

Mizuho Short Industry Focus

重要性を増す異種材接合 ～自動車のマルチマテリアル化に向けて～

【要約】

- ◆ 環境規制の強化に伴い、CO₂排出量削減に向けた自動車の車両軽量化ニーズが高まっている。斯かる状況下、車両に鉄鋼以外の素材を採用するマルチマテリアル化が進み、鉄鋼とその他の素材を接合する、異種材接合の重要性が増す見込みである。
- ◆ 自動車の生産ラインで最も多く利用されている接合法の抵抗スポット溶接（【図表 5】）は、技術的な課題が山積しており、異種材接合に利用し難い。そのため現時点で、異種材を接合する際の一般的なアプローチは、リベットやねじなどを利用した機械的接合であるが、コストや重量などに鑑み、標準化には至っていない。
- ◆ 日系完成車メーカーでは、本田技研工業、マツダが摩擦攪拌接合（【図表 7】）の開発を進めており、素材メーカーでは、神戸製鋼所が超ハイテン鋼板とアルミニウム¹の溶接技術を開発し、ファナックとの協業により自動化を目指している。また、三井化学が、金属と樹脂の接合技術を開発するなど、素材メーカーが、素材供給のみならず、異種材接合に取り組むことでマルチマテリアル化を推進する動きが見られる。
- ◆ ドイツに目を転じると、鉄鋼とアルミニウム、樹脂を適材適所に使い分けた車両が多く存在する。ドイツでは、完成車メーカーがマルチマテリアル化に対して積極的なスタンスであることに加えて、構造用接着剤²やレーザー溶接³など異種材接合を実現する有力なプレーヤーが、この流れを後押ししている。
- ◆ 日本には、鉄鋼、アルミニウム、炭素繊維の有力な素材メーカーが存在するだけでなく、異種材接合の技術や、生産工程の自動化に不可欠なロボット、工作機械の産業が集積しており、マルチマテリアル化の素地はドイツに引けをとらない。素材メーカーが、軽量化に最適な素材とその接合法を導き出し、自動車の将来像を描くことを期待する。

1. はじめに

環境問題に対応
すべく、車両の軽
量化ニーズが高
まる

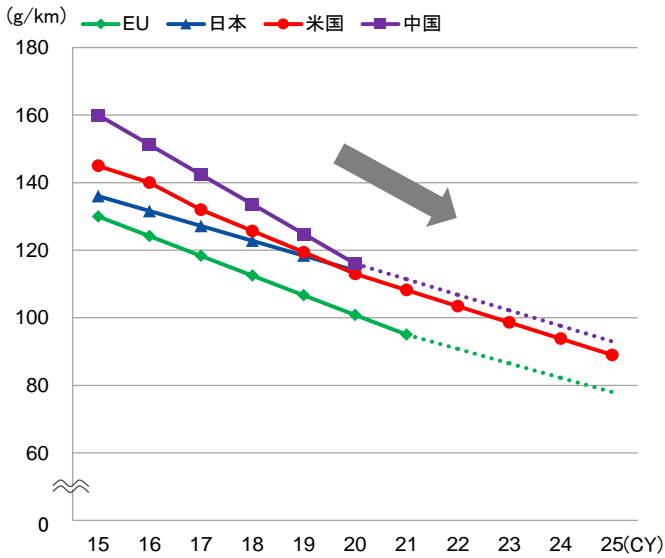
地球温暖化などの環境問題が深刻さを増す中、2015 年にパリ協定が採択され、CO₂ 削減に向けた取り組みが本格化している。中でも自動車は、例えば日本では CO₂ 排出量全体の約 15%を占めているように、世界的にも一産業としての影響度が相対的に大きいことから、CO₂ の排出規制が強化される方向にある（【図表 1】）。従来、完成車メーカーは、ガソリンエンジンの熱効率改善や、ボデー形状改良による空気抵抗軽減など様々な改良を重ねてきたが、更なる燃費改善のためには、CO₂ 排出量と相関性が高い車両の軽量化が有効と考えられる（【図表 2】）。また、ガソリンエンジン車のみならず、走行時に CO₂ を排出しない電気自動車についても軽量化が果たす役割は大きい。電気自動車は、その名の通り、エネルギー源に電気が利用されるが、足下、再生可能エネルギーで電力の大部分を賄う国は限られており、発電時に CO₂ を排出する火力発電が世界の電力供給を支えている。車両の軽量化により一充電あたりの走行距離を延伸することは、ユーザーの満足度向上だけでなく、電力消費の抑制にも繋がるため、車両の軽量化は動力源を問わず必要不可欠な取り組みと言える。

¹ 一般的にアルミニウムは、合金として利用されるが、本稿では便宜的にアルミニウム合金をアルミニウムと称す。

² 長時間大きな荷重に耐える信頼できる接着剤（JIS K6800）。

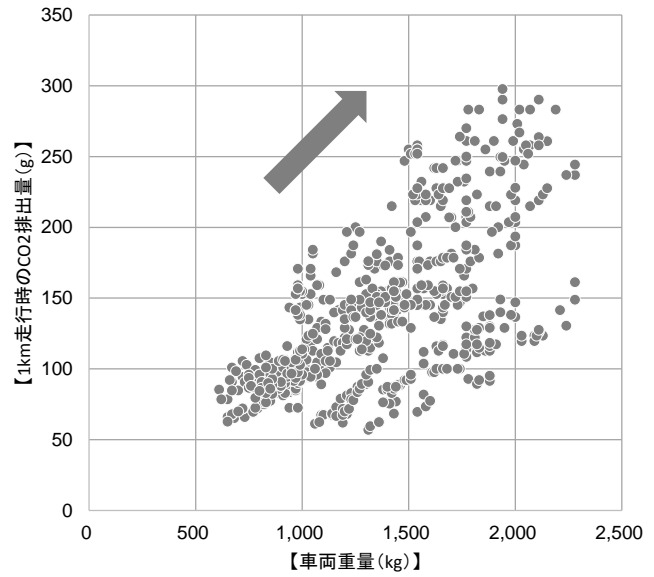
³ レーザ光線のエネルギーを利用して、素材を溶融・凝固させることで接合する方法。

【図表 1】自動車の CO₂ 排出規制



(出所) 公開情報よりみずほ銀行産業調査部作成
 (注) 破線は検討中を示す

【図表 2】CO₂ 排出量と車両重量の関係



(出所) 国土交通省「自動車燃費一覧(平成 28 年 3 月)」より
 みずほ銀行産業調査部作成

軽量化のためには「材料置換」、「構造合理化」、「工法改良」の 3 つの手法がある

車両の軽量化には、①軽量性に優れた素材に変更する「材料置換」、②車体のダウンサイジングや板厚の変更などの「構造合理化」、③接合法や加工法などの最適化を目指す「工法改良」の 3 つの手法が挙げられる。完成車メーカーは、これらを、単独で、或いは組み合わせることによって、より軽量性に優れた車両の実現を目指す。

また、「材料置換」は大きく 2 つに分けられる。第一に、車両に最も多く使用される素材である鉄鋼を、軟鋼から、より高強度なハイテン鋼板や超ハイテン鋼板に置換すると同時に薄肉化することによって軽くするアプローチである。例えば、本田技研工業が 2017 年にモデルチェンジした N-BOX では、センターピラーなどの外板部品に超ハイテン鋼板を採用するなどの改良を積み重ねたことで、従来車種対比で約 80kg の軽量化を実現した。第二に、鉄鋼から、アルミニウムや CFRP⁴など、より比重の小さい素材へ置換することで軽くする、所謂マルチマテリアル化と呼ばれるアプローチであり、近年、注目度が高まっている。尚、いずれのアプローチを採用しても、素材の変更と同時に、構造や工法の変更が生じるケースが多く、完成車メーカーは、素材、設計、加工に対する造詣の深さが試される。

今後、緩やかにマルチマテリアル化が進行する見通し

鉄鋼は、アルミニウムと CFRP に比べて比重が大きく、軽量性の観点では劣後する(【図表 3】)。今後も、鉄鋼の強度向上、薄肉化を進める流れは継続すると考えられるが、剛性に対する制約や、加工の難易度が上がることなどを受けて進化のスピードが減速し、マルチマテリアル化が徐々に広がる見込みである(【図表 4】)。一方で、鉄鋼が短期間で主役の座を譲るシナリオは想定し難い。その最大の理由は価格である。鉄鋼と比べ、アルミニウムは約 4 倍、CFRP は 50 倍以上となっている。また、既存の生産ラインは鉄鋼を前提に組まれており、概して、素材の変更は生産ラインの変更に繋がるため、設備投資を加味すると、鉄鋼の価格優位性は一層増すことになる。更に、鉄鋼は、リサイクル性や安定供給性に優れた素材であり、今後も車両の中核素材であり続けると考えるのが現実的であろう。マルチマテリアル化とは、鉄鋼で実現困難な場合に、環境対応に必要な軽量性を、その他の素材が補完していく動きと考えられ、その際、異種材同士を接合する技術が鍵となっていく。

⁴ Carbon Fiber Reinforced Plastic の略。炭素繊維によって補強されたプラスチック。

【図表 3】鉄鋼、アルミニウム、炭素繊維の比較

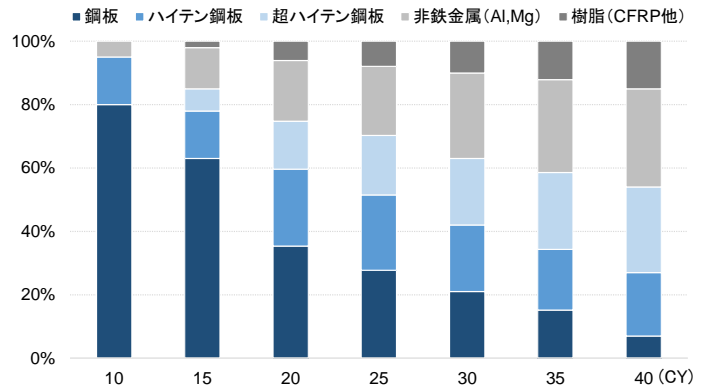
	鉄鋼	アルミニウム	CFRP
比重	7.87 g/m ³	2.70 g/m ³	2.0 g/m ³ 未満
引張強度 (強度)	270~980 MPa 以上	90~570MPa	2,000~5,000 MPa (高強度グレード)
引張弾力性 (剛性)	206 Gpa	71 Gpa	180~500 Gpa (高弾性率グレード)
価格(注1)	約70円/kg	約300円/kg	約4,000円/kg
生産時のCO ₂ 排出量(注2)	2.5kg CO ₂ e/kg	16.9kg CO ₂ e/kg	20.2kg CO ₂ e/kg
リサイクル性	✓✓✓	✓✓	✓

(出所) 経済産業省「生産動態統計」、財務省「貿易統計」、世界鉄鋼連盟、各社 HP よりみずほ銀行産業調査部作成

(注 1) 鉄鋼:熱延板、アルミニウム:アルミ地金、CFRP:炭素繊維価格

(注 2) 鉄鋼:欧州・アジア・北米(2010)、アルミニウム:アフリカ・アジア太平洋・中国・欧州(2013)、CFRP:ドイツ(2013)

【図表 4】自動車ボデー材料の構成比の見通し



(出所) Center For Automotive Research (CAR), *Technology Roadmaps: Intelligent Mobility Technology, Materials and Manufacturing Processes, and Light Duty Vehicle Propulsion* よりみずほ銀行産業調査部作成

(注) 超ハイテン鋼板はホットスタンプ材を含む

2. 異種材接合とは何か？

自動車の生産ラインでは、抵抗スポット溶接が中心だが、異種材接合には新たな接合法が必要

そもそも接合とは、「物質同士を繋ぎ合わせる」と定義されるが、その方法としては、「冶金的接合法」、「機械的接合法」、「化学的接合法」に分類される(【図表 5】)。各接合法の特徴は、接合強度やコストなど一長一短であり、ユーザーは、アプリケーションが求める特性に応じて最適な接合法を選択する。現在、日本の自動車生産ラインで最も一般的な接合法は冶金的接合法の一種である抵抗スポット溶接である。応力が集中することで部品が破損するリスクが高まるものの、生産性の高さやコスト競争力など総合的に優れた接合法であることから、長年、車両の生産ラインを支えてきたが、残念ながら軽量化に向けた「材料置換」に対して必ずしも最適な接合法とは言えない。例えば、ハイテン鋼板、更には超ハイテン鋼板を溶接するためには、高加圧や適切な電流のコントロールなどが求められ、また、導電性の高いアルミニウムには、同じく高加圧と大電流が要求されることから新たな設備や技術が必要になる。加えて、異種材接合に関しては、鋼板と樹脂の場合、両素材の融点に大きな乖離があるため難易度が高く、鋼板とアルミニウムの場合、双方の金属が熔融することで、強度に劣る金属間化合物が厚く形成されてしまうため、安全性を考えると選択し難い。従って、完成車メーカーは、「材料置換」に際して、既存の抵抗スポット溶接に代わる接合法を導入しなければならない。

【図表 5】各接合法の概要

接合法	代表例	メリット	デメリット	
冶金的接合法	抵抗スポット溶接	2枚の被溶接材料を電極棒で挟み、加圧と同時に通電することで熔融させる	・生産性 ・コスト	・応力の集中
機械的接合法	ボルト、リベット	ボルト、リベットなどの接合部品を利用することで締結する	・接合強度 ・視認性	・重量 ・コスト
化学的接合法	接着剤	接着剤により、化学的もしくは物理的な力、またはその両者によって結合する	・剛性 ・絶縁性	・硬化時間 ・検査

(出所) みずほ銀行産業調査部作成

⁵ 物体に外から力が加わった際に、その物体内部に発生する抵抗力。

電食と線膨張係数を考慮に入れなければならない

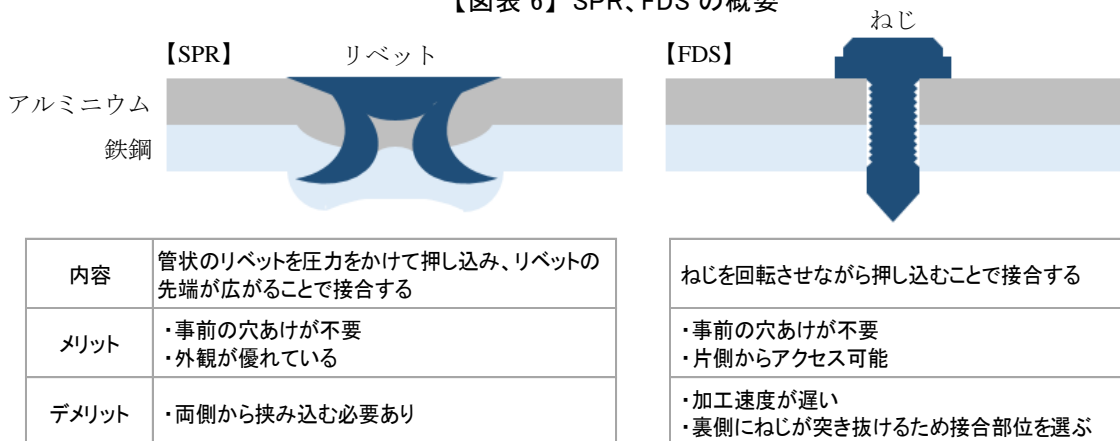
然しながら、新たな接合法の確立は容易ではない。例えば、異種材を接合する際には、接合強度だけでなく、電食⁶と線膨張係数⁷を考慮に入れる必要がある。電食によって部材間の接合強度が薄弱化すると、最終的には、接合部全体の破断に繋がる虞があることから、異種材が直接的に接することを防ぐ目的で絶縁層を挿入するなどの工夫が求められる。更に、一般的に、素材は、温度の上昇に伴って膨張し、低下によって収縮する特性を有するが、その変化率は素材毎に異なるため、接合後の加熱、冷却の過程で膨張・収縮率に差が生じ、部材の歪みを引き起こす。生産時の入熱を出来るだけ抑制することは勿論のこと、販売後も高温の環境下で長期間使用された場合においても部材がたわまない高い品質が要求される。

足下、異種材接合は機械的接合が中心的な役割を担う

現在、車両の骨格に、鉄鋼とアルミニウムや CFRP などの素材を採用した車体(以下、「マルチマテリアル車体」)の接合法は、SPR (Self Pierce Riveting) や FDS (Flow Drill Screw) と呼ばれる、リベットやねじなどを利用した機械的接合が中心である(【図表 6】)。接合強度が他の接合法と比べて優位であるうえ、接合時間が短いことから、マルチマテリアル車体の異種材接合法として広く利用されている。然しながら、接合部品そのものの重量とコストのデメリットがあるため、抵抗スポット溶接ほどの万能性はなく、「現実解」ではあるが、「最適解」と呼ぶには至っていない。また、既述の通り、異種材同士の直接的な接触は、電食を引き起こす可能性が高く、機械的接合時に接着剤、中でも構造用接着剤を併用するケースが増えている。

構造用接着剤のメリットは、絶縁性の付与や、接合強度の強化のみならず、剛性の向上、面接合に伴う応力の分散など様々な相乗効果が生まれることである。従来、構造用接着剤は、硬化に時間を要することや接合確認の検査が難しいことなど、使いこなすのが難しいということもあり、採用が限られてきた。一方で、接着剤の改良により更なる強度の向上が期待できることに加え、機械的接合よりも価格競争力を有することから、今後、トラックレコードが充実化し、接合や検査工程の改善が進むことで、異種材接合のメインストリームに躍り出る可能性を秘めている。その他にも高密度のレーザ光を用いたレーザ溶接や表面処理技術を応用した接合法など、様々な異種材接合の開発が日進月歩で進められており、完成車メーカーは、抵抗スポット溶接に比肩する接合法を探求している。

【図表 6】 SPR、FDS の概要



(出所) みずほ銀行産業調査部作成

3. 日系完成車メーカー、素材メーカーの動向

日系完成車メーカー2社が摩擦攪拌接合に取り組む

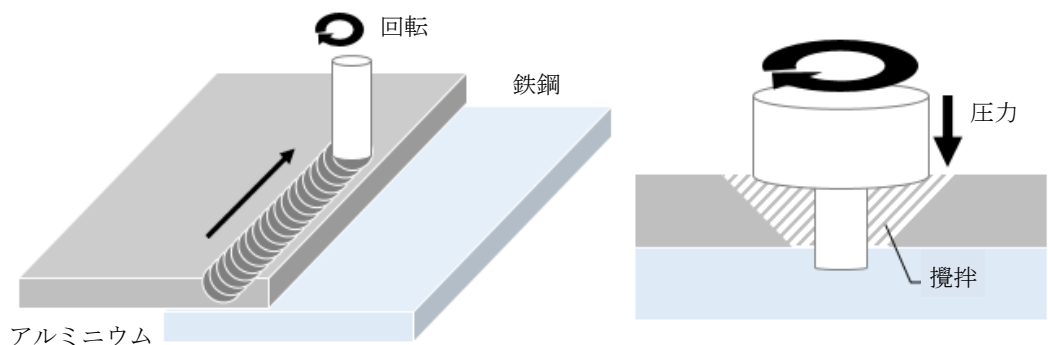
日系完成車メーカーによる異種材接合の取り組みとして、本田技研工業並びにマツダによる摩擦攪拌接合を紹介したい。摩擦攪拌接合とは、摩擦攪拌溶接とも呼ばれる冶金的接合法の一種であり、先端に突起のある円筒状のツールを回転させ、その際に発生する摩擦熱と、回転することで生じる材料の攪拌を利用する接合法である(【図表 7】)。

⁶ 異種金属間の界面に水等が接触した際に、電位が卑な金属の腐食が促進される現象。

⁷ 温度の上昇に伴い物体の長さや体積が変化する割合。

本田技研工業は、2012年に発売した北米仕様のアコードのフロントサブフレームの素材に鉄鋼とアルミニウムを採用し、摩擦攪拌接合を利用したことで、従来の鉄鋼製サブフレーム対比 25%の軽量化を実現した。また、高感度赤外線カメラとレーザー光を用いた非破壊検査システムを同時に開発し、全数検査を可能にした。完成車メーカーにとって、数千台、数万台の車両を1台1台視認することは時間、確実性の面から非現実的であり、検査工程の自動化は大きな意味を持つ。また、マツダは、アルミ圧延大手 UACJ と共同で、アルミニウムとCFRPを接合する摩擦攪拌接合の開発を進めている。これは、完成車メーカーが有する車両の知見と、素材メーカーが有する素材の知見を組み合わせることで、異種材接合に立ち向かう動きと言えよう。両社は、接合時間を2秒に抑え、既存の生産ラインをそのまま利用可能とすることで、新素材採用時の追加費用極小化を目指している。摩擦攪拌接合は、意匠性などの問題があり、全ての部位に対して採用出来るわけではないが、日本が世界に先行する異種材接合法として、一層の広がりが期待される。

【図表 7】 摩擦攪拌接合の仕組み



(出所)みずほ銀行産業調査部作成

素材メーカーも異種材接合の開発を進める

完成車メーカーだけでなく、素材メーカーにも異種材接合に取り組む動きが見られる(【図表 8】)。例えば、神戸製鋼所は、鉄鋼とアルミニウムの両事業を営んでいることもあり、超ハイテン鋼板とアルミニウムの異種金属を接合する溶接法の開発を進めている。2018年4月には、ロボット・FA装置大手のファナックと共同で、ロボットシステムの試作モデルを発表した。素材、接合に留まらず、生産工程までパッケージ化することで軽量性に優れた新素材の普及を狙う。化学メーカーでは、三井化学の取り組みが注目を集める。同社は、2012年に、ナノ・モールディング・テクノロジーと称される表面処理による金属と樹脂の接合技術を有する大成プラスと包括的ライセンス契約を結び、異種材接合の開発を進めてきた。以降、ドローンの骨格やスマートフォンのケースに採用されるなど実績を積んでおり、自動車や電機部品などへの用途拡大を展望する。完成車メーカーや部品メーカーにとって使い馴染みのない素材については、物性だけではなく、接合工程まで踏み込んだ提案が有効となるだろう。

【図表 8】 素材メーカーによる異種材接合に関する近時事例(一部抜粋)

業種	会社名(五十音順)	発表時期	内容
鉄鋼	神戸製鋼所	2018年	・超ハイテン鋼板とアルミ合金を接合する溶接法を開発 ・ファナックとロボットシステムの試作モデル化を発表
化学	ダイセル	2015年	金属表面に連続波レーザーを照射することで特殊形状を形成し、金属と異種材料(熱可塑性樹脂、熱硬化性樹脂等)を接合
	東レ	2014年	樹脂成形品に加えて、金属や繊維シートなど異素材とも強固に熱接着可能な「熱接着性PPSフィルム」を開発
	三井化学	2015年	・金属と樹脂を一体化する技術「ポリメタック®」を開発 ・ドローンの骨格部品に採用

(出所)各社 HP、公開情報よりみずほ銀行産業調査部作成

4. 海外の事例 ～注目すべきはドイツの取り組み

ドイツの完成車メーカーは、マルチマテリアル車体で先行する

海外に目を転じると、欧州、とりわけドイツの完成車メーカーが高級車を中心にマルチマテリアル化を積極的に進めている。マルチマテリアル車体を例に挙げると、BMW の i3 や 7 シリーズ、Audi の A8、Mercedes Benz の C クラスなど枚挙に暇がない。勿論、日系完成車メーカーも、トヨタ自動車の LC500 やプリウス PHEV、本田技研工業の NSX、日産自動車の GT-R など、幾つか事例はあるが、ドイツ車との比較においてその車種数は限られる。これは、日本とドイツにおける鉄鋼の調達環境の違いが 1 つの理由と考えられる。日本では、従来より、高品質な鉄鋼が相対的に安価に入手出来たことから、完成車メーカーと鉄鋼メーカーが歩みを共にすることで車両を進化させてきた歴史があり、今後も鉄鋼に対する期待は大きい。他方、ドイツでは、良質な鉄鋼の調達環境が日本ほど充実しておらず、加工技術の習熟度も低かったため、鉄鋼に代わる新たな素材や技術を導入することで軽量化を目指すマルチマテリアル化が選択されたと考えられる。

BMW は電気自動車 i3 で構造用接着剤を採用

ここで、ドイツ系完成車メーカーによる異種材接合の取り組みを紹介したい。BMW が 2013 年に発売した電気自動車 i3 では、骨格のメイン素材として CFRP を採用し、接合の中心的な役割を構造用接着剤が担っている。接合工程は、完全に自動化され、接着剤そのものの改良並びに熱処理工程を加えることで、硬化時間を、従来の接着剤対比 1/10 に短縮した。車両の生産時間に大きく影響を与える硬化時間を技術革新によってクリアした点は特筆に値する。BMW は、i3 生産のために新たな工場を建設し、既存工場の一部にも手を加えた結果、設備投資額は 6 億ユーロに達したと言われ、i3 単体の採算性には疑問が残る。然しながら、BMW が、一車種で損得を判断せず、長期的な全社戦略においてマルチマテリアル化が不可避と捉え、果敢に新たな取り組みにチャレンジしたことで、CFRP や構造用接着剤など次世代の技術や知見、ノウハウを獲得した意味は大きい。

ドイツには強力な接着剤メーカーが存在

また、ドイツには、Henkel や Delo Industrial Adhesives など有力な接着剤メーカーが存在しており、ドイツ系完成車メーカーのマルチマテリアル化を後押しする。例えば、世界最大の接着剤メーカー Henkel は、接着剤そのものの品質が優れているだけでなく、完成車メーカーに対して、コンポジット部品や表面処理剤なども併せた複合的な提案を行っている。前述の通り、完成車メーカーが異種材接合を検討する際には、素材や部品、接合法のみならず、生産工程全体を考えなければならないため、Henkel は、部品から接合、表面処理に至るまで全体最適の実現法を提案することで、自社製品の採用確率を上げると同時に、個別最適を謳う他社製品の参入を防ぐ障壁を構築している。また、2015 年にはアルミ圧延大手の米 Noveris と、自動車用アルミ部品の表面処理技術開発に向けた提携を発表し、軽量化に向けた更なるソリューション提供を目指している。

レーザー溶接では産官学一体となった取り組みが奏功

更に、ドイツは、レーザー大国と呼ばれ、レーザー技術の分野で世界を牽引している。全ての金属や樹脂に使用出来るわけではないが、異種材を短時間、且つ、高精度に接合可能なレーザー溶接の技術で他国の先を行く。これは、政府が補助金などでレーザーの技術開発をサポートし、欧州最大の応用研究機関フラウンホーファー研究機構が中心となり実用化に向けた開発を進め、そこで生み出された技術を独 Trumpf などの機械装置メーカーが活用するという、産官学一体の取り組みの成果である。構造用接着剤、レーザー溶接という 2 つの有力な異種材接合法が育っていることは、ドイツ系完成車メーカーがマルチマテリアル化を進めるうえで大きなアドバンテージとなるだろう。勿論、日系完成車メーカーが、ドイツ企業の接合技術や製品を利用することも可能であろうが、物理的、心理的な距離を考えると、ドイツ系完成車メーカーが先行して異種材接合の標準化に繋げる可能性が高いと言わざるを得ない。

5. おわりに

異種材接合がマルチマテリアル化の鍵を握る

ここ数年、「マルチマテリアル化」がキーワードとなり、様々な媒体が採り上げてきたことで、世間の注目度が増している。鉄鋼をアルミニウムや樹脂へ代替することが、車両の軽量化に有効な手段であることは論を待たない。一方で、自動車は、使用期間の長短こそあれ、耐久消費財である点を忘れてはならず、燃費規制をクリアすることだけを目的とした車両の軽量化は本末転倒である。完成車メーカーは、環境の負荷軽減という本来の目的に則り、物性やコストに加えて、リサイクル性まで含めたライフサイクルベースで、最適な素材や工法を採用しなければならない。【図表 3】で示したように、素材をつくる際のCO₂ 排出量並びにリサイクル性に鑑みて鉄鋼は環境への負荷が最も少ない素材であることを踏まえると、マルチマテリアル化が一足飛びに進むことはなく、完成車メーカーが、トライアル・アンド・エラーを繰り返すことで、徐々に浸透していくと考えられる。その際、異種材接合が素材の選択肢を増やすための鍵を握るだろう。

日本にもマルチマテリアル化に向けた産業が集積している

ドイツ系完成車メーカーは、大規模な先行投資を厭わず新たな素材や接合法を導入することで経験値を上げており、日系完成車メーカーとの知見やノウハウの差は緩やかに拡大している。然しながら、日本にも鉄鋼、アルミニウム、CFRP など、世界を代表する素材メーカーや、摩擦攪拌に限らず、構造用接着剤、表面処理加工など様々な異種材接合の技術、加えて、最適な生産プロセス構築に不可欠なロボットや工作機械の有力なプレーヤーが多数存在しており、マルチマテリアル化の素地はドイツと比べて決して引けをとらない。素材メーカーからも、神戸製鋼所や三井化学のように、素材の物性を訴求するだけでなく、接合工程まで提案する動きが出始めており、完成車メーカーをバックアップすると考えられる。今後、素材メーカーには、このような完成車メーカーのニーズを先取りする取り組みを増やし、軽量化の最適解となる素材、そしてその接合法を導き出すことで、自動車の将来像を描くことを期待したい。

みずほ銀行産業調査部

素材チーム 尾崎 望

nozomu.ozaki@mizuho-bk.co.jp

© 2018 株式会社みずほ銀行

本資料は情報提供のみを目的として作成されたものであり、取引の勧誘を目的としたものではありません。本資料は、弊行が信頼に足り且つ正確であると判断した情報に基づき作成されておりますが、弊行はその正確性・確実性を保証するものではありません。本資料のご利用に際しては、貴社ご自身の判断にてなされますよう、また必要な場合は、弁護士、会計士、税理士等にご相談のうえお取扱い下さいますようお願い申し上げます。本資料の一部または全部を、①複写、写真複写、あるいはその他如何なる手段において複製すること、②弊行の書面による許可なくして再配布することを禁じます。