

燃料電池システム搭載用サブフレームにおける 摩擦攪拌接合技術の開発

Development of Friction Stir Welding Technology for Subframe for Fuel Cell System

小 林 努* 佐 山 満*
Tutomu KOBAYASHI Mitsuru SAYAMA
矢羽々 隆 憲* 加 藤 高 士*
Takanori YAHABA Takashi KATO

要 旨

FCXクラリティ(燃料電池自動車)用に開発された燃料電池システム搭載用サブフレーム(以下、FC サブフレーム)は、軽量化と生産性向上のため、6000系アルミニウム合金押し出し材と切削部品で構成し、主要骨格部の接合に摩擦攪拌接合(以下、FSW)を適用した。FSWを適用した板組みは、重ね継手が12種類と突合せ継手1種類である。これらの継手に対して、重ね継手用5種類、突合せ用1種類のツールを開発した。FSWによる重ね継手は、下側の材料が上側の材料に侵入する現象(以下、巻き上げ)により強度低下が発生する。その発生メカニズムを明らかにし、ツールのプロブに縦溝をつけることで低減を図った。また、合せ部にRがついている形状の突合せ継手では溶加材を加えずにトンネル状に連続した穴の発生を抑える手法、すなわち、材料の厚い側にツール中心を寄せることで発生を抑制した。

以上の技術を適用することにより、従来のプレス部品構造に比べて17%の軽量化を実現した。

ABSTRACT

In order to save weight and increase productivity, the FC subframe developed for vehicle mounting of the fuel cell system employed in the FCX Clarity fuel cell vehicle is constructed from both extruded and cut parts produced from 6000 series aluminum alloy. Friction stir welding (FSW) was used to weld the main structural parts of the subframe. FSW was applied to 12 types of lap joints and one type of butt joint. Five tools were developed for the lap joints and one tool for the butt joints. The strength of lap joints formed using FSW can be diminished by the infiltration of the material in the bottom sheet into the material in the top sheet, a phenomenon referred to as "hook." The project discussed here clarified the mechanism of this phenomenon, and reduced its occurrence by forming grooves on the probes of the welding tools. In addition, in the case of butt welds of forms with radii, the occurrence of elongated cavity was controlled without the use of filler metal by having the center of the tool approach the thickest side of the material.

The use of these methods has enabled the achievement of a 17% weight saving against a conventional subframe using stamped parts.

1. はじめに

摩擦攪拌接合(Friction Stir Welding: FSW)はアーク溶接(MIG 溶接や TIG 溶接)等の熔融溶接に比べて入熱が少なく低歪化が可能であり、鉄道車両を中心に実用化がなされているものの、自動車部品の適用例⁽¹⁾としては、サスペンションアームやフード、テールゲート、ドア等の開閉体に限られている。サブフレームのように断面が中空な部品は

FSWの適用が進んでいない。これは、接合時にかかる大きな荷重によりワークが変形し、接合不具合が発生してしまうためである。

FCX クラリティ用 FC サブフレームは、Fig. 1 に示すように燃料電池システムを床下に搭載して保持、保護する部品である。軽量化を重視し、構成部材すべてにアルミニウム合金を適用したが、従来はアーク溶接による変形の課題があった。そこで主要骨格部の接手法として FSW を採用

*四輪開発センター

することにより、接合による変形の低減が図れ、さらに継手構造の簡素化および肉厚最適化による軽量化が期待できると考えた。

継手構造は接合対象部品の製造時の寸法誤差を吸収するために重ね継手とし、必要な接合強度を得るために線接合としている。しかし、FSWによる重ね継手における線接合の事例は少ない。

そのため、今回は FSW による重ね継手と突合せ継手における線接合技術を開発し、さらに重ね継手に適した構造設計をおこない実用化を図った。

本稿では、その FSW 技術の開発概要について報告する。

2. FSW と適用状況

FSW は、イギリス TWI(The Welding Institute Ltd.)が 1991 年に開発した技術である⁽²⁾。Fig. 2 に示すように、先端にプローブと呼ばれる突起の付いた接合用工具(以下、ツール)を高速で回転させながら材料にショルダ部が接するまで挿入することで接合する。プローブとショルダ周辺の材料は摩擦熱で軟化し、ツールの回転によって起こる塑性流動により固体の状態で接合される。

主にアルミニウム合金、銅合金およびマグネシウム合金等の低融点金属の接合に適しているといわれている。

特徴として、

- (1) 材料を溶融しない固相接合である。
- (2) 接合変形が少ない。
- (3) プローホール等の溶融、凝固に起因する内部品質の不具合が発生しない。
- (4) アルミニウム合金の場合、シールドガスが不要である。
- (5) 溶加材が不要である。
- (6) ヒューム、スパッタ等の発生が無い。
- (7) 大きな電力を必要としない。

等が挙げられている。また、欠点としては、

- (1) 剛性のある拘束治具が必要である。
- (2) ワーク同士のギャップ許容範囲が狭い。
- (3) すみ肉継手等の複雑形状部材の接合が困難である。
- (4) 接合終端部に穴が残る。
- (5) 低融点金属に限られる。

等が挙げられている⁽³⁾。

上記の特徴を活かして、我が国では、アルミニウム合金製の鉄道車両に採用する事例⁽⁴⁾が特に増えてきている。これは 20m にも及ぶ長尺部品が多く、従来の溶融溶接の場合は接合による変形対策を必要としていたが、変形が少ない FSW を適用することで生産性の向上に加え省エネルギーでクリーンな作業環境を提供できることによる。

また、自動車分野においては、抵抗スポット溶接のように FSW 点接合をアルミニウム合金のドアやフード等に適用した事例⁽⁵⁾が増えてきている。

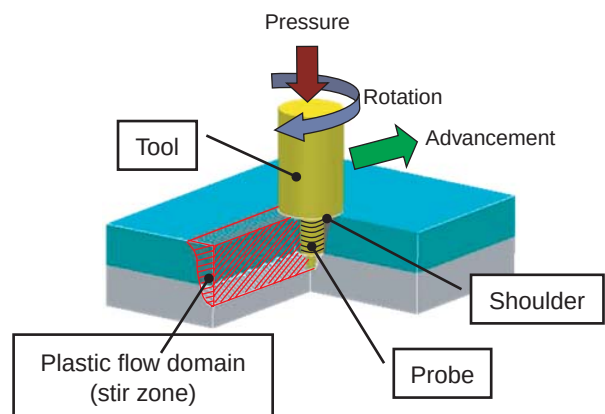


Fig. 2 Schematic illustration of FSW

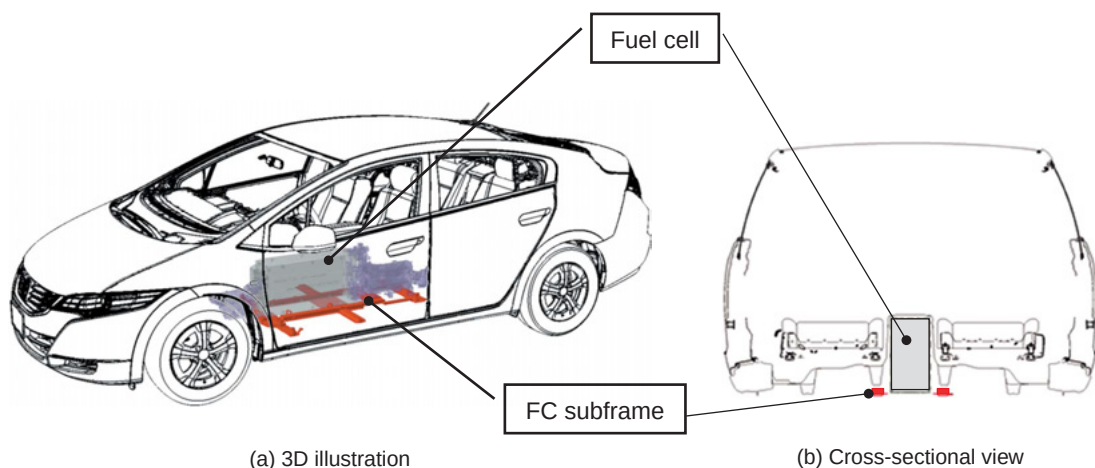
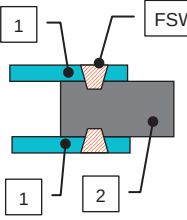
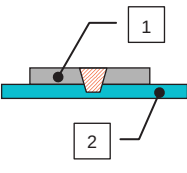
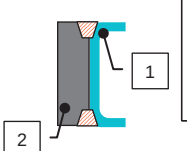
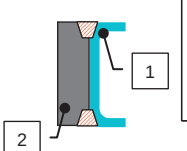


Fig. 1 Positioning of FC subframe in Honda FCX Clarity

Table 1 FSW weld structures in FC subframe

	Part 1		Part 2	
	Material 1	Thickness (mm)	Material 2	Thickness (mm)
	A6N01S-T5	1.3	A6061P-T651	
		1.5		
		2.0		
		3.0		
		3.5		
	A6N01S-T5	2.0	A6N01S-T5	2.0
				3.0
			A6063S-T5	2.0
			A5052P-O	1.2
				2.0
	A6N01S-T5	3.0	A5052P-O	1.0
			A6063S-T5	2.0
	A6N01S-T5	2.0	A6961P-T651	7.0

3. FC サブフレーム

3.1. FC サブフレームの構造

FC サブフレームの材料構成を Fig. 3 に、FSW の継手構造を Table 1 に示す。基本構成は、アルミニウム合金の押し出し材と切削加工による中実部品（以下、中実部品）の組み合わせとした。押し出し材の断面形状を Table 2 に示す。中空かつ複雑な断面が多く、断面の外接円径は36 mmから214 mm に対して、板厚は 1.3 mm から 3.5 mm と薄い設定である。材質は、押し出し性と強度のバランスを考慮して A6N01S-T5⁽⁶⁾を適用した。中実部品は強度を優先し A6061P-

T651⁽⁷⁾とした。また、部品取り付け用のプレス部品は、強度と成形性を考慮して A5052P-O⁽⁷⁾を、その他の取り付け部品は、A6063S-T5⁽⁶⁾を適用した。

主要骨格は、押し出し材の内部に中実部品を差し込んで FSW で連結する構造とした。これは接合をおこなうときに中実部品がツールからの荷重を受ける治具として機能することをねらった構造であり、さらに、押し出し材の長さ加工誤差を吸収するためである。

従来の FC サブフレームは、接合に抵抗スポット溶接および MIG 溶接を用いていたが、板厚の組み合わせに制限があり最適化ができなかった。さらに複雑な継手構造となる

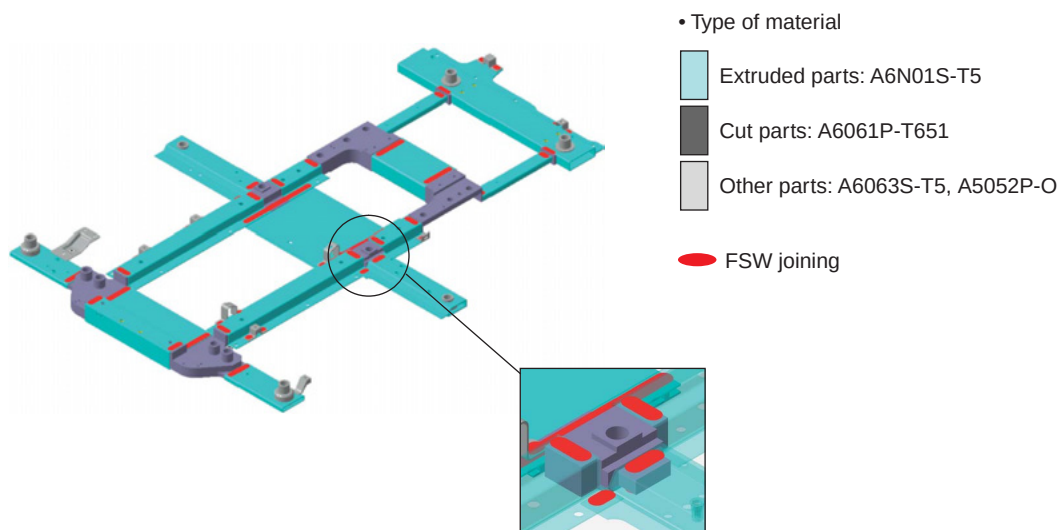


Fig. 3 Components of FC subframe

Table 2 Cross-sectional shape of extruded frames

Cross-sectional view	Circumcircle diameter (mm)	Minimum thickness (mm)	Thickness of FSW weld (mm)
	36	1.5	1.5
	73	2.0	2.0
	99	1.3	1.3
			2.0
	111	2.0	3.0
	111	2.0	2.0
			3.5
	156	2.0	2.0
	190	2.0	2.0
			3.0
	214	2.0	2.0
			3.0

ことから軽量化が困難であった。

今回の構造は FSW を前提に設計し、継手の簡素化や接合フランジの廃止、押し出し材の肉厚最適化等により 10% 以上の軽量化をねらった。また、接合後の修正作業を廃止することもねらった。

なお、本 FC サブフレームには、押し出し材の内部に厚肉の中実部品を差し込む構造とした重ね継手が 48 箇所、2 枚の薄板の重ね継手が 14 箇所および押し出し材の側面に中実部品を接合する突合せ継手が 4 箇所ある。

3.2. 継手構造の課題

突合せ継手に用いられる FSW ツールを重ね継手に用いると、引張り強度が低くなることがわかった。このメカニズムを Fig. 4 に示す。ツールの回転による摩擦発熱で加熱さ

れ軟化した材料がプローブの逆ねじの効果により、下向きに塑性流動する。プローブに沿って下向きに流動した材料は、下板で遮られて上向きかつ外側に広がるように流れる。この塑性流動域の外縁に沿って上向きの流動が周囲の軟化した材料を引きずるように持ち上げることで、上板側に下板の材料がクサビ状に侵入して巻き上げとなる。未接合の界面がそのまま上板側に侵入することで、もとの板厚から巻き上げ高さ分の板厚が減少したことになり引張り強度が低下する。

Fig. 5 に重ね継手部の断面写真を示す。塑性流動域がツール中心部から外側に広がって台形になっているのが観察される。Fig. 6 は巻き上げにより上板に未接合界面が侵入した状態を明確にするために、上板を上方へ変形させたときの断面写真である。この場合 2.89 mm の上板に対して巻き上

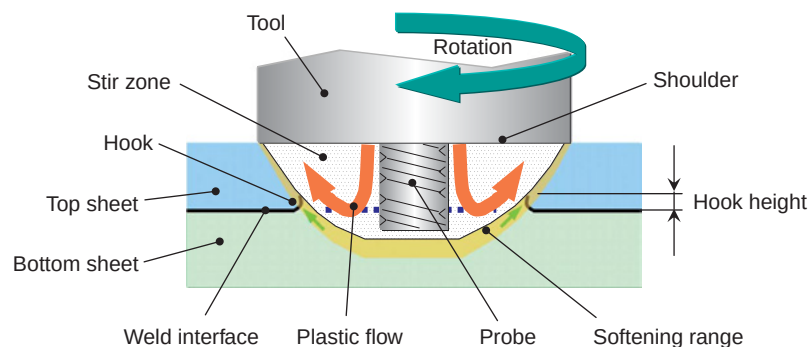


Fig. 4 Mechanism of FSW for lap joint

げ高さが、1.60 mm であり、上板の残存厚さが元板の半分以下になることから接合部の引張り強度も元板の母材強度の半分以下となっている。

Fig. 7 は、突合せ継手の接合を表した模式図である。押し出し材の角稜部の R をそのままに接合していることを示している。Fig. 8 は、トンネル状に連続した穴ができてしまった断面写真である。このような穴ができてしまうのは、一般には入熱不足などが考えられるが⁽⁸⁾、この場合は押し

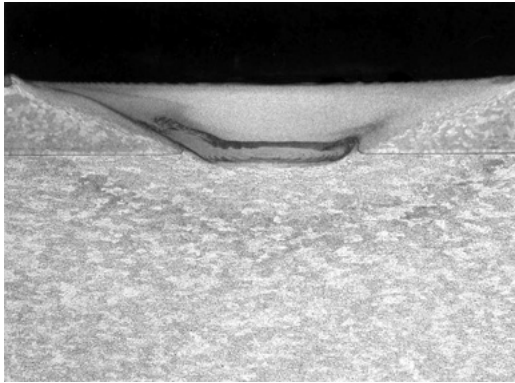


Fig. 5 Cross-sectional micrograph of FSW at lap joint

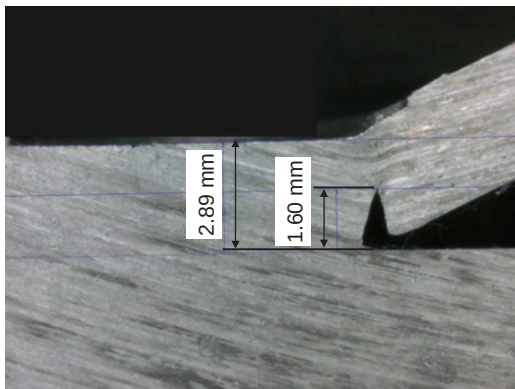


Fig. 6 Cross-sectional micrograph of FSW at lap joint when top sheet is forced upwards

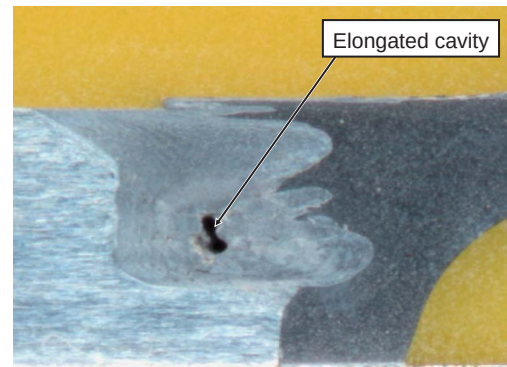


Fig. 8 Cross-sectional micrograph of elongated cavity

出し材の角稜部の R によってできる空隙が原因と考えられる。FSWは余盛りができないことにより、押し出し材の角稜部の R によってできる空隙分の材料不足が充填されずにこのような穴が形成され则认为られる。この不具合は引張り強度の低下を招くことから実用化にあたっては解決を図る必要があった。

4. 接合技術

4.1. 重ね継手の解決手法

重ね継手の引張り強度低下を防止するためには、巻き上げを抑制することが重要である。巻き上げの抑制には、縦方向の塑性流動を弱めることが考えられる。

まず、縦方向の塑性流動を弱くするにはツール回転を低速にすることが考えられる。しかし、ツール回転数が低くなると接合に必要な熱量が不足して接合が不安定になる。

Fig. 9 に 6000 系アルミニウム合金の重ね継手をツール回転数と接合速度を変化させて接合した例を示す。ツール回転数が 1000 rpm の場合は接合速度 100 - 150 mm/min において、良好な接合品質が得られた。しかし、ツール回転数を 800 rpm 以下の低回転にすると入熱不足となり接合が不安定となる。また、ツール回転数が 1100 - 1200 rpm で接合

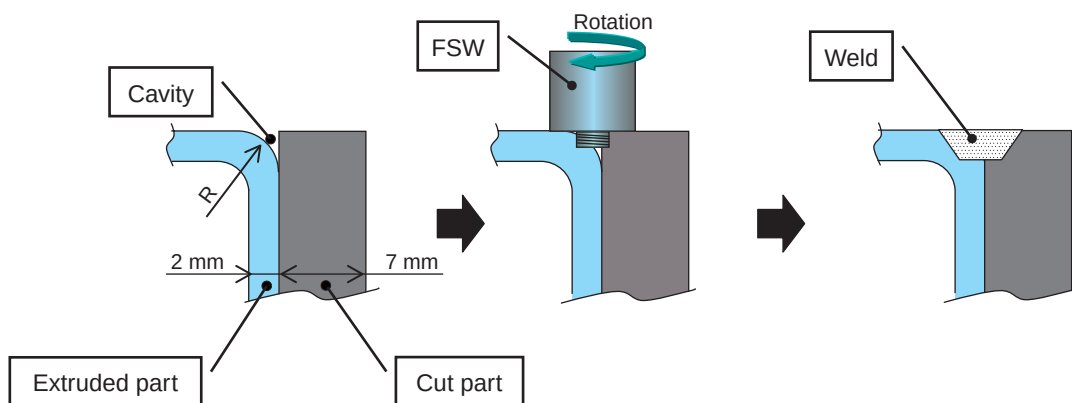


Fig. 7 Cross-sectional image of FSW butt joint

速度 100 mm/min では良好な接合品質が得られなかった。高回転では発熱過多による表面がむしれる不具合と巻き上げ過大となると考えられる。

開発したツールのプローブ形状を Fig. 10 に示す。接合に必要な回転数を維持しながら塑性流動を弱くするために、ねじ切り用タップのような縦溝をプローブに設けることにした。通常はプローブに付けられたねじが塑性流動を促進させているが、この縦溝が塑性流動を分断し、軟化した金属を縦溝内に滞留させることで流動を弱められると考えた。ねじによる下向きの塑性流動が弱まれば、巻き上げを引き起こす外側に広がりながら上向きの塑性流動も弱まることになる。さらにプローブ先端部をえぐって凹形状とし縦溝とつなげたことで、プローブ先端部のツール体積を減少させたことになる。これにより、プローブ周囲からの材料に与える圧力を低下させる効果も期待できる。プローブ先端部の圧力が低下し、周囲を押し広げる力が低減して広がりながら上向きの塑性流動を抑制できると考えた。これらを反映したプローブ形状により、接合に必要な摩擦熱を発生させるツール回転数でも巻き上げを抑制することができると考えた。

4.2. シミュレーションによる重ね継手の検討結果

ツール形状の塑性流動への影響を確認するために汎用熱流体解析ソフトウェア(ANSYS 社 FLUENT)を用いた CAE 解析を実施した。

CATIA V5 を用いて、ツールのショルダ直径の 1.3 倍ほどの直径を有する母材領域に、ツールを挿入した状態のモデルを用意し、熱流体解析ツール(ANSYS 社 FLUENT for CATIA V5)の自動メッシュ作成機能によって解析用メッシュ作成をおこなった。材料物性として密度および粘性係数を定数として設定し、ツール回転数を与え、定常状態での解析をおこなった。

Fig. 11 は、シミュレーションによって得られた縦溝の有無の違いによる流れ方向および流速分布を代表的な断面において示したものである。ただし、最大流速を 1 とした無次元数としている。

Fig. 11 から、プローブに縦溝を設けることにより、同じツール回転数においても流速が低下しているのがわかる。これは縦溝によりプローブの外縁に沿った流れが分断されるためと思われる。特に溝の内部では、流動が小さい状況であることがわかる。このことから縦方向の流速も低減し、塑性流動が弱まると考えられる。

4.3. 突合せ継手の解決手法

今回の突合せ継手は、材料の角稜部の R による空隙があるので、それを埋めるためにツール中心を中実部品側に 0.5 mm 程ずらして接合することにした。これは中実部品側から材料を流動させて空隙を埋めることができると考えたからである。また、ツールの押し込み量も通常より深くすることも、空隙を埋めるのに有効と考えて接合条件を設定した。

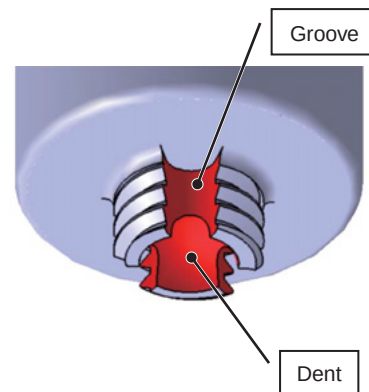


Fig. 10 Prove for developed tool

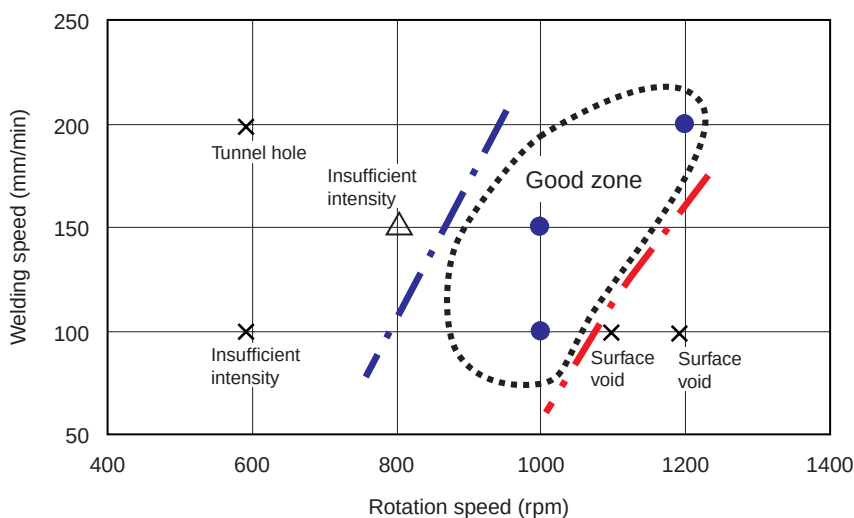
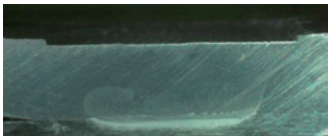
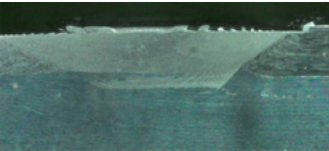


Fig. 9 Example of conditions for lap joint connection of 6000 series aluminium alloys

Table 3 Results of FSW using developed tools

No.	Joint	Type of material		Thickness (mm)	Cross-sectional micrograph	Joint efficiency
1	Lap joint	Top	A6N01S-T5	1.3		78%
		Bottom	A6061P-T6	28.0		
2	Lap joint	Top	A6N01S-T5	2.0		88%
		Bottom	A6061P-T6	28.0		
3	Lap joint	Top	A6N01S-T5	3.0		78%
		Bottom	A6061P-T6	14.0		
4	Lap joint	Top	A6061P-T6	2.0		71%
		Bottom	A6N01S-T5	3.0		
5	Butt joint	Right side	A6N01S-T5	2.0		91%
		Left side	A6061P-T6	7.0		

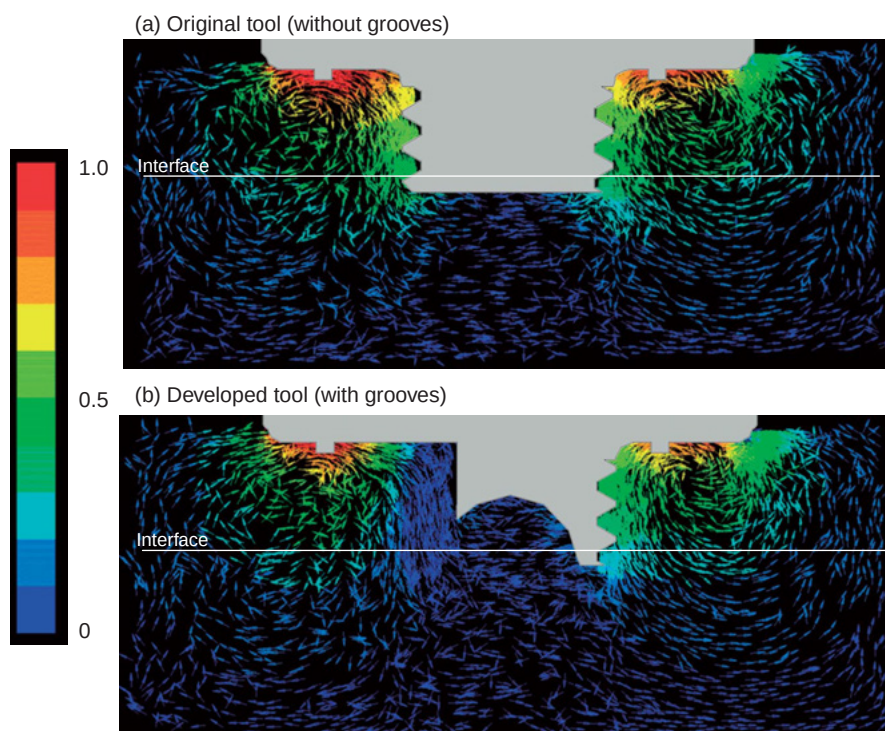


Fig. 11 Calculation of effectiveness of developed tool using CFD

4.4. 結果

今回の FCX クラリティ用 FC サブフレームでは、重ね継手12種類の板組みがあり、それぞれの板組みの上板厚に合わせて、ツールを5種類開発した。これらのツールは、プローブに縦溝を付けた形状である。突合せ用ツールは1種類開発した。

Table 3に開発ツールを用いた接合品質の検証結果を示す。巻き上げを抑制できたことにより、13種類の板組み全ての部位で母材の引張り強度に対する継手の引張り強度の割合(以下、継手効率)が60%以上であった。また、断面観察結果からも、巻き上げを抑制できていることが確認できた。

Fig. 12 に、FC サブフレームの完成品を示す。FSW の接合長は66箇所計2075 mmにおよび、接合によるひずみの量が少ないことから接合治具にひずみ量分の見込みを入れずに接合が可能となった。さらに接合後の修正をおこなわずに部品精度を満足することができたことで、修正作業工程を省略し作業効率の向上が図れた。

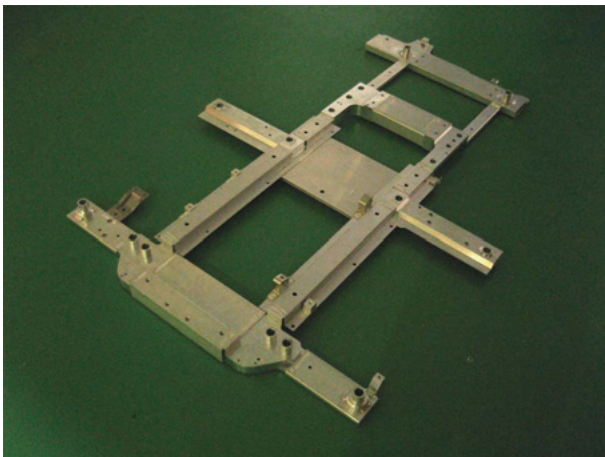


Fig. 12 Finished FC subframe

5. 量産設備

量産設備について簡単に紹介する。設備外観写真を Fig. 13 に示す。これは、FSW ツールに汎用の多関節ロボットを用いたシステムである⁽⁹⁾。二台のロボットにより支持された接合用治具に FC サブフレームをセットして、定置式の FSW 接合装置がワークを治具ごと挟んで接合する。2台のロボットの協調動作によりワークを載せた治具を動かして接合をおこなう。この装置は FSW ツールにかかる荷重を任意に制御することができるシステムであり、ロボットの動きと正確に同調することで安定した接合ができる。FSW ツールは剛性の高いフレームに取り付けられており、治具側はローラで接合荷重を支えている。また、このシステムはロボットのティーチングにより簡単に二次元はもとよ

り三次元の接合も可能である。

品質管理としては、FSW ツールの荷重や回転数、接合速度等の条件をモニタリングすることで、品質管理をおこなっている。また、6種類のツールを使用部位ごとに色分けして管理し、プローブ長と先端形状を定期的に確認している。

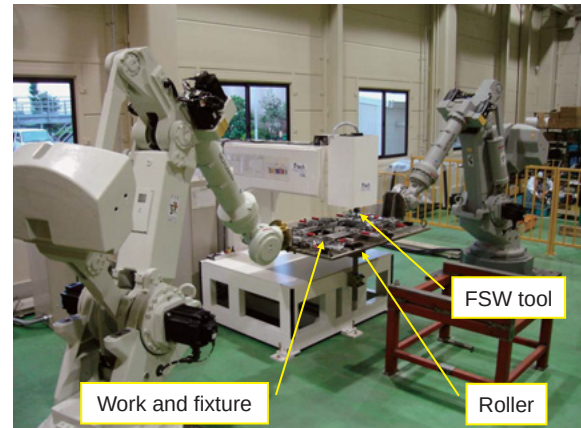


Fig. 13 Components of FSW machine

6. まとめ

本 FCX クラリティ用 FC サブフレームは、従来のアルミニウム合金板をプレスして抵抗スポット溶接と MIG 溶接で接合したものと比べて、17%の軽量化と修正作業廃止による生産性向上を達成することができた。

- (1) FSWの重ね継手では塑性流動による巻き上げが接合強度を低下させるメカニズムを明かし、流体解析ソフトウェアを用いて縦溝による巻き上げを抑えたツールを開発した。
- (2) このツールを用いることで、6000系アルミニウム合金の押し出し材と各種アルミニウム合金部材の重ね継手、突合せ継手において FSW をおこない、継手効率 60% 以上を達成した。

また、新しい量産装置としてのロボット接合システムは、接合荷重を制御して安定した接合をおこなうと同時に三次元接合も可能とした設備であり、安定した品質で FC サブフレームを生産している。

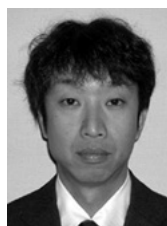
これからの自動車開発において軽量化は必須の技術であり、本技術を普及させて軽量化に貢献できると考えている。

参考文献

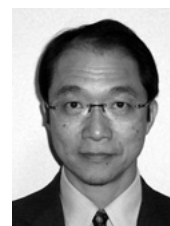
- (1) 時末光, 篠田剛, 熊谷正樹: FSW の実施例, FSW(摩擦攪拌接合)の基礎と応用, 日刊工業新聞社, p.129-161 (2005)

- (2) 藤井英俊：摩擦攪拌接合の原理と特徴，摩擦攪拌接合 (FSW のすべて)，産報出版，p.12-18(2006)
- (3) 時末光，篠田剛，熊谷正樹：FSWの原理と特徴，FSW (摩擦攪拌接合)の基礎と応用，日刊工業新聞社，p.11-12(2005)
- (4) 森久史，野田雅史，富永誉也：鉄道車両への摩擦攪拌接合の適用の現状，軽金属，第57巻，第11号，p.506-510(2007)
- (5) 古賀信次：自動車への Spot FSW の適用，摩擦攪拌接合 (FSW のすべて)，産報出版，p.232-235(2006)
- (6) 日本工業規格 JIS H4100：2006，アルミニウム及びアルミニウム合金の押出し材
- (7) 日本工業規格 JIS H4000：2006，アルミニウム及びアルミニウム合金の板及び条
- (8) 藤井英俊：摩擦攪拌接合の原理と特徴，摩擦攪拌接合 (FSW のすべて)，産報出版，p.22-24(2006)
- (9) 特開 2007-268558

■ 著 者 ■



小林 努



佐山 満



矢羽々隆憲



加藤 高士