストを両立することが困難なことから、アルミニウム合金と鋼などを組み合わせたマルチマテリアル化が進められている。しかしアルミニウム合金と鋼板の接合において、抵抗スポット溶接などの熔融溶接では、接合界面に金属間化合物が形成され、接合強度に悪影響を及ぼす問題が発生する。

一方、摩擦攪拌(点)接合は、接合時の入熱量が少ないことから金属間化合物の形成がない(少ない)特徴がある。マツダではアルミニウム合金板とめっき鋼板の FSSW 接合に取り組んだ。これは図 5 に示すとおり接合ツールを特定の加圧力で材料表面に押し付け、接合ツールとアルミニウム合金板との攪拌時の摩擦抵抗による発熱で上板のアルミニウム合金板とめっきを軟化させる。そして接合ツールによって軟化したアルミニウム合金板が塑性変形することにより接合界面の酸化皮膜が破壊され、同時に界面のめっきも除去される。この結果、めっきが無くなった範囲ではアルミニウム合金板お

び鋼板の新生面同士が直接接触することが可能となり、さらに上下のツールで材料を把持することで、新生面同士の冶金的な接合が進むことで高い接合強度を可能とした。

この接合技術は、図 6 に示す 2005 年に発売を開始したロードスターのトランクリッドの部品(ヒンジレインフォースメントと鋼板製ボルトリテーナーの接合)に採用している<sup>(18)(19)</sup>。

(2) 本田技研工業株式会社における適用例

ホンダでは、2012 年 9 月米国発売のアコードのフロントサブフレームに FSW 技術が採用された(図 7)。ただし、ガソリン車とハイブリッド車では求められる軽量化の度合いが異なるため、使用する材料構成が異なる。つまり HV 用バッテリーやモーターなどがあるハイブリッド車では、より軽いオールアルミニウム合金のフロントサブフレームであり、ガソリン車ではアルミニウム合金/GA 鋼板のマルチマテリアル構造を採る。今回はガソリン車について紹介する<sup>(20)-(22)</sup>。

(a) アコードガソリン車(アルミニウム合金/GA 鋼板の接合)

図 8 に示すようにアルミニウム合金側から回転する接合ツールを挿入し、前進角を設けずに FSW・異種金属接合す



図 7 アコードとフロントサブフレーム。

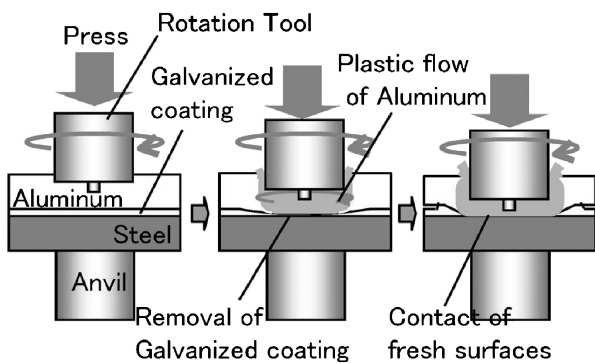


図 5 FSSW(SFW)接合/異種金属接合の概略図。

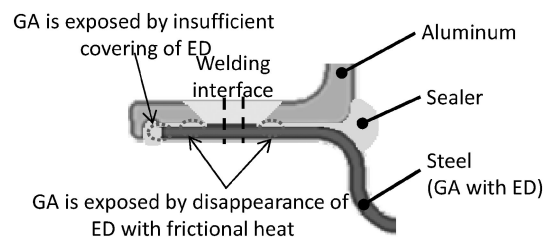
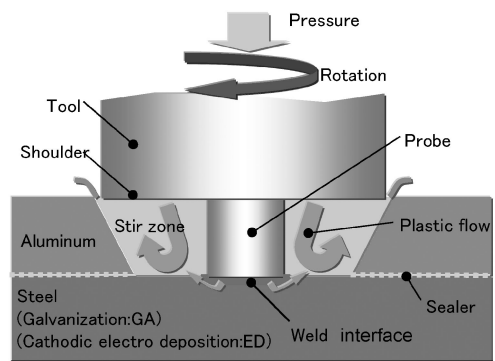


図 8 ホンダ採用の FSW 概略図。



図 6 ロードスターとトランクリッド。

る。使用されるGA鋼板はカチオン電着塗装しており、またアルミニウム合金とGA鋼板の間には、電食防止のために液型変性シリコン樹脂系シール材を挟んだ状態にある。回転する接合ツールのプローブ先端がGA鋼板の表面に挿入されることによって、スチール表面のメッキ層、塗装、シール材を除去し、スチール表面に新生面が現れ、アルミニウム合金と反応して金属間化合物層が形成し接合している。形成する金属間化合物の厚さを1 μm以下に制御することで接合強度を高く保っている。

### (b) 接合時の接合ツールの制御

FSWでは安定した接合状態を管理するために、接合ツールの挿入位置が重要となる。すなわち接合ツールの挿入位置が浅いとメタルフロー領域が小さくなり、金属間化合物も形成されず接合強度も弱くなる。逆にプローブの挿入位置が深いとスチールのフック(巻き上げ)が大きくなり接合強度の低下、また接合ツールの寿命も短くなる問題が発生してくる。

使用する材料の板厚のバラツキや治具を含めたFSW装置自体のたわみなど、接合時には様々な要因が複雑に影響するため接合状態を精密に制御することが難しい。ホンダでは接合時に圧力を感じながら接合ツールの挿入位置を制御することによって接合状態を管理している。さらに接合ツールの材質にNi系合金を用いることでツールの耐久性を向上させ、長時間安定した接合状態を保持している。

### (c) 接合状態の品質管理手法

ホンダではFSW接合部の品質管理はアクティブサーモグラフィの原理を採用している(図9, 10)。これは接合箇所表面に瞬間的にレーザーを照射し、熱を加え、加えられた熱エネルギーが接合材の下部まで移動し、その後反射して表面まで到達するまでの時間、到達時の温度や温度領域を測定する。そして、接合状態①金属間化合物が形成し、強固な接合状態、②上下の異種金属が密着した状態、③シール材・塗装が残った状態によって反射する時間や温度が異なるので、その位相差により接合状態を判断している。位相差と接合強度の関係は事前に調査し、評価シートを用いて各溶接部の品質を管理している。さらに検査時間は瞬間的であり、生産工程を滞らせることがないため全数検査を可能としている。

以上の技術を導入することで、アルミニウム合金/GA鋼板のマルチマテリアル構造が採用でき、従来のスチール製サブフレームに対し25%の軽量化を達成して燃費向上に寄与するとともに、接合製造時の電力消費量も約50%削減できた。

## 3. ま と め

前述した自動車以外にも日産自動車(株)シーマのサスペンションアームではアルミニウム合金押し出し材をFSWにより接合している<sup>(23)</sup>。このように摩擦攪拌接合技術の自動車業界へ実用化は着実に進んでおり、また自動車業界だけでなく航空機や鉄道業界、造船、一般機械に至る様々な分野で拡大してきている<sup>(17)(24)(25)</sup>。また使用する材料としては銅やアル

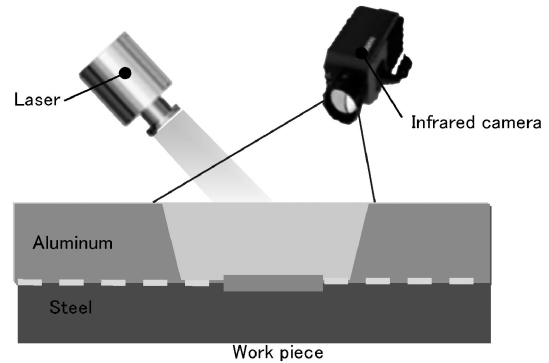


図9 品質管理の概略図。

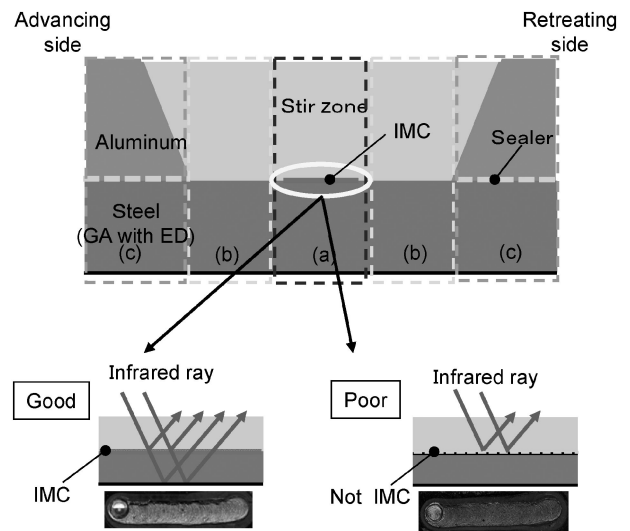


図10 接合箇所の合否判定の概略図。

ミニウム合金が中心であったが、近年鋼板や異種金属接合においても実用化されてきている<sup>(26)</sup>。さらに2015年にはFSWの基本特許が切れることから、ランニングコストが安く、工程内の省スペース化、良好な作業環境などの特徴を活かし、今後さらに実用化が増えていくものと期待される。

## 文 献

- (1) W. M. Thomas, E. D. Nicholas, J. C. Needhan, M. G. Murch, P. Temple-Smith and C. J. Dawes: International Patent Application PCT/GB92/02203 and GB Patent Application 9125978.8, UK Patent Office, London, December 6, (1991).
- (2) R. Nandan, T. DebRoy and H. K. D. H. Bhadeshia: Prog. Mater. Sci., **53**(2008), 980-1023.
- (3) R. S. Mishra and Z. Y. Ma: Mater. Sci. Eng. R, **50**(2005), 1-78.
- (4) 摩擦攪拌接合—FSWのすべて—, 溶接学会編, 産報出版, (2006).
- (5) H. Okamura, K. Aota and M. Ezumi: J. Jpn. Inst. Light Met., **50**(2000), 166-171.
- (6) G. Campbell and T. Stotler: Weld. J., **78**(1999), 45-47.
- (7) M. R. Johnsen: Weld. J., **78**(1999), 35-39.
- (8) K. E. Knipstron and B. Pekkarri: Weld. J., **76**(1997), 55-57.
- (9) C. J. Dawes and W. M. Thomas: Weld. J., **75**(1996), 41-45.

- (10) H. Fujii, L. Cui, N. Tsuji, M. Maeda, K. Nakata and K. Nogi: Mater. Sci. Eng. A, **429**(2006), 50–57.
- (11) L. Cui, H. Fujii, N. Tsuji and K. Nogi: Scripta Mater., **56**(2007), 637–640.
- (12) K. Inada, H. Fujii, Y. S. Ji, Y. F. Sun and Y. Morisada: Sci. Tech. Weld. Join., **15**(2010), 131–136.
- (13) C. J. Dawes and W. M. Thomas: Proc. 1st Int. Symp. on FSW, (1999) CD-ROM.
- (14) J. Martin: 溶接技術, **59**(2011), 54.
- (15) 村上土嘉, 山下浩二郎, 妹尾安郎, 橋 昭男: マツダ技法, (2003), No. 13.
- (16) 玄道俊行, 西口勝也, 麻川元康: 日本金属学会誌, **70**(2006), 870–873.
- (17) 江角昌邦, 桔梗千明, 佐藤広明, 平野 聡, 佐藤 裕: 金属 **83**(2013), 231–239.
- (18) 川崎重工 Kawasaki News, **135**(2004), 8.
- (19) 庄司庸平, 高瀬健治, 玄道俊行, 埜 邦彦, 森川賢一, 野口竜弘: マツダ技法, (2006), No. 18.
- (20) 宮原哲也, 佐山 満, 矢羽々隆憲, 大浜彰介, 畑 恒久, 小林 勉: ホンダ技術紹介, **25**(April 2013), 71.
- (21) 佐山 満, 宮原哲也, 矢羽々隆憲, 大浜彰介, 畑 恒久, 小林 勉: 溶接学会全国大会講演概要, **94**(2014), S-20.
- (22) 畑 恒久: 第304回塑性加工シンポジウム「異種材接合技術が拓く次世代自動車の軽量化と高性能化」/自動車における接合技術2013/8/29.

- (23) 篠田 剛: 軽金属, **64**(2014), 196–202.
- (24) 奈良圭祐: 溶接学会誌, **82**(2013), 177–180.
- (25) 森 久史, 野田雅史, 富永誉也: 軽金属 **57**(2007), 506–510.
- (26) 藤井英俊: 溶接学会誌, **77**(2008), 731–744.

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★  
 大石 郁  
 1998.4~2002.3 日之出水道機器株式会社  
 2002.4~2005.3 長崎大学大学院 生産科学研究科(博士課程)  
 2005.4~ 現職  
 専門分野: 接合, 鋳造  
 ◎接合や鋳造(アルミ合金, 鋳鉄)に関する研究及び企業からの技術相談に従事. 主に摩擦攪拌点接合・摩擦アンカー接合を中心に活動.



大石 郁



藤井英俊