

## 軽量化への取り組みを進める自動車メーカー ～ 日本の材料メーカーは海外との提携や 総合的な提案力強化が不可欠 ～

福田 佳之  
東レ経営研究所 産業経済調査部門  
シニアエコノミスト  
TEL : 03-3526-2926  
E-mail : Yoshiyuki\_Fukuda@tbr.toray.co.jp

### <ポイント>

- アルミニウムやCFRP（炭素繊維強化樹脂）が自動車に本格投入された背景に、世界的な燃費規制の強化がある。燃費改善の方策の一つとして自動車車体の軽量化への取り組みが行われている。
- これまで自動車材料として使用されていた鉄鋼は徐々に使用比率を下げているものの、鉄鋼におけるハイテン（高張力鋼）の比率は高まっており、軽量化の流れに即している。
- 代わってアルミニウムが自動車材料として台頭しており、自動車外板への採用が進展している。その軽さが評価されているものの、原料・加工コストの高さや成形の難しさなどの課題が存在しており、関連メーカーが課題解決に向けて取り組んでいる。
- CFRPは軽さだけでなく、強度や弾性においても鉄鋼より優れており、次世代自動車材料として注目されているが、成形に時間がかかるなどの課題がある。成形時間が短い熱可塑性炭素繊維強化樹脂（CFRTP）に期待が集まっているが、その実用化への道りはこれからである。
- 今後、日本の材料メーカーは新材料開発を海外の自動車関連メーカーと連携して行わなければならない。また、材料技術だけでなく、加工や評価など関連技術の開発を行い、材料に関する総合的な提案力を磨く必要があるだろう。

## はじめに<sup>1</sup>

自動車産業にとって 2014 年は、自動車材料としてこれまでの鉄鋼に代わってアルミニウムや CFRP(炭素繊維強化樹脂 : Carbon Fiber Reinforced Plastics)が大量に使用され、車体の軽量化が劇的に進むことを予感させた年として記憶されるだろう。

まず、BMW の電気自動車「i3」である。13 年 11 月に欧州を皮切りに世界で発売されているが、CFRP とアルミニウムをキャビンやシャーシにそれぞれ採用することで車体を大幅に軽量化させている<sup>2</sup>。販売価格は 499 万円からとこれまでの CFRP を使用したものと比べてかなり安価になっており、年間販売台数はこれまで販売された CFRP 車よりもはるかに多く 1 万台を超えると見られている。続いてダイムラーが 2014 年 1 月から発売している新型の「C クラス」である。骨格や外板パネル等にアルミニウムを採用し、その採用率は 48%と従来車の 5 倍程度に相当する。その結果、70kg の軽量化と 30%以上の燃費改善に成功している。販売価格は 419 万円からとこれまでのアルミ車と比較して安価である。そして、12 月に発売されたフォードの人気ピックアップトラックである「F150」の新型である(販売価格 303 万円)。ボディの材料にこれまでの鉄鋼からアルミニウムに切り替えることで 320kg(重量の 15%)の軽量化と 25%の燃費改善が期待されている。

本稿では、欧米自動車メーカーが取り組んでいる軽量化の動きについて解説する。具体的には、まず鉄鋼からアルミニウムや樹脂などへの軽めの材料にシフトする背景を説明し、その後、鉄鋼、アルミニウム、樹脂と新旧の自動車材料を個別に取り上げて解説する<sup>3</sup>。そして、多種多様な材料が自動車に使われるという「自動車材料のマルチ・マテリアル化」が進行する中で日本の材料メーカーのとるべき方策について論じて締めくくる。

## 世界的な燃費規制が背景に

世界の自動車メーカーが軽量化に取り組む背景には、世界的な環境規制の強化が挙げられる。温室効果ガスの排出においては輸送分野の占める割合が大きく、排出抑制のためには自動車の燃費規制が不可欠と考えられているためである。実際、世界の主要国で自動車の燃費規制が強化される予定であり(図表 1)、例えば米国(乗用車)では 2025 年にはリッター 23.9 キロの、欧州では 2020 年時点でリッター 25.8 キロの燃費達成が求められている。これらは 2013 年時点の燃費に比べてそれぞれ 61%、31%の改善が必要である。そこで燃費改善の切り札として期待されているのは、軽量化である。一般に、車体が 100kg 軽量化すると、燃費が 7-9%程度向上すると言われている。

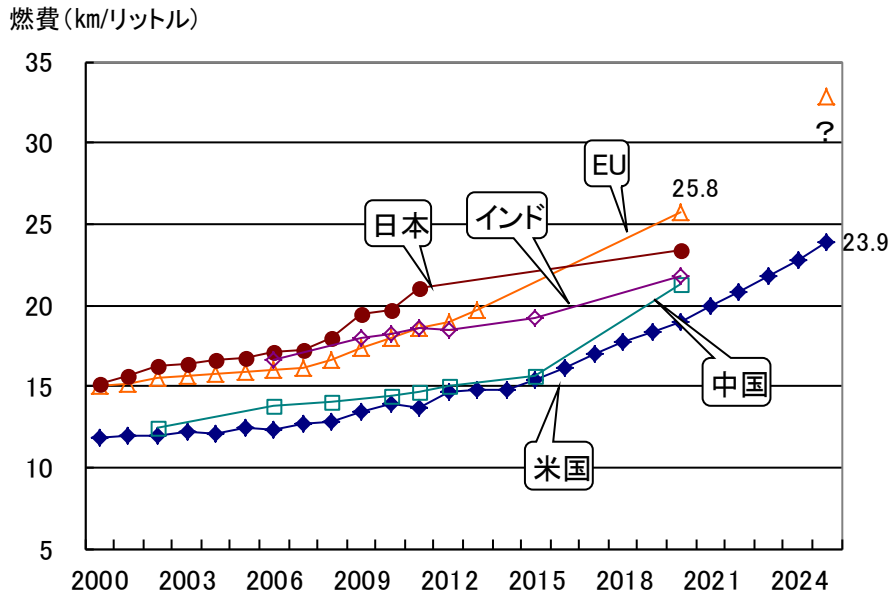
さらに、安全性の強化やエアコン搭載からエンジンのハイブリッド化までの電動化の進行は、エアバッグやバッテリー等関連装置の積載によって車体重量が少なくとも数十 kg 以上増加すると言われている。そのため、ハイブリッド化等で燃費が改善したとしても、重量増でその効果がある程度相殺されてしまう。したがって、車体重量の増加による燃費の悪化を防ぎ、ハイブリッド化等による燃費改善効果を楽しむためにも、車体の軽量化への取り組みは不可欠である。

<sup>1</sup> 本稿を作成するに当たり、東レ自動車材料戦略推進室課長の柴田恭平氏に貴重な情報提供並びにアドバイスをいただいた。謝意を表したい。

<sup>2</sup> 電気自動車はモーターやバッテリーを搭載する分だけ、ガソリン車よりも重量が増加する。このことはエンジンや変速機の重量を差し引いても変わらない。しかし、「i3」では炭素繊維とアルミニウムを材料として採用することで通常の電気自動車よりも 140kg の軽量化を実現している。

<sup>3</sup> 他の軽量化材料として、マグネシウムやチタンが存在する。

図表1 世界各国の燃費規制値の推移



注: 米国は乗用車  
出所: ICCT

### ハイテン比率が上昇する鉄鋼

これまで自動車材料として使用されていた鉄鋼は強度、成形性、環境性能(リサイクル)、そして価格の面で総合的に優れた材料であるが、近年の軽量化の動きを受けて鉄鋼においても変化が生じている。それは鉄鋼の中でも強く加工しやすいハイテン(高張力鋼: High Tensile Strength Steel)のシェアが高まっていることである。ハイテンは、炭素、シリコン、マンガンなどの元素を0.0001%単位で添加し、組織の制御を行って強度を高めた鉄鋼であり、その製造方法は鉄鋼メーカーにとって門外不出の最高機密である。ハイテンは強度(490MPa<sup>4</sup>)が一般の鋼材と比較して高く、その分薄肉化できるため、軽量化しやすい。一般的にハイテンの強度を引き上げると、複雑な形状のプレス成形時に割れが発生しやすい。そこで、材料組織を微細化することで強度を高めながら割れを発生しにくくしている。現在では、980MPa以上の超ハイテンが開発されており、フロントやセンターのピラーやルーフレールなどに用いられている。

確かに自動車に使用される鉄鋼は徐々に比率を下げている。15年前には8割程度を占めていたが、現在では7割程度と言われている。しかし鉄鋼に占めるハイテン比率は上昇して6割近くまで達している。今後は、加熱した鋼板を、熱間プレスした後に急速に冷やして強度を飛躍的に高めるホットスタンプや、同一の部品でも場所によって強度に強弱をつけてコストを抑える部分焼き入れなどの技術が投入されていく見込みである。

このため、材料として総合的に優れた鉄鋼(特にハイテン)の需要が今後大きく減少するとは考えられず、鉄鋼は引き続きその優越的な地位を維持するだろう。

<sup>4</sup> MPaとは圧力の単位(メガパスカル)であり、1MPa≒9.87気圧である。したがって490MPaはおおよそ4,836気圧を指す(1c㎡に4.8トン程度の圧力)

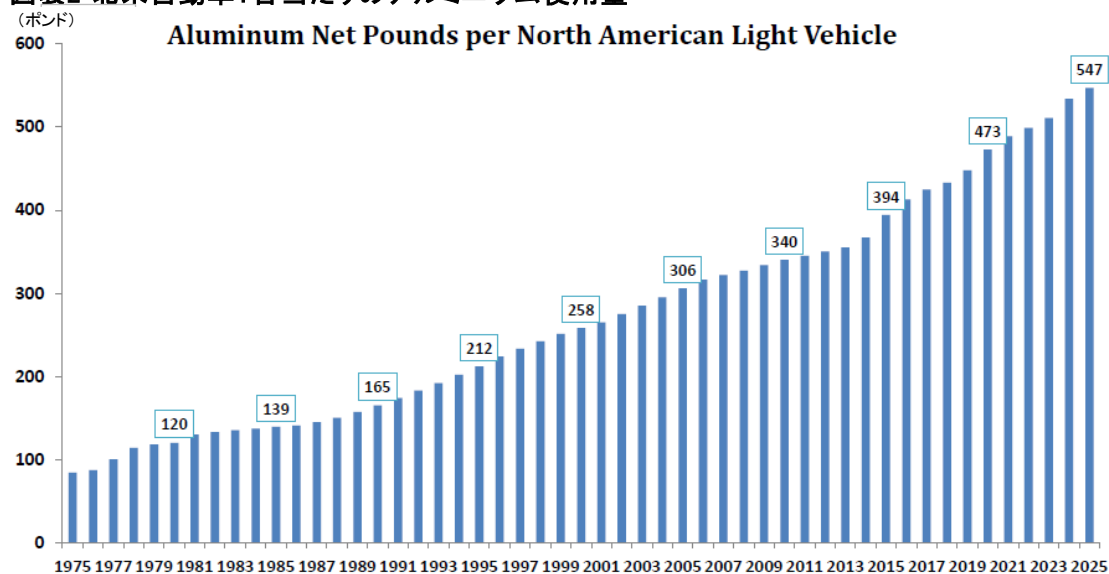
## 軽量化の波に乗るアルミニウム

軽量化における有力な材料候補であるアルミニウムはその重さが鉄鋼の3分の1と軽い上に、耐食性、熱伝導率、鋳造性に優れている。これまでエンジン、ホイール、トランスミッション、サスペンション、バンパービーム、サイドフレームなど鋳鍛造品や押し出し品を中心に用いられていたが、最近ではフードドア、フェンダー、トランクリッド、ルーフ等の外板等で採用されている。これまでアルミ部品は鉄鋼など異なった種類の材料接合を避けるため、ボルトで車体に結合する部品への使用にとどまっていた。しかし、近年の軽量化の期待に応えるため、ルーフなどボルト止めしない部品にもアルミニウムが投入されるようになってきている。

現時点でのアルミ比率は重量ベースで1割程度にすぎないが、燃費規制強化に伴う軽量化の流れに乗ってアルミニウムの採用が進むだろう。米国アルミニウム協会は、2011年から25年にかけて北米の自動車1台当たりのアルミニウムの使用量は年率3.4%の伸びで増加して547ポンド(247kg)に達するとしている(図表2)。同様に欧州アルミニウム協会も、2012年から20年にかけて欧州の自動車1台当たりのアルミニウム使用量は年率3.2%の伸びで増加して180kgに達するとした。こうした予測を受けて、米国大手のアルミニウムメーカーであるアルコアとノベリスは自動車向け設備に1,000億円を超える投資を実施する予定であり、日本のUACJもオランダのコンステリウムと組んで150億円投入して年産10万トンの自動車用パネル生産に取り組む。

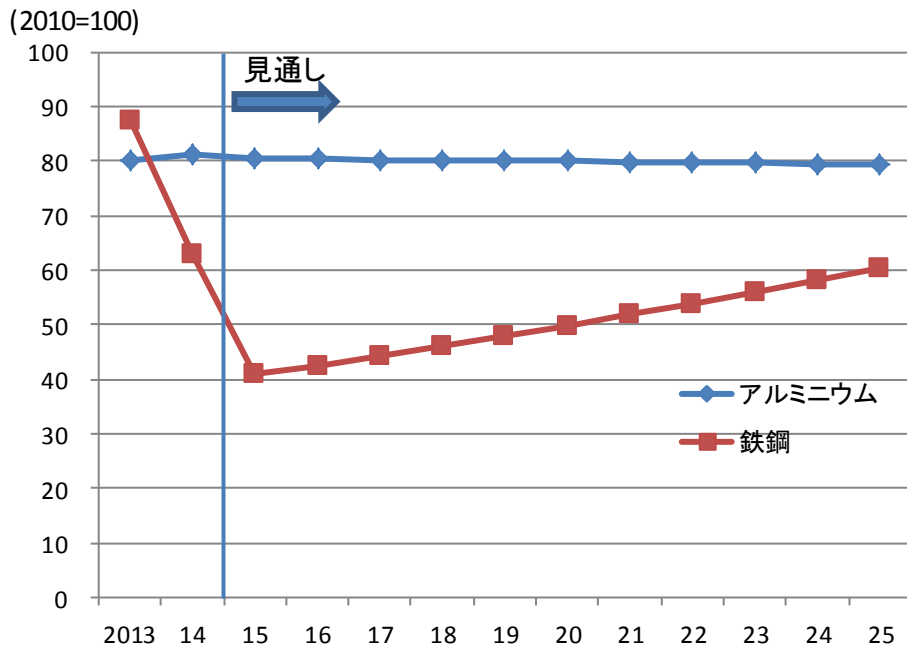
ただし、アルミニウムを自動車材料として使用するに当たって、いくつか課題が存在する。まず、アルミニウムの製造コストが大量の電力を消費するために鉄鋼に比べて高く、重量当たり3倍程度もすることだ。次に、成形が難しいことである。鉄鋼に比べて伸びが小さく、またシワや割れが発生しやすいため、プレスなどの加工が難しい。さらに接合コストが鉄鋼に比べてかかることである。鉄鋼で用いられるスポット溶接は、アルミの場合、熱や電気の伝導率が高いため、溶接時に電気や熱が逃げてしまう。そのため、スポット溶接において鉄鋼に比べて2倍の加圧と2~3倍の電流を必要とする。また、アルミニウムの自動車以外の用途展開が今後見込まれており、原料価格の予想が鉄鋼価格に比べて高く推移するのも気

図表2 北米自動車1台当たりのアルミニウム使用量



(出所)米国アルミニウム協会「2015 North American Light Vehicle Aluminum Content Study」June 2014

図表3 鉄鋼とアルミニウムの原料価格の推移



(注)2010年物価を基準にして物価上昇率を実質化した原料価格を採用している  
 (出所)世界銀行「World Bank Commodity Markets Outlook」2015年4月号

がかりである (図表 3)。

現在、シェール革命による電力料金の低下で米国ではアルミニウムの製造コストは低下する傾向にある。また、成形や接合の困難性については、アルミニウムや自動車のメーカーが、銅など合金に加える元素の検討を行っているほか、新たな成形や接合の技術開発を行っている。成形技術については割れやしわの発生を抑制するように設計された金型や熱処理温度を変えることで成形性や強度等を調整する温間成形技術の本格投入が見込まれている。接合技術については、鋼板など異種材料との接合も可能な接着剤やセルフピアシングリベット<sup>5</sup>に加えて、摩擦エネルギーによって接合する摩擦攪拌接合が注目される。実際、マツダやホンダが、アルミ合金のトランクリッドと鋼板のヒンジの接合や足回り部品であるサブフレームのアルミ・鋼板の接合に摩擦攪拌接合技術を用いている。

このようにアルミニウム使用に伴う課題は解決に向かっており、鉄鋼とアルミニウムの原料の相対的な価格差が著しく変化しない限り、自動車材料に占めるアルミニウム使用比率はパネルなど外板を中心に増加する可能性が高いだろう。

### 樹脂では CFRP 採用による軽量化を期待

軽量化においては、もう一つの有力な材料候補として樹脂がある。これまで樹脂は車両の内装や外装の部品に用いられており、車両全体の重量の 10%を占めるにいたったが、最近ではガラス繊維等で強化された樹脂が構造材料として投入され始めた。樹脂のメリットは次

<sup>5</sup> セルフピアシングリベットとは、片面から打ち込み、先端部が材料内で押し上げられることで機械的に接合するリベットである。先穴が不要で、接合時の熱影響もないなどのメリットがある。メルセデスベンツは、新型「Cクラス」の材料接合でセルフピアシングリベットを高速で打ち込む「ImPacT」方式を採用し、アルミニウムの使用部位を増やすことに成功した。



の3点である。

- ① 鋼等に比べて軽いことである。ただし、剛性（ねじれやずれに対する弾性）を維持するために、厚みを増す必要があり、そのため、軽量化の効果が相殺されてしまうと言われている。実際、剛性を維持することを考慮すると、鉄鋼の代替材料として、アルミニウムは半分程度まで軽量化できるのに対して、樹脂は3割程度までしか軽量化できない。
- ② 成形性が良好で、パーツの統合が容易なことである。望むままのデザインが比較的容易であり、また部品点数が減ることで製造工程が削減できる。
- ③ 高剛性材料と複合化することが可能である。これらの複合化によって剛性の低さなどの樹脂の弱点をカバーしながら樹脂化による軽量化効果を追求することができる。特に、CFRP(炭素繊維強化樹脂)<sup>6</sup>では、剛性を維持しながら7~8割程度の軽量化が期待できる。

### 成形時間が比較的短いC-SMCに注目

これまでCFRPはその材料特性が評価されて航空機材料に用いられてきた。現在、ボーイング社の中型機の主力であるB787の材料の半分はCFRPが占めている。ただし、航空機用途のCFRPの場合、その炭素繊維は、強度等に優れたレギュラートウから生産されている。しかし、自動車用途では材料特性や生産コストの観点から、特定の燃料タンクなど一部の部品を除いて、材料特性は落ちるものの生産コストが安価なラージトウから生産された炭素繊維が使われる。

またCFRPは材料・工法によって、圧力釜を使ってシート状のCFRPを加熱硬化させるプリプレグ、炭素繊維の織物を液状の樹脂を染み込ませて加熱硬化するRTM(Resin Transfer Molding)、短く切った炭素繊維と樹脂を複合化したシートに圧力成形と加熱硬化を行うC-SMC(Carbon Fiber-Sheet Molding Compound)の3種類に分類される。強度等の材料特性はプリプレグが一番高く、次いでRTM、C-SMCの順となるが、成形時間はプリプレグよりもRTM、RTMよりもC-SMCの方が短い(図表4)。

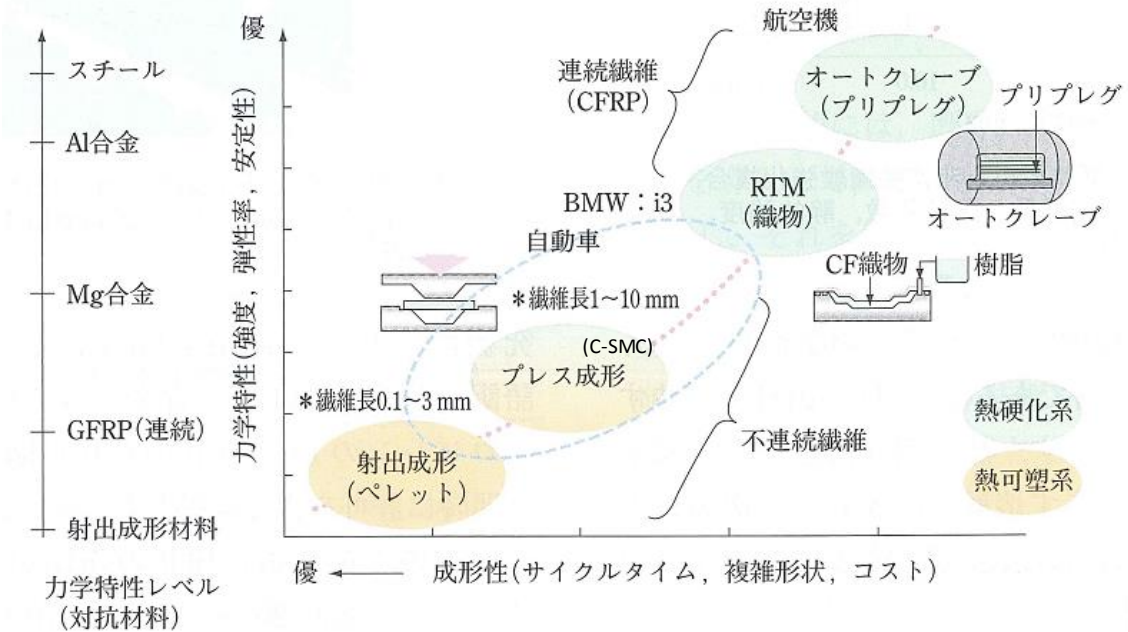
自動車材料として注目されているのは、成形時間が短いC-SMCである。C-SMCは圧力成形を使うことで複雑な形状の部品を生産することができる。さらに材料が安く、設備が簡素でガラス繊維のSMCを転用することが可能であり、一部のサプライヤーでC-SMCによる部品生産が検討されている。ただし、プリプレグやRTMと比べて強度や剛性が落ちるため、ボディなど骨格部品には投入できないものの、ルーフやエンジンフードなど部品の材料として使用可能である。もちろんC-SMCにも、材料特性のばらつきの低減や成形時間のさらなる短縮といった乗り越えるべき課題がある。

### CFRTPの本格採用にはしばらく時間が必要

現状では、C-SMCといえども、成形にかかる時間は長く、量産車の材料として向いていない。これまでCFRPに用いる樹脂はエポキシ樹脂などの熱硬化樹脂であり、樹脂を硬化させて部品を製造するのに最短でも5分以上は必要である。これでは、自動車生産での工程作業時間である1分に間に合わない。さらに歩留まりも悪く、二次加工においてスポッ

<sup>6</sup> 鉄鋼に比べて強度や弾性に優れた炭素繊維と複合化した樹脂を指す。炭素繊維の比重は1.8と鉄鋼の4分の1程度であり、比強度・比弾性率(材料の弾性・強度を密度で除した値)は鉄鋼に対してそれぞれ10倍程度、7倍程度と優れている。

図表4 CFRP及びCFRTPの力学特性と成形性の分布



注:C-SMCは熱硬化系のプレス成形品に分類される

出所:石川隆司「炭素繊維強化プラスチック(CFRP)の次世代自動車への適用の展望」自動車技術会『自動車技術』2014年11月号から抜粋

ト溶接など簡単な接合方法が使えない。また CFRP のリサイクルも確立していない。そのため、これまで CFRP が適用されたのは一部のスポーツカーや高級車の部品の一部に過ぎなかった。

そこで、現在、炭素繊維の熱硬化樹脂に代わる熱可塑性樹脂 (CFRTP : Carbon Fiber Reinforced ThermoPlastics) に注目が集まっている。CFRTP であれば溶かして冷やすだけであり、1 分以内の成形も可能となる。スポット溶接や加飾など二次加工も容易である。現時点では、細かく切った炭素繊維を含むペレットの射出成形品から、短めに切った炭素繊維や連続した炭素繊維と熱可塑性樹脂との圧力成形品の開発が行われており、それぞれ出来上がった CFRTP の成形品は、強度等の材料特性に応じて構造や電装など自動車部品の材料として使われる予定である。

しかし、CFRTP については量産化技術や生産コスト低減など解決しなければならない問題を抱えている。例えば他の材料と違って異方性 (材料特性が方向によって異なること) を持ち、これらの特性を考慮した材料設計が必要である。また熱可塑性樹脂が炭素繊維にうまく浸透していくか、樹脂が浸透したとしても流れがぶつかる場所では短めに切った炭素繊維が樹脂にうまく絡むのか、などの問題がある。短く切った炭素繊維の長さが長いほど高い材料特性を発揮するものの、今度はその炭素繊維を樹脂の中で均質に分散させるのが難しくなる。また樹脂であるため部品統合がしやすく、製造工程短縮とコスト削減を実現できるものの<sup>7</sup>、そのためには異なる材料との接合・接着技術も確立しなければならない。したがって自動車材料として CFRTP が CFRP に置き換わるには少なくとも 10 年程度はかかるものと見られる<sup>8</sup>。

<sup>7</sup> BMW の「i3」では、CFRP 製のキャビンの部品点数は 150 点程度と従来の 3 分の 1 にまで削減して、製造コストを抑えることに成功した。

<sup>8</sup> CFRTP については、東レはトヨタと共同開発しており、すでに 2014 年 11 月に発表した水素燃料電池

## 材料変更による軽量化が見送りになる恐れも

自動車メーカーは、次世代車や次の次世代車の開発のために、現時点から自動車の部位によって新たな材料が採用できるかどうか緻密に研究している。彼らは現在使用している材料の特性を最大限発揮させる、いわば材料を「使い切る」ことを軽量化の方針としている。現在使用している材料を「使い切った」としても満足する軽量化効果が得られない場合になって初めて、新しい材料の本格採用を検討することになる。

ただ、燃費規制の強化が進むことなどで軽量化のニーズは高まっていくことを考慮すると、鉄鋼（ハイテン）の次は、アルミニウム、アルミニウムの次は CFRP の順に検討が進んでいくことは間違いないだろう。このことは、アルミニウムや CFRP などの採用による自動車材料のマルチ・マテリアル化は、時間はかかるものの不可逆的に進むということを意味する。

ここで自動車材料を供給するメーカーが気を付けなければならないのは、自動車メーカーの最終目的は燃費改善と温室効果ガス排出削減にあり、そのためにとりうる手段は使用材料変更による軽量化だけではないということだ。自動車メーカーが、エンジンのハイブリッド化や EV 化などパワートレインへの投資や車体の構造変更や工法変更による軽量化への投資の方が最終目的達成のために効果的と判断すれば、例え軽量化のための材料開発が進んでいたとしても、最終局面で新材料の採用が見送りになる可能性もある。

こういった新材料見送りリスクを低減させるためには、日本の材料メーカーは、日本の自動車メーカーや部品メーカーと組むだけでなく、材料軽量化に積極的な欧米の自動車メーカーや部品メーカーと共同開発するなど連携を広げる必要がある。実際、CFRP においては日本のメーカーは欧米自動車メーカーと共同開発に踏み切っており、最近では米国 Ford とトルコの DowAksa が自動車用途 CFRP の共同開発を加速させることを明らかにした。今後も自動車の新材料開発では国境を越えた企業間連携を進めていかねばならないだろう。

## 材料メーカーは関連技術を含めた総合提案力が不可欠

その際、日本の材料メーカーに不足しているものは、新材料採用に向けて総合提案できる能力ではないだろうか。日本の材料メーカーは新しい材料技術についての知見を持っていても、それらを切削・塑性するなどの加工技術や材料特性を評価するための技術等を持ち合わせていない。特に、自動車材料のマルチ・マテリアル化が進行すると、異なる材料同士を接合・接着する技術が不可欠である。部品の場所によって異なった材料の接合・接着することでコストを抑えながら望ましい材料特性を利用することができる一方、材料によって融点や熱膨張率や酸化性が異なるため、しばらくすると境目で亀裂やずれやさびが生じて強度が低下しやすい。それぞれの材料の長所短所を踏まえた異種材料接合技術の確立が望まれている。

これまでであれば、日本の自動車メーカーがこれらの技術を補完してくれたが、欧米の自動車メーカーはそのようなことまでなかなかしてくれない。一方、欧米の材料メーカーは、新しい材料技術だけでなく、加工や評価など関連技術をパッケージにして新材料を提案してくるため、自動車メーカーは新材料を採用しやすい。日本の材料メーカーも欧米材料メーカーのように新材料技術に関する総合的な提案能力を身に着ける必要があるだろう。実際、神

---

自動車「MIRAI」のスタックフレームの材料として採用されている。また帝人は GM と 2011 年から CFRTP を使った自動車部品の共同開発を行っており、2015 年以降に年間数万台レベルの生産を目指している。



戸製鋼所が 2015 年 4 月に衝突試験設備を導入する。この試験設備で保有する材料が複雑な法規制や保険基準を満たすかどうか自ら調べて自動車メーカーに採用提案するためであり、こういった取り組みは日本企業が総合提案力を磨く上で重要であろう。

ただ欧米の材料メーカーに匹敵する総合提案力を身に着けるには、一社だけの取り組みでは限界があるのも事実である。例えばドイツのフラウンホーファー研究所は CFRTP の圧力成形品である LFT-D 混練体を開発しており、現在、彼らの LFT-D 生産技術を取り込んだ欧州企業が CFRTP の自動車部品の開発に取り組んでいる。日本においても、企業の枠を超えた研究開発プロジェクトや公的研究機関が、一企業では賄いきれない研究開発や技術の国際標準化を主導して、材料メーカーの取り組みをサポートする必要があるだろう<sup>9</sup>。

(ご注意)

- ・当資料は信頼できると思われる情報に基づいて作成されていますが、東レ経営研究所はその正確性を保証するものではありません。内容は予告なしに変更することがありますので、予めご了承ください。
- ・当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、何らかの行動を勧誘するものではありません。当資料に従って決断した行為に起因する利害得失はその行為者自身に帰するものといたします。

---

<sup>9</sup> 現在、CFRP/CFRTP の研究開発拠点が東京大学、名古屋大学、岐阜大学、金沢工業大学に作られている。国内でも産学官連携による CFRP/CFRTP 基盤技術の開発が進むことを期待したい。