

自動車「技術トピックス編」*

佐山 満**, 宮原 哲也**, 畑 恒久***, 矢羽々隆憲****



佐山 満



宮原 哲也



畑 恒久



矢羽々隆憲

Automobile (Technical Topics)*

by SAYAMA Mitsuru**, MIYAHARA Tetsuya**,
HATA Tsunehisa*** and YAHABA Takatori****

キーワード

摩擦攪拌接合, 異種金属接合, 防錆構造, ロボットFSW, 非破壊検査, サブフレーム, ツール, 金属間化合物, C型フレーム, 赤外線カメラ

1. はじめに

自動車は人々が自由に移動できる事で、生活を便利にしてきた。しかし、近年では地球規模の温暖化や化石燃料資源の枯渇が懸念され、そのため多岐に渡るCO₂排出量削減の取り組みが行われている。自動車では、エンジンの効率向上と車両の軽量化がその両輪となっている。軽量化は、車体だけでなく数千点にも及ぶ組付け部品もその対象である。その中でも、サブフレームはサスペンション、パワープラント、ステアリングギアボックスを保持する剛性が必要であり、操縦安定性能、振動騒音性能、衝突性能も大きく関与している大型で重量も大きい骨格部品である。自動車メーカ各社は、必要性能を高次元に高効率かつ低コストで軽量化を達成するために、材料、構造、接合等の研究開発を進めている。例えば、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使われている。しかし、機械結合を用いた手法では点結合となるために、重量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

あった。

一般にスチールとアルミニウムを溶融溶接した場合、十分な接合強度を得ることは困難であるので、機械結合や接着を用いていた。本開発では、製造時のエネルギー消費の少ないFriction Stir Welding (以下、FSW) に注目し、従来の溶融溶接や機械結合に代わる異種金属接合技術を開発した。溶融溶接では、防錆するための絶縁化技術も構築できていなかったが、FSWの特長を活かした防錆技術確立し実用化した。また、既存工場・生産ラインでも設置可能な省スペースと低いインフラ投資でFSWを可能にする接合システムを開発した。さらに、接合部を内部観察する手法として、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した。以上の四つの新しい技術について紹介する。

2. ハイブリッドサブフレームの構造

今回の技術を適用したサブフレームについて簡単に説明する。自動車のサスペンション、パワープラント、ステアリングギアボックスを支持する剛性を確保した骨格部品(図1)であると同時に、衝突時において衝突モードのコントロールにも寄与している重要な部品である。

パワープラントとステアリングギアボックスの支持剛性を確保・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、軽量化と構成部品点数の削減をねらった構造を考案した。材料構成を図2と表1に示す。サスペンシ

*原稿受付 平成25年9月4日

** 株式会社技術研究所 四輪R&Dセンター Honda R&D Co.,Ltd. Automobile R&D Center

***正員 株式会社技術研究所 四輪R&Dセンター Member, Honda R&D Co.,Ltd. Automobile R&D Center

**** 本田技研工業(株) 鈴鹿製作所 Honda Motor Co.,Ltd. Suzuka Factory

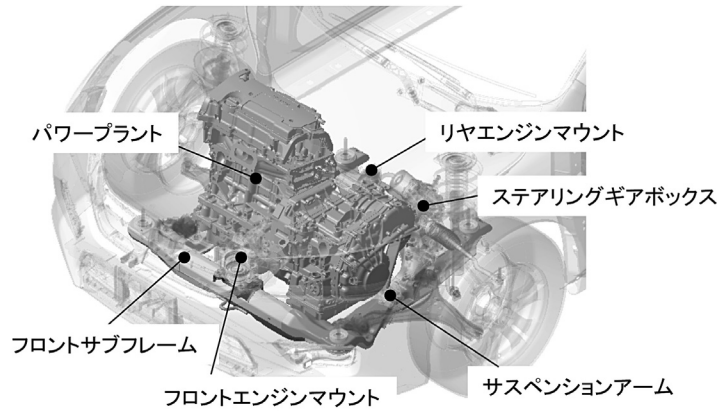


図1 フロントサブフレームの位置

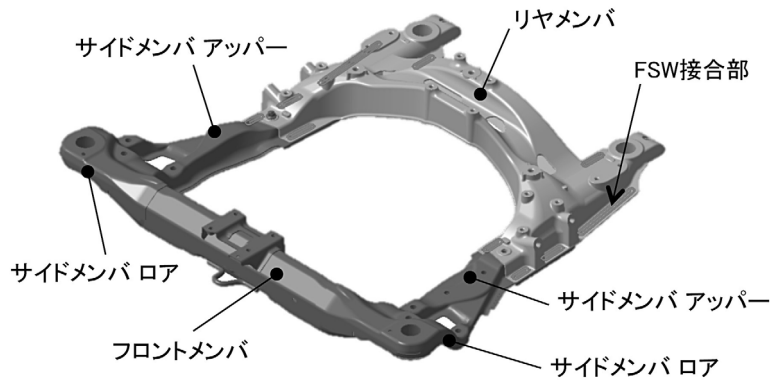


図2 ハイブリッドサブフレームの構成

表1 ハイブリッドサブフレームの使用素材

スチール部品		アルミニウム部品	
Part name	Material	Part name	Material
左サイドメンバアッパー	JAC270C	リヤメンバ	ADC3相当品
右サイドメンバアッパー			
右サイドメンバラオ			
左サイドメンバラオ			

名称	ボルト組付けメンバ	リヤメンバ
Model year	2008年型	2013年型
外観		
重量 [kg]	2.62	8.41
投影面積[cm ²]	1008	2446
Casting machine/cavity	高真空ダイカスト 3500 ton/2 cavity	高真空ダイカスト 3500 ton/2 cavity

図3 リヤメンバの比較

ンロアアーム取り付け部の剛性向上を狙う配置とすることで運動性能を高めた。そしてサイドメンバラオにスチールシート材を使い、衝突時にはサブフレームを分断させずに、エネルギー吸収を安定させている。この構造を成立させるために、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接合には、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実施した。

図3に示す新しく開発したリヤメンバは、前モデルのボルトによる組付け式に対して、重量が3.2倍、製品投影面積は2.4倍に大型化した。製品形状の工夫や、鑄造方案のコンパクト化を実施して、前モデルで使用していた鑄造機のまま、1つの鑄造型で同時に2個製品が採れるようにした。また、FSW接合面の機械加工を省けるように肉厚精度の向上をねらい、鑄造条件の適正化やサブフレーム機能に必要な断面・リブ形状を積極的に活用し、湯流れ性を向上さ

せた。これらの技術により高い鑄造品質と機械的性質を確保したうえで、低コスト化が可能となった。

新しい構造により、構成部品点数：40%削減、重量：25%低減、サスペンション取り付け点剛性：20%向上した。さらに前モデルよりもミグ溶接長を削減し、接合消費電力量も50%削減できた。

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おいては、粗大で脆弱な金属間化合物 Intermetallic Compound (以下、

IMC) 生成の抑制が重要である。IMC の厚さが $1\mu\text{m}$ 程度以下であれば実用できる接合強度が得られることから、低入熱で固相接合である FSW を選択した (図 4)。接合部は図 5 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の摩擦熱により軟化したアルミニウム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めっき層、カチオン電着塗装、シーラなどの不純物を破壊・除去し接合部の脇に押し出す事で、スチールの新生面が現れ、IMC が生成されることで接合する。IMC の組成として、Fe-Al-Si 合金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 $1\mu\text{m}$ 以下に抑えられることが確認できた。Scanning Electron Microscope (SEM) の確認結果を図 6 に示す。

異種金属接合条件の中でも、アルミニウムの塑性流動安

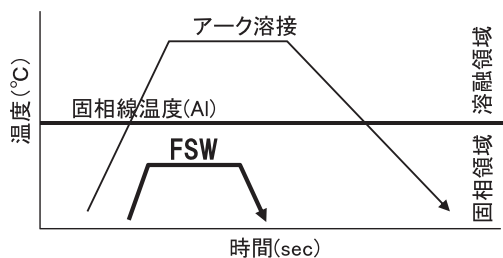


図 4 FSW の接合温度

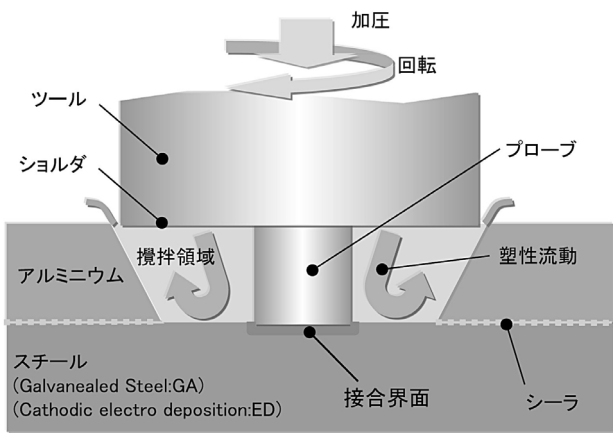


図 5 スチールとアルミニウムの FSW

定化とプローブ挿入位置管理が特に重要である。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ができていても、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る。

4. 防錆技術

適切な防錆技術の確立が異種金属接合には必要であり、その防錆技術の要は腐食因子を接合界面に到達させない事である。通常、接合後にシーラ等で封止する方法では、塗布のバラツキにより封止が不十分になり易く、閉断面になる部分の内側には塗布ができない。そこで、接合前に接合フランジ部にシーラを塗布し、ワークを重ね合わせる事でスチールとアルミニウム接触部分にシーラを隙間なく行き渡らせる手法を構築した。また、合金化溶融亜鉛めっきを施したスチール材は、接合前にカチオン電着塗装を施しておく。この状態のまま接合する事で、接合部付近には極薄くシーラが残存し、フランジ端部では適度にはみ出して、外部から腐食因子を侵入させない構造が完成する。図 7 に接合部の断面模式図を示し、接合手順を図 8 に示す。シーラに要求される機能および物性を表 2 に示す。これら観点から、1 液型変性シリコン樹脂系シーラを選定し、隙間なく充填するために塗布径や塗布位置を適正化した。なお、シーラの有無で接合強度を比較し、影響が無いことも確認した。

接合試験片を複合腐食試験機 (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図 9 に示す。シーラを塗布した試験片は腐食が発生してない事が確認できた。これに対して、合金化溶融亜鉛めっき材にカチオン電着塗装されている事で、シーラの無い試験片でも、アルミニウム側に最大 0.4mm の腐食であった。どちらの条件においても、試験後の引張強度は基準以上であった。このように、FSW による接合により亜鉛めっき材にカチオン電着塗装とシーラを適用す

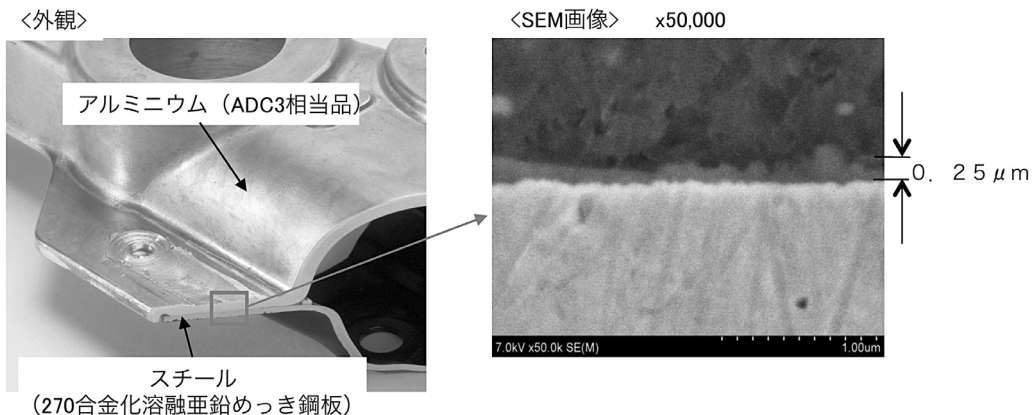


図 6 IMC の観察

ることが可能となり、接合部の防錆性を確保することができた。

5. ロボット FSW 技術

1日あたり1,500台以上の量産に適用する事を目指していたため、一般的なFSW連続接合をおこなうための大きな荷重に耐えられる大型で高剛性な門型接合装置^{2, 3)}では、広い設置面積(図10)と大きな投資が必要となり実現は困難であった。そこで、小さな設置面積と投資を抑えられる産業用多関節ロボットを使う事を検討した。しかし、多関

節ロボットによるFSW連続接合においては、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^{4, 5)}。

そこで、高荷重に耐えられる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FSW接合システムを開発した(図11)。今回のFSW連続接合では、ツール軸方向の荷重は約10kNになるが、高剛性C型フレーム構造なので、ツール軸方向の負荷はロボットにかからない。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、ロボットが接合進行方向にスムーズに動けるようにC型フレームの治具側がローラになっている。これらにより、接合速度は一般的なミグ溶接と同等である。

接合システムは特別な制御装置等を必要としないシンプルなシステムであり、産業用多関節ロボットは6軸の制御に加えて、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、統合制御している。その結果、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。

品質管理として、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することで、接合状態を常時モニタリングできリアルタイムに管理している。

また、このFSW接合システムは、ツールを変えるだけでアルミニウム同士の接合もできる高い汎用性を有している。

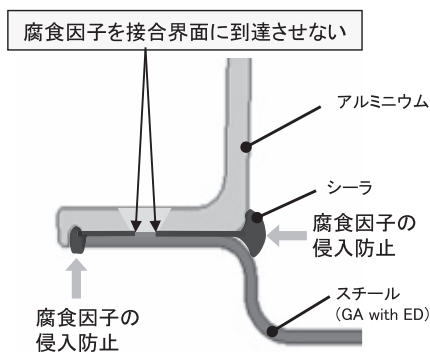


図7 防錆構造

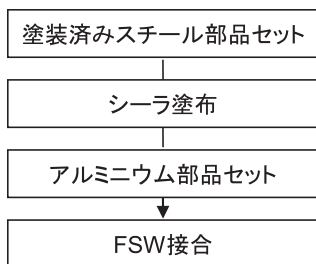


図8 接合手順

表2 シーラの要件一覧

	要求される機能	要求される物性
(1)	腐食因子の封止(水と腐食電流)	水密性、密着性および絶縁
(2)	接合熱による破壊がないこと	熱的な安定性
(3)	市場での劣化がないこと	環境と振動に関する耐久性
(4)	低投資・低コストで施工できること	1液型で自然乾燥

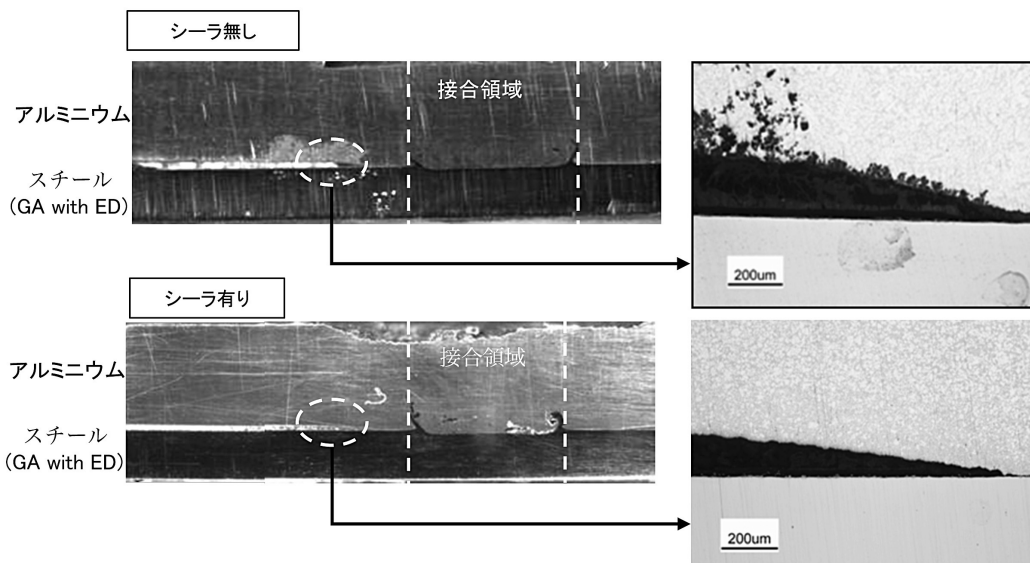


図9 CCT 120 サイクル後のシーラ有無の比較

6. 非破壊検査技術と検査システム

量産を行う上での品質管理は、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なインライン非破壊検査の両者を行う事とした。接合中のモニタリングは、ロボットが接合装置と一緒に制御しているので、ロボット自身が行っている。しかし、全数行う非破壊検査方法について

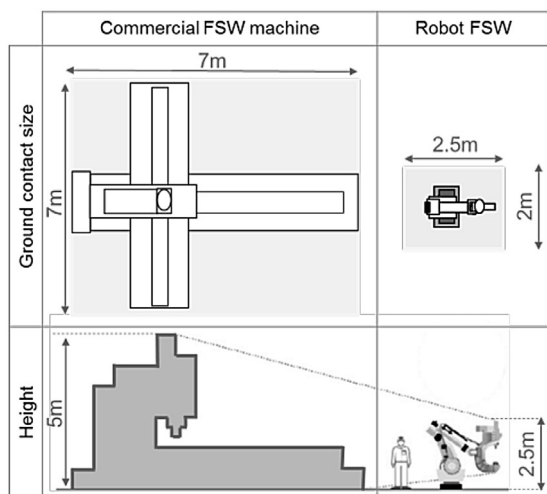


図10 FSW 装置の設置面積比較

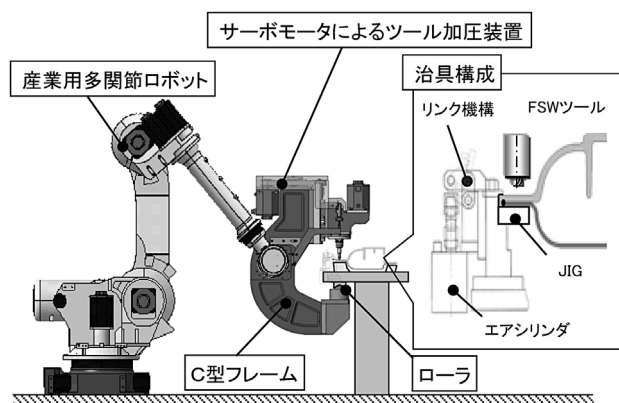


図11 FSW 接合装置

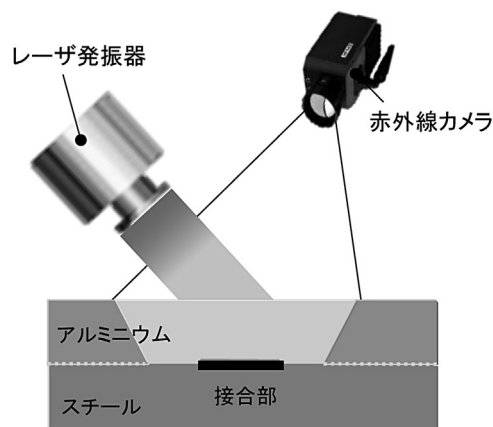


図12 非破壊検査装置の構成

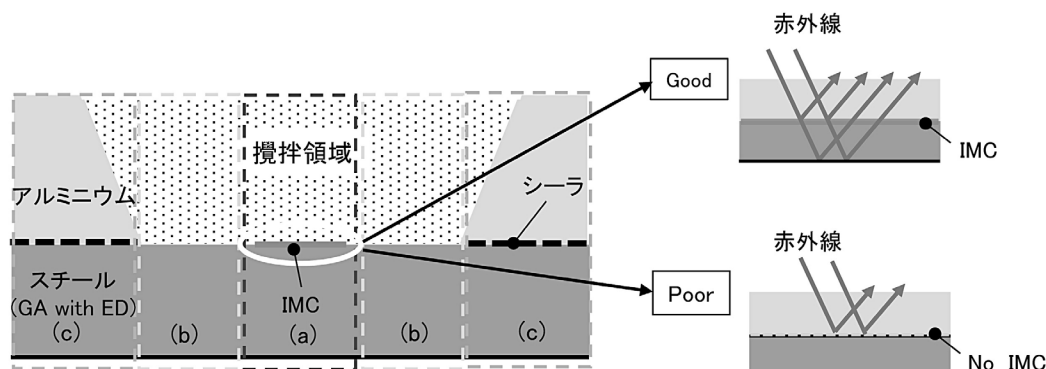


図13 接合合否判定の方法

は、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、新たなシステムを開発した。

このシステムは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とした。これは、アクティブサーモグラフィを用いて、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、図12に示す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。また適用にあたり、異種金属接合部の断面構造は以下に示すに三つに分類し(図13)、特徴を考慮した。

- (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

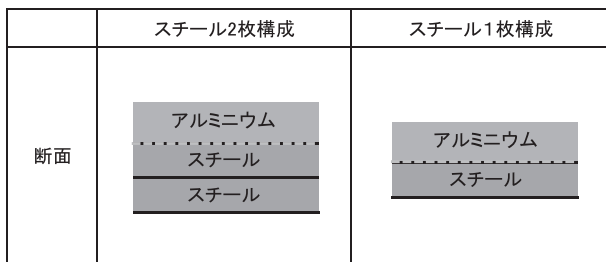


図14 スチール部材の構成

(c) シーラ，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．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(図14)，全て同じように計測ができるように反射方式を採用した．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．

7. ま と め

新しく確立した技術を以下にまとめた．

- (1) 接合部のIMCメカニズムを解明し，適正な接合条件を確立．

- (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．
- (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構築．
- (4) 光励起熱画像解析装置と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構築．

これらの技術により前モデル比で，重量は25%軽量化，構成部品点数は40%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．この新しいハイブリッドサブフレームは月産30,000台を超える生産を続けている．

FSWによる異種金属接合技術を確立し，高精度で大型化・一体化が可能なアルミニウムダイカスト部材をスチール部材と組み合わせて，軽量化と高剛性を両立させた合理的な構造を構築できた．これらの技術を適用拡大していくことで，自動車の軽量化や製造時の省電力化に貢献することができると考えている．

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攪拌接合技術の開発，Honda R&D Technical Review, Vol.21, Number 1, p.46-54 (2009)．
- 2) 時末 光，篠田 剛，熊谷 正樹：FSW (摩擦攪拌接合) の基礎と応用，第7章，日刊工業新聞社，p.105-127 (2005)．
- 3) 摩擦圧接協会：摩擦接合技術，日刊工業新聞社，p.191-193 (2006)．
- 4) Industrial Robot: An international Journal, Volume 31, Number 1, p.55-63 (2004)．
- 5) Industrial Robot: An international Journal, Volume 37, Number 1, p.36-50 (2010)．