

テクノロジーがわかると、クルマはもっと面白い

Motor Fan

illustrated Vol. 61

図解特集
CFRP
Basics

カーボンの実力

素材・製法と最新適用例

東レ×ゴードン・マレー TEEWAVE AR1 / BMW i3 / Lamborghini Aventador / McLaren MP4-12C

IAA 2011 Technical Highlights

フランクフルトで見た2010年代の自動車の行く道

New & Concept Car Anatomy フル・スカイアクティブ マツダCX-5 / ダイハツ・ミライース

博士のエンジン手帖

Supercar Chronicle

Suspension Watching

ホンダ・フィットハイブリッド トヨタ・カローラ (E70/1979) BMW 3 series

Design Institute Storia della tecnologia della macchina

VW up! ニコラ・マテラッツィの自動車技術史

全日本学生フォーミュラ大会2011

この写真の巨大な「炉」は内径3.1m×長さ7.6mである。耐圧容器であり、内部は二重構造。内隔と外隔の間に熱風を流して加熱する。



Series

36

もの創りの現場

第35回：童夢カーボンマジック | オートクレーブによるCFRP製作の現場

レーシングカーのモノコックボディや航空機の大部品がすっぽり入ってしまう大きさの炉は、数少ない。童夢カーボンマジックには3基あり、タイの童夢コンポジットタイランドでは2基稼働している。カーボン・コンポジットは、世の中の隅々へと浸透を始めた。

TEXT：牧野茂雄 (Shigeo MAKINO) PHOTO：瀬谷正弘 (Masahiro SEYA) /童夢カーボンマジック

研究／開発から量産まで、カーボンコンポジットを極めるオートクレーブ工法にこだわる

黒い小さなシートが、ていねいに「型」に貼られてゆく。シートは形状はさまざま。素材は炭素繊維（カーボン・ファイバー＝CF）の織物に樹脂を含浸させた「プリプレグ」と呼ばれるものである。よく見ると、シートにはいろいろな織り方がある。CFは、ものすごく丈夫な極細糸だ。しかし、一本だけでは弱いから束ねてつかう。一本一本のCFの周囲に樹脂を纏わり付けさせ、それを横に並べて帯状にする。この帯の幅と厚みはまちまちだが、縦と横、あるいは斜めに組み合わせて織り込んでゆけば織物になる。織物はきわめて丈夫だ。型に貼られてゆく黒い小さなシートはプリプレグの織物である。

型を覗き込むと、フライパンのような形状だった。底面と側壁をつなぐコーナー部分は小さな曲率である。シートを貼り込むのは難しく、作業をする女性スタッフはドライヤーをつかってプリプレグを部分的に温め、シート形状を型に合わせて整えながら上手く貼ってゆく。慣れた作業とは言え、その見事な手さばきにしばしば見とれてしまう。「3次元の立体造型ですから、設計図どおりにプリプレグを型に貼ってゆく作業には慣れが必要です。貼り方が設計図どおりでないと、製品に必要な強度や剛性を得られません」

カーボンマジック代表取締役社長の奥明栄さんが説明してくれる。

黒くて小さなシートは、ひとつとして同じ形状のものがない。型はそのまま製品形状であり、ときに複雑な凹凸がある。その凹凸をきちんと再現できるかどうかは、シートの裁断の仕方と貼り方に依存する。だから手作業で貼られる。この作業をロボットに置き換えることはできない。かつて日本経済を支えた繊維産業。そのノウハウと日本人の器用さ

が、CFというハイテク素材を得てふたたび開花した。そんな印象である。

ここは童夢カーボンマジック。CFをつかってさまざまな部品を生み出す工場だ。扱う製品の範囲はじつに広く、レーシングカーから自動車部品、産業機械、スポーツ用具、医療機器関連、そして航空機関連部品まで数え上げれば100を超えるだろう。そのほとんどの製品の材料は、CFをつかったプリプレグである。CFの周囲に熱硬化樹脂を付着させてあるプリプレグは、一定以上の温度に加熱して外から圧力を加えると硬化し、形状を固定することができる。一度硬化すると金属並みの強度になる。そのうえに軽い。だから、強度と軽さの両立が求められる製品に熱硬化CF製部品は利用される。ほかに取って代わる素材がないのだ。

童夢という会社は1975年に誕生した。レーシングカー設計の実績をもとにスポーツカーの少量生産メーカーをめざしたが、世の中をあっと驚かせた「童夢・零」は、自動車行政を司る通商産業省（現・経済産業省）と自動車の基準認証を担当する運輸省（現・国土交通省）との厚い壁に阻まれ、日本での量産は実現しなかった。しかし童夢は、当時から現在まで一貫してレーシングカー・コンストラクターであり、自社設計したレーシングカーを社内で製造している。そして、レースに勝つためのレーシングカーを設計する過程で、最先端素材であるCFに出会う。童夢は1980年代半ばからCFプリプレグをつかった部品をレーシングカーに採用し始め、やがてモノコックまでCF素材で製造するようになる。ここで得たノウハウをもとにカーボン・コンポジット事業へと乗り出し、2001年に童夢カーボンマジックが会社組織として童夢から独立する。「レーシングカーは軽量化と空力的な洗練が設計上

の大きなテーマです。軽量化に大きく寄与する素材であるCFをつかいこなすためにカーボンマジックが01年に独立し、空力設計のための風洞実験設備として風流舎が00年建設されました」

極めるためには専門のスタッフと部署が必要になる。だから会社を興した。現在、童夢カーボンマジックは、CFコンポジット部品の製造を請け負ううえでの調査・研究から企画・計画を経て設計・解析、試作・改良、評価・検査、そして量産・品質保証までを一貫して行なうカーボンコンポジット・コンストラクターである。

「熟成された既存製品をCF素材で作りに替えて、本当に効果が得られるか。要求される機能・性能を実現するためには、どのように設計・製造すればいいのか。このものづくりの最上流部分をしっかりと見極める技術が大切です。我われが目指すのはカーボンコンポジットのトータルコーディネーターです。最適化に向けた設計、解析、試作を行ない、強度試験などで評価、そして改良や改善を経て、高い品質と競争力のあるコストの製品を量産するという一貫体制を持っています」

90年代、レーシングカー開発でCFコンポジットをつかいこなす童夢の技術力が各方面に伝わり、童夢にはCF部品の製造依頼がさまざまな業種から寄せられるようになった。これをビジネスチャンスととらえたのが林みのる童夢社長である。現在、童夢カーボンマジックは事業拡大の一途にあり、05年に設立したタイ法人も含めて全設備がフル稼働の状態だと言う。

カーボンマジックの社屋をひとつお見学すると、熱硬化性CF素材をつかう製品の製造工程を知ることができる。順を追って説明しよう。

まず案内されたのは、CF素材を裁断する場所



裁断したCF織物を型に貼り込む作業。ドライヤーで部分的に温めながら、その温め方を調節しながら、設計図面どおりに貼ってゆく。量産しなければならない製品は、このように型もカーボンでつくられる。



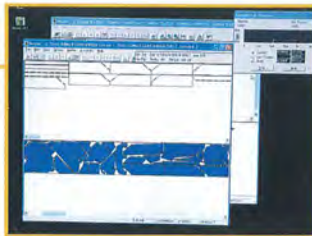
ここが設計ルーム。カーボンを熟知したエンジニア諸氏が、それぞれの担当製品を設計している。もちろん、製品評価の結果はすぐにフィードバックされ、全員が共有する知見もアップデートされる。

オートクレーブを使ったCFRP製作の工程



ロール状に巻かれた樹脂含浸のCFプリプレグ。賞味期限は半年で低温保存が必須。輸送も冷凍して行なわれるが、常温にさらされたら、そのぶんが賞味期限から差し引かれる。

コンピューターが計算した「最高歩留まり」のための裁断レイアウト。素材の幅に合わせて計算され、青い部分が素材、白いところが端材である。一見、90%以上にも見えるが、そううまくはゆかないようだ。



奥に見えるロールからCFプリプレグを引き出し、NC制御で自動カットする。手前の斜めになったところは「ロールの始まり」である。このロールで幅1m。



角型の部品には、このようにCFを巻いてゆく。かなり大きな断面積の角柱でも、強度に優れたカーボン製は「たわみ」が極めて小さいというメリットがある。



さまざまな形に裁断されたCFプリプレグ。立体形状に仕上げる場合、繊維の方向や部分ごとの厚みなどが厳格に設計されており、型への貼り込みは慎重に行なわれる。じつに細かい手作業だ。

内径1.2mの炉。製品をどの位置にどれだけ並べるかによっても仕上がりが具合が違うという。赤いホースはバキュームバッグにつなぐ真空引き用で、炉の内壁に口金がある。



CFRPでできた自動車用ダンパー。このような複雑で精密な形状も、型と成形方法の新たな工夫を織り込んだことで可能となった。



オートクレーブを終えた製品は、それぞれの製品が求める機能・性能に応じてさまざまな方法で検査される。表面仕上げが重要な部品は、まずこのような目視検査から始まる。



製品の寸法は0.1ミリ以下で、重量は0.1グラム以下で測定される。とくに重量や肉厚は、基本的な成形品の品質を保证するバロメーターである。



CF表面を保護する不織布やバキュームバッグなど、必要な副資材の多くは外国製の専用品である。日本製がない理由は「少量生産で利益が出ない」からか？



型を不織布でくみ、バキュームバッグに入れる。このあと真空引きのための口金をバッグに取り付け、バッグ内の空気を追い出しながらバッグを型に密着させる。根気と熟練の要る作業である。



一度使用した型を再利用し、ひとまわり小さな製品のための型にすることも。薄茶色の部分に目留め/離型促進/表面硬度増加のためのコーティング剤を塗ってある。



大物の一体成形では、バキュームバッグをテープで縫ぎ足し、製品に合ったサイズに仕上げる。また、真空引きのための口金をどの位置に取り付けるかも重要で、この製品では4つの口金を確認した。



4つ並んだオートクレーブ炉は左から内径3.16m/1.98m/1.2m/0.6m(うち1基はタイへ移設中)。左の写真は一番大きい4号炉の真空引き配管。サイズが大きいため40本の配管がある。右はその制御盤で、個別に内圧モニターや真空引きの制御ができる。炉のオペレーションにもノウハウがあり、とくに航空機部品を請け負う場合は定期点検とキャリブレーションが厳重になる。

だった。CFプリプレグはロール状に巻かれて素材メーカーから届く。箱にはCFの織り方や樹脂の種類、長さなどが記入されている。

ちょうど裁断が始まる時だった。梱包を解かれたプリプレグのロールが裁断機にセットされ、幅1mほどの織物が台の上に広げられた。裁断はコンピューター制御の全自動カッターによって行なわれる。コンピューターのディスプレイ上には、1枚のシートから最大効率で素材を裁断するようにレイアウトされた画像が呼び出されている。

「素材は高価ですから、できるだけ無駄を省かなければなりません。コンピューターが繊維配向を考慮したうえで裁断レイアウトを計算します。それでも複雑形状の製品が多いので端材はけっこう出ます。75mm角程度の大きめの端材は捨てずに保存しますが、素材そのものに賞味期限があるので、歩留まり90%台にするのは難しいですね」

よく見ると、台上でカットされた素材には番号が記入されている。型に素材を積層するとき、この番号がガイドになる。

「これが織っていないタイプのプリプレグです」

端材を指先で触ってみた。繊維の長手方向に25ミリくらいの端材だ。表面には透明フィルム、裏面には白い紙がそれぞれ貼ってある。保護膜だ。表の透明フィルムを剥がすと、黒いCFシートの表面が現れる。目を近づけると、髪の毛より細い繊維が平行に集められたものだとわかる。UD（ユニ・ディレクショナル＝一方向）と呼ばれるCFシートだ。樹脂によって互にくっつき合い、平行に並んでいる。この素材は織物ではない。触っていると指先の熱で樹脂が柔らかくなり、指を少し動かすと簡単に剥がれる。

「樹脂の粘性によって、互いに寄り添っているだけです。炉で焼かないとつかえません」

端材が捨てられているゴミ箱をあさる許可をいただき、数種類の端材を取り出す。幅5ミリほどのリボンを縦横に編んだ平織りのシートや、横糸が3本の縦糸をまたいで段違い模様を見せる縞子（サテン）織りのシートなど、いくつかの織り方を見つけた。2ミリ幅ほどの細いリボンで編んだ斜織り

のシートも見つけた。最先端素材のカーボンが織物であることをこの目で確かめ、なんだかホッとする。

裁断された素材は、これからつくる製品ごとに集められ、配膳台のようなワゴンに載せられて別の部屋へと運ばれる。冒頭で紹介した、型に素材を張り込む作業のためだ。異物がカーボン製品内に混入しないようクリーンルームで作業が行なわれる。以前見たことのあるオートクチュール（高級注文仕立て服）の工房を思い出した。プレタポルテ（既成高級服）ではない。伊達に高い値段を取っていない、すばらしい立体形状の仕立て服を縫う工房だ。デザイナー（設計者）の指示どおり型の中に順番に、「織り」の方向も確認しながらしっかりとCF素材を密着させる。長めの角型材の場合は、棒状の型に指定された傾斜角でシートを巻き付けてゆく。

素材を型に貼り込んだら、その上にも型を載せてフタをする。そして、型をそのまま、薄い緑色の半透明素材のできた袋に入れる。そして、袋の一部に小さな穴を開けて、そこに口金のようなものを取り付けた。

「オートクレーブ成形工程では、型に積層したプリプレグをフィルムでバックし、その内部を真空に近くしたうえで、徐々に加熱しながらさらに圧力をかけます。真空圧とオートクレーブ圧によって、プリプレグが型に密着し精度の高い成形形状が得られるばかりか、素材内部に残った気泡や、樹脂が熱硬化する際に発生するガスを除去できます。それによって安定した物性と品質の成形品ができるわけです」

作業を見ていると、口金にホースが差し込まれた。作業をしているスタッフがなにかの装置のスイッチを入れると、袋の中の空気がゆっくりと吸い出され、袋がしばみ始めた。スタッフは、沿うように袋の表面にシワをつくらせている。なぜシワなんだろう……。

「シワは、スラックスのタックのようなものです。オートクレーブ内で真空圧に加えて数気圧の圧力がかけられバキュームバッグが積層したプリプレグを押しわけですが、バッグに余裕がないとバッグファイ

ルムが突っ張って破損する恐れがあります。どのくらいの数のシワをつくるかは、形状によるので成形品ごとに異なります。作業の経験や集中力が大事な工程と言えます」

簡単な袋詰め作業ではなかったのだ。しかも、つぎつぎと流れてくる大きさも形状もまったく違う型を手際よく袋詰めしなければならぬ。観察していると、素材を型に貼る工程に携わるスタッフはみな、この袋詰め作業までをマスターしているようだった。いつもながら、日本のものづくり現場で働くスタッフのみなさんの、マルチタスクぶりには驚かされる。

で、袋詰め作業を見ていて思った。いったい、この型はどうやってつくるのだろうか。金属ではない。軽そうだ。奥社長に尋ねると、「こちらへどうぞ」と階下の部屋に案内された。白い石膏ボードのようなものが並べられている。

「セラミックパウダーを固めた建築用の断熱ボードです。これを切削加工して型をつくります。約180℃の耐熱性があり、線膨張係数がカーボンコンポジットに近く、しかも切削加工しやすいボードですから、試作型にはぴったりなのです」

レーシングカーのモノコックのような大物製品の型は、このボードを何枚も重ねて製造される。その型だけを見ても飽きない。型の表面には薄茶色のニスのような塗料が塗ってある。ボードを重ねて貼り合わせ部分が、地図の等高線のように見える。

「ニスのようなコーティングは表面硬度を確保し、石膏の目留めを行ない、素材の離型性を良くするという一石三鳥です。型づくりも難しいんですよ。重ねると、こういうふうな等高線模様が出来ますが、製品形状が難しいところに等高線が出ないように工夫します。どうしてもボードの貼り合わせ面が露出したところでは型の表面が凹んで来ます。ボードと同じ硬度の接着剤を選んでいますが、つかえるのはせいぜい10回です。カーボンで型をつくれれば200回でも300回でもつかえるから、量産品ではそうしています」

へへと納得し、部屋の真ん中へと移動すると、

素材段階と製品での強度試験



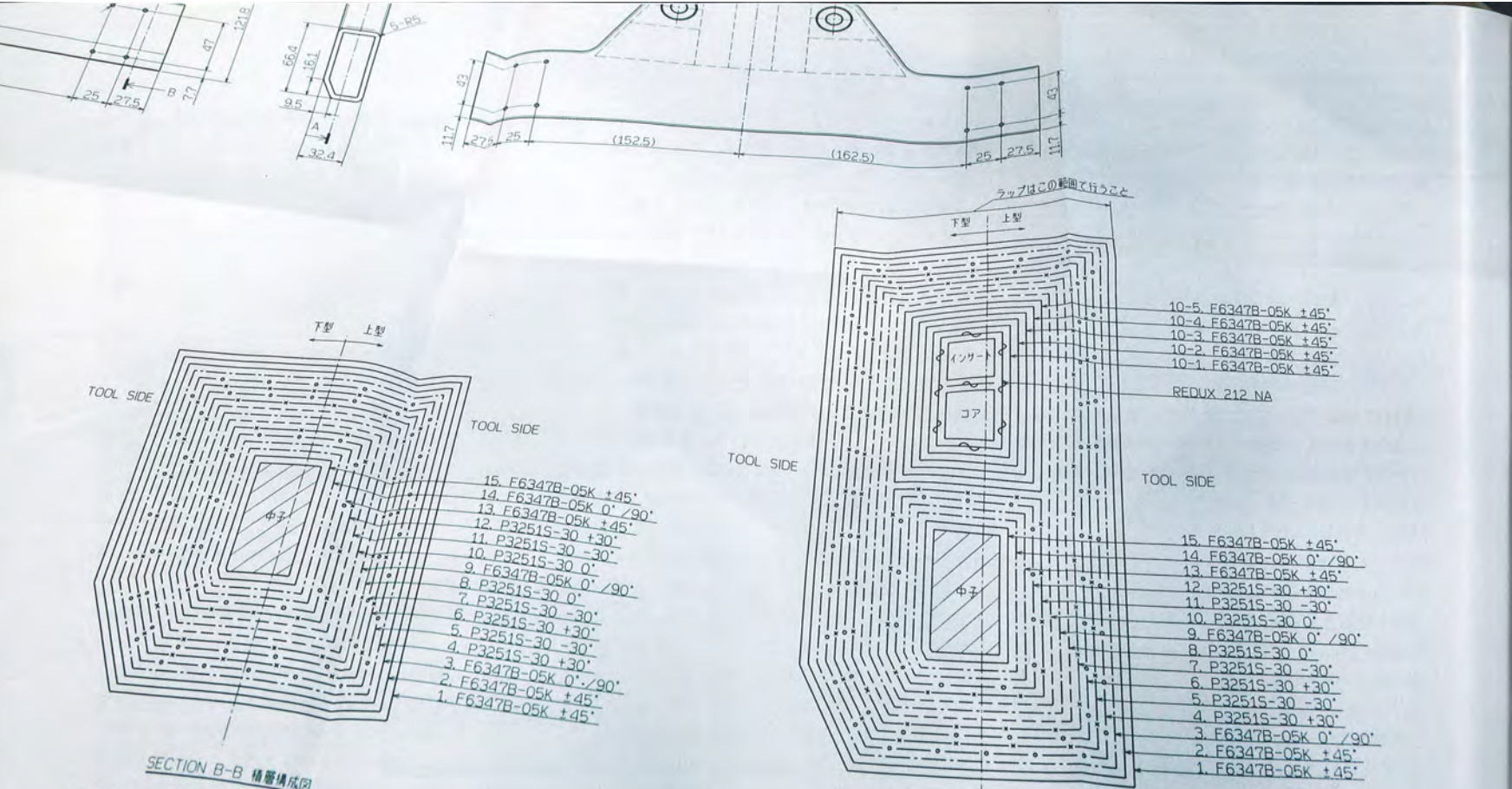
CFの織り方、素材の厚み、インサート材（CF織物の間に入れるアルミニウムなど）の違いなどで強度や剛性が変わる。具体的な設計に入る前に、素材単体での破壊試験を実施し、そのポテンシャルを知る。新製品開発のためには欠かせない工程である。



奥にある平板は、その手前にある円柱を押し付ける静的試験に供したものだ。手前に並んだ部品はレーシングカーのノーズコーンであり、レース規定の対衝突強度を測定した残骸である。こうした試験のほとんどすべてを社内で行ない、そのデータを製品開発に活かす。



これは引っ張り強度試験機。中央に素材をセットして上下を固定し、上方向にじわじわと引っ張る。力の掛け方と速度は自在であり、レーシングカーの衝突に匹敵するような引っ張り力も与えることができる。こうした測定器はどれも一様に高価である。



SECTION B-B 積層構成図

SECTION C-C 積層構成図

NOTE
 1) ハリ、エッジ等なまごこと。
 2) 本部品は①②③④⑤を一体成形し、

滅多に見ることができないCF積層構造の設計図面。どのような「織り」の素材を、どのような角度で、どのような順番で、何枚重ねるかが明記されている。素材を貼り込むときは、この図面どおりのコーナーRを守らなければならない。



クリーンルーム内でのプリプレグ積層作業。織物を3次元形状に貼るのだから熟練した工夫とともに現場での工夫と熟練が必要。まず素材の番号を確かめ、保護フィルムを確実に剥がし、所定の場所と順番どおり貼ってゆく作業である。

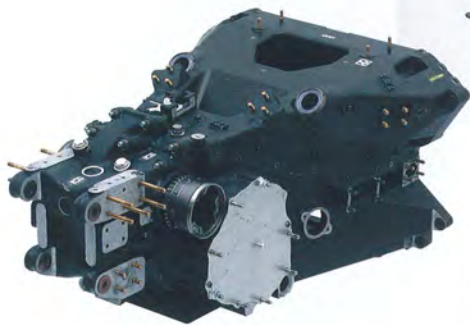


鉄道用シートは外側のシェルがCFRP製。センターアームレスト部分は背後の座席に座るひとが利用するマガジンラックを兼ねるが、この中だけカーボン無塗装で織り模様が見える。

義足に装着するブレード。素材の厚み、Rの形状、繊維の方向などによって「バネ」としての強さを調節できる。身障者陸上競技ではすでに広くつかわれており、その性能は立証済みである。



車椅子こそ軽量化や取り回し性の向上が求められる。日本で一般につかわれている製品は旧態依然であり、利用者の声はつくり手にまったく届いていないのだろうと想像する。素材革新がもたらす好例がコレ。



レーシングカーのモノコックのような大物一体成形は童夢カーボンマジックがもっとも得意とするところであり、同時にすべてのカーボン事業のルーツである。アルミ合金など金属との接合についても豊富なノウハウを持つ。



ブランドものサングラスはコスメティック・アピールがもっとも重要だが、カーボン製品を薦用してみると非常に軽い。金具とカーボンの線膨張係数の差の考慮など、ファッション用品とは言え設計は工業製品レベルで行なわれる。

そこでは石膏ボードの表面を3次元NCマシンで削っている。「新しい型をつくる作業ですか」と尋ねると、意外な答えが返ってきた。「再利用です。すでに10回くらい使用した型ですが、ボードの中のほうはまだ丈夫なので、表面を削ってちいさな型にしているのです。大きな型が使用に耐えなくなったら、こういうふうに小さな型にするのです。では、オートクレーブの炉へ行きましょう」

いよいよ、熱硬化性CF製品をつくるうえでもっとも重要な「焼き」の作業だ。オートクレーブ (auto clamp) が並んだ大きな部屋で待っていると、つぎつぎと素材が運ばれてくる。例の薄い緑色の半透明袋に入れられている。そのまま炉に入れられ、さきほどの口金にまたもやホースが差し込まれた。ホースのもう片方は炉の内壁の口金に差し込まれている。

「このホースで真空吸引します。それぞれのホースの吸い出しは個々にモニターされていて、成形中にコントロールしたり、万一、バキュームバッグが破れたりした場合にはバルブを閉じるなど対処ができるようになっています。素材を炉に入れて加熱すると、80℃付近で含浸された樹脂が一旦液状になり流動性を持つようになり、積層素材内の気泡を排除してくれます。炉内の圧力はおおむね3~7気圧です。その後90℃を超え樹脂の硬化が始まるころには、バキュームバッグの中の成形品中には、気泡も樹脂由来のガスもない状態になります。さらに130℃程度で2時間保持し、完全に硬化させます」

そんな話を聞いていると、いちばん小さな炉のそばでなにやら作業が始まった。「あ、そろそろ成形が終わりますね」と奥社長。いままで何十回も熱処理炉を見て来た筆者も

オートクレーブの扉が開く瞬間を見るのは初めてである。「焼き上がる」という感じの、おいしそうなイメージに心を躍らせながら見学。炉内の温度が落とされ、扉が開けられ、バキュームバッグに包まれた平たい型が出て来た。「レントゲン撮影用の道具です」と奥社長。「カーボンコンポジットはX線透過率が高く丈夫なので、医療機器関係のアイテムが増えています」と聞き、本日何十回言ったかわからない「へ〜」という言葉がまたまた吐いてしまった。

オートクレーブ成形されたCF製品は、必要に応じてNCマシニング、ウォータージェットやハンドリユーターなどによるバリ取りが行なわれ、完成検査へと回される。表面無塗装でつかわれる製品は、とくに外観検査が厳しい。出来上がった製品のいくつかを見せていただいたが、織り模様がきれいに出了たカーボン製品は美しい。

あ、そう言えば、筆者も毎日持ち歩いているカーボン製品がある。ドイツ製の「葉巻入れ」だ。64分の46インチまでのゲージで長さ6インチ程度までの葉巻を2本収納できる。奥社長に見ただくと「これもオートクレーブ成形ですね」とのコメント。すでに10年以上つかっているが、まったく壊れない。0.5ミリ厚の斜文織りCFシートできているが、強度があるから葉巻が変形したことはない。

「いいでしょ、カーボン製品は。丈夫で長持ち。少々コスト高は十分カバーできますが、使い次第ですね」と奥社長に言われて納得。

工場を見学して抱いた印象は、童夢カーボンマジックがCF製品のスペシャリストであるということだ。CF素材を購入し、炉で焼いて製品にする加工業者、いわゆるモルダーではなく、製品化へのアドバイスから設計支援、試作、そして改

良と、あらゆるステージについて多くの経験とノウハウを持っている。

「レーシングカーをやっていたよかったです、つくづく思います。我われはレーシングカーがあったから、このカーボンコンポジットの世界に入ったのです」

奥社長の、この言葉が印象的だった。



童夢カーボンマジック

2001年11月の設立。所在地は滋賀県東原市。資本金3000万円で従業員数80名。コンポジット材料に関する調査・研究・開発、コンポジット製品の調査・企画・設計・試作・開発・製造・販売が事業内容である。また、親会社の童夢と共同出資でタイに童夢コンポジット・タイランドを05年9月に設立した。量産効果を得られるものはタイ生産へと移管している。