



< 第 58 回 >

熱可塑 CFRP による自動車軽量化への挑戦 ～構造部材の軽量化・低コスト化を実現する“ LFT-D ” 技術～

名古屋大学ナショナルコンポジットセンター 特任教授 石川 隆司氏に聞く



石川氏と 3,500 トンプレスを中心にした研究開発設備群

世界的な CO₂ 排出規制導入と化石燃料の節約動向の影響を受けて、自動車の軽量化へのニーズが高まっている。これに応える有力な技術が、2017 年 2 月 15 ～ 17 日東京ビッグサイトで開催された国際ナノテクノロジー総合展・技術会議（nano tech 2017）の新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）ブース内の構造材料エリアに展示された。「熱可塑 CFRP による自動車軽量化への挑戦」と題して新構造材料技術研究組合（Innovative Structural Materials Association, ISMA）[1] の一員である名古屋大学集中研分室から出展された“熱可塑性 CFRP で試作したサイドフレームアクタとフロアパネル”である。同展示は来場者の関心を引くと共に、主催者からも高く評価され、「nano tech 大賞 2017」のプロジェクト賞（グリーンナノテクノロジー部門）を NEDO ブースとして受賞した [2]。受賞理由は「高張力鋼板やアルミなどこれまで自動車構造部材に用いられた材料の置き換えを目指す熱可塑炭素繊維強化プラスチック（CFRP）を開発した。自動車の大幅な軽量化につながる成果を賞す。」である。そこでこの度、本研究開発をリードしてこられた名古屋大学ナショナルコンポジットセンター（National Composites Center, NCC）[3] 特任教授の石川 隆司（いしかわ たかし）氏を訪問し、この展示を実現した“LFT-D（Long Fiber Thermoplastic-Direct）”技術^{註 1} の内容や特徴および将来展望等について伺った。

註 1）繊維長の比較的に長い炭素繊維と熱可塑樹脂の混練体を LFT-D と言い、これを高速プレス成形して軽量・低コスト構造部材を得る技術全体を LFT-D 技術と呼ぶ（詳細は第 4 章）。

.....



1. 名古屋大学 NCC：自動車用 CFRP 研究開発拠点

1.1 名古屋大学 NCC 設立の経緯

2011 年当時、名古屋地域には航空機・自動車材料の開発に特化した研究拠点がなかった。そこで経済産業省は同省の拠点形成事業として、名古屋大学に日本国内の他にはないような大型の研究設備を導入した研究開発拠点を設置し、この拠点から生まれる研究成果を起爆剤として日本の航空機・自動車産業を発展させようと考えた。

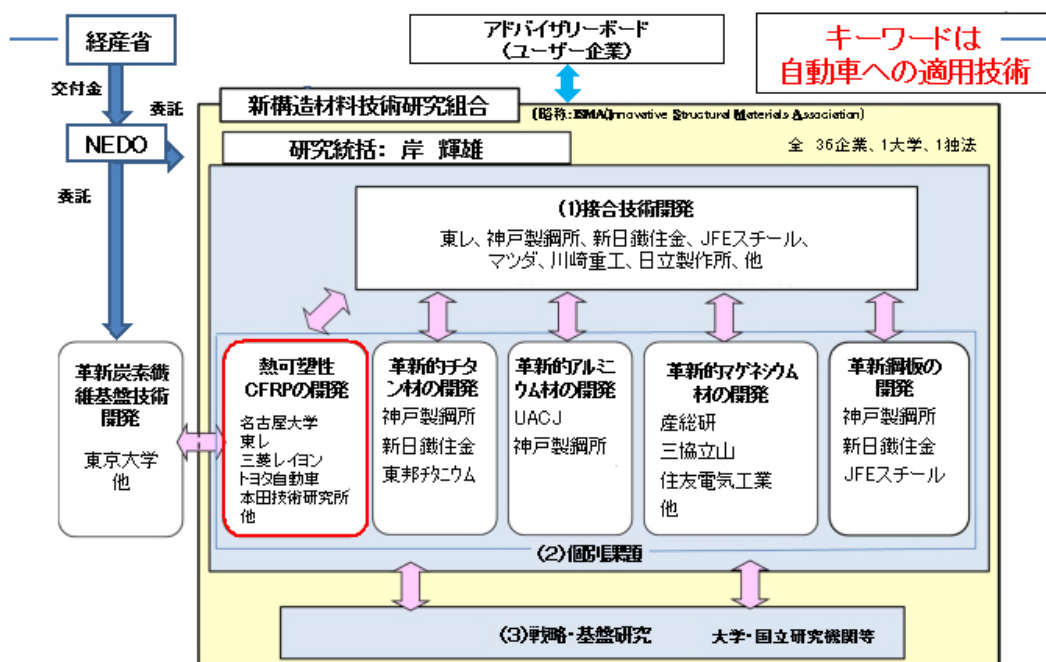
名古屋大学 NCC が組織上設立されたのは、JAXA（宇宙航空研究開発機構）で長い間航空機用複合材料の研究開発に従事していた石川氏が名古屋大学に異動した 2012 年 4 月で、2013 年 7 月には建屋、CFRP 成形用 3,500 トンプレス、連続的に LFT-D を製造する二軸押し出し機、大型連続加熱装置、耐雷・耐火・耐炎評価装置等の設備が完成し運転を開始した。研究対象は、当初は航空機向けと自動車向けとが半々を構想していたが、現在は、予算上からは自動車向けが 95%、航空機向けが 5% の割合になっている。ここにしかない設備を活用して、他者には出来ないリスクの高い製品に近いものを狙って研究開発を進めている。

1.2 研究開発テーマと推進体制

開設当初の2013年度は、経済産業省からの直接資金拠出を基盤として、東京大学と共に自動車構造用CFRTP（Carbon Fiber Reinforced Thermo-Plastics、炭素繊維強化熱可塑性プラスチック）の技術開発に取り組んだ。2014年度からはNEDOが、新しく設立した新構造材料技術研究組合（Innovative Structural Materials Association, ISMA）

[1]を経由してプロジェクト資金を得て、「革新的新構造材料等研究開発」の5つの個別課題の1つ「熱可塑性CFRPの開発」[4]を、東京大学の「革新炭素繊維基盤技術開発」と連携しながら進めている（図1）。これらの研究開発のキーワードは「自動車への適用技術」である。

このような組織の下で名古屋大学NCCは、量産自動車のボディ（シャーシ）を、熱可塑性CFRPを用い低コストで製造する研究開発をオールジャパン体制の“名古屋大学



※各研究テーマ毎に、23大学・13団体（国立研究機関・社団法人等）と共同で研究開発を実施

図1 新構造材料技術研究組合（ISMA）での革新的新構造材料等研究開発組織（プロジェクト開始当時、現体制は参考文献[5] p.20 参照）

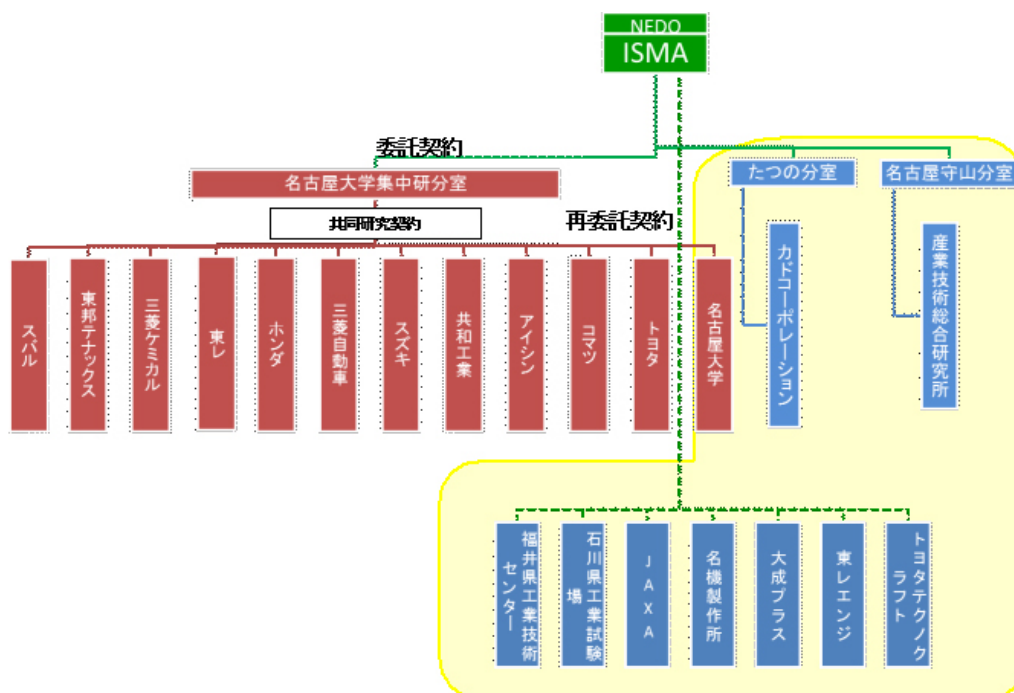


図2 名古屋大学集中研における研究開発の実施体制

閉じた雌型の中に連続繊維の織物を詰めて重合開始剤を含む熱硬化性樹脂を注入した後、加熱して出来るだけ早く重合・硬化させるものである。発展途上の技術である。

4つ目は、図の中央やや下部に示されている不連続繊維強化CFRTP法である。これは、上述の射出成型よりは長い不連続繊維（1～20mm）と熱可塑性樹脂の混練物を作製し、これを軟化点以上でプレス・成形する技術である。大量生産物でありタクトタイムの短いことおよび強度を要求する部位も多い自動車構造部品用に開発されているものである。LFT-D技術はこの技術に属し、本記事の主題であり、4章で詳しく述べる石川氏が責任者を務める名古屋大学NCCが取り組んでいるものである。

註2) 図3および本文に出てくる炭素繊維・樹脂複合材関連の用語を改めて整理しておく。

- ・炭素繊維 (Carbon Fiber, CF)：炭素繊維は軽い（比重はFeの1/4）、強い（比強度はFeの10倍）、剛い（比弾性率はFeの7倍）、錆ない等の優れた特性を持っている。
- ・CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics, 炭素繊維強化熱硬化性プラスチック)：CFと熱硬化性樹脂との複合材。CFの優れた特性を活かしたもの。
- ・CFRTP (Carbon Fiber Reinforced Thermo-Plastics, 炭素繊維強化熱可塑性プラスチック)：CFと熱可塑性樹脂との複合材。

一方、炭素繊維が連結であるか不連続であるか、樹脂が熱硬化性であるか熱可塑性であるかによって表1のように整理できる。



3. 自動車業界の軽量化への対応状況

CFRPを採用している代表的な自動車の例を紹介する。総じて日本は欧州より遅れをとっている。

1) BMW-i3

量産車にもCFRPを多用しようとする動きの中で、関係者の間で大きな話題になったものにドイツBMW社の電気自動車BMW-i3[6]がある。この車は、月産1000台

表1 用いる炭素繊維形態と樹脂種による炭素繊維強化プラスチックの呼称整理

			樹脂	
			熱硬化性	熱可塑性
連続			・オートクレーブ(プリプレグ) ・CFRP (又は連続繊維・熱硬化性CFRP) ・RTM (織物)	・CFRTP (又は連続繊維・熱可塑性CFRP)
		1～20mm		・不連続繊維強化CFRTP ・不連続・熱可塑CFRP ・LFT-D技術
		0.1～3mm		・射出成形 (ペレット)

赤字：図3に表記されている名称，青字：本文中で使用する名称

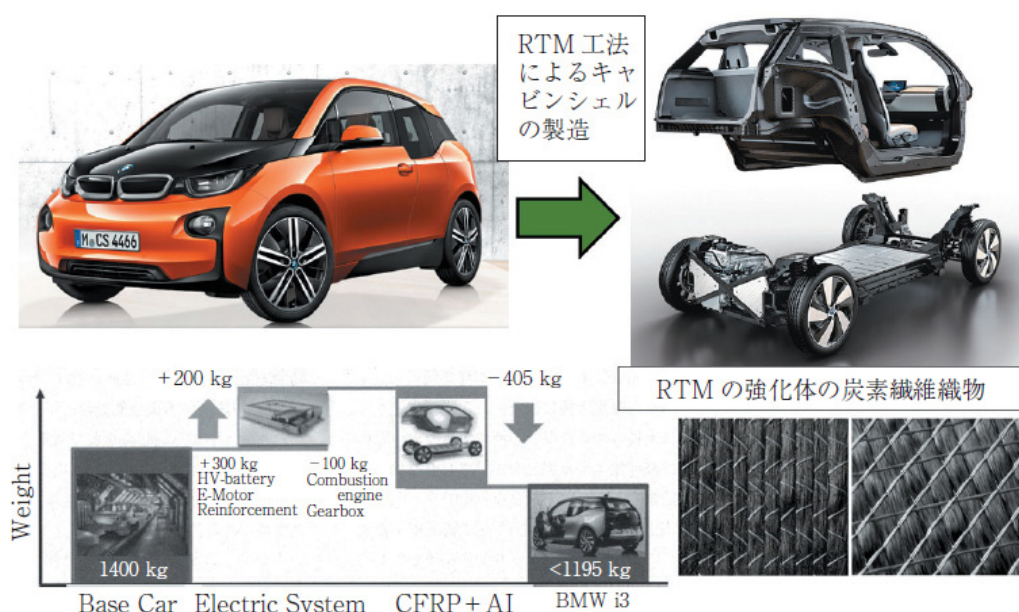


図4 電気自動車 BMW-i3 のキャビンシェルのCFRP化による重量軽減

レベルの量産車である。CFRPの適用状況を図4に示す。電気自動車であるが故に電池搭載による重量増があるが、これをキャンセルし、なお総重量を減らすために、量産自動車としては異例に多い100kg程度のCFRPを使用してキャビン構成している。キャビンは、上下のシエルを、熱硬化型であるエポキシ樹脂を用い、図3に示したRTM法で成形し、エラストマーを含んだ接着剤で接着した後、これをアルミ製のシャーシーに、少ないポイントで結合して製造している。これにより重量の増減は、①電池＋モータ：＋200kg、②ガソリンエンジン除去：-100kg、③キャビンシェルのCFRP化：-405kgとなっている。

RTMでの樹脂の硬化時間は、目標の100℃・5分タクトは達成していないようであるが、相当に高速の硬化が実現しているとのことである。コスト削減のために、炭素繊維の前駆体は日本メーカから供給され、電気料金の安い米国で繊維に焼き、ドイツに渡って織物に仕上げるという複雑なサプライチェーンをとっている。しかし、RTM法自体が長い複雑なプロセスでありまだタクトタイムが長いこと、およびカーボン繊維を織物にするということ等でコスト的には厳しいようである。

2) Toyota Mirai

Toyota Mirai[7]は、世界初の燃料電池車で、高圧水素タンクや燃料電池スタック等にCFRPが使われている(図5)。高圧水素タンクは、炭素繊維を巻いてボンベ形状にしたプリプレグを加熱硬化させる図3のオートクレーブ(プリプレグ)法で作製したもので、750気圧の水素圧に耐える軽量なタンクとなっている。燃料電池スタック台は、非連続繊維型のCFRTPであり、後述するLFT-D技術とは異なる技術で作製している。電池の電解液が漏れても、腐食を引き起こさない部材になっている。

3) その他

これらの他にBMW7(2015年モデル)、トヨタレクサスLFA、トヨタプリウスプラグインハイブリッド[8]、

audi等がこれに追随している。

また、ドイツLotus社のLotus Elise[9]は、アルミニウムを構造部材に多用し、従来のスチール車に対し30%前後の軽量化を達成している。なおこの車は、後述するように名古屋大学NCCの研究開発のベンチマーク車になっている。



4. 本研究内容：高い生産性で低コスト化を可能にするLFT-D技術とその成果[10][11]

4.1 LFT-D技術：大物成形品のハイサイクル・低コスト成形技術

本研究で開発している技術は、繊維長の比較的長い炭素繊維と熱可塑性樹脂を混練し混練機から押し出される素材を製造し、それを高圧プレスで短時間に所望の構造部材に形成する方法である。オートクレーブ(プリプレグ)法が必要とするプリプレグのような中間部材が不要で、炭素繊維と樹脂ペレット材料の供給から最終製品までダイレクトな一貫自動生産システムにより、短時間成形が可能になり、構造用CFRP製法としてはコストミニマムを目指すものである。欧州では、GF/PP(ガラスファイバー/ポリプロピレン)が主で、実用段階であるが、二次構造部材中心である。本研究開発ではCF/PA6(カーボンファイバー/ポリアミド6(ナイロン6))を用いる技術を開発し、構造部材へ適用し実用化を狙うものであり、世界とトップを争っている研究開発である。

炭素繊維、熱可塑性樹脂供給から高圧プレスで短時間に所望の構造部材を成形するまでの全プロセスを図6に示す。

プロセスは6つの素過程から成っている。

- ①熱可塑性原料(PA6、融点225℃)と添加剤(表面処理材であり、炭素繊維と樹脂との濡れを良くする)を混合したものを溶融・混練して、次の二軸スクリュウ型混練押出機へ送る。



図5 燃料電池車 Toyota Mirai でのCFRP適用状況

- ②二軸スクリー型混練押出機は、他方の側から、炭素繊維束を巻き込む。
- ③二軸スクリー型混練押出機の中で、炭素繊維は、スクリーへの衝突や樹脂内せん断場中で切断され、樹脂内のせん断力により混練されていく（従って、繊維の長さを正確に制御することは困難であり、本質的に繊維長さに分布が生じる。繊維長決定要因としては、スクリー回転数、繊維・樹脂供給量即ち混練装置内滞留時間、繊維・樹脂混練時の圧力・温度等があり、それらが複雑に影響しあっている。炭素繊維の長さで得られた成形体の力学的特性には密接な関係があり、静的な弾性係数・強度の他に衝撃特性も重要であり、特に衝撃特性を維持するには、ある程度以上の長さの繊維の存在が必要である）。この混練体を LFT-D (Long Fiber Thermoplastic-Direct) という。
- ④二軸スクリー型混練押出機から混練された素材 (LFT-D) が、一定温度（熱可塑性樹脂の融点 225℃以上）に保たれている保温チャンバー内に所定量押し出される（この押し出されたものを、見た目には座布団のように見えてるところから、本プロジェクトでは“フトン”と呼んでいる（図 7 左））。
- ⑤フトンは、保温された状態で、ロボットにより高速高圧プレスに設置された雌金型の上へ搬送・載置される。
- ⑥高速高圧プレスで、短いタクトタイム（2m²の面積で約 1 分以下）で、所定の構造部材の形に成形される（図 7 右、強度に異方性が生じないようにするには、理想的には炭素繊維がランダムな方向に向いていることであ

るが、このプレス時に“フトン”に流れが生じ、流れの方向に繊維は配向する。これはプロセスでは何とも対処の仕方がない課題である。そこで、CAE で流れを予測し、配向を加味した部材設計技術で対処するようにしている）。

4.2 開発目標：LFT-D 技術で AI 構造車より 10% 軽量化

LFT-D 技術により達成すべき目標値を、以下のような考え方にに基づき具体的に設定している。先に述べたように、従来のスチール（比重～7.8）車に比べ既に 30% 前後の軽量化を達成している実績豊富なアルミ（比重 2.7）構造車 Lotus Elise が存在するが、アルミ押出部品とアルミパネルの複数部品を接着またはボルトで締結する点で多くのエネルギーを必要とし長い製造時間を要し、数量の少ないスポーツカーには認められるが、コスト的に実用量産車には適用できない。これを、より軽量（LFT-D の比重～1.5）の LFT-D を用いる CFRP にし、且つ実用量産車並みのコストを実現できれば事業化に繋がる。そこで、Lotus Elise を、開発する軽量構造のベンチマークにし、

- ①軽量化：アルミ構造体比 10% 軽量化すること
- ②低コスト化：量産車（年産 100,000 台レベル）に対応する生産性を実現すること
- ③上記目標値を、LFT-D 技術構造の実証試験にて実証すること（最終年度 2017 年）としている。

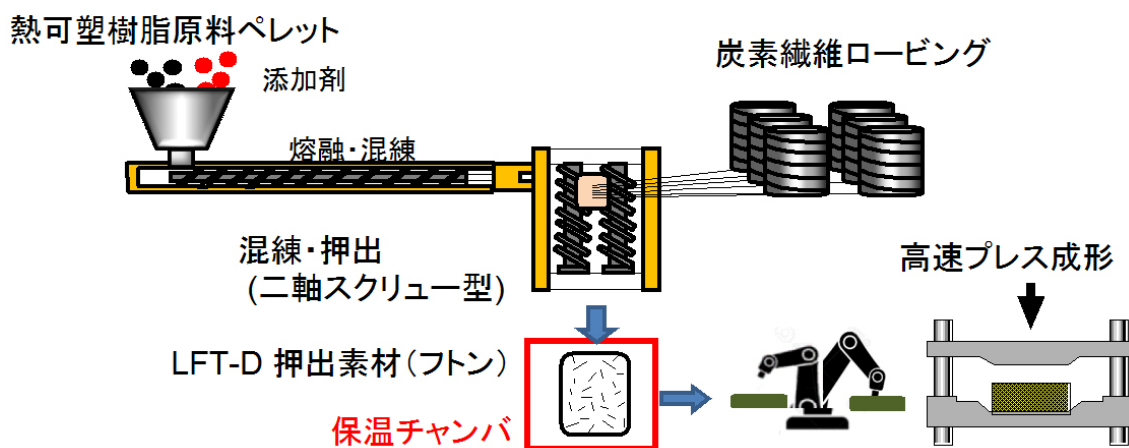


図 6 CFT-D 技術の成形プロセス

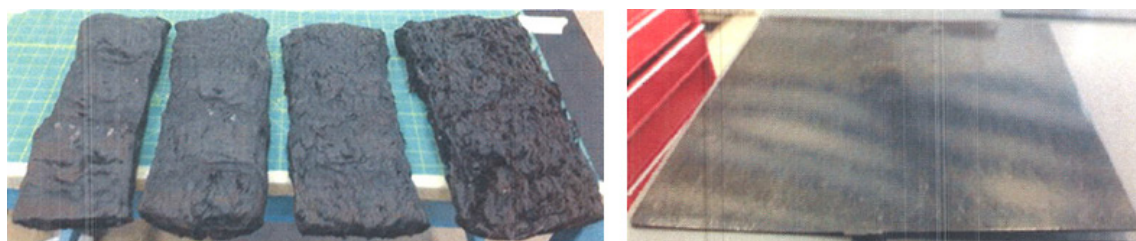


図 7 押出素材（フトン、CF/PA6、100 × 370mm、左）と成形板（460 × 460 × 3mm、右）（米 ZOLTEK 社と独 Fraunhofer 共同研究の例）

4.3 競合技術との比較

当面の競合技術は、先に図3で紹介したRTM技術である。これはヨーロッパで進展しており、炭素繊維を用い、先に述べたBMW-i3等の量産自動車へ適用されている。図8にRTMの中でも高压で樹脂を注入するHP-RTM(High Pressure Resin Transfer Molding)プロセスとLFT-Dプロセスの構成を示す。

HP-RTMプロセスは、連続炭素繊維を織物に加工後、裁断機でカット、積層、プレス機で形を整え、それを型内に載置する。次いで、重合開始剤の混入された熱硬化性樹脂(エポキシ樹脂)を高圧ポンプで注入し加熱硬化

させるなどで、長いプロセスになっている。これに対し、LFT-Dプロセスは、熱可塑性樹脂と比較的長い非連続炭素繊維を混合・混練し、フタの大きさに裁断後、金型に投入され、高速プレス機によって成形する、短くかつシンプルなプロセスである。表2に、両者の長所・短所を比較して示した。

- ① LFT-Dは、HP-RTMのように連続繊維プリフォーム製造／賦形、配管クリーニング、加熱・重合・硬化等を必要とせず、コスト、設備投資の点で優位である。
- ② しかし、LFT-Dは連続ではなく不連続繊維であるがために力学特性は劣る(この点に関しては、熱可塑性樹脂の成形性の良さから実現可能な補強効果のあるウェ

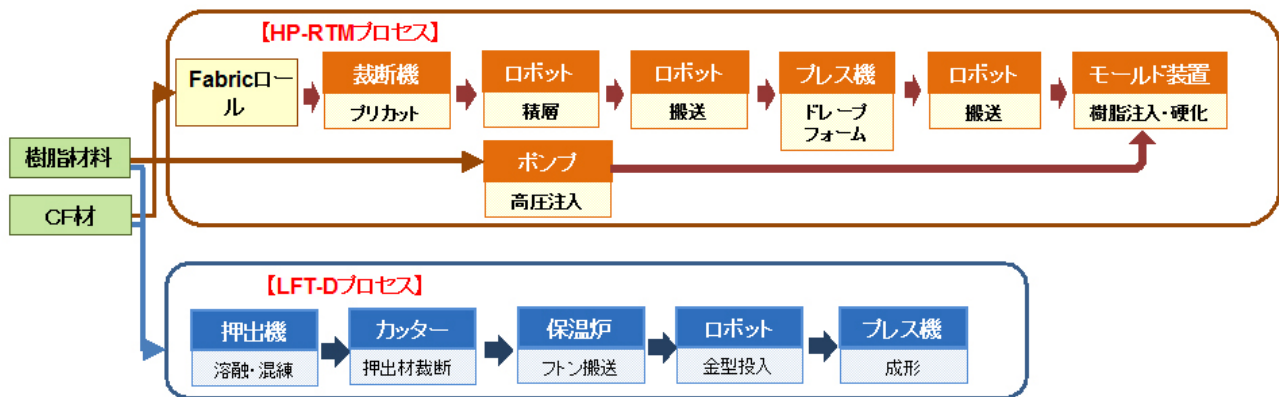


図8 HP-RTM と LFT-D 技術のプロセス構成

表2 LFT-D と競合技術 HP-RTM との優劣比較

	HP-RTM (熱硬化)	LFT-D
コスト	劣	優
設備投資	劣	優
力学特性	優	劣
融着性、二次加工性	否	可
意匠性	優	劣
リサイクル性	難	易

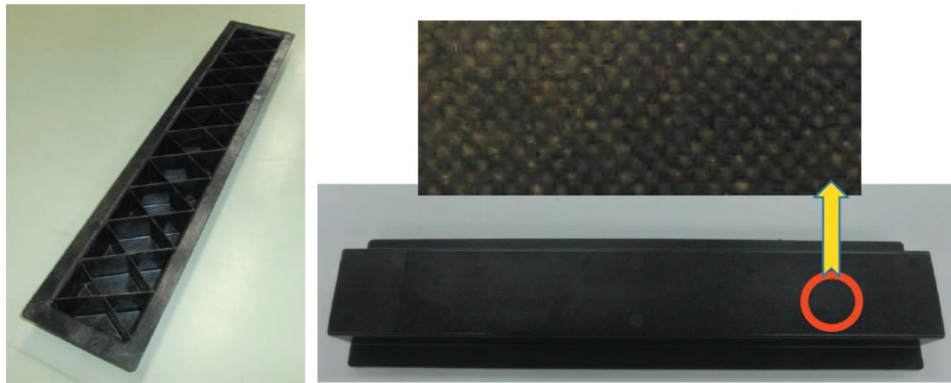


図9 LFT-D 技術でなければできない補強構造 (左: 構造部材にウェブを付与, 右: 炭素繊維織物・熱可塑性CFRP とのハイブリッド化)

ブ付構造部品（図 9 左）や連続繊維・熱可塑性 CFRP とのハイブリッド化（図 9 右）で解決している）。

- ③融着性や二次加工性は熱硬化性樹脂でできている HP-RTM は不可能であるが、LFT-D は熱可塑性樹脂であるので可能である。これが LFT-D の最大の強味である。自動車構造部品は他の部品と接続して全体を構成するが、これまでの金属でのスポット溶接と同じように超音波融着で容易に接続ができる。
- ④ LFT-D は意匠性が劣る。このため、ドアやトランク等の外ものには適用しにくい（これについても連続繊維・熱可塑性 CFRP とのハイブリッド化で解決しようとしている（図 9 右））。

4.4 LFT-D 技術による成果例：最適成形プロセス条件を確立し、大物・小物全構造部材を成形

1) 大物・小物全構造部材の成形

ベンチマークに用いたアルミ製のスポーツカー Lotus

Elise のシャーシーより、重量減 10%，比強度はほぼ同じか若干勝るものを、非連続・熱可塑性 CFRP を用いる LFT-D 技術で、生産性良く低コストで作製できることを実証評価するのが本プロジェクトの最終目標である。そこで、Lotus Elise のシャーシーの重量を計り剛性等を測定し、これらの数値を満足する非連続熱可塑性 CFRP 製シャーシーを設計した。図 10 は設計したシャーシーを 10 個の構造部材に分解したものである。この 10 個の構造部材全部を、これまで築き上げてきた LFT-D 技術で作製した。

最も難しい大物のフロアパネル（面積：約 2m² の大きさ）から成形に取り掛かった（図 11 左）。プレス時の温度、圧力、プレス移動速度等によってでき具合は変わる。また、雌金型のどこに“フトン”を置けば短時間にフトンがうまく流動し、欠落部分無く全体を成形出来るかが問題となった。実験による試行錯誤に加え、参加企業から提供されたソフトを LFT-D 用に改良した CAE により樹脂の流れの数値予測等を活用するなどして、最適条件決定の技術・ノウハウを確立した。その結果、図 11 のように目的物を

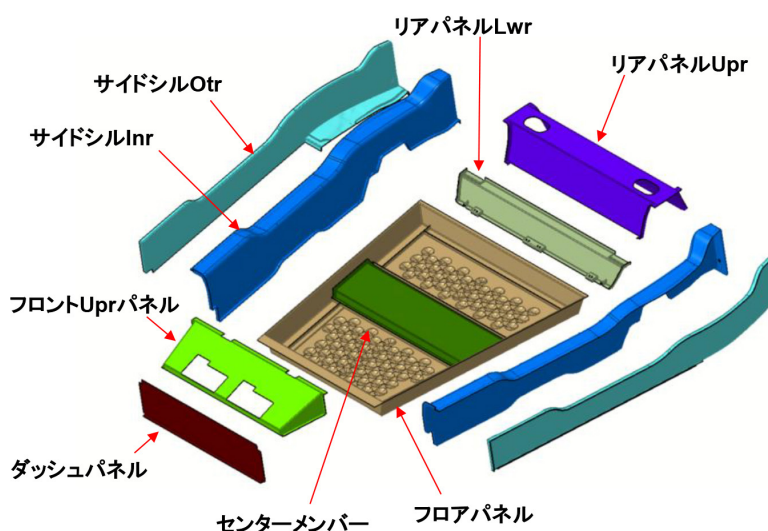


図 10 シャーシーの構成部材の配置

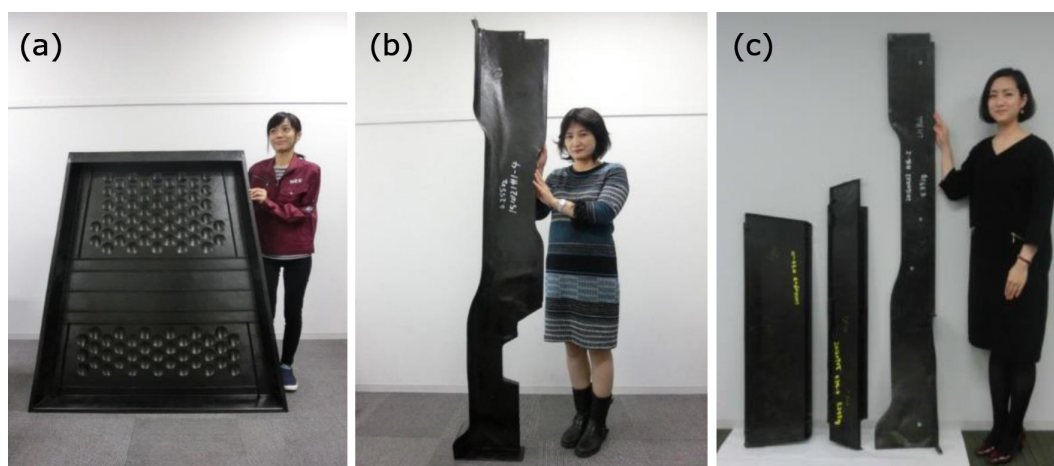


図 11 成形された構成部材 a) フロアパネル, b) サイドシル INR, c) 左から センターメンバー, リアパネル LWR, サイドシル OTR

成形できた。

サイドシル INR は、フロアパネルにより小さく易しい。しかし、このものは剛性が必要なので連続繊維の織物・熱可塑性 CFRP とハイブリッド化しなければならなかったが、これも図 11 中央のように完成させた。さらに簡単なセンターメンバー、リアパネル LWR、サイドシル OTR (図 11 右) を作製した。(フロントパネルは、成形が最も易しいので、試行段階で成形済み)

2) 全シャーシーの高速接合品

上記で成形した各構成部品を超音波溶接で接合して、完成させた全シャーシーを図 12 に示す。10 万台 / 年の量産車に適用できる生産性のある低コスト製法 (LFT-D 技術) で作製された本シャーシーが、「アルミ製のものよりも 10% 軽く、比剛性はほぼ同じか若干勝る」ものであることを証明する総合評価に取り掛かっているところである。



5. 今後の展望

今後の自動車への適用のための CFRP 成形技術の流れは、不連続繊維を用いる LFT-D 技術の方向と、連続繊維を用いる RTM 技術の方向に大別され、其々の車種の生産速度、構造部位等によって使い分けられて適用が拡大していくものと推定される。名古屋大学 NCC が手掛けている LFT-D 技術は、生産性が極めて高く大きな低コスト化ポテンシャルを持っており優位にある。しかし、適用部位によっては強度不足の課題があるが、これに対しては、連続繊維・熱可塑性 CFRP とのハイブリッド化や熱可塑性樹脂の流動性の良さを活かした構造設計による補強技術で克服できる見通しである。

量産自動車の 2 割が CFRP 構造車になるにはまだ時間がかかると思われる。しかし、世界で競い合って研究開発が進んでいる分野なので、名古屋大学 NCC としてはこの分野で世界トップを走り続け、一刻も早く実用化につなげる方針とのことである。



6. おわりに

実験現場を案内して頂いた。3,500 トンプレス、LFT-D 用二軸押出機、熱可塑性 CFRP 成形用金型、それに耐雷試験装置等々の巨大な設備に圧倒された。名古屋大学 NCC では、この大型設備を運転しないと研究開発は進展しない。常にプロジェクト参加各社が集まり、総てのテーマをいわゆる「アンダーワンルーフ」の形で運営されている。μm 径オーダの炭素繊維が数 mm オーダの長さで切断されながら熱可塑性樹脂と nm オーダの精度で表面処



図 12 全シャーシーの高速接合品



図 13 試作現場で議論を行う組員各社の技術者

理・混練されて LFT-D (フトン) となり、金型に載置され、プレスで加圧され、1 分足らずでフトンが金型の隅々まで過不足なく流動して所望の形の成形体が得られる。この結果を、NCC の研究員・技術者とプロジェクト参加各社の技術者が全員集合し、細かい成形条件や原料特性の変更など、現場で議論して成形ノウハウを築く連携作業を進めている (図 13)。まさしく nano tech 大賞「プロジェクト賞」を生み出した光景である。

最近、異常に多発する大雨や、それによる土砂崩れや流木に破壊された浸水家屋の情報に接する度に、地球温暖化をひしひしと実感させられている。名古屋大学 NCC を中心とする本プロジェクトの研究開発が進展し、その成果が産業界で実用化され、自動車の軽量化による効果「軽量化 100kg 当り、炭酸ガス排出量 20g/km 削減」により、安心と安全な地球環境保持に大きく貢献されることを願ってやまない。



参考文献

- [1] 新構造材料技術研究組合 (Innovative Structural Materials Association, ISMA), <http://isma.jp/>
- [2] “nano tech 大賞 2017”, <http://www.nanotechexpo.com>

- jp/2017/main/award2017.html
- [3] 名古屋大学ナショナルコンポジットセンター, <http://ncc.engg.nagoya-u.ac.jp/index.html>
- [4] 経済産業省 産業技術環境局 研究開発課, 「革新的新構造材料等技術開発の概要」, <http://www8.cao.go.jp/cstp/tyousakai/hyouka/haihu108/siryo2-2.pdf>
- NEDO, 「革新的新構造材料等研究開発」, http://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100077.html
- [5] NEDO, 「革新的新構造材料等研究開発（平成29年度実施方針）」, <http://www.nedo.go.jp/content/100862760.pdf>
- [6] BMW, 「BMW-i3」, <http://www.bmw-i.jp/BMW-i3/>
- [7] トヨタ, 「トヨタ・MIRAI」, <http://toyota.jp/mirai/>
- [8] 三菱レイヨン, 「三菱レイヨンの炭素繊維材料（SMC）がトヨタの新型「プリウス PHV」のバックドアに採用」, <https://www.m-chemical.co.jp/news/mrc/detail/pdf/20170306104646.pdf>
- [9] LOTUS, 「ロータス・エリーゼ」, <http://www.lotus-cars.jp/>
- [10] 石川隆司, 「自動車構造部品への炭素繊維強化プラスチック（CFRP）の応用の展望（CFRPを中心に）」, 精密工学会誌, Vol.81, No.6, pp.489-493 (2015), https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjspe/81/6/81_489/_article/references/-char/ja/
- [11] インタビュー記事, 「次世代自動車用熱可塑性 CFRP の素材および加工技術開発」, 精密工学会誌, Vol.81, No.6, pp.483-484 (2015), https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjspe/81/6/81_481/_pdf
- 本文中の図表は、総て名古屋大学ナショナルコンポジットセンター（NCC）石川氏より提供されたものである。
- （真辺 俊勝）