

PAN 系炭素繊維の現状と将来

東邦テナックス株式会社
取締役 営業部門長
乾 秀桂

炭素繊維の歴史は古く、誕生は 19 世紀末にスワンやエジソンが木綿や竹を焼いて作った電球用フィラメントにまで遡る。現在主流となった PAN 系炭素繊維は 1961 年に通産省工業技術院大阪工業技術試験所の進藤昭男博士がアクリル繊維を使った炭素繊維の基本技術を発明したのがそのはじまりである。開発から半世紀を経た PAN 系炭素繊維は、その「軽く」て「強い」特長が、「省エネ・省力化」、「温暖化ガス削減」など時代のニーズに合致、航空機、自動車をはじめとするモビリティ分野、風力発電、圧力容器など環境・エネルギー分野を中心に、今後の市場拡大が期待されている。

世界の PAN 系炭素繊維市場は、日系 3 社（東レ、三菱レイヨン、東邦テナックス）がおおよそ 60% のシェアを有し、市場をけん引している。一方で炭素繊維への世界的な注目度の高まりに伴い、中国、インド、トルコ、韓国などからの新規参入が相次ぎ、さらにロシア、中東からの参入も予想され、世界規模での競争がますます激化する見通しである。

本稿では、PAN 系炭素繊維の現状・将来展望に加え、近年成長著しい新興メーカーの動向を紹介する。

1. PAN 系炭素繊維について

1). 炭素繊維の定義

ISO では「有機繊維を焼成して得られる炭素含有量が 90%以上の繊維」と定義されている。PAN 系炭素繊維の原料は、ポリアクリロニトリル (PAN) 繊維である。炭素繊維の開発初期に、レーヨンなど様々な繊維が炭素繊維の原料として試された結果、炭素原子 (C) の含有量が多いこと及び不融化が比較的容易であったことが決め手となり、PAN 系炭素繊維が工業化され現在に至っている。PAN 系炭素繊維は更に単繊維の本数により、高い力学特性と品位が要求される用途に適したレギュラートウタイプ（一般に単繊維 24,000 本まで）と、より汎用的なラージトウタイプ（一般に単繊維 40,000 以上）に分類される。

2). 特長

PAN 系炭素繊維の最大の特長は「軽く」て「強い」ことである。その比重は 1.8 前後と、競合他素材の比重、鉄：7.8、アルミ：2.7、ガラス繊維：2.5 と比較して非常に小さい。比強度（引張強度を比重で割った値）は鋼の約 10 倍、比弾性（引張弾性率を比重で割った値）は、鋼の約 7 倍と優れた機械的特性を有する。さらに、耐疲労特性、錆びない、線膨張係数が

小さい(寸法安定性に優れる)、化学的・熱的に安定、電磁波シールド性・X線透過性に優れる、などの優れた特性を有することから、さまざまな用途に用いられている。

3). 製造方法

PAN 系炭素繊維の製造工程は、アクリロニトリル (AN) を重合・溶解・紡糸してポリアクリロニトリル (PAN) 繊維 (以下、プリカーサー) を製造する① 重合・紡糸工程 (図.1) と、プリカーサーを耐炎化・炭素化して炭素繊維を製造する② 炭素化 (焼成) 工程 (図.2) の 2 つに分けられる。アクリロニトリルの重合は主に懸濁重合、溶液重合が用いられる。重合して得られたポリアクリロニトリル (PAN) を、各種溶剤に溶かして紡糸原液を得た後、多数の細かな孔の空いた紡糸口金から紡出して繊維状にし、延伸してプリカーサーとする。プリカーサーは、セーターなどに使われる衣料用アクリル繊維の技術をベースに、各社独自に培った高度な重合・紡糸技術に基づいて製造されている。

プリカーサーを空気雰囲気下、200～300℃で加熱酸化する工程を耐炎化工程といい、この工程を経ると、高温でも熔融しない耐炎繊維になる。耐炎繊維は、抜群の耐炎性に加えて耐熱性、電気絶縁性、耐薬品性といった特性、紡織性、ドレープ性、ソフトな感触といった加工性を生かし、溶接火花受けシート、耐炎衣料、各種防災シート、断熱材、グランドパッキング用材料、また、航空機用ブレーキなどに使用される C/C コンポジット材の原料として広く使用されている。

この耐炎繊維を不活性雰囲気下、1,000～2,000℃で焼成すると炭素繊維になる。この工程を炭素化工程という。プリカーサーは、耐炎化工程で架橋構造になり、炭素化工程で繊維中の窒素原子や水素原子がガスとなって脱離して、構成原子は、ほぼ炭素原子のみとなる。この後、マトリックス樹脂との接着力向上を目的とした表面処理や、繊維の取扱性向上を目的としたサイジング(集束剤付着処理)を行う。通常の炭素繊維より弾性率の高い炭素繊維 (黒鉛繊維) を作る場合は、炭素化処理後、不活性雰囲気下 2,000～3,000℃でさらに焼成する(黒鉛化工程)。この処理を行うと窒素原子や水素原子はほぼ完全になくなり、黒鉛結晶が成長する。

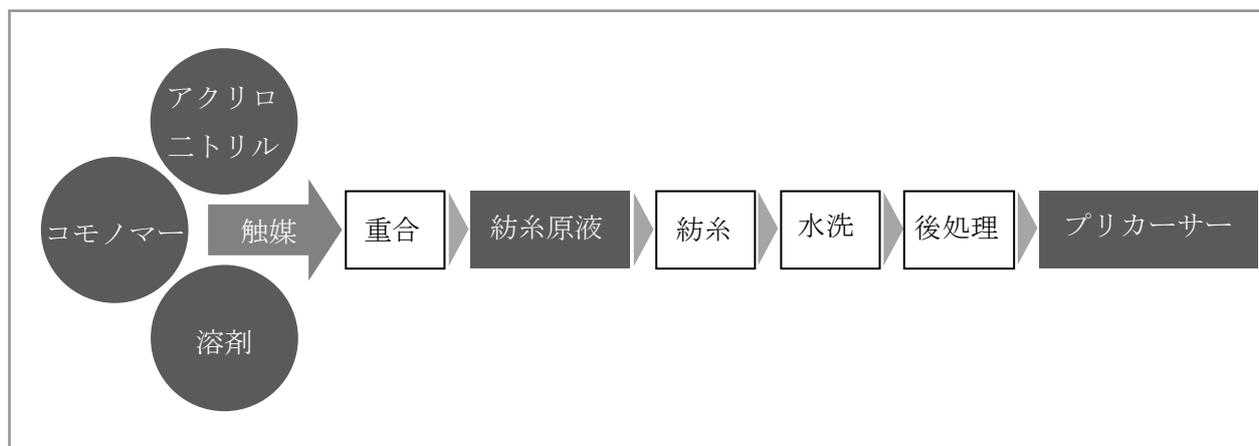


図.1 重合・紡糸工程

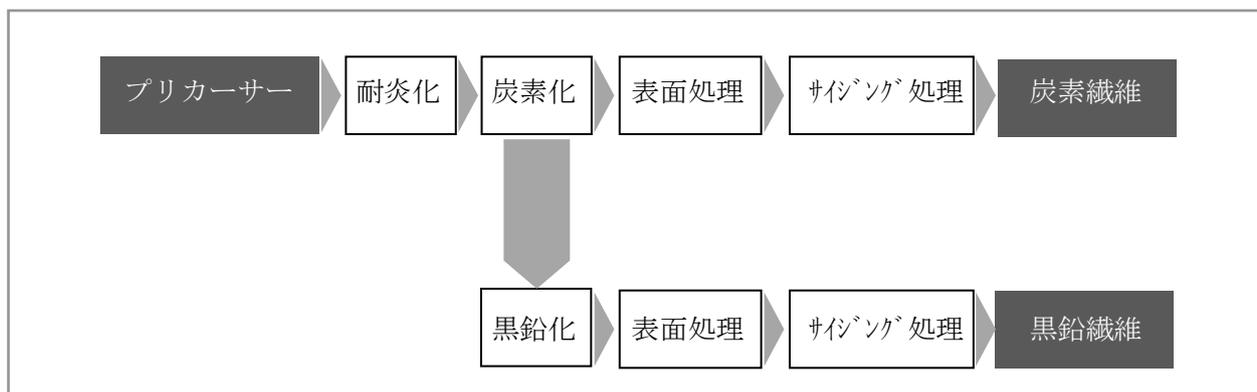


図.2 耐炭化・炭素化工程

4). 炭素繊維強化プラスチック (CFRP)

PAN 系炭素繊維は繊維単独で使われることはほとんどなく、基本的にはマトリックス樹脂と組み合わせて強化プラスチック (CFRP : Carbon Fiber Reinforced Plastics) として使われ、その価値を発現する。マトリックス樹脂は CFRP の形状、耐候性、難燃性、耐久性など多くの重要な特性を決める。組み合わせるマトリックス樹脂には大きく分けて熱硬化性樹脂と熱可塑性樹脂の 2 種類がある。熱可塑性樹脂を用いた場合、熱硬化性樹脂と区別する意味で CFRT (Carbon Fiber Reinforced Thermo-Plastics) と呼ぶことがある。現在、マトリックス樹脂として多く用いられるのはエポキシ樹脂を代表とする熱硬化性樹脂である。

一方、熱可塑性樹脂は、射出成形やプレス成形に適することから、熱硬化性樹脂と比較して大幅な生産タクトタイムの短縮が可能となり、自動車用途をはじめとする様々な分野・用途で一層の利用拡大が見込まれる。表.1 に代表的な樹脂の種類と特性、用途例を示す。

表.1 CFRP に用いられる代表的な樹脂の種類と特性、用途

樹脂	おもな特性	おもな用途
熱硬化性樹脂		
エポキシ	力学特性良、硬化収縮小	スポーツ、航空機、自動車、風力発電、圧力容器、土木建築
フェノール	難燃性、耐火性	自動車部品
ビニルエステル 不飽和ポリエステル	速硬化、低温硬化、低価格	船舶、建材
ポリイミド ビスマレイミド	高耐熱性	航空機、耐熱ロボットハンド、二輪車用マフラー
熱可塑性樹脂		
ポリアミド	耐衝撃性、耐熱性	自動車部品、パソコン
ポリカーボネート	耐衝撃性、寸法安定性	カメラ、ビデオカメラ
ポリフェニレンサルファイド	耐熱性	自動車部品
ポリエーテルエーテルケトン	耐熱性、耐衝撃性、力学特性	航空宇宙、ウエハーキャリア

5). 炭素繊維が最終製品になるまで

PAN 系炭素繊維が最終製品になるまでには、プリカーサーの製造に始まり、炭素繊維製造、中間材料であるプリプレグ、織物の製造、コンポジット製造といった長いプロセスがある。

最終製品の形状、要求性能、組み合わせる樹脂の種類、目標コストなどに応じて、組み合わせる中間材料の種類、フィラメント・ワインディング、プルトルージョン、オートクレーブ、プレス成形、RTM 成形、射出成形など多岐に渡る成形方法から最も適したものが選択される。

更に、炭素繊維は繊維方向と繊維と直角方向では物性が全く異なる異方性を有し、最終製品で必要となる性能を得るためには、炭素繊維の並べ方・含有量、組み合わせる樹脂の選択など、材料の物性設計が必要となる。

2. PAN 系炭素繊維の需要動向

炭素繊維の需要は、2008 年 米国発の金融危機の影響で一時的に縮小したものの、2010 年までに回復し、2011 年からは再び成長に転じている。成長の牽引役として、航空機用途におけるボーイング社の 787 型機、エアバス社の A350 型機など機体に CFRP を多用する機種を生産本格化や、環境・エネルギー用途における風力発電の拡大、圧力容器向け需要の増加があげられる。「省エネ・省力化」、「温暖化ガス削減」など環境配慮志向の高まりに「軽く」て「強い」炭素繊維の特長が合致し本格的な拡大期を迎えたと言える。

図. 3 に用途別 PAN 系炭素繊維需要予測を示す。2015 年には約 6 万トン、2020 年には約 14 万トンにまで拡大すると推定される。

特に、自動車用途ではドイツ BMW 社がカーボン製のモノコックを採用した量産型電気自動車「i3」シリーズの発売を 2013 年後半に開始したのをはじめ、自動車メーカー各社は強化される CO₂ 排出規制に対応するため、炭素繊維メーカーと協働し車体などへの炭素繊維採用の検討を進めており、将来的に同用途での大きな成長が期待できる。

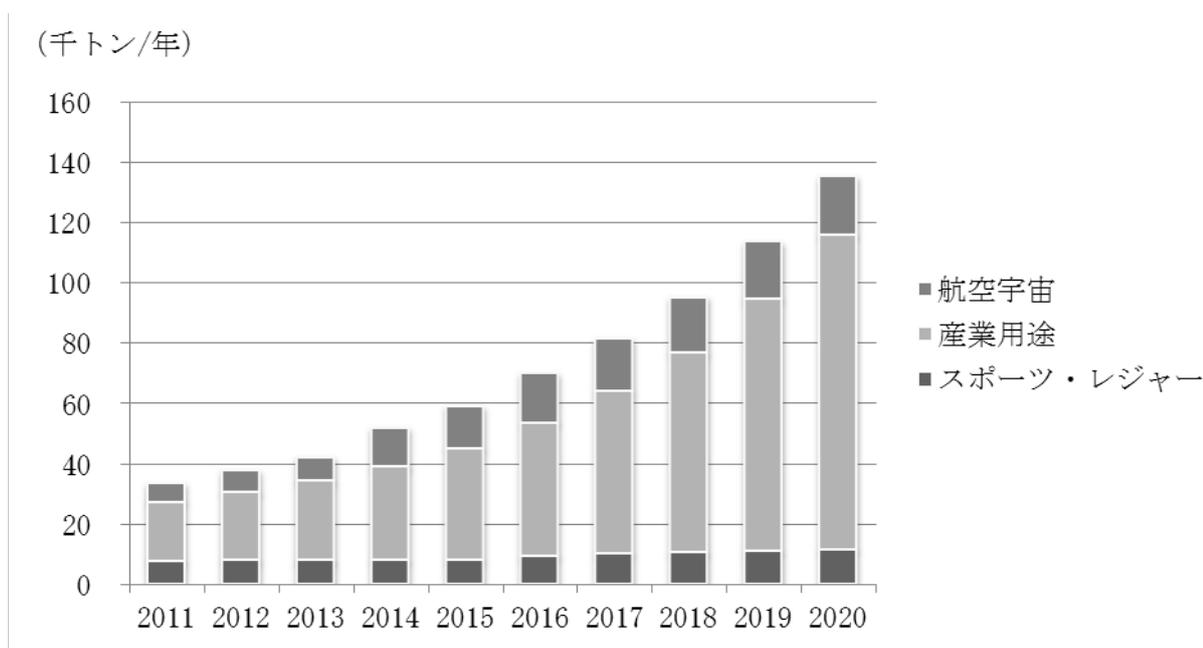


図. 3 PAN 系炭素繊維の需要動向 (東邦テナックス推定)

3. PAN 系炭素繊維メーカー各社の生産能力

PAN 系炭素繊維メーカー各社の公称生産能力を表. 2 に示す。炭素繊維市場の歴史は、高い技術開発力を有する日米欧を中心とする先進国メーカーが、参入・撤退・統合を繰り返しながらも、長らく市場の成長をけん引してきたと言える。

一方で、炭素繊維への関心の高まりから、2009 年以降、トルコ (AKSA)、韓国 (泰光産業・暁星)、インド (Kemrock)、中国、ロシアなどから相次いで新規メーカーが参入を果たしている。

また、先発メーカー各社も需要回復・成長に対応するため、中断していた増設の再開、更なる生産能力拡大を計画しており、2016 年末の公称生産能力は、およそ 12 万 5 千トンに達すると推定される。中国には既に炭素繊維メーカーが数十社あると言われているが、ここでは、商業化レベルに達しているとされるメーカーの公称能力を推計した。

実際の生産能力は公称生産能力の 60~70%程度、新興メーカーの場合はこれよりも更に低い水準に留まると想定される。従い、市場で既にプレゼンスを獲得している先発メーカー各社の需給バランスは比較的タイトで稼働率も高い水準を維持しているものと考えられる。

表 2 PAN 系炭素繊維メーカー各社の生産能力推移 (東邦テナックス推定)

単位：トン/年	2012	2013	2014	2015	2016
東邦テナックス	13,900	13,900	11,500	11,500	11,500
東レ	18,900	21,100	26,100	27,100	27,100
三菱レイヨン	10,100	10,100	10,100	11,100	13,100
Hexcel	7,200	8,200	8,200	8,200	8,200
Cytec	2,300	2,300	2,300	3,300	3,300
台湾プラスチック	7,450	8,750	8,750	8,750	8,750
Zoltek	12,750	12,750	12,750	12,750	12,750
SGL	7,500	9,000	12,000	12,000	12,000
AKSA	3,500	3,500	3,500	3,500	3,500
泰光産業	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500
暁星	0	2,000	2,000	2,000	6,500
Kemrock	400	400	400	400	400
中国メーカー	8,800	10,807	13,272	16,300	16,300
合計	94,300	104,307	112,372	118,400	124,900

4. PAN 系炭素繊維の用途別動向

航空機用途、産業用途、スポーツ・レジャー用途の主要動向について、いくつか紹介する。

1). 航空機用途

世界の民間航空機需要は、世界的な旅客需要増、航空貨物の増加、燃費効率の悪い旧型機から燃費の改善された新型機への置き換えなどに支えられ、拡大を続けている。実際、エアバス社の 2014 年の受注数は過去 2 番目となる 1,456 機、引き渡し数は 13 年連続で増加し過去最高となる 629 機となった。ボーイング社は 2014 年に 1,432 機を受注、引渡し数は 723 機となり、ともに過去最高を記録している。2014 年末時点での受注機数残はエアバス社で 6,386 機、ボーイング社で 5,789 機にも及び、両社とも、製造機数の段階的な引き上げを進めている。

航空機の機体主要構造への CFRP の採用はエアバス社の A380 型機以降大幅に増加しており、A350 型機では胴体や主翼に CFRP を採用し、その割合は機体構造重量の約 50%に及ぶ。CFRP 採用の主要部位は、一次構造材では、主翼、垂直尾翼、水平尾翼、中央翼、胴体、二次構造材では、ラダー、エルロン、フラップ、エレベーター、フェアリングなど、多岐にわたる。

機体に CFRP を多用するボーイング社 B787 型機の生産機数引き上げや、2015 年 1 月 15 日にドーハーフランクフルト間で営業飛行を開始したエアバス社の A350 型機の本格化により、本用途における炭素繊維需要は旺盛な状況が当面継続すると見込まれる。

更に、ボンバルディア社（カナダ）、エンブラエル社（ブラジル）など中小型機を専門とするメーカーでも CFRP 使用比率を高めた新型機の開発を進めている事や、2017 年に製造開始予定のボーイング社 777X 型機も主翼や尾翼に CFRP の使用が見込まれており、同用途における炭素繊維需要は今後も大きく成長するものと見込まれる。

2). 産業用途

炭素繊維需要の最も大きな成長が期待できる用途であり、表.3 に示すように、その用途は多岐に渡る。以下、主要ないくつかの用途について動向を紹介する。

a. 風力発電

風力発電用途は、炭素繊維需要の拡大に最も大きく寄与する用途の一つとして期待されている。世界的な景気減速、政策支援削減の影響で一時的に風力発電の成長は鈍化したものの、2014 年は再び成長に転じた。WWEA (The World Wind Energy Association) の報告 (2014 Half-year Report) によると、2014 年上半期の全世界における新規風力発電導入量は 17.6GW となり 2013 年同期の 14.0GW から 26%以上の伸びとなった。2014 年通年では、世界の新規導入量は 42GW となり、2014 年末時点の全世界の風力発電量は、360GW に達する見込みである。これは、全世界の電気需要総量の約 4%に相当する。2014 年上半期の風力発電導入量を国別に見てみると、中国の導入量が約 7GW と全体の 41%を占め、市場の成長を牽引している。次いで、ドイツ 10%、インド 6%、米国 5%となっている。米国では 2013 年上半期の導入量がほぼゼロとなったものの、優遇税制の延長などにより 2014 年上半期は確実な回復を見せている。

原油価格の下落など不透明な要因はあるものの、世界的な原子力政策の見直し、温暖化ガス排出削減といった社会のニーズを満たすため、再生可能エネルギーへの依存は更に高まり、

風力発電は今後も 50~60GW/年程度で新規導入が継続すると予想されている。

加えて、風力発電の洋上化、発電効率や採算性の向上を図るため、ブレードの大型化傾向が進んでおり、ブレードの更なる軽量化、高剛性化が可能となる炭素繊維の使用比率が高まり、炭素繊維需要の更なる拡大が期待される。

b. 圧力容器

圧力容器向け炭素繊維需要が急速に拡大している。米国では「シェールガス」の生産量急増による天然ガスの低価格化などに伴い、ガソリンに比べて温暖化ガス排出量が少なく環境負荷が小さい圧縮天然ガスを燃料とする天然ガス車の普及が進んでいる。これら天然ガス車では、炭素繊維で補強した圧縮天然ガスタンクを搭載する割合が飛躍的に増加し、安全性、軽量性、高圧縮化による燃料 1 回充填当たりの走行距離の増加など、数多くの利便性を実現している。

また、天然ガスパイプラインなどインフラ整備が十分に整っていない地域でガスの運搬に使用される大型 CNG タンクでも炭素繊維で補強したタイプの採用が拡大している。

今後普及が期待される燃料電池自動車向けの車載用圧縮水素 (CHG) タンク、水素ステーション向けの蓄圧大型タンクへも炭素繊維の採用拡大が期待されている。その他の用途では、消防士などが使用する SCBA タンク (呼吸器用タンク : Self-Contained Breathing Apparatus) にも炭素繊維で補強した圧力容器が使われており、この市場も順調に拡大すると思われる。

圧力容器は高い安全性を確保するため、高性能・高品位な炭素繊維が要求されるため、日系メーカーが高いシェアを獲得しており、参入障壁も高いことから当面はこの状況が継続すると期待される。

c. 自動車

自動車は、最も多くの「温暖化ガス」を排出している分野の一つである。このため、世界各国では厳しい規制を設けて自動車の排ガス規制を行っている。自動車メーカー各社は規制に対応するため、電気自動車、ハイブリッド車、内燃エンジンの改良、車体の軽量化など環境対応車の開発を進めるとともに、ディーゼルや天然ガス車の比率増加を図っている。

しかし、各国は更に厳しい排ガス規制の導入を目指している。例えば欧州では、2021 年までに CO₂ 排出量を 95g/km 以下に抑えるとしている。2012 年に欧州市場で販売された新型乗用車の CO₂ 排出量は 140g/km 前後であった。つまり、2021 年までに 50g/km 近い CO₂ 排出量削減を実現しなければならないことになる。この厳しい規制に対応するためには、更なる車体の軽量化が必要となり、これまで、レーシングカーや超高級スポーツカー等、ごく一部の車両へ適用されるに留まってきた CFRP が、量産車へ加速度的に採用される可能性がある。ドイツ BMW 社はカーボン製のモノコックを採用した量産型電気自動車「i3」シリーズを 2013 年後半から販売開始、SGL 社との合弁会社で炭素繊維生産能力を継続的に拡大するなど、好調な販売が伝えられており、他の自動車メーカーの CFRP 本格採用へ波及することが期待される。

CFRP を量産車へ普及させるは、低コスト化、供給能力の確保、リサイクル技術・サプライチェーンの確立、生産タクトタイムの短縮など解決しなければならない課題が多く残るが、自動車メーカー各社、炭素繊維メーカー各社は、協働しながら技術開発を強化・推進している。

d. その他用途

炭素繊維の用途は、その優れた機械的特性、機能的特性から多岐に渡る。その他の用途例を表. 3 に纏めて示す。

表. 3 炭素繊維のその他産業用途例

対象	使用箇所(例)
自動二輪車	レース用カウル、マフラーカバー、フレーム
車両・コンテナ	鉄道車体、座席
機械部品	ロボットアーム、板ばね、軸受、ギア、カム、ベアリングリテーナー
高速回転体	遠心分離器ローター、ウラン濃縮筒、フライホイール、工業用ローラー、シャフト
電子電機部品	パラボラアンテナ、音響スピーカー、VTR部品、DVD/CD装置部品、IC キャリアー
海底油田掘削	ライザー、テザー、パイプ類
化学装置	攪拌翼、パイプ、タンク、グレーチング
医療機器	天板、カセット、X線グリッド、手術用部品、車椅子、人工骨
土木建築	ケーブル、コンクリート補強材
OA・事務機	プリンターの軸受、カム、ハウジング
その他	樹脂型、洋傘、ヘルメット、面状発熱体、眼鏡フレーム、カメラ部品、ポンプ部品

3). スポーツ・レジャー用途

炭素繊維市場の成長を長年支え、また、その厳しい要求、“高強度化、高弾性化、広幅化、高度な加工性”が今日の炭素繊維を育成したとも言える。今後、それほど大きな成長は望めないが、従来からの主用途、ゴルフ、ラケット、釣竿は今後も堅調に推移すると予想される。

また、アジアを中心とする新興国における富裕層の増加、比較的新しい用途である、自転車フレームなどで成長が続くと期待される。自転車フレームへの炭素繊維の採用は、軽量・高剛性かつ、優れた衝撃吸収性を併せ持つフレームの実現が可能となり、路面の不快な微振動を吸収し、乗り心地がよく疲れにくいなど、炭素繊維の効用を体感できる用途の一つである。

5. 新興メーカーの動向

PAN 系炭素繊維市場には世界中の多くの大手化学メーカーが参入を試みてきたが、度重なる需給バランス失調による収益の悪化や、市場拡大に時間を要したことなどから、撤退・統合を繰り返し、現在は、日系 3 社（東レ、三菱レイヨン、東邦テナックス）がおよそ 60%のシェアを有するに至った。日本が高い国際競争力を有する素材の一つである。しかし、炭素繊維市場の拡大が世界的な注目を集めたことで、中国、インド、トルコ、韓国などからの新規参入が相次ぎ、ロシア、中東などでも炭素繊維生産プロジェクトが立ち上がっており、世界規模での競争は、今後更に激化する見通しである。

この背景には、先行するメーカーのノウハウが蓄積した高性能なプリカーサー、炭素繊維の製造を可能とする製造設備などが比較的容易に入手可能となったことや、各国が自国メーカーの育成を積極的に支援している事などがあるものと考えられる。

第 28 回 複合材料セミナー PAN 系炭素繊維の現状と将来

特に、中国は政府の支援のもと炭素繊維の技術開発に精力的に取り組んでおり、今後、我々日系メーカーにとって大きな脅威となるかも知れない。

図. 4 に、これまでの新規参入メーカーの動向を紹介する。

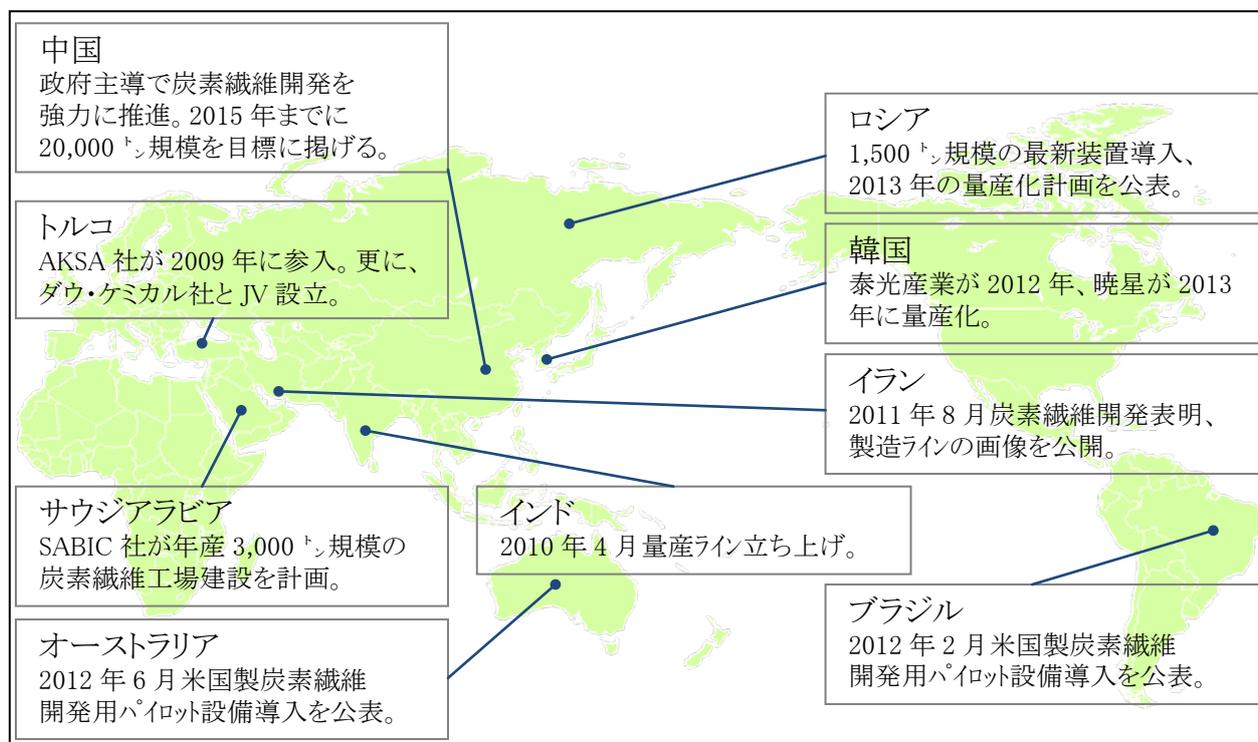


図. 4 新規参入メーカーの動向

6. まとめと今後の課題

環境問題への意識の高まりを背景に、「省エネ・省力化」、「温暖化ガス削減」など時代の要求に合致する PAN 系炭素繊維の需要は今後さらに拡大するであろう。一方で、炭素繊維や成形加工を含めた CFRP としてのコストダウン、リサイクル技術の確立などが本格的な成長への条件となる。また、新規参入メーカーの追い上げへの対応も急務となっている。

これまで我々が蓄積してきた高い技術力を更に磨き上げて行くことで、新規参入メーカーが容易に到達しえない高性能・高品位な炭素繊維の開発、革新技術による大幅なコストダウン、製品になるまでの全体プロセス最適化、などを積み重ね競争力を強化していく必要がある。このことは、炭素繊維および CFRP の普及を促進し、航空機・自動車といったモビリティ分野における環境性能の向上、風力発電・圧力容器など環境・エネルギー分野において、より環境負荷の少ないエネルギーの利用を促進することになり、「永続的に成長可能な世界の実現」に貢献することが可能となる。

今後とも炭素繊維に係わるみなさんの継続的な支援とご協力をお願いしたい。

以上