

特集：新型ロードスター

17

鉄とアルミ材の点接合技術の開発

Development of Spot Friction Welding Technology of Aluminum Alloy and Steel

庄 司 庸 平*¹ 高 瀬 健 治*² 玄 道 俊 行*³
 Yohei Shoji Kenji Takase Toshiyuki Gendo
 埜 邦 彦*⁴ 森 川 賢 一*⁵ 野 口 竜 弘*⁶
 Kunihiko Tao Kenichi Morikawa Tatsuhiko Noguchi

要 約

マツダでは従来の抵抗スポット溶接に比べ、接合に使用するエネルギーを大幅に削減したアルミ材の摩擦点接合技術 (Spot Friction Welding, 以下SFW) を世界で初めて開発し、2003年のマツダRX-8から採用している。今回、このSFW接合技術の基本原則を応用発展させ、鉄とアルミ材の接合技術を確立し、新型ロードスターのアルミ製トランクリッドにおいて実用化した。

従来、鉄とアルミニウムのような異質な金属同士の溶融接合は困難とされてきたが、本接合法では接合ツールを用いて摩擦熱と加圧力を同時に作用させることにより、鉄とアルミ材の固相状態での接合を可能とした。本稿では接合メカニズムや接合特性について解説する。また、量産への適用開発結果についても紹介する。

Summary

Mazda, having developed the world's first Spot Friction Welding technology to join lapped aluminum sheets to each other, has employed this technology since application to the Mazda RX-8 in 2003. This time we have evolved this SFW technology and used to join an aluminum trunk lid for the updated and improved Mazda MX-5.

Up to now, mutual welding of two different metals such as steel and aluminum has been a difficult task. However, the simultaneous action between frictional heat and load by a rotating tool has enabled solid-state steel and aluminum joining. This paper introduces the joining mechanism and characteristics, and the application results for mass production.

1. はじめに

地球環境問題への対応を背景に、CO₂排出量の削減・燃費改善のニーズが高まっている。燃費改善を実現するには、エンジンの効率向上と併せて車両の軽量化が不可欠である。しかし、一方で衝突安全性や快適性の要求から、車両重量が増加する傾向にある。そのため、各自動車メーカーでは、構造・軽量化材料・工法など要素技術の開発に積極的に取り組んでいる。

中でも鋼材からアルミ材への材料置換は車体部品の軽量化における有効な手段の一つである。他社においてはアウディA8やジャガーXJのオールアルミボデーに代表される車体骨格にまでアルミ材を適用した例もあるが、鋼板に比

べて材料コストが高いため、軽量化メリットが大きいボンネットなどの蓋ものの部品への採用が最も多い。近年では、鋼板車体の一部をアルミ材に置換するハイブリッド車体構造が提案され、ダイムラークライスラーCL500やBMW5シリーズなどで実用化されている。軽量化したい部位にアルミ材の部品を採用することで、軽量化と製造コストとの両立を図っている。今後はこうしたハイブリッド車体構造の検討、実用化が増加すると考えられ、鉄とアルミ材を高品質かつ安価に接合する技術が必要とされている。

マツダでは、従来の抵抗スポット溶接 (以下RSW) に比べ使用エネルギーを大幅に削減したSFW接合技術を開発し、2003年からRX-8のアルミボンネットとリヤドアに適用している。今回、このSFW接合の基本原則を応用発展さ

*1, 2 車体技術部
Body Production Engineering Dept.

*3 技術研究所
Technical Research Center

*4~6 第1車両製造部
Vehicle Production Dept. No.1

せ鉄とアルミ材の点接合技術を確立した。本稿では本技術の接合メカニズムや接合特性について解説する。また、本技術は新型ロードスターのトランクヒンジ部に適用しており、その適用開発結果についても紹介する。

2. 開発の狙い

2.1 鉄とアルミ材の溶接性

Table 1に示すように、アルミニウムと鉄ではその物理特性、特に融点や熱伝導度が大きく異なる⁽¹⁾ことから、アーク等を用いた溶融溶接では両者の金属を均一に溶融することが困難な上、仮に溶融しても接合部に脆い金属間化合物が形成される⁽²⁾ため、接合強度が著しく低下する。

したがって既存の接合法としては、ブラインドリベット、セルフピアッシングリベット、クリンチングなど機械的な接合が一般的である。しかし、リベット接合では副資材が必要となるためランニングコストが増加する。また、クリンチングでは接合強度が低く適用部位が制限されるなどの問題点があった。

2.2 SFW接合技術の特長

アルミ材同士の接合法として開発したSFW接合はFig.1に示すように、材料の上下から鉄製の接合ツールで接合部をはさみ込み、上側の接合ツールを加圧しながら回転させることで発生する摩擦熱でアルミ材を軟化させ、固相接合する工法である⁽³⁾。

この接合法をベースとし、アルミと鉄の脆弱な金属間化合物生成の抑制による安定した接合強度の確保と、リベットなど副資材の廃止によるランニングコストの低減を狙いとし開発に取り組んだ。

3. 鉄とアルミ材の接合プロセス

鉄とアルミ材の接合では、融熔点以下の温度で金属間化合物を生成せずに固相接合を行う必要があるが、単に固体金属同士を高温・高圧で接触させるだけでは接合できない。接合を阻害する要因は金属表面の薄い酸化皮膜であり、両者を固相接合するには、その酸化皮膜を破壊し、金属の新生面同士を圧接する必要がある。一般に酸化皮膜は脆弱なことから、破壊には金属表面を大きく変形させる加工が有効である⁽⁴⁾。

鉄とアルミ材の接合ではFig.2に示すように、回転ツール側にアルミ材、下部受け具側にめっき鋼板を配置する。回転ツールは鋼板に接触しない範囲で挿入されアルミ材を塑性流動させる。これによりアルミ側表面が大きく塑性変形し、酸化皮膜が破壊される。鋼板には塑性加工が及ばず酸化皮膜を破壊することはできないが、この点はめっき鋼板を用いることで克服している。

接合プロセスは、まず回転ツールを特定の加圧力で材料表面に押し付け、摩擦抵抗による発熱で上板のアルミ材を軟化させる。同時に下板のめっきも軟化させる。次に回転ツールによって軟化したアルミ材の塑性流動により界面の酸化皮膜が破壊され、同時に界面のめっきが除去される。この結果、めっきがなくなった範囲ではアルミ材及び鋼板の新生面同士が直接接触することになる。更に上下のツールを用い、特定の加圧力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と考えられる。

Fig.3に代表的な接合部の断面写真を示す。鋼板表面のめっき層は除去され、界面においてアルミ材と鋼板が直接

Table 1 Physical Properties of Iron and Aluminum

Property	Iron	Aluminum
Melting point()	1535	660
Thermal expansion coefficient(10^{-6})	12	24
Thermal conductivity	0.12	0.52
Specific gravity	7.86	2.70

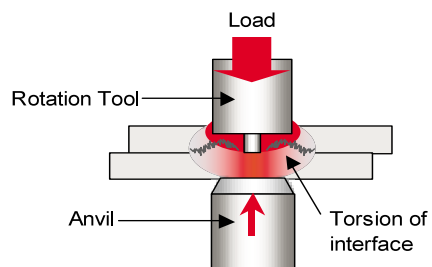


Fig.1 Schematic Image of SFW

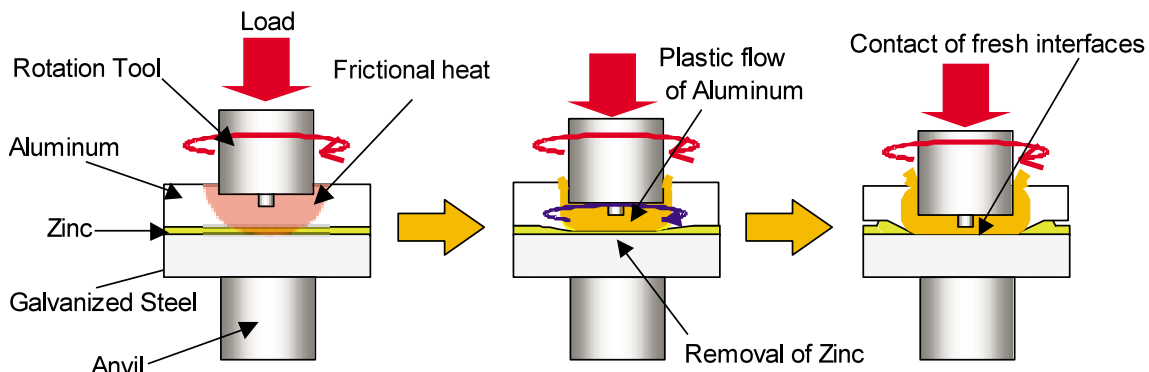


Fig.2 Schematic Image of SFW of Aluminum and Steel

圧着し、接合している。

Fig.4に接合部界面 (Fig.3のA部) のEPMA分析結果を示す。比較のため、Fig.5にめっき鋼板表面のめっきと素地鋼板との境界部の分析結果を示す。界面において明瞭な亜鉛めっき層は認められず、鋼板表面のめっき層が除去されているのが分かる。

Fig.6にめっきが溶融し始める固相線温度と接合強度の関係を示す。接合時の界面温度に対して固相線温度が低いめっき種ほど界面からの除去が容易なため接合強度は高くなる。

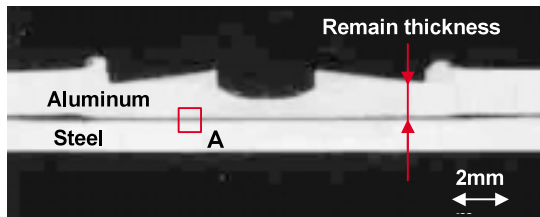


Fig.3 Cross-section of SFW Joint

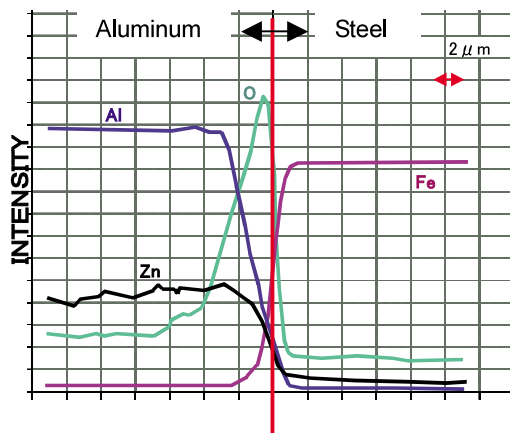


Fig.4 EPMA Result at the Interface

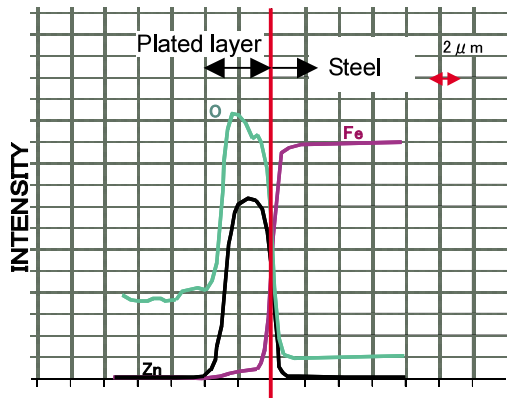


Fig.5 EPMA Result on the Galvanized Steel

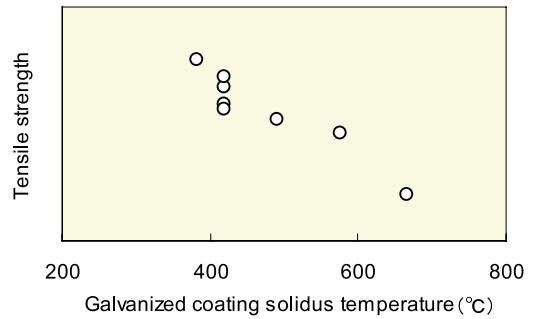


Fig.6 Relationship between Galvanized Coating Solidus Temperature and Strength

4. 接合条件と接合強度の関係

SFW接合では、加圧力、回転数、接合時間の3種類が重要な接合条件である。ここでは、これら接合条件と接合強度の関係を解説する。

4.1 加圧力の影響

回転数・接合時間を固定し、加圧力のみを変化させた場合の加圧力と引張りせん断強度、及び上板の残り板厚 (Fig.3参照) との関係をFig.7に示す。加圧力の増加とともに接合強度は増加し、ある加圧力から飽和する傾向にある。残り板厚はほぼ直線的に減少する。

これは加圧力に比例してツールのアルミ材内への押し込み量が増加した結果、アルミ材の塑性流動による酸化皮膜の破壊と界面のめっき除去が促進され、接合面積が増えるが、更に加圧力を増加させるとアルミ材の板厚減少により強度が飽和するためである。

4.2 回転数の影響

加圧力・接合時間を固定し、回転数のみを変化させた場合の回転数と引張りせん断強度及び残り板厚の関係をFig.8に示す。回転数の増加に対し初期は引張りせん断強度も増加するが、ある回転数でピークを示しその後は減少に転じる。接合中、回転ツール直下のアルミ材はツールとの摩擦力によって回転方向にも塑性流動し、更にその下部の材料も上部に追従するような形で塑性流動すると考えられる。回転数が高くなりすぎるとツールとアルミ材との間

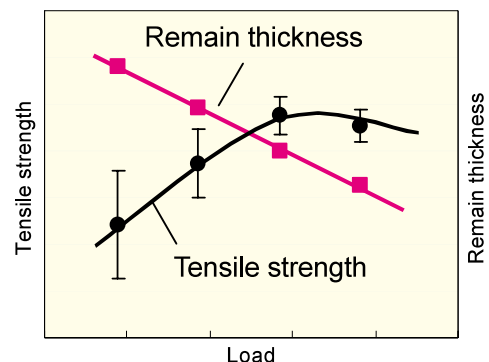


Fig.7 Relationship between Tensile Strength and Load

にすべりが生じアルミ材の塑性流動が不十分になり、接合強度も低下すると考えられる。

4.3 接合時間の影響

Fig.9に、加圧力・回転数を固定し、接合時間のみを変化させた場合の、回転数と引張りせん断強度及び残り板厚との関係を示す。加圧力を変化させた場合と同様、接合時間が長くなるとともに接合強度は増加し、ある時間から飽和する傾向にある。

接合時間が長くなるほど、軟化したアルミ材の塑性流動量が増加し、めっきの除去が促進される。その結果、接合面積が増えることで接合強度は増加するが、同時にアルミ材の板厚減少により強度が飽和するためである。

5. 量産への適用

Fig.10に本接合法を量産部品へ適用するために検討した 接合品質に影響を及ぼす材料や製造要因の一覧を示す。以下、代表的な要因の影響について説明する。

5.1 素材の影響

(1) 自然時効の影響

アルミニウム合金では時間の経過とともに、合金元素が析出し硬度が上昇する時効硬化が見られる。このため、時効硬化が接合強度に及ぼす影響について調査を行った。

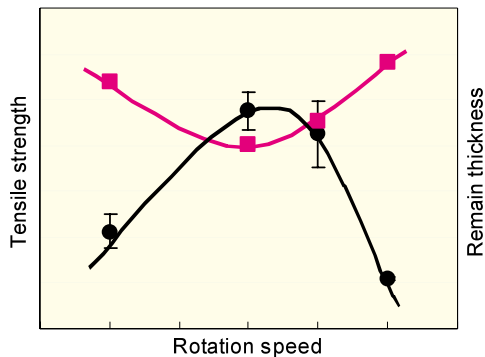


Fig.8 Relationship between Tensile Strength and Rotation Speed

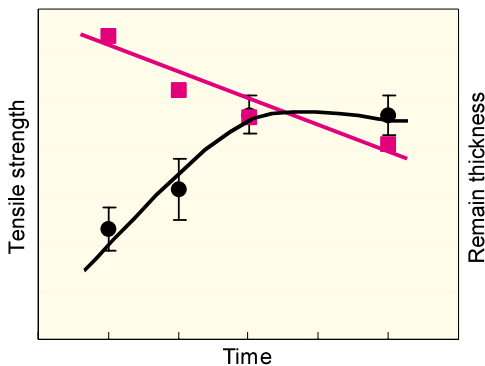


Fig.9 Relationship between Tensile Strength and Time

Fig.11に、T4熱処理からの自然時効時間（月数）と接合強度の関係を示す。接合強度は2ヶ月時点までは上昇するが、それ以降はほぼ一定の強度を示した。これは時間の経過に伴って材料自体の強度が上昇するためである。

(2) 鋼板めっき目付け量の影響

Fig.12に、めっき目付け量と接合強度の関係を示す。めっきのばらつきは接合強度に影響を及ぼすことが懸念される。例えば、目付け量が多い場合には界面のめっき除去が不十分になり強度が低下することが予想されたが、標準的な目付け量と規格上限の目付け量で接合強度に大きな差は見られなかった。

5.2 部品精度及び表面状態の影響

(1) 部品間隙の影響

部品の寸法精度ばらつきにより接合部の上板(アルミ板)と下板(鋼板)の間には、隙間が発生する場合がある。Fig.13に、板間の隙間と接合強度の関係を示す。隙間が大きくなるに従い接合強度は低下し、一定の隙間以上で接合できなくなる。したがって板間隙を適正值内にするよう部品を育成するとともに、管理項目として設定した。

(2) 材料表面状態の影響

アルミ材表面に付着する油は接合初期の摩擦熱発生に影響し、鋼板とアルミ材間の付着は両者の新生面同士の接触

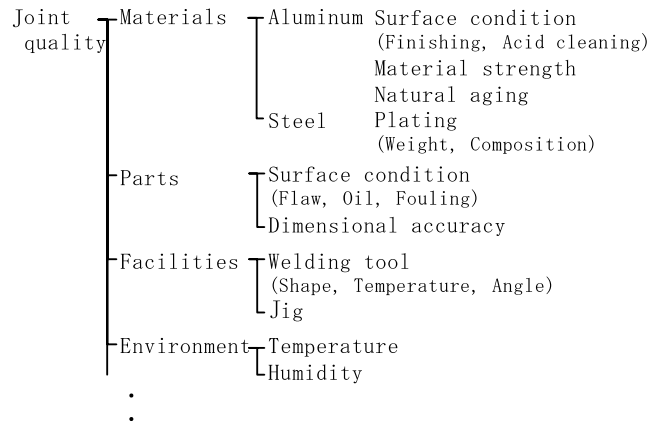


Fig.10 Welding Parameters Affecting Joint Quality

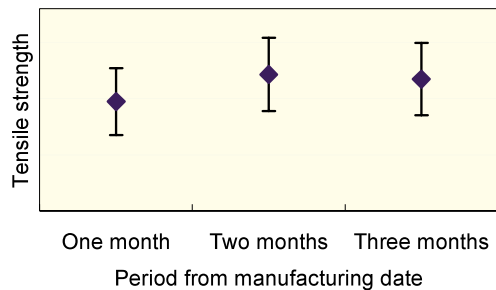


Fig.11 Relationship between Tensile Strength and Natural Aging

を妨げる要因となることが考えられる。Fig.14はプレス工程においてアルミ部品表面に付着する洗浄油の塗布ありなしで引張り強度を比較した結果である。ばらつきに若干の差はあるが、強度はほぼ同等であった。塗布した油は接合の初期段階で摩擦熱によって気化するため、接合強度へ与える影響は小さいと考えられる。

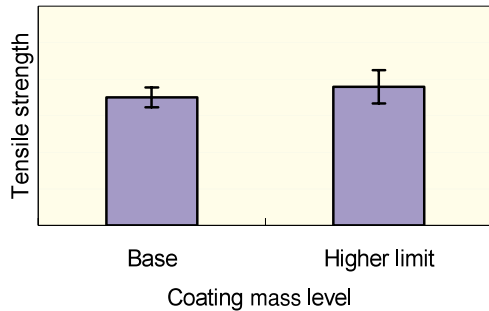


Fig.12 Relationship between Tensile Strength and Coating Mass level

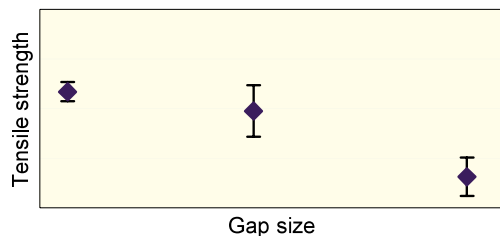


Fig.13 Relationship between Tensile Strength and Gap

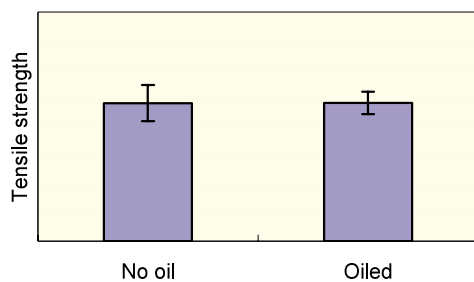


Fig.14 Relationship between Tensile Strength and Oil



Fig.15 Appearance of Reinforcement Assembly

6. 採用部位

Fig.15に、新型ロードスターのアルミ製トランクリッドインナパネルの外観写真を示す。本接合技術は、写真中の丸印で示すヒンジレインフォースメントと鋼製ボルトリテーナとの締結に適用している。

7. まとめ

- (1) 回転ツールによる摩擦熱を利用することで、これまで困難とされていたアルミ材と鋼板の点接合を実現した。この技術は摩擦熱とアルミの塑性流動によって、鋼板のめっき層を界面から除去し、互いの新生面同士を圧着させる点がポイントである。
- (2) 接合条件、材料及び製造因子と接合強度の関係を明らかにし接合条件を設定した。
- (3) 本技術を新型ロードスターのアルミ製トランクリッドへ適用し、2005年8月より量産を開始した。これにより、リベットの廃止によるランニングコストの低減に貢献できた。更に副次的ではあるが、ボルトリテーナにめっき鋼板を採用することで、電着塗装廃止によるコスト削減というメリットもある。

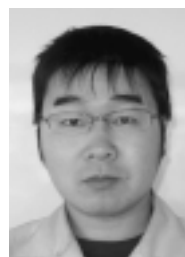
参考文献

- (1) 中田一博：異材溶接の基礎とその展開，溶接技術（9月），vol.52，p.141-146（2004）
- (2) 中田一博：異材溶接の基礎とその展開，溶接技術（10月），vol.52，p.126-130（2004）
- (3) 村上土嘉ら：環境にやさしい接合技術の開発，自動車技術，vol.57，No.6，p.63-68（2003）
- (4) N.Bay：Mechanisms Producing Metallic Bonds in Cold Welding, Welding Journal, 137（1983）

著者



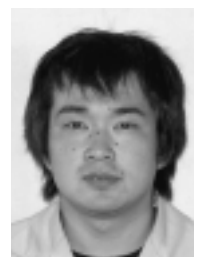
玄道俊行



埜 邦彦



森川賢一



野口竜弘