炭素繊維複合材料加工の歴史と将来展望

須賀 康雄*

1. はじめに

日本で炭素繊維 (Carbon Fiber, CF) が工業化され、ほぼ50年が経過した。CFは主として、プラスチックを母材とする炭素繊維強化複合材料 (Carbon Fiber Reinforced Plastic, CFRP) の形態で用いられ、1970年代のスポーツ用具への適用から始まり、次いで民間航空機部材への適用、近年では压力容器、風車、自動車などの一般産業用途への適用が拡大している。本稿ではPAN (Polyacrylonitrile) 系CFを強化繊維として用いたCFRPの用途展開の現状を解説すると共に、ライフサイクルアセスメント (LCA) の概念を用いて、炭素繊維による省エネ効果での環境負荷低減への貢献や、CFのリサイクルへの取り組み、および今後の展望について述べる。

2. 炭素繊維 (Carbon Fiber, CF) について

CFは、「有機物を原料とし、熱処理によって炭素繊維成分が90%以上からなる繊維」とISOで定義されている。代表的な特徴としては、比強度・比弾性率に優れ変形しにくく、線膨張係数が極めて小さく、X線の透過性に優れる上に、錆びない、軽量である、といった様々な機能を併せ持った繊維である。図1は、横軸に重さあたりの変形しにくさである比弾性率、縦軸に重さあたりの強さである比強度を示すが、CFは、スチール、アルミなどの金属やガラス繊維に比べ格段に「軽くて強く」「軽くて変形しにくい」ことが分かる。

現在工業製品として上市されているCFは、その原料の違いからPAN系とピッチ系に二分されるが、強度と弾性率のバランスの良さから、PAN系が全CF生産量の90%を占めており、航空機部品やスポーツ用具などの構造用途として使われている。

次にPAN系CFの製造方法について説明する。まず、CFの原料となるアクリル原糸 (プリカーサ) は、溶剤中でアクリルニトリルを重合させ、紡糸、延伸、乾燥することで得られる。その後、焼成工程で、プリカーサに含まれ

図1 各材料の比弾性率・比強度

る炭素骨格を熱安定化させ、1000℃～3000℃の高温下で、他の元素を焼き飛ばし、グラファイト骨格のみを残すことでCFを得ることができる。焼き上がったCFは、樹脂との接着力を高めるための表面処理が施され、ボビンに巻かれ最終製品となる。

CFの代表特性である強度の変遷について、東レのCFを例に説明する (図2)。初上市段階のCF強度は約3 GPa

図2 炭素繊維の強度の変遷

Processing of Carbon Fiber Reinforced Plastic :
Today and Future

* Suga, Yasuo

Toray Industries Europe GmbH

Hugenottenallee 175, 63263 Neu-Isenburg, Germany

(講演時: 東レ(株) 常務取締役)

2019. 7. 18 受理

であったが、1980年代から90年代にかけて、破壊起点となる欠陥の大きさをミクロンからサブミクロンレベルに抑制し、2000年代には欠陥をナノレベルまで抑制することで、市販最高強度は7 GPaに達した。引張強度の重要性を航空機の胴体を例として説明すると、上空では機体の内と外に大きな気圧差があるため、胴体には膨張による引張応力が発生する。この引張応力に耐えうる強度が材料には要求される。主に引張強度が要求される用途のその他の例として、水素タンクや電線コアなどが挙げられる。

また、強度と共に重要な特性が弾性率である。CFの構造を見ると、1本のCFの中にシート状のグラファイト結晶が繊維方向に平行に配列している。弾性率はこのグラファイト結晶が繊維軸に十分な長さで配向していることが重要であり、この結晶配向度を高めることで弾性率は向上する(図3)。弾性率の重要性を風車のブレードを例に説明すると、風が当たることでブレードは撓むが、この撓みが大きいとブレードが支柱にぶつかってしまう。従って強い外力により弾性変形しない剛性が材料に要求される。主に弾性率が要求される用途のその他の例として、自動車のボンネットフードやロボットフォークなどが挙げられる。

炭素繊維の需要は年々拡大しており、年率20%近く成長している。2016年頃、一旦伸びが鈍化したが、現在は再び拡大基調になったと考えられる(図4)。今でこそ「炭素繊維は、夢の素材」などと、もてはやされることもあるが、その歴史は、決して平坦なものではない。炭素繊維の歴史は、需要の創出と、増産・新規参入による供給過剰を繰り返し、さらに、多大な時間と開発費、巨額の設備投資を必要とすることから、これまで欧米企業を中心に多くの企業が撤退や売却を繰り返してきた。その結果として、東

レを含む日系3社が世界需要の約3分の2を占めることになったのである。

しかしながら、CF生産の最近の傾向として、中国を始めとしたアジア、ロシアといった新興国が台頭してきている。これら新興国のCFは年々品質・品位が向上しており、日本メーカを脅かす存在になりつつある。

これまで、CFの製造方法、特性、需要について説明してきたが、今後のCF製造における課題は次の通りである。

- (1) 高強度化への継続的な挑戦
- (2) 製造設備生産性の飛躍的向上
- (3) 製造時のCO₂排出量の大幅削減
- (4) リサイクルシステムの定着化
- (5) 革新的プリカーサ原料の発明

将来もCF製造で日本がチャンピオンで居続けられるかは、如何にこれら課題を克服することにかかっている。

3. CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic) の用途展開

3.1 CFRPの用途展開

CFRPの最大の特徴は、テーラーメイド技術が必要な材料ということである。最終製品で目指すべき機能やコストを考えながら、適切な材料を選び、または開発し、最終製品にあった設計と成形加工法を適用する必要がある。これはCFが様々な形態に加工可能であること、CFの性能を引き出すためにはマトリックス樹脂と組み合わせ、複合材料にする必要があること、さらにはCFが異方性材料であることに起因している。

CFは1971年に東レが「トレカ」のブランド名で商業生産を世界で初めて開始した。それ以降、新たな市場創出の挑戦の連続で、CFRPが初めて世の中に認知されるようになったのは、ゴルフシャフト、釣り竿、テニスラケットといったスポーツ用具部品である。しかしながら市場規模は小さく、1980年代に航空機の二次構造材に採用されてから市場が本格的に立ち上がり、1980年代後半に航空機一次構造材にCFRPが採用された。1990年代に入ると、産業用途での適用が始まり、市場拡大が続いている。今後は、航空機用途での採用拡大に加え、自動車、压力容器、電線ケーブルコア、風力発電のブレードなど、産業用途での飛躍的な市場拡大が見込まれる。次にCFRP各用途の詳細を説明していく。

3.2 スポーツ用途

前述のとおり、CFは初めてスポーツ用途で使用され始め、特にゴルフシャフトと釣竿用途向けに、高強度・高弾性率CF、および樹脂量の少ない薄物プリプレグが開発され、年々新製品が上市され、スポーツ用具の分野でCFRPは必要不可欠な材料となった。新素材であるCFがここまで普及したのも最初に使用したユーザーとの出会いがあったからである。最初は、1972年にオリムピック釣具社からCFを使用した鮎竿「世紀鮎」が発売され、また同年ゴルフトーナメントにおいて、米国G. BrewerプロがCFを使用したブラックシャフトを用い太平洋マスターズで優勝したことで注目を浴びた。それ以降、スポーツ用途で様々な新製品が発売され、素材性能改善が製品性能改善に直結し、それが生産量増加を支えるコストの改善に繋がり、成

図3 炭素繊維の弾性率の変遷

図4 炭素繊維の世界需要見通し

長のスパイラルが続いていくことになった。

鮎竿を例に、CF がいかに製品の軽量化に貢献しているか紹介する。世界初のカーボン鮎竿「世紀鮎」の竿重量は7.2 m 竿で 470 g~690 g。当時のガラス繊維鮎竿の 865 g から大きな軽量化を実現した。その後、CF の高弾性率化、プリプレグの低樹脂量化、マトリックス樹脂の高性能化といった開発が進み、更なる軽量化を達成してきた。これまでに最軽量モデルであるグローブライト社製「銀影競技スペシャル ZD 90」では 9 m 竿が 175 g と驚きの軽さを実現している。

また、ゴルフシャフトの重量も時代とともに軽量化が進み、今では 30 g を切る超軽量シャフトも登場している。そこにも CF の高強度化、高弾性率化が深く関わっている。

現在のスポーツ用途の市場動向は、自転車用途を中心に新規開発が進み、年率 3 % 程度の緩やかな成長を見込んでいる。スポーツ用途はこれまで技術革新による需要創造を実現し、またここで生まれた技術が他の用途に横展開され、CF 市場全体の拡大に貢献してきた、まさに「新素材のゆりかご」と言える。

3.3 航空機用途

航空機はまさに軽量化への挑戦の連続であった。ボーイング社を例にとり、航空機用途の変遷を見ると、1975 年ボーイング 737 向けスポイラーへの CF 採用を皮切りに、1982 年ボーイング 767 の方向舵、昇降舵、スポイラーなどの二次構造部材において CFRP の適用が開始された。以降、航空機構造部材としての信頼を獲得していき、1990 年ボーイング 777 で、水平尾翼、垂直尾翼などの一次構造部材への採用を果たした。

2011 年 10 月に就航したボーイング 787 は、主要構造体の全てに CFRP が採用され、コンポジット比率は約 50 % に達した。それにより従来設計との比較において、約 30 % の軽量化と 20 % の燃費低減を果たし、CO₂ や NO_x など

部位	767	787	コンポジット化の効果
胴体	アルミ	コンポジット	・耐腐食性向上－機内湿度アップ ・高強度－窓大型化、気圧アップ ・使用リベット数低減
主翼	アルミ	コンポジット	・軽量化－燃費向上 ・複雑形状化－空力特性向上
尾翼	アルミ	コンポジット	・軽量化－燃費向上
動翼	コンポジット	コンポジット	－

▶同サイズの767対比大幅にコンポジット化を実現
▶軽量化による燃費向上、機内環境向上を達成

図5 ボーイング 787 と従来機との比較

の環境破壊に繋がるガスの排出量抑制に大きく貢献することができた（図 5）。

また、ボーイング 787 では、CFRP の製造技術でも大きな革新があった。大型航空機を月産 14 機製造するために、大型のオートクレーブや AFP (Automated Fiber Placement)、それを検査する大型超音波非破壊検査マシンが開発され、胴体の一体成形を実現させた。ボーイング 787 がもたらした CFRP 製造の革新を纏めると次の通りである。

- (1) CFRP による主翼スパーの賦形性限界打破
- (2) 徹底した自動化の導入、生産設備の無人化
- (3) 航空機特有の徹底した品質管理「ノーチェンジルール」
- (4) グローバルスケールの分業とロジスティックスの確立

CFRP を航空機で適用できるようになった一方で、その適用は大型機～中型機までで、小型機では一部の使用に留まり、まだ主要材料にはなっていない。CFRP が小型航空機で主要材料になるかは、生産機数が多い小型機の製造に対応した低コスト・量産技術を開発する必要がある。積層・フォーミングでは、高性能 AFP 用テープ基材を用いた積層効率向上、脱オートクレーブ成形などの低コスト成形、接合技術を進化させた一体成形技術などの開発が必要と考えられ、2020 年代に革新成形技術が出てくることを期待する。

3.4 自動車用途

自動車へ繊維強化複合材料が使われた歴史は古く、1940 年代にはフォードが大豆の搾りかすを樹脂で固めた材料を車両の外販に適用し大幅な軽量化ができることを示している。その後、ガラス繊維を用いた複合材料がスポーツカーの外販に採用され、CF は 1979 年に F1 で初めて採用された。2014 年には電気自動車 (BMW i3) や小型スポーツカー (Alfa Romeo 4 C) の構造体にも使用され、現在は燃料電池車、高級車の構造体など、欧州を中心に需要は拡大傾向にある。

しかし、超高級車では、モノコックやフロアを中心に CFRP が採用されているが、量産車への適用はまだ拡がっていない。スチールやアルミと同様に CFRP を量産車へ適用するための課題としては（表 1）、部品生産性（高速成形）、車両組立性（低コスト高速接合）、デジタルツイン（構造・成形解析といったシミュレーション技術）、そしてリサイクルの 4 要素技術を有していることが必要である。スチールでは、高速プレス成形、スポット溶接で高速接合を実現し、構造のみならずプレス成形についてもシミュレーションが可能で、リサイクルループも完成している。また、アルミにおいても溶接技術がスチールに劣る以外はこれら 4 要素技術が確立されている。つまり、CFRP にお

表 1 量産自動車への CFRP 適用の課題

項目	スチール	アルミ	CFRP (開発内容)
部品生産性 (高速成形)	○	○	△ (高速プレス成形)
車両組立性 (低コスト高速接合)	○	△	△ (高強度高速接合)
デジタルツイン (構造・成形解析)	○	○	△ (繊維配向解析)
リサイクル	○	○	△ (新規低コストリサイクル)

いても、高速プレス成形やレーザー接合などの技術開発による高強度高速接合の実現、成形時の繊維配向と物性の解析の実現、そしてリサイクルの実現が必要である。

3.5 エネルギー・インフラ用途

今後 CFRP の適用拡大が最も期待されているのがエネルギー・インフラ用途である。既に風力発電の風車のブレードは CFRP が最も使用される用途になっているが、今後 10 年間で、風力発電容量が 5 倍に拡大し、特に発電効率の高い、CFRP 大型ブレードを適用した超大型風車の伸びが大きいと推定している。

圧力容器も CFRP の大きな用途の一つで、環境に優しい天然ガスの輸送用、バス・自動車用タンクなどに用いられる。輸送用タンクは、CFRP を使うことで、従来の鉄製タンクより 30% 軽量化でき、輸送効率を高く出来る。また、ガスパイプラインが建設できていない地域において、安価なガス輸送手段として多数導入が進められている。

その他、インフラ関係ではトンネル、道路床版、橋脚、鉄道用高欄、住宅、港湾、ビルの床や柱、など多くの場所で CFRP が既に使われており、今後益々需要が拡大する見込みである。

4. ライフサイクルアセスメント (LCA)

LCA とは、製品の製造工程で排出される CO₂ 排出量だけに着目するのではなく、資源の採掘から、輸送・製造・使用・廃棄のライフサイクル全体での発生状況を把握した上で、真に CO₂ 排出量の削減に貢献する製品やサービスを評価する手法である。CF はその軽量化による省エネ効果で、使用時の CO₂ 排出量が少なく、CO₂ 削減効果が大きい材料と言える。その一例として、CFRP を 50% 適用した航空機：ボーイング 787 の場合で説明すると (図 6)、ボーイング 787 機分の CF を製造時に排出する CO₂ の量は 20 トンに相当するが、運用時、軽量化による燃費向上で 1,400 トンの CO₂ 削減効果が期待できる。地球環境問題への対応として、炭素繊維協会では、LCA の概念を用いて、貢献をしていく考えである。

5. リサイクルの課題

東レは CF メーカーとして省エネなどにより、製造時の CO₂ 排出量削減に取り組むと同時に、使用した CFRP のリサイクルにも取り組んでいる。リサイクル CF の特徴として、バージン品に比べて製造エネルギー、CO₂ 負荷が大幅に低いことが挙げられる。PAN 系 CF のリサイクル技術とシステムについては、2006 年から 3 年間、経済産業省からの支援を受け、炭素繊維協会で「炭素繊維リサイクル技術の実証研究開発」を推進し、リサイクルの基礎技術を確立している。2009 年からの 2 年間ではプラントが

図 6 炭素繊維利用による CO₂ 削減効果

ある大牟田市との共同研究の形で再生 CF の評価を実施した。また、2012 年には、国内 PAN 系 CF メーカー 3 社で、リサイクル技術開発組合を設立し、CF リサイクルの実用化および事業化に向けた取り組みを行っている。この技術組合は 2015 年に製造技術確立という初期目標を達成したため発展的に解散し、共同開発で得られた知見・ノウハウを生かし、その後は各社独自で CF リサイクルの量産技術開発および事業化の検討を進めている。

東レは、可燃性分解ガスを燃焼に再利用する「革新省エネルギー熱分解炉」を開発し、製造エネルギーに圧倒的な省エネを図ることを目標として 2016 年度から NEDO の助成のもとプラントを設置し、不要なエネルギーを投入することなく効率的な連続リサイクルプロセスを確立している。現在は、豊田通商㈱と共同で、リサイクル事業を推進している。

CF は、軽量化などを実現しながら、長く使用することで初めてグリーン・イノベーションを進めることができる素材である。これにリサイクルという製品価値を維持したまま再生するという延命を加えることで、CF のライフサイクルを通した循環型社会の実現が達成できるのである。

6. 将来の展望

将来はドローンだけでなく、自動車やロボットも空を飛び回る時代が到来すると予測する。そのような未来では、軽量で高強度高弾性率の CF は必要不可欠な材料となり、需要が大きく拡大すると確信している。仮に 20 万トン以上の CF が必要な時代になったとして、その時に我々 CF 製造メーカーがその需要に応えることができるのかがポイントである。今後、CF の大量生産技術を開発し、加えて、成形、設計、後加工技術を進化させていくことが将来に向けて非常に重要である。