

サブフレームへ適用可能な FSW を用いた スチールとアルミニウムの連続接合技術の開発

Development of Steel and Aluminum Continuous Welding Technology Using FSW
and Application to Subframes

宮 原 哲 也*
Tetsuya MIYAHARA
大 浜 彰 介*
Shousuke OHHAMA

佐 山 満*
Mitsuru SAYAMA
畑 恒 久*
Tsunehisa HATA

矢羽々 隆 憲**
Takanori YAHABA
小 林 努*
Tsutomu KOBAYASHI

要 旨

スチール製部材とアルミニウム製部材の接合を目的とし、Friction Stir Welding を用いてミグ溶接強度以上の連続接合技術を開発すると同時に、異種金属接合部位の防錆技術を開発した。この接合技術を量産適用するために産業用多関節ロボットを用いた独自の接合システムを開発し、従来のミグ溶接同等の効率と投資で実現した。また、接合強度を保証する非破壊のインラインシステムとして、高感度赤外線カメラとレーザ光を用いた検査システムも開発した。この技術を量産車の骨格部品であるフロントサブフレームに適用することで、前モデルに対し 25% の軽量化とサスペンション取り付け点剛性を 20% 向上させ、運動性能の向上を図り、また接合消費電力も 50% 削減することができた。

ABSTRACT

Continuous welding technology that uses Friction Stir Welding and has a welding strength equal to or above that of MIG welding was developed to weld together steel parts and aluminum parts, and at the same time technology was also developed to rustproof areas where dissimilar metals are welded. In order to apply this welding technology to mass production, an original welding system using an industrial articulated robot was developed, and application was realized with an efficiency and investment equivalent to that of conventional MIG welding. In addition, an inspection system using a highly sensitive infrared camera and laser beam was also developed as a non-destructive in-line system to assure joint strength. This technology was applied to the front subframe, which is a structural component of mass-production vehicles. As a result, compared to the previous model, the weight was reduced by 25%, the rigidity of the suspension mounting point was increased by 20%, the vehicle's dynamic performance was enhanced, and electrical power consumption during the welding process was reduced by 50%.

1. ま え が き

近年、地球環境保護のための低炭素化や省エネルギー化、燃費性能向上や運動性能向上の観点より、自動車軽量化ニーズおよび製造段階における省エネルギー化のニーズが高まってきている。フロントサブフレームに求められる機能は、サスペンション、パワープラント、ステアリングギヤボックスを保持するために十分な支持剛性を有することが必要である。また、操縦安定性能、振動騒音性能、衝突性能にも寄与する。そのため軽量かつ低コストで各必要性能を高次元で高効率に達成するために、自動車メーカー各社とも盛んに接合、構造、材料等の研究開発がおこなわれている⁽¹⁾。そのため軽量化の手法として、アルミニウム製サ

ブフレームやスチール製サブフレームにアルミニウム製メンバを機械結合する手法がある。これまでのサブフレームは、ミグ溶接を多用していることから、製造段階におけるエネルギー低減に限界があった。また、機械結合を用いた手法では点結合となるために、ウエイト低減や剛性向上も限界があり、大幅な運動性能の向上は困難である。

本開発ではミグ溶接と比較して、消費電力が少なく、製造時のランニングコストが安い Friction Stir Welding (以下、FSW) に着目し、従来のミグ溶接や機械結合に代わる異種金属接合技術を開発した。一般的にスチールとアルミニウムの接合は、十分な接合強度を得ることができず、機械結合や接着でしか接合ができなかった。また、FSW を用いた異種金属接合技術は、盛んに研究^{(2), (3)}されているも

* 四輪 R&D センター

** 本田技研工業株式会社

ののまだ実用化されておらず、防錆するための絶縁化技術も構築できていない。さらにFSWを用いる場合は大型の接合装置を使用することが知られているが、広い設置面積や多くのインフラ投資が必要である。そこで既存工場、生産ラインに適応できる省スペースかつ低インフラ投資で、一日当たり1500台以上の量産に使用されることを考慮し、生産タクトもミグ溶接同等となる接合システムを開発した。また、FSW接合部を非破壊で内部観察する手法としては、超音波検査などが従来から知られているが、接合部が部材内部となるため、容易に確認できない。そこで短時間かつ正確に接合部内部検査が可能な非破壊検査技術を開発する必要があり、独自の検査システムを構築した。

2. 異種金属接合技術開発のねらいと部品開発目標値

本技術開発のねらいは、以下の四つの項目である。

- (1) スチールとアルミニウム異種金属接合技術の確立
- (2) 防錆対応技術の確立
- (3) 産業用ロボットを用いた量産接合システムの確立
- (4) 非破壊検査技術および検査システムの確立

次に、スチール製部材とアルミニウム製部材のハイブリッドサブフレームを量産化するにあたり、目標値を以下に設定した。

- | | |
|--------------------|------------------|
| (1) ウェイト | :前モデル比 10% 以上軽量化 |
| (2) 構成部品点数 | :前モデル比 30% 以上削減 |
| (3) サスペンション取り付け点剛性 | :前モデル比 10% 以上向上 |
| (4) 接合消費電力量 | :前モデル比 30% 以上削減 |
| (5) コスト | :前モデル比 同等 |

3. スチールとアルミニウム接合手法と接合メカニズム

スチールとアルミニウムの異種金属接合には、低入熱での接合が可能なFSWを選択した。Fig. 1に示すようにFSWでは、融点以下の温度で固相接合するため、粗大で脆

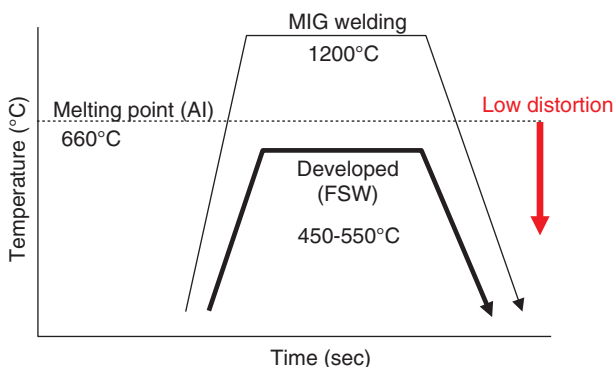


Fig. 1 Welding temperature of FSW

弱な Intermetallic Compound (以下、IMC) の形成を抑制できる。接合部は Fig. 2 に示すとおり、アルミニウム側から圧力をかけ回転しながら挿入されたツールにより、アルミニウム側が攪拌されるとともに、プローブ先端部がスチール表面のメッキ層、カチオン電着塗装、シール材などの不純物を破壊、除去し、スチールの新生面が現れ、IMC が形成されることで接合される。IMC の組成としては、 $\text{Fe}_4\text{Al}_{13}$ であることが電子回折パターンにより確認できた。また IMC の厚みは $1\mu\text{m}$ 程度に抑えられることが確認できた。Scanning Electron Microscope (SEM), Transmission Electron Microscope (TEM) の確認結果を Fig. 3 に示す。FSW の適正な接合条件設定に関しては塑性流動の安定化とプローブ挿入位置管理が重要であり、FSW の攪拌部は塑性流動の巻き上げ形態の違いから構造上の利点を考え配慮する必要がある。接合条件設定に関しては、回転数と送り速度の関係から Fig. 4 の網掛け部が適正範囲であることがわかった。挿入位置管理については異種金属接合に関して特に重要であり、プローブ挿入位置が浅い場合は界面からの不純物の排出が不十分となり安定した接合界面が得られない。反対

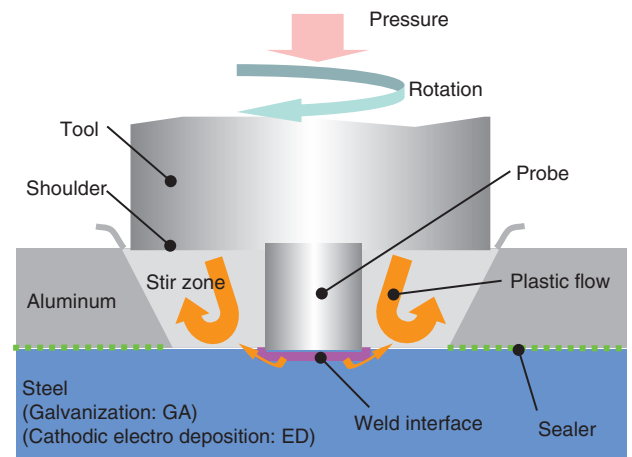


Fig. 2 Cross-sectional structure of Steel and Aluminum FSW

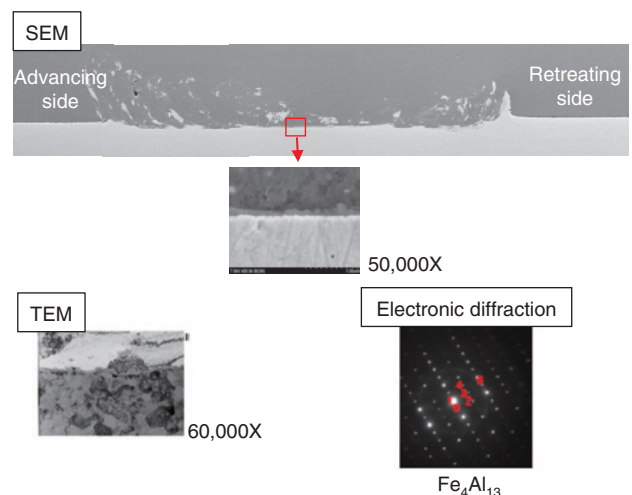


Fig. 3 Observation of IMC

にプローブ挿入位置が深すぎる場合は、界面からの不純物の排出は十分できていても、スチールとプローブのコンタクトが強すぎて、巻き上げが過大になるなど強度低下の原因にもなる。また、プローブの耐久性低下にもつながることから適正な範囲を設定する必要があった。

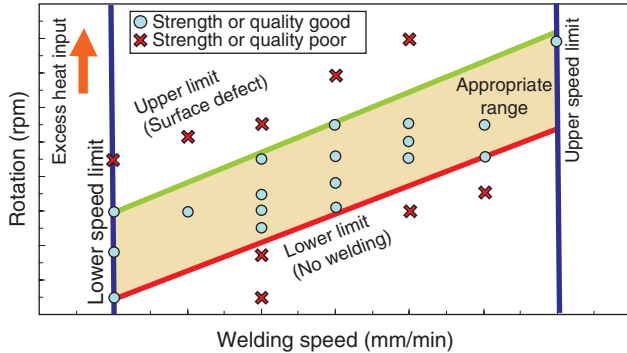


Fig. 4 Range appropriate FSW conditions

4. 防錆技術

接合部の断面模式図を Fig. 5 に示す。異材接合部近傍やエッジ部のスチール表面にはカチオン電着塗装が存在せず、メッキ層とアルミニウムが直接接触した状態となっ

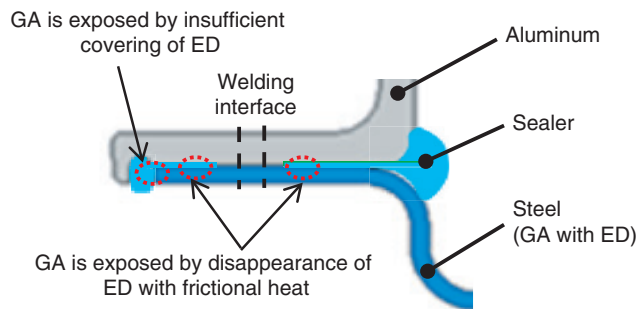


Fig. 5 Schematic cross section of welding part

Table 1 Required functions and properties for sealer

	Required function	Required property
(1)	Shut off from corrosion factors (water and corrosion current)	Water tightness, adhesion, and insulation
(2)	No failure to depend on frictional heat	Thermal stability
(3)	No failure to depend on market degradation	Durability over environment and vibration
(4)	Minimum investment in equipment and minimum cost for production control	One part agent providing cold curing

ている。このような異種金属接触部位に水等が浸入して腐食が発生するのを防ぐため、スチールとアルミニウムの間をシール材で充填する構造とした。シール材に要求される機能および物性を Table 1 に示す。これら観点から、シール材には 1 液型変性シリコン樹脂系シール材を選定した。次に、接合手順を Fig. 6 に示す。シール材を隙間なく充填するため接合前に塗布し、さらに塗布径や塗布位置を適正化した。なお、シール材の有無で接合強度を比較し、影響が無いことも確認した。また複合腐食試験機 (Cyclic Corrosion Tester: CCT) へ投入し、120 サイクルテストを実施した後の接合部近傍の断面写真を Fig. 7 に示す。シール材の無い試験片はアルミニウム側に最大深さ 0.4 mm の腐食が発生しているのに対し、シール材のある試験片は腐

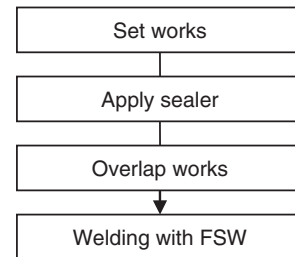


Fig. 6 Welding flow process

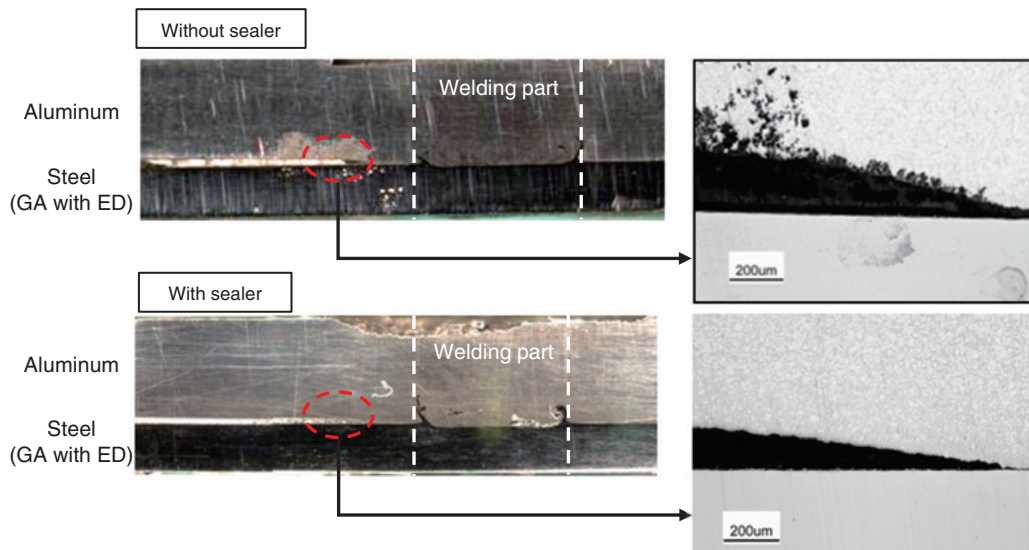


Fig. 7 Cross-sectional photos of welding test pieces with and without sealer after 120 cycles CCT

食が発生していない。このように、シール材を用いることで接合部の防錆性を確保することができた。また接合部の裏面のカチオン電着塗装が剥れたとしても、犠牲防食効果があり、防錆効果は保たれる。

5. ロボット FSW 技術

FSW 連続接合をおこなうには大型の門型接合装置⁽⁴⁾、⁽⁵⁾を使うのが一般的である。それは接合時のツールに大きな荷重がかかるため剛性の高い装置が必要だからである。この大型装置を量産に適用しようとした場合、広い設置面積 (Fig. 8) と大きな投資が必要であり、既存工場、生産ラインに導入することは困難である。そこで、産業用多関節ロボットを使い、小さな設置面積と投資を抑えられる接合装置を開発することとした。多関節ロボットによる FSW 連続接合の研究⁽⁶⁾、⁽⁷⁾もおこなわれているが、接合時の大きな荷重に耐えられる高い剛性を持った特殊なロボットの開発が必要とされていた。特に今回のサブフレーム構造における FSW 連続接合では、ツール軸方向の荷重は 10 kN 以上になる。この荷重に耐えられる特殊なロボットを開発するのではなく、ロボットに高荷重をかけないことをねら

い、Fig. 9 に示すような FSW 接合システムを開発した。この接合システムはロボットに高剛性 C 型フレーム構造の FSW 装置を搭載することで、ツール軸方向のロボット負荷を無くしている。その接合方法は、支持された接合用治具にスチール部材とアルミニウム部材をセットし、FSW 接合装置がワークを治具ごと挟んで接合をおこなう。また、C 型フレームの治具側がローラになっており接合進行方向に発生する荷重はロボットの許容荷重範囲より十分に小さくすることができた。さらに、接合速度も一般的なミグ溶接同等であり、従来の量産における生産タクトを達成できた。

この使用したロボットは 6 軸の制御をおこなっているが、本開発装置は 2 軸 (接合ツールの回転と挿入位置) をロボット自身の制御システムに組み込み、統合制御しており、接合用の特別な制御装置等を必要としないシンプルになった。このシステムは通常のロボットと同様にオンラインでもオフラインでもティーチングが可能であり、容易に二次元や三次元の接合プログラムを作成することができる。また、接合ツールの回転数や挿入位置、接合速度などを一括で制御しているのも、接合状態を常時モニタリングすることが可能であり、リアルタイムに品質管理

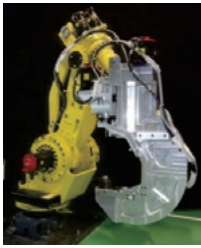
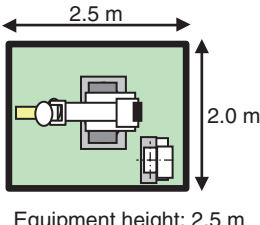
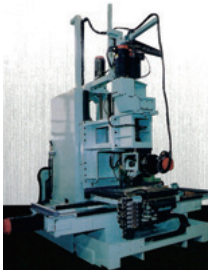
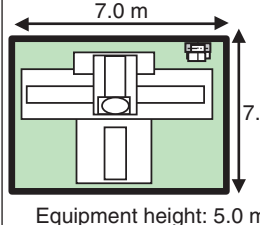
FSW unit of C-gun type robot		FSW unit of marketing	
Appearance	Ground contact size	Appearance	Ground contact size
			

Fig. 8 Comparison of FSW units

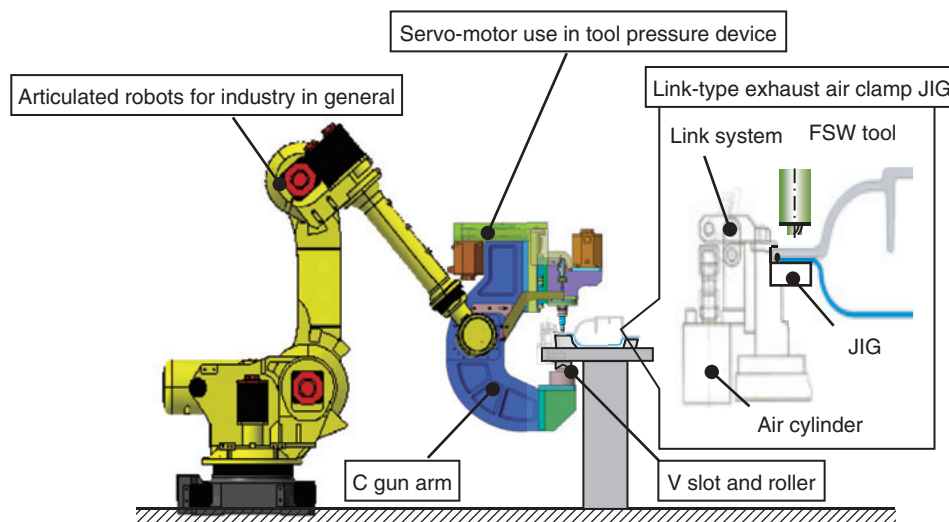


Fig. 9 FSW equipment appearance

をおこなうことができる。

産業用ロボットが使えるようになったことで、既存工場、生産ラインで安定した品質の生産が可能となった。加えてこの FSW 接合装置は、そのままアルミニウム同士の構造でも接合ができる高い汎用性を持っている。

6. 非破壊検査技術と検査システム

スチールとアルミニウムの異種金属接合部の品質管理として接合状態のモニタリングを含む条件管理と全数検査が可能でインライン非破壊検査の両者によりおこなった。既存の非破壊検査技術では異種金属接合部の品質を精度よく短時間で判定することができないことから、新たなシステムとして、光励起熱画像解析装置をベースに、レーザ励起システムを組み合わせた検査システムを開発した。このシステムはアクティブサーモグラフィの原理を用い、対象材料に適した熱源を組み合わせた構成としている。アクティブサーモグラフィは、材料に熱エネルギーを印加した時の積層方向（板厚方向）の情報を視覚化する技術である。印加した熱エネルギーを吸収した材料が素材（正常部）と異なる部位（巣、欠陥、界面など）において熱エネルギーを自己エネルギーとして放射する現象を高性能赤外線カメラで計測し周波数解析をおこなって視覚化する。従来の励起方法ではアルミニウムのような熱伝導の大きな材料の場合、熱拡散の方が深さ方向への伝熱の速さより大きくなるため精度の良い計測ができないという課題があった。そこで、照射エネルギーが大きく、出力調整（パワー密度、時間制御）が容易なレーザ装置を組み合わせ、スチール部材とアルミニウム部材の異種金属接合用にシステム構築をおこなった（Fig. 10）。また適用にあたり、以下のような特徴を考慮した。

6.1. 接合部断面構造

異種金属接合部の断面構造は以下に示すように三つに分

類できる（Fig. 11）。

- (a) IMC が形成されている熱伝導の大きい領域
- (b) IMC が形成されていないが密着していて熱伝導が (a) より低下している領域
- (c) シール材、カチオン電着塗装、空気層などにより熱伝導の著しく低い領域

この装置は、これら各領域からの反射エネルギーの位相の違いを検出し、接合品質の判断に利用する。

6.2. スチールとアルミニウム接合部構造

FSW 接合部の構造はスチールとアルミニウムの 2 部材による構造の他に一部にスチール、スチールとアルミニウムの 3 部材による構造の部分があるため、全て同じように計測できるように反射方式を採用した（Fig. 12）。また、反射方式の場合、周辺の反射光によるノイズが影響するため、測定条件や判定値の設定および再計測手法を盛り込み反射光に対する測定精度向上を図った。

これにより接合強度と位相角の関係から判定基準の設定（Fig. 13）をおこない、本システムの採用にてインラインでの全数検査が可能となった。

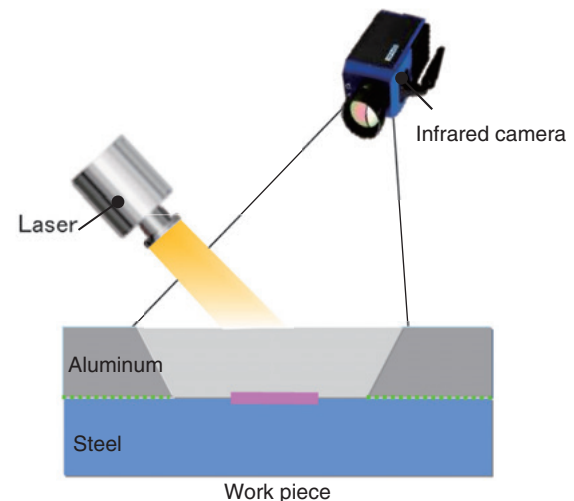


Fig. 10 Non-destructive inspection equipment

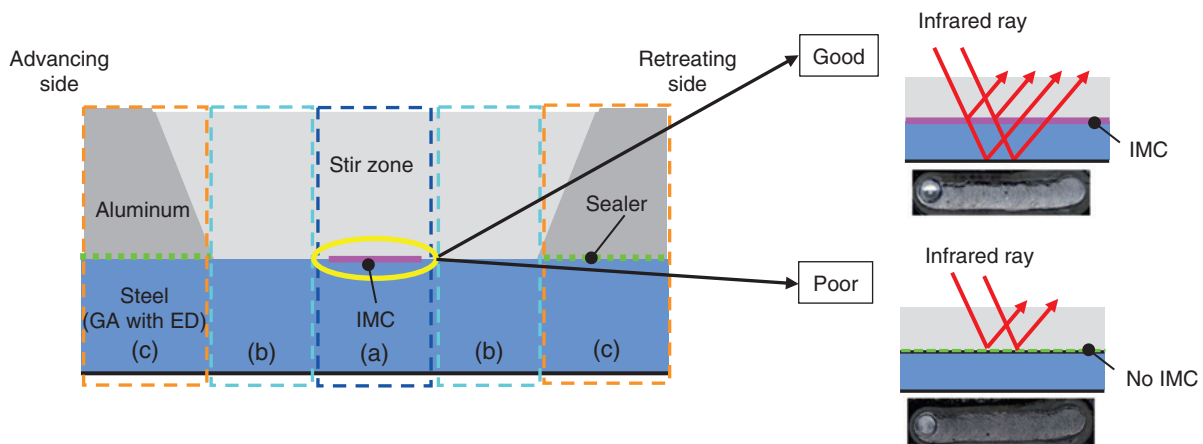


Fig. 11 Cross-section structure and judgment of welding

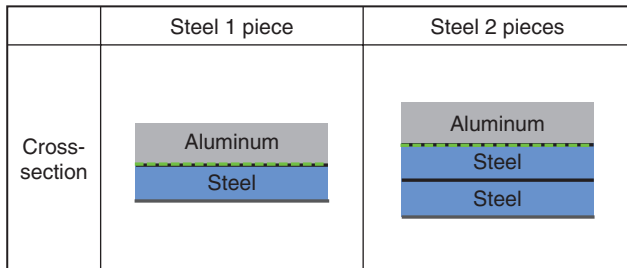


Fig. 12 Steel construction

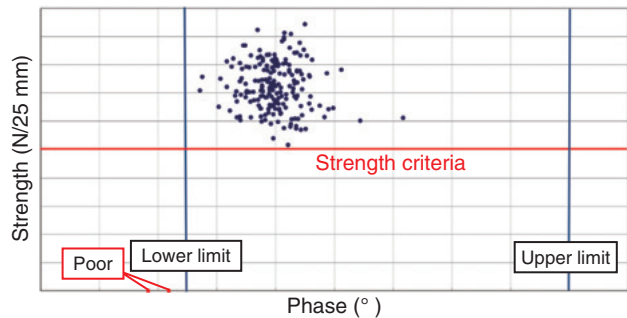


Fig. 13 Measurement result of non-destructive inspection

7. 異種金属接合技術を適用したハイブリッドサブフレームの構造

サブフレームはサスペンション、パワープラント、ステアリングギヤボックスの支持機能を有し (Fig. 14), かつ十分な支持剛性を確保すると同時に, 衝突モードのコントロールにも寄与している. 構造および材料構成を Fig. 15 と Table 2 に示す. 軽量化と構成部品点数の削減をねらい, パワープラントとステアリングギヤボックスの支持剛性を確保し向上すべく, リヤメンバをアルミニウムダイカスト製とした. また運動性能へ寄与が高いサスペンションロアアーム取り付け部にも剛性向上をねらうための配置とした. そして衝突時にはサブフレームを分断させることなく, エネルギー吸収を安定させるため, サイドメンバロ

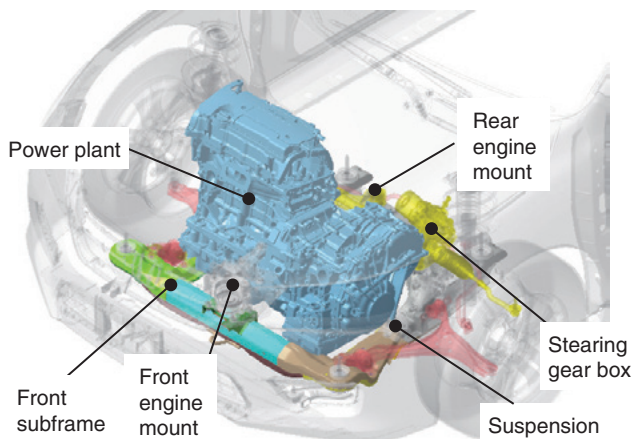


Fig. 14 Front subframe position of vehicle

Table 2 Materials of hybrid subframe for FSW

Steel parts		Aluminum parts	
Part name	Material	Part name	Material
Side member upper right-hand side	JAC270C	Rear member	Equivalent ADC3
Side member upper left-hand side			
Side member lower right-hand side			
Side member lower left-hand side			

アにはスチールシート材を採用した. 前モデルはスチールシート材メンバとアルミニウムダイカスト製メンバの構成部材を複数のボルトで機械結合していた. ハイブリッドサブフレームはスチールシート材メンバとアルミダイカスト製メンバの各々からフランジ部を形成させ, FSW による異種金属接合をする構造とした. これにより軽量化とコスト低減および省エネルギー化をねらった.

今回開発したリヤメンバは前モデルのメンバに対して, ウェイトが 3.2 倍, 製品投影面積は 2.4 倍 (Fig. 16) である. 製品形状の工夫や, 鋳造方案のコンパクト化により前モデル同一の鋳造機を用い, 1 型で 2 部品を採り, 高い鋳造品質とコスト低減を可能にした. また, FSW の接合面肉厚精度は接合品質に与える影響が大きい. このため鋳造方案と鋳造条件の適正化や, サブフレーム機能に必要な断面とリブ形状を工夫し, 湯流れ性を向上したことで, 機械的性

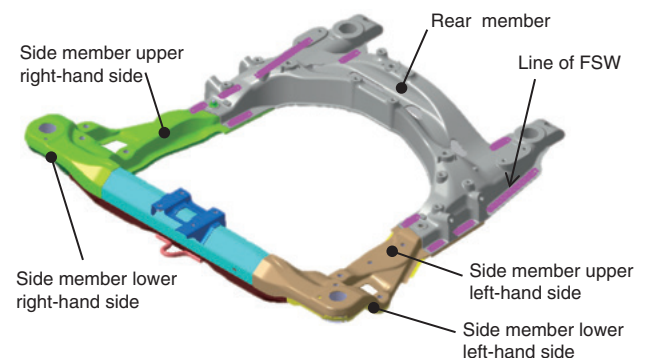


Fig. 15 Hybrid subframe components (after FSW)

Part name	Bolt tightening member	Rear member
Model year	2008	2013
Figure		
Weight [kg]	2.62	8.41
Projection area [cm²]	1008	2446
Casting machine/cavity	High vacuum diecast 3500 ton/2 cavity	High vacuum diecast 3500 ton/2 cavity

Fig. 16 Comparison of bolt tightening member and rear member

質を確保し、肉厚精度の向上が図れた。これにより FSW 接合面の機械加工を省くことができ、低コスト化が可能となった。以上より、アルミダイカスト製リヤメンバを採用し、FSW 異種金属接合技術を確立し適用したことで、構成部品点数は 40% 削減、ウエイトは 25% 低減、サスペンション取り付け点剛性は 20% 向上した。前モデルよりミグ溶接長も削減でき、接合消費電力量が 50% 削減できた。

8. まとめ

FSW を用いた異種金属連続接合技術を開発し、量産化技術を確立させたことで、以下の成果を得た。

- (1) 接合部の IMC メカニズムを解明し、適正な接合条件が構築できた。
- (2) 異種金属接合技術を用いた構造における防錆技術を確立した。
- (3) 産業用多関節ロボットを用い C 型フレームと治具構造、ロボット制御技術を開発し汎用性の高い量産接合システムを確立した。
- (4) 光励起熱画像解析装置をベースに、レーザ励起システムを組み合わせた非破壊検査技術を開発し、量産におけるインライン検査システムを確立した。

以上から前モデル比でウエイトは 25% の軽量化、構成部品点数は 40% の削減、サスペンション取り付け点剛性は 20% 向上し、接合消費電力量は 50% 削減できた。さらにコストは 5% 低減できた。今後異種金属接合技術およびハイブリッド構造サブフレームの適用を拡大することで、自動車の軽量化や製造における省電力化にさらに貢献することができる。

参考文献

- (1) 小林努, 佐山満, 矢羽々隆憲, 加藤高士: 燃料電池システム搭載用サブフレームにおける摩擦撚拌接合技術の開発, Honda R&D Technical Review, Vol.21, No.1, p.46-54
- (2) 下田陽一郎, 椿正己, 安井利明, 福本昌宏: 摩擦撚拌作用によるアルミニウムと鉄鋼材料の接合における接合界面形成におよぼす塑性流動の影響, 溶接学会, 第 89 集, p.142-143(2011)
- (3) 小椋智, 斎藤雄一, 西田太一, 廣瀬明夫, 西田英人, 吉田巧, 大道典子, 藤本光生: W/C ツールを用いた A3003/SUS304 摩擦撚拌接合継手の界面組織とその機械的特性, 溶接学会, 第 89 集, p.120-121(2011)
- (4) 時末光, 篠田剛, 熊谷正樹: FSW (摩擦撚拌接合) の基礎と応用, 第 7 章, 日刊工業新聞社, p.105-127(2005)
- (5) 摩擦圧接協会: 摩擦接合技術, 日刊工業新聞社, p.191-193(2006)

(6) Industrial Robot: An international Journal, Volume 31, Number 1, p.55-63(2004)

(7) Industrial Robot: An international Journal, Volume 37, Number 1, p.36-50(2010)

■ 著 者 ■



宮原 哲 也



佐 山 満



矢羽々隆憲



大 浜 彰 介



畑 恒 久



小 林 努