

炭素繊維強化プラスチックの廃棄物を 繊維補強コンクリートに再生利用

サーキュラーエコノミーの推進に貢献する「リカボクリート®工法」を開発

平 田 隆 祥・沼 田 裕 介

燃料電池自動車「MIRAI」の高圧水素タンクに使用されている炭素繊維強化プラスチックの端材を、コンクリート補強用繊維として短繊維の形で再生利用する新たな技術「リカボクリート®工法」を開発した。コンクリート補強用繊維は、コンクリートと混ぜることで、粘り強さである靱性を高める繊維質の補強材のことで、建設分野の使用実績は拡大している。本技術を適用した繊維補強コンクリートは、従来の補強用繊維と比べて同等以上の優れた性能を有し、自動車工場の部品置き場の床に適用した。

本技術により、炭素繊維強化プラスチックの廃棄量を削減することができ、サーキュラーエコノミー（循環型経済）の推進に貢献する。

キーワード：炭素繊維強化プラスチック（CFRP）、燃料電池自動車（FCEV）、再生炭素繊維（rCF）、リサイクル、サーキュラーエコノミー、繊維補強コンクリート

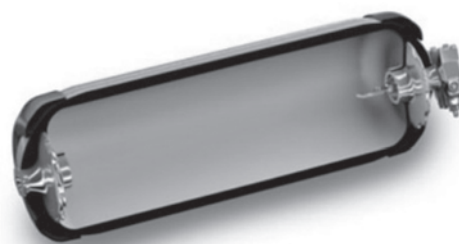
1. はじめに

炭素繊維強化プラスチック（CFRP）は、軽くて強度が高く、耐久性に優れる特長がある。そのため、水素を燃料とする燃料電池自動車の高圧水素タンクや航空機、風力発電の風車ブレードなどに利用されており、適用が拡大している（写真—1, 2）。このCFRPは、炭素繊維に熱硬化性樹脂を含浸させた炭素繊維複合材料の成形加工品である。また、炭素繊維は、単体では比強度の高い「糸」で形状を保持することができないため、プラスチックの他にも、セラミックスや金属と複合化した材料とすることにより、高い強度や弾性と成形性を兼ね備えた加工製品として利用されている。

このCFRPの2020年の世界市場は、14万9千tで、2025年頃からの自動車用途の需要拡大も予測され、航空機用途や風力発電ブレード用途も含めて2030年には34万4千t規模になると想定されている。一方、CFRP工程内端材と使用済CFRPの発生量から推計した廃CFRP処分量は、2020年に5万7千tであったものが、2030年には15万7千tに増加すると推計されている。現状、CFRPは、約30%がリサイクルされずに廃棄されているため、廃棄量の低減が環境保全やコスト低減の観点から世界共通の目標となっている（図—1）。

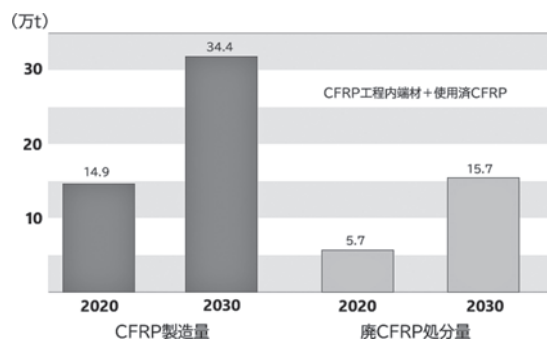


写真—1 燃料電池自動車「MIRAI」 提供 トヨタ自動車㈱



写真—2 燃料電池自動車の高圧水素タンク 提供 トヨタ自動車㈱

しかし、CFRPは強靱な材料であるが故に、その性能を保ったまま加工して再生利用することが難しく、例えば加工の過程で端材として発生したCFRPは、電炉で鉄をリサイクルする工程の原料として使用するとどまっており、本来CFRPが持つ強度を活かした再利用ができていなかった。



図一 1 CFRPの世界市場（製造量と処分量の推計）

2. 開発の背景

(1) 炭素繊維の開発と成長

炭素繊維の起源は、19世紀末にトーマス・エジソン（アメリカ）とジョセフ・スワン（イギリス）が、木綿や竹を焼いて作った炭素繊維を用いて電球を発明したことに遡ると言われている。1950年代に耐熱性が要求されるロケット噴射口の材料が求められ、1956年に米国でレーヨンを用いた炭素繊維が開発された。その後、1959年にアクリル繊維を用いたポリアクリロニトリル系炭素繊維が、1963年にはピッチを用いたピッチ系炭素繊維が、相次いで日本で発明された。1971年に高機能炭素繊維の工業化に成功したのは日本企業で、その後、他の国内メーカーも市場参入し、1970年代にはゴルフシャフトなどにCFRPとして利用された。当初は市場の開拓に苦しみつつも、やがて欧米航空宇宙産業の需要でシェアを拡大した。

現在、日本の炭素繊維は世界シェアの約5割を占めており、日本が世界をリードする先端材料であり、技術力を十分に蓄積している。炭素繊維は、安全保障貿易管理の対象品目にも指定されている。

(2) 繊維補強コンクリートの歴史

圧縮力に比べて引張力に弱い材料を、繊維を利用して複合化して補強する知恵は古くから知られていた。エジプトでは6,000年以前から、日干し煉瓦に粘土や砂と一緒に藁を練り込んでいた。藁には日干し煉瓦を固め、均等に乾燥させてひび割れを無くす働きがあった。この知恵をモルタルやコンクリートに応用したのは19世紀で、1867年に造園師のジョゼフ・モニエ（フランス）が、金網で補強したモルタルを発明しフランス特許を取得したのが最初と言われている。また、1900年にルードリッヒ・ハチェク（オーストリア）が、モルタルに石綿繊維を練り込んだ石綿スレートを発明した。

1960年代に繊維補強コンクリートの研究が進み、

1970年代初めには鋼繊維と耐アルカリ性ガラス繊維がコンクリート補強繊維として実用化された。その後、炭素繊維やアラミド繊維、ビニロン繊維、ポリプロピレン繊維（PP繊維）など様々な種類の繊維を用いたコンクリートが実用化された。

国内建設分野では、鋼繊維がトンネルの二次覆工のコンクリートやコンクリート床版に多用されたが、現在はPP繊維を添加した繊維補強コンクリートが市場の大半を占めている。一方、炭素繊維は、「軽い」、「強い」、「腐食しない」という優れた特長を有するため繊維補強コンクリートの素材としての研究は進んだものの、他の繊維に比べて高価なため、実適用は僅かであった。これまで、炭素繊維は長繊維をシートやグリッド、ロッドに加工して、鉄筋コンクリート構造物自体を補強する用途で利用されることがほとんどであった。さらに、CFRPとして一旦使用された炭素繊維を、建設分野に再生利用する事例は僅かである。

3. CFRP再生利用技術の開発概要

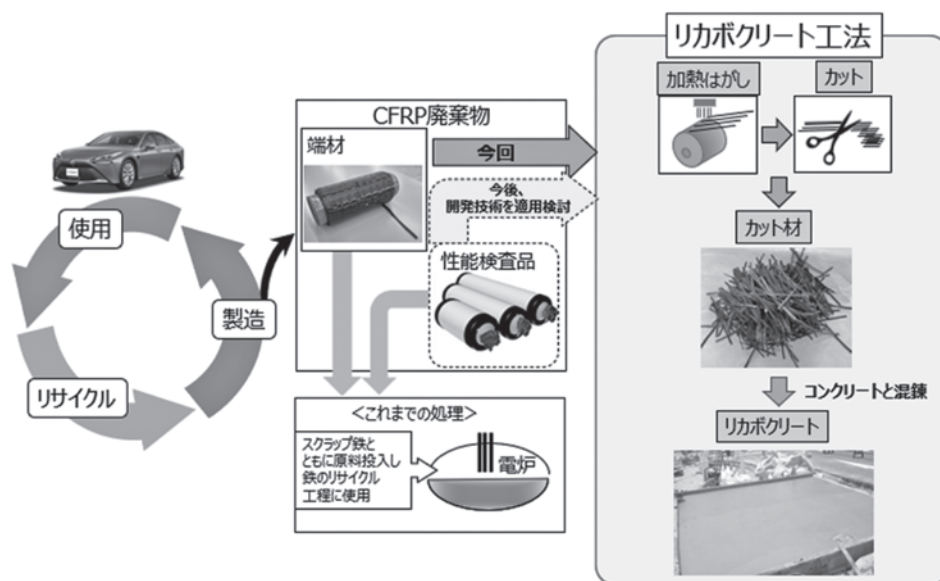
前述の背景から、自動車分野でCFRPとして一旦使用した炭素繊維を、その優れた強度特性を保持したまま再生加工し、製品としてリサイクルする技術の開発を目標とした。その結果、CFRPの再生方法や加工方法、加工品の仕様や品質確認を積み重ね、再生炭素繊維（rCF）をコンクリート補強用繊維として再生利用する新たな技術「リカボクリート（Recycled Carbon Fiber Concrete）工法」（以下、本工法という）を開発した（図一2）。

本開発では、燃料電池自動車「MIRAI」の高圧水素タンクを製造する段階で発生するCFRPの工程内端材であるトウプリプレグ（TPP）端材を用い、独自の熱加工を施した後、コンクリート補強用繊維の用途に適切な長さ・寸法に裁断して再生加工品を製造している（写真一3）。このコンクリート補強用繊維を、適量生コンクリートに添加することで、硬化した後のコンクリートのひび割れ抑制や靱性を向上する技術を実現した（写真一4）。

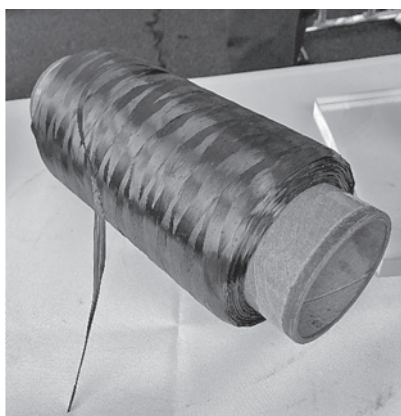
4. 特長

本技術の特長を下記に示す。

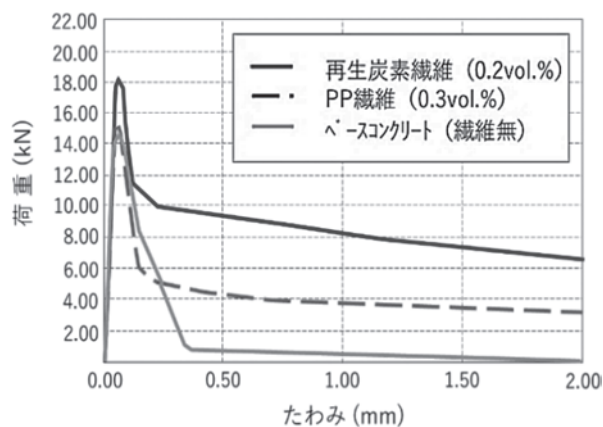
- (1) 独自の熱加工により、CFRP端材表面層からCFRPをはがす技術を確認
TPP工程内端材のCFRPの性能を保ったまま、独



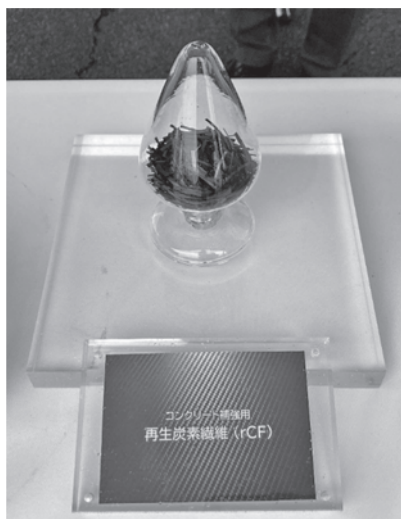
図一 2 資源循環と開発技術の概要



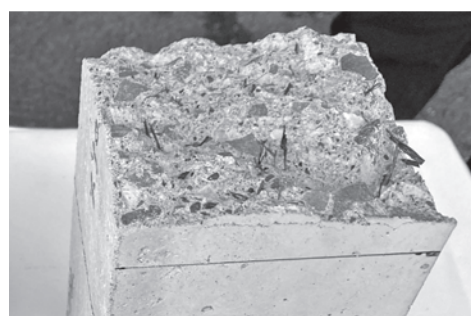
写真一 3 トウプリブレグ (TPP) 工程内端材



図一 3 コンクリート部材の曲げ靱性試験結果 (寸法: 100 × 100 × 400 mm)



写真一 4 CFRP を再生したコンクリート補強用繊維



写真一 5 曲げ靱性試験後のコンクリート断面の様子 (黒く細長い再生炭素繊維)

(2) ポリプロピレン製のコンクリート補強用繊維と比べて3分の2の添加量で同等以上の性能を発揮

本工法に使用するコンクリート補強用繊維は、モルタルやコンクリートに添加でき、同じ目的で従来使われてきたポリプロピレン製繊維の3分の2の添加量で、同等以上の圧縮強度や曲げ靱性を発揮する (図一 3、写真一 5)。

自の熱加工により連続的にはがすことができ、使用するエネルギーを最小としてコンクリート補強用の再生炭素繊維を成形加工する技術を実現した。

(3) 再生炭素繊維の使用により環境保全やカーボンニュートラルに貢献

本工法に使用する再生炭素繊維は、リサイクルにより新品の炭素繊維を用いた場合と比べて、加工製品のCO₂排出量を最大15分の1程度に削減した。また、通常の補強鉄筋の使用との比較では、CO₂排出量を最大9分の1程度にそれぞれ低減した。

5. 実適用事例

本工法は、自動車工場内の部品置き場の床用コンクリートに初適用した。適用手順は、通常の繊維補強コンクリートと同様の手順で行った（図-4）。

ベースとなるコンクリートには、生コンクリートを使用する。施工現場に到着した生コンクリート車に、足場等を使って後部の投入口から加工した再生炭素繊維を添加し、所定の時間攪拌して繊維を生コンクリート中に均一に分散する。再生炭素繊維を添加した後に、生コンクリートが所定の品質であることを試験で確認する。品質が確認できたら、通常のコンクリートと同様に型枠内に打込む。その後、施工マニュアルに基づき、罫による仕上げや養生を行う。

6. おわりに

自動車に使用するCFRPも、建設分野の繊維補強コンクリートも、優れた素材を用いて複合化材料とすることで性能を向上してきた。これら両者の技術を融合することで、さらなる改善が期待できる。構造物に使用するコンクリートは、その形状が長年保たれることと、構造材料として強度が担保されることが必要となる。しかし、現代のコンクリート構造物は、コンクリートそのものが劣化する前に、比較的短期間で補強用の鋼材が錆始めて耐力の低下に至る事例も多発して



写真-6 再生炭素繊維の添加



写真-7 本工法の打込み



写真-8 仕上げ

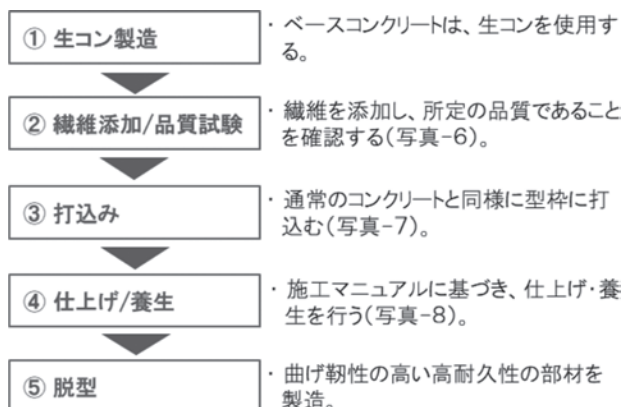


図-4 適用手順

いる。

本稿で紹介した「リカボクリート工法」は、CFRPの市場拡大を背景に、軽く、強く、腐食しない炭素繊維を再生利活用することで、安心・安全・強靱な社会づくりや歴史に残る構造物の建造に挑戦する。このようなリサイクル活動を展開することで、サーキュラーエコノミー（循環型経済）に貢献する。

《参考文献》

- ・トヨタ MIRAI/ トヨタ自動車 WEB サイト <https://toyota.jp/mirai/>
- ・(株)富士経済, 炭素繊維複合材料 (CFRP/CFRTP) 関連技術・用途市場の展望, 2021
- ・(株)矢野経済研究所, リサイクル炭素繊維の評価手法や採用状況に関する国際動向調査, 2022
- ・土木学会誌, CE リポート, 次世代の構造材料の開発を目指してコンクリートの歴史を知る, 2012

[筆者紹介]

平田 隆祥 (ひらた たかよし)
(株)大林組
技術本部 技術研究所
上級主席技師



沼田 裕介 (ぬまた ゆうすけ)
トヨタ自動車(株)
素形材技術部 基盤開発室
主任

