

2021年3月31日

報告書

実施期間 2020年9月3日～2021年3月31日

CFRP の Car to Car リサイクルチェーン 構築に 向けた実証実験 Phase3

デロイト トーマツ コンサルティング合同会社

屋代敏之、五十嵐 久二

日産自動車株式会社 材料技術部

美藤洋平、端野直輝、森直樹

概要

名称

CFRP の Car to Car リサイクルチェーン構築に向けた実証実験 Phase3

実施期間

2020年9月3日～2021年3月31日

開発/調査 代表者

デロイト トーマツ コンサルティング合同会社 五十嵐 久二

実施者

デロイト トーマツ コンサルティング合同会社 屋代 敏之、五十嵐 久二
日産自動車株式会社 材料技術部 美藤洋平、端野直輝、森直樹

目的

車体軽量化を目的として CFRP の採用拡大が予測され、将来的に ASR 量の増加が懸念される。ASR 量削減と付加価値の高い素材の活用のため、CFRP のマテリアルリサイクル技術の評価、実証を実施する。

実施内容

リサイクル CF の活用や量産化に向け、CF 取り出しからアプリケーションまでの一気通貫の検証を実証した。

成果

CF 取り出しからアプリケーションまでの一気通貫の検証”は完遂し、物性評価も実施した。物性評価結果から、今後のアプリケーション化・量産化に向けた課題解決への方向性を見出した。

本プロジェクトの概要

<本プロジェクトの目的>

- 現在、使用済み自動車における CFRP 廃材は量が限定的なこともあり、埋め立て処理がなされているものの、CFRP は軽量/高強度という特性により、2020 年代から自動車での採用が本格的に拡大すると見込まれている。そうなった場合、CFRP 廃材全てを埋め立て処理することは現実的ではないため、Car to Car リサイクルチェーンの確立は不可欠である。しかしながら、CFRP のリサイクルにおいては技術的・コスト的に課題が多く存在しており、量産対応ができていないのが現状である。このリサイクルチェーンには 5 つの必要工程(廃材選別、CF 取り出し、中間基材製造、部品成形、評価)が存在するが、各工程においてそれぞれ課題を抱えている上、工程ごとに個別に検討されているため、個別最適は進むものの、全体としての課題解決の進みが遅くなってしまっている。そのため、全工程を通した一貫通貫・全体最適の視点で課題解決策を検討することが必須となる。
- 上記状況の中、現在 CFRP のリサイクルチェーンに関する技術開発においては CFRP からの CF 取り出し技術がクローズアップされており、その他の工程に関する技術開発は少ない。加えて、CF 取り出し技術についても、各社がそれぞれの条件で実験・評価を行っており、客観的な特徴や優劣が把握できない状況である。
- そこで、2019 年度は「基礎的研究」において「リサイクル CF の劣化機構解明」と「CF と樹脂との密着機構」について解明し、リサイクル CF を使用した CFRP/CFRTP の特性も明らかになった。
また、リサイクル CF の活用においては量産化に高いハードルがあることも改めて明らかとなったことから、2020 年度は、それを解決する形態/手法として「リサイクル C の燃糸加工」「燃糸を原材料とした SMC*加工・成形」の実証実験を行う。
(*Sheet Molding Compound:炭素繊維強化プラスチック(CFRP)の中間基材の一種で、長さ数 cm にカットした炭素繊維を樹脂中に分散させたシート状の材料)
- そこで本プロジェクトでは以下3つを実施する。
 1. SMC 製造に適した燃糸の要件見極め
 2. 量産工程に使用できる燃糸の製作可否
 3. 既存の量産技術(その一つとして SMC)への適用の可否のための評価。既存設備による実証実験

<実施体制>

- 本 PJ では日産自動車をオーナーとし、「SMC 製造に適した燃糸の要件の見極めと量産工程に使用できる燃糸の製作」を守富総合環境工学研究所、「既存の量産技術への適用の可否の為の評価と既存設備による実証実験」を三菱ケミカル社が実施する体制とした。

<2020 年度の実施内容>

- SMC 製造に適した燃糸の要件の見極めと量産工程に使用できる燃糸の作製
 - SMC 製造に適した燃糸要件の見極め

- ✓ 撚り本数、撚りピッチ、繋ぎ方の異なる、計 7 種のプロトタイプ撚糸を作製し、カットテストを行い SMC 加工設備への給糸に適した撚糸の要件を見極めた。
 - 撚り本数は 1 本と 2 本のタイプ
 - 撚りピッチは 20mm/r、40mm/r、60mm/r の 3 タイプ
 - 繋ぎ方は溶融ナイロン、エマルジョン、養生テープ、エア交絡の 4 タイプ
 - カットテストは一般的な SMC 設備の仕様にもとづくロータリーカッターを使用して実施した。SMC 用のロータリーカッター(一定時間運転)にて長さ 1 インチにカット可能かどうかテストした。
- 量産工程に使用できる撚糸の作製
 - ✓ 4 工程を経て撚糸を作製した。
 1. 剥がし・シゴキ工程
 2. 接合工程
 3. 開繊カット工程
 4. 巻取工程
- 既存の量産技術への適用の可否の為の評価と既存設備による実証実験
 - SMC 加工・成形
 - ✓ 量産工程用の撚糸を原材料に既存量産設備で SMC 加工・成形工程が実行できるか検証
 - 物性評価
 - ✓ 本実験で作成した SMC テストピースの物性を SMC 市販品と比較
 - 引張試験
 - 曲げ試験
 - 超音波探傷試験

<実験スケジュール>

- 本実験は 2020 年 9 月～2021 年 3 月の約 7 ヶ月で実施した。

<実証実験の結果と考察>

- SMC 製造に適した撚糸の要件の見極めと量産工程に使用できる撚糸の作製
 - SMC 製造に適した撚糸の要件
 - ✓ カットテストの結果、撚り本数=1 本、接合方法=溶融ナイロン、撚りピッチ=40mm/r のタイプではカットミスが発生せず、SMC 製造に適した撚糸の要件と特定

図 I カットテスト結果(サマリー)

No.	撚り本数	接合手段	ピッチ [mm/r]	接合部での破断	ミスカット数	考察
1	2	熔融ナイロン	40	なし	8	最も扱いやすい。 60mm/rとのミスカット数の差は誤差範囲。
2	2	エマルジョン	40	なし	43	同じピッチ40mm/rでは最もミスカットが多い。接合部分が他よりも硬く厚いためか。
3	2	養生テープ	40	なし	10	テープ部も基本的には切れるが、カッターへの貼り付き発生。貼り付いた糸の再切断による短繊維を確認。
4	2	熔融ナイロン	20	なし	261	径が太すぎるためミスカット数が桁違いに多く使用不可。
5	2	熔融ナイロン	60	なし	11	最も扱いやすい。40mm/rと大差なし。連続使用にも適している。
6	1	熔融ナイロン	40	なし	0	1本撚りのため扱いやすくミスカットもなかった。生産効率が悪くなければ本条件がベスト。
7	1	エア交絡	37	なし	1	ミスカットは少ないが、接合部のトウ形態が乱れている。生産効率も低い。

図 II カットテスト結果(撚糸タイプ No.6)



- 量産工程に使用できる燃糸の作製
 - ✓ カットテストにて特定された燃糸要件のポビン巻き燃糸を 50 本作製
 - ✓ 一本当たりの重量は約 600g

図 III 量産工程用のポビン巻き燃糸 50 本



■ 既存の量産技術への適用の可否の為の評価と既存設備による実証実験と製品評価

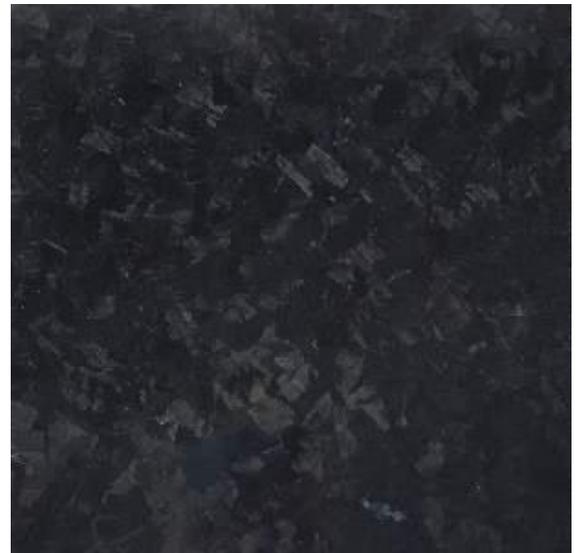
- SMC 加工・成形工程

- ✓ 作製された 50 本の燃糸を三菱ケミカルの既存 SMC 加工設備に設置し、市販品と同じ樹脂を用いて SMC 加工を実施することができ、プレス成形により厚さ 2mm、300mm 角の平板を作製できた。
- ✓ SMC 市販品と比較した際の特徴：SMC 及び成形した平板の外観としては、バージン CF を使用した市販品よりも CF チョップが明瞭に判別可能であった。リサイクル燃糸は炭化物残渣により繊維同士が拘束されているため、樹脂含浸に伴う繊維間の広がりや変形が抑制されたためと考えられる。
- ✓ 使用したリサイクル燃糸は、接合部や短冊の太さのばらつきのため張力の掛かり方が不均一となり、供給中に破断しないよう張力を制御する等の条件調整が必要であった。
- ✓ 条件調整により、連続加工が可能にはなったが、バージン CF との違い(CF 接合部、ササクレ、毛羽立ち)に起因して CF の破断が発生することもあり、バージン CF と同様の安定的な連続加工は困難であった。
- ✓ 上記状況の改善のためには、より長いリサイクル繊維を使用することによる接合頻度の低減や、接合方法の変更(エア交絡等)による取扱性の改善、繊維収束剤の付与によるササクレや毛羽立ち低減による工程通過性の改善等の対策が考えられる。

図 IV リサイクル燃糸 SMC



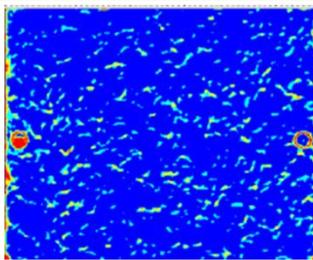
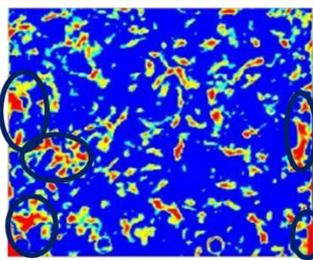
図 V リサイクル燃糸 SMC 成形板



－ 物性評価

- ✓ 本実験で作成した SMC テストピースの物性を SMC 市販品と比較した。

表 1 物性評価結果一覧

	SMC市販品	リサイクル燃系SMC	
超音波探傷画像			より大きな不健全部（内部の空隙や外観不良部）が分布していることを確認
引張強度 [MPa]	143 (4%)	52 (28%)	36%
引張弾性率[GPa]	27 (6%)	弾性変形区間がごくわずかであり引張弾性率の算出はできなかった	
3点曲げ強度[MPa]	344 (11%)	208 (17%)	60%
3点曲げ弾性率[GPa]	27 (12%)	24 (11%)	90%

*丸括弧内はn=6測定での変動係数値

リサイクル燃系 SMC は SMC 市販品対比で引張強度が 36%、3 点曲げ強度が同 60%、3 点曲げ弾性率が同 90% であった。リサイクル燃系 SMC は引張試験における弾性変形区間がごくわずかであり引張弾性率の算出はできなかった。リサイクル燃系 SMC 成形板の超音波探傷画像から、SMC 市販品成形板に比べて、より大きな不健全部（内部の空隙や外観不良部）が分布していることが確認できる。

実証実験結果を踏まえた CFRP の引張強度特性の改善は「接合方法」と「残留炭素除去方法」にあり、前者は接着剤を使用しないエア交絡や燃系接合、後者はシゴキ方法や燃系焼成などにより改善できると考えている。

<今後に向けて>

- 実証実験 3 年目である 2020 年度では、リサイクル CF の取り出し、撚糸加工、SMC 量産設備での SMC 加工・成形まで一気通貫で実施する検証ができた。
- 完成した SMC テストピースの物性はバージン材の SMC 市販品と比較すると概して低かったが、その推定要因と解決策の見通しを立てることができた。
- 強度面の課題解決の方向性としては、SMC 加工工程での安定した連続生産に適した撚糸(繊維束の太さ、接合方法、撚糸にするリサイクル繊維の長さ)を安定的に製造することが必要であり、撚糸加工工程の自動化が望ましい。
- CFRP の Car to Car リサイクルチェーンの社会実装に向けては上記の課題を解決する目処をつける必要があり、リサイクル CF の「扱いやすい形態」を今後検討する必要があると考えている。

図 VI 安定した量産に向けた課題の推定要因と解決策の見通し

	安定した量産に向けた課題	課題解決の見通し	
撚糸加工工程における課題と解決の方向性	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 手作業が多い為、工数が膨れたり、完成した撚糸の品質の一貫性に欠ける 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 工程の大規模な自動化 <ul style="list-style-type: none"> ・ シゴキ過程 — ダブルローラー機 ・ 接合工程 — エア交絡又は三つ編み接合の量産自動化 ↑改善効果が最も高いと考えられる ・ 開繊カット工程 — 自動開繊カット機 ・ 撚り工程 — 撚り機 	撚糸加工工程改善
SMC加工・成形における課題と解決の方向性	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 連続加工中、撚糸の状態を見ながら、常に給糸速度、テンションの調整が求められる 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ より長いリサイクル繊維系を使用することによる接合頻度の低減 ➢ 接合方法の変更(エア交絡等)による取扱性の改善 ➢ 繊維収束剤の付与によるササクレや毛羽立ち低減による工程通過性の改善 	撚糸の改善(要件の見直し)
物性(強度)面における課題と解決の方向性	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 残渣(残留炭素や溶融ナイロン)が原因でバージンと比較すると強度が劣る 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ より長いリサイクル繊維系を用いて接合部を減らしたり、エア交絡のような接合方法を採用することによる接合部の残渣量の低減 ➢ 焼成条件の最適化や水中開繊の強化などによる残渣量の低減 ➢ CFの束をより軽く、より細くする(概ね20%以上) 	

以上

<目次>

1. 背景と目的	P1
1.1 背景とこれまでの検討結果	P1
1.2 本実証実験の目的と2020年度の位置づけ	P2
2. 2020年度における実証実験	
2.1 実施体制	P2
2.2 実証実験概略	P2
2.2.1 2020年度の実証実験全体像	P2
2.2.2 実験スケジュール全体像	P3
2.3 実証実験詳細	
2.3.1 SMC製造に適した燃系の要件の見極めと量産工程に使用できる燃系の作製	P4
2.3.1.1 SMC製造に適した燃系の要件	P4
2.3.1.1.1 実験試料	P4
2.3.1.1.2 実験方法	P4
2.3.1.1.3 結果と考察	P6
2.3.1.2 量産工程に使用できる燃系の作製	P12
2.3.1.1.1 実験試料	P12
2.3.1.1.2 実験方法	P12
2.3.1.1.3 結果と考察	P20
2.3.2 既存の量産技術への適用の可否の為/既存設備による実証実験と製品評価	P22
2.3.2.1 SMC加工・成形	P22
2.3.2.1.1 実験試料	P22
2.3.2.1.2 実験方法	P22
2.3.2.1.3 結果と考察	P22
2.3.1.2 物性評価	P23
2.3.2.1.1 実験試料	P23
2.3.2.1.2 実験方法	P23
2.3.2.1.3 結果と考察	P24
3. 今後に向けて	P25

1. 背景と目的

1.1 背景とこれまでの検討結果

CFRP は自動車における従来材料の鉄などに比べて軽量・高強度であることから、2020 年代には自動車への本格的な採用拡大が期待されている。図 1 に示すように、現状、使用済み自動車における CFRP 廃棄量は限定的であるため、埋め立て処理がなされている。しかし、自動車への採用が本格化する将来においては、CFRP の Car to Car リサイクルチェーンの確立が必須である。

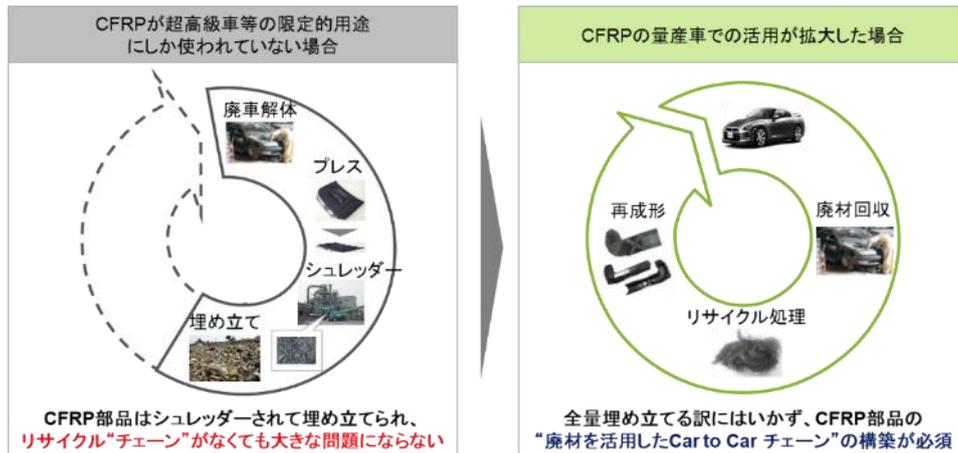


図 1 自動車への本格的な CFRP 採用が進んだ際に必要なリサイクルチェーン

2017 年度の調査により、このリサイクルチェーン構築には、①廃材選別技術・②CF 取り出し技術・③中間基材製造技術・④成形技術・⑤評価技術の 5 つが必要であり、それぞれ課題があることが分かった。これらの課題解決に向けては各工程・各社が個別に検討するものではなく、全工程を通した全体最適の視点で解決策を検討することが重要である。よって、CFRP の Car to Car リサイクルチェーン構築を目的として、全工程のプレイヤーを集めたコンソーシアム体制を構築し、下記の通り目標を短期・中期・長期の 3 つに分けて実証実験を行うこととなった。

① 短期目標(2018 年度)

2018 年度は CF 取り出し技術に焦点を当て、2017 年度の調査で有望技術候補と評価した 4 技術のうち、2 段階熱分解法、過熱水蒸気法、電解酸化法の 3 技術について同一条件でリサイクル CF 単体の評価を行い、各技術の長所・課題・開発の方向性を明らかにする。

② 中期目標(2019 年度)

2 段階熱分解法、過熱水蒸気法、電解酸化法にて取り出したリサイクル CF から CFRP および CFRTP のテストピースを作成して評価を行い、バージン CF との差異を明らかにする。また、CF 単体での評価も引き続き行い、リサイクル CF の劣化機構および CF と樹脂との密着機構の解明も併せて行う。

③ 長期目標(2020 年度～)

リサイクル CF を用いて実際の自動車部品を成形して評価を行い、リサイクル CF によるバージン CF 代替の可能性を検討する。

1.2 本実証実験の目的と2020年度の位置づけ

1年目である2018年度の実証実験では、3つの取り出し技術それぞれの特徴が見えてきたものの、特にリサイクルCFと樹脂との密着性の発現機構については未だ明らかになっていない部分が多い状態であった。よって、実証実験2年目である2019年度では、「基礎的研究」において「リサイクルCFの劣化機構解明」と「CFと樹脂との密着機構」について解明し、リサイクルCFを使用したCFRP/CFRTPの特性も明らかになった。また、リサイクルCFの活用においては量産化に高いハードルがあることも改めて明らかとなったことから、2020年度は、それを解決する形態/手法として「リサイクルCFの燃糸加工」「燃糸を原材料としたSMC*加工・成形」の実証実験を行う。

(*SMC=Sheet Molding Compound: 炭素繊維強化プラスチック(CFRP)の中間基材の一種で、長さ数cmにカットした炭素繊維を樹脂中に分散させたシート状の材料)

2. 2020年度における実証実験

2.1 実施体制

図2に示すように、日産自動車をオーナーとして弊社デロイトトーマツコンサルティング(以下、DTCと表す)が各種パートナー企業との間に入り、進捗管理等を行った。三菱ケミカルには「リサイクル源調達」、「SMC加工・成形」、「物性評価」を再委託し、「燃糸加工」は守富環境工学総合研究所に再委託した。またCFRPからのCF取り出しについては、リサイクル源となるCFRPを2019年度の実証実験のパートナー企業であったカーボンファイバーリサイクル工業(以下、CFRIと表す)に支給し、リサイクルCFを購入するという形を取った。

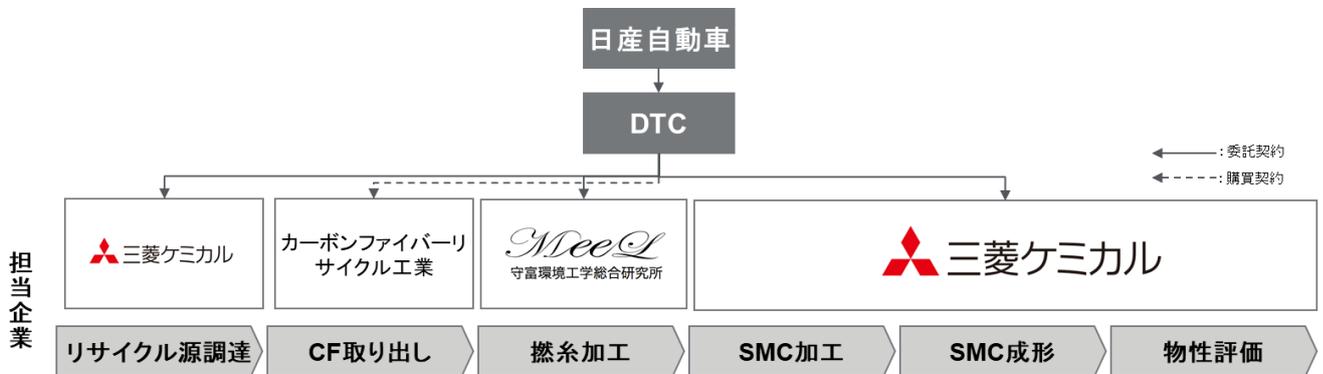


図2 2020年度の実証実験の推進体制

2.2 実証実験の概略

2.2.1 2020年度の実証実験全体像

2020年度の実証実験では、2019年度の実証実験でリサイクルCFの活用においては量産化に高いハードルがあることが明らかとなったことから、それを解決する形態/手法として「リサイクルCFの燃糸加工」「既存の量産設備によるSMC加工・成形」の実証実験を行った。

2020年度実証実験における実施事項



図3 本実証実験の進め方概念図

2.2.2 実験スケジュール

一連の実験を図4に示すスケジュールにて実施した。



図4 実験スケジュール

2.3 実証実験詳細

2.3.1 SMC 製造に適した燃糸の要件の見極めと量産工程に使用できる燃糸の作製

2.3.1.1 SMC 製造に適した燃糸の要件

2.3.1.1.1 実験試料

実験に使用する CF は三菱ケミカル社製の日産 GT-R のトランクリッドと同じ UD プリプレグを使用し、同じ積層(5層、0/90/90/90/0)の50cm 角の平板。CF の基本特性を表 1 に示し、外観写真を図 5 に示す。

実験においては量産工程用の燃糸分も含め CF 重量 200kg 分、計 640 枚の板を使用。

表 1 実験に使用した CF の基本特性

メーカー	品番	フィラメント	引張強度 /MPa	引張弾性率 /GPa	伸び /%	織度 /g・1000m ⁻¹	密度 /g・cm ⁻³	繊維径 /μm
三菱 ケミカル	TR 50S15L	15,000	4,900	240	2.0	1,000	1.82	7

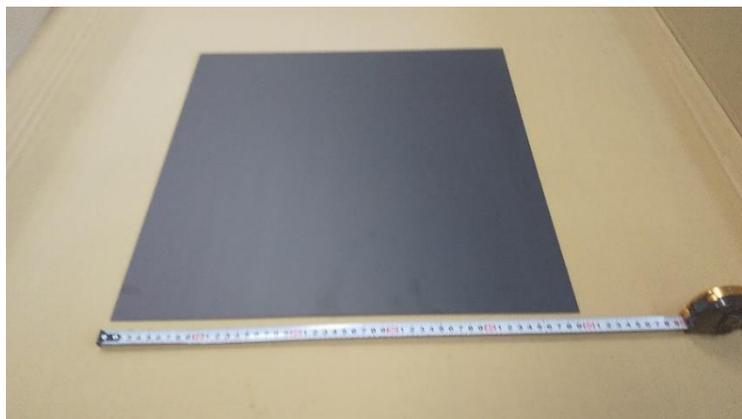


図 5 実験に使用し CF 板の外観写真

2.3.1.1.2 実験方法

リサイクル CF の取り出しは、CFRI 社の二段階熱処理法によりリサイクル CF を取り出すことを予定していた。当初は、CFRP 廃材を二段階熱処理(一次炭化と二次焼成)、あるいは一次炭化した CFRP 廃材から図 6 のようにスライバーを作製し、燃糸化する予定であったが、スライバーから燃糸するための精紡装置の入手が困難なことに加えて、精紡及び燃糸工程は開発途上のため、量産の不確実性から燃糸作製法を別途検討することとした。そもそもスライバーを経由するということは、軟織や開織工程で脱樹脂化した CFRP 廃材は軟織・開織工程で痛めつけられ、長さは維持できたとしても、炭素繊維の折損や劣化は著しいこと、かつ一定幅の目付(g/m)を確保することは困難なことが予想される。炭素繊維の特性を維持したまま、バージン CF の形状に近づけるためには、CFRP 廃材を短冊にカットして、直接燃糸にし、かつ SMC 成形用のバージンと同じボビンに巻き取るほうが適切と判断し、すでに守富環境工学研究所(MEEL)にて開発されていた「製縄機(燃糸機)」を改造して燃糸化することとした。

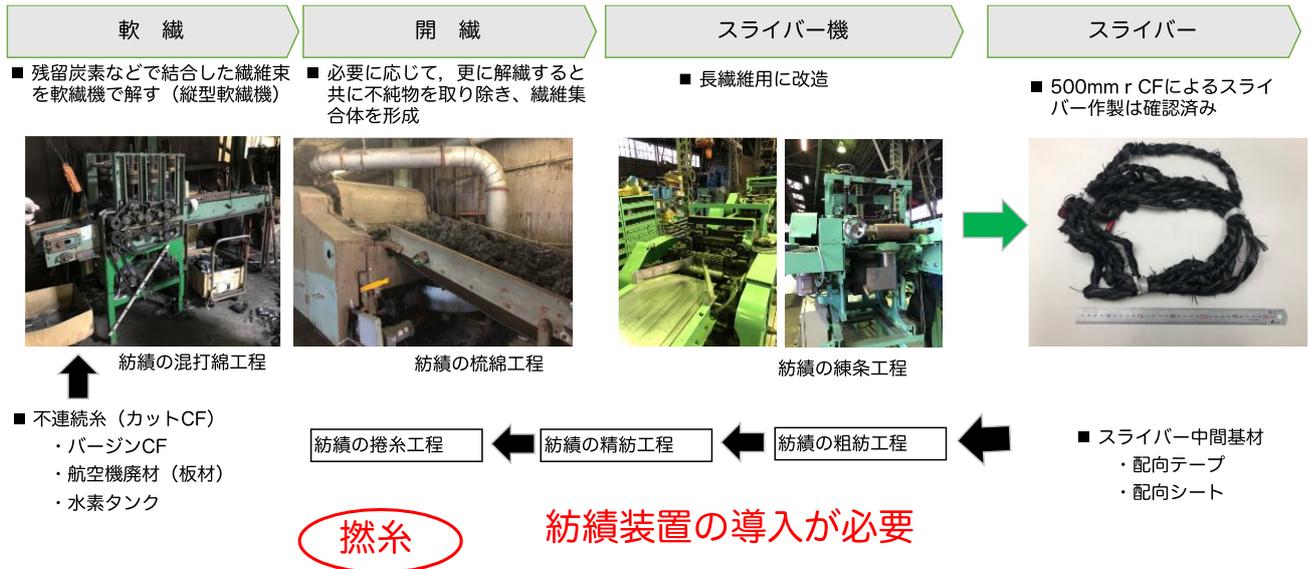


図 6 スライバー製作工程

プロジェクト開始前に予備検討した結果、CFRP がレギュラートウ（繊維束）から構成されていることを想定すると、バージン CF のトウでの燃糸工程は約 5mm 幅の2本燃りが可能なこと、燃糸工程の前の CFRP 廃材の軟織・開織および短冊カットについては、別途入手した各種 CFRP 板材をカットして、バージン CF トウに近づけるには一次炭化 CF に残留する炭素を除去した 5mm 幅の繊維束の短冊とすることが必須であることが確認された。また、通常の製縄機では稲藁を供給するがごとく、5mm 幅 x 50cm 長の繊維束（不連続系）を手動で連続供給しても、炭素繊維の場合には剛直であり、端面がリバウンドして燃えることは難しいため、端面を接合して、一時的に擬似連続化する必要があることも確認された。

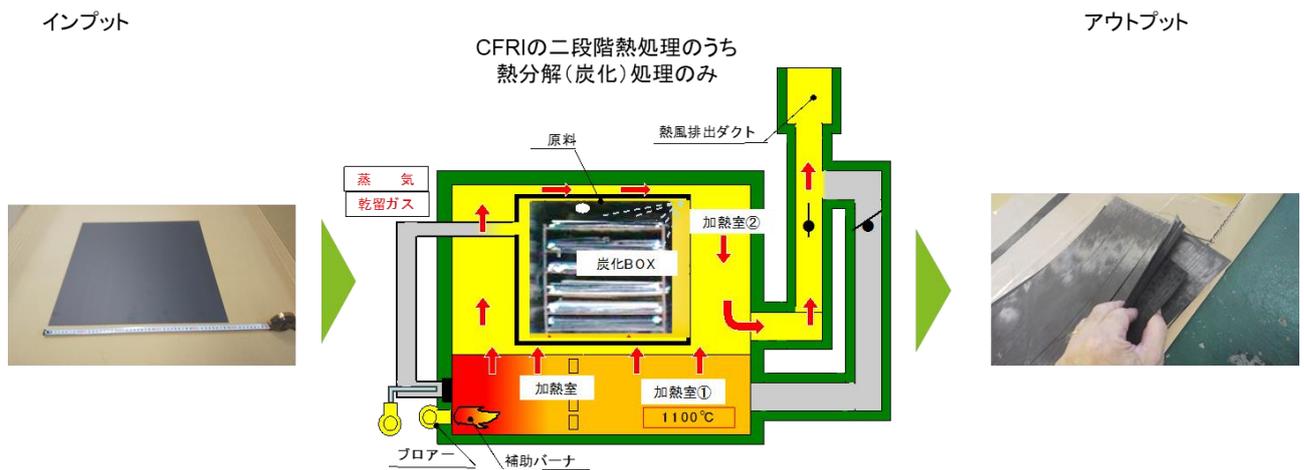


図 7 リサイクル CF 取り出しイメージ

残留炭素を極力除去するためには、二段階熱処理工程で二次焼成まで処理することが望まれるが、5mm 幅の繊維束の短冊を作製するには、繊維が“ふわふわ”過ぎる二次焼成品では、繊維長を活かす直線カット及び短冊作製が困難なことから一次炭化品を使用することとした。そのため、別途残留炭素除去工程が必要とな

った。

プロジェクトで使用する CFRP 廃材(5枚積層600枚)を想定した炭化処理後の 50cm 角板(5枚積層1枚)を予備試験板および別途入手した各種 CFRP 板材を用いて、短冊作製のためのカット、開織、残留炭素除去、接合工程を検討した結果、2案が提案された。

- A) 5cm 幅短冊カット → 5mm 幅短冊カット → 開織・残留炭素除去 → 接合 → 燃糸巻取
- B) 5cm 幅短冊カット → 開織・残留炭素除去 → 接合 → 5mm 幅短冊カット → 燃糸巻取

A 案は開織・残留炭素除去も 5mm 幅短冊の接合もしやすいが、5枚積層の 50cm 角板 600 枚から 5mm 幅短冊を切り出すと 30 万本を接合することになり、時間制約から困難と判断した。量産のためのエア交絡自動化に加えて、想定したエア交絡法はバージン CF では接合可能だが、リサイクル CF では歩留まりが 3 割以下と低く、A 案は副案とした。それに対し、B 案は 1/10 の 3 万本処理であり、端面が 5cm 幅であり、処理しやすい。しかしながら接合強度が強いと連続化した 5mm 幅のテープ状繊維束に直線カットすることが難しくなる欠点を有する。各種工程構成を検討した結果、全工程時間の短い B 案を第一候補とし、少量のプロトタイプ燃糸では A 案を採用することとした。

プロトタイプ燃糸試験では、SMC 製造に適した燃糸の要件を見極める為、燃り本数、燃りピッチ、繋ぎ方(接合方法)の異なる、計 7 種のプロトタイプ燃糸を作成し、カットテストを行い SMC 加工設備への給糸に適した燃糸の要件を見極めた。燃糸の加工工程は次章「2.3.2.2 量産工程に使用できる燃糸の作製」にて詳細を記載。まずは基本タイプの燃糸を作製し、外観、簡単な給糸テストを行った上で、望ましいと思われる燃糸要件を検討した結果、以下のパターンの組み合わせで計 7 タイプのプロトタイプを作製した。

- 燃り本数は 1 本と 2 本のタイプ
- 燃りピッチは 20mm/r、40mm/r、60mm/r の 3 タイプ
- 繋ぎ方は熔融ナイロン、エマルジョン、養生テープ、エア交絡の 4 タイプ

どのタイプの燃糸が SMC 加工・成形工程での適用に望ましいかの判断においては、カットテストで検証を行った。SMC 加工工程で使用するには、作製した燃糸が SMC 用のロータリーカッターでカットした際に、カットミスが発生しないことが条件となる。

2.3.1.1.3 結果と考察

カットテストは一般的な SMC 設備の仕様にもとづくロータリーカッターを使用して実施した。SMC 用のロータリーカッター(一定時間運転)にて長さ 1 インチにカット可能かどうかテストした。

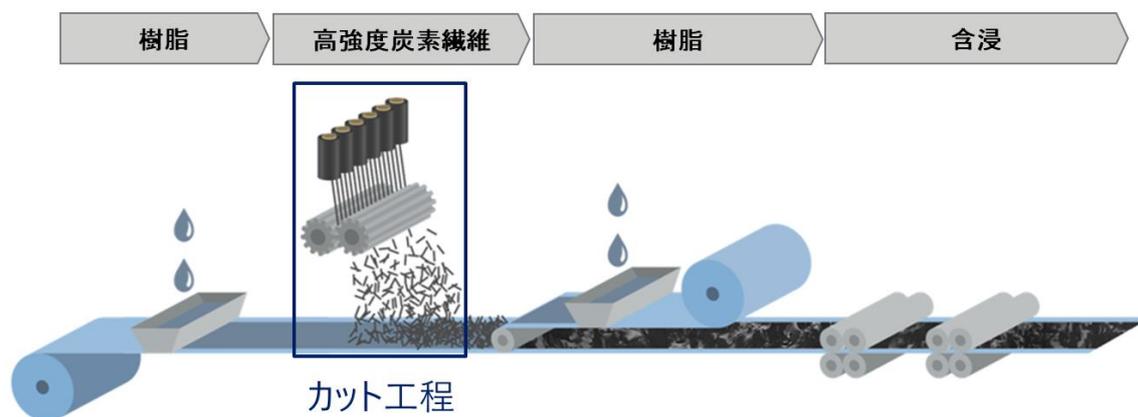


図 8 SMC 製造工程の概要とカット工程

燃系の要件(撚り本数、撚りピッチ、繋ぎ方)とカットテストの結果一覧は下表のとおり。今回のリサイクル CF の燃系サンプルは、バージン CF に比べて剛直な性状であった。撚り工程の生産性が高い 2 本撚りの場合、1 本撚りに比べ、ミスカットが多い傾向が見られた。特に、撚りピッチを小さくし、撚り数を増やした場合にミスカットが多発した。これは、剛直性により燃系が太くなってしまうことが原因と考えられる。

繋ぎ方に関しては、いずれの方法、いずれの撚りピッチでも接合部での破断は見られず、SMC 加工工程や CF 供給部での懸念はないと判断できた。また、剛直性によりカット直後に撚りが解けるため、カット後の CF トウは巻き癖も残らず良好な状態であった。

以上の結果より、ミスカットの発生を抑える観点から、1 本撚り、撚りピッチの大きな条件で、異物の混入を抑えること、また、作業性の観点から熔融ナイロンにより接合した No.6 が SMC 製造に適した燃系の要件を満たすと判断し、この要件の燃系を量産することとした。

表 2 カットテスト結果一覧

No.	撚り本数	接合手段	ピッチ [mm/r]	接合部での破断	ミスカット数	考察
1	2	溶融ナイロン	40	なし	8	最も扱いやすい。 60mm/rとのミスカット数の差は誤差範囲。
2	2	エマルジョン	40	なし	43	同じピッチ40mm/rでは最もミスカットが多い。接合部分が他よりも硬く厚いためか。
3	2	養生テープ	40	なし	10	テープ部も基本的には切れるが、カッターへの貼り付き発生。貼り付いた糸の再切断による短繊維を確認。
4	2	溶融ナイロン	20	なし	261	径が太すぎるためミスカット数が桁違いに多く使用不可。
5	2	溶融ナイロン	60	なし	11	最も扱いやすい。40mm/rと大差なし。連続使用にも適している。
6	1	溶融ナイロン	40	なし	0	1本撚りのため扱いやすくミスカットもなかった。生産効率が悪くなければ本条件がベスト。
7	1	エア交絡	37	なし	1	ミスカットは少ないが、接合部のトウ形態が乱れている。生産効率も低い。



図 9 カットテスト結果 撚糸タイプ No.1: 2 本撚り、溶融ナイロン接合、ピッチ 40mm/r



図 10 カットテスト結果 撚糸タイプ No.2: 2 本撚り、エマルジョン接合、ピッチ 40mm/r



図 11 カットテスト結果 撚糸タイプ No.3: 2 本撚り、養生テープ接合、ピッチ 40mm/r



図 12 カットテスト結果 燃糸タイプ No.4 :2 本撚り、熔融ナイロン接合、ピッチ 20mm/r



図 13 カットテスト結果 燃糸タイプ No.5: 2 本撚り、熔融ナイロン接合、ピッチ 60mm/r



図 14 カットテスト結果 撚糸タイプ No.6: 1 本撚り、熔融ナイロン接合、ピッチ 40mm/r

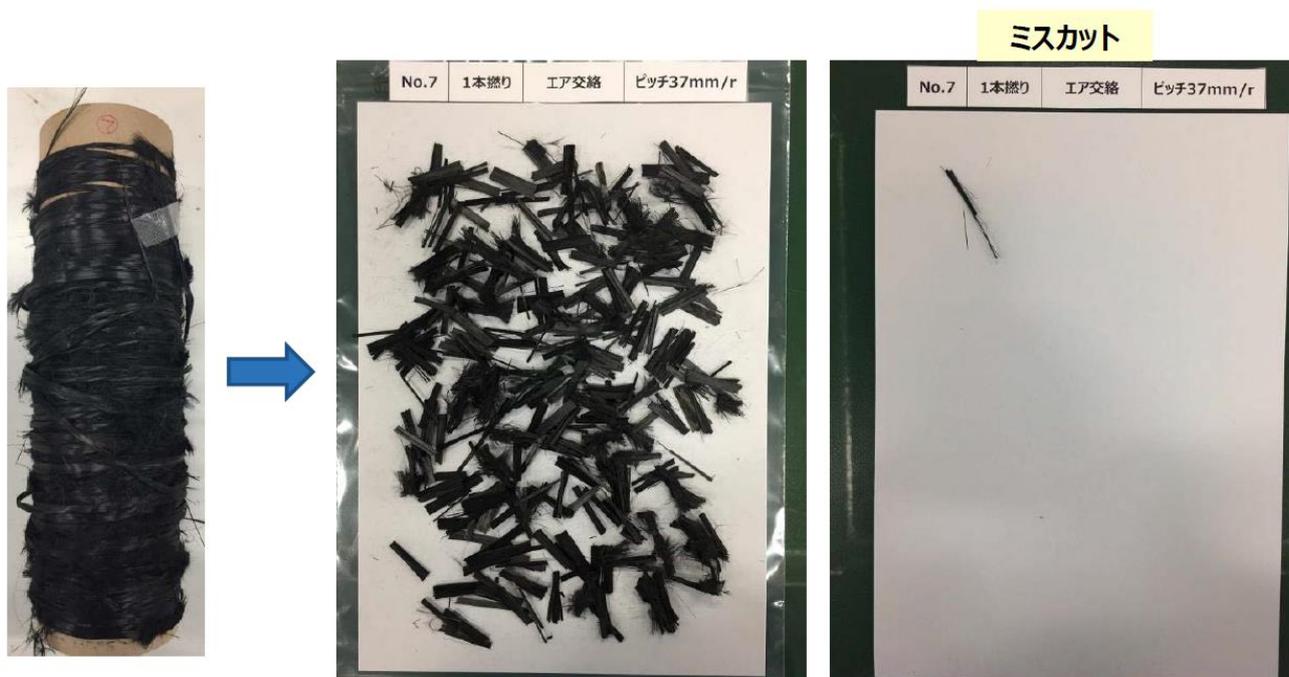


図 15 カットテスト結果 撚糸タイプ No.7: 1 本撚り、熔融ナイロン接合、ピッチ 40mm/r

2.3.1.2 量産工程に使用できる燃系の作製

2.3.1.2.1 実験試料

実験に使用するCFは2.3.1.1「SMC製造に適した燃系の要件見極め」で使用したCFと同じである。

2.3.1.2.2 実験方法

量産工程における燃系加工工程は、1.剥がし・シゴキ工程、2.接合工程、3.開織カット工程、4.巻取工程の4工程で行った。

工程1. 剥がし・シゴキ工程

CFRIで二段階熱処理のうち炭化処理のみ行った一次炭化品の50cm角(5枚積層)のCFRP廃材を各計5枚のシートに剥がす作業から開始した。入荷の際に残留炭素や折損炭素繊維が飛散することから、50cm角バット中に水漬けし、順次“剥がし”を行った。しかしながら、量産品の前に使用した50cm角板(5枚積層1枚)の予備試験板と異なり、5枚積層の中3枚積の層方向が同方向であり、手動では上下面は容易に剥がすことができるが、中3枚(アンコ)は各層の繊維が相互に入り込み、1枚1枚を剥がすことが困難な上、剥がせても厚みが一定せず、カット後の5cm幅短冊および5mm幅短冊の繊維本数(密度)が大幅に異なり、1本ずつの重量測定が必須となることから、最終的には積層の上下面のみを使用することとした。5mm幅短冊30万本を1分/本で測定するだけで5000時間要する。

剥がした50cm角シートを二つ折りカットし25cm幅×50cm長のシートとして、次に25cm幅×50cm長シートを木板に5cm等間隔に埋めたカッター刃を通して、5cm幅×50cm長の短冊を作製した。この段階では飛散する残留炭素は切断面だけであり、またある程度湿っているため1枚あたりの飛散量は少ないが、枚数が多いので、集塵機等で粉塵回収は必須である。

残留炭素除去のための空中開織及び水中開織方法については、5cm幅×50cm長の短冊を固定して動物用のスリッカーブラシで“梳く”、短冊が連続に接合されているのであれば、連続的にローラーあるいは丸棒に擦り付けることで残留炭素除去が可能であるが、“梳き”は折損が多くなること、接合による短冊の連続化による“擦り”は接合強度を上げざるを得ず、後の切断のバラツキが大きくなること、湿式では防水接合が求められることなどから、飛散防止の観点も含め水中での短冊による開織(シゴキ)とした。当初案(A案自動化)と採用案(B案手動)を下に示す。

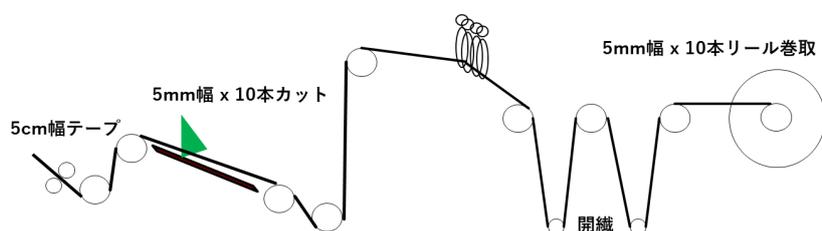


図16 当初案(5cm幅テープの5mm幅カットと開織)

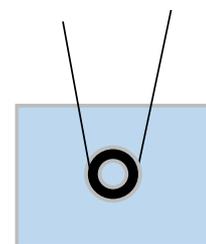
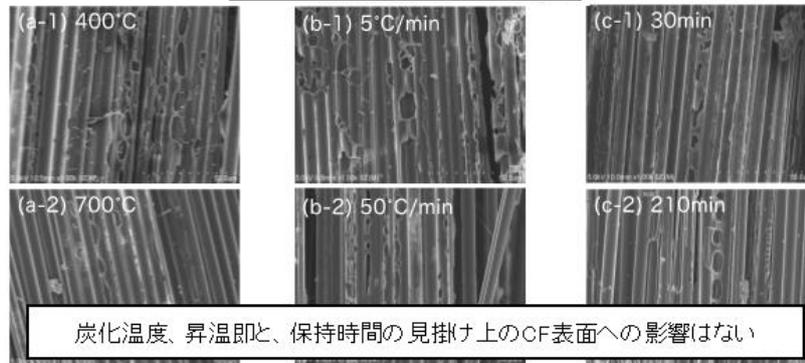


図17 採用案(シゴキ)

そもそも、残留炭素は炭素繊維表面に粉状に付着している。一次炭化品が硬いのは、図18の写真に見るように、クッキー(炭素繊維)表面にチョコレート(残留炭素)が固着している状態であり、残留炭素除去には“梳く”や“擦り”よりもチョコレート部分を“折る”ことが重要であり、折損を少なくし、残留炭素を除去するためには微妙

に“折る”必要があり、この段階では時間と労力がかかるが、5cm幅x50cm長の短冊の両端(耳:接合用に残す)をクランプではさみ、6mmφのステンレス丸棒を跨ぐようにして、手加減して”擦り折る”(シゴキ)方法を採用し、「人海戦術」とした。

CFRP炭化後のrCF表面



sEM pictures (x1000); (a-1) Carbonization 400°C, (a-2) Carbonization 700°C, (b-1) Heating 5.0°C/min, (b-2) Heating 50°C/min, (c-1) Holding 30°C, (c-2) Holding 210 min

残留炭素は、複数のCFを束ねるように存在

図 18 CFRP 炭化後のリサイクル CF 表面

1) 50cm角CFRP炭化品の5層剥がし

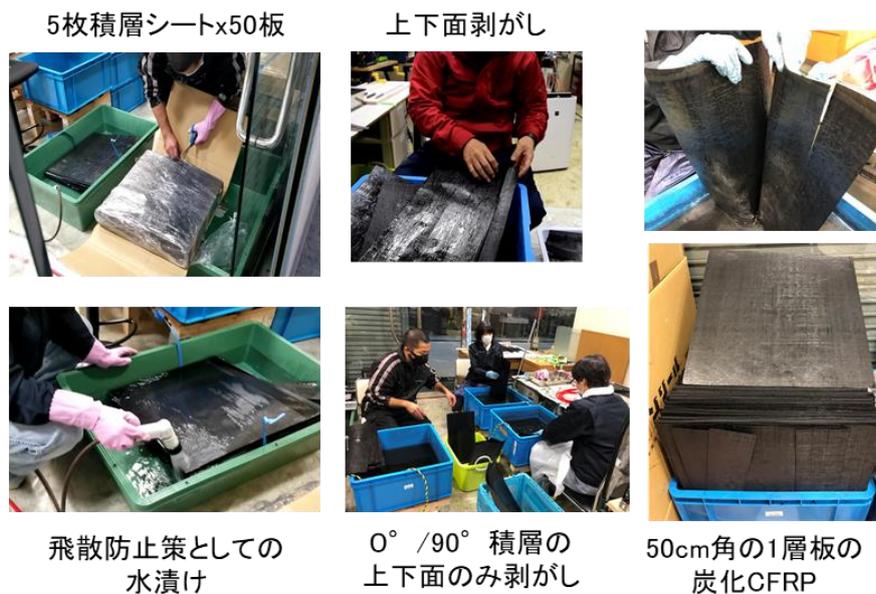
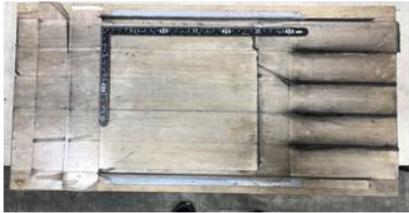


図 19 工程 1 剥がし・シゴキ工程実作業①



2) 5cm幅カット短冊



5cm幅短冊用
カッター



50cm角1層板を
25cm幅x50cm長にカット さらに
5cm幅x50cm長にカット



3) 水中開織(シゴキ)



人力開織



水中開織用バット



開織後乾燥

- 短冊一本につき人手で最低10往復(計5万本実施)
- 目的は開織と残留炭素の除去
- 約60~80wt%の残留炭素が除去され、後工程でも粉塵として飛散し、撚り工程では多分2,3wt%以下が残留と思われる
(バージン材と外観は変わらない)

図 20 工程 1 剥がし・シゴキ工程実作業②

工程 2. 接合工程

水中開繊(シゴキ)のため、シゴキ後の 5cm 幅x50cm 長の短冊を床置きで乾燥させてから、接合工程へと移行した。乾燥後の短冊からは表面に付着した残留炭素や折損繊維が飛散しやすく、集塵を徹底するため、集塵機(PM2.5 対応 48 畳空気清浄機他)を3台設置した。

接合は乾燥後の 5cm 幅x50cm 長の短冊を用いる。シゴキ工程で接合用の開繊せずに残した両耳(約 2cm 長)に熔融ナイロン(網目状アイロン両面接着テープ)を置き、加熱アイロンで接合し、連続化した短冊をテープとして 5cm 幅リール(ダンボール)に約 50m 巻き取った。このとき、以下の3点に注意した。

- 1) 5mm 幅カットのための配向維持
- 2) 熔融ナイロンの内側までの浸透
- 3) 接合のバラツキ要因となる毛羽立ち(ピンハネ)の抑制

各課題は、目視ではあるが繊維配向の確認、熔融ナイロンの形や置き方、アイロンの加熱温度と時間、急冷方法などに注意して1本毎に個別対応した。しかしながら、「人海戦術」上、老若男女により、加熱プレス圧、冷却プレス圧などに差があり、熔融ナイロンの内側までの浸透の差が、接合強度のバラツキとなり、5mm 幅カット工程でのバラツキに影響した。

また、5cm 幅リール(ダンボール)に約 50m の巻き取り時には、ある程度の引張張力(テンション)がかかるので、接合強度が弱いとこの段階で部分的に切れたり(剥がれる)、ズレたりするので、均一になるように極力補修をかけるようにした。この補修の有無が 5mm 幅カット工程や燃糸工程での追加補修となり、作業時間に大きく影響した。5cm 幅短冊 3 万本を 1 分/本で接合するとしても、500 時間を要し、1/10 の 5mm 幅短冊では 10 倍の時間となるので、5cm 幅短冊での補修が全体時間短縮には重要である。

なお、プロトタイプ燃糸の接合については、ボビン1段巻き(25m)で 5mm 幅 x 50cm 長短冊が 1 本燃りで 50 本、2 本燃りでも 100 本と本数も少なく、カットによるムラが抑制でき、エア交絡との比較が可能となることから、

- A) 5cm 幅短冊カット → 5mm 幅短冊カット → 開繊・残留炭素除去 → 接合 → 燃糸巻取
 B) 5cm 幅短冊カット → 開繊・残留炭素除去 → 接合 → 5mm 幅短冊カット → 燃糸巻取

A 案の 5mm 幅短冊での接合を採用した。接合方法としては、以下の 4 通りを試行することとした。

			長所	短所
物理接合	粘着性固体	養生テープ	容易、時短、量産可	カット残、不純物
化学接合	液体	エマルジョン	容易	乾燥時間、高価
	網目糸固体	熔融ナイロン	接合確実、少量	加熱、時長、浸透
機械接合	—	エア交絡	不純物無	接合不安定、短幅のみ

エア交絡には(株)グロッツ・ベッケルト ジャパンのニューマチック糸つなぎ器 Composite Air Splicer Airbond 701 と(株)マシンテックスのイタリアメスダン社製スプライサー MESDAN ジョイントエアー116G の2種類を試したが、両方ともバージン炭素繊維の接合は良好であるが、リサイクル CF では空気圧力や流通時間などの条件によっても異なり、接合率は 3 割以下であり、かつ接合部分はモフモフの毛羽立ちとなること、粉塵飛散が多いなど、作

業環境を整備する必要がある。この間、エア交絡装置(スプライサー本体)が高価なので、原理を見極め、自作の10連(5mm幅短冊を同時に10本処理)を試み、バージンCFでは可能と判断されたが、リサイクルCFでの接合率の低さは改善できず、開発時間の制約からエア交絡での量産化は断念した。ちなみに、出荷用燃糸のポピン巻は約500m(切断考慮、600g目標)、5mm幅×50cm長短冊の1本燃りで1000本を必要とすることから、1/10に時間の短縮が可能なB案とし、5cm幅×50cm長短冊の接合を採用した。

物理あるいは化学接合では、接着剤が残存することから、次の観点が重要となる。

- ・接着剤の残存量の抑制(不純物が少ない)
- ・カッター刃への付着にミスカットの抑制(残存粘着物の抑制)
- ・厚み方向への弱い接合は5mm幅短冊カットのバラツキ要因
- ・強固な接合は5mm幅短冊カットのバラツキ要因
- ・弱い接合は切れ、剥がれの要因

以上の観点とプロトタイプ燃糸のSMC向けカット試験結果から、熔融ナイロンによる接合を採用することとした。



図 21 工程 2 接合工程実作業

工程 3. 開織カット工程

5cm幅×50cm長短冊を接合し50mテープとして巻き取った5cm幅リールから、その5cm幅テープを5mm幅テープ(トウ)に開織カットするのが、次の工程である。

バージン炭素繊維のトウ及び別途試験的に作製したリサイクルCFテープ(不連続トウ)で開織カット工程を予備試験し、5cm幅テープカット後のテンションを掛けてローラーで横方向に拵げる開織方式はバージン系には適用可能であるが、不連続の接合テープではテンション調整が必要であることが確認できた。当然のことであるが、

バージン CF では糸強度が強く、巻取の引張強度に打ち勝つが、接着テープでは接合強度が巻取引張強度より弱ければ切れることになる。そのため、開織目的で巻取引張強度を上げることはできず、適度な巻取引張強度を維持する必要がある。このように当初は A 案をベースにしたカット後の開織（残留炭素除去）を重視したが、B 案の採用により、開織・残留炭素除去はカット前の水中開織（シゴキ）で主に行うことから、開織よりも安定したカットに重点を置いた。

5cm 幅テープを 5mm 幅テープにカットする方法として、手動と機械化の 2 種類で行った。

- 1) 板にカッター刃を埋め込み、手動で 5mm 幅にカットし、5mm 幅リールに巻き取る
- 2) 機械的に駆動式ロータリーカッターやローラーを經由して 5mm 幅リールに巻き取る

2) の機械化は自動化を目的としたものであり、検討した結果、耳の接合部分が不均一の場合には、カッターでのテープの歪みやピンハネにより、5cm 幅テープリールでの供給からカッターに至る間に片方向へ集束され、カットにバラツキが生じる。テープ自身はシゴキによりある程度は軟化しているが、バージントウに比べれば硬く、この硬さがカットを安定させるのであるが、接合部の繊維が斜めに交差したり、接合が甘いとピンハネがおこり、カッターを上にあるいは横隣に乗り越える要因となる。

1) の手動カットおよび巻取でも、接合部の繊維交差やピンハネ問題はあるものの、随時、手動で“その場対応”できるので、自動化時に生じる 10 本中の 1 本のピンハネによる停止、全量巻き戻し、接合し直し再開などの時間ロスは少なかった。後の撚りを含む巻取工程から課題としてフィードバックされたのは、5cm 幅テープを 10 本の 5mm 幅テープにカットするときに、接合のバラツキ（5cm 幅のバラツキを含む）、わずかの左右のズレ、あるいは人為的ミスから、左右両端が細くなる傾向があった。しかしながら、判断が難しいのは、500m テープで繋ぎ目（接合部）は 1000 箇所以上あり、500m 全領域で細くなるわけではなく、内側 8 本でも折損等により細くなる場合もあり、このカット工程で細い糸 1 本のために切り貼り補修をかけると、5mm 幅リール 10 本の巻取を止めることとなり、作業の効率化の観点から切り貼り補修は巻取工程あるいは巻取後に「巻き直し」（巻き直し）で補修をかけることとした。

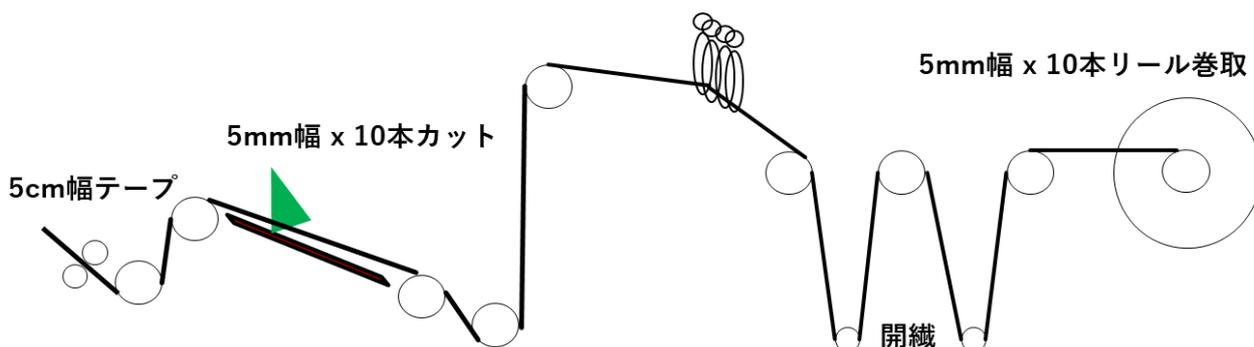


図 22 A 案のカット工程（カット後開織は試作済）



図 23 B 案のカット工程(手動開織後カットを採用)

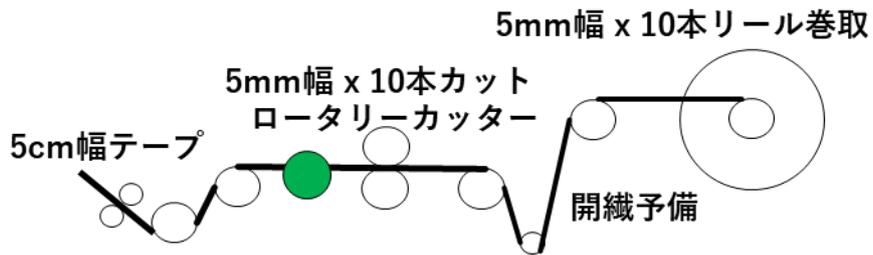


図 24 B 案のカット工程(自動開織カットを一部)

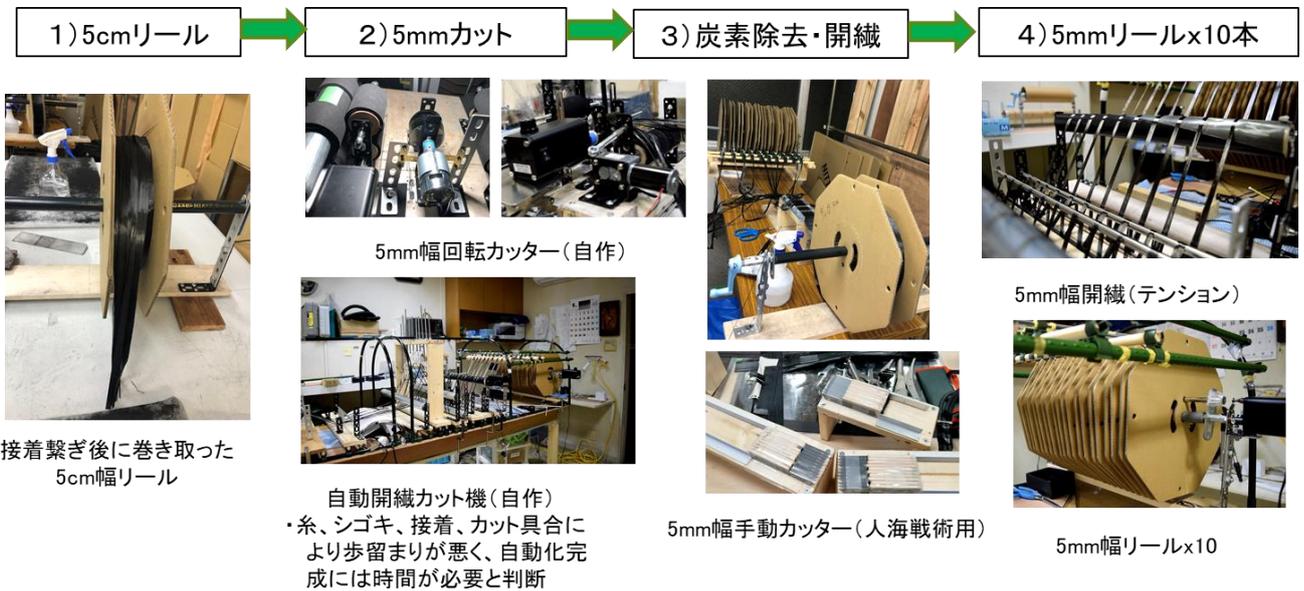


図 24 工程 3 開織カット工程実作業

工程 4. 巻取り工程

5mm 幅テープを巻き取ったリール 10 本のうち、2 本を用いて 2 本撚りするか、1 本だけで 1 本撚りをするかはプロトタイプ撚糸試験結果から、最もミスカットが少ない 1 本撚りとした。

SMC 用のボビンではバージン炭素繊維トウで目付が 1g/m であり、この条件に近づけるためには、5mm 幅テープ(目付 1.4g/m 前後)を 1 本撚りすることが望ましい。「製繩機」(撚糸機)の本来の目的は 5mm 幅短冊を直接撚りで接合させることである。一方、リサイクル CF が剛直であることから予備実験時に試した短冊供給では撚りが困難であった為、仮接合して連続糸として供給することとして準備を進めていた。準備段階では、撚りピッチ(1 撚り回転に対する長さ:mm/r)を短くして“撚り接合”の強度を上げ、接合は仮止め程度とすることを想定していたが、プロトタイプ撚糸試験前のバージン炭素繊維による撚糸での SMC 用カット試験で、撚りがかかると撚りが残存し、カット後の CF チョップにも捻れが残ることが確認され、極力撚りピッチを長くすることが望まれた。いわゆる“甘撚り”であり、製繩機本来の“撚り強化”による撚り接合の意味合いがなくなり、擬似連続化は熔融ナイロン接合強度重視となった。こうした理由およびプロトタイプ撚糸による SMC 用カット試験結果から 2 本撚りでの“撚り接合”する意味がなくなり、1 本撚りとした。撚ることの意義は毛羽立ちの抑制とボビン巻き時にフープ巻き(平行巻き)の場合に生じる繊維束の沈み込みの抑制にある。特に撚りが甘く、細い平糸が縦に沈み込むと巻き出し時に繊維束が引き出せずに切れるあるいは近傍の繊維束に絡む可能性がある。

甘撚りのピッチをどの程度にするかは、SMC 製造時のカット条件に依存することから、プロトタイプ撚糸試験では、40mm/r を標準として、甘撚りの 60mm/r と撚り強化の 20mm/r で行い、バージン品ではカット後に捻れが残るが、リサイクル品では硬いため捻れは残らないが、20mm/r ではミスカットが多いとの報告を受け、20mm/r ピッチは除外した。40mm/r と 60mm/r では大きな差はないが、巻取速度からすると 1.5 倍の差があり、生産速度の観点から 60mm/r ピッチとしたかったが、SMC 製造の観点から 40mm/r ピッチで行うこととした。

実際の運転では、5mm 幅 x 50m のリールを 10 本用い、500m 巻きボビンでは約 16 段(30m/段)であり、1 ボビンに付き左右 16 回の折返しを行いながら平行巻きを行うことになる。この折返し機構の開発には相当な時間を要していたが、1 日 10 時間、3ヶ月の連続運転による摺動部の金属疲労(摩耗)や駆動ベルトの疲労(滑り)、5mm 幅テープの毛羽立ちに伴う“裂け切れ”、接合部あるいは細テープのピンハネや切れなどの想定外の要因で、40mm/r ピッチを維持するための巻取速度が一定しなかった場合は甘撚りの 60mm/r ピッチ側に移行させた。想定外要因の殆どはテンションが掛かって巻取速度を抑え、ピッチが短くなる。こうした理由でピッチ変動の大きなボビンについては、出荷予定の 50 本製造終了後に巻き戻し(巻き直し)で、ピッチ調整することとした。

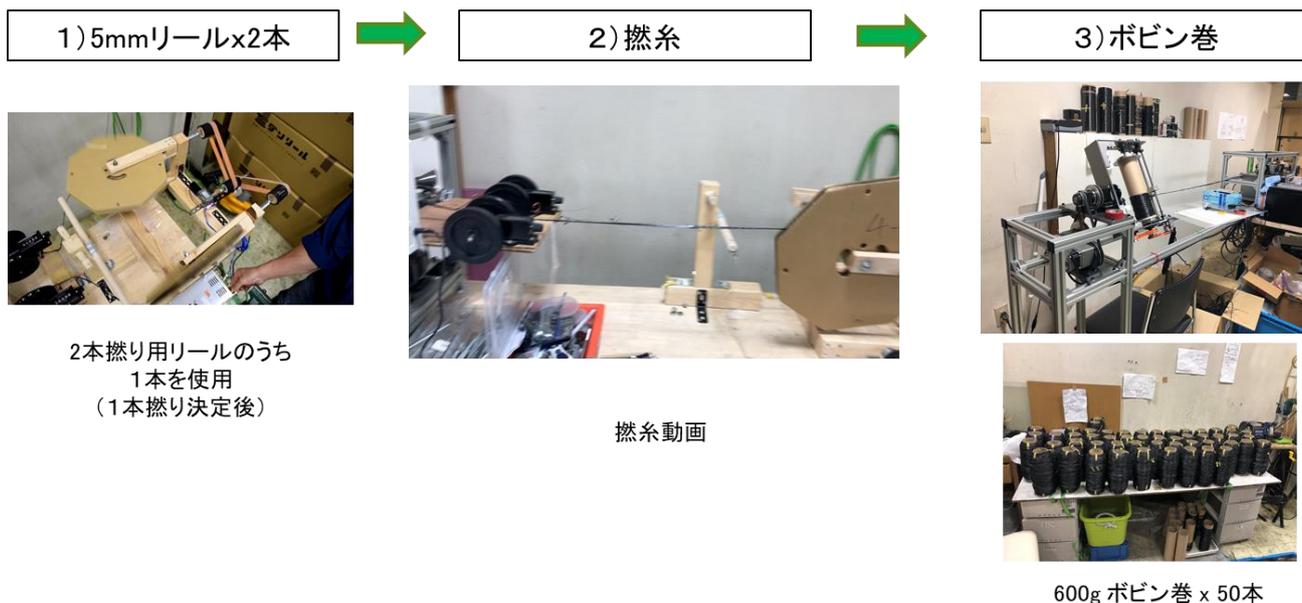


図 26 工程 4 巻取り工程実作業

2.3.1.1.3 結果と考察

最終的に、ボビン1本につき撚糸のピッチや太さの相違から 400m から 430m で、約 600gのボビンを 50 本出荷した。

シゴキ、接合、開織カット、巻取の4工程のそれぞれでの課題は明らかになった。今回のプロジェクトにおいては手作業の工程が多かったが、今後の安定した量産においては、工程の改善や機械自動化が望ましい。

1) 剥がし・シゴキ工程

- ・剥がしの自動化は想定していなかったが、手動で 5 枚積層を容易に剥がせることを鑑みると、板状の積層廃材であれば、ローラー等の摩擦での剥がしは可能と考えられる
- ・水中開織(シゴキ)の機械化は多数試作した結果、“折る”ことに特化したローラー開織が有効であることはわかっており、量産処理するためには、不連続の短冊の供給方式、当面は手動で駆動ローラに吸い込ませて、巻きつける方法は提案できるが、現在の短冊が 50cm 長と短く、駆動部と開織部のコンパクト化ができれば、自動化は可能
- ・粉塵の飛散防止の観点からは水中がよいが、乾燥工程が加わるので、集塵機完備した密閉型気中処理も選択肢に入る

2) 接合工程

- ・5mm 幅短冊で行うか、5cm 幅短冊で行うかで、方式が異なる
- ・基本は不純物(ノリ、テープ、PA, PP などのケミカルズ)は使用しない
- ・5mm 幅短冊では複数連結のエア交絡が最有力であるが、残留炭素がエア交絡を邪魔していると考えられ、シゴキ等の残留炭素除去の程度により自動化は可能
- ・ある程度の残留炭素が残留すれば CF チョップの捻じれ残留は少なく、リバウンドすると仮定すると、エア交絡に代わる最有力候補は「撚り接合」であるが、「撚り接合」によるミスカット数を下げることができれば、量産は可能

- ・5cm 幅短冊の熔融ナイロン接合は基本的に CFRP 製造と同じであり、加熱圧着・冷却をスタンピング手法で連続的に行えば、量産のための自動化は可能
- ・5cm 幅短冊両端の接合部での配向を極力揃えることで、後段の 5mm 幅テープのカット工程での補修を最小限に抑えられるが、接着剤(常温・アイロン加熱)の使用は SMC 製造段階での樹脂との親和性が低下するので、接着剤は樹脂との親和性を考慮すれば、SMC 強度低下の解決は可能

3) 開織カット工程

- ・5cm 幅テープの開織カット工程はすでに開発済みであり、接合部の均一かつ配向を維持できる接合ができれば、量産化は可能

4) 巻取工程

- ・ベルトの滑りや折返し機構のトラブル要因はすでに解決済みであり、「製縄機」(撚り機)に関する自動化は可能

総じて、不連続なりサイクル CF を用いた燃糸製造技術は他に類を見ない技術(世界初かもしれない)であり、課題が洗い出せたことは、大きな成果と考えている。その大きな課題は当然のことではあるが、「接合方法」に尽きる。SMC 試験結果からは、

- ・開織対象としなかった短冊両端(耳)の接合部も開織する
- ・接着剤(化学化合物)は用いない
- ・接着剤を用いる場合には CFRP 製造時の樹脂との親和性の良いものとする

ことで、品質を上げ、量産化に結びつので、さらなる SMC を対象とした「接合方法」の検討および研究は継続すべきである。前述のとおり複数連結のエア交絡が最有力ではあるが、以下の「編組(三つ編み)」も有力な候補の一であり、具体的な開発例を以下に示す。

- 1) 接合方法: SMC 製造時には、バージン CF で残った CF チョップドの捻れが、リサイクル燃糸ピッチ強化ではリバウンドして残らないことから、一次炭化リサイクル CF 特有の残留炭素が CF 同士を結合させていると結論付けられるが、撚りよりも繊維束(短冊)の結合力が強い「三つ編み」を採用すると、図 27 のように三つ編み部の接合は強いが切ると三つ編みが解けてリバウンドし、適正な太さと三つ編みピッチで接着剤を使用しない接合が可能となる。



図 27 三つ編みによる接合

- 2) 残留炭素除去: リバウンドに残留炭素量が影響することは確かであり、さらに残留炭素が SMC 強度特性に大きく影響するのであれば、単純には CF 燃糸あるいは三つ編み紐を低温焼成することで除去できる。擬似連続化する前の焼成は“ふわふわ”問題から回避したく、連続化した後の焼成であれば、取り扱いもプロセスフローからもシンプルになる。

2.3.2 既存の量産技術への適用の可否の為/既存設備による実証実験と製品評価

2.3.2.1 SMC 加工・成形

2.3.2.1.1 実験試料

実験には 2.3.1.1.2「量産工程に使用できる燃糸の作製」で作製したポビン巻きの燃糸 50 本。要件は、撚り本数=1 本、接合方法=溶融ナイロン、撚りピッチ=40mm/r で、ポビン一本当たりの重量は約 600g。

2.3.2.1.2 実験方法

前項にて作製された 50 本の燃糸を三菱ケミカルの既存 SMC 加工設備に設置し、SMC 加工を実施した。樹脂は三菱ケミカル SMC 市販品と同種のビニルエステル系樹脂を使用し、また繊維含有率も SMC 市販品同等とした。

得られた燃糸 SMC を所定の大きさに切り出し、標準条件でのプレス成形により厚さ 2mm、300mm 角の平板を得た。

2.3.2.1.3 結果と考察

上記製造方法により、SMC を製造することが出来、また、その SMC を平板に成形することが出来た。出来上がった SMC 及び平板の外観としては、バージン CF を使用した市販品よりも CF チョップが明瞭に判別可能であった。(下図参照)

供給された燃糸は、バージン CF と異なり、接合部や短冊の太さのばらつきのため張力の掛かり方が不均一なため、供給中に破断しないよう張力を制御する等の条件調整を行った。この条件調整により、連続加工が実施できた。しかし、バージン CF との違い(CF 接合部、ササクレ、毛羽立ち)に起因した CF の破断が発生するなどし、安定的な生産には課題が残った。

また、燃糸から数 mm 程度の微細な繊維が発生・飛散するために、作業環境・設備防護対策が必要であった。

上記状況の改善のためには、より長いリサイクル糸を使用することによる接合頻度の低減や、接合方法の変更(エア交絡等)による取扱性の改善、繊維収束剤の付与によるササクレや毛羽立ち低減による工程通過性の改善等の対策が考えられる。



図 28 (左)SMC 市販品、(右)リサイクル燃糸 SMC



図 29 (左)SMC 市販品成形板、(右)リサイクル撚糸 SMC 成形板

2.3.2 既存の量産技術への適用の可否の為/既存設備による実証実験と製品評価

2.3.2.2 物性評価

2.3.2.1.1 実験試料

2.3.2.1「SMC 加工・成形」で作製したリサイクル撚糸 SMC 成形板と、比較対象としての SMC 市販品成形板を評価に用いた

表 3 実験(物性評価)に使用した CF の基本特性

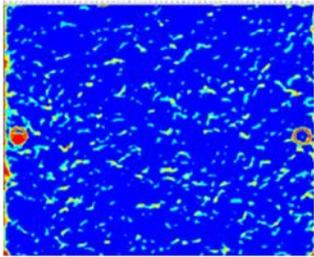
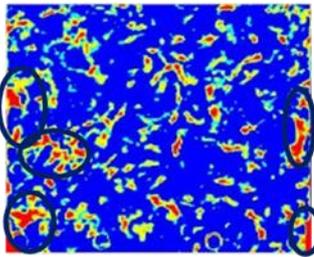
	標準 SMC	リサイクル撚糸 SMC
CF	TR50S15L	TR50S15L(リサイクル撚糸)
樹脂	ビニルエステル系樹脂	ビニルエステル系樹脂
CF 含有率	53wt%	53wt%
CF チョップ長	1 インチ	1 インチ

2.3.2.1.2 実験方法

プレス成形により得られた成形板について、超音波探傷試験により不健全部(内部の空隙や外観不良部)の確認を実施した。同じ成形板からクーポン試験片を切り出し、引張試験と 3 点曲げ試験を行った。引張試験は ASTM D3039 に基づく三菱ケミカル社内法で、3 点曲げ試験は ASTM D790 に基づく三菱ケミカル社内法にて L/D=16 として、それぞれ実施した。参照用として SMC 市販品についても同じタイミング・条件で成形を実施し、リサイクル撚糸 SMC の成形板と全く同じ評価を実施した。

2.3.2.1.3 結果と考察

表 4 物性評価結果一覧

	SMC市販品	リサイクル燃系SMC	
超音波探傷画像			より大きな不健全部 (内部の空隙や外 観不良部)が分布し ていることを確認
引張強度 [MPa]	143 (4%)	52 (28%)	36%
引張弾性率[GPa]	27 (6%)	弾性変形区間がごくわずかであり引張弾性率の算出はできなかった	
3点曲げ強度[MPa]	344 (11%)	208 (17%)	60%
3点曲げ弾性率[GPa]	27 (12%)	24 (11%)	90%

*丸括弧内はn=6測定での変動係数値

リサイクル燃系 SMC は SMC 市販品対比で引張強度が 36%、3 点曲げ強度が同 60%、3 点曲げ弾性率が同 90% であった。リサイクル燃系 SMC は引張試験における弾性変形区間がごくわずかであり引張弾性率の算出はできなかった。超音波探傷画像から、SMC 市販品成形板に比べて、リサイクル燃系 SMC 成形板にはより大きな不健全部(内部の空隙や外観不良部)が分布していることが確認できる。この結果も含め、リサイクル燃系 SMC の物性が概して低かった要因としては主に次の 3 点が考えられる。

- ① CF 全体の 5~10%を占める燃系接合部(熔融ナイロン接着)に樹脂が含浸せずに不健全部となっている。
- ② CF 表面に固着した炭化物残渣の影響で、CF 繊維束内への樹脂含浸が妨げられた。
- ③ SMC 市販品に比べ繊維束が太く(すなわち単位長さ当たりの CF 重量が大きく)、SMC 製造時 CF を分散する際の空隙部が多くなりやすく、その部分が、破壊起点となりうる樹脂リッチ部となった。

このうち①については、より長い繊維を用いて接合部を減らしたり、接着剤を使用せずにエア交絡や三つ編みのような接合方法を採用したりすることで改善する可能性がある。②についてはシゴキ方法の最適化あるいは燃系焼成による残留炭素量の低減によって物性改善が期待できる。③については、繊維束をより細く(すなわちより軽く)することで改善する可能性がある。

3. 今後に向けて

- 実証実験 3 年目である 2020 年度では、リサイクル CF の取り出し、撚糸加工、SMC 量産設備での SMC 加工・成形まで一気通貫で実施する検証ができた。
- 完成した SMC テストピースの物性はバージン材の SMC 市販品と比較すると概して低かったが、その推定要因と解決策の見通しを立てることができた。
- 強度面の課題解決の方向性としては、SMC 加工工程での安定した連続生産に適した撚糸(繊維束の太さ、接合方法、撚糸にするリサイクル繊維の長さ)を安定的に製造することが必要であり、撚糸加工工程の自動化が望ましい。
- CFRP の Car to Car リサイクルチェーンの社会実装に向けては上記の課題を解決する目処をつける必要があり、リサイクル CF の「扱いやすい形態」を今後検討する必要があると考えている。

	安定した量産に向けた課題	課題解決の見通し	
撚糸加工工程における課題と解決の方向性	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 手作業が多い為、工数が膨れたり、完成した撚糸の品質の一貫性に欠ける 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 工程の大規模な自動化 <ul style="list-style-type: none"> ・ シゴキ過程 — ダブルローラー機 ・ 接合工程 — エア交絡又は三つ編み接合の量産自動化 ↑改善効果が最も高いと考えられる ・ 開織カット工程 — 自動開織カット機 ・ 撚り工程 — 撚り機 	撚糸加工工程改善
SMC加工・成形における課題と解決の方向性	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 連続加工中、撚糸の状態を見ながら、常に給糸速度、テンションの調整が求められる 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ より長いリサイクル繊維系を使用することによる接合頻度の低減 ➢ 接合方法の変更(エア交絡等)による取扱性の改善 ➢ 繊維収束剤の付与によるササクレや毛羽立ち低減による工程通過性の改善 	撚糸の改善(要件の見直し)
物性(強度)面における課題と解決の方向性	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 残渣(残留炭素や溶融ナイロン)が原因でバージンと比較すると強度が劣る 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ より長いリサイクル繊維系を用いて接合部を減らしたり、エア交絡のような接合方法を採用することによる接合部の残渣量の低減 ➢ 焼成条件の最適化や水中開織の強化などによる残渣量の低減 ➢ CFの束をより軽く、より細くする(概ね20%以上) 	

図 30 安定した量産に向けた課題の推定要因と解決策の見通し

以上