

## PAN系炭素繊維の現状と将来 (環境配慮型社会と炭素繊維の可能性)

三菱レイヨン株式会社

取締役執行役員 炭素繊維・複合材料事業部長 立林 康巨

1961年にPAN系炭素繊維が開発されて以来、まもなく半世紀になろうとしている。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急減し、折しも炭素繊維製造各社の増設ラッシュに重なったため一転供給過多状況に陥っている。一方、世界的には地球温暖化阻止に向けて各国が「温室効果ガスの大幅削減目標」を掲げ、そ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加速が急務となっている。「軽く」て「強い」炭素繊維は省エネとグリーン・ニューディール政策実現に欠かせない材料であり、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、今後の環境適応型社会における炭素繊維の将来性を論じる。

### 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、アクリルニトリル（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、サイジング処理工程からなり、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（2200C～2800C）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、性能及びコスト等による。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がある。

##### 2. 直接成形法

トウ、クロス、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、軽量化により発電効率の向上が期待出来る。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。炭素繊維協会ではこれを「炭素繊維の LCA モデル」として発表した。

([www.carbonfiber.gr.jp/lcamodel.pdf](http://www.carbonfiber.gr.jp/lcamodel.pdf))

### 5) 炭素繊維のリサイクル

地球温暖化がクローズアップされ、環境負荷の低減に向け各界で研究開発・事業化の努力が行われている。リサイクル・システムは公共財的要素が強いことから、炭素繊維協会では協会活動の一環として、経済産業省の支援を受け、CFRP のリサイクル実証実験事業に取り組んできた。そのコンセプトは、再生炭素繊維をマイルド化して市場に戻すというもので、回収した CFRP を粉碎、分級し、マトリックス樹脂の熱分解工程を経て、再生炭素繊維を製造する。炭素繊維の普及が進めば CFRP の廃棄量も増加する。それまでにリサイクル・システムの事業化が望まれる。

## 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 年代には一時構造材に採用される。

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のである。各社は大規模減産、完工設備の稼働延期、増設工事の一時中断等、の対策を講じているが、一時的に供給過剰に陥っていることは否定できない。

### 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) である。

一方、炭素繊維の将来性が注目されて以降、新興国メーカーが炭素繊維生産に参入する動きが顕在化している。その代表例が 1,000 トン規模の設備を稼働準備中と言われるトルコの Aksa である。また中国では国家戦略のもとに十社を超えるメーカーが炭素繊維製造を標榜しており、中複神鷹炭素繊維、威海光威集団等の複数のメーカーが既に量産を開始している。今後、インド、ロシア、中東からも炭素繊維事業に参入する企業が現れると予想され、グローバルな競争が加速する。そこで勝ち残るには、一層の品質向上とコスト低減、成形加工を含む技術開発が不可欠となる。

既存メーカーの減産、増設延期、新興国メーカーの参入、といった変動要因によって、現時点での各社の生産能力の把握は困難になっている。本稿では、各社公表及び新聞・業界誌発表記事をベースに 2009 年末時点での生産能力と、増設分が 2010 年内に稼働を開始する前提に立って 2010 年末の生産能力を推定する。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。

表1：炭素繊維生産能力（三菱レイヨン推定。単位：トン/年）

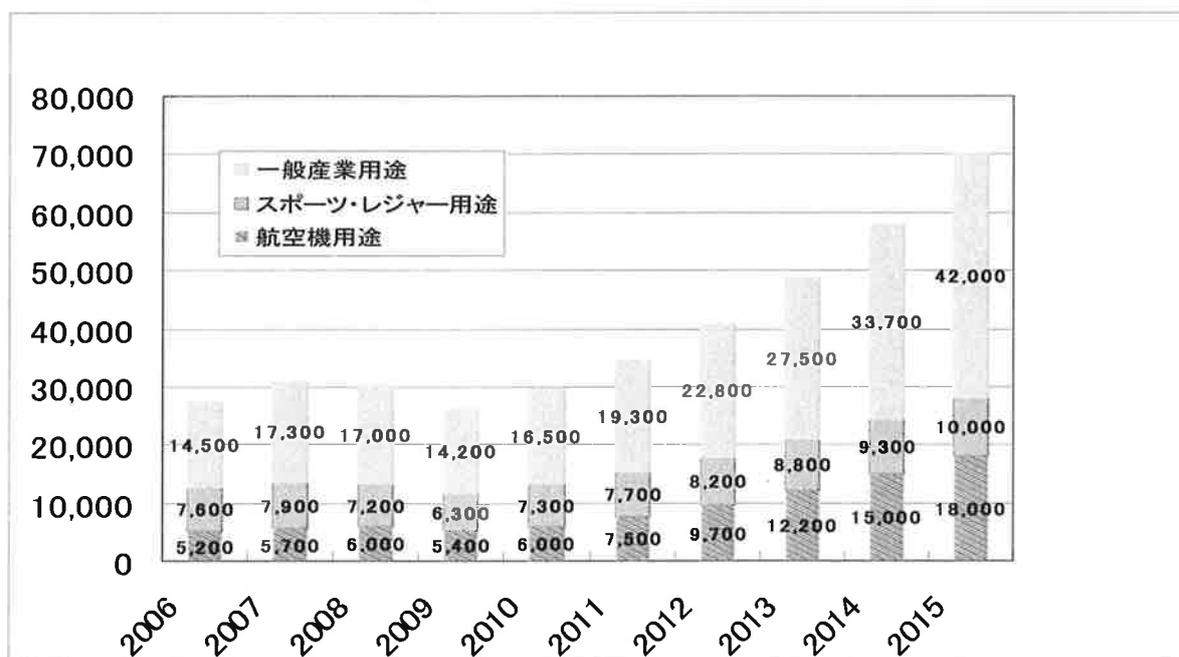
公称能力		2005	2006	2007	2008	2009	2010
三菱レイヨン	日	3,200	3,200	5,400	5,400	5,400	8,100
	米	1,500	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
	欧	0	500	500	750	750	750
		<b>4,700</b>	<b>5,700</b>	<b>7,900</b>	<b>8,150</b>	<b>8,150</b>	<b>10,850</b>
東レ	日	4,700	4,700	6,900	7,300	7,300	8,300
	米	1,800	3,600	3,600	5,400	5,400	5,400
	欧	2,600	2,600	3,400	5,200	5,200	5,200
		<b>9,100</b>	<b>10,900</b>	<b>13,900</b>	<b>17,900</b>	<b>17,900</b>	<b>18,900</b>
東邦テナックス	日	3,700	3,700	3,700	6,400	6,400	6,400
	米	0	2,000	2,000	2,000	2,400	2,400
	欧	1,900	3,400	3,400	3,400	5,100	5,100
		<b>5,600</b>	<b>9,100</b>	<b>9,100</b>	<b>11,800</b>	<b>13,900</b>	<b>13,900</b>
台湾プラスチック	亜	<b>2,150</b>	<b>2,150</b>	<b>3,950</b>	<b>6,150</b>	<b>6,150</b>	<b>8,750</b>
ヘクセル	米	2,500	2,500	2,500	3,300	3,300	5,400
	欧	0	0	0	800	800	1,600
		<b>2,500</b>	<b>2,500</b>	<b>2,500</b>	<b>4,100</b>	<b>4,100</b>	<b>7,000</b>
サイテック	米	<b>1,900</b>	<b>2,150</b>	<b>2,400</b>	<b>2,400</b>	<b>2,400</b>	<b>2,400</b>
ゾルテック	米	1,500	2,500	2,500	2,500	4,750	4,750
	欧	2,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000
		<b>3,500</b>	<b>8,500</b>	<b>8,500</b>	<b>8,500</b>	<b>10,750</b>	<b>10,750</b>
エス・ジー・エル	米	1,900	1,900	2,900	2,900	4,000	4,000
	欧	1,000	1,000	1,000	1,000	2,000	2,000
		<b>2,900</b>	<b>2,900</b>	<b>3,900</b>	<b>3,900</b>	<b>6,000</b>	<b>6,000</b>
アクサ	亜	0	0	0	0	1,500	1,500
その他		0	0	0	0	3,900	7,000
計		<b>32,350</b>	<b>43,900</b>	<b>52,150</b>	<b>62,900</b>	<b>74,750</b>	<b>87,050</b>

### 3) 炭素繊維の需要予測

年率10%を超える伸び率で急拡大してきた炭素繊維の需要であるが、2008年の金融危機を境に急速に減退した。欧米を直撃した不況の影響で、スポーツカー、レジャーボート、超軽量自転車、ゴルフシャフト等の高級耐久消費財の需要が急減した。本年に入ってスポーツ・レジャー分野の需要は漸く上向きつつある。航空機分野では、航空機メーカーの受注減による月間生産機数の下方修正が需要の下押し要因となっている。加えて、CFRP使用率が約50%に及ぶボーイング787の全日空への一号機引渡しが、当初計画の2008年末から2010年末へ2年間延びたことも需給バランス不均衡の一因となっている。産業用途においても、設備投資意欲の冷え込みにより、液晶パネル搬送用ロボットアーム、製紙機械・印刷機械用ロール、等の生産財需要が急減した。炭素繊維の短繊維を混合する高性能コンパウンドの需要も、主要用途の自動車部品、家電・電子機器部材の大幅減産に伴い、一時需要が落ち込んだ。自動車や家電製品の生産は、各国政府の景気刺激策の恩恵で急回復しており、コンパウンド需要も立ち直りつつある。消費財・生産財の需要が落ち込んだ中で、唯一伸びたのが土木建築補強需要である。中国では景気対策の一環で建築物補強に多くの予算が投じられ、施工容易な炭素繊維シートの需要が急増した。一方、景気回復政策の切り札として期待された風力発電ファームの建設であるが、欧米デベロッパー各社の資金

調達難により新規計画に遅れが生じている。その結果、炭素繊維の需要も伸び悩んでいる。当社の独自調査による推定では、2007年、2008年と3万トン台に達した炭素繊維需要量は2009年には25,900トンに急減した。その内訳は航空機分野が5,400トン、スポーツ・レジャー分野が6,300トン、一般産業用途が14,200トンである。2010年はスポーツ・レジャー分野、一般産業用途分野で需要回復が目覚しいが、生産調整が続く航空機分野の需要回復が年後半にずれ込む為、3万トン台には届かない公算が大きい。

表2：炭素繊維需要の成長予測（三菱レイヨン推定。単位：トン/年）



### 3. 環境配慮型社会と炭素繊維の可能性

炭素繊維業界にとって2008年～2010年の3年間は踊り場となったが、2011年から再び年率20%近い力強い需要拡大期を迎えることを予想する。その原動力となるのが以下に述べる温暖化ガス削減対策と成長対策を兼ねた世界的な環境対策であると考えている。

#### 1) 航空機用途

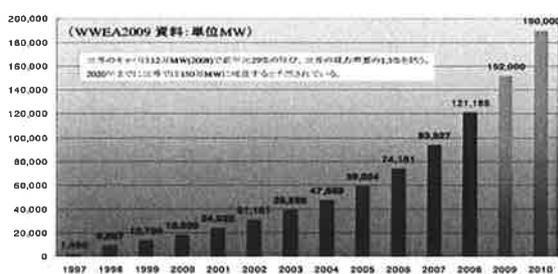
CFRPは、1980年代全般から航空機一次構造材で使用が開始され、現在では航空機の軽量化に必要な不可欠な部材として認知されるに至った。重量軽減効果による燃料効率の向上は、同時に排気ガス量の軽減につながる。ボーイングの新型機787は機体のCFRP化率約50%を達成することで、同サイズの旅客機と比較し20%の燃費抑制に成功した。航空会社約230社が加盟する国際航空運送協会（IATA）は昨年10月、2020年までに燃料効率を1.5%向上させ、航空機による二酸化炭素排出量を50年までに05年比で半減させる目標を掲げた。航空機が排出する二酸化炭素排出量は世界全体の2%程度とされるが、787をきっかけに環境に配慮した航空機の開発が進むことは間違いない。ライバルのエアバス社はやはり機体の50%以上をCFRP化する

A350XWB を 2013 年頃の就航を目指し開発中である。これら中型機と同等の燃焼効率を持つ内部に通路を一つしか設けないナローボディ機の投入は 20 年近傍となる見込みである。こうした軽量化による燃費効率改善の流れはリージョナルジェットと呼ばれる 100 席以下の短距離輸送用小型ジェット機にも及んでいる。2014 年第一四半期に初号機の引渡しを行う予定の三菱航空機の MRJ（三菱リージョナルジェット）はこのクラスの機体では初めて CFRP で垂直尾翼を製作する（主翼は金属製）。

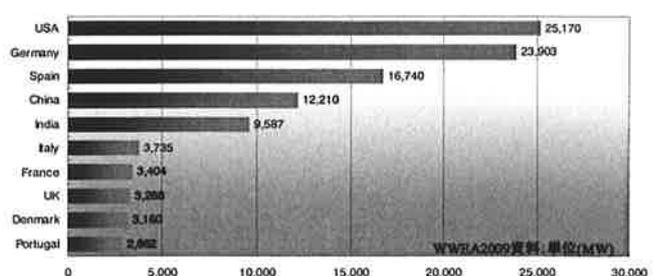
## 2) 風力発電用途

2009 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。2009 年時点で世界において 15 万 Mw の風力発電機が導入されており、2020 年にはその約 10 倍に成長すると考えられている（図 1、2）。いち早く普及が進んだ欧州では洋上風力発電の開発へとシフトしており、合計発電量で 10 万 Mw に及ぶ各種洋上ウィンドファームが計画の諸段階にある。広大な潜在建設地を有する北米や中国では、政府の強力な優遇政策を背景に大きな伸びを示している。AWEA（米国風力発電協会）は経済逆風下にも関わらず、2009 年に米国内に新設された風力発電能力が 1 万 Mw に達したことを発表した。2030 年までに風力発電による電力需要を約 20% にし、約 25 万人の雇用創出を実現する目標を掲げたオバマ大統領の演説は記憶に新しい。一方中国政府は他国に先駆けて 2020 年までに 30 万 Mw の発電容量達成の目標を掲げている。中でも内蒙古自治区の風力発電の設備容量は、2010 年までに 8 千 Mw、2015 年までに 2 万 Mw 前後と、長江三峡ダム発電所の規模に達すると見られる。実際、中国の風力発電建設ラッシュは目覚しく、欧米の新規計画が資金難で遅延や頓挫を余儀なくされる中で、昨年だけで 2 万 Mw を超える発電容量を新設したと推定される。新再生可能エネルギーの中で、風力発電は最も早く政府の補助金に頼らない収益体制を確立し、伝統的なエネルギーと競争できる分野になると予想される。発電効率の向上には風車直径の大きさが大きく関係し、風車の大型化傾向は今後とも継続する。これまでは一部の機種にのみ炭素繊維が利用されてきたが、今後、炭素繊維を風車翼に利用する設計が増加することは確実と考えられる。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いる。

（図 1）世界の風力発電能力の推移



（図 2）国別風力発電能力



### 3) 自動車用途

1979年、FordがCFRPを使用した車を発表した。これが自動車に炭素繊維を使った最初のケースといわれている。約30年を経た現在では、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ている。しかしこれまで量産車モデルの構造部材にCFRPを使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るからである。ところが、この一年で状況は一変した。金融危機を契機に、温暖化ガスの排出を抑えた環境対策車の開発競争が一気に加速。その結果これまで高価ゆえに本格的導入は当面先と思われてきた電気自動車の量産が間もなく始まろうとしている。動力源の如何に関わらず、車体の軽量化は走行距離の延長と省エネに不可欠であるゆえ、自動車メーカの炭素繊維採用意欲も高まりつつある。昨年10月には、独BMW社が2010年代前半に量産を開始する新しい小型量産車(Mega City Vehicle)に炭素繊維を使用するため、独SGL社と炭素繊維及び、その織物を製造する合弁会社を設立することを発表した。自動車メーカ自身が炭素繊維製造に出資し、自社工場でCFRP部品成形加工を実施することで、ロスのない材料サイクルと量産効果の実現を狙うものと思われる。新規材料を採用する場合の一つのモデルとして興味深い。

### 4) 燃料電池

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、車載用、家庭用コジェネ発電等で実用化検討が進められている。当社では、これまで培ってきた炭素繊維・複合材料技術をもとに、固体高分子型燃料電池の電極部品として安定した品質と低コスト化が期待できるロール状の燃料電池用ガス拡散層(GDL)の開発に成功し、“パイロフィルGDL”として、生産、販売を行っている。本格普及までには、ある程度の期間が必要と考えられるが、炭酸ガス排出抑制による環境改善効果も大きく、今後、大きな需要が期待される用途のひとつである。

### 5) 天然ガスと圧力容器

天然ガスは化石燃料のひとつであるが、昨今の原油の大幅な変動を受け、あらためて注目を集めている。ガスは体積が嵩張るため産ガス国周辺での消費が図られ、圧縮天然ガスを燃料とする自動車の市場は成長している。また、天然ガスの利用増加に伴う天然ガス運搬用の圧力容器の需要も拡大している。圧縮天然ガスを貯蔵する容器のサービスプレッシャーは約20MPa程度が一般的であり、容器の軽量化がメリットとなる用途(例:天井部に燃料タンクを搭載するバスなど)には、炭素繊維強化の圧力容器が多く使用されている。一方、近い将来に普及が期待されている燃料電池自動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る。従来の自動車並みの航続距離を確保するためには高圧容器(~70MPa)が必要とされており、炭素繊維の利用が期待される。自動車用途以外の圧力容器として、消防士が利用する空気ボンベや在宅酸素療法に利用する酸素ボンベなど、軽量化が望ましい用途での炭素繊維の利用は今後とも拡大が期待される。

#### 6) スマートグリッドとケーブル

新興国の発展に伴う電気エネルギーの利用拡大に基づいた新たな電線網の敷設や、スマートグリッド化に伴う広範囲での双方向電気エネルギーの伝達に伴い、新たに電線ケーブルの設置需要が高まっている。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る。北米、南米、中国などにおいて、炭素繊維強化プラスチックをコア材とした電線ケーブルの需要が拡大している。風力発電にとって、電力網のインフラ設備の遅れは大きな課題である。中国ではせっかく建設されたウィンドファームが送電網の容量不足で遊休状態となっている。そのため中国政府に後押しされた電力会社による電力網インフラ設備投資が急拡大している。

#### 7) コンクリート構造物の補強

炭素繊維によるコンクリート構造物の補修・補強は、阪神・淡路大震災をきっかけとする日本での普及を皮切りに、世界的に広まっている。社会インフラである道路・橋梁・各種建築物の補修・補強は、それらの構造物の長寿命化または耐震補強などリスクの低減に貢献している。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を提供することが可能となる。

### 4. 結語

われわれは、これまでのどの世代にも増して、地球環境の破壊と各種資源の枯渇という大きな問題に直面している。その課題解決のために地球規模から一個人に至るまでの大きなトレンドの下、炭素繊維はその優れた特性で、地球環境の悪化の防止と保全に役立つ素材のひとつであると考えられる。

PAN系炭素繊維は化石燃料を主な原料としており、またその製造にも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。しかしながら炭素繊維を利用することで得られるメリット、すなわち排出ガスの削減や各種構造物の長寿命化など、エンドユースでの利用過程において、その本領を発揮する。すなわち炭素繊維の利用はライフサイクル全体を通して見るのが重要であり、その意味で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。我々、炭素繊維または複合材料に関与する業界は、プレカーサーや炭素繊維そのものの製造技術を見直し、さらに環境負荷が少なくしかも生産性の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、中間材、成形加工のほか設計や評価、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よう、共に切磋琢磨し研鑽を続けることが必要である。今後も社会の期待に応えられる様、業界を挙げて鋭意努力する所存であります。

以上