

航空機を安全に軽く p.61

直径6mの胴体も一体成形

自動車を劇的に軽く p.56

ハイテンの限界突き構造部材に

お薦めのワケ p.50

環境変化で費用対効果が急上昇

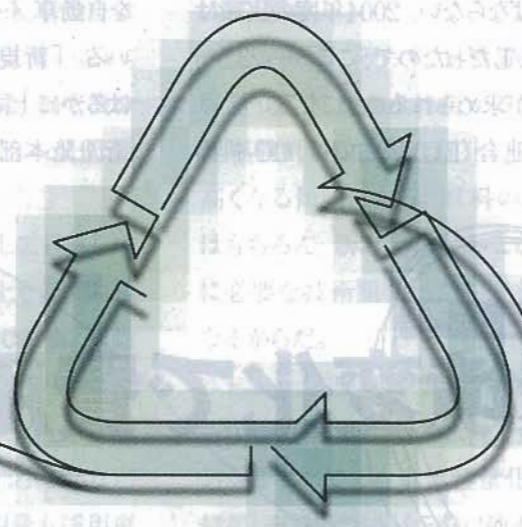
# 炭素繊維

特集 COVER STORY

# 維を使いませんか。



**リサイクルも万全に** p.70  
**意外に広い2次用途**



**一般産業を変える** p.66  
**プロの要望にとことん対応**

日本が世界需要の7割を占め、圧倒的な競争力を誇る炭素繊維に今、さまざまな分野から熱い視線が注がれている。例えば航空機では、安全航行に直結する1次構造部材に炭素繊維を本格採用し始めた。自動車分野では、トヨタ自動車が炭素繊維

を大量に用いたコンセプトカーを発表、量産車への採用が俄然、現実味を帯びてきた。繊維メーカーも増産を決めた。これほど炭素繊維が注目されるのは、高いコストに替えて余りある大きな「果実」が得られるからだ。(高野敦, 荻原博之, 藤堂安人)

**ト**ヨタ自動車は10%、日産自動車は15%——。最近、自動車メーカー各社が車体軽量化の目標値を競うように掲げている\*。その背景にあるのは、世界各地で強化される燃費および二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)排出量の規制だ。

日本では、2015年度までに乗用車の燃費を平均値で16.8km/L以上に高めなければならない。2004年度の実績は13.6km/Lだったので、ここから23.5%の改善が求められることになる。

欧州連合(EU)域内では、CO<sub>2</sub>排出

量に関して2012年までに120g/kmに下げねばならないという方向性で、欧州委員会を中心に議論が進められている(図1)。日本車の2004年の実績値は168g/km。CO<sub>2</sub>排出量は燃費に直結しているため、燃費の大幅な改善が求められることに変わりはない。

これらの新規制、特にEUの方向性を自動車メーカーは厳しく受け止めている。「新規制が求める水準は想定をはるかに上回っていた」(三菱自動車技術開発本部材料技術部エキスパート

(樹脂材料技術担当)の伊藤繁氏)。同社は、新規制を満たすにはトヨタ自動車と同じく10%の車体軽量化が必須とみており、10%の軽量化で燃費を3~7%改善できるという。

### 問い合わせが急増中

自動車メーカーが軽量化を重点課題に位置付ける中、ある材料の存在感が急速に高まっている。「軽くて強い」炭素繊維だ(炭素繊維の特徴に関しては、p.55の別掲記事を参照)。

お薦めのワケ

# 環境変化で費用対効果が急上昇

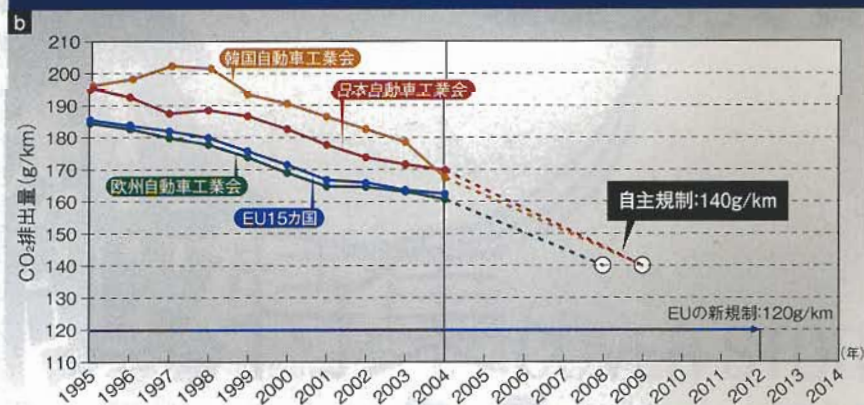


図1●CO<sub>2</sub>排出量の少なさを訴える展示(a)とCO<sub>2</sub>排出量の推移(b)  
 (a)は2008年の「第78回ジュネーブ・モーターショー」に出品されていた独BMW社の「118d」。CO<sub>2</sub>排出量が、2012年に導入が検討されている規制値未満であることを訴えている。(b)はEU域内で販売された乗用車(新車)に関するCO<sub>2</sub>排出量の実績値。排出量の減少ペースに対して厳しい規制が導入されることになりそうだ。なお、米国のメーカーは欧州自動車工業会に所属。(b)に関しては、欧州委員会の資料を引用した。

2007年の「第40回東京モーターショー」にも、その兆候は明確に表れていた。中でも自動車業界関係者の注目を集めたのが、炭素繊維と樹脂の複合材料(炭素繊維強化プラスチック、以下CFRP)を大量に使ったトヨタ自動車のコンセプトカー「1/X」だ(図2)。

1/Xの車体質量はわずか420kgしか

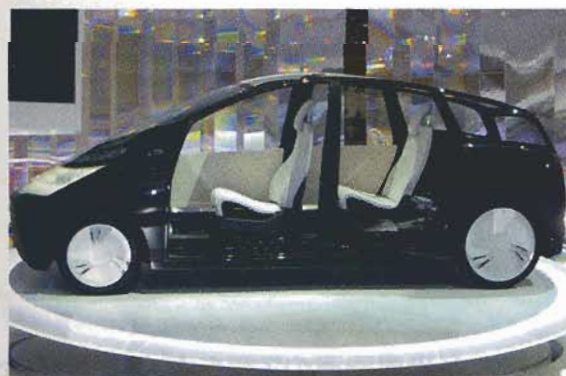


図2●トヨタ自動車のコンセプトカー「1/X」  
 「第40回東京モーターショー」に出品した。同社の「プリウス」とほぼ同等の室内空間を確保しつつ、車体質量を420kg(プリウスの約1/3)に抑えた。

\* トヨタ自動車は「2010年代半ば」、日産自動車は2015年を目標達成期限としている。

## 特集 炭素繊維を使いませんか COVER STORY

ない。AピラーおよびBピラー(フロントガラス両脇および前後ドア間の支柱)やアンダーボディ(床面の骨格)などの構造部材にCFRPを使っており、同社のハイブリッド車「プリウス」と同等の室内空間を保ちつつ、車体質量をプリウスの約1/3に抑えた。エンジン排気量は500ccである。

自動車の中でも特に性能や信頼性が問われる構造部材にCFRPを使った例は、普及価格帯の車種では今のところほとんどない。とはいえ、軽量化による燃費改善効果が最も高いのはやはり構造部材だ。すぐに実用化できるわけではないものの、1/Xは軽量化手段としてのCFRPの可能性を強烈に示した。

「(トヨタ自動車が)水面下で研究を進めていると聞いていたが、この段階でコンセプトカーという形で使ってくるとは意外だった。何ごともし『石橋をたたいて渡らない』といわれるトヨタ自動車が一部でも量産車に使い始めれば、(他社の採用も一気に進んで)炭素繊維が爆発的に普及する」(CFRPなどの複合材料の加工を手掛けるメーカーの技術者)。実際、炭素繊維メーカーの東邦テナックス(本社東京)では「東京

モーターショー以降、炭素繊維やCFRPに関する問い合わせが急激に増えた」(同社代表取締役社長の三嶋孝史氏)という。

### 軽量化の価値が高まる

自動車分野で脚光を浴びつつある炭素繊維。その需要は、右肩上がり伸びている(図3)。とはいえ、自動車は現在の需要にあまり貢献していない。需要を押し上げているのは、航空機や(自動車以外の)一般産業といった分野である。

そもそも炭素繊維は決して目新しい材料ではない。半世紀以上も前に開発された、歴史のある材料である。自動車分野においても、量産車に1990年代から使われ始めている。ただし、使用部位は高級車のプロペラシャフトなど一部に限られており、使用量も採用車種もあまり増えていないのが現状だ。

その理由は、炭素繊維を使うことのコスト対効果にある。炭素繊維の価格は、性能のグレードにもよるが数千円/kg。鉄鋼より1~2ケタ高く、アルミニウム合金と比べても数倍である。つまり、炭素繊維を使うときには、価格差を補って

余りある劇的な効果が求められる。自動車の場合、効果が航空機や一般産業ほどには得られなかったわけだ。

ところが、費用と効果のバランスに変化が生じている。燃費規制の強化や原油価格の高騰などによって、炭素繊維を使うことの価値(軽量化や軽量化による性能向上)が高まりつつあるのだ(図4)。

炭素繊維に限らず、材料置換による軽量化や性能向上に掛かるコストは、既存設計の改良・合理化に比べると高くなる傾向にある。材料のコスト差はもちろん、新材料を使いこなすために必要な技術開発への投資も必要になるからだ。

しかし、主要市場で燃費規制が強化されるといった現在の状況では「多少お金を払ってでも車体軽量化(という結果)を買いたい」(三菱自動車の伊藤氏)のがメーカーの本心。たとえ障壁は高くても、技術開発を進めて炭素繊維の採用を真剣に検討しなければならないのだ(自動車分野の動向に関しては、pp.56-60を参照)。

一方、将来の大口需要を早めに開拓したい炭素繊維メーカー各社は、自動

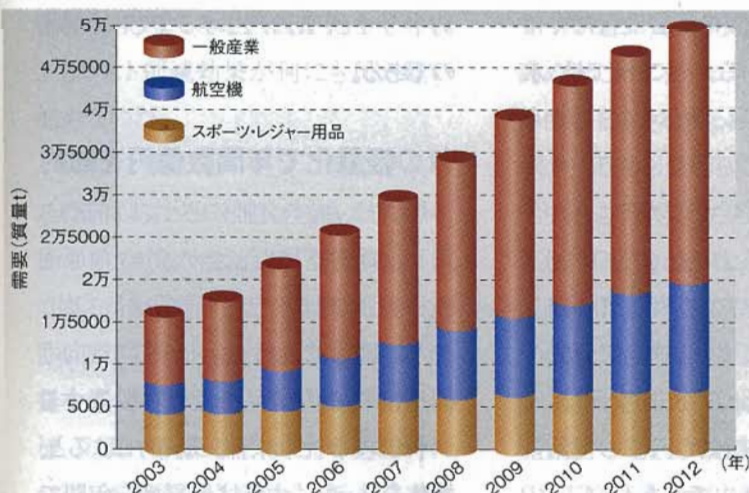


図3 ●炭素繊維の需要推移  
航空機分野と一般産業分野が拡大する見込み。東邦テナックスの推計値。

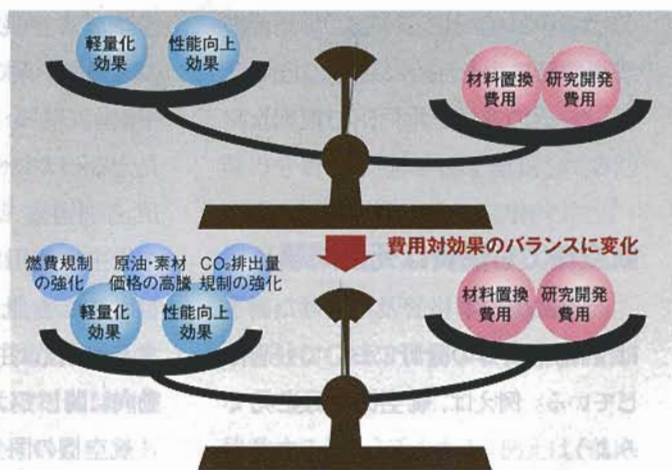


図4 ●費用対効果の変化  
燃費やCO<sub>2</sub>排出量の規制、原油や素材の価格高騰などにより、軽量化や性能向上で得られる効果(価値)が高まっている。



写真: Airbus社

図5●Airbus社の「A380」

座席数は525~853、全長は73m、全幅は79.8mの2階建て超大型機。ハブ空港間の大量輸送を想定した機種である。当初は2006年中に就航予定だったが、開発の遅れもあり、2007年ようやく1号機がシンガポール航空(Singapore Airlines社)に納められた。既に稼働している。

車メーカーへの対応を強化している。

まず、炭素繊維で最大手の東レは、自動車産業の集積地に位置する名古屋事業場(名古屋市)に、技術開発拠点「オートモーティブセンター」を設置した。2008年6月ごろに活動を始める予定だ。炭素繊維を自動車部品に応用する際の設計・製造技術を軸に開発を進めていき、自動車メーカーが採用しやすいように、いわば地ならしを行うのが主な目的である。

東邦テナックスや三菱レイヨン、三菱樹脂(三菱化学産資と2008年4月1日に合併、本社東京)などの主力メーカーも負けていない。それぞれ自動車向けの技術開発に力を注ぐとともに、自動車メーカーとの連携を水面下で模索している。

### 航空機でも燃費は死活問題

炭素繊維の本格普及に向けた動きは、自動車以外の分野においても進行している。例えば、航空機分野を見てみよう。

航空機分野で今話題になっているのは、最新鋭機の相次ぐ投入である。

仏Airbus社が総2階建てという超大型旅客機「A380」を2007年10月に就航させ、さらに米Boeing社が中型旅客機「787 Dreamliner」を2009年1月以降に就航させる予定だ。この2機種は大きさこそ違うものの、熾烈な受注合戦を繰り広げて両機種共に多くの受注を獲得、活気づいている(図5,6)。

実は、両機種に共通するのが炭素繊維の大量使用である。いずれも1機当たり約35tと、大量のCFRPを使っている(炭素繊維のみに換算すると1機当たり約20t)。

両社が機体のCFRP化を重視するのは、それが航空機の燃費改善に非常に有効だからである。特に787では、水平/垂直尾翼、主翼、胴体など、外から見えるほぼすべての部分にCFRPを採用。同程度の大きさでアルミニウム合金を主に使用したBoeing社の「767」と比べた場合、787の燃費は20%向上すると同社は主張する(航空機分野の動向に関しては、pp.61-65を参照)。

航空機の開発史は、CFRPの使用量を増やしてきた歴史でもある。CFRPの使用量は、767(就航は1982年)で1.5t、

Airbus社の「A320」(同1988年)で2t程度。使用実績がなかったため、可動翼(フラップやラダー)などの2次構造部材(仮に破損しても飛行に差し障りない部材)でわずかに使われ始めた段階だった。次のBoeing社「777」(同1995年)では、水平/垂直尾翼といった1次構造部材(仮に破損したら墜落の恐れがある部材)に採用され、CFRPの使用量は10tまで増えた。2次構造部材としての飛行実績を通じ、CFRPの(燃費改善に関する)有効性と長期信頼性が確認されたからである。そして今回の787では、主要構造部の質量の約半分をCFRPが占めるまでになったのである。

### 1tの軽量化で年間数億円を節約

燃費は、航空会社にとって以前から重要な経営指標だったが、昨今の原油価格高騰に伴う燃料価格上昇により、その影響は拡大している。航空機向け構造部材や内装品を設計・製造するジャムコ(本社東京都三鷹市)によると、機体を1kg軽くすれば燃料費を年間で約3万円節約できるという。1tの軽量化



写真：Boeing社

図6●Boeing社の「787 Dreamliner」

座席数は200~300、全長は57m、全幅は52m(787-3の場合)の中型機。1号機は、北京五輪に合わせて全日本空輸が東京-北京間に当てる予定だったが、こちらも開発が遅れている。2008年11月末に納入、2009年以降に就航予定。

なら3億円の節約だ。これは1機当たりの話である。1バレル当たり100米ドルを上回るようになった最近の原油価格では、この節約効果はさらに高まる。

A380も787も、顧客である航空会社への機体供給が当初計画より大幅に遅れている。例えば787は本来、2008年5月に1号機が全日本空輸に引き渡されるはずだったが、現在は2008年11月末に延期された。常識的に考えれば大問題である。だが、航空会社による発注の取り消しは現在のところない。航空機メーカーが限られているという事情もあるが、航空会社にとっては、新機種で実現できる燃費改善やそれによるコスト削減効果が何にも代え難い魅力なのだ。

大幅な軽量化や燃費改善を達成した787におけるCFRPの使い方は、今後の航空機の主流になりそうな勢いである。Airbus社は、2012年の就航を目指して787の対抗機種「A350」の開発を進めているが、そこでは787と同様、主翼や胴体などの1次構造部材にCFRPを全面的に採用する旨を発表している。さらに、2015年ごろの就航とみ

られるAirbus社「A320」やBoeing社「737」の後継機種でも、CFRPの使用量を787並みに拡大する予定だ。

航空機や自動車といった「移動体」だけではない。一般産業分野においても、炭素繊維が熱い注目を集めている。例えば、昨今需要が急激に伸びている風力発電機の翼(タービン)や、液晶パネルに使う大型ガラス基板の搬送用ロボットのフォーク(ガラス基板を直接支持するための構造材)など、枚挙にいとまがない。

タービンとフォークの共通点は、大型化に伴い炭素繊維の使用が不可欠になったこと。風力発電機は発電効率を高めるためにタービン面積、つまり受風部面積を大きくする必要が、搬送ロボットは生産性を高めるためにフォーク、つまり搬送可能なガラス基板面積を大きくする必要がそれぞれあった。一般産業分野においても軽量化および軽量化によるエネルギー消費効率の改善が求められており、炭素繊維は目的を達成するために最適な材料なのである(一般産業分野の動向に関しては、pp.66-69を参照)。

## 実績を作りたい繊維メーカー

これまで紹介してきた分野に限らず、軽量化や性能向上に要求は強まる一方だ。こうした状況が進むと、従来は主に材料コストの観点から遡上に上らなかった炭素繊維が、軽量化の「切り札」として浮上してくる。そして、技術者にとっては、今こそ炭素繊維を使い始める絶好の機会といえそうだ。その理由は主に二つある(図7)。

一つは、炭素繊維の黎明期を支えたスポーツ・レジャー用品から、近年の航空機や一般産業といった分野まで、炭素繊維の用途拡大に伴い設計・製造技術が徐々に確立されてきているため、今はその恩恵にあずかれることである。例えば、以前からスポーツ・レジャー用品の分野で炭素繊維を使用してきたミズノは、同事業で得たCFRPの設計・製造技術を基に、小型風力発電機の市場に参入しようとしている。

自社にCFRPに関する技術蓄積がなくても、加工技術にたけたメーカーと協業するという手もある。例えば、前出の搬送ロボットでCFRP製フォークを採用している安川電機では、フォーク

の設計・製造を複数の加工メーカーに委託している(p.69の別掲記事参照)。

今がチャンスという、もう一つの理由は、炭素繊維メーカーが「実績作り」に積極的な姿勢を見せていることである。このため、炭素繊維メーカーにとって、将来につながる魅力的な用途であれば、発注元に対して相当な技術支援をしてくれる可能性があるのだ。

その裏には、本命である自動車分野の立ち上げに、まだ時間がかかることがある。自動車への炭素繊維の採用は、その機運が非常に盛り上がっていることは前述のように確かだが、年産数万～数十万台の量産車種に今すぐに使えとは誰も考えていない。本格的な採用は早くて2015年前後という見解が多い。言い換えれば、既に市場が動き出した航空機や一般産業の分野と、まだこれからの自動車分野では、相当な時間の開きがあるのだ。

炭素繊維メーカーの立場で考えれば、この時間を少しでも短くすると同時に、自動車メーカーに対する売り込みに

有利となる実績を少しでも積み上げておきたい。さらに、自動車分野での来るべき大増産時代に向けて、炭素繊維の供給能力を少しでも拡大したいのが本音だろう。CFRP構造部材の設計・製造を積極的に請け負う姿勢からも、炭素繊維メーカーが実績作りを重視していることは分かる。

### 使用環境を見極める

こうした炭素繊維メーカーの支援姿勢があるので、現在はCFRPを使い始めるときの敷居は低くなっている。CFRP特有の設計・製造技術を持っている必要もないくらいだ。それよりも重要なのは、CFRP製構造部材の使用環境や条件を見極めることだ。

レーシングカー向けを中心にCFRP構造物の設計・製造を幅広く手掛ける童夢カーボンマジック(本社滋賀県米原市)代表取締役社長の奥明栄氏によると、CFRPを使えば応力の分布や方向に合わせて、より合理的な設計が可能になるという。これは、炭素繊維

が繊維の方向にだけ強みを発揮する「異方性材料」だからである。一般的な金属・樹脂材料などの等方性材料を前提に考えた設計のままCFRPに置き換えても、その能力を100%引き出せてはいないということだ。

従って、異方性材料の長所を生かすためには、応力の分布や方向を正確に認識しなければならない。しかも、それを認識するには、製品の使用環境や条件を的確に把握していないと難しい。

一般的な金属・樹脂材料より比強度や比剛性(引っ張り強さ・弾性率を密度で除した値)が非常に高く、異方性を持つ炭素繊維を使えば、これまでは考えられなかった軽量化・性能向上も夢ではない。だが、飛び抜けた長所は、裏を返せば設計に厳密さを求められるという短所につながる。「設計者を選ぶ」とも言い換えられる。その壁は決して低くない。だが、その壁を乗り越えたとき、鉄鋼や軽合金、樹脂などでは到達できない成果を得られるだろう。今がその絶好機なのである。

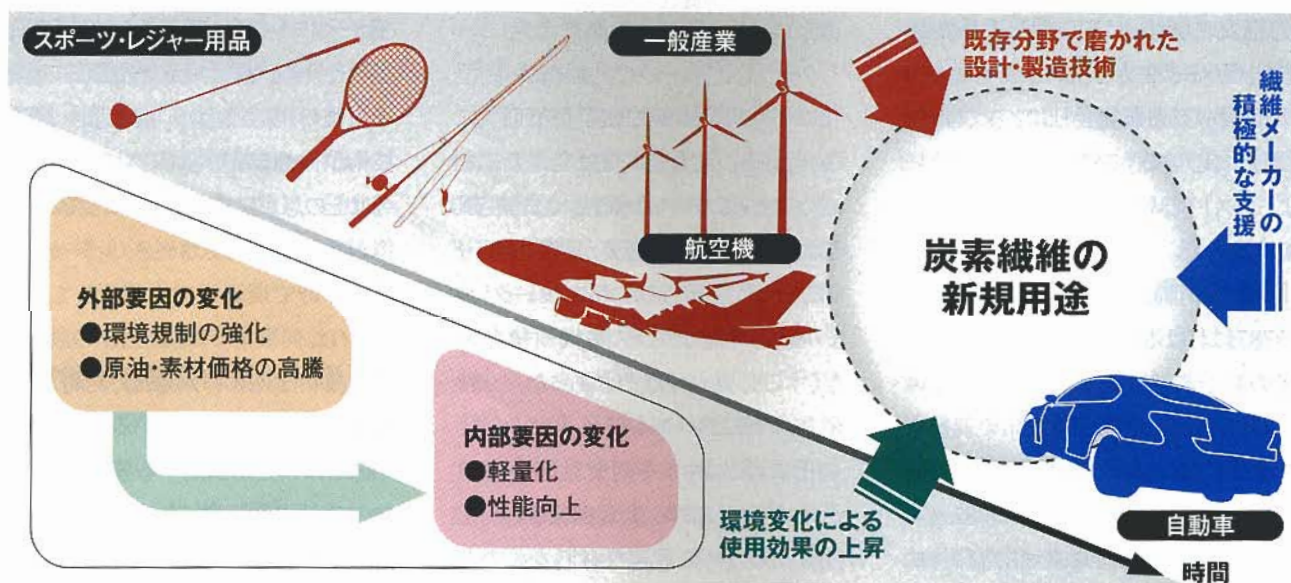


図7●使い始める絶好機

自動車分野での採用が本格化するには、まだ時間がかかる。その間、炭素繊維メーカー各社は「実績作り」に励む。一方、既存分野では設計・製造技術の蓄積・改善が進んでおり、その恩恵にあずかる絶好機といえる。

## 特集 炭素繊維を使いませんか?

### COVER STORY

## Q&A形式で理解する炭素繊維とCFRP

### 炭素繊維とは何か?

炭素繊維とは、成分のほとんどが炭素から成る繊維のこと。直径は一般に6~10 $\mu$ mで、PAN系とピッチ系の2種類がある。

PAN系は、ポリアクリロニトリル(PAN)繊維を炭化して製造するもの。炭素繊維需要の90%超を占めている。主要メーカーは東レ、東邦テナックス、三菱レイヨン。レギュラートウとラージトウに分類され、前者は3000~2万4000本(3k~24k)の繊維を束ねたもの、後者はそれ以上の本数の繊維を束ねたもの。前者は強度や剛性といった性能が高く、後者は低価格。前述の3社は前者を主力とする。ただし最近、三菱レイヨンが50k~60kの高品位繊維を開発し、境界は揺らぎつつある。

ピッチ系は、石炭・石油化学産業の残りかすであるピッチを溶融紡糸後に炭化・黒鉛化したもの。黒鉛化で反応を止めると短繊維の等方性ピッチ、熱処理を加えると長繊維のメゾフェーズ(異方性)ピッチが得られる。強度・剛性といった機械特性は後者が優れる。主なメーカーは前者がクレハ、大阪ガスケミカル、後者が三菱樹脂、日本グラファイトファイバー(本社東京)、米Cytec Industries社。

### どのように使うのか?

炭素繊維単体で使うことは、まずない。樹脂との複合材料(炭素繊維強化プラスチック、CFRP)として使う。CFRPは、Carbon Fiber Reinforced Plasticsの略。

ユーザーが炭素繊維単体を扱うことも、ほとんどない。ユーザーがCFRP構造部材を自社生産する場合、硬化前の樹脂をあらかじめ含浸させた中間体(プリプレグ)を用いる。プリプレグを使う利点は、CFRPにおける炭素繊維比率(質量ベース)が約60%と高いために炭素繊維の長所を最大限に引き出せること、成形品質を保ちやすいことだ。

そのため、炭素繊維メーカーと別に、プリプレグの開発・製造を主力事業とするメーカー(プリプレガー)もある。炭素繊維メーカー側も付加価値の

高いプリプレグの開発に取り組んでいる。

組み合わせる樹脂(マトリックス)は、熱硬化性樹脂(Thermosets)と熱可塑性樹脂(Thermoplastics)がある。特に区別する場合、前者をCFRTS、後者をCFRTPと記すことが多い。

現在、航空機分野や一般産業分野で使われているCFRPのほとんどはCFRTS。マトリックスは、エポキシ樹脂が多い。基材には、トウを一方方向に並べたもの(UD)や、織物(クロス)などがある。

成形法は、プリプレグ法(積層したプリプレグをオートクレーブ内で加熱・加圧)、Resin Transfer Molding(型内に基材を置き樹脂含浸後に硬化、RTM)法、フィラメント・ワインディング法(連続した長い炭素繊維に樹脂を染み込ませて芯金に巻き付け、筒状に成形)、プルトリュージョン法(積層したプリプレグやマットを、加熱した型を通して引き抜きながら硬化)などがある(図A)。

### 炭素繊維の長所は?

最大の長所は、低密度でありながら高強度・高剛性であること。同じ強度や剛性を実現するのに必要な質量が、鉄鋼や軽合金、樹脂より小さい。軽量化の観点で材料の実力を比較する場合、比強度および比剛性(強度・弾性率を密度で除した値)を用いると分かりやすい(図B)。

密度(g/cm<sup>3</sup>)は、PAN系で1.75前後と、鉄(7.87)やアルミニウム(2.70)より低く、マグネシウム(1.74)と同程度だ。メゾフェーズピッチ系は2.0~2.1と、PAN系より高い。同じ炭素でもグラファイトは2.25、ダイヤモンドに至っては3.51である。

このほかに①熱伝導率が高い(不燃性)②熱膨張率が低い(熱寸法安定性)③電気伝導率が高い(導電性)④固有振動数が高く、振動減衰能に優れる⑤耐食性に優れる⑥X線の透過性が高い——といった特性がある。これらを生かした用途は、①に対しては防火・耐炎材、②は人工衛星・精密加工機械、③は電極、④はガラス基板搬送ロボットフォークやスポーツ用品、⑤は建築補強

材⑥はCTスキャナのベッド——である。なお、発火や爆発の危険性は基本的にない。

### 炭素繊維やCFRPの短所は?

鉄鋼や軽合金より価格が高く、少ない使用量で済む設計が特に求められる。さらに、脆性材料という点も短所になり得る。鉄鋼とは異なり、極限強度を超える応力が加わると、直ちに破断する可能性が高い。「粘りが無い」ともいわれる。

CFRPの性質として、引っ張りには強いが、圧縮に弱い。引っ張りの際は破断直前まで炭素繊維が応力を受け持つのに対し、圧縮の際は樹脂が炭素繊維より先に破壊されるからだ。曲げ耐性を検討する際は、圧縮側に注意する必要がある。

### ほかの繊維とどう違うのか?

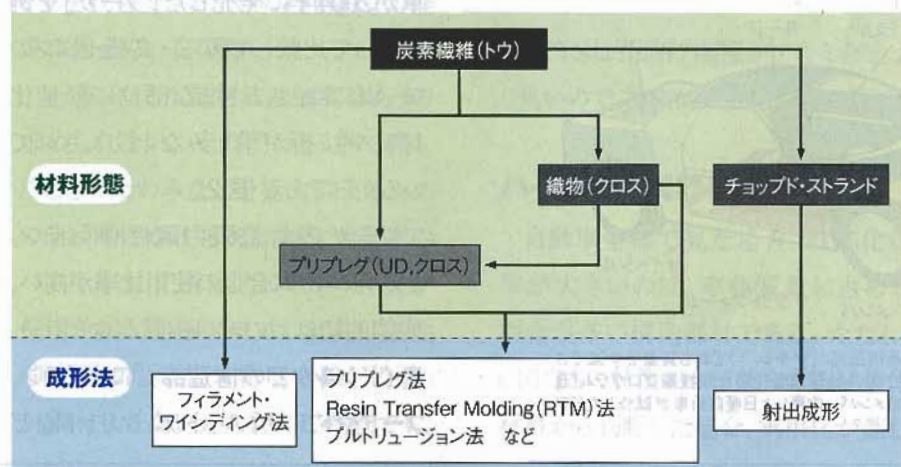
炭素繊維のほかに、ガラス繊維やアラミド繊維などがある。ガラス繊維は安価だが、比強度や比剛性が炭素繊維より低い。そのため、既にガラス繊維が使われている用途では、費用対効果次第で代替が進む可能性がある。

アラミド繊維も、比強度や比剛性の点では炭素繊維に劣る。ただしアラミド繊維は、炭素繊維にはない靱性(耐衝撃性)を備えるため、両繊維を組み合わせ互いの長所を生かすことも可能である。織物メーカーの明大(本社岡山県倉敷市)は、炭素繊維とアラミド繊維をそれぞれ2方向ずつ配した4軸織物を開発、実際に採用されている。

### 今後の課題は?

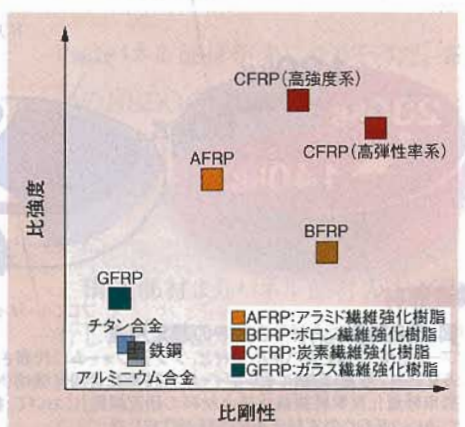
炭素繊維メーカー側は、生産コスト削減による繊維価格の低減、増産体制やリサイクル技術の確立に向けて動いている。メーカーとユーザーが協力しつつ、CFRP構造部材に特有の設計技術や低コスト生産技術の開発も進める必要がある。

リサイクルに関しては、技術的には既に幾つかの手法が確立されつつある。課題は経済性である(リサイクルの動向に関しては、pp.70-71を参照)。



図A●炭素繊維の材料形態と主な成形法

用途に応じて使い分ける必要がある。チョップド・ストランドは、トウを数~数十mmに切断したもの。熱可塑性樹脂と混練した上で射出成形する。



図B●比強度と比剛性

CFRPは、ほかの繊維強化樹脂(FRP)や鉄鋼、アルミニウム合金より比強度・比剛性が高い。ここでのFRPのマトリックスはすべてエポキシ樹脂。炭素繊維協会の資料を基に本誌が作成した。



**2** 008年3月、足掛け5年にわたる長丁場を終えたプロジェクトがある。新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) が主導し、東レと日産自動車に参加した「自動車軽量化炭素繊維強化複合材料の研究開発」だ。

このプロジェクトの目的は、炭素繊維強化プラスチック (CFRP) 製の自動車部品に関して、製造サイクルタイムを短

縮すること、基本性能や衝突安全性、リサイクル性を検証すること。パネル部材と構造部材への適用を想定しており、東レや日産自動車がドアパネルやプラットフォームといった部品を実際に試作した (図1)。

使った材料は、炭素繊維の織物と熱硬化性樹脂 (エポキシ樹脂) を組み合わせたもの。Resin Transfer Molding (RTM) 法を基に大幅な改良を加えた「ハイサイクル一体成形」で製造した。RTMでは製造サイクルタイムが160分だったが、樹脂の組成や添加剤、樹脂の注入法などを改善することで、ハイサイクル一体成形ではそれを10分に短縮。これにより、年産数万台クラスの量産車種で本格的に採用される可能性も出てきた。

自動車を劇的に軽く

# ハイテンの限界突き構造部材に

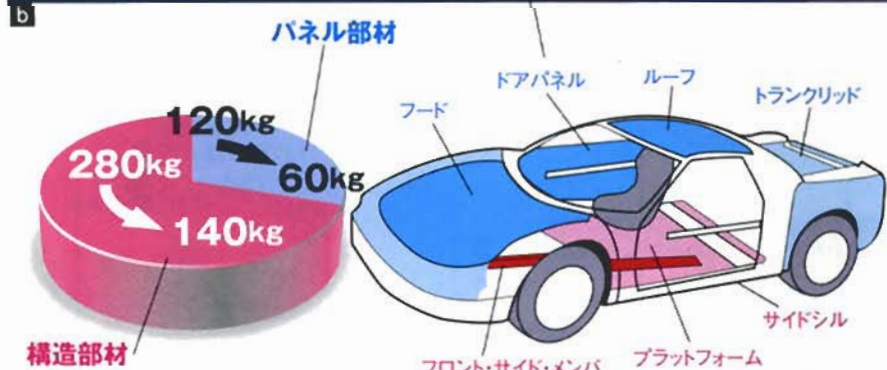


図1●自動車におけるCFRPの想定用途  
フードやルーフなどのパネル部材と、プラットフォームに代表される構造部材がある。いずれも質量を半減できる見込み。写真は、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の地球温暖化防止新技術プログラム「自動車軽量化炭素繊維強化複合材料の研究開発」において、参加メンバーの東レと日産自動車が生産したドアパネル。NEDOの資料を基に本誌が作成した。

## 代替可能性は十分

ハイサイクル一体成形品に限らず、炭素繊維と熱硬化性樹脂を組み合わせたCFRTS\*1の自動車における主な用途は、パネル部材と構造部材である。自動車メーカーは、この二つの用途に対しては、ほかの軽量化材料の使用も考えている。そこで、ここではCFRTSの可能性を検討するために、日産自動車が2004年に発売した「フーガ」を例にとって比較してみる。高級セダンのフーガには、さまざまな部位に軽量化材料や技術が惜しみなく投入されているからである (図2)。

フーガでは、高張力鋼板 (ハイテン) とアルミニウム合金の使用比率が高い。具体的には、フロントメンバやピラー、サイドシルなどの構造部材にハイテン、フードやドアパネル、トランクリッドなど

\*1 CFRTS 炭素繊維と熱硬化性樹脂を組み合わせた複合材料で、Carbon Fiber Reinforced Thermosetsの略。

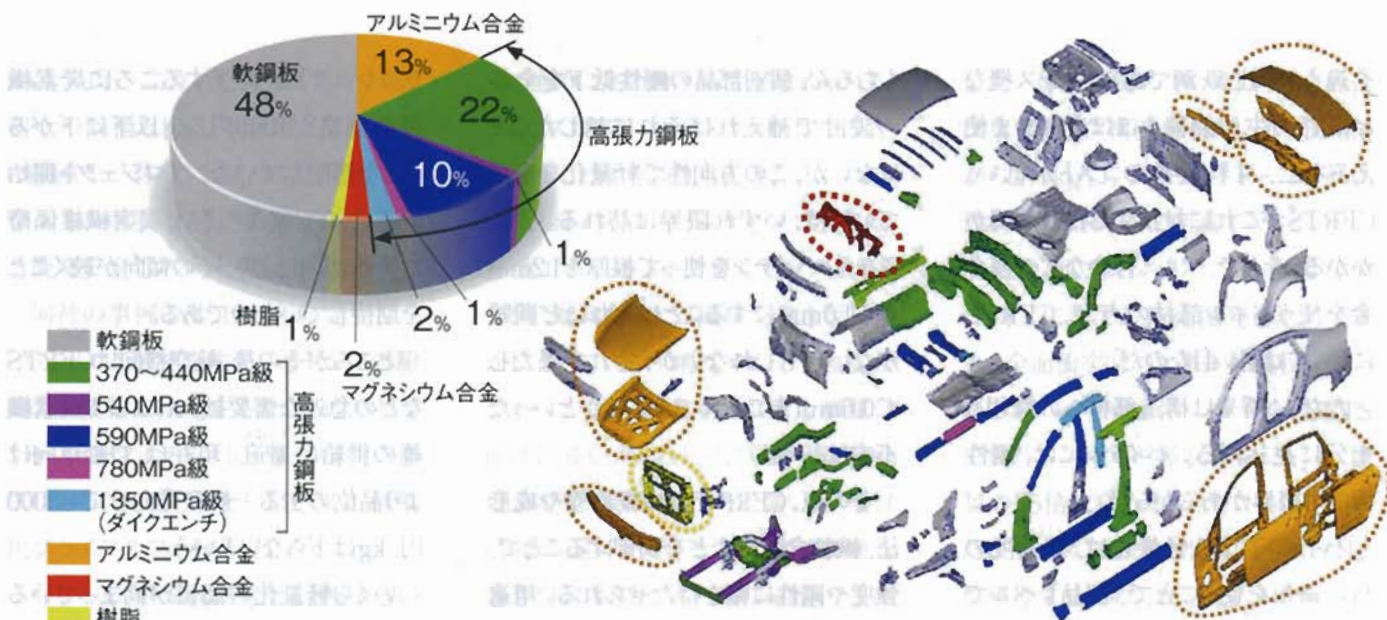


図2●車体軽量化に向けた材料活用の動向  
高張力鋼板やアルミニウム合金の採用が多い。図は「フーガ」の事例。日産自動車の資料。左上は質量ベースの使用比率。

のパネル部材にはアルミ合金が使われている。つまりCFRTSの主なライバルは、構造部材ではハイテン、パネル部材ではアルミ合金に代表される軽合金ということになる。

構造部材の軽量化にハイテンが多用されるのは、構造部材に求められるのが主に引っ張り強さであり、ハイテンを使えば同じ引っ張り強さを実現するのに必要な鋼材の量が少なくて済むからである。言い換えれば、ハイテンの比強度（強度を密度で除した値）が軟鋼板より高いことを生かして軽量化しているわけだ。その点、CFRTSは比強度がハイテンよりさらに高いので、ハイテンを代替できるだけの技術的な可能性は備えている（図3）。

一方、パネル部材には強度はあまり求められない。その代わりに、手で押したときのたわみなどを極力抑えるための曲げ剛性が不可欠となる。自動車のパネル部材で積極的にアルミ合金が使用される理由の一つは、比曲げ剛性（弾性率の3乗根を密度で除した値）が鋼材より高いからだ。この点でも、

CFRTSは比曲げ剛性がアルミ合金より高いので、技術的に意味がある（図3）。

### ハイテンの限界を突く

自動車全体で見た場合、軽量化効果が大きいのは、車体質量に占める割合が多い構造部材である。ただし、CFRTSの特徴および競合する軽量化材料から判断した場合、実用化が進む

のはパネル部材が先になりそうだ。前出のNEDOのプロジェクトでも、まずはパネル部材、次に構造部材の順番で実用化が進むという将来図を想定していた。

構造部材よりパネル部材の方が先行して代替しやすいのは、ライバルであるハイテンの費用対効果が高いからである。軟鋼板とハイテンは強度こ

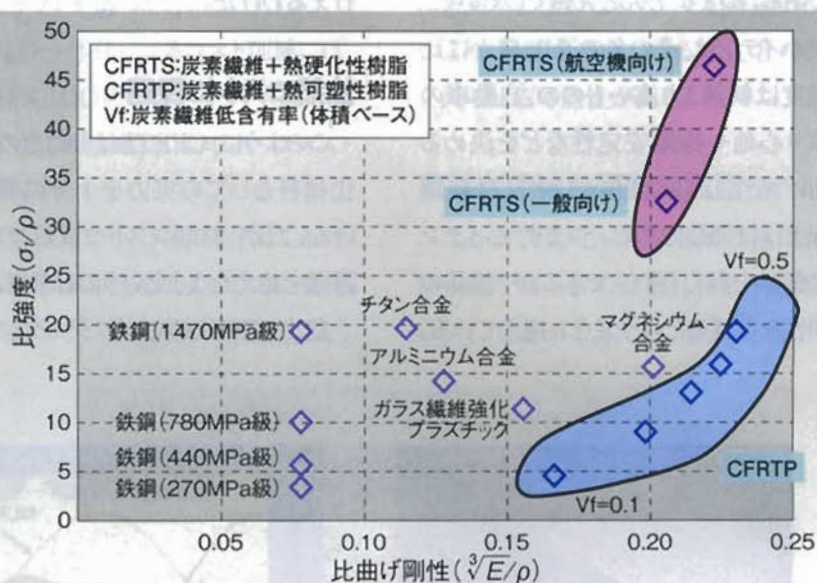


図3●自動車部品材料としての比強度と比剛性の比較  
鉄鋼にない特性を生かす必要がある。自動車部品材料としての特性を比較するため、比引っ張り剛性ではなく比曲げ剛性を見ている。比曲げ剛性は、弾性係数の3乗根を密度で除した値。東京大学大学院工学系研究科環境海洋工学専攻教授の高橋淳氏の資料に基づき本誌が作成した。

そ違うが同じ鉄鋼であり、プレス機など既存の生産設備をほぼそのまま使えるなど、材料置換のコストが低い。CFRTSがこれに対抗するには時間がかかる。そこで、アルミ合金などの軽合金を使うパネル部材の方が、CFRTSにとっては狙い目のだ。

ただし、将来は構造部材への採用も十分に見込める。ハイテンには、剛性面での限界があるからだ。

ハイテンによる軽量化は、比強度の高い鋼板を使うことで、部品レベルで同等の引っ張り強さを実現するために必要な鋼板の量(質量)を減らすことである。つまり、どんどん薄くしていく。

ハイテンは、その名の通り、確かに比強度は軟鋼より高いものの、自動車の乗り心地や操縦安定性などを決める曲げ剛性(および比曲げ剛性)は軟鋼板とほぼ同じである。つまり、ハイテンは部品を軽く(薄く)できるが、部品の剛性を下げるといふ欠点も抱えている。

もちろん、個別部品の剛性低下を全体の設計で補えばそれに越したことはないが、この方向性で軽量化を進めていけば、いずれ限界は訪れる。例えるなら、ハイテンを使って板厚を1.2mmから1.0mmにすることはそれほど問題がないかもしれないが、それを果たして0.6mmまで薄くできるのかといった不安は残る。

その点、CFRPでは繊維形態や成形法、繊維含有率などを制御することで、強度や剛性に幅を持たせられる。用途に適した性能の造り込みを、材料の段階だけでなく、設計や成形の段階でも行えるわけだ。

### 依然コストに課題

このように、CFRTSは自動車の軽量化材料としての実力を十分に備えている。だが、材料コストや成形コストに課題を抱えたままというのも事実だ。

前出のNEDOのプロジェクトでは、

プロジェクトが終了するころに炭素繊維の価格が1000円/kg以下に下がることを想定していた。プロジェクト開始直前の2002年ころまで、炭素繊維価格は下落傾向にあり、その傾向が続くことを期待していたのである。

ところがその後、航空機向けCFRTSなどの急速な需要拡大によって炭素繊維の供給は逼迫<sup>ひっばく</sup>。現在は、自動車向けより品位の劣る一般産業向けでも3000円/kgは下らないという。

いくら軽量化の価値が高まっているとはいえ、軽量化効果が大きいというだけでは競合材料とのコスト差を打ち消すには至らないのも事実。そのためには、軽量化以外にもCFRPならではの利点が必要になる。「炭素繊維を使う以上、自動車部品を軽量化するのは当たり前。高価な炭素繊維を使う別理由、プラスアルファが問われてくる」[三菱自動車技術開発本部材料技術部エキスパート(樹脂材料技術担当)の

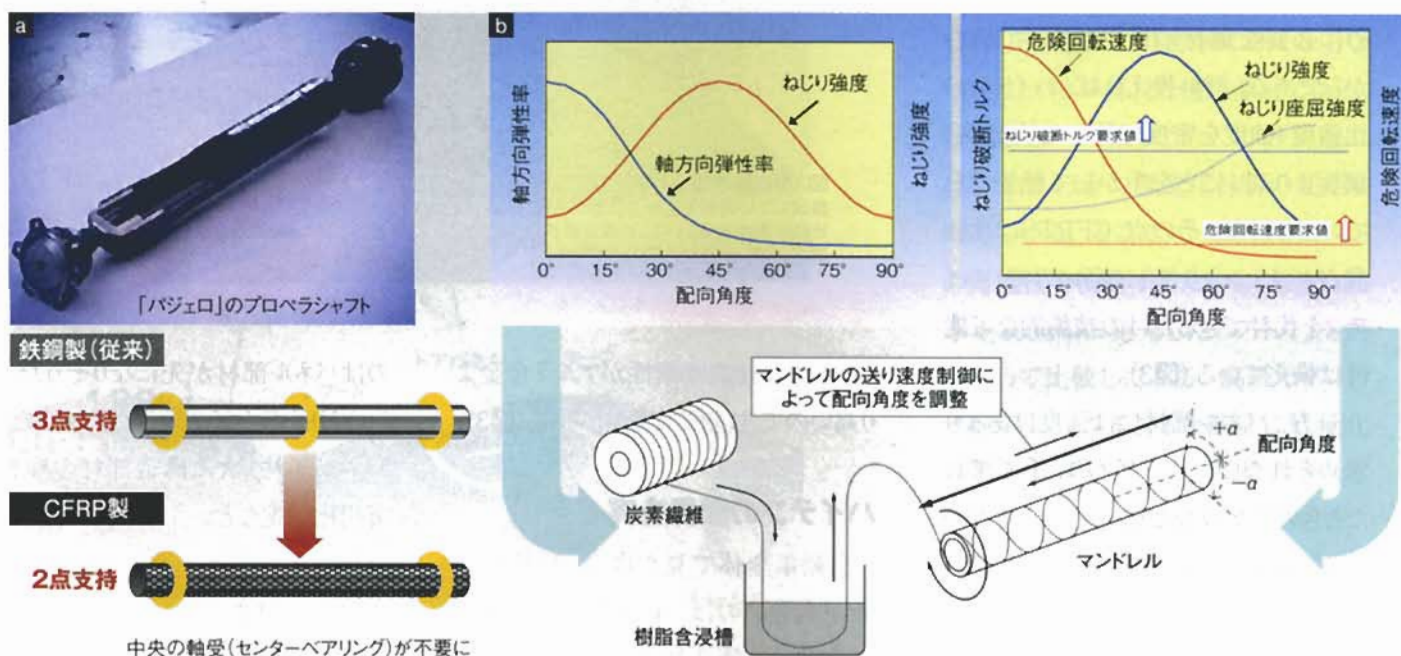


図4●プロペラシャフトの採用例  
「バジェロ」では、プロペラシャフトを鉄鋼製からCFRTS製に変更。センターベアリングが不要となり、部品点数やコストの削減を実現した(a)。曲げ剛性やねじり強度を最大限に高めている(b)。

後呂学氏)。こうしたプラスアルファの利点の候補として、同氏は「部品点数の削減や一体化によるコスト削減」「衝撃エネルギー吸収特性の高さを生かした衝突安全性の向上」などを挙げる。

同社の事例では、1999年に発売した「パジェロ」が相当する。エンジンの駆動力を後輪に伝達するためのプロペラシャフトをフィラメント・ワインディング法によるCFRTS製としたときに、軽量化プラスアルファを実現した。

もちろん、軽量化できたことも大きいのだが、むしろ最大の効果は、プロペラシャフトを支持するための軸受の数を3個から2個に減らせたことだったという。CFRTSは曲げ剛性やねじり強度が高いので、3個のうち中央にあったセンターベアリングと呼ばれる軸受を省けたのだ(図4(a))。

ただし、そのためには設計・製造上の工夫が不可欠だった。センターベアリングを省くことから、プロペラシャフト

そのものに高い曲げ剛性が求められる。また、プロペラシャフトは回転体なので、ねじりに対する強度も重要だ。

フィラメント・ワインディング法では、芯金(マンドレル)に対してどのような方向(配向角度)で繊維を巻き付けたかによって、曲げ剛性やねじり強度が変わってくる。軸と並行(0°)な繊維は曲げに強いが、ねじりに弱い。配向角度が45°の繊維はねじりに強いが、曲げに弱い(図4(b))。そこで、炭素繊維を巻き付ける際にマンドレルの送り速度を制御し、配向角度の分布を調整することで、曲げとねじりの両方に強いプロペラシャフトを造ったという。

部品の一体化によるコスト削減には、前出のNEDOのプロジェクトも取り組んでいた。日産自動車は、リア・クロス・メンバやリア・サイド・メンバを一体化してリア・フロア・パネルとすることで、従来は85部品で成り立っていた構造をCFRTSで一体成形した(図5)。こう

した一体化を進めていけば、将来的には車体質量(構造部材のみ)を300kgから147kgに、プラットフォームの部品点数を225から29に削減できるという。

また、同プロジェクトでは衝突安全性向上に関する技術開発も進めてきた。全面衝突時のエネルギー吸収部材となるフロント・サイド・メンバをCFRTSで試作。エネルギー吸収量を65kJと、鋼製の1.5倍に高めることを目標にしていたが、設計の工夫などにより実際には1.8倍程度まで高められる見込みだ。

エネルギー吸収部材のエネルギー吸収量を高められれば、その分だけ衝突時に乗員室に伝わるエネルギーを減らせる。つまり、自動車事故による死亡者の数を減らせる可能性がある。

### 有望なのは熱可塑性樹脂

ここまでは、主に炭素繊維と熱硬化性樹脂を組み合わせた材料(CFRTS)に関して述べてきたが、量産規模が1



図5●部品点数削減の事例  
CFRP化によってプラットフォーム部品を一体化し、部品点数を削減。軽量化も実現した。日産自動車の資料を基に本誌が作成した。

ケタ上の年数十万～数百万台クラスの車種で使うには、さらに大幅な生産性の向上が求められる。そこで、このところ注目されているのが熱可塑性樹脂と組み合わせたCFRTP\*だ。これによって、サイクルタイムの壁を破ろうというのである。

材料にCFRTSを使用したNEDOのプロジェクトでは、サイクルタイムを160分から10分に短縮した。それは確かに大きな前進だが、年産数十万～数百万台クラスでは約1分にする必要がある。また、リサイクルの観点でも熱可塑性樹脂のCFRTPが有利だ(リサイクルの動向に関しては、pp.70-71を参照)。リサイクル性から、マトリックスにはポリプロピレン(PP)が選ばれることが多い。

CFRTPに関しては、既に実用化の例がある。日産自動車は2006年に発売した「スカイライン」のフロントエンド・モジュールだ(図6)。炭素繊維(長繊維)

とPPを組み合わせた材料を使用している。炭素繊維の含有量は20質量%である。

このモジュールの特徴は、シュラウド一体型のラジエータ・コアサポートを搭載し、一体化による部品点数の削減や、組立性の向上を実現していること。ガラス繊維強化プラスチック(GFRP)製の従来品に対して、約20%の軽量化も達成している。

ラジエータ・コアサポートはエンジンルーム前部にあり、ラジエータやコンデンサといった熱交換部品を保持する。一方、シュラウドは、中央で空冷ファンを支え、ラジエータとコンデンサに風を引き込むための部品だ。これら二つの部品を一体物として設計、射出成形している。部品間にすき間が生じないので、外部から引き込んだ風を漏らさずにラジエータやコンデンサに流せる。軽量化だけでなく、冷却性能要求を満た

しやすいので生産が簡単になるという「プラスアルファ」をうまく発揮できた事例といえる。

## 課題は山積み

このように多大な可能性を秘めているCFRPだが、課題も少なくない。自動車の軽量化技術全般を見ている日産自動車技術開発本部エキスパートリーダー(車体設計)の道浦吉晴氏は、CFRPの持つ実力を認めた上で、量産車種への採用の課題として①材料特性(特に延性・<sup>じんせい</sup>靱性)の向上②信頼性(特に接着・接合面の強度)の向上、信頼性評価技術の構築③生産性の一層の向上(サイクルタイムの短縮)——を挙げる。いずれも、材料メーカーと自動車メーカーの協業が不可欠な課題だ。

また、CFRTPはCFRTSと比べて繊維と樹脂の接着性に劣る(なじまない)という問題を抱えている。繊維と樹脂が剥離しやすいので、耐衝撃性に問題がある。この問題には、材料メーカーが剥離しにくくなる技術(炭素繊維の表面処理やマトリックス構造の改善といった技術)の開発に取り組んでいるほか、製法側の改善も行われている。NEDOは、2008～2012年の5年間で自動車用CFRTPの新規プロジェクトを進めるが、同プロジェクトにおける最大の課題も、繊維と樹脂のなじみである。



### 【メリット】

- 軽い(約20%の軽量化)
- 生産性が高い(部品一体化)
- 冷却品質を確保しやすい

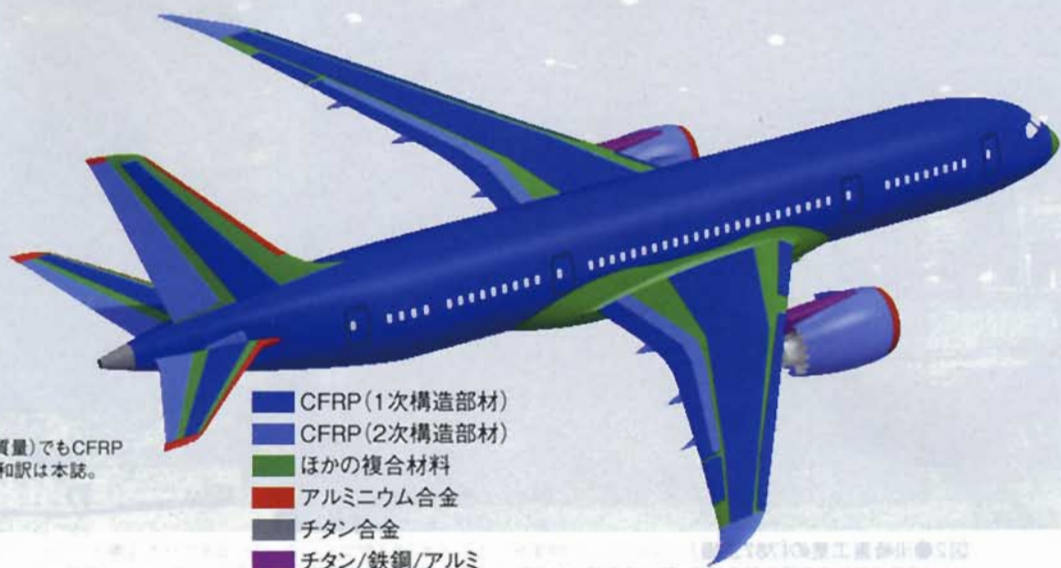
図6●CFRTPの適用例

「スカイライン」(2006年式)で採用された、シュラウド一体型のラジエータ・コアサポートを搭載するフロントエンド・モジュール。ポリプロピレン(PP)をマトリックスとして射出成形している。製造しているのはカルソニックカンセイ。

\*2 CFRTP 炭素繊維と熱可塑性樹脂を組み合わせた複合材料で、Carbon Fiber Reinforced Thermoplasticsの略。



図10「787」における各種材料使用状況  
外から見える部材は、ほぼすべてCFRP。使用比率(質量)でもCFRPなど複合材料が約半分を占める。提供はBoeing社、和訳は本誌。



- CFRP(1次構造部材)
- CFRP(2次構造部材)
- ほかの複合材料
- アルミニウム合金
- チタン合金
- チタン/鉄鋼/アルミ

航空機を安全に軽く

## 直径6mの胴体も一体成形

**仏** Airbus社の「A380」と米 Boeing社の「787 Dreamliner」。こうした最新鋭旅客機の1次構造部材には、CFRPが35tも使われる。CFRPの大量採用時代が到来したのだ。787については機体主要構造部の質量の約50%、A380でも約25%がCFRPとなった(図1)。CFRPの大量採用を可能にしたのは、「大型部材の一体成形」や「層間剥離問題」といった技術課題を解決できたためである。

### 「なんとでも一体成形せよ」

大型部材の一体成形に挑んだのは、日本の重工メーカーだ。787の開発は、三菱重工業、川崎重工業、富士重工業の3社がBoeing社と共同開発契約を結んで進めた。この日本勢3社の合計シェアは機体質量に対して約35%に上り、これまでのBoeing社の機種の中で最高となった。三菱重工は主翼、川崎重

工は主翼の前に位置する胴体(前部胴体)など三つの部材、富士重工は胴体と主翼をつなぐ部材(中央翼)を担当した。各社が担当した部材はどれもこれまではアルミニウム合金で造られており、ここまで大型の部品をCFRP化するというのは未知の世界だった。

しかもBoeing社は、これらの大型部材を分割せずに一体成形することに強くこだわった。炭素繊維の材料価格がアルミ合金よりは高いというコストアップ分を、一体成形によるプロセスコストの低減によって吸収しようと考えたのである。

例えば、川崎重工が担当した前部胴体は、直径6mの円筒形の大型部材である。「767」や「777」ではアルミ合金で複数枚のパネルに分割して製造したものを、リベットで接合して円筒形に組み立てていた。これに対して787では、パネル分割せずにすべて複合材料の一

体成形品「ワンピースバレル」とすることを強く要求してきたのである。

これを聞いた川崎重工側では当初、これほどの大型部材の一体成形は非常に困難であると判断した。しかしBoeing社は「絶対やるんだ」と譲らなかったという。案の定、技術的には極めて高いハードルが待ち受けていたが、川崎重工は同社が持つ技術の粋を集めてそれをなんとか克服し、製造にこぎ着けることができた。

### 大型部材向けに世界最大級の装置

前部胴体の製造プロセスは、次の6工程から成る。①プリプレグの積層②オートクレーブによる硬化③部品の位置決め用の穴をドリルで開け、所定の形状にトリム加工④非破壊検査⑤フレームおよびファスナの取り付け⑥床などの部品の取り付け——である。おのおのの工程に大型部材の一体成形

航空機製造の現場から見た「787」の開発と生産。三菱重工業、川崎重工業、富士重工業の3社がBoeing社と共同開発契約を結んで進めた。この日本勢3社の合計シェアは機体質量に対して約35%に上り、これまでのBoeing社の機種の中で最高となった。三菱重工は主翼、川崎重工は主翼の前に位置する胴体(前部胴体)など三つの部材、富士重工は胴体と主翼をつなぐ部材(中央翼)を担当した。各社が担当した部材はどれもこれまではアルミニウム合金で造られており、ここまで大型の部品をCFRP化するというのは未知の世界だった。しかもBoeing社は、これらの大型部材を分割せずに一体成形することに強くこだわった。炭素繊維の材料価格がアルミ合金よりは高いというコストアップ分を、一体成形によるプロセスコストの低減によって吸収しようと考えたのである。例えば、川崎重工が担当した前部胴体は、直径6mの円筒形の大型部材である。「767」や「777」ではアルミ合金で複数枚のパネルに分割して製造したものを、リベットで接合して円筒形に組み立てていた。これに対して787では、パネル分割せずにすべて複合材料の一

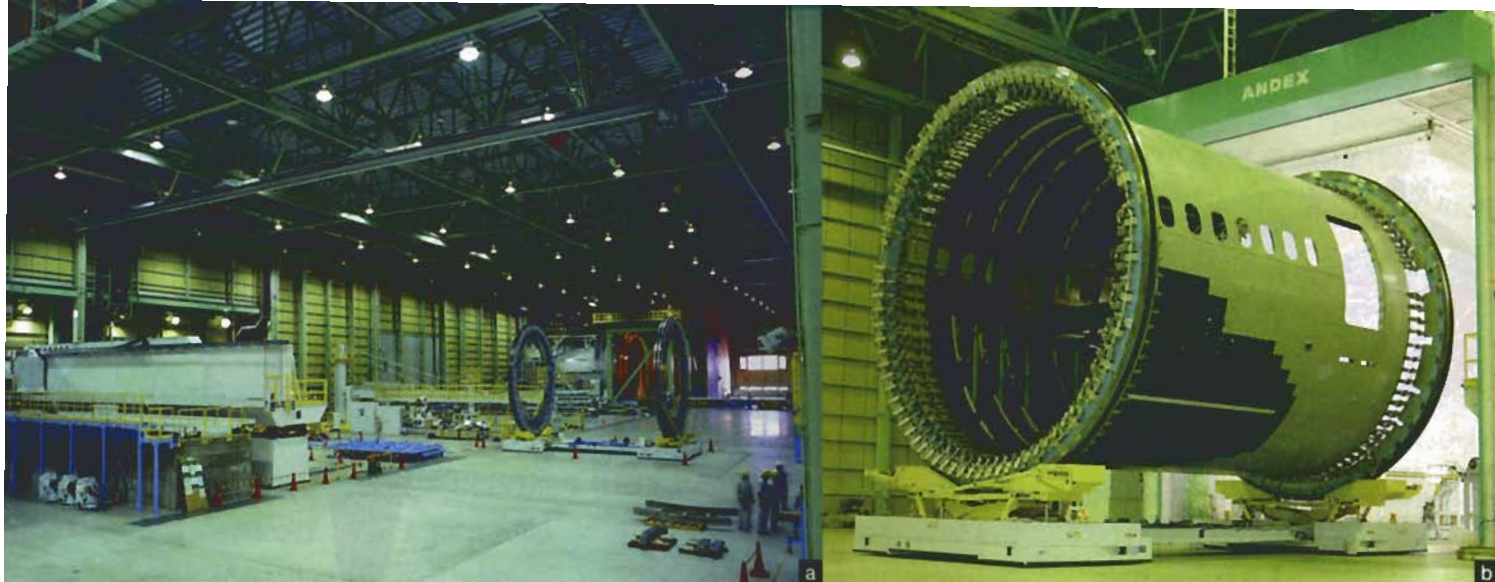


図2●川崎重工の「787工場」  
(a)は竣工式前後の工場内部の様子。延べ床面積は約2万㎡。(b)は直径6mの前部胴体。

を可能にする世界最大級の装置を導入した。

例えば、①の積層工程では、直径約6mの胴体成形型に0.5インチ(1.27cm)幅のプリプレグを32本同時に巻き付けていくプリプレグ自動積層機を導入した。合計16インチ(40.64cm)幅のプリプレグを同時に積層できる装置は世界最大級である。

さらに、積層成形した前部胴体を高温高压で焼き固める②のオートクレーブは、内径8×長さ17mで、これも世界最大級だ。100tクラスの部材を数時間で最高200℃まで加熱できる。

④で導入した超音波非破壊検査装置も、一体成形した前部胴体がすっぽり入る巨大なものだ。直径6×長さ12.5mまでの試験体の検査が可能なこの装置も世界最大級で、しかも川崎重工が世界で初めて導入した。

川崎重工は、これらの大型部材の一体成形向け最新鋭設備を導入した製造拠点「787工場」を、2006年7月に竣工させた[図2(a)]。同社の航空機製品の組立工場である、名古屋第一工場(愛知県弥富市)内にある<sup>1)</sup>。ここで造られた前部胴体は2007年1月に初出荷され、中部国際空港から米国サウス

カロライナ州のGlobal Aeronautica社に空輸[図2(b)]。そこで後部胴体と合体後、ワシントン州のBoeing社の組み立て工場に運ばれる。

### 層間剥離問題を克服

一般的にCFRPの強度面における弱点は、重ね合わせたプリプレグの各層の間のエポキシ樹脂部分が剥離(層間剥離)しやすい点である。いったん層間剥離を起こすと強度劣化を起し、最悪の場合、墜落事故につながる恐れがある。Boeing社は787の1次構造部材の開発に当たって、この点に最も気を使ったといわれている。

製造工程面で特に問題になったのは、重ね合わせたプリプレグの間に気泡が残ることだった。気泡が残るとそれが欠陥となり、層間剥離が起きやすくなる。川崎重工によると、これだけ大きな部材で気泡を残さずに造るのは至難の業だったという。同社は、技術内容は一切明らかにできないとしているが、材料やプロセスを工夫してこの問題を克服したとみられる。

また、787では、外から見える外装部材がほぼすべてCFRPになったことから、衝撃による層間剥離を抑えるという

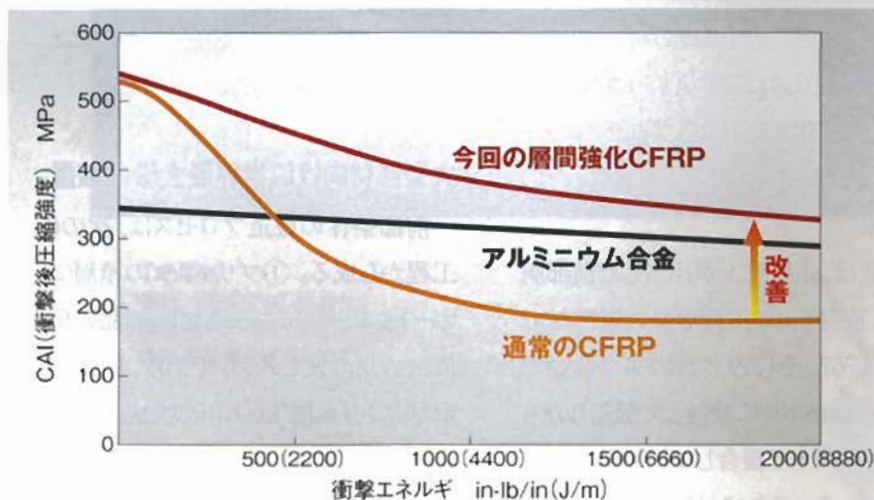


図3●「層間強化プリプレグ」で作製したCFRPは衝撃後圧縮強度(CAI)で優れる。衝撃エネルギーが大きいても、強度の低下が少ないのが特徴。提供は東レ。単位換算は本誌。

\*1 川崎重工によると、2008年2月時点でBoeing社からの受注が850機を超え、既存の787工場だけでは生産が間に合わなくなった。そこで同社は2008年1月、名古屋第一工場の南側に新工場を建設すると発表し、同年2月6日には起工式を行った。2009年1月に稼働する計画である。新工場の建物の延べ床面積は約3万8000㎡。製造能力は現在の工場と同等という。た

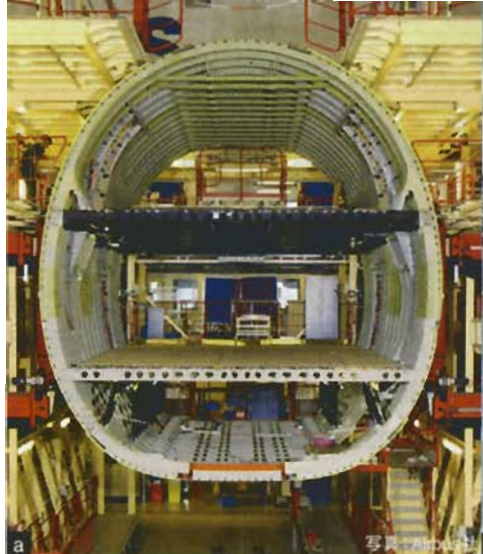


図4 ●「A380」に採用されたCFRP製フロアクロスビーム

(a)は胴体の断面写真。2階客席(アッパーデッキ)のフロアを支える構造部材である。50~60cm間隔で65本並べる。1階席用のフロアクロスビームには従来通りアルミ合金が使われる。(b)は1本のフロアクロスビームを持ち上げたところ。質量は15kg、サイズは長さ7m、断面形状が250×80mm。

技術課題も浮上した。離着陸時に滑走路の小石が跳ねて機体に当たったり、電や鳥がぶつかったりすると、衝撃によって層間のエポキシ樹脂部分に亀裂が入り、剥離を起こす恐れがあるのだ。そのため、Boeing社はプリプレグの材料にも衝撃によって層間剥離を起こさないものを求めた。

### 「層間強化プリプレグ」を採用

結果としてBoeing社が787の1次構造部材向けに採用、認定したのが、東レが開発した「層間強化プリプレグ」だった。この新プリプレグは、1995年就航の777の水平/垂直尾翼などに部分的に採用されていたが、この間の飛行実績で安全性などが評価されたことから、787の1次構造部材で本格採用されることになった。787向けプリプレグにおける東レのシェアは80%、炭素繊維で見るとほぼ100%に上るといふ。

この層間強化プリプレグの材料技術面でのポイントは、エポキシ樹脂のマトリックス中に<sup>じんせい</sup> 靱性の高い熱可塑性樹脂の粒子を均一に分散させたことである。東レは、粒子の材料はナイロン系だとしているが、詳細は明らかにしていない。靱性が高く高弾性の粒子が存在する

ことにより、その部分でエネルギーを吸収し、衝撃によって発生した亀裂の進展を食い止める効果があると考えられている。

層間剥離しにくいことの程度を示す材料物性値は「衝撃後圧縮強度(CAI: Compression After Impact)」である。衝撃を加えた後で圧縮強度を測定して求める値だ。東レが開発した層間強化プリプレグで作製したCFRPのCAI値は、従来のCFRPのほぼ2倍で、アルミ合金をしのぐ値を示している(図3)。これが、今回の大量採用に大きく寄与したという。

### 2階席を支える部材をCFRP化

以上のように、787は現状の技術水準でCFRPを極限まで採用した機種だといえるだろう。一方、Airbus社のA380は、CFRP化という意味では1世代前の機種である。胴体や主翼は、まだアルミ合金製だ。それでも、水平/垂直尾翼、圧力隔壁、セントラル・ウイング・ボックス(主翼と胴体を結ぶ構造体)など重要な1次構造部材にCFRPが多く使われている。総2階建ての超大型機だけあって、CFRPの使用量は787とほぼ同じである。

A380では、2階建てならではのCFRP部品が採用されているのも特徴だ。その一つが、2階席の床を支えるフロアクロスビームである(図4)。Airbus社はこれまで、こうしたクロスビームはアルミ合金で造っていた。これを軽量化のためにCFRP化しようとしたのである。アルミ合金をCFRP化することにより、約15%軽量化できる。同ビームは1機当たり65本使われているため、全体に及ぼす軽量化効果は大きい。

しかし問題は、A380向けフロアクロスビームは長さが7mもあり、この大きさの金型やオートクレーブを調達するには大きな投資が必要になることだった。加えて、部品一つずつに金型成形とオートクレーブによる加熱硬化をバッチ処理的に行っていたのではコストがかさむ。そこでAirbus社が採用したのが、ジャムコが開発した「ADP(Advanced Pultrusion Process)法」と呼ばれる連続成形法である。

### プリプレグを切らずに金型内を移動

ADP法では、連続したプリプレグを金型内に投入し、切らずに長いままで金型内を移動させる(引き抜く)。金型は1.5mと短く済み、オートクレーブも不

だし同社は「新工場が完成し、二つの工場で生産が始まって、これだけの受注をさばくには数年以上かかる」という。



要になった。「金型コストが下がる点やオートクレーブが要らない点を考えると、従来のオートクレーブによる成形法と比較して、半分程度にコストダウンできているのではないか」(ジャムコ航空機器製造カンパニー機器製造工場技術部長の浅利和美氏)。

ADP法は、①プリプレグの調整②金型への自動投入③金型によるホットプレス④オープンによる後硬化⑤切断——という手順で進む(図5)。

①のプリプレグの調整では、シート状で供給されたプリプレグをいったん幅10cm、長さ1m程度の短冊状にカットし、それを手作業で20層程度の連続したプリプレグにする(図5(a))<sup>\*1</sup>。

この連続プリプレグを透明なテープ状の基材に張り付けて、ラインに投入する。連続プリプレグはロールで巻き取られ、フロアクロスビームの形状になるように4方向から金型に自動供給される。ロールを立体的に配置するために、方向によっては逆さまに積層したプリプレグが剥離しないように、プリプレグの粘着性を調整したという。

③のホットプレス工程では、180℃に加熱した金型によってプリプレグを圧縮する。金型は開閉を繰り返しており、開いているときに材料を引き抜きによって移動させる。引き抜きのスピードは1時間に2.5mである(図5(b))。金型の長さを2倍にすればスピードも2倍に上がるが、金型の製造コストを勘案して1.5mに落ち着いたという。

### 垂直尾翼で実績が評価される

実は、このADP法による構造部材は既に、Airbus社の各機種垂直尾翼で使われている。生産スタートは1997年だ。ジャムコがADP法の基本プロセ

スを開発した後にAirbus社に売り込みをかけていたところ、Airbus社が従来のアルミ合金に対しては軽量化、既存のCFRPに対してはコストダウンすることに興味を持って採用に至ったのである。

その後、Airbus社はA380の開発に当たり、垂直尾翼だけでなく、これまでアルミ合金で造られていたフロアクロスビームもこの製法で造れないかとジャムコに打診してきた。垂直尾翼における5年間の採用実績で、安全面などで問題ないことが確認されたことから、重要な1次構造部材に本格採用することを考えたのである。

こうして2002年には、A380のフロアクロスビーム向けADP法の開発がスタートした。前回の垂直尾翼の構造部材ではAirbus社から図面を渡されてジャムコはその通りに製造するだけだったが、今回は設計、開発段階からジャムコに発注が来たのだ。

### A380向けに新プリプレグ

ジャムコは開発に当たり、より高い品質と軽量化を目指して、東邦テナックと共同で新しいプリプレグを開発することにした。それまでの垂直尾翼向けのプリプレグはオートクレーブ法向けの既存のプリプレグを使っていたため、ADP法向けには最適化されていなかったのである。

新プリプレグ開発のポイントは二つあった。第一に、ADP法の温度管理の条件に合わせてプリプレグの粘度を最適化した点。第二に、有孔圧縮強度<sup>\*2</sup>という物性値を高めるように材料を調整した点である。航空機向けCFRPの開発で重要な指標は、この有孔圧縮強度と前述した衝撃後圧縮強度(CAI)の

二つである。有孔圧縮強度は曲げモーメントに対する強さを、CAIは衝撃に対する強さを示している。この二つの物性値はトレードオフの関係にあるため、既存の航空機向けCFRPではCAIを重視して、有孔圧縮強度をやや犠牲にしている面があった。

しかし、このフロアクロスビームは外装部材ではないので、CAIをそれほど高める必要がなかった。そこで、有孔圧縮強度を重視した材料設計が可能になったのである。有孔圧縮強度が高まった分、従来よりも軽量化が可能になったという。

### 熱を使わない次世代プロセスも検討

航空機向けCFRPの採用拡大の機運が高まるに伴って浮上してきた問題が、オートクレーブによって加熱、硬化する工程がコストアップになるという点である。オートクレーブの設備投資額がかさむほか、成形に要するエネルギー消費量が多く、サイクルタイムが長いので生産性が上がらないといった課題を抱えたままだからだ。

ジャムコが開発したADP法は、オートクレーブを使わない連続プロセスという点で先進的ではあるが、熱で硬化するエポキシ樹脂を使っているという点では同じであり、金型で温度をかけるほか、オープンで後硬化させている。そこで、ADP法を発展させて、熱ではなく電子線で硬化するプロセスの検討が進められている。

これは基盤技術的な検討であるために、経済産業省のプロジェクトに採り上げられた。プロジェクト名は、「次世代航空機用構造部材創製・加工技術開発」の中の「複合材料の非加熱成形技術」。2003年度から5年計画で実施

\*1 短冊状のプリプレグには、炭素繊維の方向が0°(長手方向)、±45°の3種類のものを用意する。このうち0°のものは、曲げモーメントに対して強く、±45°のものはせん断力に対して強く働く。この3種を交互に積層していくことで全体の強度を上げる。また重ね合わせる際に、プリプレグ間の合わせ目を各層ごとにずらすことで連続したプリプレグとしている。

され、2008年3月には同プロジェクトは終了した。参加企業は、ジャムコのほか、川崎重工と東邦テナックスなどだ。東邦テナックスが電子線で硬化するエポキシ樹脂とそれを使ったプリプレグを開発し、ADP法を適用する。

現状の熱を使うADP法の成形サイクルは、前述したように2.5m/時間だが、電子線硬化では10m/時間と、一気に4倍にスピードアップできた。この方法で、100席級の旅客機のプロアクロスビームを想定して模擬部品を製造したところ、所定の強度を得たという。ただし、問題は通常の熱硬化エポキシ樹脂と比べ、開発した電子線硬化エポキシ樹脂の靱性が約3割低下する点である。このため、積層界面が割れやすい。今後、樹脂の改良や炭素繊維の配向を工夫して補強するなどの対処が必要になると考えられている。

## 連鎖硬化ポリマを開発

このプロジェクトでは電子線以外に、紫外線と可視光による硬化プロセスの検討も進められている。

紫外線硬化プロセスを開発しているのが三菱重工である。同社はまずCFRPの母材として、「連鎖硬化ポリマ：CCP (Chain Curing Polymer)」と呼ばれる新素材を開発した。主成分はエポキシ樹脂だが、光重合開始剤と熱重合開始剤を適切に組み合わせることによって、硬化反応時の反応熱を次の反応にうまく利用し、連鎖反応を起こさせるものだ。反応としては、まず紫外線によりカチオン<sup>\*3</sup>が発生して、それが分子を攻撃して重合する「光カチオン硬化」が起こる。その際の熱で、さらにカチオンが発生し、それによって「熱カチオン硬化」が連鎖的に起こるといった仕組み



図5 ●ADP法を適用したフロアクロスビームの製造ライン(ジャムコ)

(a)はカットした短冊状のプリプレグを手作業で積層して、切れ目のない連続プリプレグとしてラインに載せているところ。この連続プリプレグがロールに巻かれ、(b)の金型に投入される。なお、この金型への自動投入プロセスはADP法の重要なノウハウのようで、写真撮影は認められなかった。(c)はオープンで、180°Cに保って後硬化させる。(d)はオープンから出てきた成形体の末端部分。成形体は連続して出てくるので、切断して完成となる。

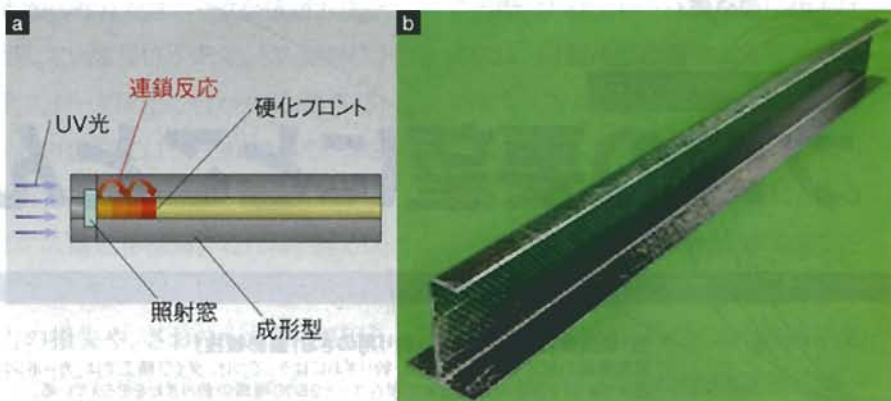


図6 ●連鎖硬化ポリマ(CCP)を使った新RTM法

(a)は模式図。繊維の一端に紫外線を照射することによって反応が連鎖的に進む。(b)は試作したJ型フレーム。

である〔図6(a)〕。

このCCPをResin Transfer Molding (RTM)法(p.55の別掲記事を参照)に適用することにより、一端に紫外線を照射するだけで反応が連鎖的に進み、長さが約1mのJ型フレームを試作できることを確認した〔図6(b)〕。オートクレーブを使った従来法の成形時間が約5時間であるのに対し、今回の方法は約10分と大幅に短縮できた(反応温度は約180°C)。単純形状のJ型フレームだけでなく、やや複雑なT型やI型などのフレーム構造材の成形も可能とみている。2015年ごろに小型民間旅客機への採

用を目指している。

可視光硬化技術については、富士重工などが開発を進めている。まず、エポキシ樹脂をベースに、可視光で硬化できる新素材を開発した。しかも、従来の航空機用CFRPと同等の強度/耐熱性を持ち、遮光下、常温で6カ月安定した特性を保つ。この新樹脂を使ったプリプレグを作製し、積層後に一括で可視光を照射することによって構造部品を試作した。可視光は人体に対する安全性が高いなどの特徴を持つため、修理プロセスなどに適用できるのではないかと期待されている。

\*3 有孔圧縮強度(OHC: Open Hole Compression) 複合材料の標準的な試験法で、リベットや配管など穴を開ける使い方を想定して、穴の開いた試験片に圧縮荷重をかけたときに持ちこたえられる最大応力。複合材料の曲げモーメントに対して耐える力を示している。

\*4 カチオン プラスの電荷を帯びたイオンのこと。カチオンが重合開始剤となって重合、硬化が進む反応を「カチオン重合」と呼ぶ。

**こ**まで見てきたように、自動車分野や航空機分野の盛り上がりで俄然、世間の耳目を集め始めた炭素繊維。しかし、1960年代の誕生直後から最近の本格拡大期を迎えるまでの揺籃期を支え、今でも炭素繊維需要の約半分を占めるのが「一般産業」分野だ。釣りざおやゴルフクラブのシャフト、テニスラケットをはじめとするスポーツ用品のほか、天然ガス車向けのCNGタンクに代表される压力容器、さらには産業機械や土木建築といった用途で地道に実績を重ねて性能や信頼性の高さを証明し、今日の発展の礎を築い

たのである。

この分野は長い歴史があるだけに、炭素繊維の使い方には一日の長がある。例えば、スポーツ用品の中でもいち早く炭素繊維に着目し実用化してきた釣りざお(図1)。炭素繊維本来の特性を余すことなく引き出すことにたけている(p.69の別掲記事参照)。

### 「革命」を起こした炭素繊維

数mから10数mという長さの釣りざおには何より、長時間持ち続けて疲れない軽さが求められる。釣りざおメーカーはこれに応えるべく、高弾性率/高

強度な材料を採用したり、肉厚を薄くしたりと軽量化技術でしごきを削ってきた。その流れの中で、当初は竹ざお一辺倒だった釣りざおに、1950年代にGFRP(ガラス繊維強化プラスチック)製の「グラスロッド」が、1970年代にはCFRP(炭素繊維強化プラスチック)製の「カーボンロッド」が加わった。

特に「カーボンロッドの登場は、グラスロッド以上の革命的な出来事だった」(ダイワ精工フィッシング生産本部技術部ロッド技術課長の戸澤久氏)。それは無論、炭素繊維の圧倒的な軽さ故。例えば、<sup>あゆ</sup>鮎ざおの場合、グラスロッドが

一般産業を変える

# プロの要望にとことん対応

図1●炭素繊維を使った鮎釣り用のざお「銀影競技」  
炭素繊維の軽さや剛性の高さが、釣りざおにはうってつけ。ダイワ精工では、カーボンロッドだけでなく、グラスロッドを含めて現在ざおと2500種類の釣りざおをそろえている。



図2●各パターンを張り合わせる工程  
積層の仕方でも釣りざおの特性を調整する。

長さ7.2mで重さ710gに対し、カーボンロッドは同じ長さ7.2mで重さ560gと、2割強軽くなったのだ。この差は、その後の技術改良でますます広がることに。現在のそれぞれの最軽量タイプでは、グラスロッドが長さ7.2mで重さ515g、カーボンロッドが長さ9mで重さ190g。長さが1.25倍に伸びたのに重さは逆に7割近く軽くなるのだから、まさに「革命」と呼ぶにふさわしい。

しかも、釣りざおの素材としての炭素繊維の魅力はそれだけではなかった。低弾性から高弾性まで選べる幅広いグレード展開が、目的とする釣りに合わせて多種多様のアイテムを取りそ



図3●パターンを鉄心に巻き付ける工程

(a)鉄心にパターンを仮留めた状態。(b)ローリングマシンで巻き付けた状態。

ろえる必要がある釣りざおという商品にはうってつけだった。実際、ダイワ精工が現在、国内向けの釣りざおに使用している炭素繊維の弾性率は50G~650GPaと広範囲にわたり、カーボンロッドだけで実に2000種類以上を商品化している。

こうしたさお造りでは専用機を利用し、釣りざおの形態に合わせて加工条

件や治具を変えていく。炭素繊維の選び方と相まって、磯ざおや溪流ざお、鮎ざおといった目的ごとの特性を引き出すことが可能になるのだ。

### 設計/製造はノウハウ満載

カーボンロッドを造る最初の工程は、炭素繊維に樹脂を染み込ませてシート状にしたプリプレグの切断。設計図に従って炭素繊維の配向を長さ方向に対し0°や±45°になるように台形や三角形の形状に切り出す。こうして切断されたものをパターンと呼び、それをロッドに合わせて積層したり張り合わせたりする(図2)。「積層の仕方は0°と90°を基本に、用途や部位によって±45°を組み合わせる。これで、さおのかたさなど

を微調整していく」(ダイワ精工フィッシング生産本部技術部主事の池田直篤氏)。

実は、ロッド本体ではないが、上述の基本から外れたユニークな積層方法を採用している部位がある。「V-JOINT」と呼ぶ、ロッド同士の合わせ部(継ぎ部)だ。この部位では0°と90°のパターンを使わずに、±45°のパターンを積層するバイアス構造を採る。これは、例えば大きな魚を一気に浮かせて寄せるときの力の損失や、さおのへたりの原因となるひずみを極力抑えるためだ。

従来は90°のパターンで補強していた。ところが解析を進めていくうちに、合わせ部には斜め方向に大きな変形が生じていることが判明し、構造を変えたのだ。「釣ざお本体の0°のパターンに、合わせ部の±45°のパターンを組み合わせることでトラス構造のようになり、軽くて丈夫な上、斜め方向の変形を効果的に抑制することが可能になった」(同社フィッシング生産本部技術部ロッド設計課長の小村恭央氏)。

加えて、この構造にすると、「合わせ部のないワンピースロッドに限りなく近い美しいしなりも出せるし、穂先の感度も高められる」(小村氏)という。

話をロッドに戻そう。各種パターン

を積層したり張り合わせたりしたら、その端部を釣りざおの型となる鉄心に仮留めし、ローリングマシンという装置で鉄心を転がしながら巻き付ける(図3)。この際、ロッドという綺麗な筒に仕上げするには、仮留めた端部と仮留めないもう一方の端部がピッタリと一致することが望ましい。仮留めた端部にもう一方の端部が届かない(筒にならない)のは論外として、逆に届きすぎて重なり合ってもロッドに求められる綺麗な筒にはならないからだ。結局、過不足なく巻き付けるためには、「切断からローリングまでの諸条件を高い精度で管理し、各工程のバラつきを極力抑える」(池田氏)必要があるという。

続いて、140~150℃の炉で1時間半ほど加熱してエポキシ樹脂を硬化させる。ここでは、加熱膨張時のよじれといった不良が発生する恐れがある。対策として、同社では炉に入れる前にパターンの上に巻く樹脂テープの巻き方などに工夫を凝らしている。

こうして成形されたロッドは鉄心から引き抜き、所定の寸法に切断される。さらに、樹脂テープをはがし表面やロッド同士の合わせ部を研磨した後、塗装、組み立て、検査工程を経て、太公望の待つ市場に出荷されていく。

\*1 欧州向けは弾性率800GPaクラスの炭素繊維を用いた釣りざおが実用化している。「ボールロッド」と呼ぶ種類だ。通常の釣りざおの太さが25mm程度に対し、ボールロッドは40~45mmと太い。このさおは、「立てたり曲げたりすることなく、16m先に浮きを付けて小さい魚を

釣るもの。競技に使われるので、とにかく軽さが求められる」(ダイワ精工)ことから、極めて弾性率の高い炭素繊維が採用された。ちなみに、ボールロッドの価格は120万~130万円。



図4 ● ミズノテクニクスが試作した小型風力発電機  
回転軸が鉛直方向を向いていることから「垂直型」と呼ばれる。全方向の風を生かせることが特徴。

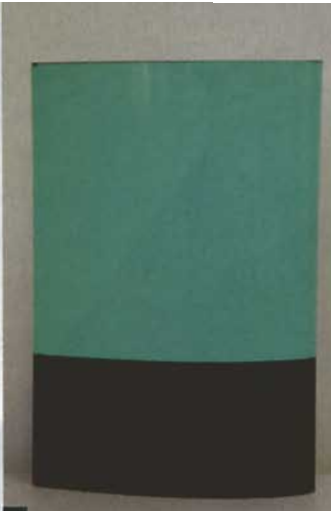


図5 ● 小型風力発電機のブレードの一部

(a)は正面から、(b)は上面から見た。CFRP製。航空機の翼を基に形状を決めた。



## スポーツで培った技術で新分野へ

ダイワ精工と同じスポーツ用品分野で炭素繊維の技術を磨き、そのノウハウを武器に新規市場への参入を計画する企業がある。ミズノだ。狙うは風力発電機。中でも、定格出力が数kW級の小型機の分野だ。

このクラスの風力発電機は、一般家庭や商業施設など小口の電力需要がある都市部で使われる。それ故、平地や高原、沖合といった開けた場所に設置する数MW級の大型機と違って、風力の安定確保が難しい。そこで小型機のブレードには、わずかな風でロータが軽快に回り出す優れた始動性が求められ、従来のアルミニウム合金などより軽い炭素繊維に期待が集まっているのである。

図4はCFRP製ブレードを採用した小型機の試作品で、設計/製造は同社の子会社であるミズノテクニクス(本社岐阜県養老町)が担当した。この発電機の特徴は、ブレードの回転軸が設置面に対して垂直であること。そして、回転軸と平行にブレードを取り付けることで風向に対する指向性をなくし、全方向からの風を発電に有効利用できるようにしてある。風向が頻繁に変わりやすい都市部ならではの気象条件に

配慮した設計だ。

ブレードの大きさは縦1600×横270mm。断面は「航空機の主翼形状を参考に、風切り音が小さくなるように設計した」(同社技術部生産技術開発課主事の平松幸夫氏)結果、涙形とした(図5)。さらに、軽量化を追求するために中空とし、内部には風速60m/秒の強風にも耐えられるように「はり」を渡した。

## 中空体で優位に立つ

ミズノテクニクスが中空体という構造を選んだのは、既存のCFRP製ブレードに対し性能、コスト両面で優位性を発揮できると考えたからだ。

既存のCFRP製ブレードは主に、ポリウレタン発泡体などの芯材にプリプレグを巻き付けて加熱硬化させる中空体。この構造の場合、①芯材を使う分、重くなる②芯材に高精度な加工が求められる③炭素繊維を型内に配置してから樹脂を注入し硬化させるResin Transfer Molding (RTM) 法を使うので、樹脂の注入設備が必要になる④仕上げに炭素繊維クロスを利用し、表面状態を良好にする必要がある——といった難点がある。①は性能低下を、②～④はコスト増加を招く要因だ。

こうした中空体と比較し、中空体は質量が約半分になる。そして何より、中空体を製造する技術「中空内圧成形」こそ、同社の最大の武器。これまでテニスラケットや軟式野球用バットなどの製造で培ってきたノウハウを生かせば、未知の市場とはいえ勝算があると考えたのだ。

その中空内圧成形ではまず、ポリアミド製のバッグにプリプレグを巻き付け、アルミ合金製の型内に入れる。続いて、バッグ内に約0.4MPaの空気を送り込み、約140℃で30～40分加熱して硬化させる。こうして中空体を成形するが、今回は内部にはりを設けなければならない。そこで、「バッグを二つ用意した。両者で挟むようにしてはりを成形するが、圧力の調整の仕方がポイントになる」(平松氏)という。

さらに、こうしたCFRPの成形においては、炭素繊維の束がバラけずに広がらないまま成形されてしまう「開織」や熱膨張の違いで発生する部分的な凹凸、いわゆるヒケなどが問題になる。開織に対し、同社は圧力をかけるタイミングを工夫した。「加熱してエポキシ樹脂の粘度が落ちてから高圧にする」(同氏)。一方、ヒケに対しては、「取り出すタイミングが大事」(同氏)と語る。

炭素繊維本来の特性を余すことなく引き出すという点では、液晶パネル向けガラス基板の搬送ロボットも同じだ。例えば安川電機が製造する搬送ロボットには、「フォーク」と呼ぶガラス基板の支持部材などに炭素繊維が使われている(図A)。この採用の経緯を追うと、炭素繊維がこの部材にいかにか適した材料であるかが分かる。

同社によると、ガラス基板の大型化に伴って搬送ロボットの性能に対する要求は厳しさを増し、フォークにはより一層の①たわみ量の低減②振動減衰能の向上——が求められてきたという。

①のたわみ量とは、フォークが自身の重さとガラス基板の重さで変形する際の先端の変位量(最大たわみ量)を指す(図B)。この大きさが、実はガラス基板の収納性に大きな影響を及ぼす。

液晶パネル工場では、ガラス基板を専用のラックに収納している(図C)。この際、上下のガラス基板同士の間隔をピッチと呼び、狭いほど当然収納性が

上がる\*。しかしフォークのたわみ量が大きいと、ガラス基板との干渉を避けるためにピッチを広げなくてはならない。

ガラス基板を支持するフォークを等分布荷重が作用する片持ちばりと考えた場合、フォークのたわみ量はフォークの長さの4乗と単位長さ当たりの荷重に比例し、弾性率と断面2次モーメントに反比例する。ここで、ガラス基板によって決まるフォークの長さや荷重は変えようがないから、たわみ量を減らすには弾性率を高めるか、断面形状を変更して断面2次モーメントを上げるしかない。このうち、後者の対策はフォークの自重が増し、ガラス基板に対する平行度が低下するので現場で使いにくい。結局、フォークのたわみ量を抑制する最良の手段は、弾性率の高い材料、すなわち炭素繊維を使うことなのだ。

さらに、搬送ロボットが動きを止めてからフォークの振動が収まるまでの時間に影響を与える、②の振動減衰能も同様だ。ここで発生する無駄な待ち時

間をできる限り短くしたいが、従来のアルミ合金製フォークではガラス基板の大型化が進むにつれ、限界が見えてきた。同社FPDロボット事業統括部液晶ロボット担当技術課長の仲子透氏は言う。「炭素繊維を使わないと、もはや搬送ロボットは成立しない」。

実際、同社をはじめ、搬送ロボットメーカー各社は、ガラス基板が外形寸法730×920mmの第4世代になったころから炭素繊維製フォークを使い始めた。主流は、一方向のプリプレグを同じ向きに積層し加熱硬化したタイプである。さらに、同1870×2200mmの第7世代向け以降ではフォークに加え、それを保持する「ブラケット」と呼ぶ部品のCFRP化が進んでいる。

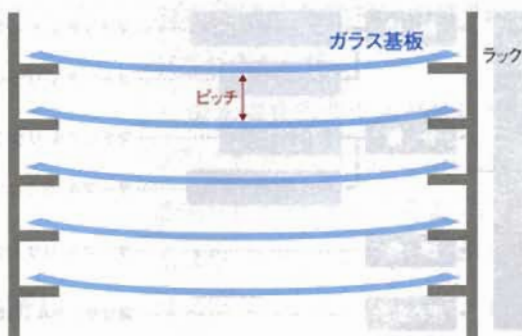
なお、同社はフォークやブラケットを設計/製造せず、外部の加工メーカーに委託する。そのため同社では、使用環境を正確に突き止めることに重きを置き、コンピュータ解析の精度を高めることに注力している。



図A●ガラス基板搬送ロボットの概観  
安川電機の製品。フォークは長いもので7m近くある。フォークの形状は中空の四角柱で、最近ではフォーク先端のたわみ量を極力少なくするためにテーパー構造にすることが多い。



図B●ガラス基板の荷重によるたわみ  
フォークを片持ちばりと考えた場合、ガラス基板による等分布荷重を受け、先端が最もたわむ。



図C●ガラス基板の収納部  
一般的なラックの模式図。ガラス基板同士の間隔(ピッチ)が短いほど、多くのガラス基板を収納できる。フォークのたわみ量をピッチより短くしなければならない。

\*A フォークの届く高さには制限があるので、ラックの全高を伸ばしても問題の解決にならない。ラックを増やして収納場所を分散させると、今度は搬送サイクルタイムに影響する。

**炭**素繊維メーカーが、繊維や炭素繊維強化プラスチック (CFRP) のリサイクル技術の開発に本腰を入れ始めた。業界団体の炭素繊維協会が、福岡県大牟田市に建設した実証リサイクルプラントの試験運用を2008年4月に開始するのだ (図1)。

これまで、CFRPの廃棄物 (使用済みの成形品や製造段階の不良品) は、ほとんど埋め立てられていた。ここに来て炭素繊維メーカーがリサイクル技術の開発に取り組むのは、リサイクル可能なことが自動車で本格採用されるための必須条件だからである。

例えば日本では「使用済自動車の再資源化等に関する法律」(通称、自動

車リサイクル法) が2002年7月に制定、2005年1月1日に完全施行されたことによって、シュレッダダスト (破碎くず) のリサイクル率を2005年度までに30% (自動車全体のリサイクル実効率で88%、いずれも質量ベース)、2010年度までに50% (同92%)、2015年度までに70% (同95%) に高めなければならない。加えて、欧州連合 (EU) 域内ではCFRPだけでなく、繊維強化プラスチック全般の埋め立てが禁止される可能性がある。リサイクルできない材料を自動車メーカーは採用しないだろう。

### 粉碎して射出成形材料に

1990年ころ、CFRPなどの繊維強化

プラスチックは「リサイクルできない材料」などといわれ、今でもそのイメージを持っている人は多い。しかし、現在は状況が違う。CFRPを粉碎して再び複合材料の原料としたり、繊維と樹脂を分離したり、さまざまな手法が技術的に確立されつつある (図2)。

いち早く実用化にこぎ着けたのは、英Milled Carbon社だ。同社の手法は、CFRP/プリプレグ/炭素繊維の廃棄物を粉碎・熱分解し、ミルド (繊維長が1mm未満) やチョップド・ストランド (同1mm以上) を得るもの。生産能力は500t/年。米Boeing社や仏Airbus社の航空機工場から出る廃棄物を主要ターゲットにしており、将来的には廃用になった航空機の確保も狙っているとみられる。

炭素繊維協会の手法も、基本的にはMilled Carbon社と同じである。ただし、同協会のパイロットプラントでは、熱分解工程の後に再び粉碎することで、主生成物をミルドに定めている。

例えばミルドを熱可塑性樹脂と組み合わせると射出成形すれば、炭素繊維の形態はやや違うものの、再び複合材料になる。従って、CFRTS (炭素繊維と熱硬化性樹脂を組み合わせた複合材料) 製の自動車部品からミルドを得て、それをCFRTP (炭素繊維と熱可塑性樹脂の組み合わせによる複合材料) とし、自動車部品原料に使うことも可能。同協会は、2010年に1000t/年の生産能力で操業することを目指している。

### 長繊維のまま取り出す

一方、粉碎・熱分解とは別の手法で、廃棄物から長めの繊維を取り出すようとしているのが、日立化成工業である。CFRTSを化学的に分解し、樹脂と完

## リサイクルも万全に 意外に広い2次用途

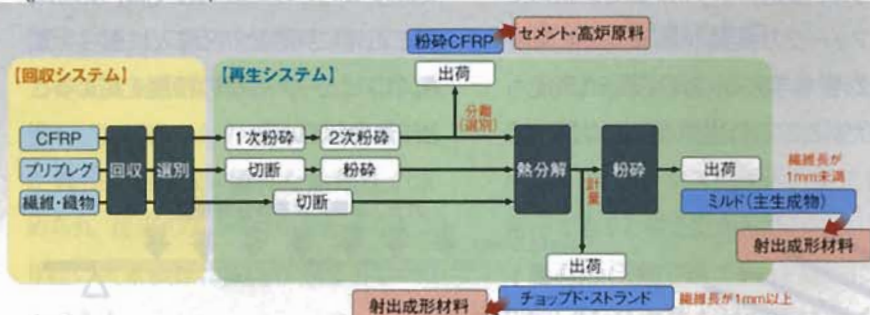


図1 炭素繊維協会によるリサイクルプラントの概要  
2008年4月に試験運用を開始。主にミルドを回収する。ミルドとチョップド・ストランドは共に短繊維だが、繊維長が1mm未満だと前者、1mm以上だと後者に分類される。同協会の資料を基に本誌が作成した。

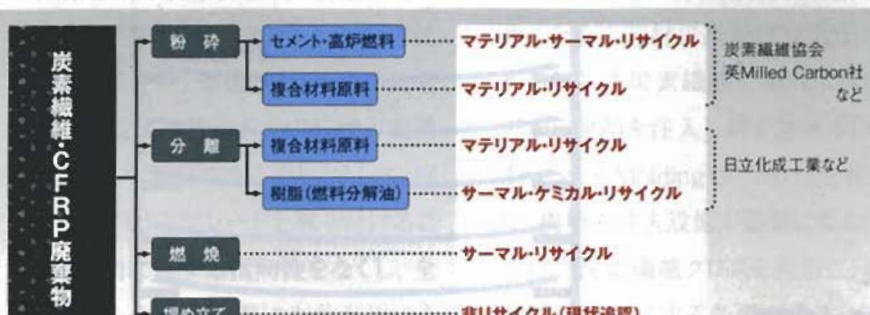


図2 CFRPリサイクルの方式一覧  
粉碎してセメント・高炉原料や短繊維の複合材料原料にする方式や、繊維と樹脂を分離する方式の技術開発が特に進んでいる。炭素繊維協会の資料を基に本誌が作成した。

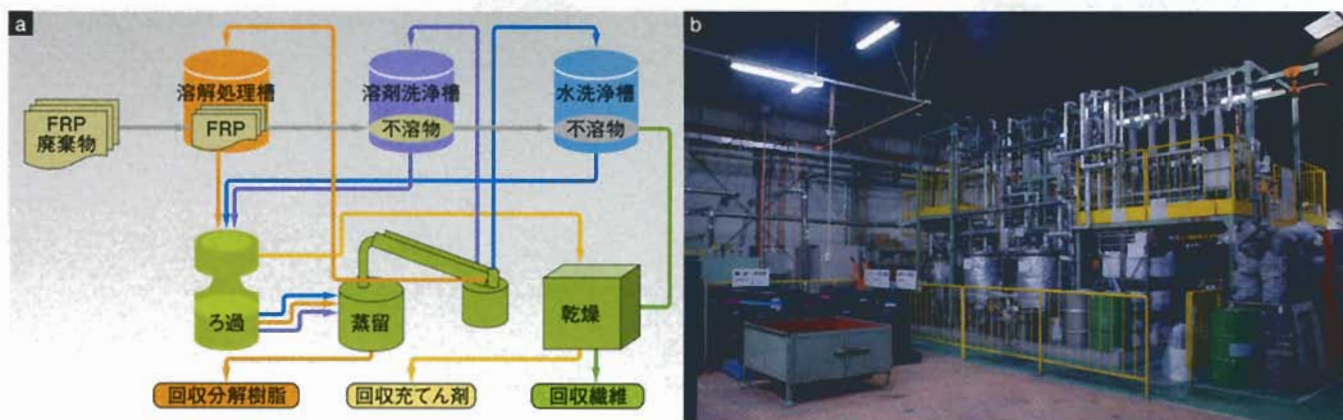


図3●日立化成工業によるリサイクルプラント

(a)が概要、(b)が試験プラントの外観。化学的に分離するので、熱分解に比べて劣化が少ないことが最大の特徴。取り出した繊維は、不織布などにした上で複合材料の基材として再利用する。(a)は、日立化成工業の資料を基に本誌が作成した。



図4●取り出した炭素繊維

分離後、乾燥させた状態。CFRPを全く粉砕しないのではなく、槽に入る程度に粉砕してから分離する。

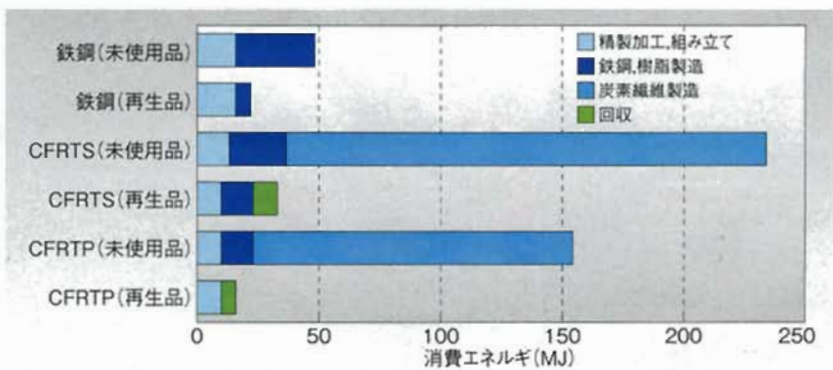


図5●リサイクル材製造における消費エネルギーの比較

CFRPの再生品は、炭化(図の炭素繊維製造工程)が不要なので、製造に必要なエネルギーが未使用品より低い。東京大学大学院工学系研究科環境海洋工学専攻教授の高橋淳氏の資料。

全に分離された、数十mm程度の炭素繊維を得る(図3、4)。熱分解プロセスを経っていないので、炭素繊維の劣化が少なく、射出成形以外の用途に使える。例えば、この再生繊維から作った不織布をCFRPの基材として再利用する。建設分野における補強材などの需要が見込めるという。

劣化が少なく、用途が広いことの利点は大きい。ミルドやチョップド・ストランドといった短繊維は、強度や剛性といった性能面で見劣りするため、再生品の用途に限られ、価値(価格)も低い。リサイクルは、どれだけ技術的に確立されていても、経済性が伴わなければサイクルが回らないという現実があるため、付加価値の高い繊維を取り出せることは、実用化を模索する上で大きなアドバンテージになり得る。

同社の手法は、炭素繊維を回収する

までのプロセスが簡潔という側面でも優れている。ただし、取り出した繊維を不織布にするまでの工程に手間がかかる点は、今後の課題になりそうだ。生産規模の拡大に伴い、この工程を自動化できれば、同技術の使い勝手は飛躍的に高まる。

同技術は、もともとガラス繊維強化プラスチック(GFRP)への適用を想定して開発されたものだったが、CFRPにもほぼそのまま適用できる。GFRPは、需要が年間数百万tと、CFRPより2ケタほど上をいく。需要と同程度の廃棄物が毎年発生しているため、リサイクルが課題だった。GFRPのリサイクルプラントは既に実用化している。

### 再生品の存在が普及を後押し

再生炭素繊維は、その製造にかかるエネルギーが未使用品のそれより非常に

低い(図5)。再生品は繊維の炭化が不要だからである。CO<sub>2</sub>排出量が少ないことの価値が高まっている現在の状況は、再生品の普及を後押しする可能性がある。

リサイクル技術が進歩し、100%の再生品や未使用品との混合品が実用に堪えると分かれば、再生品の価値(価格)が上がる。これが、炭素繊維普及のハードルを引き下げる。回収コストを上回る価格で廃棄物が売れるのなら、材料調達時点のコストの高さが帳消しにされるからだ。

炭素繊維需要が本格的に拡大するのはこれからである。しかし、普及してからリサイクルを考えるようでは遅い。もはや、リサイクルできない材料が普及する時代ではない。リサイクル技術の確立は、炭素繊維の将来に向けた重要な布石といえる。