アルミニウムと異種材料の点接合技術

杉本 幸弘^{1*}・田中 耕二郎¹・西口 勝也¹

Journal of The Japan Institute of Light Metals, Vol. 69, No. 2 (2019), 74-80

© 2019 The Japan Institute of Light Metals

Spot joining of aluminum and dissimilar materials

Yukihiro SUGIMOTO^{1*}, Kojiro TANAKA¹ and Katsuya NISHIGUCHI¹

Keywords: body; weight reduction; multi-material; dissimilar joining; aluminum

1. はじめに

自動車や航空機などの輸送機器には温室効果ガスであるCO₂の排出削減が求められており，燃費改善に繋がる軽量化はその有効な手段である。自動車においては車体の抜本的な軽量化を狙いに，従来の鋼板製車体のような単一材料ではなく，各種構造材料の特長を生かした適材適所の材料配置（マルチマテリアル車体）の研究が進められている。

図1にマルチマテリアル車体構想の一例を示す¹⁾。その実現には材料の高性能化と低コスト化を両立するための研究開発と，異種材料からなる複数の部材を組み付けるための接合技術が不可欠である。平成26年度から開始されたNEDO委託事業「革新的新構造材料等研究開発」では，中長期的な視点で革新鋼板や革新アルミニウム，炭素繊維強化プラスチック（CFRP）などのマルチマテリアル化に資する軽量材料とそれらの接合技術が開発されつつある。

本稿では，その研究テーマのひとつである「アルミニウムと異種材料の点接合技術」について，研究開発の背景とこれまでの研究成果を紹介する。

2. マルチマテリアル車体

2.1 車体の軽量化

図2は一般的な乗用車の重量構成である。ボディシェル（骨格）とクロージャー（蓋物）からなる車体は車両重量

の約40%を占め，その軽量化はシャシ等の軽量化にも波及する。また，車体は衝突安全や操縦安定性などの車両性能に直結する重要な構造体であること，さらにその基本構造や生産工程の変更は多大な設備投資を伴うことから，車体をどう軽くするかが自動車メーカーの関心事であり，その構造最適化と材料・工法の選択が車両重量低減の鍵を握る。

図3に車体軽量化のロードマップを示す。高張力鋼板（ハイテン）やホットスタンプ材などの鋼板の使い切りを経て，

図2 乗用車の重量構成

図1 マルチマテリアル車体構想の一例

図3 車体軽量化のロードマップ

¹ マツダ株式会社 技術研究所（〒739-8670 広島県安芸郡府中町新地3-1） Technical Research Center, Mazda Motor Corporation (3-1 Shinchi, Fuchu-cho, Aki-gun, Hiroshima-shi, Hiroshima 739-8670)

* 責任著者 E-mail: sugimoto.y@mazda.co.jp

受付日：2018年7月23日 受理日：2018年8月22日

表1 輸送機器の巡航速度と主要材料

輸送機器	巡航速度 (km/h)	主要材料	
		現状	将来予測
航空機 (B787)	900	CFRP／アルミニウム／チタン	← アルミニウム／マグネシウム
新幹線	300	アルミニウム	鋼板／アルミニウム／樹脂 (CFRP 含む)
自動車	100	鋼板	←
大型タンカー	30	鋼板	←

中長期的にはマルチマテリアル化が進展するというのが現時点での趨勢である。

高価格帯のプレミアム車が多い欧州においては、鋼板やアルミニウム、CFRP等を組み合わせたマルチマテリアル車体がすでに実用化されており、この技術分野では日本よりも先行している。Audi Q7の車体は重量比率でアルミニウムが52%、鋼板が48%であり、さらにBMW 7seriesではCFRPが一部の構造部材に採用された^{2),3)}。

一方、日本国内では高品質の自動車用高張力鋼板が調達できることもあり、マルチマテリアル化は緒に就いたばかりであるが、生産台数の少ない一部の高級車やスポーツカーで実用化が加速している。

2.2 輸送機器の軽量化効果

同じ輸送機器でも自動車と他の輸送機器の材料では満たすべき要件に自ずと違いがある。表1に輸送機器の巡航速度と主要材料の現状と将来予測を示す。エネルギー消費 $\div$ 運動エネルギー(質量 $\times$ 速度²)と仮定すると、時速900km/hの航空機のエネルギー消費に及ぼす重量低減の効果は、自動車(時速100km/h)の81倍である。

自動車は加減速を繰り返すため、実際にはこれほどの差はないにしても、エネルギー消費に及ぼす重量低減の効果は航空機に比べるとはるかに小さいものと考えられる。このことは、CO₂削減を目的とした自動車の軽量化には航空機ほどのコストが掛けられないことを示唆している。

さらに、地球規模でのCO₂排出削減という目的に対してはプレミアム車よりも生産台数の多い量販車の燃費改善が重要であり、材料や工法に関わるコストが車体材料の重要な選定指針になる。なお、新幹線並みの最高速度300km/hを超えるスポーツカーなど、燃費性能ではなく運動性能の極限を目指す自動車の軽量化はこの限りではない。

2.3 構造材料の現状

2.3.1 機械的性質

車体用の構造材料としては鋼板やアルミニウム、マグネシウム、繊維強化プラスチック(FRP)などが候補に挙がる。なかでもCFRPは航空機での使用が拡大していることもあり、次世代自動車材料としても注目されている。

図4に各種構造材料の機械的性質を示す。図中には前述のNEDO委託事業における革新材料の開発目標値も併記した。鋼板は引張強度で270～1800MPaと材料選択の幅が広い。また、既存のアルミニウム展伸材は70～600MPaであり、強度レベルが同じ場合には鋼板よりも伸びが小さい。革新材料の開発目標を見ると、革新アルミニウムは既存ハイテン並みの特性を、革新マグネシウムは既存アルミニウム並みの特性を達成しようとするものであり、機械的性質に限ると鋼板の優

図4 各種構造材料の機械的性質

位性は将来にわたっても変わらない。

一方、パネル部材の剛性はヤング率と断面係数で決まる。ヤング率が低い軽量材料では板厚を増やして鋼板並みの剛性を得ることになるが、その場合でも比重が小さいため、部材としての重量は軽くなる。鋼板パネル部材をアルミニウムで置き換えると、板厚は1.4倍になるが、重量はほぼ半減する。スポーツカーや高級車のボンネット等が鋼板からアルミニウムに置き換わりつつある理由である。

2.3.2 調達性、リサイクル

年間の世界生産台数が8,000万台を超える自動車の場合、調達性やリサイクルも材料の選定指針となる。表2に全世界での主要構造材の生産量と材料およびリサイクルのコスト差を示す。

粗鋼の生産量16億トンに対し、アルミニウムが5,000万トン、マグネシウムが100万トン、炭素繊維が6万トンであり、量販車への適用を想定した場合、マグネシウムや炭素繊維は調達性に課題が残る。また、鋼板やアルミニウムのスクラップは有価物として売買されるのに対し、CFRPは現時点では廃棄物として処理されることになる。アルミニウムは鋼板に次いで生産量が多く、リサイクル市場も機能しており、材料価格も含めて最も現実的な車体用軽量材料といえる。

なお、CFRPは優れた材料性能を有するものの、短中期的には調達性や材料価格、リサイクルなどに課題があるため、適材適所の原則に従い、その特長を最大限に発揮できる部位(付加価値が大きい部位)に限定的に用いるのが妥当と考えられる。

2.4 量販車のマルチマテリアル化

2.4.1 車体構造、材料

以上のようなCO₂排出削減に及ぼす自動車の軽量化効果や各種構造材料の現状を考慮すると、量販車のマルチマテリアル車体は金属主体(鋼板やアルミニウム)のモノコック構造で、これにクロージャーなどのパネル類を中心にアルミニウムや繊維強化プラスチックが適用される可能性が高い。一部

表2 主要構造材の生産量と材料およびリサイクルのコスト差

材料	生産量 (万トン)	材料価格比 (めっき鋼板を100)	リサイクル (スクラップ買取価格)
粗鋼	162,040 (2015) 世界鉄鋼協会統計2016	亜鉛めっき鋼板 (100)	○ (15円/kg～)
アルミニウム新地金	5,004 (2014) 経産省非鉄金属戦略2016	アルミニウム圧延板 (500)	○ (75円/kg～)
マグネシウム新地金	102 (2014) 経産省非鉄金属戦略2016	マグネシウム圧延板 (2000)	× 市場なし
炭素繊維	6 (2015) 三菱レイヨン技術資料	PP-CF40ペレット (3000)	× サーマル, 埋立

(材料価格比およびスクラップ買取価格は参考値)

図5 マルチマテリアル車体の主要課題

のスポーツカーでは、車体骨格をアルミニウム押出型材で構成するスペースフレーム構造が採用されているが、生産方式や生産タクトの点で量販車には不向きである。

なお、マルチマテリアル車体では鋼板よりも高価な材料の使用比率が増加する。量販車への展開にあたっては、この材料費の低減に加え、設備投資抑制やグローバル生産対応の観点から既存の車体製造ラインを活用した生産が不可欠になるものと考えられる。

2.4.2 生産上の課題

図5に既存の車体製造ラインを活用してマルチマテリアル車体を生産する場合の主要課題を示す。アルミニウムのプレス成形性は鋼板よりも劣るため、部材によっては形状の見直しや分割が必要になる。プレス成形のサイクルタイムは数秒程度であるのに対し、CFRPの成形には最新技術を用いても3～10分程度を要する。

また、鋼板車体の接合には抵抗スポット溶接が1台あたり3,000～4,000点程度使用されているが、マルチマテリアル化にあたっては異種材料からなる複数の部材を組付けるための接合技術も不可欠である。

これらCFRPの成形時間短縮や異種材料接合はNEDO委託事業の主要課題でもある。以下に異種材料接合技術の現状と委託事業の研究テーマである「アルミニウムと異種材料の点接合技術」の概要を報告する。

3. 異種材料接合の現状

3.1 機械的接合

欧州のマルチマテリアル車体ではリベットやスクリュー等を用いた機械的接合が採用されている。例えば前述のAudi Q7では、アルミニウム同士の接合やアルミニウムと鋼板の異種材料接合にはセルフピアシングリベット (SPR) が約

2,600点、フロードリルスクリュー (FDS) が600点、アルミニウムと超ハイテン (1000MPa超級) の接合にはスペシャルセルフピアシングリベット (SSR) が230点、フリクションエレメントウェルディング (FEW) が100点程度用いられている²⁾。また、BMW 7seriesのCFRPと鋼板の接合は、双方の部材に下穴を開け、それをブラインドリベットで締結している。

3.2 直接接合

一方、日本ではリベット等を用いずに異種材料を直接接合する研究が従来から活発に行われてきた。表3にNEDO委託事業で開発中の技術も含め、異種材料接合の研究例を示す。アークやレーザを用いた溶接やろう付け、摩擦撚拌接合、超音波接合など多岐に及ぶ。なかでも摩擦撚拌接合は、母材に対して回転ツールによる摩擦熱と圧力を同時に加えられることや塑性流動により金属表面の酸化物や吸着ガス等の不純物が除去できること、さらに固相接合のため脆弱な金属間化合物の生成が抑制されるといった特長があり、異種材料接合への応用研究と実用化が進んでいる。

例えば摩擦撚拌点接合を用いた異種材料接合はアルミニウム製トランクリッドと鋼板製補強材との接合に適用された⁴⁾。実用化にあたってはアルミニウムの相手材として亜鉛めっき鋼板が用いられた。亜鉛めっきの融点はおおむね400℃程度であり、接合時の摩擦熱により亜鉛めっきが溶融し、接合界面から排出される。その結果、下地である鋼板の新生面が露出、その新生面とアルミニウムが固相接合される。

また、摩擦撚拌連続接合は自動車のフロントサブフレームのアルミニウムダイカストと鋼板 (合金化溶融亜鉛めっき) との異種材料接合で実用化された⁵⁾。この実用例の特徴はアルミニウムダイカスト側から挿入された回転ツールの先端が鋼板表面を削るように制御されていることである。これにより鋼板の新生面が露出し、アルミニウムと接合される。アルミニウムと鋼板の連続接合では重ね合わせだけでなく、突合せ継手についても研究が進んでいる。この場合も鋼板側の新生面を得るために回転ツールの軌跡を鋼板側にオフセットさせ、鋼板端面を削ることで接合強度が向上することが知られている⁶⁾。

なお、NEDO委託事業では、この摩擦撚拌接合に加え、レーザや抵抗スポット溶接による異種材料接合の研究が行わ

表3 異種材料接合の研究例

材料の組合せ	摩擦攪拌接合		溶接, ろう接				超音波
	点接合 (FSSW)	連続接合 (FSW)	アーク	レーザ	抵抗スポット 溶接	ブレージング	
アルミニウム／銅板	◎	◎	○		●	○	○
マグネシウム／銅板	○	○					
アルミニウム／CFRP	●	●		○	○		○
銅板／CFRP		○		●	○		

◎：実用化（車体），○：研究段階，●：NEDO研究テーマ

図6 抵抗スポット溶接と車体接合技術の要件

れており、アルミニウムと銅板、さらには金属とCFRPとの直接接合が可能になりつつある。

4. アルミニウム／異種材料の点接合技術の開発

4.1 車体接合の要件

以上のように種々の材料組合せを想定した異種材料接合技術が開発されつつあり、マルチマテリアル車体の接合技術の選択肢は拡大している。一方、銅板車体に多用されている抵抗スポット溶接は、図6に示すように部材のフランジ同士を重ねて一対の電極で挟み、大電流によるジュール熱で溶融ナゲットを形成する接合法であり、車体接合技術としての優れた特長を備えている。

銅板車体には軟銅板から超ハイテンまでの種々の材料が用いられ、それらの板厚も多岐に及ぶ。抵抗スポット溶接では母材の材質や板厚に応じて通電条件を変更するだけでよく、板組に対する自由度が大きい。図6には車体接合技術が具備すべき要件も併せて示している。マルチマテリアル車体に適用される異種材料接合にも抵抗スポット溶接並みの品質やコスト、生産性が望まれる。

4.2 技術開発コンセプト

量販車を想定したマルチマテリアル車体は、前述のように銅板やアルミニウムなどの金属が主体で、CFRPはその特長を最大限に発揮できる部位に限定的に用いられる可能性が高い。したがって、それら部材の組付けには銅板・アルミニウム・CFRPを相互に接合できる異種材料接合技術が必要とな

図7 アルミニウム／銅板の抵抗スポット溶接

る。

そこで、NEDO委託事業では、「既存の車体製造ラインへの適合性が高く、リベットやスクリューなどの副資材を必要としないローコストの直接接合」を開発コンセプトとして、異種材料接合技術の開発に取り組んだ。

具体的には、アルミニウム／銅板／銅板の3枚組の接合にも対応できる抵抗スポット溶接⁷⁾と、アルミニウム／CFRPの摩擦攪拌点接合^{8),9)}である。以下にそれぞれの技術概要を紹介する。

4.3 アルミニウム／銅板の抵抗スポット溶接

4.3.1 接合原理

アルミニウムと銅板の異種材料接合では、接合界面における脆弱なAl-Fe系金属間化合物の形成を抑制する必要がある。そこで、直流インバータ方式の抵抗溶接機を用い、図7に示すようにアルミニウムと銅板の接合界面ではアルミニウムのみが溶融するように通電制御する。アルミニウム／銅板／銅板の3枚組の場合には最初に中板と下板の銅板界面が発熱して溶融ナゲットが形成され、その熱が中板を介して上板に伝わり、アルミニウムのみが溶融する。

アルミニウム表面の酸化膜はアルミニウムが溶融することで破壊されるが、それに接する銅板は固相のままであり、その表面酸化物が接合性を阻害する。そこで、アルミニウム／

図8 亜鉛めっきの役割

図9 鋼板表面処理と引張剪断荷重

図10 通電パターン

鋼板の摩擦攪拌点接合と同様、アルミニウムと接する鋼板には亜鉛めっき材を用い、酸化物等の悪影響を回避している。図8に亜鉛めっきの役割を示す。溶接中に亜鉛めっきが溶融し、接合界面から排出され、下地である鋼板の新生面が露出、その新生面とアルミニウムが接合される。

4.3.2 通電条件の検討

3枚組の中板（アルミニウムに接する鋼板）の表面処理と引張剪断荷重の関係を図9に示す。非めっき鋼板（SPCC）に比べ、合金化溶融亜鉛めっき鋼板（GA）や電気亜鉛めっき鋼板（EG）を用いることで引張剪断荷重が向上する。GAよりもEGの方が高い値を示す。これはめっきの融点が低くかつ薄目付ほど、接合界面からのめっき成分の排出が容易なためであるが、逆にめっき成分の排出が不十分な場合には強度低下の要因になることを示唆している。

そこで国内の自動車用防錆鋼板としては主流の厚目付GA材でも高い接合強度が得られるよう通電条件を検討した。その結果、通電の多段化が接合界面からのめっき成分の排出に有効であることがわかった。図10に通電パターンを、図11に十字引張試験結果に示す。冷却時間を挟んで段階的に溶接電流を高めることで、GA材の場合でも高い接合強度が得られた。図12には超ハイテン材を含む板組での引張剪断荷重を示す。アルミニウム／980MPa級GAハイテンの2枚組や

図11 十字引張試験結果

図12 超ハイテン材を含む板組での引張剪断荷重

アルミニウム／GA軟鋼板／1180MPa級ハイテンの3枚組でもアルミニウム抵抗スポット溶接JIS A級引張剪断荷重を超える強度が得られており、いずれもアルミニウムのボタン破断を呈した。

本技術は鋼板車体と同じプロセスである抵抗スポット溶接であり、鋼板車体とマルチマテリアル車体の設備を共用することで、それらの混流生産にも対応できる可能性がある。リベット等の副資材も不要で、鋼板のめっき種や強度グレードの制約も受けにくいことから、アルミニウムと鋼板のローコストな異種材料接合法として有望と考えられる。

4.4 アルミニウム／CFRPの摩擦攪拌点接合

4.4.1 接合原理

アルミニウム同士の摩擦攪拌点接合では、図13に示すように3,000rpm程度で回転する鋼製ツールの突起部（プローブ）が下板まで挿入され、摩擦熱で軟化したアルミニウムが塑性流動し、下板が上板に楔状に入り込んで固相状態で接合される。一方、アルミニウム／鋼板の接合ではツールは上板のアルミニウムに留まるように制御され、摩擦熱とツールの押圧により下板の鋼板の亜鉛めっきが溶融排出され、下地の鋼板新生面にアルミニウムが溶着される。

アルミニウム／CFRPの異種材料点接合は後者の形態に近い。すなわち、ツールはアルミニウム内部で留まり、摩擦熱で融けた樹脂がアルミニウムに溶着する。ポリアミドなどの熱可塑性樹脂やそれらをマトリックスとする繊維強化プラスチックが接合できる。

その接合メカニズムを明らかにするため接合界面を電子顕微鏡で観察した。結果を図14に示す。アルミニウムの薄い酸化膜を介して樹脂が溶着していることがわかる。熱可塑性樹脂でも官能基を持たないポリプロピレンとは十分な接合強

図13 摩擦攪拌点接合

HAADF像

元素マッピング

図14 電子顕微鏡による接合断面観察

図15 表面処理による接合性改善

度が得られないことから、極性を有する樹脂官能基と酸化アルミニウムとの分子間力に起因した結合と考えられる。事実、ポリプロピレンに官能基（-COOHなど）を添加することで、アミド基を有するポリアミドと同様に接合できることがわかっている。また、図15に示すように、接合相手材がポリプロピレンの場合には、樹脂への官能基添加だけでなく、アルミニウム側にポリプロピレンと相溶性のある樹脂コーティング等を施すことでも接合性が向上する。

4.4.2 接合強度

アルミニウム／CFRP摩擦攪拌点接合の引張剪断荷重をISO19095に準じて計測した。アルミニウムには酸洗浄したJIS A5182（幅30mm×板厚1.2mm）、CFRPには非連続炭素繊維を40%含有したポリプロピレン射出成形材（幅30mm×板厚3mm）を用い、30mmの重ね代の中央部をアルミニウム側から点接合した。接合には位置制御型の摩擦攪拌点接

図16 引張剪断試験結果

図17 試験後の剥離面

図18 総摩擦熱量と接合面積

合装置を用い、ツール挿入深さを1mmとした。また、ツール径と挿入速度、回転数等を適宜選択し、接合面積が200～800mm²の範囲の試験片を作成した。

図16に試験結果を示す。引張剪断荷重はおおむね接合面積に比例している。板厚1.2mmのアルミニウム抵抗スポット溶接JIS A級引張剪断荷重を超える値を示しており、強度部材の接合に必要な強度基準を満たすレベルにある。試験後の剥離面を図17に示す。摩擦熱によりツール径の2倍程度の範囲の樹脂表層部が熔融し、アルミニウムに溶着している。アルミニウム側には部分的に樹脂成分や炭素繊維が付着しており、樹脂の凝集破壊の傾向が見られた。

なお、摩擦熱は、その一部がツールにも伝達されるため必ずしも接合部に投入された正味の熱量ではないが、品質とプロセスパラメータを関連づける有効な管理指標である。そこで、接合中のツール駆動用サーボモーターのトルク変動をもとに単位時間あたりの摩擦熱（J/s）＝トルク（Nm）×回転数（rpm）×0.1047を求め、最大摩擦熱（摩擦熱の最大値）と

総摩擦熱量（摩擦熱を時間で積分した値）を定義した。

図18に総摩擦熱量と接合面積の関係を示す。両者には相関があり、要求強度レベルやマトリックス樹脂の熱的性質に応じてプロセスパラメータを設定することで多様なCFRPの接合が可能と考えられる。

5. ま と め

構造材料のコストや調達性、リサイクル等を考慮すると、量販車を想定したマルチマテリアル車体は金属主体（鋼板、アルミニウム）で、これにクローシャーなどのパネル類を中心にアルミニウムや繊維強化プラスチックが適用される可能性が高い。

NEDO委託事業では、既存の車体製造ラインへの適合性が高く、リベットなどの副資材を必要としないローコストな直接接合法として、アルミニウム／鋼板の抵抗スポット溶接とアルミニウム／CFRPの摩擦攪拌点接合の開発に取り組んだ。

その結果、いずれの接合法でもアルミニウム抵抗スポット溶接のJIS A級引張剪断荷重を上回る値が得られており、特に強さを要する接合部にも適用可能なレベルに達した。

今後は車体組立工程の外乱に対するロバスト性の確保や市

場環境を想定した耐久信頼性の検証、品質保証方法の検討を進める。

謝 辞

アルミニウム／異種材料の点接合技術の成果は、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。

参 考 文 献

- 1) 新構造材料技術研究組合REPORT, No. 1, (2015).
- 2) T. Hambrecht and U. Alber: AUDI AG, The new AUDI Q7, Presentation ECB 2015, (2015).
- 3) The new BMW 7 Series, EuroCarBody2015, (2015).
- 4) 玄道俊行, 西口勝也, 麻川元康: 日本金属学会誌, **70** (2006), 870-873.
- 5) 畑 恒久, 矢羽々隆憲, 朝見明彦: 溶接学会全国大会講演概要集, Vol. 2013f (2013). <https://doi.org/10.14920/jwstaikai.2013f.0.40.0>
- 6) 福本昌宏, 椿 正巳, 下田陽一朗, 安井利明: 溶接学会論文集, **22** (2004), 309-314.
- 7) 田中耕二郎: 軽金属溶接, **55-11** (2017), 15-19.
- 8) 杉本幸弘, 田中耕二郎, 西口勝也: 溶接学会平成29年度春季全国大会フォーラム予稿集, (2017).
- 9) 杉本幸弘: 溶接学会誌, **87** (2018), 66-70.