

課題番号： 3 G-2002

体系的番号： J P M E E R F 2 0 2 0 3 G 0 2

研究課題名：

リサイクル炭素繊維を原料とした 連続繊維強化複合材料部材の開発

重点課題：

主：【重点課題⑪】ライフサイクル全体での徹底的な資源循環に関する研究・技術開発

副：【重点課題①】持続可能な社会の実現に向けたビジョン・理念の提示

研究実施期間： 令和 2 年度～令和 4 年度

研究代表機関： 国立大学法人東海国立大学機構 岐阜大学

研究代表者： 仲井 朝美

研究分担機関： トーア紡マテリアル株式会社
国立大学法人 三重大学
三重県工業研究所

1.研究開発背景等

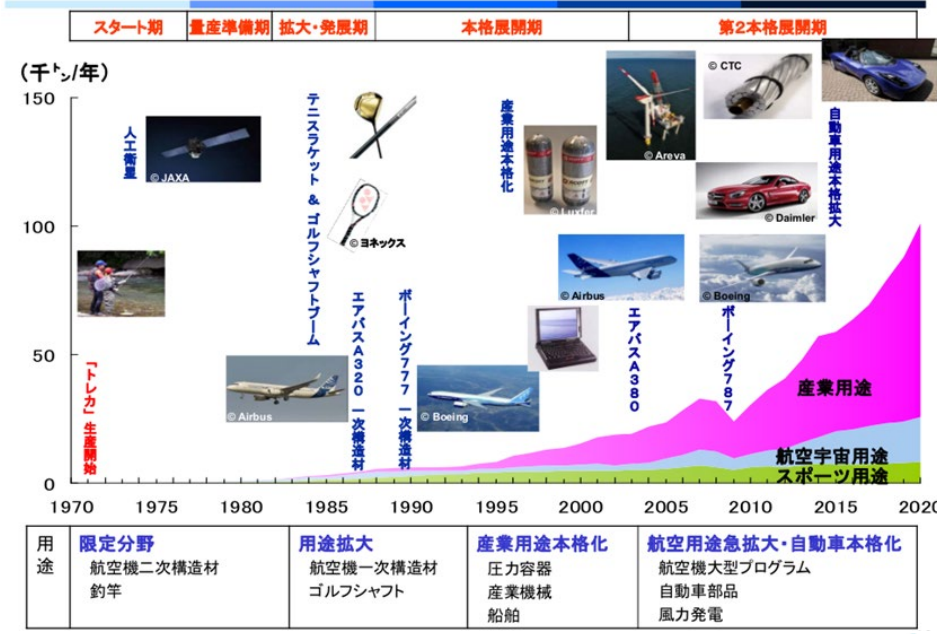
炭素繊維強化プラスチック（CFRP）は、高強度・軽量・耐熱性の特性を活かし、航空機、自動車、風力発電ブレード、建築土木等で採用が拡大し、**2030年の世界市場は2017年比2.6倍の3兆5800億円**と見込まれている。

- 特に航空分野では大型機やビジネスジェットの生産本格化などによって**需要が拡大**するが、同時に**機体製造時の端材も大量に発生**することとなる。
- これまでに自動車や航空機用途で利用されたCFRPが**2025年頃に大量の廃材**となる時期を迎える。

CFRPリサイクル：国内研究機関等で分離・取り出しの技術開発が進められている。取り出されたCFは「**短繊維**」であり、不織布や樹脂との混合等の限定的な利用にとどまっている。

短繊維化することで強度が低下し、意匠性にも課題。現状は、ガラス繊維の代替程度と思われ、今後は回収した**CFの新たな形態での利用、用途拡大が必要**

需要が拡大している炭素繊維：
持続可能な生産消費形態を維持する（SDGs目標12）
循環型経済（Circular Economy）の確立



リサイクルCFの用途開発 TORAYCA

■用途例

(1)チョップドファイバー

① 樹脂との混合による樹脂成型（コンパウンド）



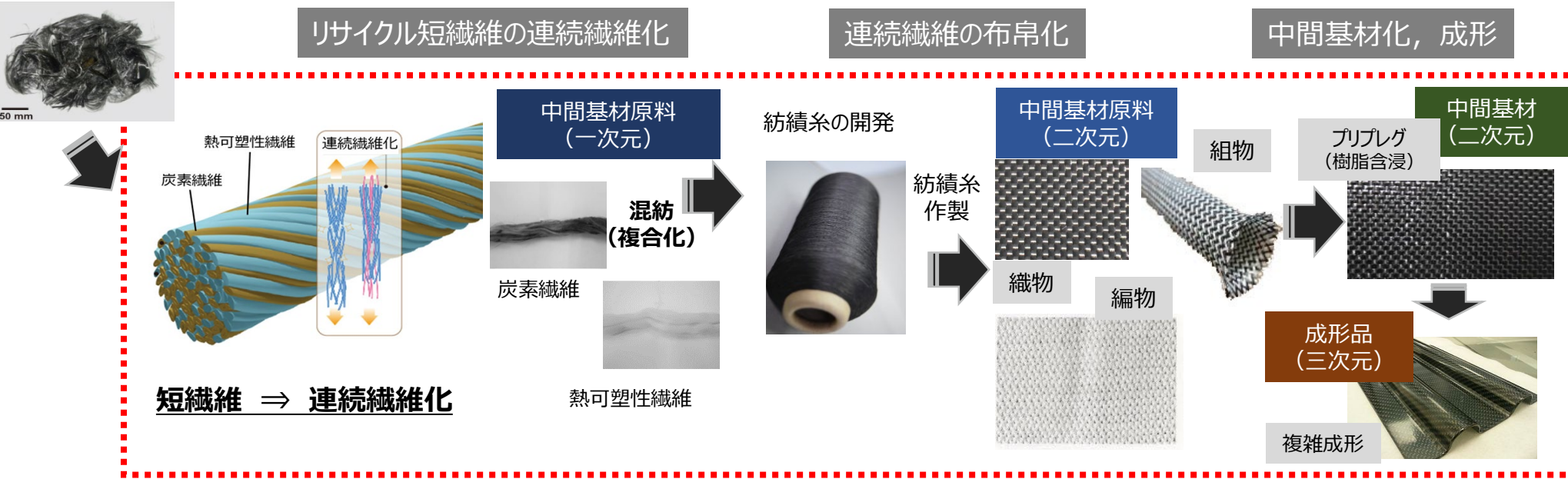
②不織布との混合によるプレス成型加工



(2)ミルドファイバー



2.研究開発目的



短繊維 ⇒ 糸 ⇒ 布 ⇒ 成形品
(一次元) (二次元) (三次元)

- 短繊維を連続繊維化, 糸を形成して, 高強度と意匠性向上を実現！！
- その糸を編織して布帛 (中間基材化) , 三次元に成形して, 製品を形作る！

なぜ、糸を狙ったか？

- 糸 (ReCF/樹脂) としてリサイクルする際のエネルギーは、熱加工工程が無いので低負荷である。 (行政)
- 一次元の繊維集合体 (糸) は、布 (二次元) , 服 (三次元) へ展開できる (川上から川下へ) (研究開発)
- 不織布 (フェルト) 製品では安価なため、CFは価格競争で不利。糸で付加価値を高めたい。 (川上メーカー)
- 短繊維では性能が低いため、構造部材への適用が困難。連続繊維 (糸) で性能を高めたい。 (川下メーカー)

3.研究目標

連続繊維（糸）の開発（サブテーマ1）を起点に、中間基材化(サブテーマ2)、素材特性解析（サブテーマ3）及び成形技術（サブテーマ4）を連動して、リサイクル炭素繊維成形品を提案する。

サブテーマ1	リサイクル炭素繊維の連続繊維化及び製布化技術の開発
目標	リサイクル炭素繊維を用いた連続繊維糸（紡績糸）の試作 リサイクル炭素繊維紡績糸を用いた織物，編物の試作 リサイクル炭素繊維を用いた中間基材原料（糸，布）の試供品の提示
サブテーマ2	リサイクル炭素繊維を原料としたプリプレグ成形技術の開発
目標	1. ReCF／熱可塑性樹脂界面特性の確保：表面处理、成形条件の最適化 2. ReCF/樹脂混紡糸を用いたプリプレグの成形技術の構築 3. ReCF/樹脂混紡糸を用いた組物(パイプ) の製造技術の開発
サブテーマ3	リサイクル炭素繊維基材の材料特性解析
目標	炭素繊維連続糸，それを用いた成形品の特性評価シミュレーション技術の開発 リサイクル炭素繊維紡績糸を用いた成形品の特性評価シミュレーション リサイクル炭素繊維を原料とした連続繊維強化複合部材のシミュレーション技術の確立
サブテーマ4	リサイクル炭素繊維基材の成形性に関する研究
目標	リサイクル炭素繊維を用いた連続繊維糸（紡績糸）の性能評価 ハイブリッド成形に適した中間基材の選定 リサイクル炭素繊維ハイブリッド成形条件の最適化と成形品の試作提案

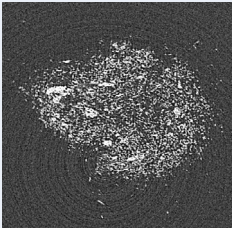
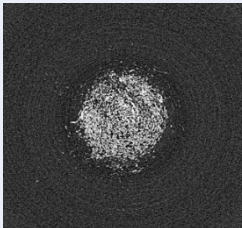
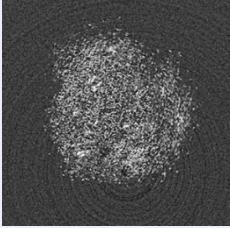
4.研究開発内容

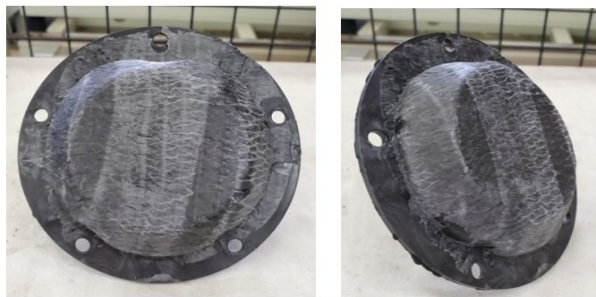
サブテーマ 1	リサイクル炭素繊維の連続繊維化及び製布化技術の開発
内容	(1) 短繊維化されたリサイクル炭素繊維の連続繊維化に向けた装置導入 ・炭素繊維の紡績技術の調査および連続繊維化のためのスライバー製造設備導入とその調整を行った。 ・ReCFとポリプロピレン (PP) を混紡したスライバー作製を行った。 (2) 紡績技術によるリサイクル炭素繊維の連続繊維化 ・ReCFとPPが均一になるような混合方法やカード等の設定条件を検討して、最適な装置条件を検討した。 ・紡績糸の高品質化のために、精紡時のドラフトや撚り数などの諸条件を検討した。
サブテーマ 2	リサイクル炭素繊維を原料としたプリプレグ成形技術の開発
内容	(1) ReCF／熱可塑性樹脂界面特性の確保：表面処理、成形条件の最適化 ・リサイクル炭素繊維を紡績するための繊維表面処理条件等を検討した。 ・リサイクル炭素繊維布帛をプリプレグ成形するための種々の条件（界面特性、含浸性）を検討した。 (2) ReCF/樹脂混紡糸を用いたプリプレグの成形技術の構築 ・リサイクル炭素繊維紡績糸からなる布帛と組み合わせる樹脂材料、含浸方法等の条件を最適化を検討した。 ・一方向材料を成形し、断面観察による成形性評価、引張試験による力学的特性評価をおこなった。 ・一方向材成形のためのプリフォームをTFP技術で作製し、加熱圧縮成形して物性等の評価をおこなった。 (3) ReCF/樹脂混紡糸を用いた組物(パイプ) の製造技術の開発 ・リサイクル炭素繊維紡績糸を用いて、パイプ、曲面形状等、複雑形状の部材を試作開発する。

4.研究開発内容

サブテーマ3	リサイクル炭素繊維基材の材料特性解析
内容	(1) 炭素繊維連続繊維系のシミュレーション技術の開発 ・炭素繊維系（フィラメント系）をX線CTにより分析し、繊維の幾何学的構造を調査した。 ・紡績系の異方性を考慮した弾性定数を算出する手法を開発した。 (2) リサイクル炭素繊維紡績系のシミュレーション技術の開発（微視的構造モデルの開発） ・リサイクル炭素繊維紡績系からなるReCFRPの数値シミュレーションモデルを開発した。 ・連続繊維紡績系の繊維体積含有率と撚り角が複合材料の弾性率に及ぼす影響を調査した。 (3) ReCFRPの振動減衰特性の評価 ・テキスタイルCFRTPの振動解析シミュレーションを行うシステムを開発した。 (4) ReCFを強化材としたテキスタイル複合材料の構造解析 ・リサイクル炭素繊維紡績系をテキスタイル構造としたReCFRPの有限要素解析を行うシステムを構築した。
サブテーマ4	リサイクル炭素繊維基材の成形性に関する研究
内容	(1) リサイクル炭素繊維を用いた連続繊維系（紡績系）の性能評価 ・ReCFとPPからなる紡績系等の物理特性（織度、炭素繊維含有量、破断強度、伸度）を評価した。 (2) ハイブリッド成形に適した中間基材の選定 ・リサイクル炭素繊維紡績系を用いた中間基材を作成、評価した。 (3) リサイクル炭素繊維ハイブリッド成形条件の最適化と成形品の試作提案 ・ReCFRTPシートとReCF含有樹脂ペレットを用いてハイブリッド成形により成型品を試作した。

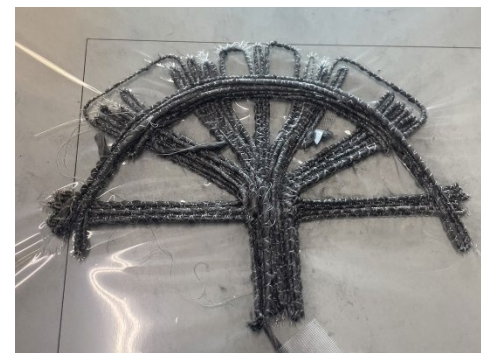
5-1.成果の概要

試作糸の外観 (糸)			
X線CTによる 試作糸の観察 (断面)			
破断強度	49.4 N	62.2 N	<u>109 N</u>
サンプル名	試作01	試作02	試作03



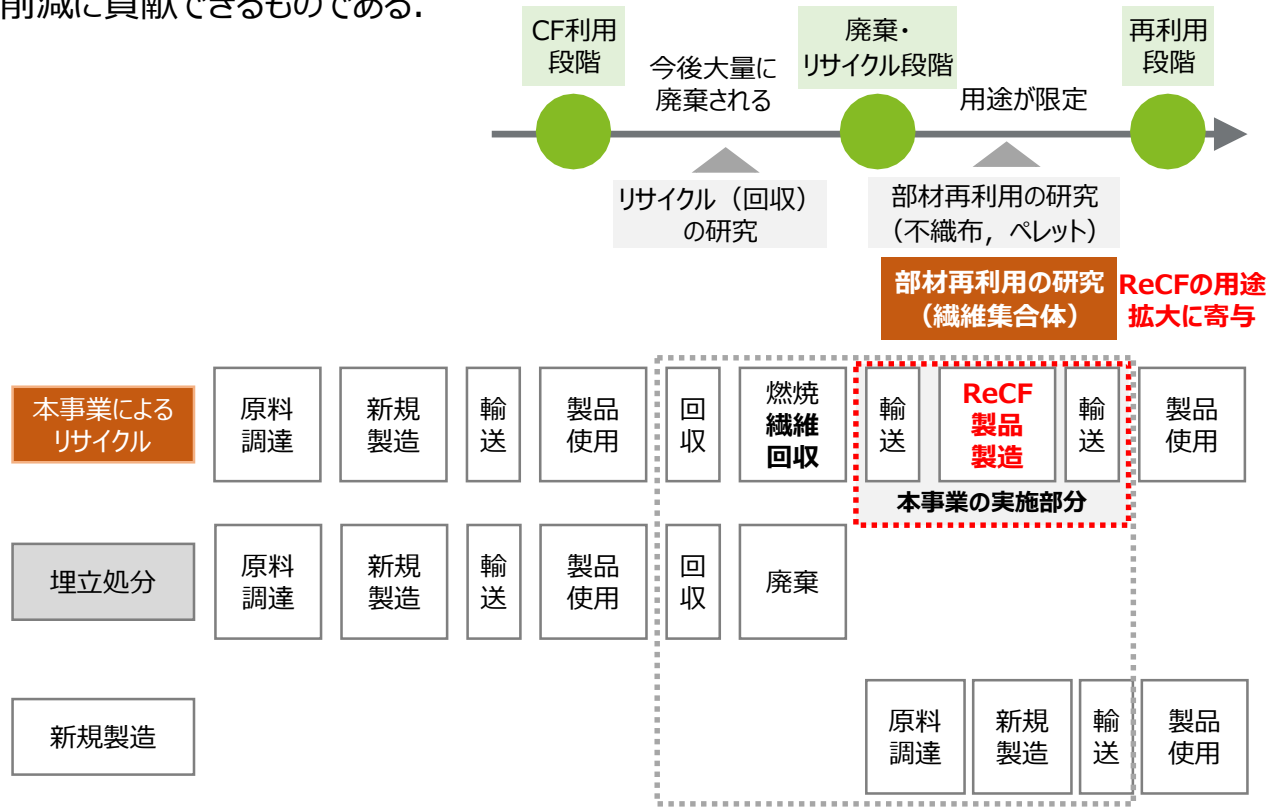
	vCFPPペレット	ReCFPP織シート + ReCFPPペレット
圧縮強度 (kN)	14.8	13.2 (89%)

4つのサブテーマが、連続繊維作製、基材化、特性解析、試作成形というそれぞれの役割で十分な成果をあげた。また各テーマで、研究開発だけでなく、試作開発、試作品の提示を行い、実証的な成果を得ることができた。サブテーマが連動しながら事業を進めることができ、**リサイクル炭素繊維の利用に関する新技術開発ができたことから、「目標を上回る成果をあげた。」**と自己評価した。



5-2.環境政策等への貢献

CFRPのリサイクルに伴う最終処分量の削減：使用後のCFRPは、主に埋立処分がなされており、再製品化は一部にとどまっている。リサイクル拡大にはReCFの用途拡大が必須であるが、本テーマはリサイクル炭素繊維を紡績して連続繊維化を行うことで、糸、布帛として成形用の中間基材化を図り、用途拡大につながるものである（図）。すなわち、ReCFの新たな利用方法の提案により、最終処分量の削減に貢献できるものである。



CO2削減見込みの分析：ELG社の試算では、リサイクル炭素繊維はバージン繊維の生産に必要なエネルギーの10%程度で生産されるとしている。炭素繊維の製造には、286MJ/kgのエネルギーが必要で、CO2排出量は、22.4kg-CO2/kgである。これに対して、リサイクルCFRPの製造エネルギーは1/10（29MJ/kg、2.2kg-CO2/kg）と算出され、国内で2万～3万トンのリサイクル市場が形成されれば、40.4万～60.6万トンのCO2削減に寄与することができる。また、本事業の紡績、製布の工程は、電力エネルギーが主で、熱エネルギーはほぼ使用しないため、同量のReCFを用いた製品では、ペレット製造、チョップド、混紡不織布製造などよりも製造エネルギーは低く、さらなるCO2削減効果も期待できる。

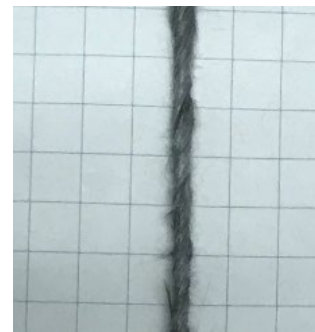
将来の生産量では2万トン/年を想定して、約40万トン/年のCO2削減効果を目指したい。

(1) リサイクル炭素繊維を用いた連続繊維糸（紡績糸）の試作

- ・直線的な形状であるReCFと熱可塑樹脂であるPPを原料として、連続的なスライバーを作製できた。
- ・ReCFとPPを紡績技術により連続繊維化して紡績糸を試作した。



試作スライバー



試作紡績糸

(2) リサイクル炭素繊維紡績糸を用いた織物、編物の試作

- ・作製した連続繊維は繊維が太いため自社の製布設備では布帛の試作が困難であり、他のサブテーマと連携して布帛の試作を進めた。布帛に適した糸の供給を行ない、成形原料として有効であることを確認することができた。

(3) リサイクル炭素繊維を用いた中間基材原料（糸、布）の試供品の提示

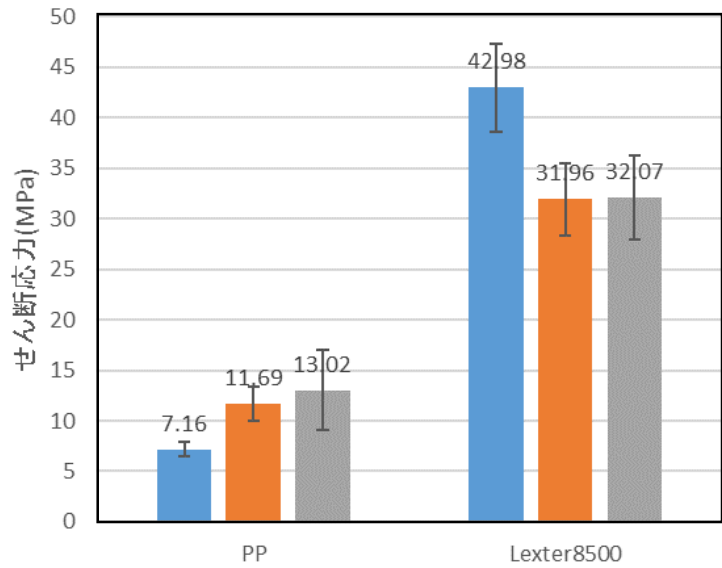
- ・紡績糸の高品質化を図り、開織工程の改善により品質が向上でき、試作糸を川下工程へ供給できた。

CFのリサイクルシステムの基点となる連続繊維（スライバー、紡績糸）の作製、提案ができたことから、「**目標通りの成果をあげた**」と自己評価した。織物、編物の試作部分は他のサブテーマのとの連携となったが、全体目標である試作成形にまで至ったため、目標通りと自己評価した。

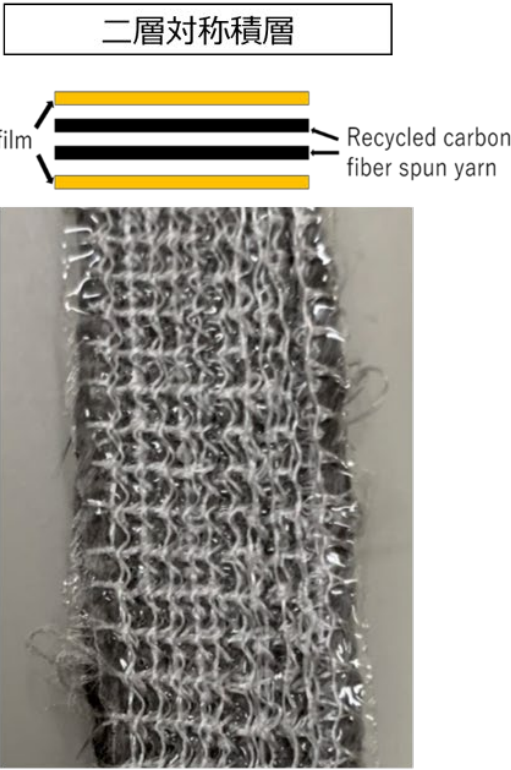
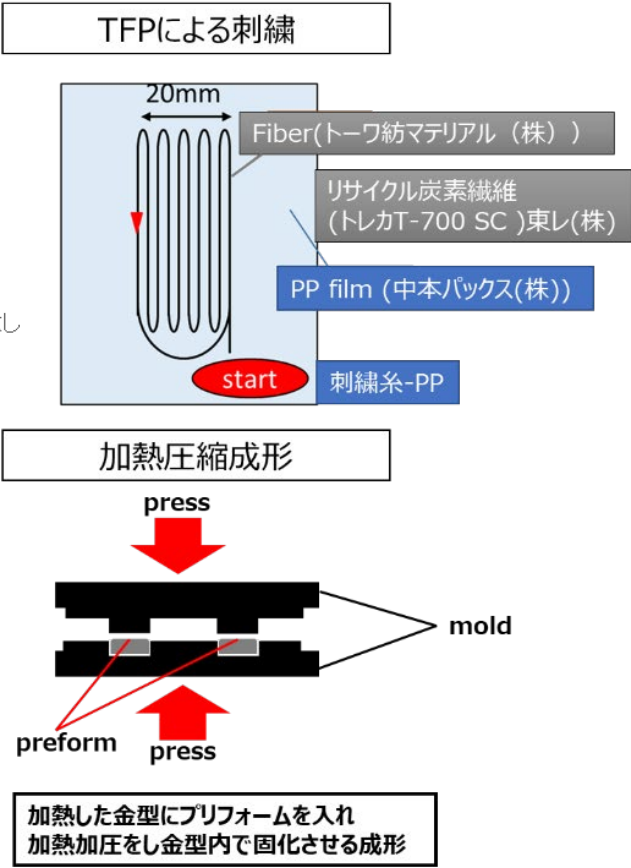


リサイクル炭素繊維紡績糸の試作工程 （動画）

- (1) ReCF／熱可塑性樹脂界面特性の確保：表面処理、成形条件の最適化
- (2) ReCF/樹脂混紡糸を用いたプリプレグの成形技術の構築



リサイクル炭素繊維を紡績するための繊維表面処理条件を明らかにした

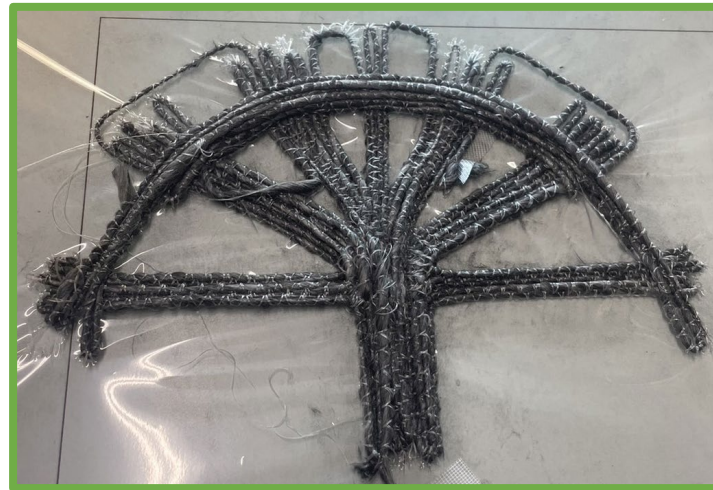


ReCF/樹脂混紡糸を用いたプリプレグに対して、含浸性および力学的特性の観点から最適成形条件を明らかにした

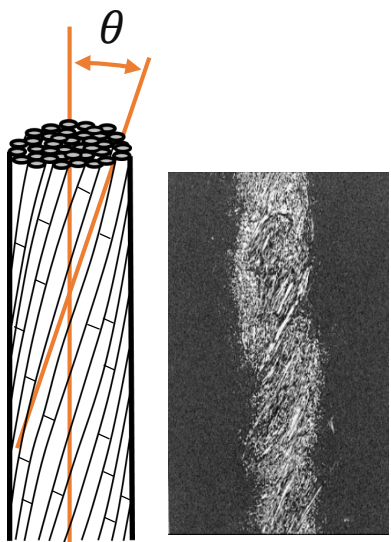
（３）リサイクル炭素繊維紡績糸から、組み技術によるパイプ、編み技術による曲面形状等、複雑形状の成形が可能となる部材を試作開発する。

複雑形状を実現する強化形態作製技術として、TFP (Tailored Fiber Placement) 技術を採用した。パイプ形状を実現する成形技術として、フィラメントワインディング成形技術を採用した。

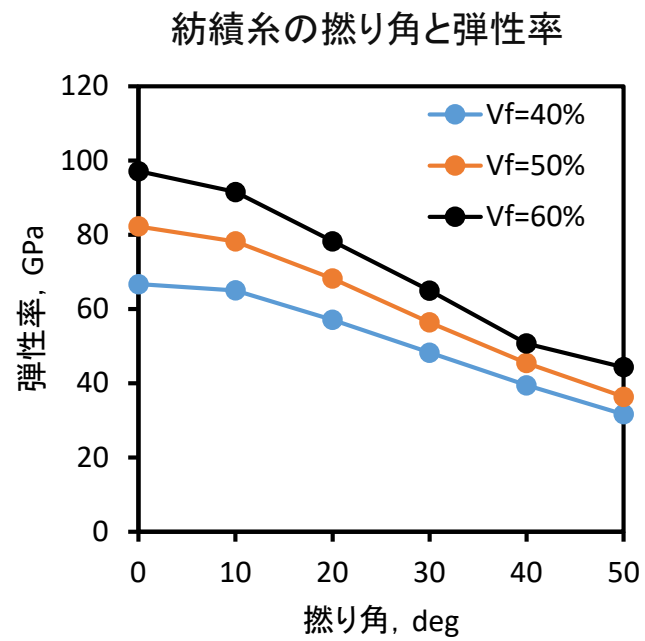
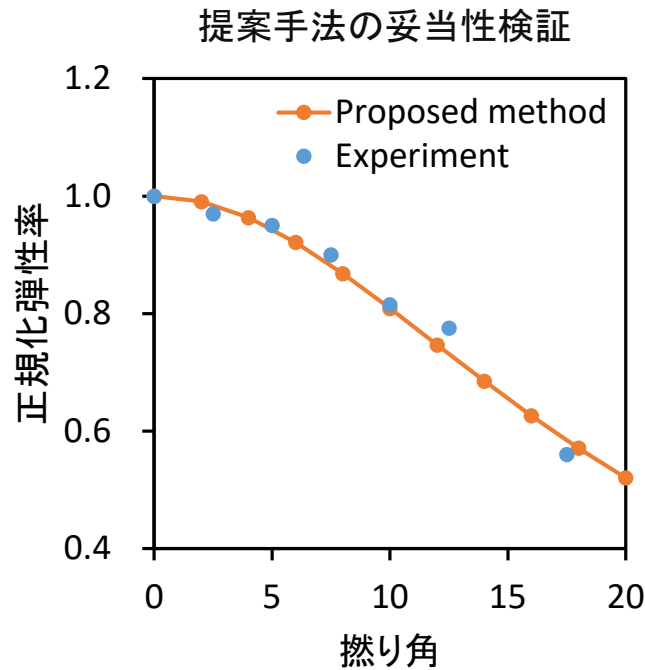
ReCF/樹脂混紡糸を使用して、連続繊維と同様にTFP技術を適用することが可能になった



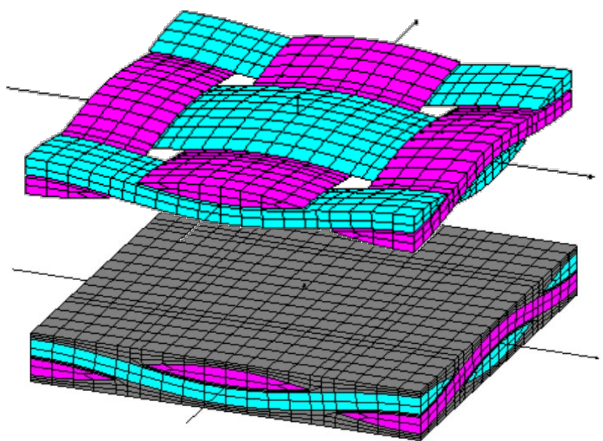
目標を上回る成果をあげた： 複合材料（ReCF/PP混紡糸）の最適成形条件の提示、TFP技術を用いた強化形態の作製および成形を実現できた



- ✓ 開発した材料モデルの妥当性を検証するため、弾性率（引張）を実験（引張試験）と比較検証した。
⇒ 誤差は最大で2%以下であり、開発手法の妥当性を確認した。
- ✓ 連続繊維紡績糸の繊維体積含有率と撚り角が複合材料の弾性率に及ぼす影響を調査。
⇒ 撚り角が大きくなるに従い、弾性率が低下する傾向を確認した。



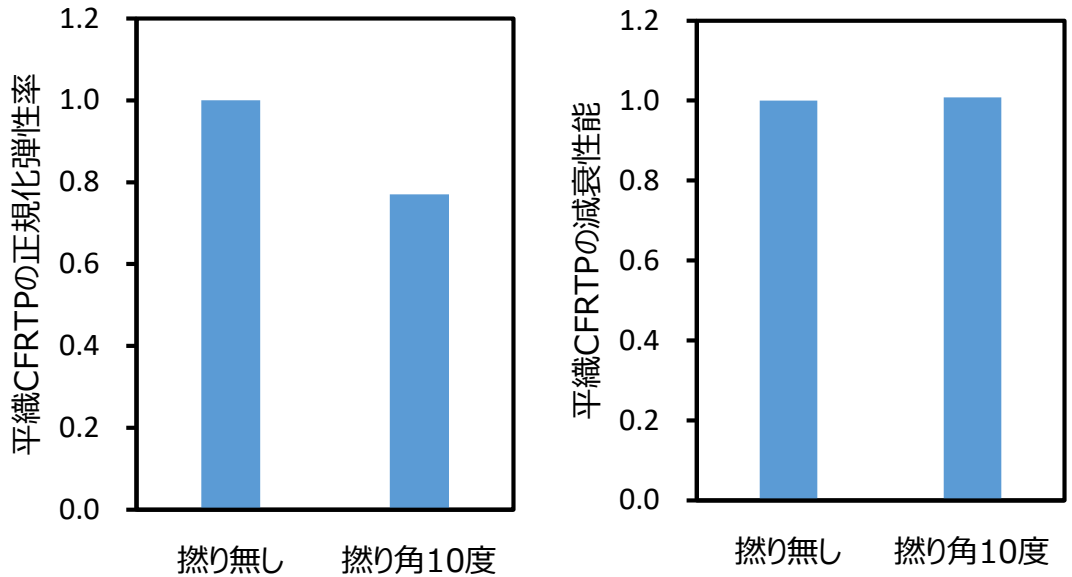
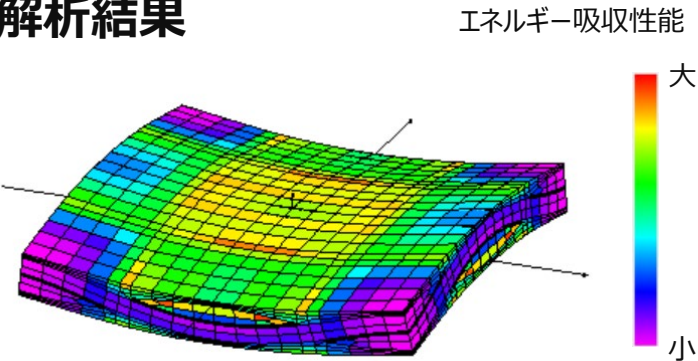
解析モデル



紡績された炭素繊維を用いたテキスタイルReCFRTPの振動解析シミュレーションを行うシステムを開発した。

- テキスタイル構造：平織
- 撚り角：「撚り無し」と「撚り角10度」の場合を比較
- リサイクル紡績糸の特性を考慮した、テキスタイルCFRTPの応力解析と振動減衰解析が可能。
これにより、静的・動的特性に及ぼす影響を定量的に評価できる。

解析結果



○リサイクル炭素繊維紡績糸を用いたReCFRTPの材料特性を評価するシミュレーション技術を開発
⇒ ReCF成形品の弾性特性や振動減衰特性が可能となった。

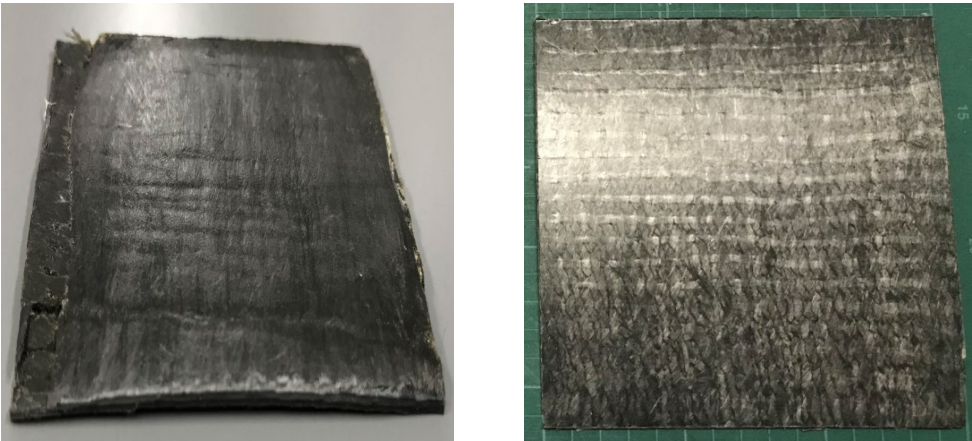
○ReCF紡績糸からなるテキスタイル複合材料の特性評価を行う有限要素解析システムを構築
⇒ 試作部材の弾性・振動減衰特性を明らかにできた

これらより、「**目標を上回る成果をあげた**」と自己評価した。

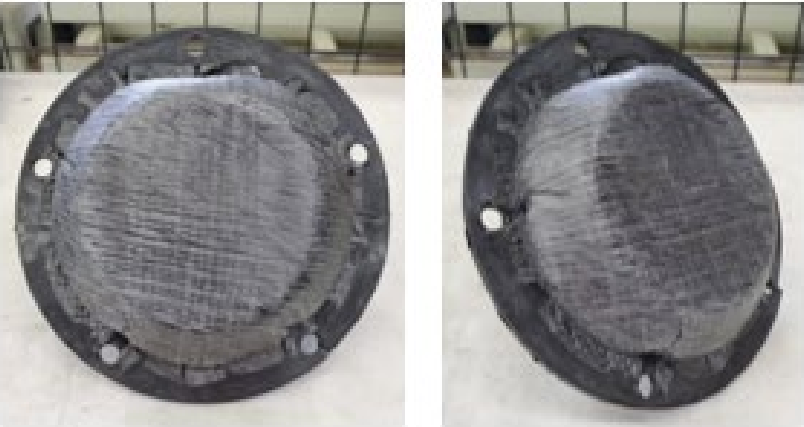
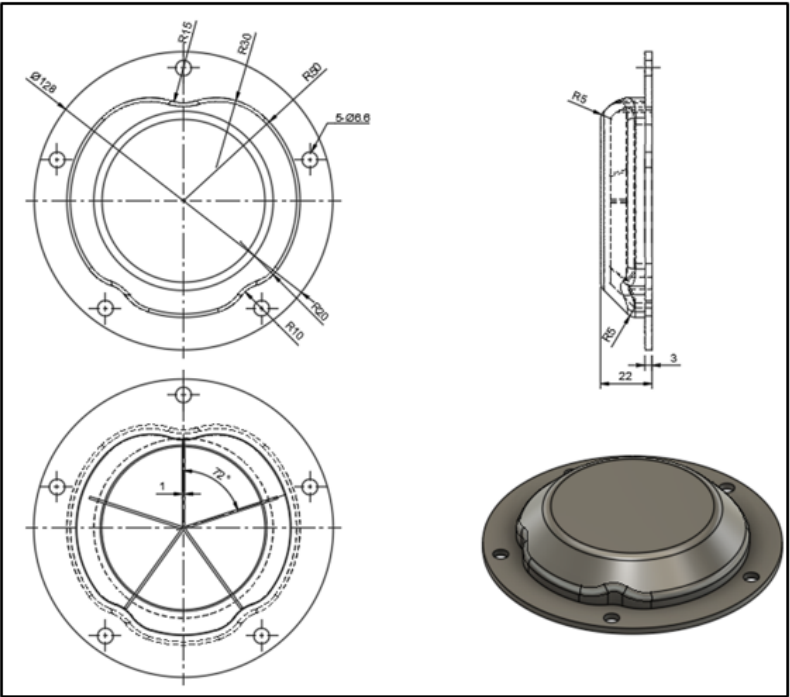
- ✓ リサイクル炭素繊維を用いた連続繊維糸（紡績糸）の性能を評価した。
⇒ 市販のバージンCF（vCF）紡績糸と比較して、引張強度は約1/4であったものの、破断強度は約2.7倍、伸度については約16倍であった。



	太さ [tex]	CF割合 [wt%]	引張試験		
			破断強度 [N]	伸度 [mm]	強度 [N/tex]
試作紡績糸	1260	59	74.9	17.6	0.059
【参考】 vCF紡績糸	136	100	27.7	1.06	0.204



- ✓ ハイブリッド成形に適した中間基材を選定した
⇒ 賦形性確認試験により、積層を0°-90°とした中間基材および紡績糸織物を用いたハイブリッド成形用の試作成形品に使用することとした。



- ✓ 成形品の試作を行った
⇒プリプレグの賦形性の詳細な確認を可能とする金型を設計し作製した
- ✓ リサイクル炭素繊維ハイブリッド成形条件の最適化を行った
⇒賦形性試験で射出成形条件の最適な温度が160℃～170℃であることを確認しハイブリッド成形が可能であることを確認した。
vCFペレットのみからなる成形品と比較して、ReCF織物シートとReCFペレットからなるハイブリッド成形品の圧縮強度が89%であった。

	vCFPPペレット	ReCF織物シート ＋ ReCFPPペレット	【参考】 PPペレット
圧縮強度 [kN]	14.8	13.2 (89%)	6.2

【サブテーマ4】の達成状況 >>> **目標どおりの成果をあげた。**
リサイクル炭素繊維の性状把握およびこれを用いた試作紡績糸が市販のバージン炭素繊維紡績糸と比較して破断強度と伸度がいずれも大きくなる特性を把握できた。また、試作紡績糸を用いたハイブリッド成形品は比較として成形した市販プリプレグと同様、賦形性に問題がないことを明らかにした。さらにバージン炭素繊維ペレットからなるハイブリッド成形品の圧縮強度は計画時の目標であるバージン材の80%以上を上回る**89%を達成**したことから、「**目標通りの成果をあげた**」と自己評価をした。

6.研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

特に記載すべき事項はない。

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表（査読なし）>

1) 森澤諭、市川幸治、増山和晃、松岡敏生：令和2年度三重県工業研究所研究報告，45，143-144（2021），リサイクル炭素繊維を原料とした連続繊維強化複合材料部材の開発

2) 森澤諭、中村創一、瀬戸彰文、増山和晃、松岡敏生：令和4年度三重県工業研究所研究報告，47，印刷中（2023），ハイブリッド成型機を用いたリサイクル炭素繊維基材の成形性に関する研究

(2) 口頭発表（学会等）

1) 山田隆義，出口佳史，仲井朝美，中西康雅，森澤諭，松岡敏生：日本複合材料学会第46回複合材料シンポジウム（2021）「リサイクル炭素繊維を原料とした連続繊維強化複合材料部材の開発」

2) 兒玉哲一，山田隆義，森澤諭，瀬戸彰文：第34回東海支部若手繊維研究会(2021)「リサイクル炭素繊維の連続繊維化技術の開発とその評価」

3) 竹下隆太郎，出口佳史，山田隆義，岩月高志，増山和晃，森澤諭，松岡敏生，中西康雅，仲井朝美：日本繊維機械学会 第76回年次大会(2023)「リサイクル炭素繊維を原料とした繊維強化複合材料の開発」（アブストラクト提出済み）

4) 高畑圭吾、札内彰、大谷章夫、仲井朝美：材料シンポジウム「若手学生研究発表会」(2022)
「リサイクル炭素繊維紡績糸を用いたCFRTPの成形条件が含浸特性および力学的特性に及ぼす影響」

5) 高畑圭吾、札内彰、大谷章夫、仲井朝美：第14回日本複合材料会議(JCCM-14)
「リサイクル炭素繊維紡績糸を用いたCFRTPの力学的特性向上に向けた検討」

6) 中西康雅：日本繊維機械学会第74回年次大会（2021）「撚糸構造を有する繊維強化複合材料の振動解析技術の開発」

7) Kazuaki Masuyama, Satoshi Morisawa, Toshio Matsuoka, Yasumasa Nakanishi: 14th International Conference on Textile Composites(2022) “An Estimation of Elastic Modulus of CFRP made from Recycled Discontinuous Carbon Fibers”

8) 森澤諭、瀬戸彰文、松岡敏生、出口佳史、山田隆義：日本繊維機械学会第75回年次大会（2022）
「リサイクル炭素繊維／PP紡績糸による強化複合材料の作製とその物性」

(3) 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

6.研究成果の発表状況

(4)「国民との科学・技術対話」の実施

- 1)みえ産学官技術連携研究会・広域連携研究会「第1回マルチマテリアル検討会」(主催：三重県、令和3年6月11日、オンライン開催)にて、「炭素繊維強化樹脂材料(CFRP)の利活用」として、各サブテーマの成果等を講演。参加者約30名
- 2)14th International Conference on Textile Composites (共催：日本繊維機械学会、京都工芸繊維大学、令和4年9月14日～9月16日、会場：京都工芸繊維大学)にて、「Development of Reinforced Composite Material using Recycled Carbon Spun Yarn」として、取組概要や各サブテーマの成果を展示した。参加者約90名。

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1)繊維ニュース (2020年8月21日、「トーア紡マテリアル／炭素繊維再利用を共同研究／岐阜大、三重大、三重県工業研究所と」)

(6) 本研究費の研究成果による受賞 特に記載すべき事項はない。

査読付き論文に準ずる成果発表	0件
その他誌上発表（査読なし）	2件
口頭発表（学会等）	8件
「国民との科学・技術対話」の実施	2件
マスコミ等への公表・報道等	1件
本研究費の研究成果による受賞	0件
その他の成果発表	0件