

日経 クルマの技術の明日を読む

Automotive Technology

techon.nikkeibp.co.jp/AT/

2012
5

隔月刊・奇数月発行

早く、安くを現実に

CFRPで クルマを造る

成形品コストを1/10以下に
RTMの本格活用始まる
1分で成形できる熱可塑タイプ



解説

高齢化というビジネスチャンス
始まったISO26262対応

展示会レポート

ジュネーブモーターショー

好評連載

明日を読む

グローバル新潮流を追う

ITでクルマはこう変わる

エンジニアの仕事

EV/HEV 部品解剖

視点

自動車エンジニアのためのデバイス入門

40 Cover Story 特集

早く、安くを現実に

CFRPでクルマを造る

鋼板やアルミニウム合金より大幅に軽くできるものが高コストという理由でレースカーやスーパーカーにしか使われていなかったCFRP（炭素繊維強化樹脂）。そのCFRPを早く、安く造る技術の開発が進んでいる。実績のある熱硬化性CFRPでは、RTM（レジン・トランスファ・モールディング）で成形品コストを1/5～1/7にする“現実解”が見えてきた。さらに、2020年ごろの本格採用を目指して、熱可塑性CFRPでコストを1/10以下にしようとする“理想解”への挑戦も始まった。

- 42 Part.1 量販車を使い始める
- 46 Part.2 熱硬化性樹脂を使う現実解
- 53 Part.3 熱可塑性樹脂で目指す理想解

56 Features 解説

56 高齢化という
ビジネスチャンス

62 始まった
ISO26262対応

18 Tech Report 技術レポート

18 震災から1年後の
東北自動車産業

20 日産とVolkswagen社の
大規模モジュール開発

22 ホンダ「N BOX」の軽量化技術

- 24 日立の両面冷却インバータ
- 26 ジャトコのCVT海外生産戦略
- 29 Volkswagen社の「up！」
- 33 部品メーカーのグローバル化セミナー報告
- 37 車載ソフト開発の効率化セミナー報告



好評連載

78 グローバル新潮流を追う
第18回 Fiatグループの事業戦略
ブランド活用し小型車を強化
電動パワートレインでは提携も



100 ITでクルマはこう変わる
第18回 Android搭載データロガー
車両情報をスマートフォンで閲覧
二つのプラットフォームで信頼性を高める

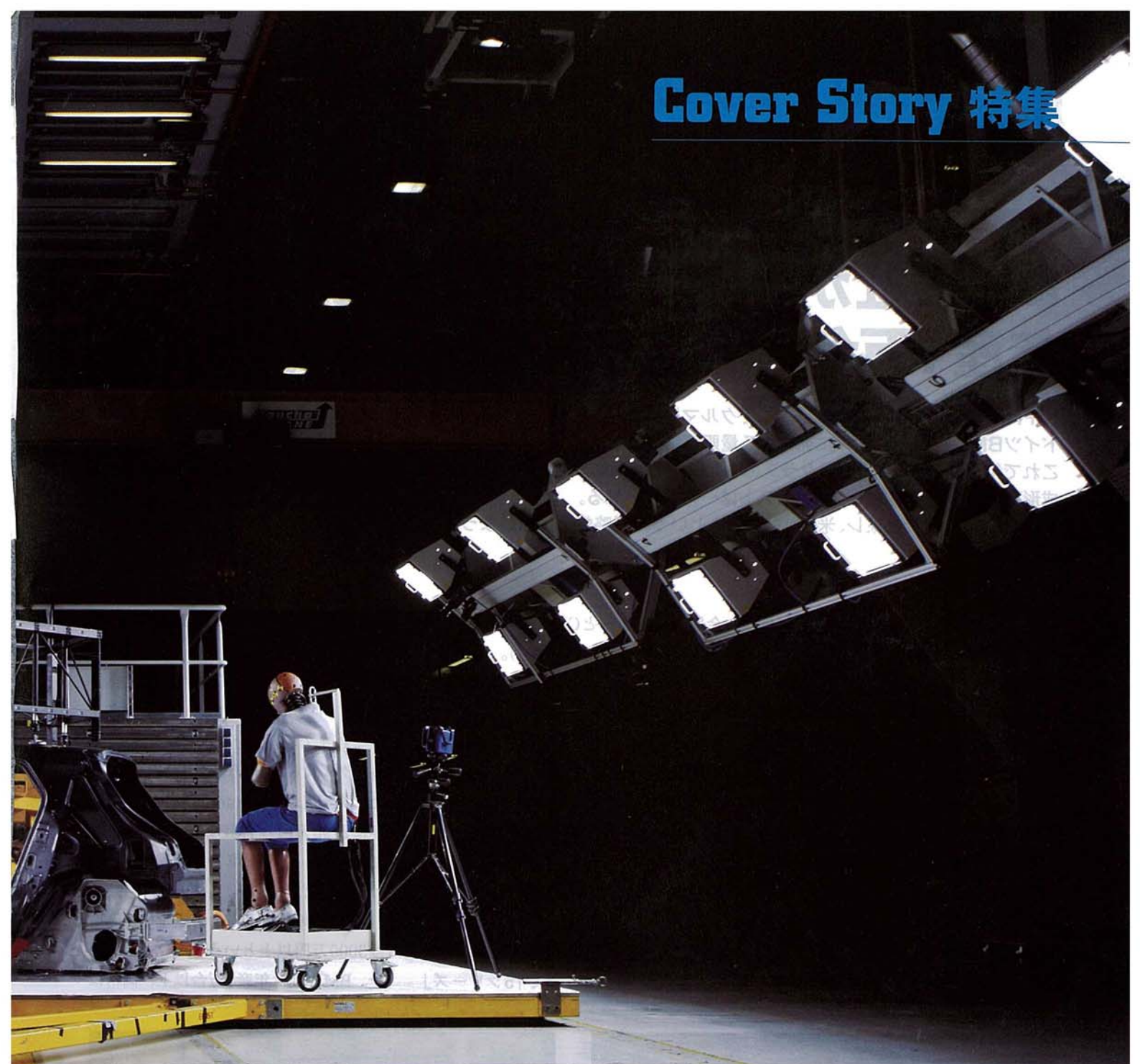
102 自動車エンジニアのためのデバイス入門
第9回 電源回路(5)
HEV向けDC-DCコンバータの現状

133 視点
欧州ジャーナリストの視点
ユニークなアイデアを盛り込んだコンセプトモデルが多く登場したジュネーブモーターショー
韓国ジャーナリストの視点
ウォン安だけでは説明できない
Hyundai躍進の原動力はEファクター

早く、安くを現実に

CFRPで クルマを造る

鋼板やアルミニウム合金より大幅に軽くできるものの高コストという理由でレースカーやスーパーカーにしか使われていなかったCFRP（炭素繊維強化樹脂）。そのCFRPを早く、安く造る技術の開発が進んでいる。実績のある熱硬化性CFRPでは、RTM（レジン・トランスファ・モールディング）で成形品コストを1/5～1/7にする“現実解”が見えてきた。さらに、2020年ごろの本格採用を目指して、熱可塑性CFRPでコストを1/10以下にしようとする“理想解”への挑戦も始まった。（林 達彦）



Cover Story

Part.1 量販車が使い始める

BMW社が2013年にEVで適用
年産1万台、400万円クラスが視野に 42

Cover Story

Part.2 熱硬化性樹脂を使う現実解

RTMで成形コストを1/5~1/7に
プリプレグを早く硬化させる方法も 46

Cover Story

Part.3 熱可塑性樹脂で目指す理想解

材料価格の低減と“1分成形”がかぎ
年産20万台規模への採用目指す 53

写真提供: BMW社

BMW社が2013年にEVで適用 年産1万台、400万円クラスが視野に

「CFRP（炭素繊維強化樹脂）は高くてクルマに使えない」という常識が変わりそうだ。

ドイツBMW社が2013年に発売する量販車に使うと宣言したからだ。

これで年産1万台、400万円クラスのクルマへの適用にメドが付いた。

成形時間の大幅な短縮で成形品コストは一桁下げられる。

ドイツDaimler社と東レ、米GM社と帝人といった戦略的提携も始まった。

鉄(Fe)よりもアルミニウム(Al)合金よりもCFRPが軽いのは分かっている。ただ、航空宇宙産業はまだしも、クルマの世界で年間1万台以上作るような量販車にCFRPを適用するという自動車メーカーはなかった。

だが、この状況が大きく変わる。BMW社が2013年に発売するEV(電気自動車)にCFRP製ボディを採用すると2009年に発表したからだ。同社は「BMW i」というブランドで出すEVの「i3」、続いて製品化するプラグインハイブリッド車(PHEV)の「i8」を、Al合

金製のシャシーとCFRP製キャビンの組み合わせで実現する(図1)。

BMW社は、3年後に炭素繊維を3000t分生産できる設備を、材料メーカーに求めており、1台に100kgの炭素繊維を使うとしても年間3万台レベルの大規模生産が予想される。

一部メディアで報道されているi3の価格も衝撃的だ。ドイツの経済紙「Handelsblatt」は、BMW社CEO(最高経営責任者)であるNorbert Reithofer氏が「i3は5シリーズよりも買いやすい」と発言したとする。ドイツで「5シリーズ」

は3万9900ユーロ(1ユーロ110円換算で439万円)からであることから、400万円近くの価格が設定される可能性がある。

これまでCFRPをキャビン全体に使ったクルマは3000万円以上が常識だった。英McLaren Automotive社が2011年に2790万円の「MP4-12C」を発表した際には、「CFRP車で最も安い」といわれたほどだ(図2)。

年間1000台以下の少量生産で、価格は3000万円以上というCFRP車の世界を、BMW社は年産1万台以上、価格は



図1 ドイツBMW社の「i3」と「i8」

いずれもコンセプト車で、アルミニウム合金製のシャシーにCFRP製のボディを組み合わせる。電気自動車のi3(左)は2013年発売予定。それに続いてPHEV(プラグインハイブリッド車)のi8(右)も量産予定。



図2 英McLaren Automotive社「MP4-12C」

RTMで成形した「モノセル」と呼ぶキャビンを用いる。キャビンの質量は75kgと軽量だ。

400万円クラスという、量販車の世界に一気に引き下げようとしている。

材料コスト、成形コストを低減

同社がこうしたドラスチックなコストダウンを実現できたのは、CFRPに使う材料コスト、成形コストを徹底的に見直したからである。

炭素繊維は強度に優れ、剛性が高い。産業用で使われる引っ張り強さ5GPaの繊維は、鉄の10倍以上の強さがある。さらに質量も軽い。元素の周期表でC(炭素)は、6番目。原子番号が13、26のAl、Feよりも圧倒的に軽い。炭素繊維の密度当たりの強度(比強度)および剛性(比剛性)が非常に大きいのはこのためだ。

ただ、繊維を単体で構造材に使うことは難しい。そこで、繊維を織物などに加工し、そこに樹脂を含浸させて複合材としたCFRPという形で部品を造る。炭素繊維の並べ方や複合材における炭素の含有率によって比強度や比剛

	2015年における各用途の地域別需要予測(t)				
	北米	欧州	アジア	その他	合計
一般産業	7800	1万4900	1万3500	5800	4万2000
スポーツ&レジャー	1200	600	8000	200	1万
航空機	7000	7000	2000	2000	1万8000
合計	1万6000	2万2500	2万3500	8000	7万

拡大する産業用途
・風力発電 1万6500
・自動車 5000
・その他 2万500

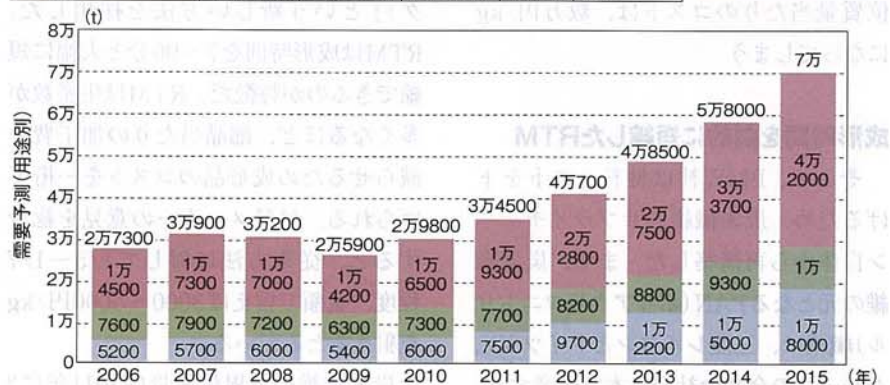


図3 炭素繊維の需要予測

三菱レイヨンの予測では、2015年に7万tに達する全需要のうち、自動車向けは5000tと見る。

性は変わるものの、比強度はFeやAlに比べて数倍程度の値になるため、軽量化効果は大きい(p.44の別掲記事参照)。ただ材料コストと成形コストは高い。1kg当たりの炭素繊維の価格は2000円ほどで、Feとは二桁違う。この炭素繊維を織って、熱硬化性のエポキシ樹脂

を含浸させた、プリプレグと呼ばれる中間基材でも、1kg当たり数千円になる。CFRPの成形品は通常、プリプレグを型に何層も貼り付け、その状態でオートクレーブと呼ぶ加熱・加圧炉で硬化させて製造する。硬化時の熱サイクルは、昇温、保温、冷却の一連のサイ

表 主なCFRP採用車

社名	Lamborghini社	トヨタ自動車	McLaren Automotive社	Fiat社	日産自動車	Daimler社	富士重工業	BMW社
車名	Aventador LP 700-4	レクサスLFA	MP4-12C	Alfa Romeo 8C Spider	GT-R	Mercedes-Benz SL	インプレッサ WRX STI tS	i3
外観								
適用部位	キャビン	キャビン	キャビン	外板、後部リッド	ラジエータ・コア・サポート	後部リッド内側	ルーフ	キャビン
工法	プリプレグ、RTM	プリプレグ、RTM、SMC	RTM	—	射出成形	RTM	VaRTM*	RTM
質量	145kg	193kg(キャビン、アルミ含む)	75kg	—	—	—	5kg	100kg(推定)
成形メーカー	内製	内製	—	Benteler SGL社(後部リッド)	カルソニックカンセイ	Euro Advanced Carbon Fiber Composites社	東レ	内製
発売	2011年	2010年	2011年	2009年	2007年	2012年	2011年	2013年
価格	3969万円	3750万円	2790万円	2650万円	869万4000円	917万円(欧州)	422万1000円	約400万円(推定)
生産台数	500~1000台/年	500台	1000台/年	500台	—	—	400台	数万台/年(推定)

*図4参照

クルタイムが2~4時間と長く、一つの型と炉を用いる場合、1日に数個しか造れない。作業費と設備費が材料コストに増して大きく、結果的に成形品の単位質量当たりのコストは、数万円/kgになってしまう。

成形時間を劇的に短縮したRTM

そこで、BMW社は材料コストを下げるため、炭素繊維のサプライチェーン自体から再構築した。まず、炭素繊維の元となるPAN(ポリアクリロニトリル)繊維は、三菱レイヨンとドイツSGLグループの合弁会社が日本で生産する。このとき、繊維を「5k」と呼ぶ、5000本の太い束で生産することでコストを下げた。さらにPAN繊維を焼いて炭素繊維にする工場をBMW社とSGLグループは米ワシントン州に新設。水力発電による非常に安価な電気料金で繊維

を造っている。

成形方法も自動化を進めた。従来の手作業中心の成形方法でなく、「RTM(レジン・トランスファ・モールディング)」という新しい方法を採用した。RTMは成形時間を7~90分と大幅に短縮できるのが特徴だ。RTMは生産数が多くなるほど、部品当たりの加工費を減らせるため成形品のコストを一桁下げられる。材料メーカーの意見を総合すると、従来方法に対して1/5~1/7程度、金額で言えば3000~5000円/kgを狙えるとみている。

炭素繊維の世界生産量は2011年に3万5000tといわれ、そのうち自動車用は2000t前後に過ぎない。ただし、今後3への採用だけでなく、量販車への適用は増えていき、2015年には2倍以上の5000tに達しそうだ(図3)。

例えば、ドイツDaimler社は、スポ

ーツカーの新型「SL」の後部トランクリッド内側にRTMで成形したCFRP部品を採用した。すでに、東レとのCFRP成形に関する合弁会社Euro Advanced Carbon Fiber Composites社をドイツに設立済みで、Mercedes-Benzブランドが掲げる「全モデルでボディ質量を10%軽量化する」という開発目標の達成にCFRPを活用していく方針だ(表)。

日本車ではトヨタ自動車のスーパーカー「レクサスLFA」がキャビン骨格をCFRPとし、RTMも3部品に採用した。LFAは500台の限定車だが、確立した技術は、今後高級車に適用される可能性が高そうだ。

RTMは成形時間を短くできるのが特徴だが、東レはさらに成形時間「5分」を目標に現状の7分から縮めようとしている。大幅な短縮だが、それでも自動車生産のタクトタイムが1分程度なのに比

CFRPはなぜ軽くできるのか

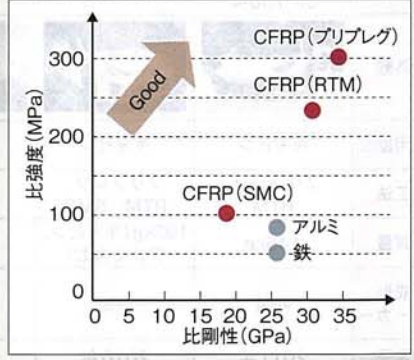
CFRPで車両を軽くできるのは質量当たりの強度、剛性が高いからである。まず、炭素繊維単体では引っ張り強さが、5GPa(500kgf/mm²)程度と鉄の10倍以上ある。一方、弾性率(金属におけるヤング率)は235GPaと鉄と大きく変わらない。ただし、密度は鉄が7.8、炭素が1.3のため、それぞれの値を密度で割った比強度、比剛性は炭素繊維がFeを大きく上回る。

炭素繊維をCFRPにすると、樹脂を含有し、さらに繊維を積層する際に向きを変えて並べるため、材料の強度、剛性は炭素繊維単体よりも大幅に下がる。しかし、その分を見込んでも、図Aに示すように、

プリプレグ、RTMの比強度はFeやAlを何倍も上回り、比剛性も高い。

軽量化効果は適用部位によって異なるが、外板などの張り剛性が求められる部位に使った場合、剛性を同じにすると仮定して質量は1/3にできると試算されている。これは東京大学の高橋氏らが開発中のPPを炭素繊維で強化した場合。張り剛性は比弾性率(曲げ)×板厚の3乗で計算する。このCFRPの曲げ弾性率は鉄の1/8であるため、鉄に対して厚さは2倍にする必要があり、体積は鉄の2倍になる。密度はCFRPが1/6であるため、結果的に質量を1/3にできる。

CFRPの原料にはPAN(ポリアクリロニトリル)系繊維とピッチ系繊維がある。一般的な前者では、数千本を束にしたPAN繊維に耐炭化処理を施し、焼成炉で焼いて、炭素繊維とする。



図A 主なCFRPの比強度、比剛性(トヨタ自動車での比較)

べて長い。そこで、より成形時間を短縮できる熱可塑性樹脂を使ったCFRPへの期待が高まっている。

1000円/kg狙う熱可塑性CFRP

熱可塑性CFRPは、炭素繊維に含浸させる樹脂を、熱硬化性のエポキシ樹脂から、PP(ポリプロピレン)、PA(ポリアミド)といった熱可塑性樹脂に転換するもの。プレス成形などにより1分程度の成形時間で部品を造ることを目指す(図4)。

東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻教授の高橋淳氏は、「熱可塑性CFRPとすることで1分で成形できれば、年間20万台規模の量産に対応できる。設備償却費が大幅に下がるため、成形品コストでは1000円/kgが視野に入る」と主張する。これには、もちろん炭素繊維のコストを現状の半分程度にするという条件が付くが、RTMの成形品コストをさらに数分の1にできる可能性がある。

自動車を意識した熱可塑性CFRPの開発も加速している。例えば、帝人はプレス成形で1分以内に成形する技術を確認し、2011年にその技術を使って軽自動車クラスの車両骨格をわずか47kgとした試作車を公開した。Fe製とした場合に比べ、質量は1/5程度になるという。

さらに、同社は2011年12月には米GM社と熱可塑性CFRPの共同開発契約を結んでおり、2015年ごろに量産車に適用したいとする。

帝人以外では、NEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構)の「サステナブルハイパーコンポジット技術の開



図4 CFRPの種類と期待される工法

熱硬化性および熱可塑性CFRPを早く、安く作る技術が注目されている。

発」プロジェクトで、連続繊維と短繊維の両方の強化繊維を用いた熱可塑性CFRPを東京大学の高橋氏らが開発中だ。東レや三菱レイヨンが参画して、1分以内に成形する技術を確認した。

このように、CFRPでは、実績のある材料を使いながら、RTMなどで成形時間を短縮することにより成形品コストを数分の1にする“現実解”の適用が始まった。さらに成形品コストを大きく下げるため、1分以内の成形が可能となる熱可塑性CFRPを“理想解”として目指していくことになる。

CFRPを早く、安く造る方法は、樹脂の種類、強化繊維の形態などによっ

て図4のように非常に多岐にわたる。熱硬化性CFRPでは、RTMに加えて、三菱レイヨンが開発したプリプレグを熱プレスする方法などが成形時間を短縮する技術として有望だ(Part2参照)。

一方、熱可塑性CFRPでは、いかに連続繊維を使えるようにするか、どれだけ早く成形できるかがかぎとなる。前者では、NEDOのプロジェクトで東大らが、樹脂と連続繊維をテープ状に一体化した中間基材を利用して各種の成形品を造る技術に取り組んでいる。後者では帝人などが繊維をランダムに混ぜたシートを熱プレスする工法が目される(Part3参照)。

RTMで成形コストを1/5~1/7に プリプレグを早く硬化させる方法も

強度、剛性に優れる熱硬化性CFRPを高速に成形できるのがRTM（レジン・トランスファ・モールディング）だ。樹脂を型に後から注入する、強化繊維に織物を使わないという工夫で低コスト化を図る。月産数千個の生産が可能で、成成品コストも従来の1/5~1/7にできる可能性がある。BMW社の「i3」、トヨタの「レクサスLFA」もRTMを積極的に使う。一方、従来のプリプレグを使いながら5~10分で成形する技術も登場した。

レースカーやスポーツカーで最も実績があるのは、プリプレグを積層し、オートクレーブで硬化させる熱硬化性CFRP（p.47の別掲記事参照）。例えば、日産自動車「リーフ」のモータ、減速機をミッドシップに搭載したデモンストラクション用のEV（電気自動車）レースカー「リーフNISMO RC」も、キャビンからカウルまでほとんどをプリプレグで造っている（図1）。

同車を製作したNISMOは、ツーリングカーレースであるGT選手権の「GT500」クラスに出場する「GTR」のCFRP製キャビンも同様の方法で造る。リーフNISMO RCではGTカーで使う、

プリプレグの間に挟むハニカムパネルやインサート部品を極力取り除き、構造をシンプルにして低コストでキャビンを製作した。

GTカーに対して大幅に安くできたというが、それでもキャビンの製造コストは数百万円のレベル。クルマ1台が買ってしまうほどだ。モノコックの質量は150kgなので、単位質量当たりのコストは数万円/kgと非常に高い。

オートクレーブを使わない

従来の方法ではプリプレグを積層する手間や、オートクレーブを使った硬化時間の長さがコストを押し上げる。

このため、低コスト化のために積層工程やオートクレーブによる硬化工程を省いた工法が工夫されている。

一つは、航空機部品など大型で炉に入らない部品を成形するために開発されたVaRTM（Vacume assisted RTM）、もう一つはRTMである（図2）。VaRTMは、炭素繊維を型内に積層し、型をバッキングフィルムで包んで真空引きする点はプリプレグの成形と似ている。ただし、オートクレーブを用いず真空引きした負圧で樹脂を繊維に含浸させ、型を加熱して硬化させる。

一方、RTMは上下の型でプリフォーム（シートを積層して最終形状に賦（ふ）

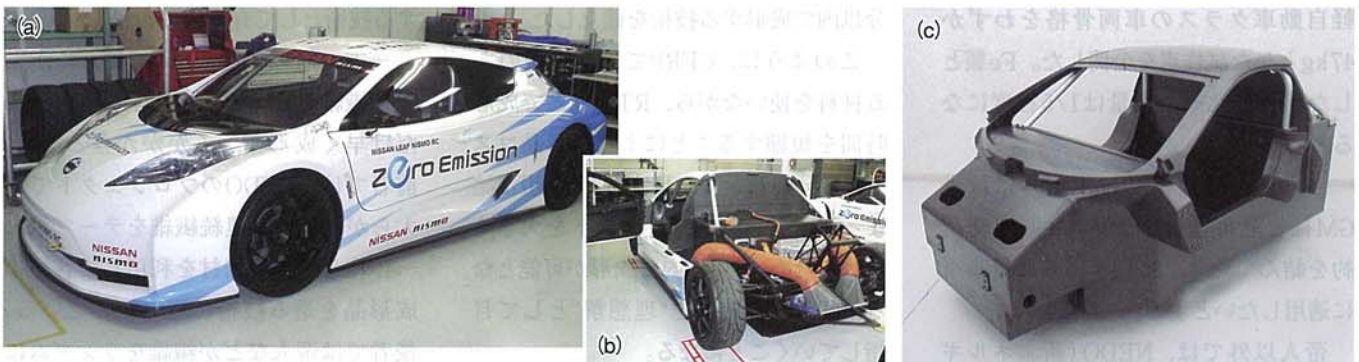


図1 日産自動車「リーフNISMO RC」

(a) キャビンとカウルにCFRPを使用し質量は925kgと量産車より495kg軽い。(b) モータはミッドシップに搭載。(c) モノコックはプリプレグで成形、上部はロールオーバーで補強している。運転席背後にLiイオン2次電池を積む。

形し仮接着したもの)を挟み、型内に樹脂を注入して硬化させる。

富士重工業が2011年に発売した400台の限定車「インプレッサWRX STI tS」のルーフはVaRTMを使った〔図3(a)〕。少量生産ではRTMに比べて上型が不要なため型費を安くできるという。

同ルーフでは、繊維を格子状に織った「平織り」のシートを4層重ねて樹脂を注入する。金型を30分ほど加熱し硬化させた後、後工程の熱処理を経て塗装する。成形は東レが担当し、炭素繊維には「T300」と呼ぶ引っ張り強さ3.5GPaの汎用品を使った。繊維は3000本の糸を一束とした「3k」である。

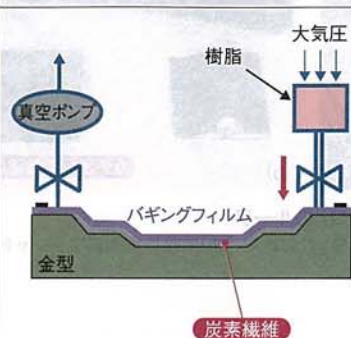
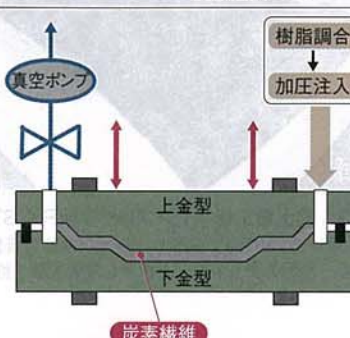
成形方法	VaRTM	RTM
LFAでの実績	ルーフ	フード、フロア など
工程	賦(ふ)形→バギング→真空吸引→樹脂注入	賦(ふ)形→真空吸引→樹脂注入
成形イメージ		
設備費	片面型・真空設備(◎)	両面型・樹脂注入装置(△~○)
成形サイクル	230分(x~△)	45分(△~○)

図2 VaRTM (Vacume assisted RTM) とRTM (トヨタ自動車での比較)

プリプレグとは?

CFRPの素材として一般的なプリプレグは、炭素繊維にエポキシ樹脂を含浸させた粘着性のあるシートである。ただし、そのままでは扱いにくいので、表面と裏面に樹脂および紙製のはく離紙が付いている〔図A(a)〕。1枚の厚さは0.1~0.5mmと薄いため、所定の形状に切断した後で、目的の強度・剛性に合わせて積層するのが一般的だ。

オートクレープで成形するには、まずはく離紙を剥がして型に張り込む。通常、繊維の方向を0度、90度、+45度、-45度と変えて、4層を1セットにするケースが多い。積層する際、樹脂を軟化させて型形状に沿わせるため、ヒータなどで加熱しながら作業することもある〔図A(b)〕。

プリプレグを張り込んだ型は、バギングフィルムで包んで真空引きし、プリプレグを型に密着させる〔図A(c)〕。そのままオートクレープと呼ぶ、加熱・加圧炉に入れて3~5気圧、130℃前後に加熱する〔図A

(d)〕。成形時間は昇温、保持、冷却を含めて2~4時間程度。オートクレープから出してフィルムを外し、型から成形品を取り出すと完成する。

プリプレグに含む炭素繊維は織物(格子状の模様を持つ平織り、綾織りなど)もしくはUD(一方向)のシートが使われる。樹脂を含浸させる工程があるため、材料コストは高めた。



図A プリプレグ+オートクレープ成形の手順

(a) はく離紙のついたプリプレグ、(b) カットして型に積層、(c) バギングフィルムで包み、真空引き、(d) オートクレープで加熱・加圧。(写真提供: 東京R&D)



図3 富士重工業「インプレッサWRX STI tS」のルーフ
(a)東レのVaRTMで成形し、ルーフ本体の質量は5kgにできた。(b)前後は樹脂製ワッシャを挟んでねじで固定し、左右のナット部はカチオン電着塗装を施した。

ルーフでは張り剛性が重要だ。炭素繊維は単体では曲げ剛性が高いが、繊維の方向を変えて積層するCFRPでは一方向当たりの剛性が落ちてしまう。そこで、鉄(Fe)製のルーフの厚みが0.7mmなのに対し、CFRP製ルーフは1.6mmと2倍以上に厚くして剛性を確保した。質量は10kgから6kg(ルーフ本体は5kg)に4kg軽くてきた。

ボディには接着とねじで固定する。ねじ止めは前後、左右とも8点ずつ。工夫したのはFeとCFRPの接触部における電食を防ぐため、ウレタン製ワッシャで絶縁、ステンレス製ねじを使う、インサート部品にカチオン電着塗装を施すなどの対策を採ったことである〔図3(b)〕。

量産性の高いRTM

VaRTMは少量生産なら型費を低減できるものの、成形時間が4時間と長い。インプレッサのルーフは補修部品として買うと35万円もする。原価を半分としても成形品の単位質量当たりのコストは3.5万円/kgとプリプレグとそれほど変わらない。

よりコストを下げられる方法として有望なのがRTMだ。RTMは上下の型、樹脂注入機が必要となり、初期投資は高いものの成形時間は7~90分と早い。成形時間を短くできれば、1部品当たりの設備償却費を大きく下げられる。

すでにMcLaren社のMP4-12C、イタリアLamborghini社の「Aventador LP 700-4」がキャビン成形に使ってい



図4 BMW社「i3」の試作ボディ
Liイオン2次電池とサスペンションを取り付けるAl合金製シャーシの上に、CFRP製ボディを取り付ける。



図5 ドイツSGLグループの多軸基材
90度方向が異なる繊維を重ねてステッチして一体化している。BMW社にも同様の材料を供給する。

るほか、年間1万台以上生産すると見られるBMW社の「i3」もRTMを採用する。

RTM成形品のコストをi3で試算してみる。車両価格を400万円とすると、ボディは100万円以下、例えば50万円などと想定できる。同車はEVとして航続距離130~160kmを達成するといひ、そのためには容量20kWh程度のLiイオン2次電池が必要だ。電池だけで100万円以上のコストがかかり、必然的にボディに割ける金額はそれほど多くない。キャビンの質量をFe製の200kg程度の半分である100kgと仮定すると、キャビンが50万円なら成形品コストは5000円/kgのレベルになる。

同車があえてキャビンをCFRPにしたのは、ボディ質量の軽さがもう一つのコスト増加要因であるLiイオン2次電池の搭載量を減らすのに効くからだ。i3では電池の保護フレームを兼ねたAl合金製ラダーフレームの上に、CFRP製キャビンが載り、両者をねじと接着で留める(図4)。ボディが軽ければ、その分電池の容量を減らせる。

多軸基材で材料コストを下げる

材料コストではプリフォームに使うシート、そして炭素繊維やその原料ま



図6 RTMの成形工程
(a)ロールから炭素繊維を引き出す、(b)プリフォームを成形する型の上に繊維をセット、(c)接着剤を塗布して型を閉じプリフォームを固めてトリミングする、(d)プリフォームをロボットでRTM成形機に投入。



図7 i3のサイドパネル
小さな部品に分けてプリフォームを作成し、重ねしをステープラーで留めて固定。RTM成形で一体化する。



図8 ウィンドー周りに組物のプリフォームを使う
写真では見えないが、ウィンドー周りのルーフおよびフード近くの水平部材に罫目模様となる組物を使った。

でサプライチェーンを見直した。RTM成形のほとんどの部位に採用したのが多軸基材である。この素材は、繊維が一方に並び、それを白い糸でステッチしたものである。

多軸基材はUD(一方向)のシートを90度ずらして積層し、ステッチで縫い合わせ、X軸、Y軸方向の強さをそろえている。CFRPでは「平織り」の織物が使われることが多いが、織らなくてよいUDのシートの方が安くできる(図5)。

糸の製造工程も見直した。BMW社向けの炭素繊維は、三菱レイヨンとドイツSGLグループの合弁会社が原料のPAN(ポリアクリロニトリル)繊維を製造する。PAN繊維はBMW社とSGLグループの合弁工場で焼いて炭素繊維とするが、あらかじめ太い「5k」(5000本)の束とすることでUDシートをより低コストに造っている。

中空のプリフォームをRTMに使う

多軸基材を使ったRTMの例として、以前からCFRPを採用しているBMW社「M3」のルーフ成形工程を見てみる。まず、ロールをプリフォームの成形機にセットして繊維を引き出す[図6(a)]。次にプリフォームを成形する型の上に繊維をセットする[図6(b)]。このとき、積層するシートの各層を仮付けするために接着材を塗布しておく。次に型を閉めて加熱し、ルーフの形状にプリフォームを固め、型からはみ出た部分を



図9 先代「M6」のバンパービームも組物のプリフォームを使う
成形はSGL Kumpers社が担当。左からAugust Herzog社の編み機、組物のプリフォーム、RTM成形品。



図10 トヨタ自動車「レクサスLFA」のホワイトボディ
質量は193kgで、そのうちCFRPが65%、Al合金が35%を占める。

サイドパネルの成形品(図7)では、プリフォームの重ねしりをステーブラーで留めている。小さなプリフォームを束ね、大きなプリフォームとして型にセットするようだ。一方、リアフェンダーなどは複数の部品を成形し、それを接着して構成する。

多軸基材以外では中空形状のプリフォームを適用した。写真では見えないが、ウインドー周りに縄目模様のプリフォームを使った(図8)。この部分には三つ編みの原理を利用して、ロープや組紐を造る組物技術を適用した。中空形状を造るには、消失鋳型(ロストワッ

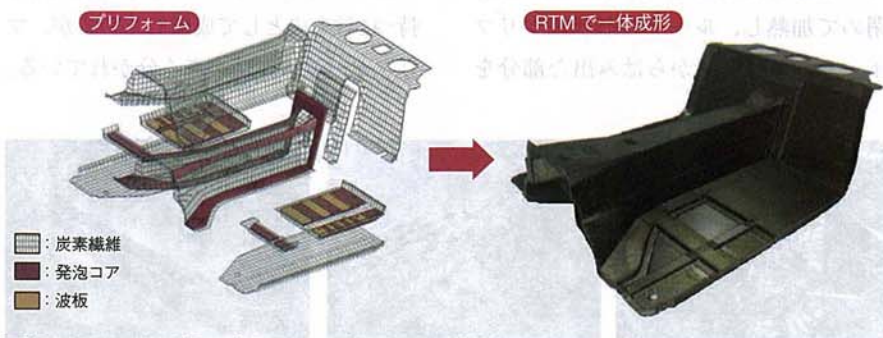


図12 フロアは10個のプリフォームをRTMで一体化

設計当初は6部品に分かれていたが、RTMで一つの部品に統合。型を削減したほか、作業工数を80%、接着組み付けに関わる機械加工を50%減らした。成形にはRTMに射出圧縮を組み合わせる。



図11 プリプレグ、RTM、SMCを使う

大部分がプリプレグだが、フロア、Aピラー、クラッシュボックスはRTM製。後部部品はSMC製。

クス)で作ったマンドレルを巻くように繊維を編み、RTM成形後マンドレルを溶かす。

同技術は、BMW社の先代「M6」の前後バンパービームにも使われた(図9)。プリフォームの成形は、SGLグループのドイツSGL Kumpers社が担当し、編み機はドイツAugust Herzog社製である。

LFAは3カ所にRTMを使う

国内メーカーではトヨタのレクサスLFAが、初のCFRP車として登場した。当初はアルミニウム(AI)合金製で設計

していたが、途中でCFRP製に変更、キャビンはCFRP、シャーシ部分はAl合金製である。ホワイトボディでは質量が193kgとAl合金製に比べて約100kg軽くできた(図10)。

キャビンの製造には三つの成形方法を使い分ける。サイドシルや前部バルクヘッドなどの中空構造を持つ主要骨格はプリプレグ、前部のクラッシュボックスとAピラー、フロアはRTM、そして後部の部品は炭素繊維で強化したSMC(シート・モールディング・コンパウンド)である(図11)。

キャビンは各方法で成形した部品に接着剤を塗って治具にセットし、炉の中で60分硬化させて一体化する。外板は、前部フードをRTM、ルーフをVaRTMのCFRPとした。

主要骨格にプリプレグを用いたのは、少量生産であることと、1次構造物として十分な強度を持たせるため。今回、プリプレグの繊維には脱気性に優れ、高強度化もできる多軸基材を適用した。また、樹脂を繊維束に完全に含浸させるのではなく、半含浸状態とした「セミ

プレグ」と呼ぶ材料を用いた。同材料は基本的に、オートクレーブを用いなくても高品質が得られる。

RTMは豊田自動織機が開発に協力し、Vfと呼ぶ炭素繊維含有率(質量%)を55%程度に高めたのが特徴。プリプレグの60%に近い比率を実現した。フロアパネルは設計当初、部品を6個接着して構成していたため、多くの型が必要だった。これをRTMで一体成形し、部品点数と型数を減らした。

フロアのプリフォームは10個ある(図12)。各プリフォームは専用の型で部品ごとにサブアセンブリし、予備成形する。これらのプリフォームと、側突時の衝撃エネルギーを吸収するための波板状部品、波板の中空部に入れる発泡コアを型にセットし、RTM成形機でエポキシ樹脂と硬化剤を注入する。成形時間は45分程度である。

プリフォームには多軸基材を使った(図13)。現在トヨタ自動車有機材料技術部長で、レクサスLFAの開発を担当した小澤学氏は「コストが安く、織物と違って繊維が直線状になるため強くできるのが特徴」とする。

Aピラーのプリフォームに使った中



図13 RTM用の多軸基材
BMW社と同様に、90度方向が重なる繊維を2枚重ねてステッチしている。

空の組物は村田機械の編み機によって生産する。断面形状を変えられ、さらにマンドレルを往復させることで層を重ねて厚くできる。LFAのAピラーの最も厚い部分ではマンドレルを6往復させ、12層とした。Aピラーは図14のように平板状のブラケットとともにRTMで同時成形する。この際、平板には外板で余った端材を使い、高価な炭素繊維を有効利用している。

クラッシュボックス用に新たなプリフォームも開発した(図15)。豊田自動織機が開発した3次元織物である。2次元のシートではなく、繊維を積層した上でZ軸方向にも糸を通す(図16)。



図14 プリフォームを組物で作ったAピラー
中空形状のプリフォームを組物で作製。端材を活用したブラケットとRTMで一体成形する。

特徴は衝撃吸収エネルギーに優れること。CFRP製クラッシュボックスは、比強度が金属に比べて大きく、また金属と違ってつぶれ残りが少ないことが特徴。東レによればCFRP製はFe製に比べて単位質量当たりで2.5倍吸収エネルギーが大きいという。今回、豊田自動織機が開発した織物は、破壊時に炭素繊維の層間がはく離することがなく、2次元のものより吸収エネルギーが1.2~1.5倍になるという。

RTMを高速化する東レ

成形コストを削減するため、RTMの高速化に取り組むのが東レだ。LFAの



図15 3次元織物とクラッシュボックス
クラッシュボックスは先端の面積が小さく、徐々に大きくすることで、先端からつぶれるように制御。

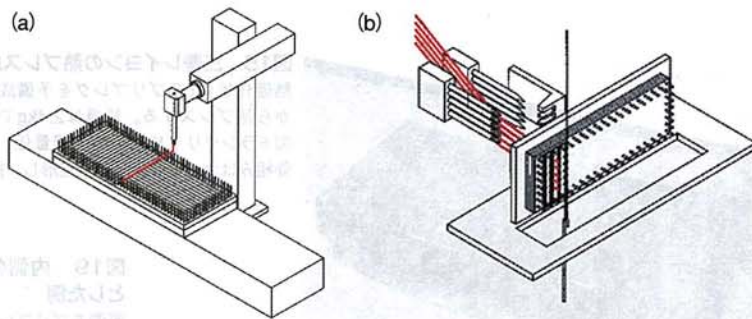


図16 3次元織物の織り機
(a)四方に立てたピンに巻き付けるようにシートを作製する装置と、(b)厚さ方向に糸を挿入する装置で構成する。厚さ10mm以上の織物を造れる。



図17 東レのCFRP試作車「TEEWAVE AR1」

(a)全長3975×全幅1766×全高1154mmで、車両質量は846kg。そのうちLiイオン二次電池は220kg。
(b)キャビンは三つのRTM部品(フロア、インパネ、後部のパネル)で構成し、質量は45kg。

場合成形時間は45分であったが、東レはすでに7分まで短縮したとし、最終目標として5分を目指す。高速化によって成形コストを下げられれば、単位質量当たりのコストを1/5~1/7にすることが現実味を帯びてくる。

同社は英Gordon Murray Design社と協力して、CFRPのコンセプトカー「TEEWAVE AR1」(図17)を製作しており、キャビンをRTMで造った。キャビンはわずか3部品で構成し、質量を45kgとFe製より53%軽量化しながら、ねじり剛性は1万2000N・m/度と通常車並みを確保できた。

東レはRTMの高速化に長く取り組んでおり、以前に成形時間10分を実現した際は、プリフォームの配置が1分、樹

脂の注入が3分、樹脂の硬化が5分、脱型が1分としていた。律速段階だった硬化時間を5分に縮めるために硬化剤を変更した。従来のアミン系硬化剤に代え、注入初期はゆっくり固まり、硬化が進むと指数関数的に重合するアニオン重合系硬化剤を開発した。

ここまでプリプレグより生産性を上げたRTMの応用が拡大してきたことを紹介したが、他社と異なるアプローチを採るのが三菱レイヨンである。同社は、従来のプリプレグを改良して高速成形する技術「PCM(Prepreg Compression Molding)」を開発した。プリプレグを熱プレス成形するもので成形時間が5~10分と短い。RTMと同等のコストを実現できるとみる。自動車メ

ーカーにサンプルを供給しており、早ければ2年程度で実用化しそうだ。

PCMでは最初にプリプレグを加熱し、最終形状に近づけるための予備成形をする。その後、本型に投入し、熱プレス成形する。改良のポイントは硬化時間の短い樹脂を開発したことだ。

試作したトランクリッドは、外側をPCM、内側をプリプレグのオートクレーブ成形で構成し、同形状のAl合金製より40%軽くできた(図18)。厚さは1.1mmで、UDのプリプレグを5層重ねた。非常に薄くできた理由は、UDの方が織物より強度に優れることと、繊維の積層方向を最適化したことによる。

PCMでは成形圧力が3~10MPaとRTMの0.5~5MPaより高く、RTMに比べて成形品表面の平滑性が高まるという。圧力を2MPa以上に上げると、表面に空隙などが発生しにくく、塗装の前処理などを少なくできる。

PCMは比較的単純な形状に向いており、リブを立てたり、深く絞った形状は実現しにくい。こうした場合、同社は炭素繊維を用いたSMCとの組み合わせを考えている。型内でSMCと一体成形したり、中空部を造る技術も開発している(図19)。



図18 三菱レイヨンの熱プレス成形品
熱硬化性のUDプリプレグを予備成形してから熱プレスする。質量は2.4kgでAl合金製トランクリッドより40%軽量化。内側の骨組みはオートクレーブで成形し、接着。

図19 内側の骨組みをSMCとした例

表側をプリプレグ、内側をSMCとし、型内で同時成形し一体化した前部フードの例。SMCは形状の自由度が高く、複雑な形状に適する。



材料価格の低減と“1分成形”がかぎ 年産20万台規模への採用目指す

CFRPを年産20万台規模の量産車に適用するには部品コストで1000円/kgが目標となる。部品の質量を1/3にすると考えれば、300円/kg程度の鋼製部品の置き換えが可能になるからだ。この画期的なコスト低減には炭素繊維の価格低下、成形コストの低減が必要だ。このうち成形コストの低減には成形時間の短縮が最も効果的だ。熱可塑性CFRPを使って1分以内に成形できる技術の開発に各社が取り組んでいる。

熱硬化性CFRPは、RTMやプリプレグのプレス成形で成形時間5~10分を目指しているが、射出成形ほどには短くできずコストも高い。自動車生産のタクトタイムは1分程度であり、量産車に適用するには、成形時間をこれに近づけることが求められる。

東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻教授の高橋淳氏は「Vf(炭素繊維の含有率)、樹脂の種類、成形時間などのパラメータを変えて部品コストを試算すると、炭素繊維の価格低下と成形時間の短縮が最もコストに影響する」という。

炭素繊維の価格は現在1kg/2000円

する。しかし、今後中国などでの生産が増え、価格競争が激しくなること、これまでの製造工程を革新する生産技術の開発も始まっていることから、中長期的には1000円/kgも夢ではない。

一方、成形時間の違いはコストに大きく効く。例えば1億円の設備を入れて年間20万個を生産すれば、1個当たりの設備償却費(1年で償却すると仮定した場合)は500円になる。この生産量を実現するには、1日11時間、月間25日稼働で、成形時間を1分に縮める必要がある。これがもし5分だと、償却費は2500円にはね上がる。

1分で成形できるCFRPとして注目さ

れるのが熱可塑性樹脂である。加熱すれば軟化し、冷却すれば固化する特徴を生かし、加熱したシートを温度の低い型でプレスすれば瞬時に成形できる。

メリットはほかにもある。樹脂の価格が低いこと、部品同士の接合が容易なこと、リサイクルしやすいこと、じん性を高められることだ。現在、樹脂として有力視されているPP(ポリプロピレン)とPA(ポリアミド)は、エポキシよりも安価。部品同士も接着だけでなく、部分的な加熱・溶着で接合できる。

ただし、課題もある。最もやっかいなのはポリマと炭素繊維の濡れ性である。炭素繊維の表面とポリマの接着性

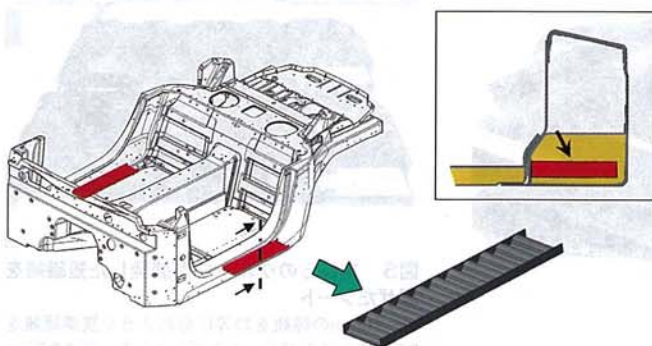


図1 トヨタ自動車「レクサスLFA」の衝撃吸収材
連続繊維を含む熱可塑性エポキシをプレス成形して波板を作製。変位量と同じとすると、熱硬化性CFRPと比べて衝撃吸収能力を30%高くできた。



図2 帝人の熱可塑性CFRPの試作車
下部のプラットフォームは樹脂にPA(ポリアミド)、ピラーから上部はPP(ポリプロピレン)を用いる。(写真:山本琢磨)



図3 骨格の質量は47kg
骨格は大人2人で持てる程度の軽さである。(写真：山本琢磨)

が悪く、複合材料としての特性を出しにくい。そこで、炭素繊維表面の改質技術、PPの末端を変性させる変性剤が開発されている。また、ポリマの粘度が高いため、連続繊維に樹脂を浸すのが難しく、Vfを高めにくいのも課題。熱硬化性のプリプレグなら65%程度まで高められるのに対し、熱可塑性では20~50%が限界だ。

LFAで実現した熱可塑性エポキシ

熱可塑性CFRPがクルマで使われ始めた例もある。レクサスLFAは、サイドシル内部の衝撃吸収用波板に熱可塑性エポキシを使ったCFRPを採用した

(図1)。エポキシは熱硬化性だが、硬化剤の配合を工夫することで、重合後に熱可塑性を示すようにした。採用の理由は、衝撃吸収性能が高く熱硬化性CFRPより成形品を小型化できるため。ただし、残念ながら1分では成形できない。

この波板は2段階で成形する。あらかじめシート状の中間基材を造り、それをプレス成形する。中間基材の造り方は、連続繊維を敷き詰めた上に液状の樹脂と硬化剤を撒き、それを熱プレスするというもの。できた板は150℃程度で軟化するため、温めて端から徐々にプレスしていくことで波板にする。同部品はアセトンに3日浸漬することで樹脂と繊維を分離でき、将来リサイクルが必要になった場合も有利だ。

材料を供給するナガセテムテックスは、RTMで生産できる熱可塑性CFRPも開発中。重合前のモノマをRTMの型内に注入し、重合させてPA6とすることで連続繊維の熱可塑性CFRPを造ることができる。2分で固まるため、成形時間も短くできる。

熱可塑性CFRPで車両を試作

プレスで熱可塑性CFRPを1分以内で成形する技術は、帝人が独自に開発しているほか、NEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構)の「サステナブルハイパーコンポジット技術の開発」プロジェクトの委託先である東大らも取り組んでいる。

帝人は米GM社と共同開発契約を結び、2015年をめどに熱可塑性CFRPの実用化を目指す。また、骨格を熱可塑性CFRPとした試作車を作成し、3000km程度走行させた(図2)。同社の狙いは、「生産性に優れる熱可塑性CFRPで、車両の中で最も重い骨格を軽量化し、量産車に適用する」(帝人複合材料開発センター所長の石原敏雄氏)こと。何十万円、何百万円というCFRP成形品を一桁、二桁安くしたいとする。

試作したEVの車体は骨格のみで47kgと軽い(図3)。試作車では、厚さ1.5mm程度で非連続炭素繊維をランダムに配置した熱可塑性CFRPシートを、プレスでコの字断面のはりや、リブを付けた板に成形し、それらを熱や超音

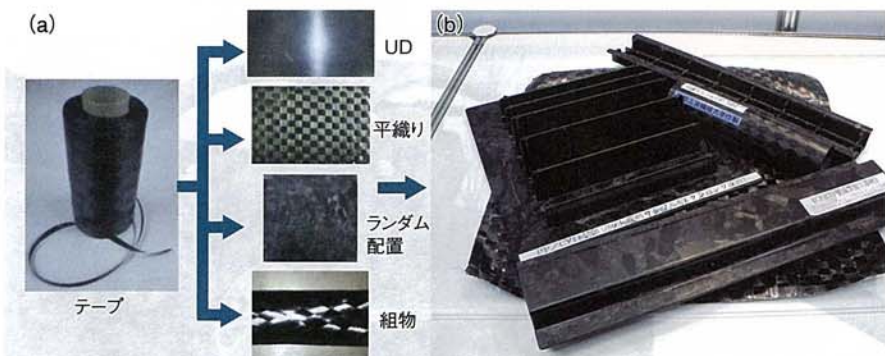


図4 三菱レイヨン、東洋紡らのグループが開発した技術

(a)炭素繊維の周囲にPPを巻いた幅15mmのテープを造る。このテープを並べる、織る、50mmにカットして積層、編むことでシート、中空品の中間基材ができる。(b)上の成形品はカットしたテープで構成したプレス品で、60mmのリブを立てられる。中空品は京都工芸繊維大学が作製。



図5 東レらのグループが開発した短繊維を混ぜたシート

5~10mmの繊維を均等に分散させた炭素繊維をPPで挟みこんだシートをプレスした。厚さ0.7mmの鋼板と同等の剛性を持つ成形品は315g(厚さ1.8mm)と、ガラス繊維強化品の470g(厚さ2.5mm)より薄くて軽い。

波で溶着している。

車両は下部のプラットフォームと、上部の客室を構成する部分で材料を変えた。下部は、汎用樹脂の中で強度の高いPAのCFRP、上部は自動車でも用いられる安価なPPのCFRPだ。通常の射出成形に加える3~5mmの短繊維よりはるかに長い繊維を入れている。

連続繊維でない熱可塑性CFRPの強度・剛性を補うため工夫したのが、プレスしたはりを井桁状に組み合わせた点。前後方向に通したはりは4本。左右のサイドシルおよびホイールアーチを構成する部分で2本、車両中央に配置した比較的まっすぐなはりは2本である。サイドシルは、特に剛性が必要なため、コの字断面のはりを2本重ね合わせ、内部に平板を挟み込んだ。最も厚い部分では、4.5mmの肉厚となった。同様にフロア部も左右に4本のクロスメンバを通した。フロア部分は2重構造で、中央に電池を配置する。

連続繊維のテープを造る

東大らのグループは、三菱レイヨンと東洋紡を中心としたグループと、東レを中心とした二つのグループで、連続繊維を用いたCFRPと非連続繊維を用いたものの開発に取り組んでいる。

前者はまず、炭素繊維の周囲にPPを軟化させて絡ませ、樹脂と繊維を幅15mmに一体化したテープを作る。このテープを一方向に並べればUDのシートができるし、平織りすることも可能。また、50mm程度にカットしてランダムに配置して固めたシート、テープを組物にして中空構造とすることもできる(図4)。後は、中間基材をプレス

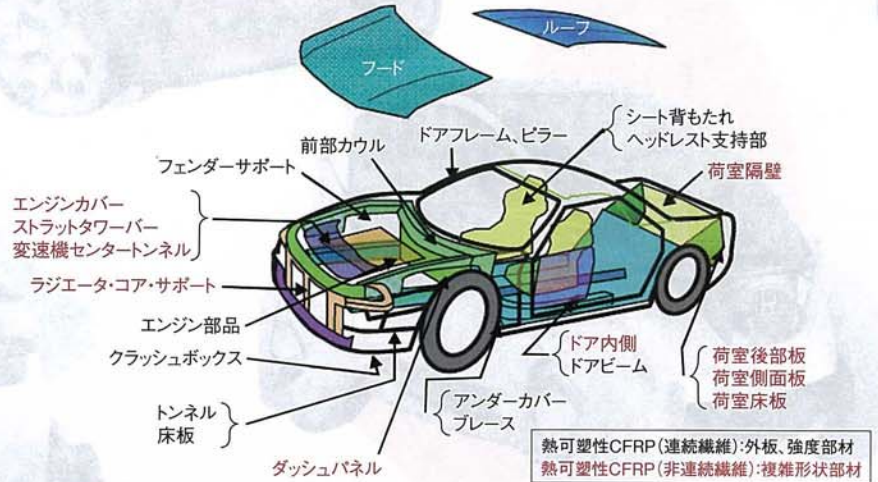


図6 熱可塑性CFRPの適用例

連続繊維および非連続繊維のCFRPを1380kgの車体に174kg分適用すると、車体質量を410kg(30%)軽くでき、燃費は22.5%向上する(東京大学の高橋淳氏による試算)。

成形するだけだ。連続繊維のシートではあまり複雑な形状は成形できないが、カットしたテープを固めたシートでは、60mmの高さのリップを立てられる。

一方、東レらは5~10mmの短繊維を均等に分散させたCFRPのシートを開発中。(図5)。東大の高橋氏は、熱可塑性CFRPの適用部位を二つに分けて考えている。短繊維を用いたCFRP

は流動性に優れるため、室内品の板やエンジンルームの部品など複雑形状に適する。一方、連続繊維を用いたCFRPは強度・剛性に優れるため、構造部材や外板への応用を想定する(図6)。

高橋氏はこれらの材料技術、成形技術に加えて材料コストの低下などが実現するのは2019年程度と見ており、本格的な量産はそれ以降になりそうだ。④

CFRPはもっと軽くなる

CFRPでは繊維の方向をなるべく均等に配置して擬似的な等方性を実現することが多い。しかし、繊維の積層をより最適化したほうが軽くできる可能性がある。

CFRP部品の生産は経験や勘に基づく場合が多く、異方性材料の解析技術は十分に確立されていない。東京大学の高橋氏も、等方性材料を使って現在の車両構造を置き換える発想から、異方性材料を使って構造から見直せば、さらに質量を

1/3軽くできると考える。

ブリブregを何層にも張り込んでいくオートクレーブ成形などの積層設計に解析技術を生かしているのが東京R&Dである。異方性の解析ソフトに炭素繊維や樹脂の物性値データベースを組み合わせ、どのような積層が最も軽いかを解析する。強度と剛性を同等としながら質量を40%軽くした例、同等の強度と剛性、質量ながらコストを20%下げた例などがある。