

CFRTPでクルマを造る 量産に向き、安い

自動車を樹脂化する手段として、CFRTP(炭素繊維強化熱可塑性樹脂)が浮上してきた。これまで開発が進められてきたCFRP(炭素繊維強化樹脂)のマトリックスはエポキシに代表される熱硬化性樹脂。これに対し、CFRTPはPP(ポリプロピレン)のような熱可塑性の樹脂を使う。CFRPが航空機から転用された技術であるのに対し、CFRTPは自動車のための技術だ。量産に向き、安価にできる。



自動車の骨格に使うCFRTPの開発が急速に進み始めた。日本国内で4カ所の研究設備が稼働を始めたからだ。まず、2009年に東京大学の低炭素工学イノベーション拠点ができ、2012年に入って、名古屋大学の「ナショナルコンポジットセンター」、岐阜大学の「複合材料研究センター」、金沢工科大学の「いしかわ炭素繊維クラスター」の3施設が相次いでできた。これら合計4施設が本格稼働することで、CFRTPの開発が本格的に始まる。

CFRTPでは、こうした施設があるかないかが開発のスピードを左右する。“低コスト”と言われているため誤解されがちだが、CFRTPはCFRPよりも大掛かりな生産設備が要る。設備費は高くなるが、それを償却するような量産規模で生産することによって単価を安くする。“装置産業”としての性格が強いのである。

CFRPに使うエポキシは2液を反応させるまでは分子量が小さく、粘性の低い液体だ。炭素繊維(CF)を浸せば染み込んでいく。だからハンドレイアップという“手作り”ができる。

ところが、PPの熔融粘度は硬化していないエポキシの1000倍にも達する。このため、自動車の車体を使うような大きな部品を成形するにはMN級の本格的なプレス機械が必要だ。それほど深くない普通の形を造るのにも成形圧力10MPa、深い形状にするには20MPaが必要だから、面積が1m²の部品で10MN(1000tf)である。ルーフ、フロントフードなどは2m²の面積があるので20MN(2000tf)のプレス機が必要だ。深い形状にしたければ、プレス機

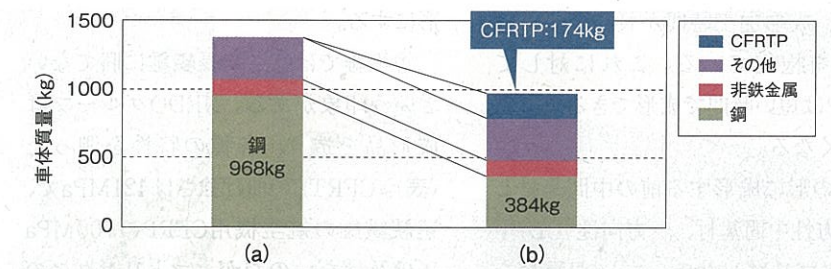


図1 CFRTPの質量削減効果
(a)が鋼を主に使った車体、(b)がCFRTPを174kg使った車体。

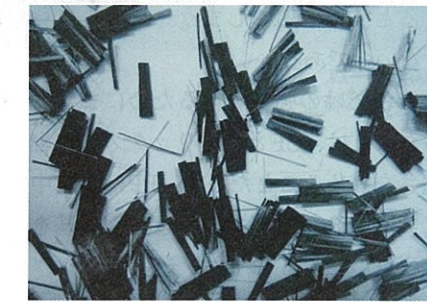


図2 短く切った炭素繊維
これを分散させて等方性中間基材とする。



図3 CFマットの拡大写真
緻密なネットワークを形成している。

は40MN(4000tf)にもなる。

少量生産の手作りもできるCFRPと違い、大きな設備で大量生産することを前提にした材料なのである。研究をするにも大学や小規模な成形品メーカーでは手に余るほどの設備投資をする必要がある。このため相乗りで研究できる施設が必要だ。今のところ、大手の自動車メーカーでさえ、独自の本格的な投資をするには至っていない。だから、冒頭で紹介した4施設の開設が重要になってくる。

短いCFで等方性の基材を造る

現在、CFRTPの開発で先行しているのはNEDOのプロジェクト「サステナブルハイパーコンポジット技術の開発」に参加している東京大学、東レ、三菱レイヨン、東洋紡、タカギセイコーな

どのグループである。推進委員としてトヨタ自動車、日産自動車、本田技術研究所が入っている。既に試作品を造り、その特性も評価、公表している。要素技術として中間基材、成形、接合、リサイクルの4技術を開発した。

NEDOグループは車体質量が1380kgある自動車を軽くすることを想定している。多くの部材をCFRTP製にすることによって、鋼が584kg減り、その分を174kgのCFRTPに置き換える(図1)。結果として車体質量を970kgと、30%減らすことができる。燃料消費量を22.5%減らし、2030年までの累計で338万台が普及すると仮定すると、原油換算で50.7kL/年を節約できる。

試算に車両価格は無いが、“338万台が普及するほど安い”ことを前提としている。CFRPはもともと航空機向けの

技術で、成形加工時間が長く高価という課題を抱えている。これに対してCFRTPは短い時間で成形できるため価格が安くなる。

部品の形に成形する前の中間基材として等方性中間基材、一方向性(UD)中間基材(プリプレグテープ)の2種類を開発した。

等方性基材は短く切ったCFを使う(図2)。CFは通常、3000~2万4000本の束になった状態で供給されるので、これを均一、等方に1本ずつ分散させると、各繊維がほかの繊維と多数接触して緻密なネットワーク構造を形成する(図3)。この“CFペーパー”をPPのフィルムと重ね、加熱プレスして部品の

形にする。

短繊維では強さで長繊維に勝てないという印象がある。NEDOグループは成形品を造り、各種の特性を測った(表)。CFRTPの曲げ強さは421MPaで、連続繊維の航空機用CFRPの700MPaには及ばないのだが、マトリックスの密度が0.9g/mLと軽いため全体としても1.1g/mLと小さく、比曲げ強さにすると実は並んでしまう。長繊維に負けないのである。

これだけの強さを得るためにまずやったことは、CFとマトリックスの結合強さを高めることだった。PPは樹脂中に共有結合や水素結合できる官能基を含まない。従って、たとえCF表面のグ

ラファイト構造を化学的に修飾しても、両者の接着性があまりなく、界面で結合力が弱い。

今回の研究では、様々な官能基種を埋め込んで結合性を高めた各種の変性PPを作成した。それぞれ界面せん断強さ(IFSS)を測り、接着性の指標とした。どの試作品も、標準品の2倍以上のIFSSを示し、CFとの接着性を得られることを確かめた(図4)。

ベルトを使ったプレス機で連続生産

次に中間基材を造るための装置を検討した。CFとPP、それぞれのシートを重ね、熱を加えてプレスする。1枚の板ごとにプレスする方法が考えられるが、量産を前提にすると連続処理をしたい。鋼板の生産でこれに対応する工程の圧延では、製品はフープ材で出てくる。1枚1枚の切り板では、生産性でかなわない。

そのために、上下一対のベルトでシートを挟み、連続的に積層するプレス機を導入した(図5)。ベルトは加熱部と冷却部に分かれており、加熱部で熔融、含浸し、冷却部で圧力を保ったまま固化する。

表 等方性中間基材の特性
比曲げ強さではCFRTPが連続繊維CFRPに並ぶ。

	曲げ弾性率 E(GPa)	曲げ強さ σ(MPa)	密度 ρ(g/ml)	比曲げ弾性率 (3√E/ρ)	比曲げ強さ (√σ/ρ)
銅	200	420	7.8	0.75	2.6
アルミニウム	71	160	2.7	1.5	4.7
マグネシウム	45	370	1.8	2.0	11
GMT (Glass-Mat-reinforced Thermoplastics)	7	145	1.2	1.5	9.7
連続繊維CFRP(エポキシ)	50	700	1.5	2.5	18
等方性CFRTP中間基材 (ポリプロピレン)	14.5	421	1.1	2.2	18

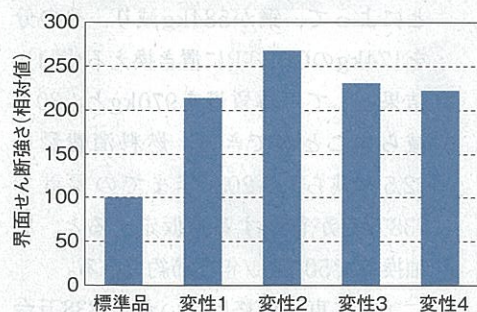


図4 変性PPの界面せん断強さ試験
界面せん断強さは接着性を示す指標。様々な変性の仕方を試し、標準品の2倍以上であることを確かめた。

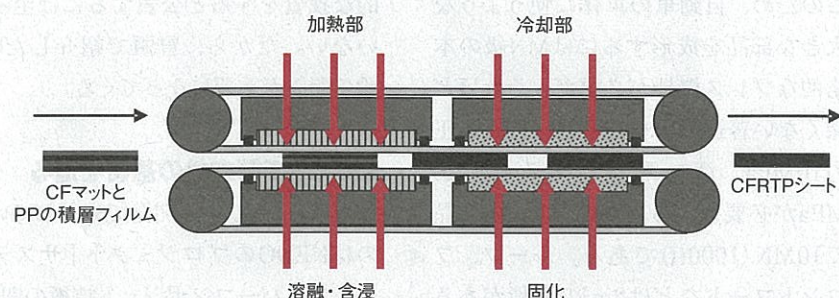


図5 ダブルベルトプレス装置のイメージ
上下から挟み、連続でプレスできる。



図6 ダブルベルトプレス装置の本体
周辺装置を含めると20×10mという大型の装置である。



図7 ロール状の等方性中間基材
フープ材のように連続で取り扱える。マトリックスはPP。

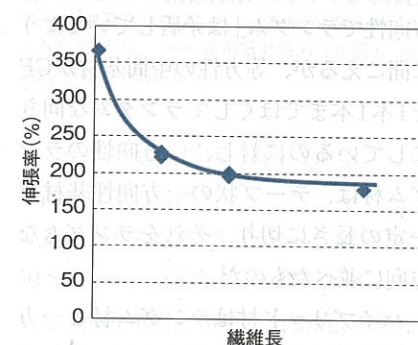


図8 繊維長と伸張率の関係
繊維が長いと伸張率が落ちる。横軸は未公開。

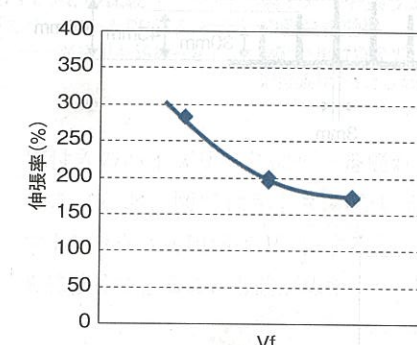


図9 Vfと伸張率の関係
Vfが大きいと伸張率が落ちる。

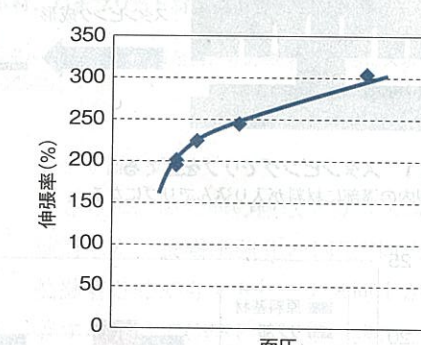


図10 面圧と伸張率の関係
面圧が大きいと伸張率が上がる。

プレス機本体の据え付け面積は5×3mだが、周辺設備を加えると20×10mになる大型の設備だ(図6)。ベルト幅800mm、最高加熱温度400℃、最大成形圧力は8MPa、最高ベルト速度15m/分である。ベルトの背面に油を満たして静水圧を掛ける。

この設備を使い、等方性基材を生産して仕様を検討した。温度、圧力、生産速度などのパラメータを検証し、Vf(全体的積のうちCFの占める割合)が30%までの基材ならば量産できることを検証した。薄いものはロール状の素材を供給し、製品をロールで取り出すこと

ができる(図7)。厚い場合はロールにできないので、シート状に切断して出荷する。なお、加熱温度の上限は400℃であり、PPだけでなく、強度、耐熱性の高いPA(ポリアミド)フィルムでも問題なく生産できることを確認した。

スタンピングで製品に

こうしてできた等方性基材をスタンピングして自動車の構造部材にする。どのくらい成形性があるかが使い勝手を左右する。円筒形のワークを軸方向につぶし、直径がどこまで増えるかを伸張率と定義して整理した。伸張率が

大きければ流動性が高く、様々な形に成形できることになる。

繊維長が長くなるほど伸張率は低くなる(図8)。同様にVfが上がると伸張率は下がる(図9)。つまり、強さを出そうとして長い繊維をたっぷり入れると、成形は難しくなる。定性的には“自明”なことだが、定量的な数字を得たことに意味がある。それでも、面圧を上げれば伸張率は上がる(図10)。やはり、大きな生産設備が必要なようである。

スタンピング工程での流動性を確かめるため、根元厚さ3mm、高さ30mm、45mm、60mmの3種類のリップを立てた

成形品を試作した(図11)。金型温度120℃、面圧15MPaでは、Vfが10%の等方性基材で、高さ60mmのリップの先端まで材料を充填できた。Vfが20%になると、30mm程度が限界だった。成形圧力を40MPaに上げると、60mmでも完全に充填できることが分かった。

リップから試験片を切り出してVfの分布を測定した。リップのVfは全体のVfとあまり変わらない。つまり繊維が先端

まで流れ込んでいることを確認できた(図12)。残念なことに、リップ部の曲げ強さ、曲げ弾性率は根元の平板部より低くなった。プレスの圧力が直接伝わらないため加熱、軟化したときに気泡を積極的に追出す力が弱くなり、気泡が残ってしまうようだ。ただし、リップの一番弱い部分でも、成形前の中間基材の60~70%を維持した。

なお、グラフ右のGMT (Glass-mat re-

inforced thermoplastics)は参照のために実験した購入品で、繊維はリップの隅にまでは流れていかないことが分かる。

テープ状の一方方向性基材

等方性の基材とは別に、一方方向性の中間基材を試作した。長いCFを切らずに使い、PP、PAなどの熱可塑性樹脂を浸透させて、強く接着したプリプレグテープである。

このテープを重ねることによって一方方向性基材を造った。このほかランダム材、ハイブリッド材を開発した。「一方方向性でランダム」は矛盾しているように聞こえるが、等方性の中間基材がCFを1本1本までほぐしてランダムな向きにしているのに対し、一方方向性のランダム材は、テープ状の一方方向性基材を一定の長さに切り、それをランダムな方向に並べたものだ。

ハイブリッド材はランダム材と一方方向性基材を張り合わせたもの。ランダム材を使うと素材が流動しやすくなるため複雑な形状に成形できる。しかし、絶対的な強さでは一方方向性基材にかなわない。鋼材から置き換えるには、両者の性質を兼ね備えたものが必要になる。そこでランダム材の両面に一方方向性のプリプレグシートで挟んだものを試作した。

想定する部材は断面が「モナカ」のように2枚の部品を張り合わせたもの。ランダム材、ハイブリッド材を使って、モナカの片面に相当する部材を成形し、それを2個向き合わせて振動融着して箱型断面の角材とした(図13)。モナカの内側にリップがあるもの、ないものの両方を造った。リップは角材の長手方向

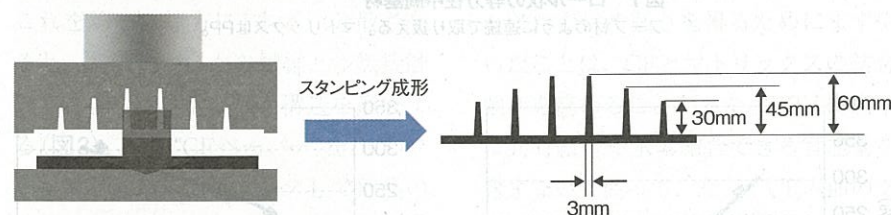


図11 スタンピングでリップを立てる
金型内の溝部に材料が入り込んでリップになる。

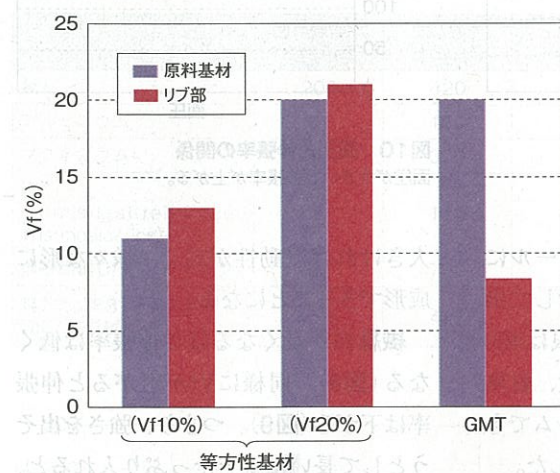


図12 リップ部分のVf
等方性基材はリップ部でもVfが下がらず、先端までCFが入り込んでいることが分かる。

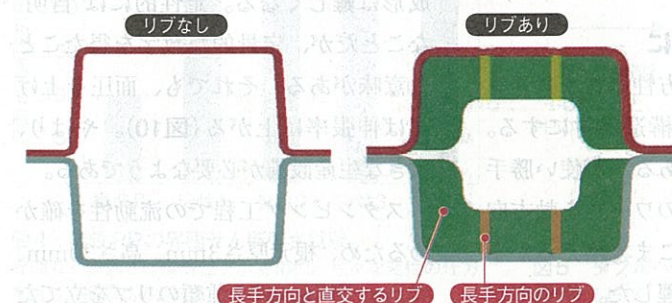


図13 ハットチャンネル接合品の模式図
ハットチャンネル2本を向かい合わせにして箱型の部材を造る。

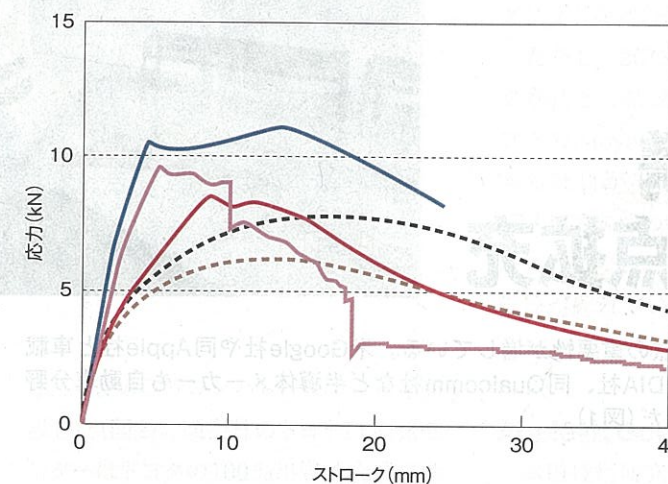


図14 CF/PP系材料のハットチャンネルと鋼板パイプとの比較
—がPP系ハイブリッド、—がPP系ランダム(リップあり)、---がPP系ランダム(リップなし)、---が電気亜鉛めっき鋼板(線溶接)、---が電気亜鉛めっき鋼板(スポット溶接)。

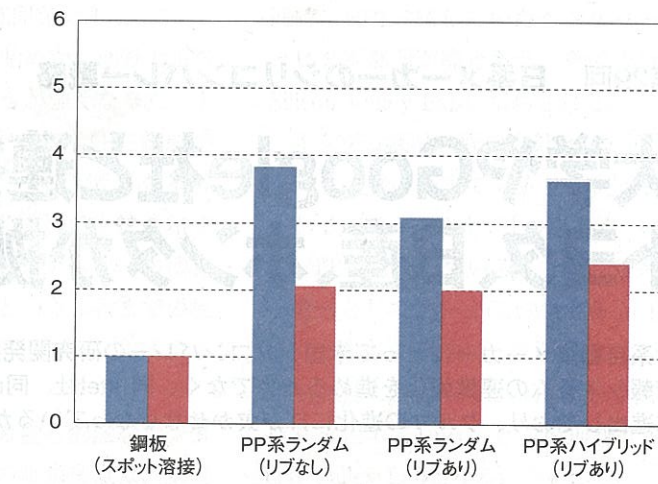


図15 PP系ランダム材、ハイブリッド材による各種ハットチャンネルの軽量化効果
■が単位質量当たりの強さ、■が単位質量当たりの弾性率(ともにスポット溶接鋼材を1としたときの数字)。

と、それと直交する方向に走る。リップの高さは10mmだ。

造った角材は長さ400mm、断面形状50×50mmの直方体で、ランダム材、ハイブリッド材とも厚さは2mmである。ランダム材のリップなしでは質量は260g、リップを立てると、その分増えて360gになる。ハイブリッド材は内側がランダム材、外側が連続繊維材。繊維の向きは長さ方向に対して0度/90度/0度/90度/0度の5層だ。ハイブリッド材は、連続繊維材が増える分だけランダム材を減らし、質量を360gにそろえた。

比較のために厚さ1mmの鋼板を曲げ、溶接した角材も用意した。溶接は100mm間隔のスポット溶接、連続溶接の2種類をそろえた。断面は50×50mm、質量は720gある。

この試料を使い、3点曲げ試験をした(図14)。その結果を質量当たりの強さ、弾性率としてまとめた(図15)。強さではリップなしのランダム材、剛性ではリ

プ付きのハイブリッド材が一番優れていた。なお、図では示していないが、マトリックスをPPからPAにすると、さらに強くできることも確かめた。

接合すると繊維同士が絡む

接合についても検討した。CFRTPは高温、高圧で成形するため、大型の一体成形品を目指す大きな設備が必要になり、サイクルタイムも伸びる。複数の部品に分けて成形し、それを接合する方が合理的である。

接合の速度と強さで既存の鋼と並ぶ接合技術の開発を目指し、熱可塑性樹脂に向けた融着法を検討した。PPに適した接着剤がないという理由もあり、接着でなく融着とした。中間基材は、熱板融着、振動融着、超音波融着など、接合面を重ね合わせて加熱加圧する方法が使えることを確認した。接合部が一体になって繊維の含有率が上がり、接合強さを母材の90%以上にできるこ

とを立証した。

さらに、接合面の破壊メカニズムを検討した。長繊維強化のCFRP同士を熱融着させてもマトリックス同士が接着するだけでCFRPとしての強さを出すのは難しい。これに対して短繊維では明確な接合界面はなく、繊維同士が絡むことによって靱性が高くなり、接合部の強さが上がることが明らかになった。

CFRTPの開発は欧州でも進んでいるが、CFRPと同じく、航空機の技術がクルマに流れ込んでいる。これに対して「日本のCFRTPは初めからクルマを向いている」(東京大学工学系研究科システム創生学専攻教授の高橋淳氏)のが特徴だ。生産設備は大掛かりだが、量産すれば1台当たりのコストは下がる。NEDOの狙い通り2030年までに338万台が普及するとすれば、十分に量産車向けの技術ということが出来る。

(浜田彦彦)