

## PAN系炭素繊維の現状と将来

三菱レイヨン株式会社  
炭素繊維・複合材料事業部長  
小野 貴弘

1961年にPAN系炭素繊維が開発されて以来、半世紀が経過した。技術改良と用途開拓の歴史を経て、21世紀に入り航空機用途と風力発電翼等の産業用途が牽引する需要拡大期を迎えたが、リーマンショックに端を発する世界同時不況により炭素繊維の需要は一時的に急減した。その後、ボーイング787の就航、シェールガスブームを背景とする圧縮天然ガス(CNG)の利用増大、を追い風に炭素繊維の需要は再び拡大基調に転じている。一方、世界的な景気減速で動きが鈍っているとは言え、地球温暖化阻止に向けて各国が掲げた「温室効果ガスの大幅削減目標」の実現に向けて、風力発電、太陽光発電等の再生可能エネルギー市場の拡大、電気自動車、燃料電池車等の代替エネルギー車の開発が進んでいる。本年秋には、炭素繊維複合材料(CFRP)を車体骨格に採用するBMW社の電気自動車「iシリーズ」が市場に登場する。福島第一原子力発電所の事故後に、「脱原発」を選択したドイツをはじめとする欧州各国は、原子力発電所並みの大規模・集中型電源として洋上風力発電所の建設を推進している。今や「軽く」「強い」炭素繊維は、サステナブルな社会実現に欠かせない材料として、供給量の拡大と量産成形加工技術の進化により本格的普及期を迎えようとしている。本稿では、炭素繊維の歴史と現状を踏まえつつ、最新の市場動向(シェールガス革命・洋上風力発電・車体軽量化など)を紹介すると共に、炭素繊維の将来性と課題を論じる。

### 1. PAN系炭素繊維について

#### 1) 炭素繊維の製造方法

PAN系炭素繊維(以下、炭素繊維)はポリアクリロニトリル(PAN)繊維(以下、プレカーサー)を焼成してつくられるもので、アクリロニトリル(AN)モノマーからプレカーサーを製造する工程とプレカーサーから炭素繊維を製造する工程に大別される。前者は、ANの重合工程とPANの紡糸工程からなり、重合工程で使用される溶剤が製法により異なること、紡糸方式に湿式と乾式があること等から、採用されている技術によりプレカーサーの物性に違いが生じる。後者は、耐炎化工程、炭素化工程、表面処理工程、サイジング工程からなり、高弾性率タイプの炭素繊維は炭素化工程中で更に高温の炉(2200~2800℃)で焼成して得られる(黒鉛化工程)。高品質のプレカーサーを確保することが、高品質の炭素繊維を製造する為の必要条件である。

#### 2) 炭素繊維の成形加工方法

炭素繊維はマトリックス樹脂と組み合わせて成形加工され炭素繊維複合材料(CFRP)となる。成形加工技術は未だ改良の途上にあり、様々な方法が並存するが、どの方法を採用するかは、部材・製品の形状、要求性能、コスト、数量等による。代表的な成形方法は次の通りである。

### 1. 間接成形法

炭素繊維に樹脂を予備含浸させた中間基材（プリプレグ等）を使って、複合材料に成形加工する方法である。内圧成形法、オートクレーブ成形法、オープン成形法、シートラッピング成形法等の従来法に加え、短サイクル化が期待できるプレス成形などがある。

### 2. 直接成形法

トウ、織物、プリフォーム形態の炭素繊維に樹脂の含浸と成形加工を同時に行う方法である。フィラメント・ワインディング成形法、引抜き成形法、RTM 成形法、VaRTM 成形法等がある。

## 3) 炭素繊維の特徴

炭素繊維は鉄よりも強くアルミよりも軽いと称されるように、優れた物性を有する。

### 1. 機械的特性

汎用タイプの炭素繊維の引張強度はジュラルミン（A2024-T7）の 10 倍以上、引張弾性率は同 3 倍以上の性能をもつ。炭素繊維は密度が約  $1.8\text{g/cm}^3$  と金属材料と比べ軽量である為、比強度、比弾性率では更に優れた機械的特性を発揮する。

### 2. 電氣的・電磁的特性

炭素繊維はほぼ炭素原子からなるため導電性を有する。体積固有抵抗はニクロムに近い。絶縁材として使用されるガラス繊維とは対照的である。各種電極や除電ブラシなどにも利用されるほか、X 線写真の天板やカセットにも応用される。

### 3. 熱的特性

炭素繊維は 1000C 以上で焼成されるため熱的安定性は高い。長さ方向の線膨張率は石英並みに小さく、その優れた寸法安定性のため工業用測定器にも利用される。

### 4. 化学的特性

炭素繊維は一般的に耐薬品性、耐食性に優れる。

## 4) 炭素繊維の軽量化効果

素材間の比較において、炭素繊維の最大の特徴は比強度・比弾性率が優れていることである。炭素繊維を使用することにより、軽量化を通して各用途で経済、技術、環境保全面からメリットを享受できる。特に航空機や車輛等における燃費改善による経済効果が著しい。技術面では、重量が軽くなる分、設計上の制約条件が緩和され、機能・性能の改良を図る事が可能となる。風力発電装置のようなエネルギー関連分野の構造材に利用した場合、軽量化による発電効率の向上やその他パーツ（タービン・タワーなど）軽量化などの効果が期待出来る。環境保全面では、自動車等に使用した場合、燃料消費量の削減と二酸化炭素の排出量の削減効果が約束される。炭素繊維は製造工程において排出する二酸化炭素の量は多いものの、原料、素材製造時から製品（自動車）の使用、廃棄までのライフサイクル全体で見ると二酸化炭素排出削減が図れる。炭素繊維協会では、航空機、自動車、風力発電のライフサイクル全体にまたがる二酸化炭素排出削減効果を検証し、「炭素繊維の LCA モデル」として発表している。

## 2. 炭素繊維の需要と供給

### 1) 炭素繊維需給の歴史

炭素繊維は 1961 年に工業技術院大阪工業試験所の進藤博士により開発された。1969 年に英 Courtaulds 社が世界で始めて工業化し、1971 年に東レ、1972 年に Hercules (後の Hexcel)、1973 年には東邦レーヨン (後の東邦テナックス) が工業化している。三菱レイヨンの工業化は 1983 年である。

工業化開始後、炭素繊維の生産能力は順次拡大化したが、用途・製品開発と生産技術の改良を同時に行う過程であった。1970 年代の開発初期段階では、炭素繊維の特徴を最大限活かせる用途として、航空機用途と釣具やゴルフシャフト等のスポーツ・レジャー用途への応用が進められた。やがて 1970 年代後半、民間航空機の二次構造材に採用され、1980 年代には一次構造材に採用されることで、材料の信頼性が確立された。

1997~1998 年、各社は需要増を見込み、生産能力を一斉に増強、結果的にその後の需給不均衡を招来させた。更に 2001 年の 9.11 による航空機需要の急激な減退が加わり、2003 年頃まで事業の低迷が続いた。

2004 年以降、航空機需要の回復と風車翼等の大型産業用途への採用を機に、年率 15% を超える需要拡大期が到来し、2006 年頃には炭素繊維は一時的に供給不足に陥った。各社が再び生産能力の増強を実施した結果、2008 年には再び需給バランスが緩和したところに、リーマンショック以降の金融危機が直撃した為、各社とも生産調整を余儀無くされた。

2010 年には、中国政府の財政出動によるインフラ需要急増 (特に耐震補強用途) の恩恵もあって需要は急回復した。以後も需要は堅調に推移し、2012 年の炭素繊維の世界需要は、38,500 トンと推測される (三菱レイヨン推定)。これは、3 年前の複合材料セミナーにおいて当社が予測した 2012 年度需要 40,700 トンよりも 2,200 トン少ない。その理由としては、世界景気減速の影響に加え、B787 の就航遅延の影響と中国インフラ需要の低迷等、が挙げられる。

### 2) 炭素繊維の生産能力

工業化以来、日米欧の炭素繊維メーカーは、激しい需給バランスの変動と生存競争に晒され、市場からの退出と M&A による淘汰を余儀なくされてきた。最終的に残ったのは、日系 3 社、東レ、東邦テナックス、三菱レイヨン、欧米系 4 社、Hexcel、Cytec、SGL、Zoltek、台湾系 1 社 Formosa Plastics (FPC) の 8 社である。2010 年以降、韓国 (泰光産業・暁星)、中国 (中複神鷹など)、トルコ (AKSA)、インド (ケムロック) など新興国からの市場参入が相次いだ。但し、新規参入メーカーについては、国内産業への販売が主であり、グローバルに活動しているメーカーは AKSA のみである。炭素繊維製造ライン 2 系列 3,300 トンの名目生産能力を保有する AKSA は昨年同事業を切り出し、米化学大手ダウ・ケミカルが 50% 出資する合弁会社として発足させた。従来プレーヤー 8 社に、この Dow-AKSA を加えた 9 社が現在の主力プレーヤー、と言える。

最近の興味深い事例は、BMW 社が独 SGL と合弁で炭素繊維製造会社 (SGL-ACF 社) を米国に設立し製造を開始したことである。現在 1,500 トンの能力を要する 1 系列を保有し、今夏には 2 系列目 (1,500 トン) を稼働させる予定である。

さまざまな変動要因により現時点での各社の生産能力の把握は困難になっているが、本稿では、各社公表及び新聞・業界誌発表記事をベースに 2012 年末時点での生産能力と、それ以降の増設が予定通り開始される前提に立って下表のとおり生産能力を推定する。設備を保有しているという点では 30 社近く存在するとされる中国の炭素繊維メーカーであるが、中国化学繊維工業協会による統計値（2011 年末既設能力）8,425 トンを採用し、ロシア、インドを併せて名目生産能力 1 万トンと仮定した。

一般的に、公表されている名目生産能力（公称能力）と、実質生産能力とは大きな乖離がある。既存メーカーでは 7～8 割、新興メーカーでは 5 割以下、と推定される。2012 年末時点で、日系 3 社の統計上の名目生産能力は世界総生産能力の 50%を下回るが、実生産能力では 60%を上回り、実生産量ベースでは依然 7 割近いシェアを占めると推定される。

公称能力	地域	2010	2011	2012	2013	2014	2015
三菱レイヨン	日	8,100	8,100	8,100	8,100	8,100	8,100
	米	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
		<b>10,100</b>	<b>10,100</b>	<b>10,100</b>	<b>10,100</b>	<b>10,100</b>	<b>10,100</b>
東レ	日	7,300	7,300	7,300	8,300	8,300	9,300
	米	5,400	5,400	5,400	5,400	7,900	7,900
	欧	5,200	5,200	5,200	5,200	5,200	5,200
	韓				2,200	4,700	4,700
		<b>17,900</b>	<b>17,900</b>	<b>17,900</b>	<b>21,100</b>	<b>26,100</b>	<b>27,100</b>
東邦テナックス	日	6,400	6,400	6,400	6,400	6,400	6,400
	米	2,400	2,400	2,400	2,400	2,400	2,400
	欧	5,100	5,100	5,100	5,100	5,100	5,100
		<b>13,900</b>	<b>13,900</b>	<b>13,900</b>	<b>13,900</b>	<b>13,900</b>	<b>13,900</b>
台湾プラスチック	台湾	<b>6,150</b>	<b>7,450</b>	<b>7,450</b>	<b>8,750</b>	<b>8,750</b>	<b>8,750</b>
Hexcel	米欧	<b>4,200</b>	<b>4,200</b>	<b>5,700</b>	<b>7,200</b>	<b>7,200</b>	<b>7,200</b>
Cytec	米	<b>2,400</b>	<b>2,400</b>	<b>2,400</b>	<b>2,400</b>	<b>2,400</b>	<b>3,400</b>
Zoltek	欧・墨	<b>10,500</b>	<b>10,500</b>	<b>10,500</b>	<b>10,500</b>	<b>10,500</b>	<b>10,500</b>
SGL	欧米	<b>6,000</b>	<b>6,000</b>	<b>6,000</b>	<b>6,000</b>	<b>6,000</b>	<b>6,000</b>
SGL-ACF	米		<b>0</b>	<b>1,500</b>	<b>3,000</b>	<b>3,000</b>	<b>3,000</b>
Dow-Aksa	トルコ		<b>1,500</b>	<b>3,300</b>	<b>3,300</b>	<b>3,300</b>	<b>3,300</b>
泰光産業	韓		<b>0</b>	<b>1,500</b>	<b>1,500</b>	<b>1,500</b>	<b>1,500</b>
暁星	韓		<b>0</b>	<b>500</b>	<b>2,000</b>	<b>2,000</b>	<b>2,000</b>
その他	中・印	<b>7,000</b>	<b>7,000</b>	<b>10,000</b>	<b>10,000</b>	<b>10,000</b>	<b>10,000</b>
合計		<b>78,150</b>	<b>82,450</b>	<b>90,750</b>	<b>99,750</b>	<b>104,750</b>	<b>106,750</b>

表 1：炭素繊維生産能力（三菱レイヨン推定。単位：トン/年）

### 3) 炭素繊維の需要予測

以下に炭素繊維の用途別の需要予測を記載する。

#### 1. スポーツ・レジャー用途

スポーツ・レジャー分野の需要は、2010 年に急回復したが、在庫調整などにより 2011 年に再び低迷、その後、上向きつつあり、既存用途であるゴルフ・釣竿・ラケットに加え、自転車・ホッケースティック・野球やソフトボールのバットなどの用途でも需要が堅調に伸びると見込ま

れる。特に、自転車用途においては、高級グレードでの超軽量化・高機能化追求と汎用グレードでの本格的な量的拡大が進んでおり、今後もこのトレンドは続くと見込まれる。ゴルフに代表されるスポーツ・レジャー分野の高級品消費者層は、これまで日本及び欧米に偏っていたが、今後新興国富裕層向け需要が喚起されれば、この分野は更なる成長の余地がある。スポーツ用コンポジット製品の生産は現在中国沿岸部に集中しているが、今後ベトナム、バングラデシュといった低賃金国への生産移転が進むものと推測される。

## 2. 航空機用途

航空機分野では、新興国のエアライン会社や躍進著しい LCC からの旺盛な発注に支えられ、ボーイング社の 737、777、エアバス社の A320、A380 といった既存機の生産が拡大している。当初計画よりも 3 年以上遅れて 2011 年 10 月に就航したボーイングの中型機 787 は受注機数が 800 機に達し、現在月 5 機生産を本年末までに月 10 機体制に引き上げる計画である。787 は機体の構造重量の約 50% に炭素繊維複合材を使用しており、一機あたりの複合材使用量は約 35 トンとされる。エアバスは 787 の対抗機種となる中型機 A350XWB の機体の 53% に複合材を使用し燃費性能を向上させた。こちらも既に 500 機以上の受注を抱えており、2014 年後半の就航を目指している。18 年には月産 10 機体制に高める計画。この時点で、一機あたりの炭素繊維使用量が大きい A380、A350XWB、B787 の三機種だけで年間 1 万トン近い炭素繊維複合材の需要が発生する計算となる。(本稿執筆時に 787 のバッテリー発火問題が発生し、同機の運行・出荷が停止となった。一刻も早い問題解決と運行・出荷の再開が望まれる)。

複合材を採用するのは中型機、大型機のみではない。2014 年に就航を目指すカナダ・ボンバルディア社の小型機 CS100/300 は、RTM 成形による複合材の主翼を採用する。中国 COMAC 社が開発を進める小型機 C919 も主翼を複合材化する。一方、エアバスは主力の小型機 A320 のエンジンを変更することで燃費効率を大幅に改善する A320NEO を 2016 年には引き渡し開始予定であり、ボーイングも同方式の 737MAX を 2017 年に就航させる予定である。両小型機が複合材を本格採用するのは 2020 年代半ばとなる見通しである。100 席以下のリージョナルジェット機では、三菱航空機が 2015 年に就航させる MRJ の垂直尾翼と主翼・水平尾翼の動翼部分に複合材を採用する。

これら機体に使用される炭素繊維の需要に加え、取替え需要が発生する内装材や座席への複合材利用も増大する見通し。航空機エンジンについても、787 に搭載される GE 製 GEnx エンジンのファンブレードに複合材が採用されたのに続き、A320NEO に搭載される新型エンジンである CFM(米 GE と仏 SAFRAN の合弁)製 LEAP-X エンジン及び Pratt&Whitney 製 PW-1000G にも複合材が採用される。PW1000G 開発には IHI 等日本のエンジンメーカ 3 社も参画しており、IHI は炭素繊維複合材を用いたファンケース等の成形を手掛ける見通しである。

軍用機においては、主翼に複合材を使用した国産戦闘機 F-2 の生産が 2010 年に打ち切られたが、3.11 に東松島基地で津波によって破損した F-2 練習機の補充目的で、2015 年までに 10 数機が追加生産されることが決まり、更に増える可能性もある。航空自衛隊の次期主力戦闘機に選定された F-35 も大量の複合材を使用するが、米国での生産計画が遅れていることが懸念される。

### 3. 産業用途

低成長率ながらも着実な需要の伸長が見込まれるスポーツ・レジャー用途、新型機の就航計画とビルドレイトに基づき長期的な需要見通しが立てられる航空・宇宙用途に比べ、産業用途の長期的な需要予測には困難が伴う。その理由は、産業用途の需要が、世界的な景気動向に左右されるだけでなく、各国のエネルギー政策、燃費規制などの立法政策、産業振興策や補助金政策、原油価格や天然ガス価格の動向、に大きく影響されるからである。

短期的には、産業用途はリーマンショック後の低迷を経て、風力発電分野を中心に需要回復、堅調な伸びを見せている。米国での発電税額控除（PTC：Production Tax Credit）政策が昨年末に打ち切られるとの観測（最近ようやく延長が決定）から、風車向け需要が一時的に停滞する現象が発生したが、燃費規制に対応すべく軽量化検討が進んでいる自動車や、新型天然ガス「シェールガス」を収める運搬容器の補強材としての需要など、その他の分野においては需要が堅調に伸びると期待されている。後述する風車、自動車、圧力容器以外の注目すべき産業用途の用途と需要動向を以下に示す。

#### a) 耐震補強・土木建築用途

炭素繊維の織物やシートに樹脂を塗工し固定する方式によるコンクリート構造物の補修・補強用途は、鉄材を使用した工法と比べ、軽量かつ取り扱い容易であることから、欧米・日本など先進国のみならず中国を中心とするアジア諸国にも着実に浸透している。最近では「国土強靱化計画」を打ち出した安倍政権による緊急経済対策にも、学校、官庁、病院等の公共建築の耐震化工事や老朽化した橋梁・トンネルなど社会インフラの補修・補強工事が盛り込まれている。また新規建造物にも予め炭素繊維を使用することで、より大型で高性能な構造物の提供が可能となる。

#### b) 高圧電線心材用途

新興国の発展に伴い、大容量電線網の敷設需要が高まっている一方、欧米においても、風力、太陽光等の再生可能エネルギーを既存グリッドに接続する為の高効率送電線需要が発生している。従来の電線では高温化による弛みや、積雪に伴う断線などの課題があったが、炭素繊維強化複合材料をテンションメンバーとして採用することで、鉄塔間のロングスパン化が可能となった。また CFRP 採用により、電流容量の増加、電力ロス削減、軽量化が期待でき、この先南米や中国市場を中心に需要の拡大が見込まれている。

#### c) 電子機器筐体用途

最近注目を集めているのが、炭素繊維の剛性、電磁波遮蔽特性を生かしたパソコンやウルトラブックの筐体用途である。これまでは炭素繊維のチョップドファイバを混合した熱可塑樹脂ペレットを射出成形する方法が主流であったが、より薄肉化・軽量化を実現する為、高級スポーツ部材や航空宇宙材料に使用されてきた高弾性糸の薄目付プリプレグが採用される製品も現れている。また、今後の薄型テレビの本命とされる大型有機EL表示装置（OELD）にも、剛性確保の為に CFRP 製のパネルが採用されている。

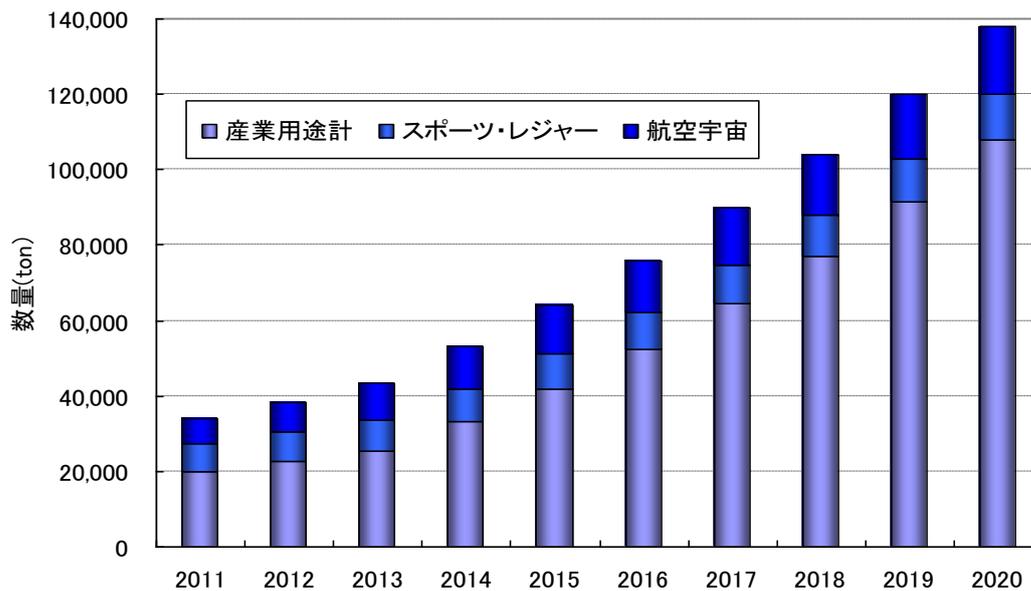


図1：炭素繊維需要の成長予測（三菱レイヨン推定。単位：トン/年）

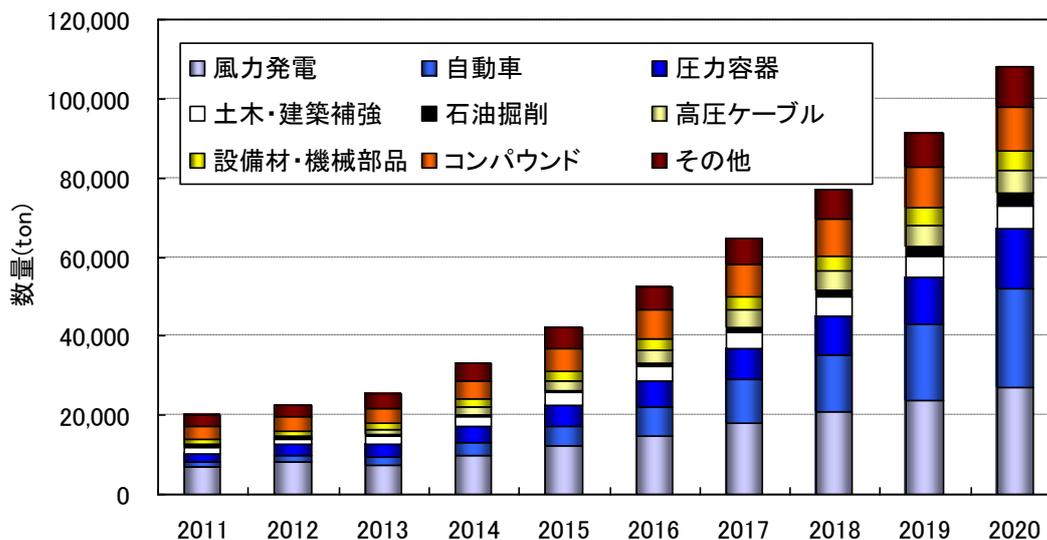


図2：用途別産業用途需要の成長予測（三菱レイヨン推定。単位：トン/年）

なお、地域別内訳は、2012年の推定世界総需要38,500トン中、日本含むアジアが12,500トン、欧州が15,000トン、北米が10,000トン、その他地域1,000トン、と推定される。これが2015年には、日本含むアジア20,000トン、欧州24,000トン、北米16,500トン、その他地域2,500トンと、それぞれの地域で着実に伸長すると予想される。

### 3. 炭素繊維の可能性

リーマンショック以降落ち込んだ需要が回復、堅調に成長している炭素繊維業界であるが、2013年～2015年には急激な需要拡大期を迎える事を予想している。その原動力となるのが以下に述べる環境に配慮した産業用途であると考えられる。

#### 1. 洋上風力発電

2012年時点で最も普及している再生可能エネルギーは風力発電である。良好な風資源のある環境下では高いグリッドパリティを達成しており、経済的合理性も兼ね備える。2012年末時点で世界全体で累計設備容量28万MW（メガワット）の風力発電機が導入されており、この内洋上風力発電の導入量は5000MWであり、欧州に集中している。EUは一次エネルギー供給に占める再生可能エネルギーの割合を2020年に20%に高めることを目標としており、その切り札として、各国で大規模洋上風力発電所（オフショアウインドファーム）の建設計画が進行中である。中でも英国は、総額13兆円を投じ、2020年までに7000基以上の風車を沖合に設置し、原発約30基分に相当する3.2万MWの発電能力を持つ巨大な洋上電源開発を官民挙げて推進している。

大規模洋上風力発電所に設置されるタービンの規模も、現在主流の3MW機から5～10MWの次世代機開発が急速に進んでいる。発電効率の向上には風車直径の大きさが密接に関係するが、羽根の大型化傾向に伴い、炭素繊維を羽根の桁材（スパー）や外皮（シェル）に利用する設計が増加することは確実に考えられる。炭素繊維は風車翼の剛性設計に貢献するが、複合材料としての圧縮性能の向上、また、性能を十分に発現し、かつ経済的な中間材・成形法が求められており、プリプレグ積層法や積層した一方向性繊維への樹脂注入法などの既存方法に加え、引抜き成形法やダイレクト成形法など、より生産効率を高められる成形方法の開発・採用が進むと見込まれる。

#### 2. シェールガス革命

“シェールガス革命”とは、技術革新による非在来型ガスの商業開発がもたらす世界の天然ガス埋蔵量の急増のことである。特にシェールガスブームに沸く北米では、天然ガス価格の下落に伴い、圧縮天然ガス（CNG）を燃料とする公営バス、廃棄物配送車、民間会社の配送トラックなどの大型車両の市場が急成長している。天然ガス車のもう一つのメリットは、環境負荷が低いことである。ガソリンに比べCO<sub>2</sub>排出量を10～20%減らせるのに加え、天然ガストラックはディーゼルトトラックに比べNO<sub>x</sub>（窒素酸化物）やSO<sub>x</sub>（硫黄酸化物）などの排出量が大幅に低減され、黒煙や粒子状物質（PM）もほとんど排出しない。大型車両に搭載される天然ガスを20MPaを超える高圧で貯蔵する容器には、軽量化目的で金属やプラスチックのライナーを炭素繊維で補強したコンポジットタンクの採用が増加している。

天然ガスの利用増加に伴い、パイプラインや液化設備の投資には適さない中小ガス田からの近中距離陸上運搬用のコンポジットタンク需要も東南アジア市場などを中心に拡大しており、海運タンクとあわせて、超大型圧力容器への炭素繊維需要が見込まれる。

この用途においては、材料としてより安定的に性能が発現できる、性能・信頼性の高い炭素繊維が必要とされており、日系メーカーが高いシェアを保持している。

### 3. 車体軽量化

自動車は、大量の「温暖化ガス」を排出している分野として、世界各国で厳しい排ガス・燃費規制が課されている。とりわけ欧州では、域内で販売される自動車の走行距離 1kmあたりの CO<sub>2</sub> 平均排出量を 120g 以下に抑えるという規制の導入が 2012 年から始まった。2015 年までに全ての新車を対象に目標達成が求められ、未達成のメーカーには課徴金が課せられる。このような厳しい規制に対応するため、欧州自動車メーカー、とりわけ大型高級車やスポーツカーを主力とするドイツメーカー各社は環境対応車の開発を加速している。高効率内燃エンジンの開発、電気自動車やハイブリッド車の導入、に加え、燃費改善に有効な車体の軽量化にも取り組んでいる。

炭素繊維は「究極の車体軽量化材料」とされるが、その用途は高級スポーツカーを中心に、スポイラー、ルーフ等の外装、インパネ等内装の他、ドライブシャフト、シャーシの一部等に使用されるに留まっている。レクサス LFA のような限定生産車を除いて、これまで量産車モデルの構造部材に CFRP を適用する動きはなかった。炭素繊維が金属に比べ高価であることに加え、大量生産に適合した生産技術の確立と製造工程短縮という大きな課題が横たわっていたからである。

このような状況にあって、独 BMW 社は、炭素繊維を車体骨格部に大量採用した小型電気自動車 i3 の量産化を発表し、炭素繊維業界のみならず自動車業界をも驚かせた。同社は自動車メーカー自身として炭素繊維製造に出資、自社工場で CFRP 部品成形加工を実施することで材料ロス低減・サプライチェーン短縮化を図った。また、CF 製多軸織物を RTM 成形することにより、従来法と比較して、コスト競争力と量産性を高めている。本プロジェクトは、自動車用途への CFRP 量産適用化の試金石になると考えられ、本年 10 月発売予定の i3 の成功が期待される。

他の自動車メーカーも、CFRP の採用検討を進めており、材料メーカー、成形メーカー、自動車メーカー間での共同開発・協業がますます進むと見込まれている。BMW が採用した RTM 成形方法に加え、パーツに応じ、より短サイクルで量産性に優れた PCM 工法（プリプレグをプレス成形する方法）や、炭素繊維を PP（ポリプロピレン）や PA（ポリアミド）といった熱可塑樹脂で含浸させた中間材料を成形した熱可塑性炭素繊維複合材料(CFRTP)の採用検討が進んでいる。

### 4. 燃料電池車 (FCV)

水素と空気中の酸素を反応させて発電する燃料電池は、クリーンなエネルギー源として注目されており、家庭用コジェネ発電装置（エネファーム）として実用化されていることに加え、次世代エコカーへの搭載が期待されている。電気自動車などに比べ、充填時間の短さ、走行距離の長さなどが強みとされる。現在、日米欧韓の自動車メーカーは 2015 年頃に普及開始を目指すべく開発を進めている。一方、燃料電池車の普及には、インフラ整備が不可欠となる。日本政府は、燃料電池車へ燃料（高圧水素）を供給する水素ステーションを 2015 年までに 100 箇所設置する計画を補助金等で支援する。

燃料電池車は、高圧水素による水素貯蔵が最も商業生産に近い方式であると考えられている。従来の自動車並みの航続距離を確保するために充填圧力が 70MPa 超の高圧水素ガス（CHG）容器が必要とされており、CNG タンク用途を上回る高性能な炭素繊維の採用が検討されている。

また、自動車用燃料電池の電極ガス拡散層（GDL）の基材にも、炭素繊維の短繊維を分散・抄紙したシートを炭化・結着させたカーボンペーパー等が使用される見通しである。燃料電池車の本格普及は 2020 年前後になると思われるが、炭素繊維が技術革新に貢献出来る分野であることは疑いない。

#### 4. 炭素繊維産業発展の課題

炭素繊維のもつ材料としての可能性が、再生可能エネルギー分野や代替エネルギー自動車分野で本格開花し、期待される成長を実現する為に業界が取り組むべき課題を挙げる。

##### 1) コストと環境・エネルギー負荷の低減

金属材料よりもはるかに高い炭素繊維のコストは、自動車やエネルギー関連の産業用途展開にあたり大きな障害となっている。一般的に、炭素繊維のコストを構成する主要素としては、プレカーサーの原料となる石油由来のアクリロニトリルの市況価格、プレカーサー紡糸や炭素繊維焼成の設備投資費、電気・ガス・窒素・蒸気といったユーティリティコスト、が挙げられる。今後、設備資材や建設費が安く、安価な電気やガスが利用できる新興国での炭素繊維製造参入の動きは続くと推測される。一方、日系メーカーの強みは、高性能で安定した品質を有する炭素繊維を高い設備稼働率と製品収率で製造できる生産技術である。その技術優位をさらに高めながら、新興国メーカーの追い上げに対し、省エネをはじめとする総合的なコスト競争力向上によって顧客要求や用途適性に応えるのが、日系メーカーの役割であると考えられる。

中長期的には、炭素繊維製造時の使用エネルギーと CO<sub>2</sub> 排出量の半減、及び生産性の大幅向上を両立させる「革新炭素繊維製造プロセス」の研究が国プロで進められている。一方、海外の企業や研究機関で、PAN に換わるリグニンなど非石油由来原料を用いた炭素繊維の開発が進められているが、性能やコスト面で課題は多いようである。

##### 2) 量産成形加工技術

航空機の構造材用やスポーツ部材用に開発されてきた炭素繊維複合材料（CFRP）の成形加工技術は、大型風車翼や自動車のボディの成形にはそのまま応用できない。とりわけ、年間 10 万台規模の量産車の部品製造には、分レベルの成形時間で部品を造るハイサイクル工程の確立が不可欠である。炭素繊維メーカー各社でも独自のハイサイクル成形方法の開発が進められており、欧米の大手自動車メーカーとの間で共同開発の取り組みも始まっている。一方、国内では、本年を最終年度とする NEDO（新エネルギー・産業技術共同機構）の「サステナブルハイパーコンポジット技術の開発」プロジェクトが、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 の成形技術開発に取り組んできた。また、新たな試みとして、名古屋地区に設立される NCC（ナショナルコンポジットセンター）を拠点に、複数の自動車メーカー、材料メーカー、加工成形メーカー、機械メーカーなどが参加・集結し、複数の研究開発テーマを同時並行で進める企画が進展中である。同様の試みは、ドイツにおいてニーダーザクセン州主導の CFK-Valley という企業コンソーシアムが優れた実績を挙げている。

### 3) リサイクル

現状 CFRP 成形工程では大量の工程屑が排出され、数年後には現需要を上回る廃材量になるとの予測もある。更に退役屑(End of Life)も時間差で排出されて来るため、熱硬化、熱可塑性に関わらずリサイクル CF (RCF) 取出し再利用は不可欠との認識が形成されつつある。CF リサイクル事業化実現には廃材収集、RCF 回収、用途開発の同時解決が必要となる。RCF は低コスト材料として期待されており、用途開発には他方面からのアイデア創出が望まれる。

航空機業界では B787 や A350XWB 等新型航空機の CFRP 工程屑の再利用の取り組みが進む。自動車業界ではコストだけでなくリサイクル率 90%以上、リサイクル時の環境・エネルギー負荷低減、リサイクル事業化も含めて車体への CFRP 部品の適用要件のひとつとなっている。BMW 社はボーイング社との間で、炭素繊維のリサイクルに関する共同研究に乗り出している。

炭素繊維協会は 2006 年から経済産業省の支援で福岡県大牟田市に熱分解法によるリサイクルパイロットプラントを建設しミルド CF リサイクルを実証した。2009 年からは福岡県の支援を受けミルドだけでなくチョップド RCF 用途展開を検討した。2012 年度からは PAN 系 CF メーカー 3 社が当該プラントを用いて事業化に向けた検討を行っている。

### 4) サプライチェーン

量産車や大型産業用途案件への本格採用にあたっては、原材料から部品製造、リサイクルまでのサプライチェーンの整備が欠かせない。残念ながら、世界的に見ても、用途開拓途上の段階では、炭素繊維、樹脂といった原材料の供給側には大手メーカーが揃っていても、織物などの中間基材や CFRP 成形加工を手掛ける業者には中小企業が多い。炭素繊維メーカーが出来ることは限られている。優れた技術力を持つ中小企業を支援し、新規案件への参画を促進する仕組み構築が、日本の産業競争力向上、技術革新実現に向け以前に増して重要となっている。

## 5. 結語

われわれは、これまでのどの世代にも増して、「地球環境の保全と人類の豊かさ追求の両立」という難しい問題に直面している。炭素繊維はその優れた特性で、今回のセミナー副題でもある「地球環境の切り札」となることが期待されている。PAN 系炭素繊維は化石燃料を主な原料としており、その製造過程で多大なエネルギーを消費する。そのため炭素繊維単体を見れば、必ずしも地球環境に優しい素材とは言えない。しかしライフサイクル全体で捉えれば、排出ガスの削減や各種構造物の長寿命化など、地球環境に多大な貢献をもたらすことのできる素材である。この素材の可能性を最大限に引き出すには、炭素繊維業界のみならず、関連産業、顧客、官学との協創関係を通じた技術革新が必要である。我々炭素繊維業界は、共に切磋琢磨し、プレカーサーや炭素繊維そのものの製造技術を見直し、少しでも環境負荷が少なく、しかも生産性が高く低コストの炭素繊維製造法への転換を進めながら、素材、樹脂、中間基材、成形加工のほか設計・評価、リサイクル技術を含めて、より社会に炭素繊維の価値を提供できる総合的産業に育て上げることが出来るよう鋭意努力する所存です。関係各位皆様のご理解とご協力をお願い致します。