

航空機複合材廃材のリサイクル活用の取組み

Efforts for Recycling and Utilizing Aircraft Composite Material Waste



金 升 将征^{*1}
Masayuki Kanemasu

山 森 卓^{*2}
Taku Yamamori

西 村 渉^{*3}
Wataru Nishimura

内 山 兼 吾^{*4}
Kengo Uchiyama

炭素繊維複合材料は、その軽量、高強度な特性から、旅客機の主翼部分などへの適用が拡大している一方、炭素繊維製造時のエネルギー負荷が大きく、また廃棄処理時にかかる環境への負荷も大きな課題となっている。三菱重工業株式会社では、従来、炭素繊維複合材料のリサイクル化に向けた取組みを進めており、本報では、安定したリサイクル材を供給できるサプライチェーンの構築とリサイクル材特有の技術課題の克服に向けた活動概要について報告する。

1. はじめに

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。三菱重工業株式会社(以下、当社)でも、Boeing 787 の複合材主翼の製造を受注し、大量の複合材部品製造を行っているが、複合材製造時に発生するプリプレグ(未硬化材料)や硬化済み部品の端材等の廃棄物として複合材廃材も発生させている。図1に、当社で発生する複合材廃材の事例を示す。また、炭素繊維の製造は、一般的にエネルギー負荷が大きく、アルミより多くの CO₂ を排出しているため、複合材廃材の廃棄処理時には環境への負荷や処理費用も発生している。

当社は、2040 年にカーボンニュートラルを達成することを宣言(MISSION NET ZERO)し、資源の有効活用を通じた環境負荷低減と地球環境保護を目指している。そこで、これらの目的達成に向けて、複合材リサイクル技術に着目し、安定したリサイクル材を供給できるサプライチェーンの構築とリサイクル材特有の技術課題克服に向けた活動の取組みについて報告する。

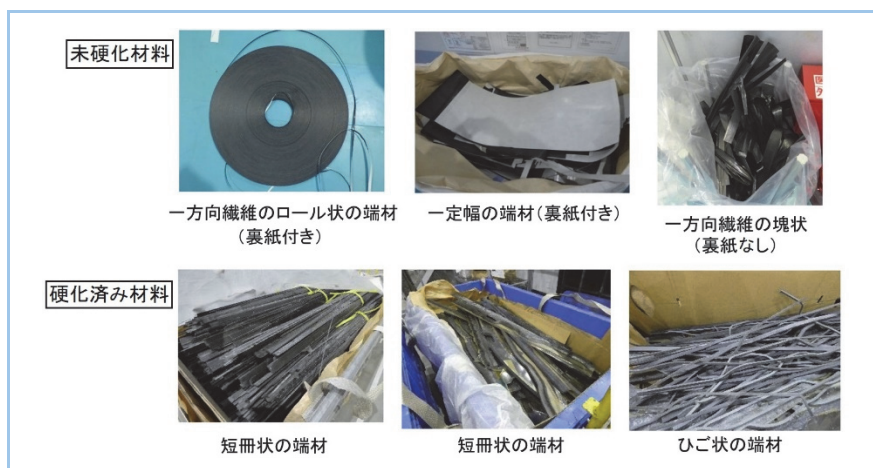


図1 当社で発生する複合材廃材の事例

*1 総合研究所 特殊システム研究推進部 主席研究員

*2 民間機セグメント 787 主翼工作部 課長 技術士(機械部門)

*3 総合研究所 ファクトリーイノベーションセンター

*4 民間機セグメント 787 主翼工作部

2. リサイクル炭素繊維の製品化に向けた課題

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おり、当社も従来、これらのリサイクル技術を活用したリサイクル炭素繊維の性能評価やリサイクル炭素繊維の有効性実証を進めてきた⁽¹⁾。一方で、リサイクル炭素繊維を用いた製品化に向けては、リサイクラーをはじめとする様々なサプライヤーとの連携に加え、以下の3点の課題が存在する。

(1) 廃材の調達性

自動車部品のような大量生産品向けには、部品重量や車種によって、廃材の供給量不足が懸念されることからあまり適しておらず、中量・少量生産品向けに限定した上で、廃材の安定確保が必要となる。

(2) 廃材品質の信頼性・安定性

不純物の混入防止、廃材のトレーサビリティの仕組み作り、また有用なリサイクル炭素繊維の材料規格などは存在しないため、信頼性や品質安定性に懸念がある。

(3) 価格設定

リサイクル炭素繊維は、一般的にはバージン炭素繊維に比べ安価となるが、ガラス繊維と比べると高価となる。従って、ガラス繊維を用いた部品を代替する場合には、軽量化などの付加価値だけでなく、安価な価格設定も必要となる。

リサイクル炭素繊維を用いた製品化には、少なくとも上記3点の課題解決が必要であるが、複合材廃材を安定供給でき、航空機製造で求められるトレーサビリティシステムを保有する当社の強みを活かすことで、廃材供給量や廃材品質を一定程度保証し、さらに廃材仕分けによる分別コストを抑制した取組みを次章で紹介する。

3. 複合材廃材の管理

当社の複合材廃材は単一素材で構成され、航空機製造で求められる高い品質工程により異物混入がないため、信頼性が高いという評価をリサイクルパートナーから得ている。さらに、CFRP以外の材料が混入しないように、図2(左)に示すポスターを掲示する等、廃材を“ゴミ”ではなく“資源”と捉える意識改革を進めている。さらに、航空機製造で求められるトレーサビリティシステムを活用した人材教育や工程の変更管理なども導入することで、廃材の安定供給だけでなく、変更が発生した場合にも追跡が可能となり、廃材の形態・形状・品質を一定程度保証する仕組みを構築した。

また、サプライチェーンの全体最適化の視点から、図2(右)に示すような、後工程のリサイクル処理が容易となる形状で廃材を回収し供給する等、より付加価値の高いリサイクル炭素繊維を生み出すサプライチェーン作りを、お客様やリサイクルパートナーと共に取り組んできた。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・廃材処理費低減の取組を進めている。



図2 複合材廃材の管理方法

4. リサイクル炭素繊維の製品化取組み

次に、サプライチェーン拡大の一環として製品化の用途探索を開始し、サーキュラーエコノミーを推進している経済産業省中部経済産業局の協力の下、三菱電機株式会社（以下、三菱電機）製のスティック型掃除機（図 3）を候補として選定し、三菱電機と連携しながら 2020 年より検討に着手した⁽²⁾。本スティック型掃除機の一部には、バージン炭素繊維を混錬したポリプロピレンを用いた射出成形部品が適用されており、環境負荷低減とコストダウンを目的に、本スティック型掃除機のハンドル部品とパイプ部品を対象としたリサイクル炭素繊維への置換えを推進した。



図3 三菱電機製コードレス掃除機“iNSTICK ZUBAQ”

複合材廃材からリサイクル炭素繊維を取り出すリサイクラーには、量産体制の整備状況や廃材が発生する名古屋地区からの運搬による環境負荷とコスト低減を考慮して、岐阜県に位置するカーボンファイバーリサイクル工業株式会社と協力体制を構築した。また、リサイクル炭素繊維を混錬したペレットを製造する樹脂メーカーとしてダイセルミライズ株式会社（現：ノバセル株式会社）の協力の下、量産化に向けた準備を進めた。本活動のサプライチェーンを図 4 に示す。特に、開発の初期段階から、ステークホルダー間で要求仕様・コストターゲットを共有し、サプライチェーンの全体最適化の視点で課題解決に取り組めたことが、製品化に繋がった大きな要因だと考えられる。

次に、バージン炭素繊維からリサイクル炭素繊維への置換えに向けて、ペレット製造試験、カーボン評価、実物成形試験、実物破壊試験の順で評価を行った。その中で発生した技術課題と対策方法について述べる。

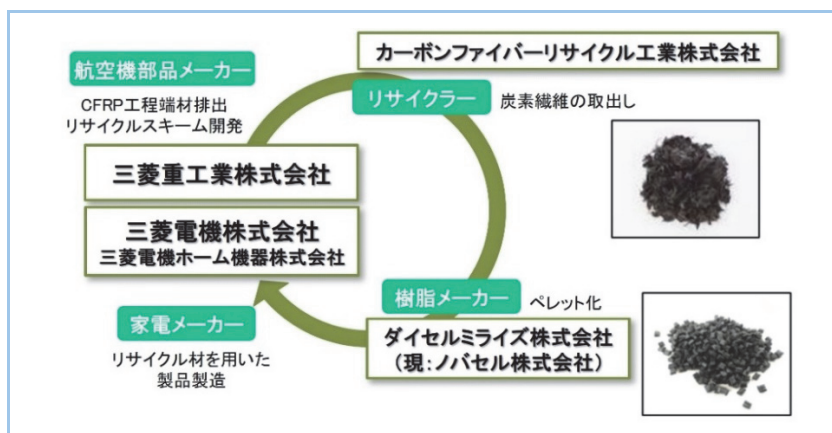


図4 サプライチェーン構築⁽³⁾

4.1 ペレット製造工程の量産性

製品化に向けて、中間材料であるペレットの量産性が求められる。一方、リサイクル炭素繊維特有の問題として、①粉塵の発生、②フィーダー詰まりの原因となる長繊維の混在（図 5）、という量産性を低下させる 2 点の要因が存在する。

①粉塵発生の原因としては、リサイクル炭素繊維を定長に切断する際に細かく切断された繊維と、熱分解法による繊維表面に残存する煤の遊離が主要因と考えられる。そこで、繊維表面にポリプロピレンと密着性の良いサイジング剤のスプレー塗布を採用し、表面をコーティングすることで粉塵の発生を抑制し、取扱い性を向上させることができた。一方、②長繊維の混在については、定長切断後の分級工程時に一定確率で長繊維が金網をすり抜けるため、分級工程の回数を増やすことで抑制を図った。ただし、分級回数の増加に伴い、表面の擦れによる粉塵増加の要因になるため、バランスを考慮した最適回数を採用した。

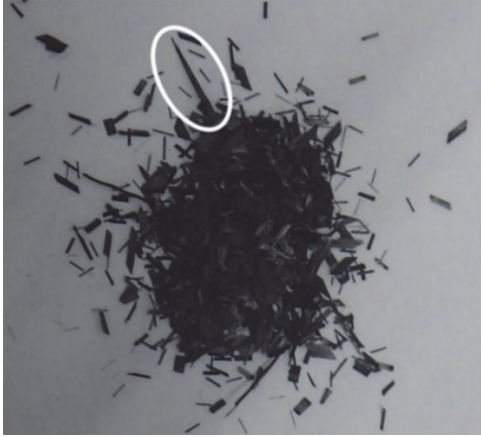


図5 長繊維の混在

4.2 強度特性

現行部品に採用されている市販品ペレットの繊維長は、所定の長さに切断した炭素繊維ロービングに対して樹脂を含浸することで一定の残存繊維長を保持することができる。一方、リサイクル炭素繊維の場合は、複合材廃材が様々な積層角度で構成されていることや、ペレタイズ工程時に繊維が切断される影響により、残存繊維長が短くなる。そのため、繊維含有率が同じ場合、リサイクル炭素繊維ペレットは、バージン炭素繊維を使った市販品ペレットと比較して、強度特性が同等、もしくは低下する傾向にある。強度特性を維持するためには、リサイクル炭素繊維の繊維含有率を増やすことが対策となるが、同時に材料コストが増加する。さらに、現行品では、射出成形前に樹脂ペレット単体を混錬し、所定の繊維含有率を希釈する追加工程が存在することを踏まえ、現行品と同等の強度特性と、希釈工程省略とを両立できる繊維含有率として 15%に設定した。引張試験を常温から使用条件を超える温度環境で測定した結果、特異的な変化もなく、物性のばらつきを考慮してもターゲットとする現行材料の水準を確保することができた(図 6)。さらに、工程省略だけではなく、材料管理の一元化により、トータルの部品成形コストを低減させることもできた。

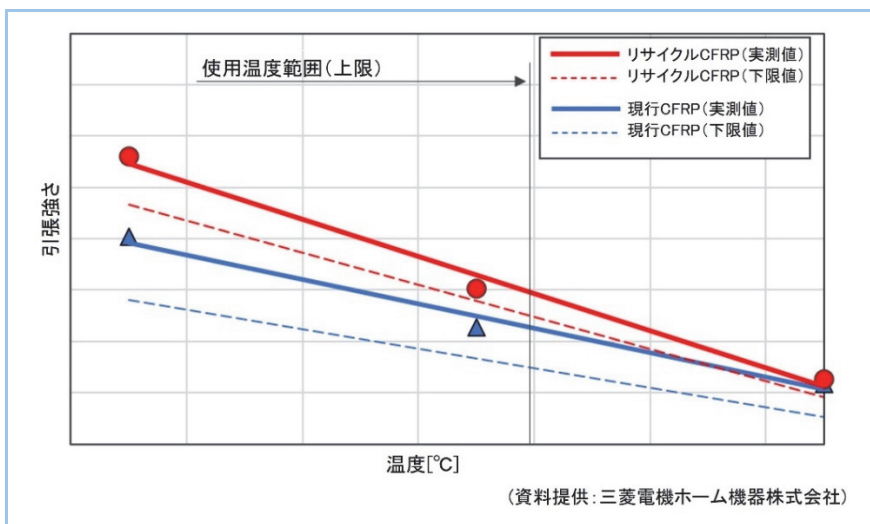


図6 引張試験結果

4.3 外観品質

ペレット量産性、強度低下の問題解決を経て、実物成形試験フェーズに移行したが、現行部品の外観品質と比較し、成形部品表面に白化および、白化に起因する色むらが発生した(図7)。調査の結果、選定したベース樹脂であるポリプロピレンと添加剤の流動特性の差が影響していることが判明した。そこで、カーボンブラックの添加、流動性が高い樹脂グレードへの変更、表面の樹脂スリップを抑制させる添加剤の追加、流動性を高める成形条件の最適化を図り、外観品質を改善させた。また、ベース樹脂の変更に伴い、熱収縮率の差による断面形状変化も軽微ながら発生し、設計仕様を見直すなどの対策も講じた。リサイクル炭素繊維の適用に際しては、リサイクル炭素繊維による影響だけではなく、ベース樹脂の特性や成形条件などの他の要因についても留意しておく必要がある。



図7 リサイクル炭素繊維を用いた射出成形部品の外観品質

4.4 振り返り

リサイクル炭素繊維を適用する場合の技術課題と、その対策方法について述べた。適用製品によってはバージン炭素繊維から単純に置換えできる場合もあるが、今回の事例のように、様々な工夫が必要な場合もある。しかし、強度低下は繊維含有率増大で補完可能であり、外観品質は、樹脂及び成形条件の最適化により改善できる。また、これらの対策を行った場合でも、バージン炭素繊維に対して、明確な価格優位性を維持できることが確認できた。持続可能性を意識したモノづくりの機運は年々高まっているが、一方で、コスト悪化を許容できないケースも多々存在する。検討に着手してから市場導入に至るまで約2年半の検証期間を要したが、持続可能性と経済性を両立した一例として参考になれば幸いである。

5. まとめ

今回の活動を振り返ると、経済産業省中部経済産業局の協力の下、廃材発生元、リサイクルパートナー、樹脂メーカー、エンドユーザーの全ステークホルダーが開発の初期段階から要求仕様・コストターゲットを共有し、サプライチェーンの全体最適化の視点でターゲットに向けて連携できた事が成功要因だったと考えられる。特に、リサイクル炭素繊維の課題である信頼性や品質安定性については、当社の航空宇宙分野で培ったノウハウを基に、廃材品質を一定程度保証すると共に、リサイクル炭素繊維の品質やコストターゲットについては、民生品での知見を活かした独自の品質管理要求を設定することで、一貫した品質と低価格を提供することができた。サプライチェーン内で、それぞれのステークホルダーの特徴を生かした役割分担ができた良い事例だと言える。

本活動は当社お客様であるBoeing社からも評価され、Sustainability Forum 2022にも展示された(図8)。また、三菱電機では適用拡大を進めており、現行の成形金型をそのまま利用することで追加の初期投資なく、キャニスタータイプの掃除機の製品本体下ケース部への実装にも成功している(図9)。しかしながら、航空機製造に伴う廃材発生量に対して、リサイクル炭素繊維の製品

化への使用量は少なく、また、樹脂メーカーが求める必要バッチ量に達していない課題も残っている。今回の製品化をきっかけに、引き続き、リサイクル炭素繊維の市場拡大を目指し、持続可能な社会に向けて貢献していきたい。

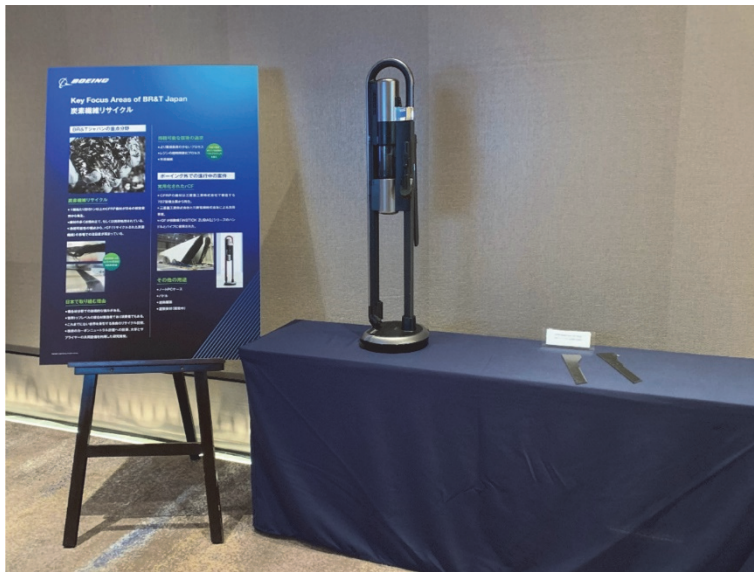


図8 Sustainability Forum 2022 の展示



図9 三菱電機製掃除機(家庭用)“TC-GS2E5”

参考文献

- (1) 金升将征ほか, 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, 三菱重工技報, Vol. 55 No.2 (2018)
- (2) 相馬公義, 航空機工程廃材から炭素繊維のリサイクルと家電製品への活用, 月刊 環境管理 2023 年 9 月号 Vol.59 No.9
- (3) 中部経済産業局 兆しレポート(第 2 回)
https://www.chubu.meti.go.jp/a32kikaku/kizashi/20220714/kizashi_report2.pdf