

CFRPが大衆車に搭載へ 鉄並みに安くなる

CFRP(炭素繊維強化樹脂)を巡る技術開発がにわかに活気付いている。CFRP部品の価格を鋼板製部品並みに下げ、大衆車に搭載することを目指した取り組みが急進展し始めたのである。量産車として初めてCFRP骨格を採用したBMW社の「i3」は大きな注目を集めたが、クルマへのCFRPの本格搭載は、今までに幕が上がったばかりだ。

(高田憲一)



炭素繊維

Q:「CFRPに
魅力を感じるか」

と技術者に聞いた結果。



BMW社の「i3」の骨格。上部がCFRP製で、下部のシャシーがアルミ合金製。CFRPの採用などで350kgの軽量化を達成した。

感じる
97.1%

回答数は411。調査方法などはp.55参照。

- 第1部 大目標への道筋 ...p.38
- 量産車への搭載がついに始まる
低コスト化で日本が世界をリード
- コラム ...p.44
CFRPを使いこなすための基礎知識
- 第2部 ここまで来たCFRP活用 ...p.46
CFRPがクルマづくりを一変
「i3」で大勝負に出たBMW
- 第3部 カギ握る熱可塑性CFRP ...p.49
成形1分で自動車工場に同期
機械的特性の改善に向け開発進む
- 第4部 数字で見る現場 ...p.53
6割が使用経験もしくは使用検討
自動車や機械に裾野が広がる

大目標への道筋



量産車への搭載がついに始まる 低コスト化で日本が世界をリード

2014年4月、世界で初めてCFRP(炭素繊維強化樹脂)を車体の主要骨格に採用した量産車が日本で発売された(図1)。ドイツBMW社の電気自動車「i3」^{*1}である。

i3の価格は499万円。これまでCFRPが主要構造部材に採用されたのは価格が数千万円の、いわゆるスーパーカー。生産台数も限られていました。一方、i3は既に1万台の受注がある量産車。つまり、CFRPは量産車に使えるほど、費用対効果が高まってきたことを意味する(pp.46-48に関連記事)。BMW社は今後もクルマの構造部材にCFRPを積極的に活用していく方針である。2014年9

月から日本での納車が始まったプラグイン・ハイブリッド車「i8」にも同じ構造の骨格を採用している。

同社は、CFRPの利用拡大に対応するため、炭素繊維^{*2}の生産能力の大幅な拡大に踏み切る。炭素繊維メーカーのSGLグループと合併で運営する米国ワシントン州の炭素繊維工場の生産能力を、現行の年産

3000tから2015年初めまでに年産9000tまで高める方針だ。仮にクルマ1台に50kgの炭素繊維が使われるとすると9000tは18万台、100kgなら9万台に相当する。2013年の炭素繊維の世界需要が4万1000t(東レ調べ)なので、BMW社の生産能

力はその2割以上に達する。

i3の量産の影響は日本メーカーにも波及している。実はi3に使う炭素繊維の原料であるPAN(ポリアクリロニトリル)繊維は、三菱レイヨンとSGLグループの合弁会社が供給している。その合弁会社でも大増産の計画が進行中だ(図2)。

大幅な軽量化が可能

CFRPの最大の特徴は、質量当たりの強度および剛性が高いことである。この特徴を活用することによって大幅な軽量化や新しい設計コンセプトの実現が可能になる(pp.40-41の別掲記事参照)。

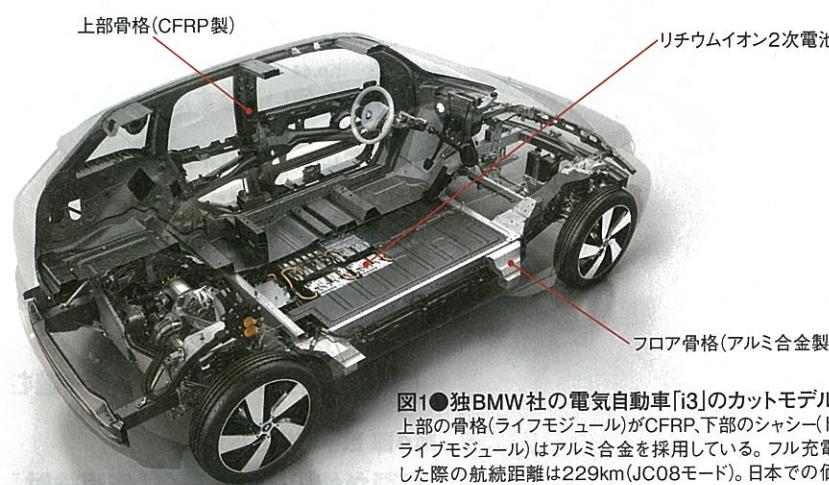


図1●独BMW社の電気自動車「i3」のカットモデル
上部の骨格(ライフモジュール)がCFRP、下部のシャーシ(ドライブモジュール)はアルミ合金を採用している。フル充電した際の航続距離は229km(JC08モード)。日本での価格は標準タイプで499万円。

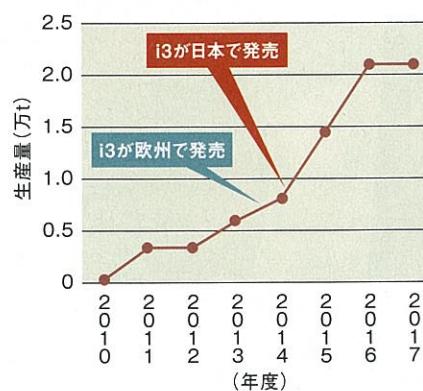


図2●BMW社「i」シリーズ向けに炭素繊維原料を大増産
「i」シリーズ向けに炭素繊維原料を供給する三菱レイヨン大竹事業所は今後生産量を大幅に増やす計画だ。

*1 欧州では2013年11月に発売した。i3には電気自動車の他、レンジエクステンダー搭載車もある。

*2 炭素繊維にはPAN(ポリアクリロニトリル)繊維を原料にするタイプと、石油系のビッチを原料にするタイプがあるが、この特集では主に構造材料に使われるPAN繊維を原料にするものに限って紹介する。

図3は、CFRPを活用した場合のクルマの軽量化効果を、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)が試算したもの。鋼を主要構造材とすると車両重量は1380kgだが、CFRPを多用することにより410kg(約30%)の軽量化が可能になるという。その結果、22.5%の燃費改善が見込める。

世界的に燃費規制(二酸化炭素排出規制)が進む中、22.5%の改善は自動車メーカーにとって大きな魅力になる。i3の車両重量は1260kg。2次電池の搭載などで通常は重くなる電気自動車でありながら、一般的なエンジン車(約1400kg)よりも140kg程度軽い。i3はさまざまな軽量化技術を駆使しているが、最大の効果を発揮したのはCFRPの骨格への採用である。

本命は大衆車への搭載

BMW社の動きを裏付けるように、炭素繊維の世界市場は、今後、急速な伸びが見込まれている(図4)。東レの分析によると、2020年の世界需要は、2013年の3.4倍の14万tに拡大する見通し。CFRPを採用する航空機の増産に加え、自動車分野の需要拡大が見込めるからである。しかし、

東レのこの予測ですら、まだ控え目な見方なのである。「自動車分野の需要は現時点で不確定要素が多いので、一部しか盛り込んでいない」(東レ)ことが背景にある。

なぜ控えめと言えるかといふと、ここ最近明らかになった技術革新に

より、大衆車の基本骨格への搭載が視野に入ってきたからだ。これが実現すれば、市場規模はさらに大きく上振れする。

その実現のためには、CFRP製品の費用対効果を、鋼製の部品並みにする必要がある。否、費用対効果

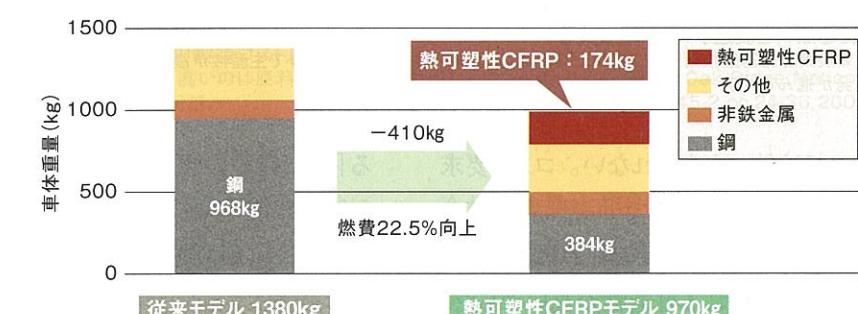


図3●CFRPを構造部材と外板に利用した場合の軽量化と燃費向上
新エネルギー・産業技術総合開発機構の試算によると、ボンネットやフード、骨格などを、現行の鋼から熱可塑性CFRPに変えると車両重量を410kg(約30%)軽くできる。これに伴い、燃費は22.5%向上する。

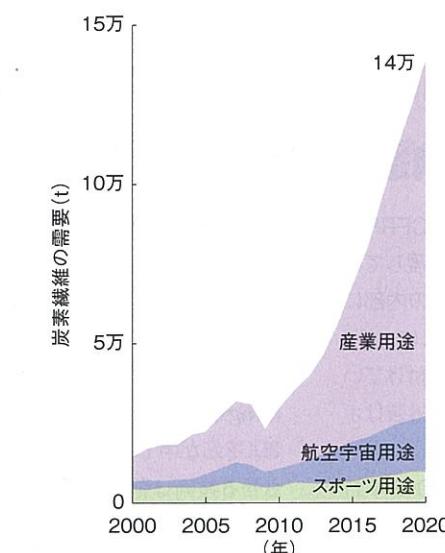


図4●炭素繊維の世界需要の推移と今後の見通し
航空機の増産に加え、自動車分野の需要拡大が見込まれるため、炭素繊維の世界需要は大きく伸びる見通し。大衆車の主要構造部材に採用されれば、さらに膨大な需要が生まれる。東レによる推定。2014年以降は見通し。

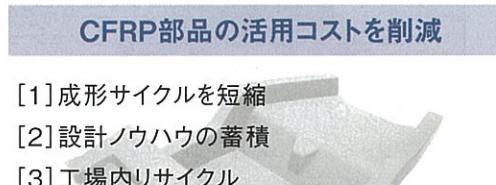


図5●鉄並みの安さの実現に不可欠な2つのアプローチ
2大コスト要因である「炭素繊維の製造コストの削減」と「CFRP部品の活用コストの削減」が重要となる。

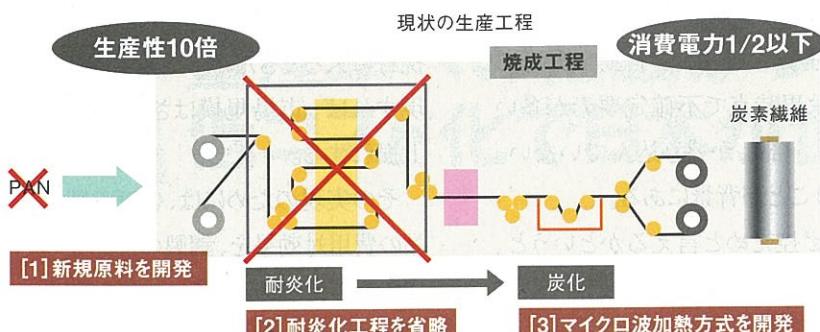


図6●原料と製造プロセスを変える
革新炭素繊維基盤技術開発プロジェクトでは、安価な新規原料と、低コストで生産性が高い製造プロセスの開発が進んでいる。

では甘いかもしれない。コスト要求が厳しい大衆車では、部品としての調達価格を鋼板製並みにすることが求められる可能性が高いからだ。すなわち、「鉄並みの安さ」を実現する必要がある。

そのためには、2大コスト要因であ

る「炭素繊維の製造コスト」と、成形コストなどを含む「CFRP部品の活用コスト」の両方を大幅に引き下げることが必須となる（図5）。このうち後者のCFRP部品の活用コスト削減は、近年さまざまな技術開発が進んで大きく進展している（後述）。

一方、前者の炭素繊維の製造コスト削減には、これまで限界があった。日本や米国、ドイツなどで、PAN繊維に代わる安価な炭素繊維原料や、新しい製造プロセスの開発が進められてきたが大きな成果は得られていない。

その結果、製造時に大量に消費する電力代を抑えるために電力料金が低廉な地域に工場を立地することが、製造コストを抑える主な対策となっていた。BMW社が米国ワシントン州に炭素繊維工場を建設したのも、水力発電の安価な電力を利用できることが大きな理由の一つだ。しかし、こうした手法だけでは、当然のことながら大衆車への搭載が可能な水準までコストは下がらない。

ところが、ここにきてこの壁を打破する期待が一気に高まっている。炭素繊維の新製造工程の開発を進めている、日本の国家プロジェクト「革新炭素繊維基盤技術開発」が新原料を見いだし、それに対応する新たな製造工程を提案したのだ（図6）。

同プロジェクトは東京大学大学院工学系研究科教授の影山和郎氏を統括責任者、産業技術総合研究所エネルギー技術研究部門（統括研究主幹）の羽鳥浩章氏をプロジェクトリーダーとし、世界の炭素繊維の生産の7割を占める東レ、帝人（東邦テナックス）、三菱レイヨンの3社が参加する大プロジェクトである。

実際、このプロジェクトに対する炭素繊維メーカーの力の入れようは

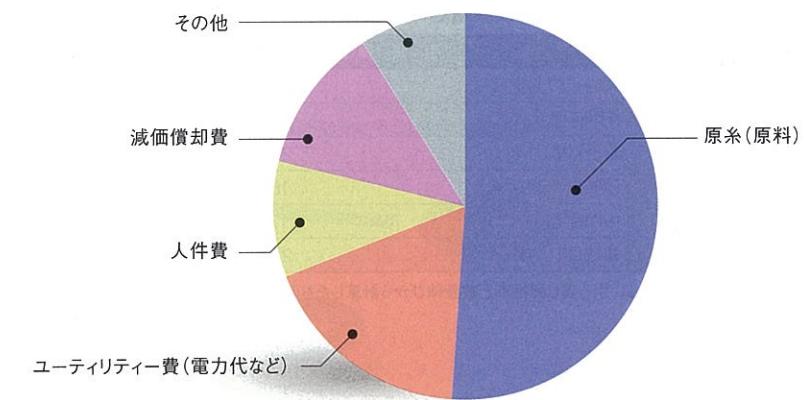


図7●炭素繊維の製造コスト内訳
最もコスト比率が高いのは原糸費、次いで電力代などのユーティリティー費。米 Oak Ridge National Laboratoryによる分析。
出典：C.D.Warren et al, SAMPE Journal, 45-2, pp.24-36, 2009.

相当なものだ。「量産技術の確立には、さまざまな技術開発が必要なので、新製造プロセスによる量産を前提に事業を考える段階ではないが、大きな期待をかけている」と帝人グループ常務執行役員炭素繊維・複合材料事業本部長で、東邦テナックス代表取締役社長の吉野隆氏は話す。東レも「CFRPを汎用材料にするには絶対に必要な技術」（同社取締役生産本部（複合材料技術・生産、ACM技術部）担当の吉永稔氏）

CFRPが一眼レフのボディー構造を変えた

ニコンは一眼レフカメラのボディーに熱可塑性のCFRPを採用することで、ボディー構造を一新し、軽量化を実現している（図A）。これまでの同社の一眼レフカメラは、本体の内部に鋼やマグネシウム合金製のシャシーを組み込み、それに、ボリカーボネート（PC）を射出成形して作った外装を取り付けていた（図B(a)）。構造部材はあくまでもシャシーであり、外装はボディーの強度や剛性にはほとんど貢献していなかった。

一方、CFRP製ボディーを採用した「D5300」（2013年11月発売）と「D3300」（2014年2月発売）は、外装全体が構造部材となるモノコック構造である（2014年9月に発売した「D750」のボディーの一部にもCFRPが採用されている）。そのため、この2機種からはシャシーがなくなった。

構造解析でボディーの設計を最適化した結果、D3300の

場合で45g、すなわち約10%の軽量化を実現できた。「最近はGPSやWiFiなど新たに搭載する機能が増え、ボディーが重くなる傾向が強まっていた。設計はmg単位で軽量化を進めている。そんな中で一気に45gも減らせる技術は他にない。CFRPボディーの実用化は絶対に成功させなければならないプロジェクトだった」と、ニコン映像事業部開発統括本部第一設計部第三設計課副主幹の奥谷剛氏は説明する。

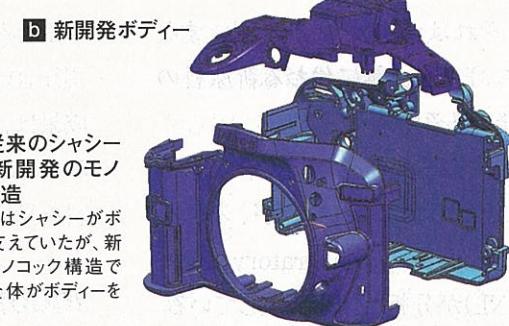
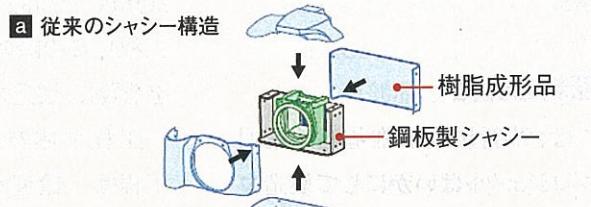
採用したCFRPは、帝人製の「セリーボ」。射出成形用のPCに炭素繊維を充填したものだ。こうしたCFRPは以前からあつ



図A●CFRPをボディーに採用したニコン「D3300」
高剛性のCFRPを活用してボディー構造を一新した。前機種に比べて、約45g軽量化している。

たが、今回採用したCFRPは、強度が高く外観品質に優れる。通常のガラス繊維強化樹脂の曲げ比強度を100とすると、従来のCFRPは160だが、今回利用したCFRPは260に達する。これはマグネシウム合金を上回る。この高強度があったためモノコックボディーを実現できたのだ。

ボディー構造の一新によって、設計手法も大きく変わった。シャシーを内部に組み込んでいた前機種では、主要部品である撮像素子やシャッター、ファインダー、オートフォーカス機構などをシャシーに取り付けていた。しかし、D5300とD3300にはシャシーがないので、どこに取り付けるかをゼロから考える必要があった。また、部品配置の基準は前機種ではシャシーだったが、シャシーのないモノコックボディーではレンズマウントに変わった。部品の配置と取り付け方法の工夫により、部品点数の削減と内部構造の単純化を実現でき、組み立てやすさも向上したという。



表●2種類の新原料から作った炭素繊維の特性

	引っ張り弾性率(GPa)	引っ張り強さ(GPa)	破断伸び(%)	
新原料A	現時点の測定値 中間目標 最終目標	200 170 235	1.8 (1.7) (3.5)	0.9 1.0 1.5
	現時点の測定値 中間目標 最終目標	180 170 235	2.1 (1.7) (3.5)	1.1 1.0 1.5

()内の引っ張り強さは、引っ張り弾性率と破断伸びから計算したもの。

と強調する。

影山氏は「高性能炭素繊維を効率的に量産するプロセスの確立に向けて着実に成果を上げつつある。これによって、炭素繊維の製造コストを大幅に下げたい」と語る。コスト削減によって炭素繊維価格が下がれば、CFRPの大衆車への搭載に向けて強力な追い風になることは間違いない。この技術をモノにできれば、近年になって炭素繊維の生産拠点として急速に台頭している中国に対しても、価格競争力で優位に立つことができる。

新原料を発見

では、革新炭素繊維基盤技術開発プロジェクトはいかにして製造コストを抑えようとしているのだろうか。それは、原料を変えること。すなわち、PAN繊維に代わる新原料の開発である¹⁾。

炭素繊維の製造コストの内訳はほとんど明らかにされないが、米Oak Ridge National Laboratory(以下、ORNL)が分析結果を公表している。

それによると、約50%が原料コスト

で、電力代などのユーティリティー費、人件費、減価償却費が続く(図7)。

原料のPAN繊維の価格は数百円/kg程度だが、炭化工程で炭素以外の成分が取り除かれるので、質量は半分以下になってしまう。つまり、2kgのPAN繊維からできる炭素繊維は1kg以下。そのため、単位質量当たりの原料コストが高くなる。

PAN繊維は、そのまま高温にさらすと燃えてしまうので、燃えにくくするために200~300℃の温度で酸化させ(耐炎化工程)、次に1000~2000℃の高温で炭化させる(炭化工程)。この際の加熱で膨大な電力を消費し、製造コストを押し上げる。

工程全体の中でも、特に耐炎化工程は、「設備が大掛かりで設備投資がかさむ上、製造時間の9割を占めるため生産性への影響も大きい」(影山氏)。同プロジェクトの最大の成果は、この耐炎化工程を省略できる、PAN繊維に変わる安価な新原料を見いだしたことにある。

1000円/kgを切れるか

革新炭素繊維基盤技術開発プロ

ジェクトは現時点で新原料としてA、Bの2種類の高分子に絞り込んでいる³⁾。

同プロジェクトは、これら新原料を用いた炭素繊維の性能に、中間目

標と最終目標を設定した上で、現時点での測定値を明らかにしている(表)。中間報告(案)では、Aの引っ張り強さや破断伸びに関しては、紡糸工程や炭化工程を改善することで「2倍程度まで向上する可能性がある」と指摘し、さらに「(表中の)最終目標を十分超えうる炭素繊維が得られるものと考える」とする。最終目標の物性は、航空機向けの2次構造材料などに使われている炭素繊維に相当するため、自動車分野でも十分に使えそうだ。

一方、製造工程面では耐炎化工程をなくせることが大きな意味を持つ。耐炎化工程は製造時間の9割を占めるので、これを省ければ生産性が大幅に向上する上、ユーティリティー費に直結する消費電力も大幅に抑えられる。同プロジェクトでは、「生産性10倍、消費電力1/2以下」を目標として掲げている。

生産コストについては目標を明らかにしていない。それでも、同様に低コストの自動車向け炭素繊維の開発を進めているORNLのコスト目標

5~7ドル/lb(1157~1620円/kg、1

ドル=105円で換算)が目安となるだろう。さらに言えば、1000円/kgが大衆車採用への分水嶺となる⁴⁾。影山氏は自動車メーカーの技術者を対象に1000以上の項目から成る調査を実施しており、「1000円/kgを切れれば、軽量化の利点がなくても構造部品にCFRPが使われるという結果が出ている」という。

もちろん鋼板の価格は1000円/kgよりも大幅に安いが、CFRPは強度・剛性が高いので使用量が鉄よりも少なくて済む。さらに耐衝撃性や耐腐食性などの利点があるので、部品としては鉄並み、もしくは鉄より優れた費用対効果が期待できる。

同プロジェクトは現在、年間数kg程度を造れる設備で基本的な実験をしている段階。量産技術の確立までは、今後長い道のりがある。2016年度には年間1オーダーのパイロット設備を造り、続いて量産技術の確立のための開発を始めたいとしている。

成形、設計、再利用がカギ

CFRPの2大コスト要因のうち、炭素繊維の製造コスト削減と並ぶ、もう1つのコスト要因であるCFRP部品の活用コストについても、その低減を目指した技術開発が活発化している。そのアプローチは、p.39の図5で示したように、大きく3つに分かれる。

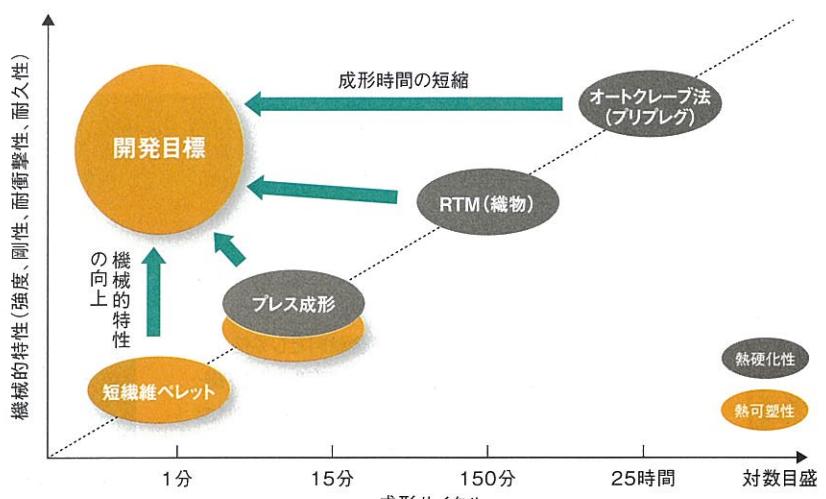


図8●成形加工技術の開発アプローチ

熱硬化性CFRPは機械的特性に優れるが成形サイクルが長い。そのため、成形サイクルの短縮が開発目標になっている。一方、熱可塑性CFRPは、成形サイクルは短いが機械的特性が低い。こちらは機械的特性の向上が開発目標となる。

第1の成形サイクルの短縮を実現できれば、部品の生産性が高まり、部品単価を引き下げることが可能となる。ここでは熱可塑性樹脂が注目されている(図8)。

第2の設計ノウハウの蓄積によりCFRPの異方性を生かした設計が可能となる。部品の機械的特性を部位ごとにメリハリをつけることができるので、一層の軽量化が図れ、炭素繊維の使用量を減らせる。

第3は工場内リサイクルの推進である。廃棄していた端材などを再利用すれば、環境負荷の低減に加えてコスト削減も見込める。炭素繊維の価格低下とともに、こうした技術開発によってCFRP部品の活用コストの削減が進めば、「鉄並みの安さ」に着実に近づくことができる。

その中でも、特に第1の成形サイ

クルの短縮を狙って自動車メーカーと炭素繊維メーカーの共同開発が活発化している。その流れは、樹脂成形に熱硬化性樹脂を使うCFRPと熱可塑性樹脂を使うCFRPに大きく分かれる。

米General Motors社と帝人は、熱可塑性CFRPを1分で成形する技術を使った部品の共同開発を進めている(pp.49-52に関連記事)。コスト削減には熱可塑性樹脂が有利だが、熱硬化性樹脂に比べて機械的特性が低いという課題がある。この課題の解決に向けて、東京大学を中心とするグループが開発を進めている。

参考文献

- 産業構造審議会産業技術環境分科会 研究開発・評価小委員会 評価ワーキンググループ、『革新炭素繊維基盤技術開発評価中間報告(案)』、2014年3月、pp.13-15。

*3 参考文献1)の中間報告(案)では、「塩基性の含窒素官能基により溶媒に可溶な芳香族系高分子である新規前駆体化合物A」「溶解放剤が酸化ポリマー鎖に振り袖状に結合した柔軟構造をもつ新規前駆体化合物B」と表現されている。

*4 炭素繊維が1000円/kgの場合、ユーザー企業が購入する中間基材は約800円/kg程度になると推定できる。熱可塑性CFRPを想定して樹脂価格を200円/kgとし、炭素繊維50%、樹脂50%で複合すると、原料の価格は(1000+200)/2で600円/kg。これに中間基材にするための加工費約200円を加えると約800円/kgとなる。なお、比重が鉄の1/4なので、鉄1kgと同じ体積のCFRP中間基材は約200円となる。

CFRPを使いこなすための基礎知識

Point 1 CFRPの種類と構造

ここでは、さまざまなCFRPがどう造られるのかを炭素繊維まで遡って見ていこう。炭素繊維は繊維なので、それだけで部品を造ることはできない。そのため、樹脂と組み合わせて複合材料として使う。使用する樹脂の種類や炭素繊維の品種、状態(織物や短纖維など多様な形態にすることが可能)によって、CFRPの特徴が大きく変わってくる。主な中間基材/成形材料に限っても4種類がある。これらの中間基材/成形材料ごとに主要な成形法が変わってくる。



炭素繊維

比強度は鉄の約10倍、比弾性率が約7倍と機械的強度に優れる。一方で比重は約1.8と、鉄の約1/4。このため高い軽量化効果を発揮できる。

中間基材/成形材料



織物

織物は、型にセットして樹脂で固めるのが基本。さまざまな織り方が工夫されている。この織物が強化材となって機械的特性を高める。



プリプレグ

織物に樹脂(主にエポキシ)を含浸させたシート。織物の代わりに繊維を一方向にそろえたテープを使うこともある。



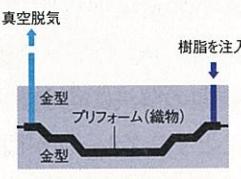
SMC(Sheet Molding Compound)
SMCは不連続の炭素繊維を均一分散させ、そこに樹脂(主に不飽和ポリエステル)を含浸させたシート状の中間基材。繊維が切れているので形状自由度が高い。



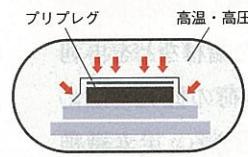
ペレット

熱可塑性樹脂の中に短い炭素繊維を分散させて、射出成形向けの成形材料(ペレット)にしたもの。一般的な射出成形機で使える。

成形法

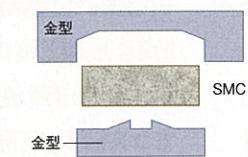


RTM(Resin Transfer Molding)
炭素繊維の織物などを予備成形して製品形状のプリフォームを作り、これを金型にセットしてエポキシ樹脂などを流し込む。その際、金型内を真空脱気することで、炭素繊維に樹脂を素早く含浸させる。同時に金型全体で加熱して成形品を硬化させていく。近年、成形サイクルの高速化が進み、数分で硬化させる技術も登場している。



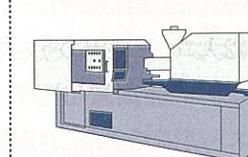
オートクレーブ成形

オートクレーブ成形は、プリプレグを使う成形法の典型。航空機の主翼などがこの成形法で造られている。オートクレーブとは高温・高圧の圧力釜のこと。昇温、保温、冷却に時間がかかるので成形サイクルは2~4時間となる。高剛性、高強度で寸法精度の高い成形品が得られる。



プレス成形

対応できるのは熱可塑性樹脂を使ったCFRPに限られる。基本的には通常の樹脂成形と同様に対応できる。



射出成形

対応できるのは熱可塑性樹脂を使ったCFRPに限られる。基本的には通常の樹脂成形と同様に対応できる。

基礎知識

Point 2 「熱硬化性」と「熱可塑性」

CFRPに使う樹脂は、エポキシ樹脂や不飽和ポリエステル樹脂などの熱硬化性樹脂と、ポリプロピレン(PP)やポリアミド(PA)などの熱可塑性樹脂に大きく分かれる。この2つは性質が異なる。

熱硬化性樹脂は、炭素繊維に含浸させた段階では粘度が低いモノマーで、成形時の加熱によって重合反応が起きてポリマー(樹脂)になる。重合反応には時間が必要なので、成形サイクルは一般的に

長い。航空機の構造部材を造る際に使うオートクレーブ法では、加熱時間が2~4時間に達する。

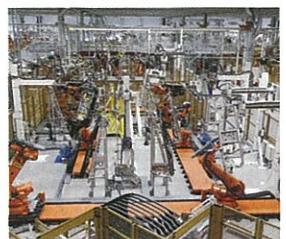
一方、熱可塑性樹脂の場合は、通常の樹脂成形と基本的に同じなので、小物部品の射出成形なら10秒以内、かなり大型品のプレス成形でも1~数分で成形できる。生産性が高いため低コスト化やすい。ただし、熱硬化性樹脂に比べて溶融粘度が高いので、大型品には大型プレス機が必要になる。

Point 3 多様なCFRP

トヨタ自動車が2010年12月から2012年12月にかけて期間限定で500台生産した「レクサスLFA」は軽量素材、とりわけCFRPを大胆に使いこなしており、さながらCFRPのショールームのようなクルマになっている。既に販売は終えているが、部位に合わせた多様なCFRPの使い分けを典型的に示している。



「レクサスLFA」には多様なCFRPが使われた



ここまで来たCFRP活用

CFRPがクルマづくりを一変 「i3」で大勝負に出たBMW

第1部の冒頭で紹介したように現時点でCFRP（炭素繊維強化樹脂）活用で世界トップを快走するのがドイツBMW社である。同社が電気自動車「i3」の骨格に選択したのは熱硬化性CFRPだ。

i3の基本構造は、熱硬化性CFRPで上部の骨格を造り、アルミニウム合金製の下部シャシーと一体化させるとする。鋼製と比べた同基本構造の軽量化効果は実に350kgに

達する。

しかし、基本構造、特にCFRP骨格がもたらしたもののは軽量化だけではない。クルマの製造方法や材料調達を一変させたのだ。世界初のCFRP骨格を量産車に使うには、大胆かつ細心の戦略が不可欠だった。

溶接は不要、接着材を活用

BMW社はまず、最上流にまで遡って手を打った。ドイツの炭素製

品メーカーSGLグループと合弁で炭素繊維の生産に乗り出したのだ（図1）。さらに、合弁パートナーのSGLグループは、炭素繊維の原料であるポリアクリロニトリル（PAN）繊維を確実に調達するために、三菱レイヨンと合弁会社を立ち上げている。まず、炭素繊維を確保したのだ^{*1}。

炭素繊維は、中間基材の積層板、プリフォームを経て、BMW社のランツフート工場とライプツィヒ工場

図1●BMW社のCFRP骨格製造の流れ



*1 第1部で紹介したようにBMW社の炭素繊維工場の生産能力である年間9000tは、2013年の世界の炭素繊維需要の2割以上に相当する。BMW社が自社で製造するのは、外部だけでは必要な量の炭素繊維を調達できない可能性があるからだ。

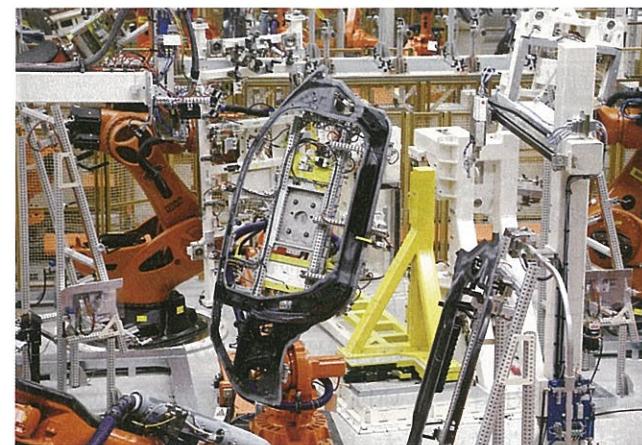


図2●CFRP骨格の組み立て工程
溶接ではなく接着剤で接合する。部品の搬送、接着剤の塗布、接合などはロボットなどにより全自動で行う。



図3●CFRP骨格と下部シャシーの一体化
2台のロボットが下部シャシーに接着剤を塗布し、その上にCFRP骨格を載せた上で、4カ所をボルトで締結する。

に運ばれ、RTM (Resin Transfer Molding) 法で部品に成形される。RTMは、製品の形状に予備成形した炭素繊維のプリフォームを、加熱した金型にセットし、金型を閉じると同時にエポキシ樹脂を充填して硬化させる成形法だ(pp.44-45参照)。

航空機分野への熱硬化性CFRPの適用で先行し、活用技術を蓄積してきた三菱航空機(本社名古屋市)第2設計部顧問の小祝弘道氏は「RTM法は生産性が高く、造った熱硬化性CFRPの機械的特性は、オートクレーブ成形で造ったものに近い」と指摘する。

BMW社は「高速で樹脂を注入する」としており、成形サイクルは10分程度。RTM法は成形サイクルの短縮が進んでおり、以前2~3時間かかっていた成形サイクルを数分に短縮する技術が提案されてきている(pp.48に関連記事)。

こうして造られるCFRPの部品は

i3の1台当たりで約150個に及ぶ。非常に多数に見えるが、実は鋼でフレームを造る場合の約1/3だ。これらの部品は、ライプツィヒ工場内に新設された車体製造設備に集められ、ここで部品同士を接着して骨格に組み立てる。通常の車体組立ではスポット溶接が主流だが、CFRP骨格で溶接は一切行わない^{*2}。これは車体組立ラインの基本構成が根底から変わることを意味する。

使用する接着剤は、新開発した硬化速度が速いタイプだ。車体製造設備に多数配置されたロボットが、全自动で部品の搬送、接着剤の塗布、接合、組み立てを行う(図2)。

接合する部品に接着剤を正確に計量して塗り、部品同士に1.5mmの隙間を開けて接着する(その隙間は接着剤が埋める)。接着剤は90秒後に硬化が始まり、常温だと90分で完了するが、今回の設備ではCFRPの一部を加熱することで硬化時間を10

分に短縮した。これは、従来の硬化時間の1/32という。CFRP骨格1台当たり、幅20mmで長さ160m分の接着剤による接合を行っている。

最終組立に2つの並行ライン

組み立てられたCFRP骨格は、別工程で造られたAI合金製の下部シャシーとともに最終組立ラインに送られる。その最終組立ラインは、2本のラインを並行に設置したユニークなもの。1本がCFRP骨格用、もう1本がAI合金製の下部シャシー用だ。

下部シャシーには、2次電池やモーターなどを取り付けていく。並行してCFRP骨格には内装部品などを取り付ける。部品を取り付けたCFRP骨格と下部シャシーは、並行ラインの最後で一体化させる(図3)。2台のロボットが下部シャシーに接着剤を塗布し、その上にCFRP骨格を載せて自重で接着させ、さらに4カ所をボルトで締結する。

*2 ただし、下部シャシーの生産ラインには溶接工程がある。

残りの外板を取り付けるのはその後だ。i3は軽量化のため、フェンダーなどに熱可塑性樹脂を採用している。これらに加え、ルーフなどCFRP製の外板も含め、全て塗装済みで組立ラインに供給される。そのため、メインラインには塗装工程もない。

CFRP骨格を製造する工程と最

終組立ラインで要する時間は20時間。BMW社の既存の生産ラインに比べて半減しているという。時間短縮は並行ラインの効果もあるが、形状自由度の高いCFRP骨格の採用によって部品数が減ったことが大きく貢献している。新しいクルマづくりの中心にあるのが、まさにCFRP骨

格なのだ。

BMW社のCFRP活用は、クルマづくりの基本を変える野心的な取り組みであるだけでなく、多くの時間をかけた綿密かつ周到なプロジェクトである。熱硬化性CFRPの活用では、他社が一朝一夕でBMW社に追いつくことは難しいだろう。

成形サイクルの短縮目指す熱硬化性CFRP

熱硬化性CFRPでは、成形サイクルの短縮を狙った技術開発が活発化している。

日産自動車が2013年12月に発売した「GT-R」の2014年モデルには、PCM(Prepreg Compression Molding)法で成形した熱硬化性CFRPが採用されている(図A)。アルミ合金製と比べて約40%軽量化できたといふ。

同法は三菱レイヨンが開発した成形法で、2~3分で硬化するエポキシ樹脂と炭素繊維でプリプレグを造り、それを金型で加熱しながら3~10MPaの高圧でプレス成形する。成形サイクルは約10分と短いので熱硬化性CFRPとしては生産性が高い。また、高温高圧でプレスするため表面の平滑性が高く、外板として使えるほどの塗装品質が得られる。

一方で、連続繊維を使うため、深絞り形状やボス・リブを立てることは苦手だ。こうした形状や構造には、同じシート材だが、2~3cm程度に切断した炭素繊維を分散させた炭素繊維強化SMCが向いている。連続繊維ではないので機械的特性は連続繊維を使ったプリプレグには及ばないが、繊維が樹脂と一緒に流れボス・リブの部分にも入り込みやすい。ジャパンコンポジット(本社東京)研究本部先端材料グループグローバルリーダーの箱谷昌宏氏は、「高さ20~30mm程度のボスやリブは普通に立てられる。高さがそれ以上

の場合は要相談」と説明する。

同社の炭素繊維強化SMCは、近く発売されるクルマに採用が決まり、2014年8月から量産に入っている。ロボットなどで成形工程の前後を自動化すれば、2~3分の成形サイクルを実現できる。その生産性の高さが評価されたといふ。

東レは、「i3」でも使われているRTM法の成形サイクルの短縮に注力している。東レのRTM法は、エポキシ樹脂を複数の注入口から金型内に流し込む多点注入が特徴だ。2012年からドイツDaimler社の高級車「SLクラス」のトランクリッド向けに供給している実績がある(図B)。東レ取締役 生産本部(複合材料技術・生産、ACM技術部)担当の吉永稔氏は、「硬化時間を5分まで短縮できた。これを3分にしたい」とする。

現在、熱硬化性CFRPの共通する開発目標は成形サイクルの短縮となっている。なぜなら、それが大衆車への搭載につながる道だからだ。



図A●PCM法で成形したトランクリッド
日産自動車の「GT-R」が採用。アルミ合金製と比べて4割軽量化した。



図B●東レの
RTM技術が
使われている
トランクリッド
ドイツDaimler社
の高級車「SL
クラス」に搭載され
ている。東レは、
RTM法の高速化
を進めしており、
硬化時間3分を
目指している。

カギ握る熱可塑性CFRP



成形1分で自動車工場に同期 機械的特性の改善に向け開発進む

ドイツBMW社の電気自動車「i3」は衆目が一致する量産車である。しかし、価格が約500万円であり、大衆車とはいえない。大衆車に使うためには、さらなるコスト削減が不可欠だ。そこで俄然注目を集めているのが、樹脂成分にポリプロピレン(PP)やポリアミド(PA)などの熱可塑性樹脂を使う熱可塑性CFRPである。

熱硬化性CFRPは、強度や剛性に優れるため軽量化効果が高く、自動車の骨格や外板に使うのに十分な寸法精度を備えている。しかし、量産性が低く、大量生産ではコスト面で不利になる。成形工程で樹脂を硬化(高分子化)させるために成形サイクルが長くなるからだ。自動車工場のタクトタイムは1分程度。熱硬化性CFRPの成形サイクルが仮に10分だとすると、1分のタクトタイムに合わせるには10台の成形機が必要になる。

一方、熱可塑性樹脂は最初から高分子になっている。それを溶かして冷やすだけなので、1分以内の成形も可能だ。熱可塑性CFRPの成形に使う大型のプレス機や射出成型機は、熱硬化性CFRPの成形に

使うRTM法の成形機に比べて高額だが、生産性が高いために量産規模が大きければ大きいほど、コスト面で優位になる。

この熱可塑性CFRPで突出した動きをしているのが帝人だ。

2015年以降に数万台/年規模

帝人は2011年3月、熱可塑性CFRPを使って1分以内でプレス成形する技術を開発。併せて、熱可塑性CFRP製骨格を搭載した試作車を公開している(図1)。

さらに2011年12月、米General Motors社(以下、GM社)と同技術を用いた熱可塑性CFRP部品を共同開発する契約を締結、GM社が世

界に展開する乗用車やトラック、クロスオーバー車などの量産車に採用する方針を掲げた。発表の際、帝人は「2015年以降、同技術が年間数万台レベルの量産車に使われることを目指す」としている。

その後、帝人はGM社との共同開発の進ちょく状況や熱可塑性CFRPの物性について一切明らかにしてこなかったが、今回、帝人グループ常務執行役員炭素繊維・複合材料事業本部長で東邦テナックス代表取締役社長の吉野隆氏がインタビューに応じ、共同開発は順調に進んでいくこと、スケジュールに変更はないこと、などを明らかにした(p.52に吉野氏のインタビューを掲載)。



図1●熱可塑性CFRP
の骨格を搭載した電
気自動車の試作車
帝人が2011年3月に公開
した。骨格の重さは47kg
で、鋼板で作った場合の
1/5。シート状基材(一方
向性と等方性の2種類)
のプレス成形品と、長繊
維強化ペレットの射出成
形品を接合して作製した。

炭素繊維で世界最大手の東レも、熱可塑性CFRPの開発に積極的だ。2012年に公開した電気自動車のコンセプトモデルで、ルーフとクルマ前部のハッチという外板に熱可塑性CFRPのプレス成形品を採用している(図2)。

ただ、これら以外の成形サンプルについては公開できないという。「中間基材となるシートに炭素繊維をどう分散させるかによって機械的特性が大きく変わる。そのため、各社とも最高レベルの機密になっている」と東レ取締役生産本部(複合材料技術・生産、ACM技術部)担当の吉永稔氏は説明する。

そんな中、熱可塑性CFRPの物性や成形サンプルなどを公開しているところがある。東京大学工学系研究科システム創成学専攻教授の高橋淳氏がプロジェクトリーダーを務め



図2 CFRPを多用した、東レの電気自動車の試作モデル
熱硬化性CFRPで造ったモノコックボディなどさまざまなCFRPが使われている。ルーフとクルマ前部のハッチという外板が熱可塑性CFRPのプレス成形品。

*「熱可塑性CFRP(CFRTP)の開発」新エネルギー・産業技術総合開発機構から委託を受けた新構造材料技術研究組合のプロジェクト。「熱可塑性CFRP(CFRTP)の開発」には東レ、東邦テナックス、三菱レイヨンなど炭素繊維メーカー

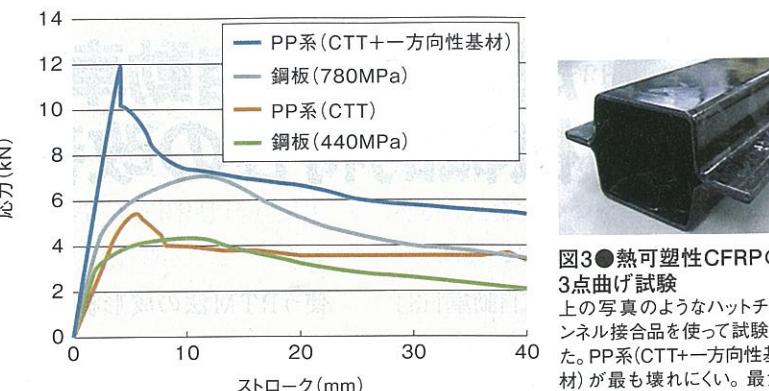


図3 熱可塑性CFRPの3点曲げ試験
上の写真のようなハットチャンネル接合品を使って試験した。PP系(CTT+一方向性基材)が最も壊れにくい。最大応力は12kNに達している。

る「熱可塑性CFRP(CFRTP)の開発」*プロジェクトのグループだ。

高性能の中間基材が登場

高橋氏たちは「CTT(Carbonfiber Tape Thermoplastics)」と呼ぶ独自のシート状の中間基材を開発している。一方向性基材(UDテープ)を一定の長さに切断し、これをランダムに分散させ、PPを含浸させることでシート状にしたものだ。一方向性

基材とは連続炭素繊維を一方にそろえてPPで固めてテープ状にしたもの。そのため、シートを上から見ると「ポストイット」が分散したような独特な性状をしている。

炭素繊維を繊維レベルで均一に分散させた等方性基材に比べて、ある長さを持った炭素繊維が集まっているので補強効果に優れ、機械的特性が大きく向上する。CTTをプレス成形した熱可塑性CFRPの物性は、質量当たりで比べると、航空機向けの熱硬化性CFRPを上回るという。具体的には、引っ張り弾性率と引っ張り強さで上回り、特にアイズット衝撃強さは1.5~2倍となる。

同グループは、自動車の構造部材を想定してCTTでハットチャンネルの接合品を作製し、3点曲げ試験を実施している(図3)。試験では2種類の熱可塑性CFRP製の接合品を用意した。1つは、PPとCTTのみを組み合わせたもの。もう1つがPPと、CTT/一方向性基材の積層品を組

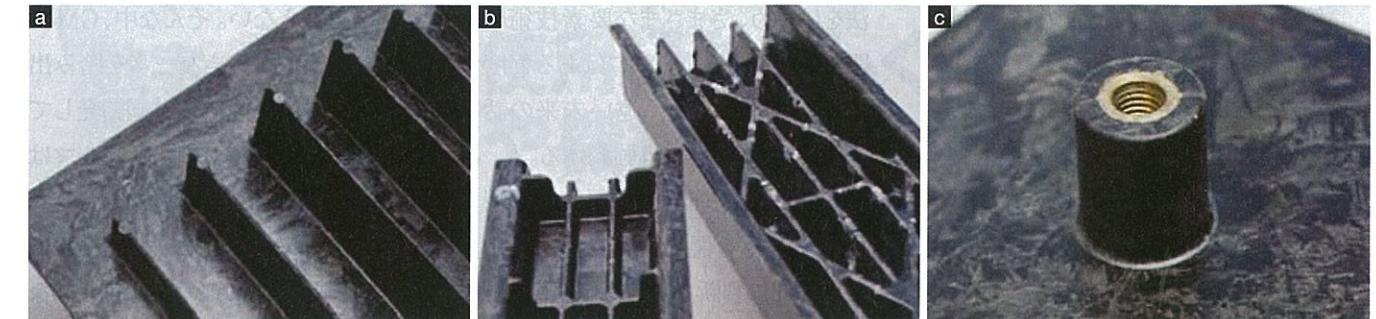


図4 PP系等方性基材の成形サンプル
PP系等方性基材はさまざまな形状を実現できる。(a)はリブを立てた成形サンプル。根元の厚さ3mm、高さ60mmのリブでも成形できることを確認している。(b)は複雑な内部構造を備えたハットチャンネルの成形サンプル。(c)はボスの中心に後加工で金属製の雌ねじを追加したもの。

み合わせたものだ。

CTTと一方向性基材の積層品は、CTT単独のものに比べて曲げ破壊に対する強さが格段に向上した。同時に同じ構造の440MPa級高張力鋼板と780MPa級高張力鋼板で作ったサンプルとも比較した。3点曲げ試験結果の分析から、同じ剛性を実現するには、質量は高張力鋼板の半分で済み、その際の衝撃吸収能力は、440MPa級高張力鋼板の2倍、780MPa級高張力鋼板の1.5倍に達することが分かったという。

活用技術でもコスト削減

高橋氏は、将来的には熱可塑性CFRPの進歩により、CFRP部品が鉄並みの価格になると確信している。そのシナリオは次の通り。大きな流れは、炭素繊維を造る技術と、それを部品にする活用技術が両輪となって進化し、CFRP部品のコストが大幅に下がるというものだ。

まず、第1部で紹介した「革新炭

素繊維基盤技術開発」プロジェクトなどにおいて、新しい製造方法が確立し、炭素繊維の価格が大幅に下がることが前提になる。ただし、炭素繊維の価格が仮に1/2もしくは1/3になっても、費用対効果で鉄にはかなわない。CFRPの活用技術の進化が不可欠だ。ポイントは3つある。

第1に、成形の際の生産性の向上である。その際、ボテンシャルの高さを考えると、熱可塑性CFRPが主役になるとみられている。前述のCTTのように、中間基材の進化によって熱可塑性CFRP部品の強度や剛性、耐衝撃性などの機械的特性が向上すれば、熱可塑性CFRPの使用量が減る。それにより、さらに部品コストを削減でき、軽量化効果も高まる。加えて、成形による形状の自由度が高まれば、さまざまな構造の設計に対応できるようになる(図4)。

第2に設計ノウハウの蓄積、とりわけCFRP部品の構造設計の技術が重要となる。熱可塑性CFRPには機

械的特性がどの方向でも等しい等方向シートと一方向性基材の2種類がある。両者の組み合わせで、部位ごとに機械的特性を変えられる。この特徴を設計に生かせば、さらなる軽量化が可能になるという。

「我々のプロジェクトでは、ホワイトボディーの質量を現在の鋼板製に比べて6割減らすことを目標にしている」と高橋氏は語る。それほど軽量化が実現できれば、エンジンやサスペンション、タイヤなどの負担を大きく軽減できる。例えば、低コスト・軽量の小排気量のエンジンで済む。こうした副次的な効果を考えると、クルマ全体の質量を半減できると高橋氏はみる。当然ながら、大幅な燃費改善が可能になる。

さらに、コスト削減の工夫を盛り込む。熱可塑性CFRPは、溶けた状態での粘度が高いので、大型部品の成形には成形圧力の高い大型プレス機が必要になる。当然ながら設備投資額が上昇する。この課題の

クトがある。

解決に向けて、高橋氏のグループは、部品を分割し、後から接合するというアイデアを検討している。

第3のポイントが工場内で発生する端材などのリサイクルだ。リサイクルすることで廃棄する素材を減らせば、コスト削減に直結する。その点でも溶かして再利用できる熱可塑性CFRPには多くの可能性がある。

CFRP部品を鉄並みの価格にするには、低成本の炭素繊維の製造

法をはじめ、さまざまな要素技術の開発が必要だ。「それにはある程度の時間が必要だが、遠い未来の話ではない」と高橋氏は強調する。

もっとも、CFRPを全面的に採用した大衆車を開発するかしないかを最終的に判断するのは自動車メーカーだ。技術開発を伴うことから、「i3」を遙かにしのぐ壮大なプロジェクトとなるはずだ。現時点では、その判断に必要な要素技術が完成して見守っている。

いるとはいえない。そんな中、GM社は帝人と組み、大きな一步を踏み出したのである。両社が共同開発しているCFRPベースの新しいクルマは生産台数が年間数万台なので、大衆車とはいえない。しかし、大衆車への搭載につながる大きな前進となる。GM社がいつ、どんなクルマを発売するのか。世界の自動車メーカーと炭素繊維メーカーは固唾を飲んで見守っている。

「2015年以降に年間数万台レベル」は揺るぎなし

——米General Motors社との熱可塑性CFRPを使った部品の共同開発の進捗状況は?

吉野氏 「2015年以降に年間数万台レベル」というのが当面の目標だが、この実現に向けて着実に進んでいる。我々が単独でスケジュールを決めるわけにはいかないので、具体的にいつということは言えない。2015年にこだわっているわけではない。

自動車メーカーとは、さまざまな可能性について議論しており、どんどん新しいアイデアが出ている。2011年3月に公開した試作車はデモンストレーションのためのもの。実際に開発している部品は顧客ニーズに合わせているのでかなり異なる。

まだいろいろハードルはある。新しいことをやっているのだからある意味で当然だ。共同開発が停滞しているという認識はない。

——開発中の熱可塑性CFRP部品の性能は?

吉野氏 我々は、熱硬化性CFRPについて多くの実績を有しているが、それを踏まえた上で、クルマ分野では熱可塑性CFRPが有利だと考えている。コスト競争力があるからだ。

航空機の場合、軽くすることのメリットが非常に大きいが、クルマの場合は軽さを若干犠牲にしても安いことが重要だ。費用対効果を重視して、鉄と同じ機械的特性を出すためにある程度厚くなつたとしてもいいのではないか。

——帝人の熱可塑性CFRPの特徴を聞きたい。

吉野氏 材料と成形技術の両方だ。それ以上のことは話せない。プロセスの部分は完全にノウハウなので公表できない。

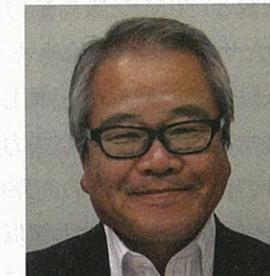
——あまりに情報がないので、「本当に共同開発が進んでいるのか」という声がある。

吉野氏 先ほどお話ししたように共同開発は着実に進んでいる。このプロジェクトに関しては、社内でも別の会社と同程度に情報管理を徹底している。だから進捗状況を知っている人はごくわずかだ。

——事業面ではどのような波及効果があるか?

吉野氏 CFRP製品全体で2020年前後に1500~2000億円の売上規模を見込む。中でも自動車が最大の成長分野だ。

我々の特徴は単に材料を売るのではなく、成形まで手掛け部品として販売すること。量産が近づけば成形工場を造る。すなわち、ティア1になることを目標としている。数年前、ティア1になると表明したが、これが我々のユニークな点で、最もチャレンジングなところだ。



吉野 隆氏
帝人グループ常務執行役員炭素繊維・複合材料事業本部長で東邦テックス代表取締役社長。

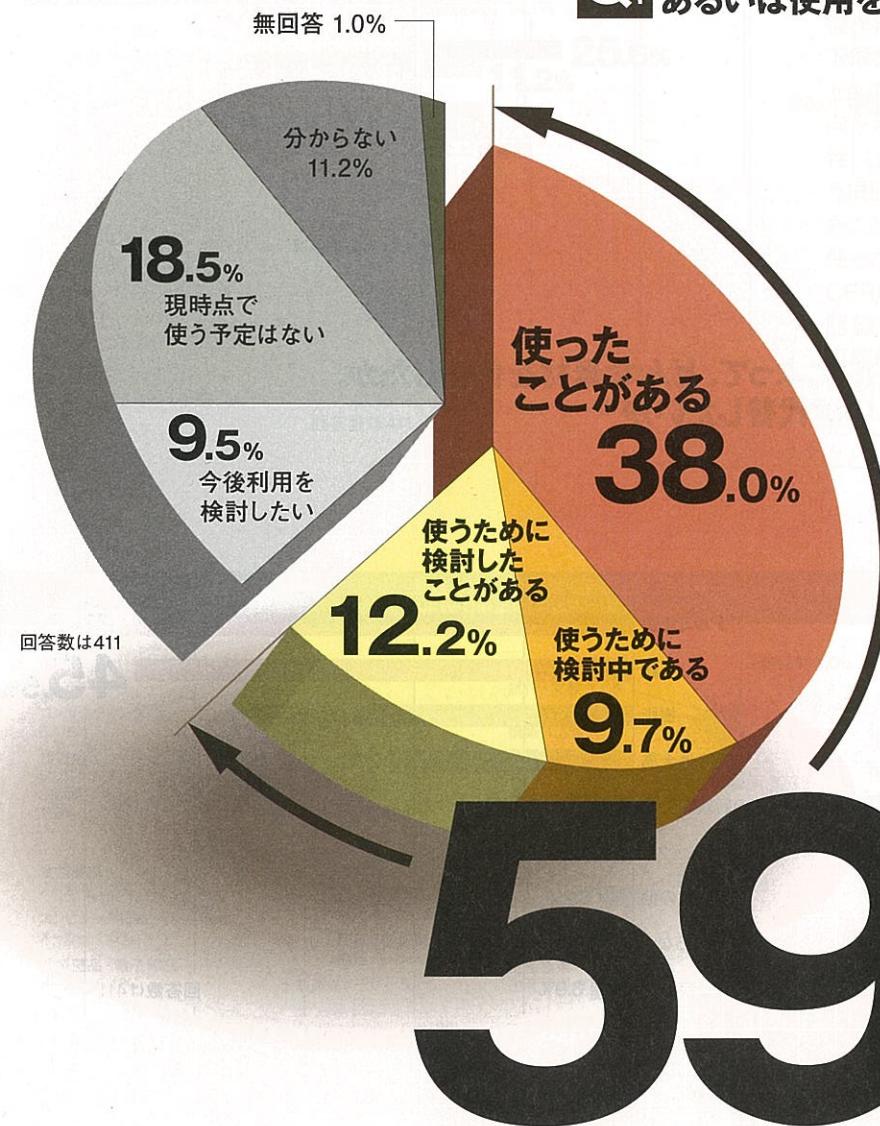
調査テーマ「CFRP/炭素繊維への取り組み」

数字で見る現場

6割が使用経験もしくは使用検討 自動車や機械に裾野が広がる

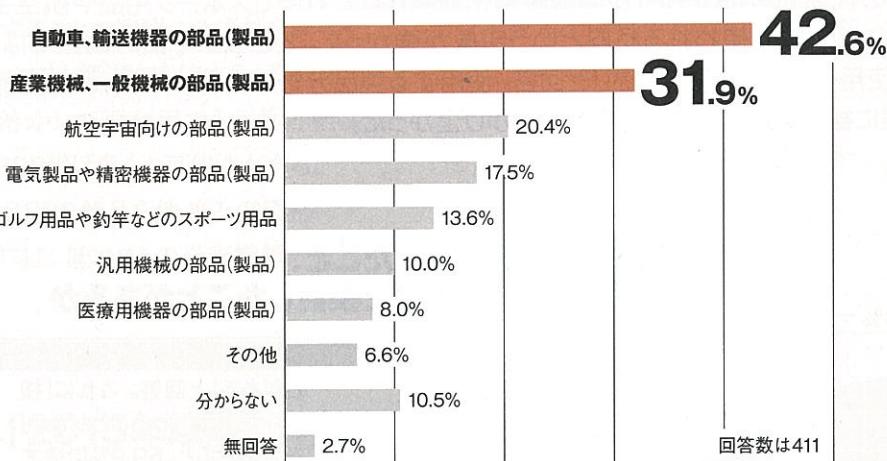
高性能材料の代表であるCFRP(炭素繊維強化樹脂)は、これまでスポーツ用品や航空宇宙など限られた分野で使われる材料という印象が強かった。ところが今回の調査では、59.9%が「使用もしくは使用を検討」と回答。使用する製品分野も自動車や産業・一般機械など、着実に裾野を広げつつあることが浮かび上がった。

Q1 CFRPを使ったこと、あるいは使用を検討したことがあるか



38.0%がCFRPを「使ったことがある」と回答。これに「検討中」と「検討したことがある」を合わせると、59.9%に達する。CFRPは多くの技術者が扱う材料になりつつあるようだ。「使う予定はない」との回答は18.5%にとどまった。

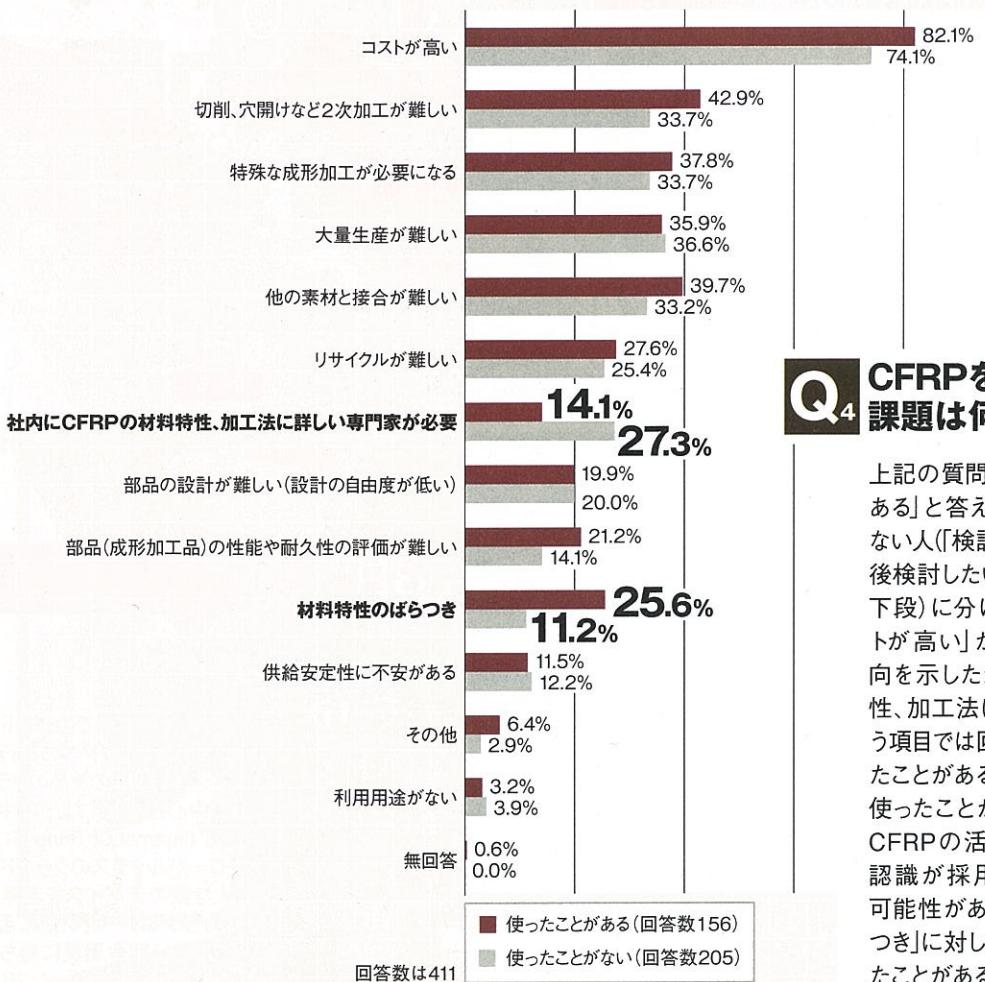
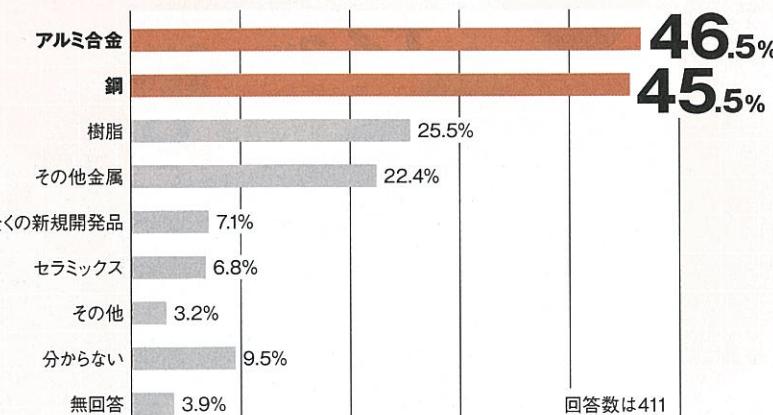
**Q2 CFRPは、どんな部品に適用したか。
あるいは適用したいと思うか**



「自動車、輸送機器の部品(製品)」がトップで、42.6%だった。炭素繊維メーカーは自動車を用途開発の重点分野としているが、使う側の関心も高まりつつある。次いで多いのが産業・一般機械(31.9%)、CFRPに対する関心の広がりが見て取れる結果となった。航空宇宙が20.4%、電気製品・精密機器が17.5%と続く。

**Q3 CFRPによって、どんな素材を代替したか。
あるいは代替したいか**

アルミニウム合金と鋼が45%強でほぼ並んでいます。アルミ合金は軽量素材の代表だが、CFRPにはアルミ合金を上回る軽量化が期待できる。鋼をCFRPで代替すれば、さらに大きな軽量化効果が得られるが、その際には費用対効果がポイントになる。鋼の代替が本格化するには、炭素繊維やCFRPの大幅なコスト低減が必須となる。



**Q4 CFRPを採用する上で
課題は何か**

上記の質問に対して、Q1で「使ったことがある」と答えた人(上段)と、使ったことがない人(「検討中」「検討したことがある」「今後検討したい」「使う予定はない」の合計:下段)に分けて集計した。いずれも「コストが高い」がトップになるなどよく似た傾向を示したが、「社内にCFRPの材料特性、加工法に詳しい専門家が必要」という項目では回答数が大きく異なった。使ったことがある人が14.1%だったのにに対し、使ったことがない人は27.3%に上った。CFRPの活用には専門性が必要という認識が採用へのハードルを高くしている可能性がある。さらに、「材料特性のばらつき」に対しても回答数に差が出た。使ったことがある人が25.6%だったが、使ったことがない人は11.2%にとどまっている。

回答者プロフィール

