

Illustration feature CFRP Basics

Epilogue

不景気、円高ドル安、そして震災——日本企業の多くは「新しいこと」への挑戦に対して臆病になった。まるで技術立国としてのプライドを失ったかのようだが、日本が世界に提案できる「ネタ」は、けして少なくない。炭素繊維もそのうちのひとつであり、これをどう戦略的に活用するかに期待がかかる。特集の末尾に当たり、東京大学・高橋教授に炭素繊維の近未来を尋ねた。

TEXT&PHOTO:牧野茂雄(Shigeo MAKINO)



東京大学

高橋 淳 教授

東京大学教授 東京大学大学院工学系研究科 システム創成学専攻
Professor Doctor of Engineering University of TOKYO, School of Engineering
Department of System Innovation

近い将来にカーボンは鉄と「闘える」素材になる

筆者が高橋教授に初めてお会いしたのは、2011年1月だった。08年度に始まったプロジェクトで高橋教授は、熱可塑性カーボン素材の自動車への利用について研究と検証を行なっていた。CF素材と言えば、オートクレープなどによる成形が必要な熱硬化タイプだけだと思われているが、それは間違いである。CFはあくまで「骨格」であり、加工素材としての性質はCFの周囲を取り囲むバインダーとしての樹脂に依存する。樹脂には加熱すると硬くなる熱硬化樹脂と、逆に加熱すると流動化する熱可塑樹脂があり、両方ともCFと組み合わせができる。筆者はむしろ、熱可塑性樹脂とCFの組み合わせに注目していた。

要は「面積」である。少しでも軽くなった自動車を大量に生産すれば世の中へのインパクトは大きい。ごく少量の高価な燃費チャンピオンカー、超低CO₂排出車を100台生産したところで、社会へのインパクトにはなり得ない。そういうクルマの存在を否定するつもりは毛頭ないが、車両重量60%減という超軽量車を年産100台つくるより10%軽くなったクルマを20万台、50万台と量産することのほうがインパクトは大きい。生産台数がもたらすCO₂削減面積である。

そんな思いがあったから、高橋教授の提案する熱可塑性CF素材を普及させるプロジェクトには興味があった。以下の文章は、筆者が高橋教授に対して行なったインタビューに筆者の持論を混ぜながら構成したものである。筆者の解釈による高橋理論である。

車両重量1400kg級のクルマにつかわれている約1000kgの鋼材のうち約600kgは約200kgの熱可塑性CFRP (Carbon-Fiber Reinforced Plastic)に置き換えられ30%程度の軽量化になる。ボディを一体成形でCFRP製にするのではなく、小さな部品を正確に、確実にCFRPに置き換え、接合する。熱可塑性CFRPなら鋼板と同じように成形・接合できる——高橋教授はこう提唱している。そして、鋼材を熱可塑性CFRPに置き換えるにはどのような技術が必要かを検証している。

一般にはほとんど知られていないが、いまやCFのバリエーションはものすごい。CFRPになる前段階の、「繊維」としてのバリエーションである。引っ張り強度や繊維の太さだけでなく、長さにもバリエーションが出てきた。「長くて極細の黒い糸」だけがCFではない。CFを1ミリ程度の長さにカットしてもつかえるし、10ミリでもいい。長さを変えることで特性が変わる。

	単位	自家用車	トラック	風車フレード	旅客機
保有量	万台	7,000@2010 10,000@2030 13,000@2050	2,6000@2010 3,8000@2030 5,0000@2050	12@2010 100@2030 150@2050	1.5@2010 3.0@2030 4.5@2050
年間生産量	万台	5300@2010 7500@2030 1,0000@2050	2000@2010 3000@2030 4000@2050	2.5@2010 5.0@2030 6.0@2050	0.06@2010 0.12@2030 0.18@2050
1台あたりの炭素繊維需要量	トン	0.1	0.4	4	25
炭素繊維の年間需要量	万トン	530@2010 750@2030 1000@2050	800@2010 1200@2030 1600@2050	10@2010 20@2030 24@2050	1.5@2010 3.0@2030 4.5@2050
工場ごとの生産量	1年 1日 1時間	20,000 800 50	5,000 200 13	5000 20 1.25	300 1.2 0.075
理想的な量産プラント数		265@2010 375@2030 500@2050	400@2010 600@2030 800@2050	5@2010 10@2030 12@2050	2@2010 4@2030 6@2050
プラントごとの炭素繊維需要量	万トン	2	2	2	0.75

「無論、強度や耐衝撃性など炭素繊維が持つポテンシャルを最大限に活かすのであれば、長い繊維をつかい熱硬化樹脂と組み合わせる方法がベスト。しかし、それでは大量生産には向かない。成形時間が長いためコストも高くなる。それでは大量普及しません。危急の課題が量産車の軽量化なのですから、時間と金をかけてつくる超軽量車とは発想が全く違います。現在の鋼材ベースの量産車製造手法にCFを取り入れる手段を考えるべきです。そのため目標はまず30%の軽量化です。これを、自動車の生産スピードを現在と変えずに実現する。年産20万台をコンスタントにつくる。つまり毎日800台、1時間当たり50台です。1台を約1分のサイクルタイムで生産する。そのためには、どのようにCFを使えば良いか。これが考え方のベースです」

高橋教授はこう言う。シンプルで明快な考え方だ。筆者が考える「面積」と同じである。安価な大量生産を前提に素材と工法を考えましょうと提唱している。今まで日本の製造業がさんざんやってきたことだ。

長い連続繊維のCFを型に入れ、オートクレーブで加圧・加熱成形していたのでは、大量生産には向かない。この方法は、CFの特性を最大限に活かすべき製品、つまり「CFでなければ不可能な製品」に使用すればいい。航空宇宙だけでなく医療や福祉関連、超高性能ロードカーやレーシングカー、スポーツ用具など、長繊維CFが必要とされている分野はどんどん広がっている。連続繊維CFで成形した部品をつかうことでの「世界が変わった」という例は多い。

しかし、その一方では短くカットしたCFでも「製品になる」という道が拓けた。長さ数ミリ程度の短いCFの単繊維をランダムにバラけさせ樹脂で固めてシート状にしたものや、CFを帶状に集めて長さ数センチほどにカットし、同様にランダム配置したシートなど、かつては存在しなかった素材がどんどん登場している。

木材に例えれば、連続繊維CFは柾目の檜や松の大木から切り出した木材である。長手方向にはものすごく強靭であり、長さを活かしてつかう。仕上がりも美しい。いっぽう短繊維CFは、短い端材を接合した集積材や細かいクズになった端材を圧縮したMDFに似ている。樹木としての繊維が短く切られているから、ある一方向からの力に対してだけものすごく強いという「方向性」(UD=Uni Directional)がない代わり、どの方向からの力も受け止めるという「等方性」を持っている。鋼材やアルミ合金などに似た特性だ。

用途ごとに炭素繊維需給ボタンシャルを見るとこのようになる。2030年で推計すると、たとえば乗用車1台当たりの使用量を100kgとして、全世界では750万トンになる。理想的な量産プラントはまだまだ足りないことになる。

「そこがポイントのひとつです。等方性です。自動車部品の多くはプレス成形でつくりますね。金型に素材を入れて、そこに圧力をかけて成形します。この方法をそのままCFに利用できたら成形時間は劇的に短くなります。鋼材をロールで購入して、それを切ってプレス成形し、スポット溶接で接合するから、クルマは1分1台のサイクルタイムを実現できた。ならば、CFの等方性材料のロールから素材を切り出し、プレス成形できるようにすればいい。そのためには、熱を加えたら柔らかくなる熱可塑性CFが便利です。繊維があらかじめ切れているので複雑な形にも成形できます」

たしかにそのとおりだ。等方性材料で熱可塑性なら、型に入れる前に素材をヒーターで温めておけばいい。いま、当たり前に金属部品の熱処理につかっている連続炉で充分だろう。ロールから裁断した素材を加熱し、それをプレス成形し、バリを落とせばいい。このような工程ならほぼ完全に自動化できる。

「200°C程度に温めた熱可塑性素材を100°Cの金型に入れて成形するので、ホットプレスではなくコールドプレスと呼ぶほうが正しいでしょう。鋼材より有利な点は、何回かに分けて徐々に形を整える連続プレスが不要という点です。ほとんど1発で成形できます。プレス成形用の等方性CF素材そのものは、いま素材メーカーで開発が進んでいます」

しかし、繊維を細切れにした等方性材料を鋼板に置き換えられるだろうか。連続繊維CFRPが強度や耐衝撃性に優れるのは、繊維が長いからではないか?

「等方性CF材だけをつかうではありません。連続繊維の素材や、織物になった素材もつかいます。たとえば、耐衝突の強度が必要な部位をつくるのであれば、方向性素材を縦／横で交叉させ、その間に織物素材をはさんだりして強度

を確保することができます」

そうか。熱可塑性か熱硬化性かは樹脂の性質であり、使用するCFは共通だ。訊けば、CF含有率30%程度の等方性材料が成形しやすく強度も充分だと言う。CFが30%ということは、残り70%は熱可塑性樹脂だ。樹脂はバインダーの役割だけでなく、樹脂そのものの強度と質量を利用してもらうことになる。

「熱可塑性CFRPの破壊特性は鋼材に似ています。どこまでも伸びていいという条件では鋼材にかないませんが、たとえば200ミリ以内のクラッシュ・ストロークで変形を止めのであれば、鋼材と同等の耐衝撃性を確保できます。前面6:4のオフセット衝突もシミュレーションでやってみましたが、予想どおりです」

いずれCFRPで実車のボディをつくって衝突実験をやってみてほしい。その製作段階で、自動車のどの部分をCFRPに置き換えるかの検証もできる。

「連続繊維をシートにするとCF含有率が高くなり、強度を得られます。当然、CFを多くつかうため素材の値段も高くなります。だから、適材適所で連続繊維素材と不連続繊維素材をつかわなければいいのです。イメージとしては、0.8ミリ厚の鋼板を2ミリ厚の不連続繊維シートで代替できると思います。現状では、プレス成形用のCF素材は強度／剛性／耐衝撃性／耐久性といったパフォーマンスが連続繊維素材に比べて劣るのですが、高性能な熱可塑性中間基材の開発はどんどん進んでいます」

中間基材とはCFと樹脂を合体させたものであり、加工されてCFRPになる前の状態を指す。熱可塑性CFRPでは「一方向性」「ランダム」「等方性」の3タイプの中間基材が用意される。樹脂そのものの性能向上と、樹脂とCFの界面を自在にコントロールする技術も含めて、かなり期待できると素材メーカーでは聞いた。



世の中には、我われ研究者がまだ知らない 成形技術がたくさんあるはずだ 炭素繊維樹脂の成形方法が変われば新しい世界が拓ける そして、その先にはまったく新しい コンポジットデザインのためのヒントがあるように思う

「熱可塑性CFRPにつかうPP（ポリプロピレン）も、CFからはがれてしまうとCFがバラけてしまします。そうならないようCF表面と樹脂の両方を改質し、接着性は高まりました。また、樹脂の分子が大きいと含浸が難しいのですが、ここも解決の方向が見付かっています。目標である自動車の30%軽量化には自信があります」

問題は、自動車メーカーがこの案に乗るかどうかだが、ロール状で自動車工場やプレスメーカーへ供給され、プレス成形できるのであれば、自動車業界にとってはとても都合がいい。熱可塑性樹脂だから、熱硬化性樹脂のプリプレグのような賞味期限もない。

「デラミネーション（層間剥離）しないという点もメリットです。樹脂が粘っこいのです。この点は接合上のメリットにもなります。熱硬化CFRPは非常に硬いので、たとえばボルト穴の位置が正確でないと、その部分のアライメントのズレでバキンと壊れてしまうことがあります、熱可塑CFRPは少々余裕があります。デラミネーションが起きないという前提で、設計の工夫も生まれます。CFRPと鋼板を接合するのなら、電位差腐食対策を施したボルトで大丈夫です」

接合は重要だ。簡単にプレスして簡単に接合できなければ量産車にCFRPなどつかえない。日本の自動車工場では接合部分の95%以上が抵抗スポット溶接であり、欧州のように構造接着剤を多用したりレーザーで線溶接するといった手法はあまり取り入れていない。CFRPはスポット溶接できるのだろうか。

「超音波スポット溶接をつかえます。抵抗スポットのように電流を流すのではなく、ピエゾ素子をつかって20kHzの超音波を発生させて溶着させます。小型の機材なのでスポットガン用のロボットにも装着できるでしょう。熱硬化性CFRP同士の接合は接着剤の強度に依存しますが、熱可塑性の場合は互いに溶着させることができます。しかも、溶けてくついた部分がもつとも丈夫になります。接合については、むしろ

中小業者さんのほうがいろいろなノウハウを持っていらっしゃいますから、我われが案ずるよりも技術革新のほうが早いかも知れません」

高橋教授へのインタビューは、インタビューと言うよりはディスカッションになってしまった。自動車は実用性が重要であり、走らせたときの剛性感やドライブフィールも重要。こういう部分に話が入っても、高橋教授はご自身の知見・経験から「こうではないか」という仮説を導き出す。過去に筆者は「走りなどどうでもよい」という研究者の方と何度もお話をさせて戴いたが、高橋教授は「実用サイド」の方という印象だった。

また、今回の特集に当たって取材させて戴いた素材メーカーのエンジニア諸氏も「剛性感はじつに微妙ですね」とか「つくってみないとわからないことが多い……」といった発言があり、それぞれの立場で自動車への理解を深めようと努力されている様子が感じられた。

さて、最後にお値段の話。CFRPの価格競争力はどうなるだろうか。調べてみれば、だいたい4000円/kgというのがCFの市販価格だ。それに加えて低い歩留まり、高い加工コストで、現在のCFRPは1kg当たり1万円というところか。600kgの鋼材を3分の1の重さのCFRPで置き換えるとしても、部材製造コストが10倍以上になる。どうやってこれを10分の1以下にするのか。

「まず部材コストの半分を占める加工コストは量産により激減します。材料コストについても、曲げ中心に使われる所以CFは航空機用途の半分程度しか使っていませんし、樹脂は安く、端材も再利用できて歩留まりが高いので、トータルで部材コストは現在のCFRPの2割弱と見積もっています。残るはCFの製造コストですが、今年、日本で超低コストCF開発の国家プロジェクトも始まりましたので、これとあわせると将来は必ず鋼材と闘える値段になると思います」

ひとつ心配なのは、「アカデミックであるか」とか「シミュレーションできるか」とか、新しい技術の採用について可否を決定する立場にあ

る評価者が、古い価値観を振りかざすという傾向だ。いまや軍用機の世界でも経験則からの設計改良が取り入れられている。「旅客機でも同じだ」とも聞いた。シミュレーションなどできなくとも、理論として体系化されていなくても、「実効性があればいい」という考え方だ。戦闘現場でのリペアも然り。25ミリ機銃弾に一部をえぐられた戦闘機の主翼の主桁を「こう修理すればいい」という非公式マニュアルが半ば公式化したりしている。コンポジット材が自動車に入ってくると同時に、自動車の側も変わらなければならない。素材と自動車設計が互いに響き合わなければ、軽量化のための材料置換は進まない。

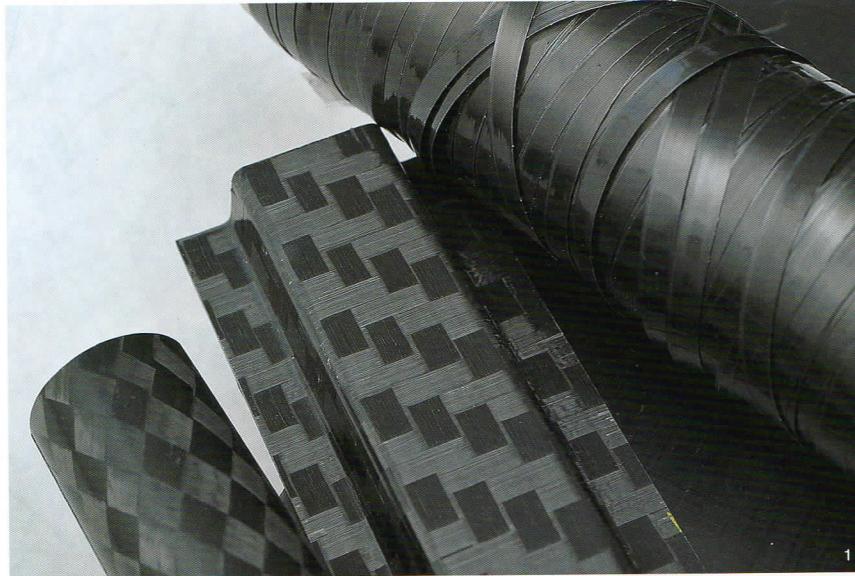
「日本はコストばかり気にしています。何か行動を起こさなければ進歩は生まれません」

そう。このままでは、日本の自動車業界のそこかしこに何となく漂う閉塞感は払拭されない。まごまごしているうちに、中国やインドが安価な自動車を輸出するようになるだろう。高橋教授はこう警鐘を鳴らす。

「中国がCFの大量生産に乗り出しました。安からう悪からうのレベルかもしれません、それで十分という用途は確実にあります」

日本は何をすべきか。たとえ安い電力と安い労働コストから生まれてくる新興国製CFが市場を席巻しても、量産車へのCFRP展開ノウハウは他の追随を許さないレベルであってほしい。

このあと、高橋教授と筆者は接合方法や構造部材の形状設計の話題になった。学生の皆さんのが、超音波溶着で平板に補強リブをくっつけてしまったこと。摩擦攪拌溶接がつかえること。ピラー内部を三角形と直線のリブで補強すればCFRPができるかもしれないということ。樹脂が耐えられる熱履歴のこと。深絞り成形の限界。そして、この特集の取材が終了したとき、いずれ『統・カーボンの実力』をやらねばと思った。新しい知識を仕入れれば仕入れるほど、量産車への利用という可能性が膨らむ。カーボンはけして未来素材ではない。現在の素材なのである。



(1)試作段階の熱可塑性CFRP。一方向シートから織物、内圧成形用の円筒状織物までさまざまなタイプがある。一部は実用化され、実際に製品になっている。(2)中国もCF生産に乗り出した。現状では日本が世界シェアの7割を握るが、いずれ中国の生産能力は劇的にアップするだろう。大学などでも素材研究は活発だ。写真の湖南大学はモーターショーに試作車を展示した。(3)航空宇宙分野でのCF利用は欧米が圧倒的に強い。素材そのものではなく利用方法でノウハウを持っている。(4)(5)意匠製が問われる部分は熱硬化型CFがまだ強い。(6)薄くて軽いCFを使いこなすための研究は、巨額の国家予算を投じても実行すべきテーマであるはず。

