



東レ (株)

愛媛工場 複合材料研究所

1 はじめに

「ドリームライナー」。未来を感じさせるその名前は、ボーイング社の最新鋭中型旅客機であるボーイング 787 の愛称である。2011年7月3日、このドリームライナーと呼ばれる B787 旅客機が初来日した。B787 は従来の旅客機と大きく異なり、ボディ部にはカーボン繊維強化プラスチック (CFRP: Carbon Fiber Reinforced Plastic) を採用し重量の大幅な軽減に成功したことから、世界を大きく騒がせ、世間に CFRP が知れ渡るきっかけとなった。現在ではさまざまな広告やコマーシャルなどで、当たり前のように「CFRP」という言葉が飛び交うようになっている。ところで、「CFRP」とはいったい何なのだろうか。なぜ航空材料に使われ、これほど注目されるようになったのだろうか。今回、ボーイング社と炭素繊維の独占供給契約を結び、世界でも注目されている東レ (株) (以下、東レ) を訪問させていただいた。

2 東レおよび東レ愛媛工場について

東レは、1926年に東洋レーヨン (株) と称して創立され、当初はレー

ヨン生産の役割を担った会社であった。今回訪れた愛媛工場はその製造工場として設立され、東レが国内に持つ12カ所の工場の中で最大規模であり、歴史のある工場である。現在では、炭素繊維の原料糸であるプリカーサから、中間基材であるプリプレグ、コンポジットまでを一貫して生産している唯一の工場であり、研究・技術開発・商品開発・生産の機能が備わったヘッドクォータとしてこれまで炭素繊維の発展に大きく貢献してきた。同工場内の複合材料研究所は、炭素繊維、樹脂、コンポジットの材料開発と新規用途開発をそのミッションとしており、高性能炭素繊維「トレカ」は、ここ愛媛工場で1973年に世界で初めて製品化され、シェアは世界一を誇る。愛媛工場では複合材料事業以外にも、水処理事業の膜製品である逆浸透膜エレメント「ロメンブラ」の生産も行っている。これは高分子技術革新によって開発された製品であり、敷地内にある海水淡水化テスト設備で、実用化するための試験が行われている。また、ネコインターフェロンである「インターキャット」の生産もここで行われている。この製品は、ネコやイヌなどの Companion Animal を対象とした世界で初めてのウイルス用治療薬として使用されているが、絹糸の原料となるカイコに

遺伝子組み換え技術を適用して製造している。愛媛工場だけでも高分子化学、有機合成化学からバイオテクノロジーまで、東レの技術分野と事業領域の広さを垣間見ることができた。

3 CFRP について

3.1 概要

CFRP は、炭素繊維と樹脂を混合して成形したものであり、軽い、強い、硬い、錆びないといった特徴がある (図1)。鉄と比較した場合、比重は鉄の4分の1程度だが、強度は約10倍、弾性率を比重で割った比弾性率も約7倍と優れており、航空機部材のほかにも自動車部材、スポーツ用品などさまざまなものに使用されている。炭素繊維はポリアクリルニトリル (PAN) 繊維を材料とし、それを化学反応によって耐炭化、炭化をさせ、さらに弾性率を高める必要がある場合はその後黒鉛化を行うことで、黒鉛結晶を一方方向に成長させて製造される (図2⁽¹⁾)。炭素繊維は、金属などとは異なり、異方性が強い。等方性である金属の場合、製品の形状が決まれば、製品の特性が一意に設計されるが、CFRP の場合、繊維が一方方向に引き揃えられたシートを、任意の方向に積層することで任意の力学特性を発現することができ、設

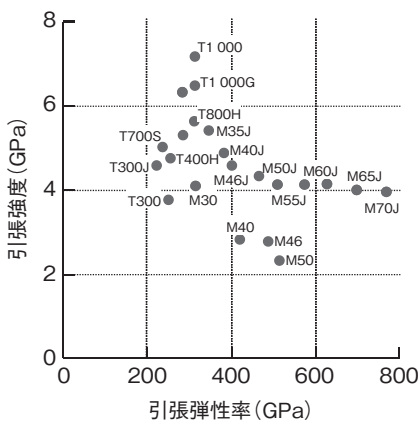


図1 PAN系炭素繊維ラインナップ

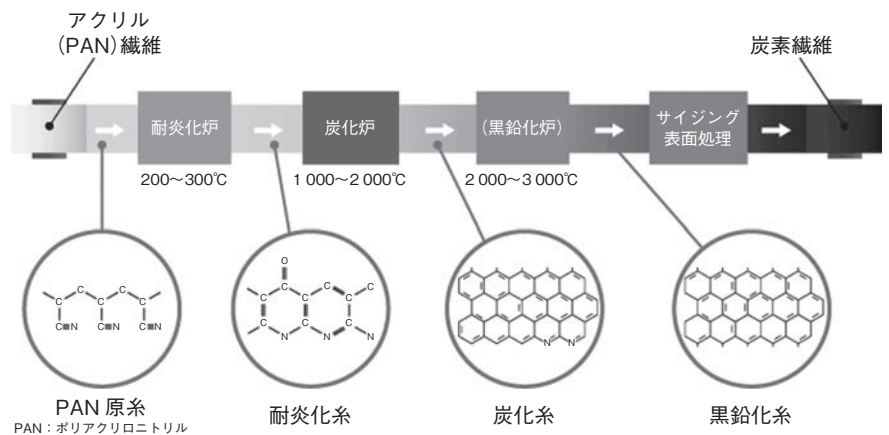


図2 炭素繊維の制作方法⁽¹⁾

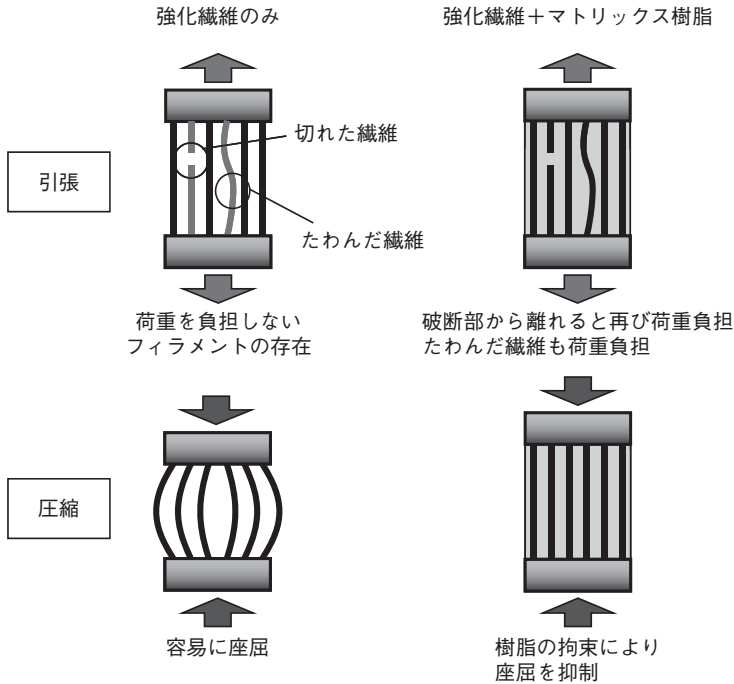


図3 繊維強化プラスチックのシナジー効果

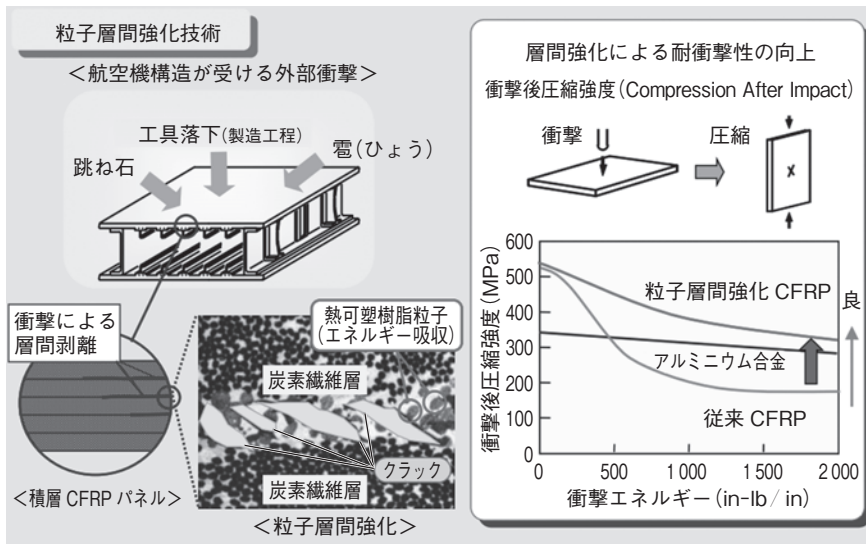


図4 層間強化技術⁽²⁾

計の自由度がさらに大きくなる。

3.2 高強度化への道

なぜCFRPは高強度なのだろうか。その答えは複合材料のコンセプト自体にあった。FRPは、剛性の高い材料と靱性の高い樹脂を組み合わせられており、炭素繊維のみでは繊維の特性上簡単に座屈してしまうが、樹脂で固めてしまうことによって、座屈を抑制することができる。曲げに対して応答できるような構造材へと化ける。一方、引張りに対しては、繊維のみでは一本一本が引張りに耐えられずに切れてしまうと、切れた繊維は荷重を持たなくなり、段々と全体の引張応力が低下してい

く。ところが、樹脂と組み合わせると、繊維が切れた部分は樹脂がせん断力で荷重伝達して、ある距離離れると正常な繊維と同等の荷重分担でき、また、たわんだ繊維も力を伝達できるという特徴を得られ高強度化する。炭素繊維の強度は最弱部の強度によって決まる(最弱リンクモデル)といった特徴があるため、内部の欠陥や表面の欠陥に敏感で、欠陥を取り除くことがさらなる高強度化へと繋がる。現段階では弾性率はほぼ理論値近くまで到達しているが、引張強度はまだ20分の1程度と、今後さらに向上の余地がある(図3)。

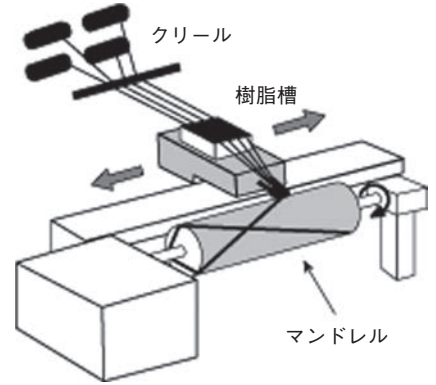


図5 フィラメントワインディング⁽³⁾

CFRPは強度が優れている反面、脆いという印象があったため、航空機部材への適用が困難であるとされる時代もあった。その印象をくつがえした技術が、層間強化技術である(図4⁽²⁾)。層間強化技術とは、繊維が配向している層間に熱可塑性粒子を配置し、衝撃加重が加わったときに変位を受け持つ役目を果たす。つまり、クラックを誘導し、粒子がエネルギー吸収をして損傷を軽減させることに成功した。これにより、従来のアルミと比較しても衝撃に強い材料を設計することができ、航空機部材に適用されるようになったのである。

3.3 加工方法

先述のとおり、製品に炭素繊維を用いる場合、その製品の要求性能を満たすように繊維配向を設計する必要がある。では実際にどのような加工方法が存在するのか。現地では、実際に製作したものとともに、主な加工方法の説明をしていただいた。

- (1) フィラメントワインディング法(図5⁽³⁾)

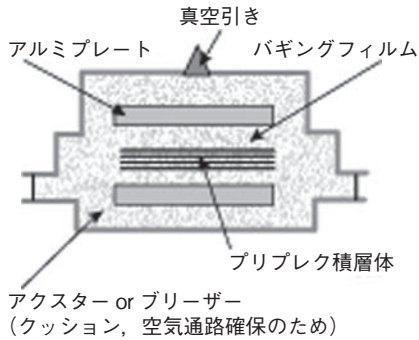
ダイバーが使用する呼吸器となるタンクに用いられており、樹脂を浸漬しながら糸を巻きつけるという手法。ほかにも、圧力容器や輪転機のロールなどにも用いられている。

- (2) オートクレーブ法(図6⁽⁴⁾)

炭素繊維をシート状にし、そこに樹脂を含浸させたもの(プリプレグ)を用いた方法であり、航空機やスポーツ材料に使われている。繊維量と樹脂量が精度よくコントロールできるため、高性能な製品設計が可能となる。

- (3) 射出成形法

より複雑な形状を出したい場合に用いられる方法。熱可塑性樹脂に短く切断した炭素繊維を混入させたペレット

図6 オートクレーブ⁽⁴⁾

を射出することによって成形するため、形状は自由にできるが力学特性としては連続繊維を用いたものよりも落ちてしまう。より形状自由度に重きを置くOA機器のケーシングなどに使用されている(図7⁽⁵⁾)。

ほかに、釣竿やゴルフシャフト、テニスラケットなどさまざまなものを見せていただいた。たとえば、釣竿を製作しようとしても、ただたわまないように一方向に繊維を入れているというわけではなく、屈服座屈やオイル座屈を起こさないように繊維配向をアレンジしている。

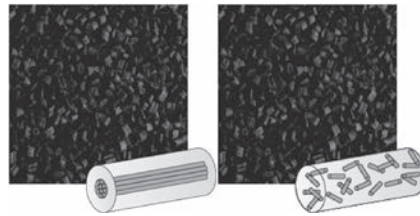
3.4 課題と取り組み

このようにCFRPは炭素繊維と樹脂から成り立つため、今後さらに強度を求めるには、それぞれの材料の性能を上げる必要がある。炭素繊維では、繊維1本当たりの強度や繊維の界面の向上、そして樹脂では、接着性の向上や熱特性、耐久性の問題などが挙げられる。それでは実際に愛媛工場ではCFRPの強度や信頼性を上げるためにどのような研究が行われているのか。複合材料研究所研究員の武田さんの案内で、実際に研究所を見学させていただいた。

4 工場見学(炭素繊維)

4.1 試験片の作成

新しく開発されたCFRPの強度評価に用いられる試験片の製作現場を見学させていただいた。試験片の強度は一方向強化プリプレグ材の積層構成に依存するため、さまざまな積層板を作成し試験する必要がある。現場ではちょうど、作業員の方々が薄いシート状の一方向強化プリプレグ材をカッティング作業しているところだった。試験片一つ作るのもひと苦労である。

図7 射出成形法(ペレット)⁽⁵⁾

4.2 環境試験

次に、作成した試験片の研磨、超音波探傷、環境槽を用いて熱や湿気などのサイクル試験が行われていた。とくに、航空機は上空から熱帯地方の駐機場まで幅広い温度湿度が加わることからワーストケースを想定した環境暴露試験を行い、物質がどのようにして劣化するのかを評価するために行う。

4.3 強度評価

炭素繊維と樹脂の界面において、どのように力が作用するかが強度に大きく影響する。その評価を定量的に行うために武田さんご自身がつくられた界面評価装置を見せていただいた。これは、樹脂の中に直径5 μ m程度の炭素繊維を1本埋め込み、マイクロコープで埋込み長さや引抜き荷重を測定するといった装置であった。界面強度を数値解析から推測する場合、パラメータの選択に恣意性が出てしまうため、仮定の少ない実験による直接同定にこだわりたいとお話であった。樹脂の完全降伏に近い状態を再現し、埋込み部に一定のせん断応力が生じるKelly-Tysonの仮定に近づけるために埋込み深さを極限まで浅くしているそうだ。「個体差はないのでしょうか」といった学生からの質問に対しては、「界面状態自体にもばらつきがあると考えられ、多数データの統計的な検証が必要と考えている」と回答をいただいた。

5 工場見学(樹脂)

5.1 樹脂の合成

プリプレグとは、炭素繊維に熱硬化性樹脂を含浸させたシート状のものだが、樹脂は主にエポキシ樹脂を用いている。エポキシ樹脂は接着剤として用いられることが多いが、炭素繊維に力学的に応力を伝えていくためには、接着をよくすることが大命題だそうだ。樹脂関連で最初に見学させていただいた場所が、この樹脂の開発をする研究

室だった。ここでは、エポキシ樹脂と硬化剤などが管理されており、試薬を混ぜて化学構造などを推測しながら新しい材料を研究している。ナノ材料を樹脂に分散させたり、ただ手動で混ぜるだけではなく振動を加えながらオイルバスの中で混ぜるなどして、物性を評価していた。実際にオープンもあり、そこで硬化させながらいろいろな樹脂を検討したり、白衣を着た方々が手で樹脂を練っている姿がみられた。少しずつ樹脂の割合などを変化させながら研究するため、機械などは用いずに混合させているようだ。

5.2 化学分析

次に、化学分析を行う場所を見学させていただいた。開発では、試作や試験をひたすら行っていただくだけではなく、各工程でどういう現象が起きるのかということを必ず想定し、メカニズムを検証しながら開発のアプローチを行う必要があるという。ここは、化学の点からそのような工程分析を行っている場所である。樹脂は粘弾性体であるため、熱力学特性などが非常に重要となる。そのため、示差走査熱量測定(DSC)といって、ガラス転位点や材料としてゴム状態からガラス状態に変異点となる位置などで熱量の変化を探索する機械やレーザ顕微鏡、蛍光顕微鏡などがある。ほかに、さまざまな環境下や周波数でねじり、引張り、曲げを加えたりする動的粘弾性試験(DMA)と呼ばれる装置がある。粘弾性もまた、ガラス転位点や溶融点で大きく変化するため、調査を行っている。

6 インタビュー

最後に、今回説明していただいた研究員の武田さんと複合材料研究所の所長の遠藤さんに学生からの質問にお答えいただいた。

(複合材料の力学特性について)

Q 炭素繊維を製造する際の繊維の加熱温度によって、強度や弾性率は大きく異なるのでしょうか。

加熱温度によって弾性率が変わってきます。人工衛星など熱膨張係数が小さい用途のときは、高弾性率のものが使われるので、加熱温度は高くなります。これに対して、航空機など強度が必要なものに関しては、加熱温度はそこまで高くないが強度を上げる工夫を行っ



図8 集合写真(右から)3番目の遠藤所長,4番目の武田研究員とメカライフ学生委員)

ています。

Q では、もし欠陥をなくすなど極限まで行えたとすると、強度は理論値まで上げられるのでしょうか。

難しい質問ですね。理論強度として提示している値は、単分子であるグラファイトでの値ですので、これをグラファイトの集合体である炭素繊維で実現できるかはまた別の話になります。理想形とは何か、理想形となった場合に強度はいくらになるのかは、現在も研究課題で、モレキュラダイナミクスなども用いてアプローチしています。(複合材の製造について)

Q 繊維と樹脂との接合性をよくするために、どのような表面処理を行っているのでしょうか。

表面を電解酸化させて、水酸基やカルボキシル基を表面に付けます。さらに、炭素繊維をまとめるためのサイジング剤にも接着力向上のための仕掛けがあります。

Q 「トレカ」クロスはどのような織り方なのか。愛媛県の地場産業である今治タオルの織り方は参考にされたりするのでしょうか。

平織、綾織、朱子織などが知られています。また、タオルは編物で、輪を繋ぐ手法なので、伸びやすい反面、繊維が真直でないため強度が低くなるので、CFRP用途にはあまり用いられません。

Q 炭素繊維は製造コストが問題になると聞きますが、高い要因はどこにあるのでしょうか。

コスト高といっても、炭素繊維を何と比べるかによります。たとえば、補強材料として炭素繊維よりも使用量の多いガラス繊維と比べますと、 SiO_2 を溶出させて巻き取ったものを製品にするといった非常に単純なプロセスで

できているのです。一方炭素繊維は、まずポリマをつくり、アクリル繊維にして、焼いて炭化させるといった工程なのでプロセスが長く、ガラス繊維よりも設備・人・エネルギーが増えます。

Q では、自動車の同じ部材の製造において、マグネシウム合金と比べるといかがでしょうか。

金属は等方性なので、形状が決まると設計が一つに決まりますが、複合材料は繊維配向をアレンジしたり、さまざまな成形方法、たとえば初期投資の少ない手法を選択することができるので、製品の求める特性や数量で、必ずしも金属対比で高額になるわけではありません。性能はスーパーカーと汎用車では異なります。なので、CFRPを使ったほうがコストパフォーマンスが上がるという考えの人がいれば成り立つ領域があるので、それに応えています。

(環境問題・リサイクル問題について)

Q 炭素繊維を製造する際は二酸化炭素を多く排出しますが、ライフサイクルアセスメントという考え方では二酸化炭素排出量を削減できると聞きました。どのくらい削減できるのでしょうか。

産業全体で見てもとくに運輸部門における二酸化炭素排出量が多く、軽量化により二酸化炭素排出量を大きく削減できるため、CFRPの適用メリットが大きいと考えています。自動車の場合、日本だけでも8000万台走行しているので、CFRP適用が広がれば大きなインパクトがあります。航空機に関しては、排出量のほとんどが飛行によるもので組立による排出は少ないので、燃費が圧倒的に大きく、削減比率は大きくなります。

Q リサイクル技術を確立するうえ

で、今後の課題があれば教えてください。

炭素繊維リサイクル技術開発組合を設立して取り組んでいます。ビジネスとして流れることが大事になり、ビジネスモデルを構築しながら、用途開発し、量産技術を確立していかなければなりません。また、回収したCFRPはピッチ系であったりPAN系であったり、または一緒に使っているお客様もいるので、混ぜて処理せざるを得ない状況です。ペットボトルもそうですが、リサイクル品の事業性の検討は今後の課題です。

7 おわりに

今回の訪問は2013年9月9日に行われた。愛媛工場では東レの将来の中心事業と目されている炭素繊維と膜製品の生産を行っており、とくに炭素繊維に関しては原料糸からコンポジットまで一貫して生産する唯一の工場である。事業本部制を設けずに研究と生産の組織に属しながら、ニーズもシーズも共有し、推進している。そんな組織体制が、複合材料のバイオニアである東レの技術を創出し続け、さらにコア技術である高分子化学・有機合成化学・バイオテクノロジーを駆使させた先端材料の開発へと繋がっていることが窺えた。

最後になったが、複合材料研究所の所長の遠藤さんをはじめ、ご説明をいただいた研究員の武田さん、訪問した研究室の方々など、ご協力していただいた皆様に深くお礼を申し上げます(図8)。

(メカライフ学生編修委員 富山好子、中野なつみ、佐藤速夫、酒井康徳、小野恭代)

文献

- (1) http://www.torayca.com/aboutus/abo_001.html
- (2) http://www.toray.co.jp/ir/pdf/lib/lib_al35.pdf
- (3) http://www.torayca.com/technical/tec_001.html
- (4) http://www.torayca.com/technical/tec_001.html
- (5) http://www.torayca.com/lineup/product/pro_005.html