# 產経新聞社賞

超軽量革新複合材料"CFRF"の研究開発

# 東レ株式会社

本間 雅登 土谷 敦岐 平野 啓之中山 義文 松谷 浩明 武部 佳樹 今井 直吉 竹原 大洋 藤岡 聖

# 1. 緒 言

炭素繊維複合材料 (CFRP: Carbon Fiber Reinforced Plastics) は、炭素繊維の優れた強度や弾性率などの特性を設計要素に、マトリックス樹脂とともに成形することで極めて高い力学特性が得られる。その最大の目的は構造の軽量化であり、航空機や宇宙機の機体構造、ゴルフやテニスといったスポーツ用品、レーシングカーをはじめとする自動車のシャシや部材など、妥協を許さない最先端領域で絶大なポテンシャルを発揮してきた。近年では、炭素繊維のグローバル生産化が進み、風車ブレード、高圧タンク、電子機器など幅広い産業用途でも活用されるようになっている。

炭素繊維(CF: Carbon Fiber)の特徴と他の強化繊維との比較を表1に示す。CF はその内部結晶構造に由来してストランド特性を精密に制御することができ、工業化以降の高強度化高弾性率化の研究開発によりラインナップが強化され(図1)、CF の選択自由度も CFRP の魅力である。

同時に、産業用途への適用拡大は射出成形や SMC(Sheet Molding Compound) など Affordable な材料開発、サンドイッチ体などの積層設計、成形加工技術の進化を促した。すなわち、市場の飽くなき軽量化ニーズに応えるために、素材、材料、設計、成形の総合的な技術パッケージの開発が益々重要になっている。

項目	PAN系CF	ガラス繊維	アラミド繊維		
単繊維径 (μm)	5~7	8~14	12		
比重(-)	1.8	2.6	1.5		
引張弾性率 (GPa)	200~800	70	130		
引張強度 (GPa)	2~8	1.5~2.5	1.5~2.5		
熱膨張率 (10-6/K)	-1.5~0.1	5	-5.7		
熱伝導率(W/m·K)	8~160	1	0.04		

表1. 炭素繊維(CF)の特徴

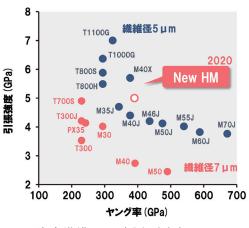


図1. 炭素繊維トレカ(登録商標)のラインナップ

# 2. 超軽量高剛性材料 "CFRF"の創出

東レの開発した "CFRF (Carbon Fiber Reinforced Foam, 登録商標)" は、Foam の名の通り体積の大部分を空気が占める空隙体でありながら、構造体としての剛性を兼ね備える  $^{1-5}$ 。 図2(左)に X線 CT 画像による "CFRF" の基本構造を示す。CF を単繊維に分繊させた短繊維からなるネットワークを骨格とし、CF 同士の交点を接合、さらにマトリックス樹脂で骨格を固定した構造体である。ここで、CF は低比重かつ繊維径が約 $7\mu$ m と細いことから、重量当たりの繊維数が圧倒的に多い。例えば、繊維1g で10mm の GF (Glass Fiber) は約30 万本、CF は約150万本でその5倍である。CF は弾性率が高く撓みにくいことに加え、この膨大な繊維数を利用して緻密かつ強固なネットワークを形成することができる。

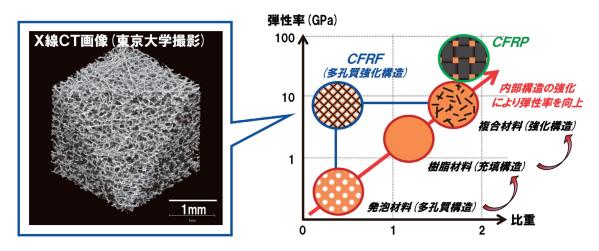


図2. "CFRF"の基本構造(左)と開発アプローチ(右)

"CFRF"のコンセプトを図2(右)の開発アプローチで説明する。ここでは材料の比重と、構造体の成立要件である剛性(弾性率)で整理した。単純に比重を小さくするには多孔質構造がよいが、通常発泡材料は容易に変形・破壊するため構造体には使用できない。そこで充填構造である樹脂材料、さらには強化構造である複合材料として構造体に供する。つまり、比重を大きくしながら内部構造を強化し弾性率を向上させるアプローチであり、比弾性率(弾性率/比重)に優れる CF は強化材として最適である。特に、高弾性率の CF を高充填した CFRP ほど軽量化に有効である。

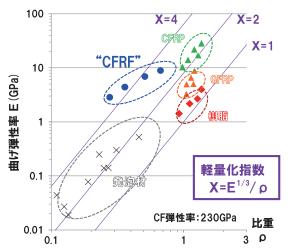
これに対し、構造体の多くは GFRP (Glass Fiber Reinforced Plastics) の弾性率で成立しており、その弾性率を維持したまま多孔質構造 (低比重化) とするアプローチを考案し、この画期的な発想を "CFRF"で実現した。

表2は各種材料と "CFRF" との特性比較である。CFRP のプリプレグがエポキシである以外は、PP(Polypropylene)マトリックスで統一した。

CFRP(連続繊維の CF 束にエポキシ樹脂を含浸させたプリプレグを成形) は力学特性で圧倒しており、異方性材料の特性を積層設計により制御する。

	CF	RP	GFRP		"CFRF"	発泡材
成形材料 (マトリックス樹脂)	プリプレグ (エポキシ)	射出成形材 (PP)	GMT (PP)	射出成形材 (PP)	<u>シート基材</u> (PP)	<b>発泡シート</b> (PP)
比重(-)	1.5	1.1	1.2	1.2	0.2~0.7	0.5
引張強度 (MPa)	640	130	80	100	30~100	8
曲げ弾性率 (GPa)	48	20	5	9	3~8	0.1
線膨張係数(10-6/℃)	2	3	20	20	5	_
備考	織物仕様 繊維方向特性	MD方向特性	CV値~20%	MD方向特性	CV値≦5%	非強化

表2. 各種材料と"CFRF"との特性比較





		複合材料			
	スチール	GMT (PP)	射出成形材 (PP)	"CFRF" (PP)	CFRP (エポキシ)
相対 厚み	1.0	3.0	3.0	3.0	1.7
相対	100	50	40	20	30
重量	•		-	80%軽量化 40%軽量化	4

図3. "CFRF"の軽量ポテンシャル(左)と設計例(右)

"CFRF"は短繊維(不連続繊維)の複合材料に分類され、発泡材同等の低比重でありながら GFRP 同等の力学特性を示す。"CFRF"の特性は比重、つまり空隙率に大きく左右され、現 状比重0.2~0.7、弾性率3~8GPa に到達している。

また、短繊維の複合材料は安定性が低く、GMT (Glass Mat Thermoplastics) はバラツキの指標である CV (Coefficient of Variation) が大きく $^6$ 、射出成形による成形品は流動方向 (MD) に対し直交方向 (TD) で特性が大きく低下することはよく知られている $^7$ 。 "CFRF" は 短繊維を用いながら、ネットワークの均質性と CF の等方分散から、荷重方向によらず安定した特性を発現する。

ここで、剛性設計での軽量ポテンシャルを考察する。図3(左)は各材料の比重と曲げ弾性率をプロットした散布図である。この図に、曲げ剛性(部材の変形のしにくさ)から軽量化指数 X(弾性率 1/3/比重)の等高線を描く。X の数値は軽量化の倍数に直結するため、"CFRF"の軽量ポテンシャルは他の材料よりも抜群に優れていることが明らかである。

図3(右)には、等価の曲げ剛性を有する板状部材を例に、相対的な厚みと重量をスチールと比較した結果を示す。 "CFRF" はスチールに対し約80%、CFRP に対しても約40%の軽量化が見込める。

"CFRF"の剛性発現について、図2の写真からも CF の単繊維を接合した擬似的なトラス構造と理解される。すなわち、空間に占める CF の体積はわずか数%ほどであるが、無数のマイクロトラスにより荷重を分散することで構造を支えている。この究極の軽量性を製品に適用するには、材料設計とともに成形技術も不可欠である。

"CFRF"は CF 短繊維ネットワークの自在な圧縮/膨張による三次元的 (厚み方向) な挙動を利用して成形する。この現象は"スプリングバック"として繊維材料では共通の性質と理解されているが、東レは超軽量化を実現する革新技術に進化させることで "CFRF" の創出に成功した。

根本的な性質として CF は塑性変形せず、高強度で折損しにくく、高弾性率で変形に対して優れた復元力を有する。この特徴のため、CF 短繊維ネットワークは圧縮による弾性エネ

ルギーの蓄積が大きく、その反力として膨張によるエネルギー解放も大きくなる。

この原理を利用して、マトリックス樹脂で CF 短繊維ネットワークの構造を固定したシート基材と、そのシート基材を加熱することによりマトリックス樹脂を軟化させ膨張成形するコンセプトを確立した。

図4にCF 短繊維ネットワーク(シート基材)の膨張性を示す。シート基材をオーブンで約1分間加熱することにより、厚み方向に均質に膨張する。現状膨張倍率は約6倍、膨張圧力は数 MPa にも達し、CF ならではの特徴が反映されている。また、CF 短繊維ネットワークは繰り返し再圧縮と再膨張が可能であり、"CFRF"の成形コンセプトを補完している。

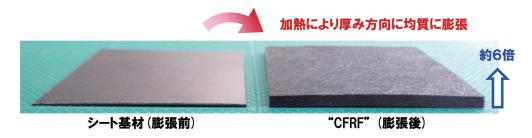


図4. "CFRF"の膨張性

図5には、"CFRF"のスプリングバックで発生する高い膨張圧力を利用して複雑な凹凸部材を成形した例を示す。予熱によりシート基材を膨張させ、冷却金型に搬送してプレス成形機にて加圧賦形後に、再膨張させることで成形時間5分で比重0.5の"CFRF"の部材を成形した。部材のカット断面から、厚み変化(徐変)を伴う曲面形成、立ち壁面の形成、リブ部の形成など金型に沿った立体形状の追随性に加え、各要素で均質充填された"CFRF"のポーラス構造が確認できた。

また、要素毎に空隙率を制御しており、高強度が必要な端部は充填構造設計、中央の曲げ 荷重部は高い空隙設計と、使い分けに対応できている。これらの成形技術を駆使することで、 従来 CFRP や短繊維成形材料では実現しえなかった画期的製品の創出に繋げる。



図5. "CFRF"の凹凸部材の成形例

# 3. "CFRF"開発に至る革新技術

"CFRF"の"マイクロトラス構造"は CF 短繊維ネットワークを骨格とし、それをマトリックス樹脂で固定することで形成できる。これを工業的に生産するために、 CF 短繊維ネットワークに熱可塑性樹脂を複合化したシート基材 (プリプレグ)を開発した 8~14)。

図6はシート基材の概要である。シート基材は成形品形状にあわせて、所望のサイズにカット・積層して使用する。ハサミなどで簡易に裁断でき、等方設計のために特別な積層設計は不要である。マトリックス樹脂の制約はなく、ほぼ全ての樹脂系に対応が可能である。



図6. シート基材の概要

本シート基材の中には CF 短繊維ネットワークが形成されている。重要な設計ポイントは CF 同士への完全な応力伝達を実現することであり、応力伝達が不完全であると均質かつ高い膨張が得られず、また不完全な部分が欠陥となり力学特性を阻害することとなる。東レは破壊力学や解析技術を絡めてこの課題を解決した。

従来、短繊維からなる複合材料(短繊維材)は、射出成形材料をはじめ SMC、GMT など 市場展開されているが、強化繊維の利用率は CFRP に遠く及ばず低強度である。

短繊維材では繊維長さ、繊維配向、樹脂特性により強度が大きく変動し、かつ異方性があり、特性バラツキも大きいことから精度の高い理論解析は困難であった。

東レはこの短繊維材の根本的問題に長年取り組んでおり、図7の破壊メカニズムから考察を深めた。低強度な短繊維材は、ミクロな破壊起点から強化繊維を迂回してクラックが伝播し、樹脂破断により全体破壊に至る(Fiber Avoiding)。ここで、強化繊維がクラック伝播を抑制して、繊維破断を伴いながら全体破壊することで強度は向上する(Fiber Breaking)。さらに、ミクロな破壊起点が強化繊維界面のマトリックスの剥離と強化繊維端部への応力集中が支配因子であることも特定した。

短繊維材が低強度となる因子を解明したことを受け、まず CF 界面の高接着技術を確立し  $^{15\sim17)}$ 、CF 端部の応力集中を最小化する単糸分散技術と等方分散技術を開発、これらを組み合わせたシート状の CF 短繊維のネットワークを設計することで、CF への応力伝達を定量化することに成功した。

さらに、このシートに所望の熱可塑性樹脂を複合化させてシート基材とするプリプレグ化 技術やシート基材の膨張成形技術も開発し、実用化に必要な総合的な技術パッケージとして



図7. 短繊維からなる複合材料の破壊メカニズム

完成させた18~20)。

図8はシート基材の CF 繊維長と引張強度の関係と、引張強度の解析値(シミュレーション結果)を示す。繊維長2~10mm において解析値に近似する引張強度が発現したことがわかる。なお、この引張強度のバラツキは極めて小さく等方的であり、荷重方向に影響せず CV 値は5%以下を満足する。すなわち、短繊維材で実測値と解析値の条件を揃えて比較検証が可能となった。

また、繊維長4~8mm において、同一繊維含量の CFRP の理論強度の90%に達しており、 短繊維系で連続繊維同等(約90%)の CF 利用率を初めて実証した。

従来、短繊維材の強度予測は困難であったが、世界初の強度シミュレーション技術を獲得したことが、材料設計のさらなる高度化に繋がっている<sup>21~25)</sup>。図8のシミュレーション結果は、CF 繊維長によって破壊メカニズムが樹脂破断から繊維破断に遷移することを示唆している。そして CF 破断となる繊維長の設計指針が"CFRF"の基点となった。

以上、CF を高接着とする分子レベルの界面設計から、CF を単繊維に開繊し等方分散させる分散技術 (CF 短繊維ネットワーク成形技術)、熱可塑性樹脂との複合化技術、膨張成形による構造形成といったマルチスケールでの設計を通し、複合材料の領域に "CFRF" という新境地を切り拓いた。

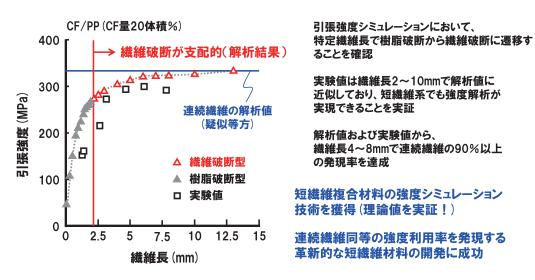


図8. 短繊維系複合材料における繊維長の影響(強度シミュレーション)

# 4. "CFRF"の実用化

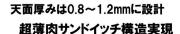
"CFRF"は CFRP と設計コンセプトが異なるため、実用化には適用スキームから考案する必要がある。表3に両材料の特徴を整理した。 CFRP のプリプレグは CF ストランドを配列させて高い繊維含有率とした極端な異方性材料である。プリプレグには積層設計が不可欠であり、薄肉化かつ高い比強度で軽量化を達成する。一方、"CFRF"のシート基材(プリプレグ)は CF 短繊維の分散体であり、等方性の均質材料である。このシート基材からなる膨張成形品は、僅か数%の CF にもかかわらず、ネットワークの三次元構造化により厚肉化し高い比剛性で軽量化を達成する。

各々の性質は相反するものの、厚肉の"CFRF"をコア材に、薄肉の CFRP をスキン材に適用したサンドイッチ構造体において両材料のシナジー設計が考案できる。

	CFRP	"CFRF"	サンドイッチ構造体
コンセプト	・CF高充填による力学特性の追求・材料は極端な異方性材料 プリプレグ 成形品(積層体) ボイドのない中実構造	・多孔質化による軽量性の追求 ・材料は等方性の均質材料 シート基材 成形品(空隙体) 膨張による空隙構造	CFRPスキンと"CFRF"コアの構成 でFRP 複合化によるシナジー設計
特長	高強度	高剛性	高強度+高剛性
成形品	薄肉構造	厚肉構造	厚肉構造
用法	積層工程/硬化成形	膨張成形	一体成形

表3. CFRPと"CFRF"の特徴

図9に "CFRF" コアのサンドイッチ構造体を適用したノートパソコン筐体を示す。その特長は軽量高剛性であり、従来製品の軽量性を大きく上回る。 "CFRF" の登場により、ハイエンドの筐体開発は比重1以下の設計領域に突入し、初採用以降、適用メーカーと機種を拡大しつつ年間百万台以上のヒット商品に成長した<sup>26~28)</sup>。





	既存	開発品	
天面の構成	マグネシウム合金 (中実構造)	CFRPサンドイッチ 汎用発泡コア	CFRPサンドイッチ "CFRF"コア
比重	1.8	1.1	0.7
天板重量 (g)	90	80	50
相対剛性(-)	100	230	275

天面の超軽量化で筐体比重<1の時代に突入

図9. "CFRF"コアのサンドイッチ構造体を適用したノートパソコン筐体

#### 〈パソコン筐体成形技術のスケールアップ〉

#### スチール対比50%軽量化設計





実物大スケールで"CFRF"コアサンドイッチ構造体の5分成形を実現

図10. 車体ルーフの一体成形例

筐体の量産性を達成するため、CFRP プリプレグと、"CFRF" プリプレグの一体成形技術に挑戦した。すなわち、プレス成形装置を用いて CFRP プリプレグの硬化、スキンコアの接着、"CFRF" プリプレグの膨張と形状賦形からなる複合工程のハイサイクル生産システムを開発したことで、実用化への適用スキームが確立できた。

このパソコン筐体向けに開発したハイサイクル成形システムは、スケールアップ検討も進められ、成形時間5分で車体ルーフ形状の試作品が得られている(図10)。

ここで、ノートパソコン筐体の製品価値となる耐衝撃性について、"CFRF"の優れた衝撃吸収ポテンシャルを示す。図5の"CFRF"のモデル部材を用いて、クラッシュテスト(ストライカーによる圧縮試験)を行い、"CFRF"は逐次的に破壊が発生し、高い衝撃吸収エネルギー(変位 – 荷重線図における面積)が得られる(図11)。高衝撃材料として使用される GMT(比較材)では荷重初期で座屈破壊するのに対し、"CFRF"は均質な空隙構造で、CF 短繊維ネットワーク全体で荷重を伝達するため、局部的な応力集中を抑制した効果と考えられる。

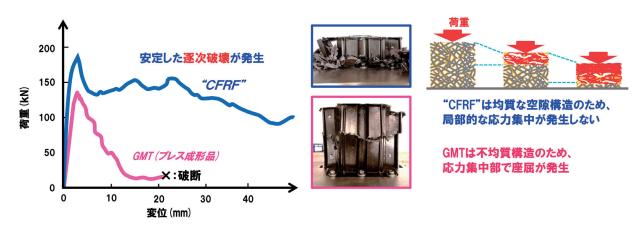


図11. モデル部材でのクラッシュテスト(圧縮試験)

次に、"CFRF" コアのサンドイッチ構造体についても、面外へのストライカーによる衝撃試験 (ISO 6603-2) により、優れた衝撃吸収ポテンシャルを備えていることがわかった。 CFRP で実績豊富なロハセル (登録商標)のコアを用いたサンドイッチ構造体 (比較材) が貫通する試験条件において、"CFRF" コアを用いた開発品はストライカーが裏面に到達せず (非貫通)、最終的にストライカーが反発した。また、"CFRF" コアにより部材剛性が向上したため初期の荷重が大きいこと、変位 2mm 近傍で CFRP スキンが貫通した後に "CFRF" の逐次破壊による衝撃吸収が発生していることも確認できた(図12)。

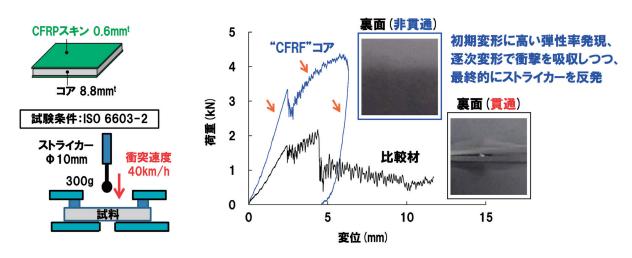


図12. サンドイッチ構造体の面外方向の衝撃試験

## 5. "CFRF"のさらなる展望

"CFRF" コアのサンドイッチ構造体の開発に成功したことで、副次的効果として機能素材の内挿化が可能となった。例えば、"CFRF" コアを支持体としてグラファイトシートを内挿したサンドイッチ構造体では、従来 CFRP では到達不可能な金属レベルの熱伝導性を実現した<sup>29)</sup>。

グラファイトシートは黒鉛化により優れた熱伝導率を発現するが、これは構造の脆弱化にも繋がり、容易に剥離や破砕する。単純にCFRPへ積層してもグラファイトシートが剥離し、CFRPの特性を毀損するため製品化は困難であった。そこで、CF短繊維ネットワークを利用して、グラファイトシートをCFの点接地で支持する設計を考案した(図13)。CFRPのプリプレグ、"CFRF"のシート基材およびグラファイトシートを一体成形したサンドイッチ構造体は、力学特性や品位品質を損なうことなく、アルミニウム合金を上回る熱伝導率200W/m・kを達成した。

高熱伝導性設計を応用して、"CFRF"コアの内部にグラファイトシートによる熱伝導回路を形成させ、所望の方向に放熱を誘導することもできる。図14は"CFRF"コアのサンドイッチ構造体の凹凸成形品であるが、"CFRF"内部にL字にグラファイトシートを配置し、この成形品をヒーターで局部加熱した。その後の放熱性を観察すると、狙い通りグラファイトシートに沿った放熱が確認できた。

以上より、CFRP は放熱性の面では金属材料への代替は困難とされてきたが、本技術を適用することで金属同等の熱伝導性を確保するだけでなく、放熱を誘導する熱マネジメントと

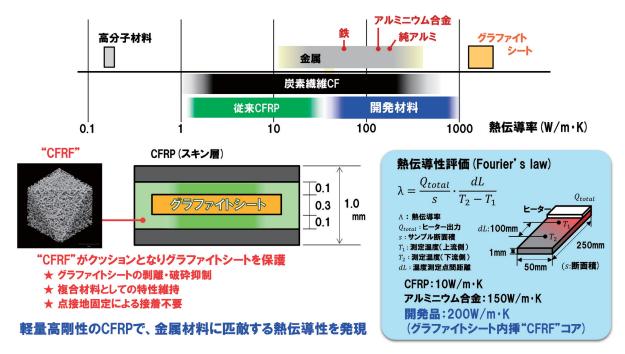
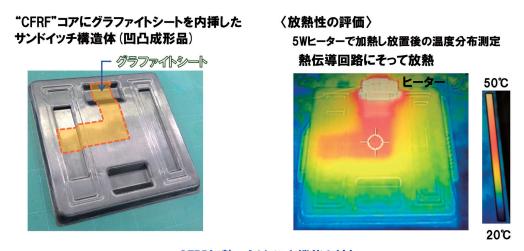


図13. 高熱伝導性材料の開発



CFRPに熱マネジメント機能を付与

図14. グラファイトシートの熱伝導回路による放熱ソリューション

いう金属にはない価値を提案でき、将来的な CPU や EV バッテリー周辺の発熱、室内・車内の温度制御の低エネルギー化などに対して有効なソリューションとなる可能がある。

"CFRF" は軽量ポテンシャルで CFRP を上回ることから X 線医療の分野にも貢献できる  $^{30}$ 。表4には等価剛性板における X 線透過特性を示す。 X 線透過率は高い数字ほど優位であり、散乱線含有率は低い数字ほど優位となる。表4より "CFRF" および "CFRF" コアのサンドイッチ構造体は、CFRP よりも X 線透過性と散乱線含有率に優れており、患者支持台、FPD(Flat Panel Detector) カバーや散乱線除去グリッドなどへ適用することで吸収線量を 10%以上低減する効果となる。また、"CFRF" は均質材料であるため面内の密度分布が等しく、 X 線強度を下げてもムラのない画像が得られ、かつ CFRP 織物のような模様の映り込

表4. 等価剛性板での X 線透過特性

	CFRP (織物)	"CFRF"	"CFRF"コア サンドイッチ構造体	
概略図			************	
相対厚み	1.0	2.4	1.0	
相対重量	100	50	40	
X線透過率(%)	89	94	95	
散乱線含有率(%)	2.6	1.4	1.0	

"CFRF"によりX線透過率は約6%向上、散乱線含有率は約50%低減

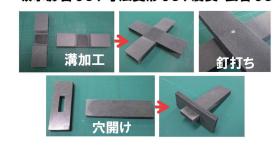
みもない。現代医療の進歩とともに X 線被ばくの機会が増加する中で、CFRP が適用されて以来の、医療被ばくを低減する材料イノベーションが期待される。

"CFRF"は木材の代替可能な素材であり森林保護の点でも取り組みを進めている。木材は 異方性が強く、天然由来であるために安定した品質設計は困難であり、吸水による特性およ び寸法の変化、腐食や虫害にも課題がある。"CFRF"は、木材の比重、弾性率、切削加工性、 組立性を代替でき、工業化によって過剰な森林伐採を抑制できる可能性がある。図15の "CFRF"製の椅子(サンプル)は、釘や接着剤を使用せず組子で製作した。



#### "CFRF"の加工性は木材に匹敵

- ・品位品質の安定化、特性設計の自由度
- ・吸水影響なし、寸法変形なし、腐食・虫害なし



"CFRF"を切削加工し、嵌合のみ(接着剤、釘なし)で組立

図15. "CFRF"を木材様に活用

最新の市場動向として、空飛ぶクルマやドローンの開発に注目が集まっている。特に、空飛ぶクルマは大都市とその近郊で活用される UAM (Urban Air Mobility) の開発が世界的に活発化している。これらの機体や部材の軽量化は後続距離やペイロードの向上といった製品価値に直結するため、CFRP の有望市場である。さらなる機体軽量化が見込める "CFRF" は活躍の機会ととらえ開発を加速している。

# 6. 結 言

本稿では、東レの開発した "CFRF" の特徴とともに、その技術基盤となっている CF 短繊維ネットワークの設計技術や実用化事例を紹介した。このネットワークによる強化構造のため "CFRF" は、発泡材同等の低い比重と、繊維強化樹脂同等の弾性率を発現し、剛性設計による軽量化効果は CFRP をも上回る。また、"CFRF" の成形材料であるシート基材 (プリプレグ) は、加熱による膨張効果を利用した立体形状の成形に適しており、CFRP のプリプレグとの一体成形技術も確立した。

これらの技術開発を通して、超軽量のノートパソコン筐体での実用化を起点に、X線医療機器やUAMなどの有望市場をターゲットに開発を加速し、多様化する製品の軽量化ニーズに応えていく。

東レはこれからも超軽量革新材料 "CFRF" で複合材料の新境地を切り拓き、豊かな社会の発展に向けて貢献していく。

## 辞 態

本研究の成果の一部は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務(JPNP08024、JPNP14014)から得られたものである。

また、本研究にご協力頂いた東京大学 高橋淳教授、東北大学 岡部朋永教授、東京都立 大学 根岸徹准教授に感謝申し上げる。

# 参考文献

- 1) 東レプレスリリース、超軽量と高剛性を両立する炭素繊維構造材料を開発 (2016) (https://www.toray.co.jp/news/details/20160328001168.html)
- 2) 武部ら、材料、Vol.65、No.8、pp.555-560 (2016)
- 3) 日経 Automotive、2016年7月号、pp.28-29 (2016)
- 4) 日経エコロジー、Vol.206、pp.25-26 (2016)
- 5) 本間、自動車技術、Vol.70、No.12、pp.104-105 (2016)
- 6) 国際公開第2018/003433号(2018)
- 7) 東レテクニカル情報 (https://www.plastics.toray/ja/technical/torelina/tec 010.html)
- 8) 東レプレスリリース、カットファイバーを用いた炭素繊維複合材料 理論強度の 90% を発現する革新技術を開発 (2010)
- 9) 本間ら、第60回高分子学会年次大会予稿集(2011)
- 10) Hirano et al., 18th International Conference on Composite Materials Proceedings (2011)
- 11) Hirano et al., 12th Japan International SAMPE Symposium & Exhibition Proceedings (2011)
- 12) Motor Fan illustrated, Vol.53, pp.50-53 (2011)
- 13) 畑中ら、日本機械学会 M&M2014カンファレンス予稿集 (2014)
- 14) 松谷ら、日本複合材料学会誌、Vol.40、No.5、pp.227-237 (2014)
- 15) Tsuchiya et al., 18th International Conference on Composite Materials Proceedings (2011)

- 16) 平野ら、日本複合材料学会誌、Vol.39、No.3、pp.113-119 (2013)
- 17) Nagatsuka et al., 16th European Conference on Composite Materials Proceedings (2014)
- 18) 長塚ら、日本機械学会 M&M2013 カンファレンス予稿集 (2013)
- 19) 長塚ら、日本複合材料学会誌、Vol.41、No.3、pp75-84 (2015)
- 20) 篠原ら、日本複合材料学会誌、Vol.47、No.6、pp.222-232 (2021)
- 21) 橋本ら、日本複合材料学会誌、Vol.35、No.6、pp.256-265 (2009)
- 22) 橋本ら、日本複合材料学会誌、Vol.37、No.4、pp.138-146 (2011)
- 23) Okabe et al., Advanced Composite Materials, Vol.21, No.2, pp.147-163 (2012)
- 24) Hashimoto et al., Composites Part A, Vol. 43, No. 10, pp. 1791-1799 (2012)
- 25) 山本ら、日本複合材料学会誌、Vol.43、No.3、pp.104-111 (2017)
- 26) ITmedia PC USER (2020) (https://www.itmedia.co.jp/pcuser/articles/2012/16/news003 2.html)
- 27) PC Watch (2020) (https://pc.watch.impress.co.jp/docs/column/hothot/1297903.html)
- 28) PC Watch (2022) (https://pc.watch.impress.co.jp/docs/news/1384655.html)
- 29) 東レプレスリリース、放熱性に優れる炭素繊維複合材料を創出 自在なヒートマネージメント設計を実現 (2021)
  - (https://www.toray.co.jp/news/details/20210519001577.html)
- 30) 根岸ら、第31回乳癌検診学会学術総会抄録集(2021)