

17

アルミニウム／CFRPの異材点接合技術 Dissimilar Material Spot Joining Technique of Aluminum and CFRP

西口 勝也*¹ 田中 耕二郎*² 森田 泰博*³
Katsuya Nishiguchi Kojiro Tanaka Yasuhiro Morita
杉本 幸弘*⁴
Yukihiro Sugimoto

要 約

地球環境問題を背景に自動車においては抜本的な車体重量の低減が求められており、従来の鋼板のみの単一素材ではなくアルミニウムや樹脂材料などを適材適所に配置したマルチマテリアル車体の研究が進められている。マルチマテリアル車体の主要材料、鋼板、アルミニウム等の金属、これに炭素繊維強化プラスチック（Carbon Fiber Reinforced Plastics : CFRP）を組み付けるための接合技術が必要となる。従来、異種材料の接合にはリベットやボルト／ナットなどの機械締結が用いられ、生産性やコスト面の課題が大きかった。アルミニウムとCFRPとを副資材なしに直接接合可能とするため、アルミニウム同士やアルミニウム／鋼板の異材接合法として実用化された「摩擦攪拌点接合」をベースとした異材接合技術の開発を行っている。本工法では、CFRPのマトリクス樹脂中に存在する官能基とアルミニウム表面の酸素リッチ層とが化学的に結合し接合されると推測された。また、接合条件を適正に設定することにより接合強度はアルミニウム抵抗スポット溶接のJIS A 級引張せん断荷重を上回る値を示した。接合部の要求強度や樹脂の熱的性質に応じて接合パラメーターを適正に設定することで多様な樹脂への適用可能性が示唆された。

Summary

Radical reduction in body weight is asked in vehicle development against the background of the global environmental problem, and a study of the multi-material body, arranging aluminum and CFRP properly instead of the conventional steel sheet body, is advanced. The joining technique to assemble a steel and aluminum materials, which are the main materials of the multi-material vehicle-body, and CFRP is needed. Application to joining of aluminum and CFRP was considered based on the "friction stir spot welding" which came to practical use as the dissimilar material joining way of aluminum materials or aluminum and a steel sheet. It was guessed that a joining mechanism is the chemical bonding between the functional group which exists in matrix resin of CFRP and an oxygen rich layer in the aluminum surface. Also, the joining strength indicated the value higher than the JIS A-grade tensile shear strength of the aluminum resistance spot welding by adopting joining condition properly. Proper adoption of joining parameter based on the required strength of the joint and thermal property of resin indicated applicability to diverse resins.

1. はじめに

地球環境問題を背景に自動車などの輸送機器には二酸化炭素排出量の削減が求められており、軽量化は電動化、内燃機関や伝達系の効率向上、摩擦や転がり抵抗低減などととも燃費改善の有効な手段である。自動車におい

ては抜本的な車体重量低減をねらい、従来の鋼板のみの単一素材だけではなく、アルミニウムや樹脂材料など各種材料の特徴を活かして適材適所に配置したマルチマテリアル車体の研究が進められている。

Fig. 1に、マルチマテリアル車体構想の一例を示す⁽¹⁾。マルチマテリアル車体実現のためには材料開発と、異種

*1～4 技術研究所

Technical Research Center

材料の接合技術が必要であり、それらをコストと生産性を高次元で両立し実現する必要がある。これらを背景として、平成26年度からNEDO委託事業「革新的新構造材料等研究開発」が開始され、革新的鋼板、アルミニウム、CFRPなどの軽量材料開発とそれらの接合技術開発が行われている。本稿では、マルチマテリアル車体の概要、NEDO委託事業の研究テーマの一つであるアルミニウム／CFRPの摩擦攪拌点接合技術開発の概要を報告する。

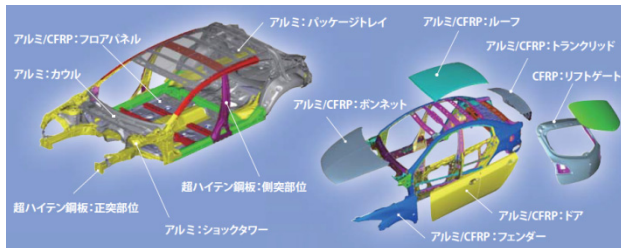


Fig. 1 Example of Study of Multi-material Body

2. 車体の軽量化と接合技術

2.1 車体のマルチマテリアル化

車体はボディーシェルとハングオン部品からなり、車両重量の40%を占める大物部材である。その軽量化はシャシーやパワートレイン部品等にも波及するため、二次的な軽量化の効果も大きい。また、衝突安全性能、走行性能や振動騒音など車両の商品性に直結するため、車体の基本構造、材料の変更には大きな投資を伴う。車体構造の最適化、材料工法の選定が重要である。

現在の車体材料は鋼板が主体であり、今後も中心的な役割を果たすと考えられ、高張力鋼板、ホットスタンプ等の適用拡大が進み、中長期的には鋼板以外の材料も適材適所に適用したマルチマテリアル化が進展すると考えられている。既に欧州の一部高級車では、鋼板、アルミニウム及びCFRPを組み合わせたマルチマテリアル車体の実現されている。国内でも、軽量化と走行性能の向上をねらいにハングオン部品へのアルミニウム材料置換が進んでおり、一部の少量生産の高級車ではCFRP部材の適用も始まっている。

2.2 異種材料接合技術

従来の鋼板製車体は鋼板パネルをアセンブリーするモノコック構造が主流であり、その接合には抵抗スポット溶接が1台当たり3000~4000点程度使用されている。抵抗スポット溶接は、副資材が不要で1点当たりの接合コストが小さい、ロボットによる自動化が容易でかつ接合時間が短い、板組に対する自由度が大きいなどの優れた特徴をもつ。マルチマテリアル車体の組み立てに用いられる異材接合技術も抵抗スポット並みの品質、コスト、

生産性が求められる。

鋼板／アルミニウムの接合では、接合装置が両サイドからアクセスできる構造にはセルフピアッシングリベット（SPR）の適用が主流であり、中空材と板材の接合など片側からのみアクセス可能な部位にはブラインドリベットやフロードリルスクリュー（FDS）などの工法が用いられる。高強度鋼板とアルミニウムの接合では、SPRの適用が難しいため、摩擦圧接の原理を利用したフリクションエレメント溶接（FEW）の適用も始まっている。CFRPと金属の接合では、低い塑性変形能や層間はく離等の問題があるため依然としてブラインドリベットと接着による結合が主流である。

CFRPは現状材料コストが高く、調達性、リサイクル性など考慮するとその特徴を最大限に発揮できる部位への限定的な使用が現実的と考えられる。量販車種を想定したマルチマテリアル車体の主要材料である鋼板、アルミニウム等の金属、これにCFRPを組み付けるための接合技術が必要となる。従来のリベット接合には生産性やコスト面の課題が大きく、自動化や低コスト化に対応した新たな接合技術が必要である。以下に、アルミニウム同士やアルミニウム／鋼板の異材接合法として実用化された「摩擦攪拌点接合」^(2,3)をベースに開発中の、アルミニウム／CFRP摩擦攪拌点接合技術のメカニズム、性能について報告する。

3. アルミニウム／CFRPの摩擦攪拌点接合

3.1 接合プロセス及びメカニズム

アルミニウム同士の摩擦攪拌点接合では、高速回転するツールが下板まで挿入され、摩擦熱でアルミニウムを軟化させ、塑性流動により上下の板が固相接合される。アルミニウム／鋼板の接合では、同様にアルミニウム側から挿入されたツールは下板までは貫通せず、摩擦熱と加圧力により上下板の界面に金属間化合物を形成し固相接合される⁽³⁾。

アルミニウム／CFRPの摩擦攪拌点接合は、アルミニウム／鋼板の接合により近いと考えられる。高速回転するツールは上板のアルミニウム側から挿入され、挿入量は上板板厚内にとどめられる。アルミニウムとツール間で摩擦発熱し熱伝導により界面のCFRPの樹脂を溶融し

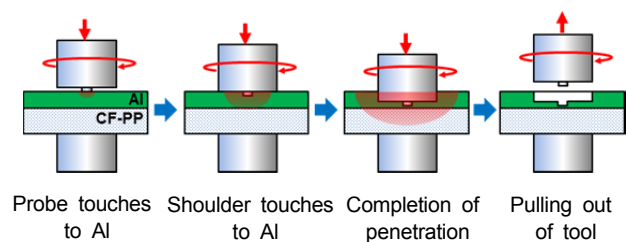


Fig. 2 Schematic of Joining Process

アルミニウムと溶着する。そのため、ポリプロピレンやポリアミドなどの熱可塑性樹脂をマトリクスとするCFRPの接合が可能である。Fig. 2に、接合プロセスの概略を示す。

Fig. 3に、アルミニウムとCFRPの接合部断面写真を示す。アルミニウム中央の窪んだ部分はツールが挿入された領域であり、ツール直下ではアルミニウムがCFRP側に塑性変形している。また、Fig. 4には、Fig. 3の中で四角で囲んだ位置のSEM写真を示す。アルミニウムとCFRPが隙間なく密着していることが確認できる。Fig. 5に、同様の位置のTEM写真及び炭素、酸素及びアルミニウムの元素マッピング結果を示す。アルミニウム表面には酸素リッチな層が存在しており、この中間層を介してアルミニウムとCFRPが接合していることが分かる。熱可塑性樹脂において官能基を持たない場合は接合ができないことから、本接合手法では樹脂中に存在する官能基と酸素リッチな中間層との結びつきにより化学的に結合されているものと推測される。第一原理計算など計算化学の結果から、化学結合種として電気陰性度の違いによ

るクーロン力に起因した結合、脱水縮合による共有結合、水素結合など幾つかのメカニズムの可能性が示唆されている。

3.2 接合強度に及ぼす接合条件の影響

板厚3mm のカーボン繊維40wt%PP 射出成型品（以下、CF-PP）、アルミニウム材に板厚1.2mm のA5052-H34 酸洗材を供試材として、接合強度に及ぼす摩擦攪拌点接合条件の影響を調査した。なお、CF-PPにはあらかじめ官能基を添加し、接合性を改善した樹脂マトリクスを用いている。

接合には、Fig. 6に示す位置制御式摩擦攪拌点接合装置を用いた。本装置では、ツールの回転速度と挿入速度が一定の条件で設定した挿入量までツールが押し込まれる。接合は、30×100mm 試験片同士をアルミニウムを上板側とし30mm ラップで治具に固定し、重ね合せの中心部を接合した（Fig. 7）。Table 1 に、接合条件を示す。

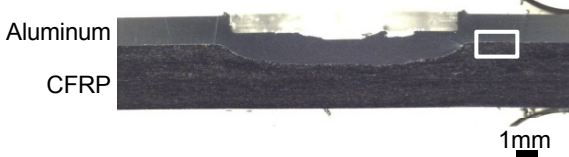
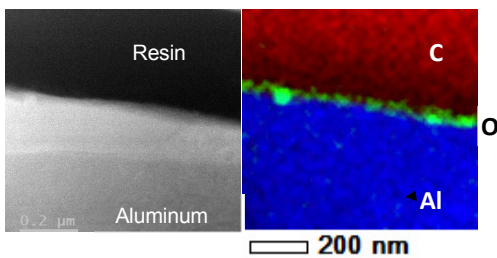


Fig. 3 Picture of Joint Section



Fig. 4 SEM Image of Cross Section



HAADF image Mapping of an element

Fig. 5 TEM Image of Cross Section⁽⁴⁾



Fig. 6 Photo of Joining Devices

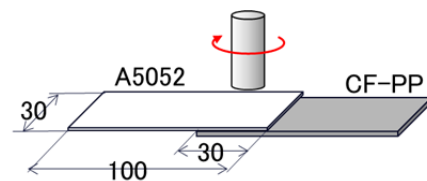


Fig. 7 Schematic Image of Joining

Table 1 Joining Conditions

Parameter	Conditions
Tool diameter	6~10mm
Rotation speed	1000~15000rpm
Penetration speed	6~60mm/min
Penetration depth	1.0mm

接合ツールには、径φ6、8及び10mmの3種類を用いた。ツール回転数は1000～15000rpm、ツール挿入速度は6～60mm/minの範囲とした。また、ツール挿入量はツール先端のプロープがアルミニウムに接触した位置から挿入終了までの移動量であり、全ての条件で1.0mmの一定とした。

接合中に、熱電対及びレーザー表面温度計により界面及びアルミニウム表面 (Fig. 8) の温度を、アンビルに組み込んだロードセルによりツール加圧力をモニタリングした。同時に、接合装置の駆動軸モータートルクを出力した。接合強度は、ISO19095 Plastics—Evaluation of the adhesion interface performance in plastics-metal assemblies—に準じた引張せん断試験により測定した。

Fig. 9に、接合後の試験片外観写真を示す。前述のとおり、アルミニウム側にはツールに対応したへこみが形成されるが、樹脂側はほぼ元の平坦なままである。接合条件によっては、本写真のように溶解した樹脂が上下板間の外部に排出されたバリ部が形成される。

Fig. 10に、接合時間と上下板界面及びアルミニウム表面温度の関係の一例を示す。接合条件は図中に示している。ツール先端のプロープがアルミニウム表面に接触し昇温が開始する。次にショルダーがアルミニウムに接触した時点から急激に温度上昇し、その後は各測定位置とも接合終了まで緩やかに温度上昇する。最高到達温度は接合界面中央部でポリプロピレンの分解温度 (約280℃) を超える500℃近くまで上昇しており、周辺部分でも溶解温度 (166℃) を超える温度に上昇する。

Fig. 11に、接合中の駆動軸トルクのモニタリング結果の一例を示す。軸トルクは初期に急激に立ち上がり、そ

の後は接合が終了するまで緩やかに低下する。また、同じ挿入速度であれば最大軸トルクは回転数が小さい程大きくなった。荷重についても軸トルクとほぼ同様の傾向を示した。

接合温度や軸トルク、荷重に及ぼす接合条件の影響を見ると、ツール挿入速度の増加に伴い軸トルク、荷重のピーク値は増加するが、界面の最高到達温度は小さくなる。これは、荷重、軸トルクが上がることで界面の昇温速度は増加するものの、逆に接合時間が短く、温度上昇する前に接合が終わってしまうからである。ツール回転数の増加に伴い、荷重及び軸トルクのピーク値は低下する傾向を示した。界面の最高到達温度は、ツール回転数を3000 から15000rpm に増加させてもあまり変化しなかった。ツール径を大きくすると荷重及び軸トルクのピーク値は増加した。界面中心の温度はツール径を変えてもあまり変化しないが、外周温度はツール径とともに増加した。

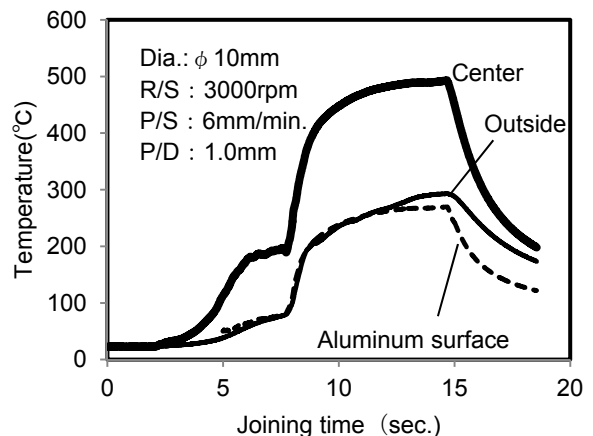


Fig. 10 Temperature Change of Each Portion

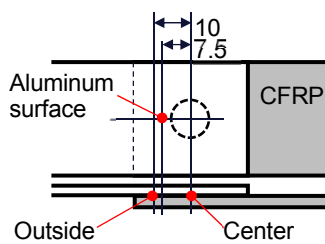


Fig. 8 Measuring Position of Temperature

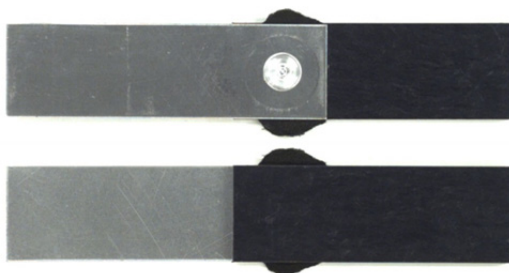


Fig. 9 Photo of Test Piece after Joining

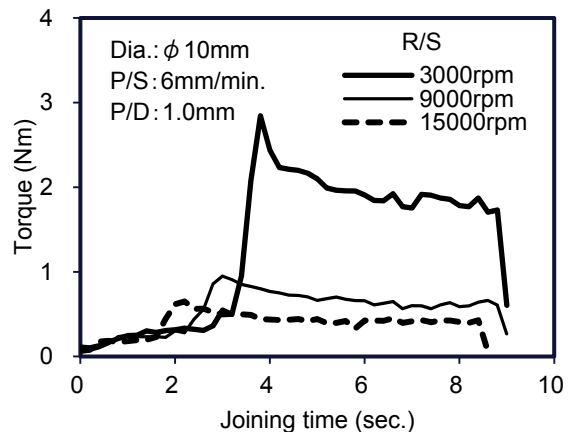


Fig. 11 Relationship between Joining Time and Torque

Fig. 12 に、挿入速度6及び60mm/minで接合した試験片の引張せん断試験後のはく離面写真を示す。図中に点線で示す範囲が、樹脂が溶融しアルミニウム表面と接合されていた範囲である。アルミニウムの表面には、樹脂及びカーボン繊維の付着が確認できる。いずれの接合条件においても、界面温度が高く樹脂の溶融面積が大きくなるほど、引張せん断強度は高くなる傾向を示した (Fig. 13)。本接合技術では、回転ツールとアルミニウムとの摩擦熱で溶融した樹脂がアルミニウム側に溶着するため、発生する摩擦熱量が樹脂溶融面積、接合強度を支配する重要な指標と考えられる。接合中の回転ツール駆動用サーボモーターの軸トルクから下記の式(1)を用いて単位時間当たりの摩擦熱を算出し、それを基に接合中の最大摩擦熱量、総摩擦熱量を求めた。

$$\text{摩擦熱(J/s)} = \text{トルク(Nm)} \times \text{回転数(rpm)} \times 0.1047 \quad (1)$$

Fig. 14 に、総摩擦熱量と樹脂の接合面積の関係を示す。摩擦熱の一部はツールや材料、試験片固定用の治具

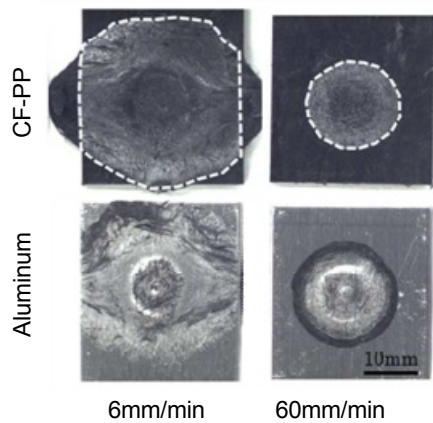


Fig. 12 Photo of Fracture Surface

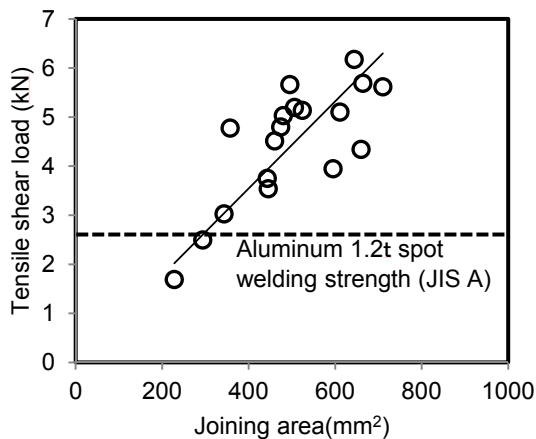


Fig. 13 Relationship between Joining Area and Joining Strength

等にも伝達されるため必ずしも接合に投入された正味の摩擦熱量ではないが、計算から求めた総摩擦熱量と接合面積には相関関係が認められた。

3.3 接合部の耐久信頼性

引張せん断試験に用いた同じ材料を用いて、疲労試験及び耐候性試験を行った。Fig. 15に、疲労試験の結果を示す。試験は、応力比0.05の引張-引張せん断荷重による疲労試験を実施した。図中に示す破線は、アルミニウム板どうしの抵抗スポット溶接試験片の疲労試験結果であり、CFRP/アルミニウム摩擦攪拌点接合試験片は抵抗スポット溶接に比べ高い疲労特性を示した。

同様の試験片を用いて、恒温恒湿環境 (85°C×85% RH) 及び高温環境 (85°C) に672時間保持、冷熱くり返し (-40°C⇔100°C) を500cycまで実施し、試験前後の引張せん断強度の比較を行った。初期値に比べ暴露後の引張せん断強度はバラツキが大きくなる傾向を示すものの、平均強度は初期とほぼ同等の値を示した。

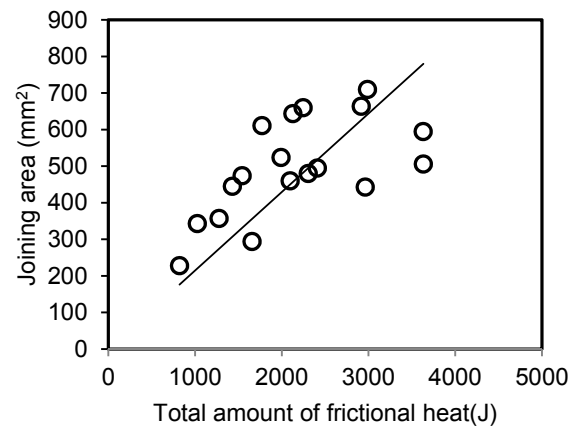


Fig. 14 Relationship between Total Amount of Frictional Heat and Joining Area

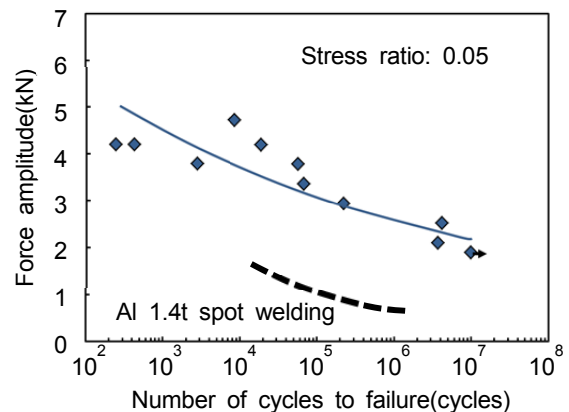


Fig. 15 Fatigue Characteristics of CFRP/Aluminum Joining

4. おわりに

マルチマテリアル車体を想定した異材点接合技術として、アルミニウム/CFRPの摩擦攪拌点接合の可能性を見出すとともに、接合メカニズムや接合性向上のための要件を明らかにした。

CFRPとアルミニウムは酸素原子リッチな中間層を介しナノメートルレベルで緻密に接合されていた。熱可塑性樹脂において官能基を持たない場合は接合ができないことから、本接合手法では樹脂中に存在する官能基と酸素リッチな中間層との相互作用により化学的に結合されているものと推測される。

接合条件を適正に設定することにより、接合強度はアルミニウム抵抗スポット溶接のJIS A級引張せん断荷重を上回る値を示す。また、接合中の総摩擦熱量と接合面積には相関があり、要求強度レベルや樹脂の熱的性質に応じて接合パラメーターを設定することで多様な樹脂の接合が可能と考えられる。

今後は車体部材適用時の外乱に耐え得るロバスト性や耐久信頼性の検証に加え、接合時間の短縮と品質保証方法の検討に取り組む。

5. 謝辞

本研究の成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務の結果得られたものです。ここに謝意を表します。

参考文献

- (1) ISMA REPORT No.1 December (2015)
- (2) 村上ほか：アルミ新接合技術の開発，マツダ技報，No.21, pp86-91(2003)
- (3) 玄道ほか：摩擦点接合技術の開発，日本金属学会誌，70(11)，870(2006)
- (4) 西口ほか：アルミニウム/CF-PP の摩擦攪拌点接合強度に及ぼす接合条件の影響，軽金属学会第133 回秋季大会講演概要(2017)

■ 著 者 ■



西口 勝也



田中 耕二郎



森田 泰博



杉本 幸弘