繊維強化プラスチックの動向とリサイクル

佐野 慶一郎¹⁾， 齊藤 奈々子²⁾， 森 智和²⁾

SANO Keiichiro¹⁾， SAITHO Nanako²⁾， MORI Tomokazu²⁾

¹⁾静岡県立大学 環境科学研究所， ²⁾山梨県環境科学研究所

1. はじめに

2007年10月12日にノルウェーのノーベル賞委員会は、温暖化対策の理解を深めた尽力者として、米国元副大統領のアル・ゴア氏に同年のノーベル平和賞を授与することを発表した¹⁾。授賞式は同年12月10日にノルウェーのオスロで開かれ、ゴア氏は世界中から拍手喝采を浴びた。ゴア氏著の「不都合な真実」には「私にできる10の事」が掲げられている。その中のひとつに「リサイクル製品を積極的に、利用しましょう」と明記されている²⁾。地球に身を預け暮らす私達にとって、リサイクルの必要性は揺ぎない事実である。

しかし、未だ世界中でリサイクルされず大量に焼却や埋め立て処分されている様々な廃棄物が存在する。なかでもFRP（繊維強化プラスチック）は、その代表である。FRPは軽量で強固、且つ成形性に富むなどの利点から、プレジャーボートや航空機、自動車、風力発電機、浴槽、給水槽、浄化槽、マネキン、ヘルメットをはじめとする様々な製品に用いられているが、FRPの多くは熱硬化性樹脂のUP（不飽和ポリエステル）やエポキシ樹脂を母材とし、ガラスや炭素などの繊維、添加剤のタルクを多く含んでいるため、リサイクルが困難である³⁾。FRPをリサイクルするために、母材樹脂を溶解し、強化繊維とタルクの分離する工程は、複雑でエネルギーとコストが掛かると見積もられる。近年、さらに悪いことに、原油の高騰と埋め立て処分場の逼迫により、産業廃棄物の処理費が高値となり、廃FRP製品が不法投棄される問題も深刻化している。国内で不法投棄された廃FRPボートの状況を図1に示す。これら廃FRPによる環境問題を改善するために低コストでエネルギー効率の良いFRPリサイクルの新技術とその実用化が求められている。

本稿では、まずFRPの市場と技術開発の動向に触れ、FRPのニーズと将来性を再認識するとともに、最近のFRPリサイクルの技術動向について解説する。

2. FRP 市場の動向

(1) 国内のFRP出荷量

日本国内のFRP出荷量はここ数年、約36万トンとなっている。あわせて、廃FRPは建築物の解体や廃船などから大量に生じている。国内で生じる廃FRPは、2005年に45万トン／年も発生し、その後も40万トン／年を越えると予想される⁴⁾。

(2) 世界のFRP出荷量

世界のFRP市場を注視すると、ここ10年間、欧州と米国、日本の生産出荷量は、ほぼ横ばいである。しかし、中国でのFRP生産量は、年々、増加傾向にある。1997年は22万tであったのに対し、2005年には110万tにも達している。2006年は「国家投資第11次五ヵ年計画」の最初の年であり、今後も公共事業と科学技術、環境技術（風力発電、浄化槽）の推進により、FRPの大幅な需要拡大が見込まれる⁵⁾。世界全体でみれば、今後、アジア諸国の経済発展により、FRPの需要は増加するものと予想される。

図1 不法投棄された廃FRPボート

3. 新たなFRPのニーズと開発動向

(1) CFRP（炭素繊維強化プラスチック）

以前よりFRP製品は、GFRP（UP母材にガラス繊維）が主流であるが、近年は、製品の軽量化や小型化、強度確保のためにCFRP（エポキシ樹脂に炭素繊維）の採用が米国と欧州を中心に増加している。米国では、航空機のボーイングB787とエアバスA380の主要構造材にCFRPを採用している^{5,6)}。また、欧州では、CFRPで自動車を軽量化し、燃費とCO₂排出を改善するための国家プロジェクトTECABS⁷⁾が世界に先駆けて2000年より進められた⁸⁾。今後、原油高騰の影響により、輸送機の燃費向上が求められ、CFRPの採用も増加していくものと予想される。

(2) NFRP（天然繊維強化プラスチック）

環境保護の観点から、FRPに熱可塑性樹脂（ポリプロピレンなど）の利用や天然繊維（ケナフやジュート、サイザル、綿など）を用いたNFRP（天然繊維強化プラスチック）の製品化が増えている。さらに、最近では、すべてがバイオ材で造られたグリーンコンポジット（ポリ乳酸に天然繊維）と呼ばれるFRPの研究が盛んである^{8,9)}。今後、母材と天然繊維の界面の改善や複数の天然繊維のマッチング、ポリ乳酸の特性向上が待たれる。

(3) FRP製国産車のゆくえ

■NEDOプロジェクト

日本でも、新しいFRPの開発動向がうかがうことができる。現在、NEDOプロジェクト「自動車軽量化炭素繊維強化複合材料の研究開発」が進められている^{10,11)}。このプロジェクトでは、超軽量、高強度、衝突時の安全性に富むCFRPを開発し、自動車用材料として導入・普及を図ることによって、自動車の軽量化を図り、エネルギー起源温室効果ガス排出の抑制に資することを目的としている⁹⁾。

■第40回東京モーターショー

2007年10月27日から開催された第40回東京モーターショーにて、トヨタ自動車はCFRPやグリーンコンポジット材を採用した2台のコンセプトカーを発表した。1台目はファミリーカーとして、小型化と軽量化を提案した環境安全コンセプトカー「1/X」である。CFRPを車体の構造材に用いることにより、大人4人が乗車可能な車体重量を通常モデルの3分の1（420 kg）まで軽減させている。CFRP製のフロアはリブ形状にし、車体の強度を向上させている。この軽量化に加え、ハイブリッドエンジンを搭載し、プリウスの3分の1の排気量（500cc）でも、同車と同等の加速と高燃費（ガソリンで70 km/L）が得られるとしている。さらに、ルーフ材には環境に配慮したグリーンコンポジット材を採用している。このルーフ材は、母材としてポリ乳酸、強化繊維に

ケナフとラミーが用いられ、ほのかな光が透過する新開発の材料である^{12,13)}。2台目は、レクサスブランドとして、高性能を追求した2シータースポーツカー「LF-A」である。CFRPを多用して徹底的な軽量化を図った車体と高性能V10エンジンとの組み合わせで、圧倒的な動性能を目指している¹⁴⁾。同社は、車体の軽量化を未来の車づくりの重要なテクノロジーであると唱えており¹²⁾、近い将来、CFRPやグリーンコンポジットで造られた自動車の実用化が期待される。

4. FRPリサイクルの技術動向

(1) セメントキルンとサーマルリサイクル

産業分野ごとにいくつかのFRPの処理手法が提案されているが、どれも大規模な実用化には至っていない。国内のFRP廃船については、国土交通省によるリサイクルプロジェクトが発足し、実用化を目指した開発と実証実験が進められた。FRP廃船を各地にて収集、解体し、処理工場に運搬し、混油、破碎してセメントキルンの燃料として再利用する検討がなされている¹⁵⁾。また、(社)強化プラスチック協会は、オレフィン系プラスチックの廃棄物を混合することにより、燃料としての再利用の検討がなされた⁴⁾。これらの処理手法での課題は、前処理（FRPの分別と破碎）の効率化および大規模プラントへのFRP輸送のインフラ整備である。

(2) 廃食用油分解によるケミカルリサイクル

筆者らは、廃FRPを植物油中で加熱分解し、リサイクルする手法を提唱してきた。現在、廃食用油を利用し、大型の装置で安価に廃FRPを分解し、リサイクルする手法を考案し、その技術開発と実用化を試みている。

廃食用油を用いた廃FRPの熱分解装置を図2に示す。実験手順として、まず、反応槽にFRPと廃食用油（重量比＝1：3）を入れる。さらに、分解油の酸化防止と発火防止、蒸気の流動性確保のため、反応槽内に少量の窒素ガスを流通させる。次いで、廃食用油を320℃まで加熱保持し、90分ほど反応させるとFRP母材のUPは分解し、完全に液化する¹⁶⁾。反応時に生じた蒸気を冷却す

図2 廃食用油を用いた廃FRPの分解装置¹⁷⁾

る槽内に通過させると高純度の針状結晶のオルソフタル酸と無水フタル酸のみが効率よく回収できる¹⁷⁾。これらフタル酸は、UP原料として用いることが可能である。

(3) 亜臨界水分解によるケミカルリサイクル¹⁸⁻²⁰⁾

2006年、松下電工(株)は、亜臨界水中でFRP製の浴槽をリサイクルする手法を大阪府立大学の協力を受け開発し話題となった。この手法では、UPのエステル結合を分解し、グリコールと有機酸の原料モノマーを回収できる。

加水分解の時点で得られたグリコールとフマル酸は、バージンのUP原料として使用可能である。また、スチレン架橋部はスチレン-フマル酸共重合として回収でき、FRP成形用の低収縮剤に用いる技術も開発されている。図3にFRPの亜臨界水分解によるリサイクル工程を示す。同社は、2007年度に400kg/回(浴槽20個分、0.8t/日)の処理能力を持つ亜臨界水分解パイロットプラントを完成させ、2012年ごろにFRP浴室ユニットの製造工程端材、年間200トン規模のリサイクルの実現を目指しており、実用化が待たれる。

(4) 常圧溶解法による繊維リサイクル^{21,22)}

日立化成工業(株)は、2007年6月に「常圧溶解法を用いたFRPリサイクル技術」で第34回環境賞優良賞を受賞した。この技術は、触媒にリン酸三カリウム、溶媒にベンジルアルコールを用い、FRPを常圧下で200℃、約10時間で溶解し、ガラス繊維、フィラー、樹脂などの各素材に容易に分離し、それらを低コストで再びFRPにリサイクルすることを可能している。図4にFRPの常圧溶

解によるリサイクル工程を示す。また、粉碎などの前処理が必要なく、加圧するための設備とエネルギーが不要なことから、加工コストを低減し、安全衛生面からも有利な上、ガラス繊維が長い状態で回収できるため、引っ張り強度が新品の7割となり、再利用可能な水準のFRPを再生することができる。FRPから回収したガラス繊維を図5に示す。回収した樹脂分解物は、現状は燃料油として再利用可能だが、最終的にはその半分以上をFRP用樹脂として再利用することを目指し、早期の実用化が期待される。

(5) CFRP製自動車のリサイクル⁵⁾

自動車に用いられたCFRPは、その分離とリサイクルが必要となる。現状のCFRPリサイクルは、粉碎後にコンクリートなどの補強物に用いる程度である。自動車の廃CFRPは、再度、自動車部品にリサイクルすることが望ましい。NEDOプロジェクト「自動車軽量化CFRPの研究開発」では、CFRPのリサイクル技術についても研究開発を進めている。その構想を図6に示す¹¹⁾。

■ CFRP破砕物の利用²³⁾

廃CFRPの「自動車部材への再加工作」が検討されている。破砕したCFRPをポリプロピレンやABS樹脂と混練して射出成形するだけで、衝撃吸収エネルギーは低下するものの、新樹脂材とほぼ同等の力学特性が得られ、4回の繰り返しリサイクルが可能と報告されている。

■ CFRPの易解体²⁴⁾

廃CFRP部品を他の樹脂や鉄、アルミ部品から容易に解体できる接着剤の研究開発が進められている。特徴的

図3 FRPの亜臨界水分解によるリサイクル工程¹⁸⁾

図4 FRPの常圧溶解によるリサイクル工程²²⁾

図5 常圧溶解にてFRPから回収したガラス繊維²²⁾

図6 CFRP自動車部品のリサイクル構想¹¹⁾

な粘弾性を有する説着剤のエポキシ樹脂を作成し、さらに解体トリガー(熱膨張を有する黒鉛)を添加することにより、耐熱接着性を有しながら加熱解体できるCFRP用接着剤の可能性が報告されている。

5. おわりに

今世紀に入り、原油価格の高騰は全く治まらず、ガソリン価格は上昇を続けている。この厳しい原油市場の背景から、輸送機の燃費向上が求められている。航空機でのCFRP採用による軽量化に端を発し自動車のFRP化も進行していく動向がうかがえる。また、アジア諸国の経済発展が順調であり、FRPの世界市場は上昇傾向にある。その反面、FRPリサイクルの技術開発とその実用化は、いくつかの検討がみられるが、非常に遅れている。現在のところ、国内外の産業界では、FRP母材の溶解、および繊維と母材との分離も困難で、処理コストの面でリサイクルできないと考えられている。しかし、将来、革新的な廃FRPのリサイクル技術が開発されれば、FRPは軽量で環境負荷が少ない材料として注目され、自動車をはじめとする様々な製品への採用が格段に増えるであろう。あわせて、グリーンコンポジットの品質向上とリサイクルを目指した研究開発と普及も期待したい。

参考文献

- 1) Nobelprize.org, <http://nobelprize.org/>
- 2) アル・ゴア, 枝廣淳子=訳; 「不都合な真実」ECO入門編, ランダムハウス講談社(2006)
- 3) 森智和他; 「プラスチックの化学再資源化技術-廃食用油を利用する廃FRPの熱分解技術-」シーエムシー出版(2005)
- 4) (社)強化プラスチック協会, <http://www.jrps.or.jp/>

- 5) 富山隆史; 「自動車軽量化炭素強化複合材料の研究開発の概説」自動車技術Vol.61(2007)
- 6) 山口晃司他; 「日本のFRP事情と今後の動向」自動車技術Vol.61(2007)
- 7) Technologies For Carbon Fiber Reinforced Modular Automotive Body Structures, <http://www.tecabs.org/>
- 8) 木村照夫; 「天然繊維屑をグリーンコンポジットとして再利用」京都工芸繊維大学地域共同研究センター, 知のシーズ集, 先端ファイブ科学部門(2006-2007)
<http://www.liaison.kit.ac.jp/db/index.php?dpt=11>
- 9) 邊吾一; 「日本における複合材料の最新技術動向」自動車技術Vol.61(2007)
- 10) NEDO 自動車軽量化炭素繊維強化複合材料の研究開発の基本情報
<http://www.nedo.go.jp/activities/portal/gaiyou/p03005/p03005.html>
- 11) 第1回「自動車軽量化炭素繊維強化複合材料の研究開発」(中間評価)分科会プロジェクトの全体概要説明資料<公開資料>資料5-2(2005)
www.nedo.go.jp/iinkai/kenkyuu/bunkakai/17h/chuukan/2/1/5-2.pdf
- 12) TOYOTA AUTO SHOWS INFORMATION
http://www.toyota.co.jp/jp/autoshow/2007/tokyo/report/toyota/1016_1/index.html
- 13) トヨタ自動車ニュースリリース
http://www.toyota.co.jp/jp/news/07/Oct/nt07_063.html
- 14) トヨタ自動車ニュースリリース
http://www.toyota.co.jp/jp/news/07/Oct/nt07_065.html
- 15) 国土交通省海事局「FRPリサイクルシステム」
http://www.mlit.go.jp/maritime/senpaku/FRP_recycle/index.html
- 16) 佐野慶一郎他「植物油によるFRPボート廃材の熱分解とリサイクル手法」第73回マリンエンジニアリング学術講演会論文集(2005)
- 17) M. Takayanagi et. al; 「Thermal Degradation of Thermosetting Resin Waste with Vegetable Oil」Proceedings of The 3rd International Symposium on Feedstock Recycling (ISFR) of Plastics & Other Innovative Plastics Recycling Techniques(2005)
- 18) 野間口兼政他; 「欧州・北米・環太平洋地域のFRPリサイクル」自動車技術Vol.61(2007)
- 19) 松下電工(株)ニュースリリース2006年9月25日
<http://www.mew.co.jp/corp/news/0609/0609-21.htm>
- 20) 松下電工(株)環境報告
<http://www.mew.co.jp/corp/csr/eco/02/26.html>
- 21) 日立化成工業(株)ニュースリリース2007年6月7日
http://www.hitachi-chem.co.jp/japanese/information/2007/n_070607.html
- 22) 日立化成工業(株)「不飽和ポリエステル樹脂を主成分とするFRPのFRPなどへのリサイクル技術の開発」経済産業省平成14年度循環型社会構築促進技術実用化開発補助事業, 成果報告(2003)
- 23) 高橋淳「マテリアルリサイクルとLCA」自動車技術Vol.61(2007)
- 24) 岸肇「リサイクル技術-解体性接着技術-」自動車技術Vol.61(2007)

佐野 慶一郎 (さの けいいちろう)

昭和62年、自動車会社に入社、平成9年、博士(工学)取得(静岡大学大学院)、同15年、山梨県環境科学研究所入所、同18年より静岡県立大学環境科学研究所准教授、専門はリサイクル工学と環境政策論

齊藤 奈々子 (さいとう ななこ)

平成16年、九州工業大学大学院生命体工学研究科修士課程修了、同年、同大学大学院研究員、同18年、山梨県環境科学研究所入所、環境資源学研究室研究員、専門は環境工学と資源リサイクル

森 智和 (もり ともかず)

平成17年、九州工業大学大学院情報工学研究科博士課程修了、同年、山梨県環境科学研究所入所、同18年、環境資源学研究室長、専門はLCAと資源リサイクル

新刊

『繊維のふしぎと面白科学』

天然繊維とスーパー繊維の素材と機能性の秘密

山崎 義一 著、新書版、206頁、本体900円、ソフトバンククリエイティブ刊

本書は日本化学繊維協会において永年にわたり、化学繊維の教育啓蒙活動に従事された山崎義一氏により執筆された最新刊です。

昨今の中国を中心とした近隣諸国との競合で生産面では縮小を強いられ、厳しい環境におかれている我が国の繊維産業ではありますが、日本の繊維産業の技術水準は世界のトップクラスであることは誰もが認める通りです。この技術と日本国民の持つ優れた感性の融合により今後も世界をリードしていくでしょう。

本書では繊維はこんなところにも使われている、こんな特徴があるといった興味ある話が満載されています。第1章から第5章にわたって、自然界にある繊維と科学の力で生まれた繊維、繊維って何だろう、進化する繊維、暮らしと繊維、未来の繊維に分けてやさしく解説されています。絵や写真も豊富で、内容は繊維の専門家でも目から鱗です。びっくりの繊維ワールドへ誘ってくれること請け合いです。

(雪)

日本繊維機械学会 正会員 入会申込書

氏 名 (ふりがな)	<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> 年 月 日生 ⑩ </div>			会員種別 (○印をつける)	正・学生
正 会 員	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 60%;"> 所 在 地 (郵便番号) 勤務先名称 { 役職名並びに所属部課名 教授・准教授・講師・助教 </div> <div style="width: 35%;"> (電 話) (FAX) E-mail : </div> </div>				
学生会員	所 在 地 学 校 名 科名及び学年				
自 宅 (郵便番号)				通 信 先 (○印をつける)	自宅 勤務先
経 歴	出身学校 (名称, 科名, 卒業年次) <div style="display: flex; align-items: center;"> 業 務 { 略 歴 { </div>				
他に加入している 学会・協会名			紹 介 者		
入会申込	年 月 日	入会承認	年 月 日	会員番号	

(1) 入会申込について

本申込書に会費を添えてお申し込み下さい。ホームページからも申し込みできます。

(2) 会 費

正会員 年額8,000円 学生会員 年額2,000円

(3) 入会承認書および会誌について

入会申込書並びに会費受理の上、本会にて入会承認の手続完了次第、ただちに入会承認書並びに機関誌「繊維機械学会誌 (月刊)」並びに「Journal of Textile Engineering (隔月刊)」を無料配付致します。但しバックナンバーご希望の場合には別に誌代をいただきます。

(4) 会員資格について

正 会 員…繊維並びに繊維機械に関する学識経験または関心のある個人 学生会員…在学中の者

(5) 入会申込書送付先

〒550-0004 大阪市西区靱本町1丁目8番4号 (大阪科学技術センタービル) 社団法人 日本繊維機械学会

(6) 特別の場合を除き会費領収書は送金控書をもってこれに代えさせていただきます。

(TEL. 06-6443-4691, FAX. 06-6443-4694, E-mail: i-love-tmsj@nifty.com)