航空機複合材廃材のリサイクル利用による環境負荷低減

Environmental Impact Reduction by Recycling of Composite in Aircraft Manufacturing

金升 将征[*1] Masayuki Kanemasu
西村 渉[*2] Wataru Nishimura
吉川 明男[*3] Akio Yoshikawa
山森 卓[*4] Taku Yamamori
小林 亮[*3] Ryo Kobayashi

航空機部品を中心に，軽量・高強度である炭素繊維を用いた複合材の利用が進んでいるが，当社では年間 1000 トン近くの複合材廃材が発生し，産廃処理している。炭素繊維の製造は，エネルギー負荷が大きく，アルミと比べても2倍以上の CO_2 が発生しており，さらに複合材産廃処理にも環境負荷が発生する。この問題を解決するため，複合材リサイクル技術に着目し，リサイクル炭素繊維の性能評価や強度特性を取得した。本稿では，環境負荷低減を目指し，複合材廃材からリサイクル炭素繊維を抽出するまでの新しいバリューチェーン構築の取り組みについて述べる。

1. はじめに

軽量・高強度である炭素繊維複合材（CFRP）は，航空機部品や自動車部品を中心に適用拡大が進んでいる。一方，炭素繊維は，燃え難い，軽くて飛散しやすい，導電性がある等の特性を有しているため，廃棄時に多くの課題がある。例えば，燃焼を伴うサーマルリサイクルでは，燃え残った繊維が飛散することで電気的短絡事故の原因となる。そのため，多くの複合材廃材は，埋立処分されているのが現状である[(1)]。また，炭素繊維は高価であり，製造時のエネルギー負荷が大きく，アルミと比べても2倍以上の CO_2 発生量のため，ライフサイクル全体で見た場合にマテリアルリサイクルとしての利用が強く望まれている。しかしながら，リサイクルされた炭素繊維は，バージン炭素繊維より物性が低下すると考えられているため，本格的なマテリアルリサイクルは進んでいない。[(1)]

図1 当社で発生する複合材廃材

*1 民間機セグメント技術統括室
*2 総合研究所製造研究部
*3 民間機セグメント民間機事業部業務管理部
*4 民間機セグメント民間機事業部複合材主翼工作部

当社でも，Boeing787 の複合材主翼の製造を受注し，年間 140 機を越える大量の複合材部品製造を行っているが，複合材製造時に使用するプリプレグの歩留りやトリム工程等の廃棄物として年間約 1000 トンの複合材廃材（図1）が発生しており，環境面の負荷も大きく，産業廃棄物処理に多大な経費が発生している。この問題を解決するため，複合材リサイクル技術（熱分解法や溶解法等）に着目し，リサイクル炭素繊維の性能評価や強度特性評価を通して，これまで取り組んできた複合材廃材からリサイクル炭素繊維を抽出するまでの新しいバリューチェーン構築を紹介する。

2. リサイクル炭素繊維の性能評価

近年，国内外で複合材リサイクル技術の開発が盛んに行われている。国内では，表1に示すように，熱分解法，溶解法，流体法，電解法，触媒分解法等[(1)]があるが，実用化を考慮すると現段階では熱分解法[(2)]と溶解法[(3)]が有望と考えられている。そこで，熱分解法と溶解法のリサイクル技術を用いて，当社の複合材廃材からリサイクル炭素繊維を抽出し，リサイクル炭素繊維の性能評価を行った。

表1 国内の炭素繊維リサイクル技術

技術分類	熱分解法	常圧溶解法	超臨界流体法	亜臨界流体法	電解法	触媒分解法
樹脂の種類	樹脂全て	エステル系	エステル系	エステル系	樹脂全て	樹脂全て
回収物	炭素繊維 ガス	炭素繊維 樹脂分解物	炭素繊維 硬化前熱硬化性樹脂	炭素繊維 樹脂分解物	炭素繊維	炭素繊維
温度	500℃	100～200℃	250～300℃	300～400℃	酸アルカリ電解温度	400～450℃
圧力	常圧	常圧	5～10MPa	1～4MPa	常圧	常圧
前処理	なし	なし	粉砕	なし	チップ粉砕	なし
規模	2000トン/年	12トン/年	ラボスケール	ラボスケール	ラボスケール	ラボスケール

2.1 SEM（Scanning Electron Microscope）による表面観察

熱分解法と溶解法により抽出したリサイクル炭素繊維表面の SEM 観察結果を図2に示す。観察結果から，両手法共に，樹脂の残渣，汚染物質，炭素繊維の欠損等も確認できず，リサイクル炭素繊維の表面は良好な状態と考えられる。

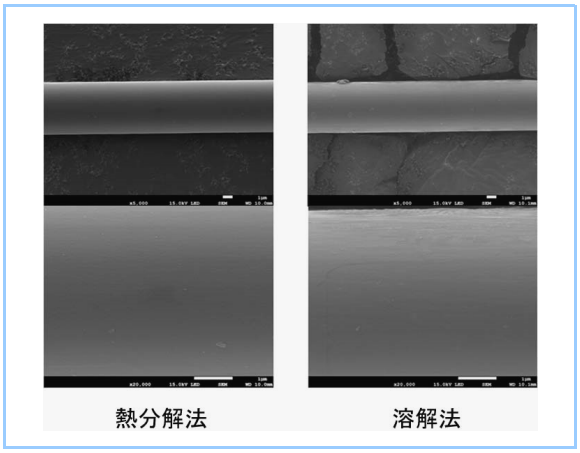

図2 リサイクル炭素繊維の SEM 観察結果

2.2 XPS（X-ray Photoelectron Spectroscopy）による表面元素分析

リサイクル炭素繊維表面に対して XPS 分析を実施し，リサイクル炭素繊維とバージン炭素繊維の表面に存在する酸素原子量を算出した（図3）。リサイクル炭素繊維は，リサイクル工程中にマトリクス樹脂だけでなく炭素繊維表面の官能基も除去されていると考えられるため，バージン炭素繊維より表面酸素原子量が少ない値を示した。

しかしながら，リサイクル炭素繊維表面には酸素原子を含んだ官能基の残存も確認できるため，マトリクス樹脂との密着性や濡れ性は期待できると考えられる。

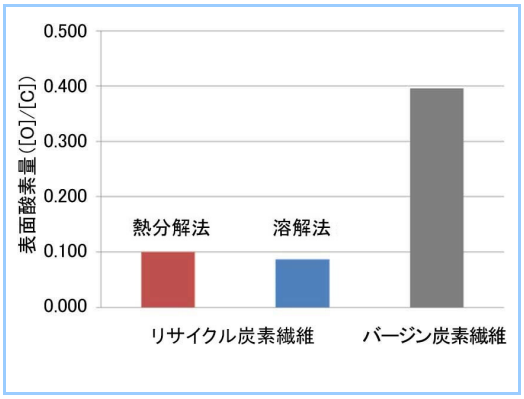

図3 リサイクル炭素繊維の表面酸素量

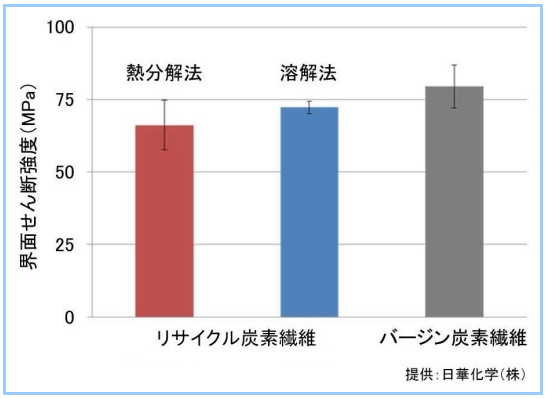

図4 マイクロドロップレット試験結果

2.3 マイクロドロップレット試験

続いて，リサイクル炭素繊維の表面の密着性を評価するために，マイクロドロップレット試験を実施した。リサイクル炭素繊維束から単繊維を取り出し，エポキシ樹脂を付着することでマイクロドロップレットを形成させ，引抜試験により得られた引抜荷重から界面せん断強度を算出した(図4)。リサイクル炭素繊維の界面せん断強度は，バージン炭素繊維より若干低い値を示しているが，2.2 項で示した酸素原子を含んだ官能基の残存効果により，両手法で抽出したリサイクル炭素繊維表面は十分な密着力を保持していると考えられる。

3. リサイクル炭素繊維の有効利用による環境負荷低減への取り組み

複合材廃材は，リサイクル工程中に所定のサイズに切断されるため，連続繊維としてリサイクル炭素繊維を取り出すことは困難である。そのため，リサイクル炭素繊維の形態としては1mm 以下のミルドファイバー，10mm 以下の短繊維，10mm 以上の長繊維となり，それぞれの繊維形態に応じてペレット化や不織布化等の付加価値の高い利用方法が望まれる。利用例を図5に示す。本稿では，汎用性の高い短繊維の有効利用として，熱可塑樹脂との複合材利用を検討した。さらに，リサイクルパートナーを取り込んだバリューチェーン構築による環境負荷低減の取り組みについて述べる。

図5 リサイクル炭素繊維の形態

3.1 短繊維のリサイクル炭素繊維有効利用

リサイクル炭素繊維と熱可塑樹脂とのペレタイズ化による利用を検討した。熱可塑樹脂は，炭素繊維との密着性を考慮しポリアミド 12(PA12)を選定した。図6に示すとおり，原料ペレットとリサイクル炭素繊維を二軸混錬押出機に投入しペレタイズ化した。得られたペレット(CF 含有量

20wt%)を用いて射出成形による強度評価用供試体を製作し，市販品の短繊維ペレット(PA12＋CF20wt%)と比較評価を行った。なお，市販品の炭素繊維には，高強度タイプの東レ製 T700 を使用した。引張強度と曲げ強度の試験結果を図7に示す。リサイクル炭素繊維を用いた供試体は，市販品と比較しても同等の結果を示し，リサイクル炭素繊維の有効性を実証できた。

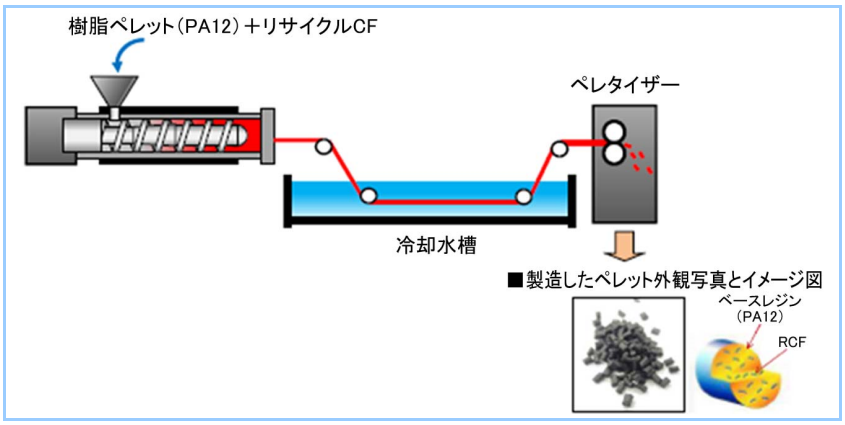

図6 ペレタイジング工程

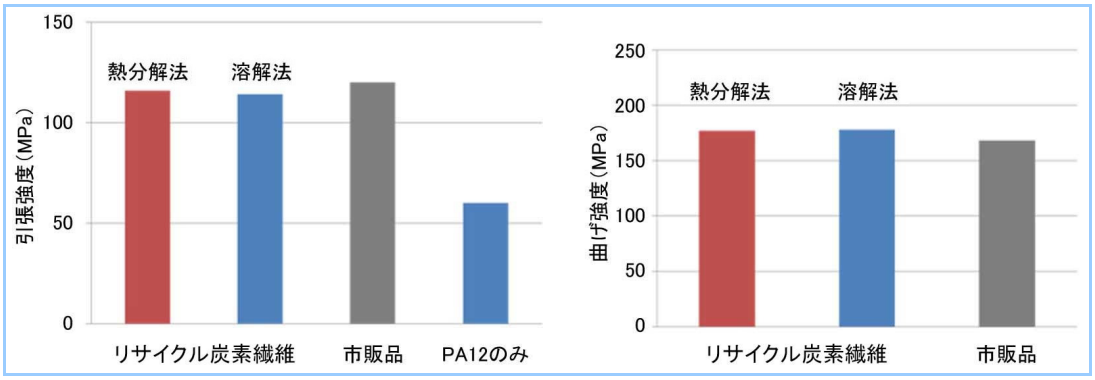

図7 リサイクル炭素繊維/熱可塑樹脂複合材の強度特性

3.2 リサイクルパートナーを取り込んだバリューチェーンの構築

リサイクルパートナーからは，当社の廃材は単一素材で異物混入がなく信頼性が高いという評価を得ており，さらに，廃材の安定供給のために，CFRP 以外の材料が混入しないようにポスター(図8)を掲示する等，廃材を“ゴミ”ではなく“資源”と捉えるよう意識改革を進めている。また，廃材をリサイクル処理が容易な形で供給する等，お客様やリサイクルパートナーと連携しながら，他社に先駆けて，複合材の製造からリサイクルまでの領域をカバーした新規バリューチェーンを構築した。

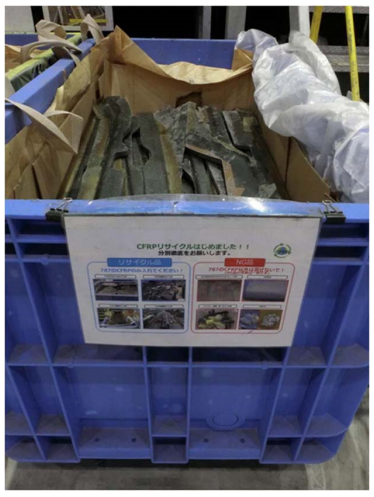

図8 廃材の分別を促すポスター

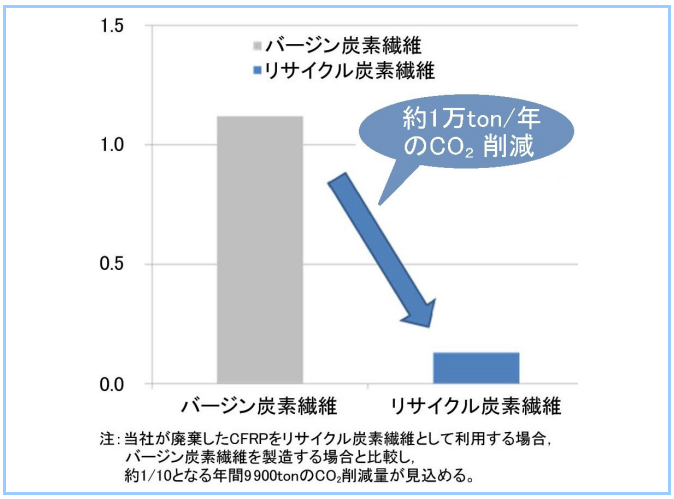

図9 当社 CFRP 廃材をリサイクル利用した場合の CO_2 排出量削減効果

一般に，バージン炭素繊維の製造では，286 MJ/kgの製造エネルギーを必要とし，CO_2排出量は 22.4 kg-CO_2/kg と報告されている(4)。しかし，今回の取組みにより，炭素繊維の製造エネルギー消費を 1/6 程度に削減し，当社の複合材廃材の再利用により年間1万トン近い CO_2 が削減可能となった(図9)。

4. まとめ

本稿では，リサイクル処理方法の見極めやリサイクル炭素繊維の性能評価を行い，リサイクル炭素繊維の有効性を実証した。また，複合材廃材を安定供給できる当社の強みを生かし，他社に先駆けて，当社で発生した複合材廃材から利用価値の高いリサイクル炭素繊維を抽出するまでの新しいバリューチェーン構築の取り組みを紹介した。既に，複数のリサイクルパートナーに廃材を定常的に供給する体制をとり，環境負荷低減の取り組みを始めている。さらに，産廃処理費用もなくなり，コスト低減にもつながった。

今後は，構築したバリューチェーン拡大の取り組みとして，リサイクル炭素繊維の製品化を目指し，環境負荷低減に貢献していきたい。

参考文献

(1) 守富 寛，阿部 知和，特集 リサイクル，成形加工，Vol.30 No.2 (2018)
(2) 守富 寛，板津秀人，CFRPの成形・加工・リサイクル技術最前線，NTS，第3編，第3章，第1節 (2015)
(3) 柴田勝司，中川光俊，日立化成テクニカルレポート，第 56 号，(2013.12) p.6～11
(4) 山藤家嗣，炭素繊維複合材料とリサイクル，(2015)
http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/150223/150223_01e.pdf