

センター・オブ・イノベーション（COI）プログラム

終了報告書

研究開発期間：平成 25 年度～令和 3 年度

拠 点 名： 革新材料による次世代インフラシステムの構築
～安全・安心で地球と共存できる数世紀社会の実現～

中核機関： 金沢工業大学

プロジェクトリーダー	氏名	池端 正一
	所属機関	大和ハウス工業株式会社
	部署	
	役職	理事

公開版 令和 4 年 3 月 31 日

目次

エグゼクティブサマリー

i

A イノベーション創出に向けた活動実績 1

1	目指すべき将来の姿の設定	1
2	目指すべき将来の姿からのバックキャストिंग	3
3	アンダーワンルーフ	4
3.1	拠点体制	4
3.2	参画機関 ※一覧は別紙3「参画機関一覧」参照	8
3.3	拠点のマネジメント体制と仕組み・実績	9
4	研究開発テーマの成果	12
4.1	FRP 補強筋	12
4.2	建築向け FRP パネル	16
4.3	“Carbon CUBE”	22
4.4	テンションロッド	27
4.5	橋梁部材 (PC 緊張材)	32
4.6	大型パネル (風力ブレード)	37
4.7	大型パネル (硬翼帆)	43
4.8	グラウンドアンカー	48
4.9	プレス成形	52
4.10	ダブルベルトプレス	57
4.11	ランダムシート	61
4.12	長尺構造材	64
4.13	中空部材	68
4.14	接合技術	72
4.15	界面	77
4.16	PVA 高強度繊維	81
4.17	バイオマス由来樹脂	85
4.18	超耐熱樹脂	90
4.19	リサイクル	94
4.20	研究開発全体の成果について (科学技術・学術上の新たな体系的知見等)	99
5	社会実装に向けた必要な対応	101
5.1	知的財産マネジメントの状況	101
5.2	社会実装に向けた課題 (規格標準化、規制対応、社会規範・倫理等) の抽出と対応	102
5.3	マーケティング・試験的な取組の状況 (必要に応じて記載)	103
5.4	研究開発成果の多様な展開の状況 (必要に応じて記載)	104

B イノベーションが連続的に創出される自立的なプラットフォーム構築に向けた活動実績 105

1	自立的なイノベーション・プラットフォームの構築について	105
1.1	自立的なプラットフォームの構築に向けた拠点の強み・資産の形成状況	105
1.2	産学連携を効果的にするルール・運営方法の工夫	109
1.3	自立的なプラットフォームの構想・設計・稼働の状況	111
2	若手を中心とする多様な人材の活躍促進について	114
2.1	次代を担う若手等の多様な人材の育成・活躍促進の状況	114
2.2	人材の育成・人材循環整理表	115

- 別紙 1 ロードマップ（FY2013～FY2021）
- 別紙 2 活動実績一覧
- 別紙 3 参画機関一覧
- 別紙 4 参加者一覧
- 別紙 5 研究開発テーマと個別研究開発課題の関係一覧
- 別紙 6 用語集

1 拠点の概要

本拠点では、安全・安心で、長期間に亘って価値を失わない数世紀社会の具現化を図るため、「革新素材」と「革新製造プロセス」の開発により、従来の鉄やコンクリートに代わる、軽量・高強度で長寿命、低コストで大量生産可能な「革新構造材料」を開発してきた。これらの開発成果を次世代インフラシステムに実装することで社会コストの低減と新たな価値の創造により、活気ある持続可能な社会の実現を目指してきた。さらに基盤技術として、新規バイオ由来樹脂、建築構造に適用可能な超高耐熱樹脂などの素材開発や、新規材料の社会実装を促進する長期信頼性評価、規格化等も取組んでおり、COI 終了後も革新材料の社会実装へ向けた拠点活動を継続していく計画である。

2 研究開発期間終了時の実現目標と達成状況

本拠点の研究開発は、フェーズ1では素材開発、製造プロセス、加工技術、装置開発等のシーズ技術の基礎開発を実施し、フェーズ2では社会実装を見据えてバックキャストの観点からこれらのシーズ技術の集約・再編を図り基盤となる技術を確認し、さらにフェーズ3ではアプリケーション毎に最適な技術を組み合わせた技術横断型のタスクチームにより社会実装を進めてきた。

研究開発期間終了時の実現目標としてはインフラ、海洋、住宅・都市の各分野において革新材料を多くのアプリケーションに実装し、安心安全な社会を実現することが目標であり、最終年度では特にコンクリート構造の鉄筋代替となる FRP 筋の製品化が目標である。具体的な案件としては JR 東海のリニア中央新幹線のコンクリート構造への適用が検討されている。現在、JR 東海により性能評価試験等を実施している状況で、来年度中の量産製造への立上げを目標としている。

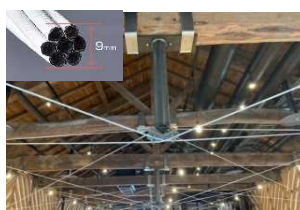
また、いち早く実用化・商品化を達成している炭素繊維ロッドの「カボコマ・ストランドロッド」(小松マテーレ(株)による商品化)は耐震補強材としての JIS 制定も達成し、さらに駅ホームの転落防止柵など、軽量高強度なロッドとして用途展開が進んでいる。土木分野では法面崩落防止用のグラウンドアンカーシステムの支圧版に CFRP 版を適用し NEXCO 西日本と共同で実証試験を継続している。このように土木建築分野では革新構造材料を社会実装することで、軽量化による現場施工の省力化、インフラの長寿命化による社会コストの低減等、持続可能な社会の構築に貢献している。

海洋分野では風力推進船の FRP パネルを用いた硬翼帆が日本海事協会の基本承認を得て(2019 年 10 月)、2022 年度には風力推進船の 1 号船となる大型商船が運航開始の予定である。このような大型構造(1本の帆は幅 15m 高さ 50m)は FRP でなければ成立しないことから、今後 COI で開発してきた革新製造技術をさらに適用していくことで生産性の向上とコスト低減を図り、2050 年までに海運分野における CO2 の 50%削減目標に向けた風力推進船の普及に貢献していく計画である。

都市・住宅分野では軽量で移設も容易な“Carbon CUBE”や、省施工と軽量化が求められている高層建築等への革新材料の適用開発を行ってきた。本分野の最大の課題は火災時の耐火性能であり、そのため高温下で載荷性能を有する新規の超高耐熱樹脂の開発に取り組んでいる。これに加えてこれまで取組まれてこなかった複合材料の高温領域での力学挙動を明らかにするため、実大サイズで検証可能な試験装置の開発を行い、試験環境・評価方法についても整備を進めている。こうした取組みにより新規材料の建築分野への適用が容易になる。



バサルト繊維/PP FRP 筋



木造建築の耐震補強
(出典：小松マテーレ HP)



高温試験装置

3 特筆すべき研究開発成果の概要

本拠点の研究開発では、フェーズ 2 までの取組において、主に社会インフラの構造部材に適用可能な基盤技術となる製造技術と素材の開発を行い、フェーズ 3 ではアプリケーション毎に最適な技術、素材を組み合わせた技術横断型のタスクチームにより社会実装を進めてきた。この過程で開発してきた製造技術、素材は複合材料の適用拡大に汎用的に活用可能であり、連携プロジェクト（外部資金等も活用した派生した研究開発、企業主体の活動）として幅広い分野への展開につながったことも特筆すべき成果と言える。

具体的には、土木建築分野での適用を目的としたロールフォーミング成形と連続プレス成形による長尺部材の製造技術は、熱可塑性樹脂を用いた高い生産性が評価され、航空機部材、自動車部材への適用へ向けた日独企業による国際共同研究へ展開が進んでいる（日本側は津田駒工業(株)、大同工業(株)、ドイツ側は Airbus 他が参加）。中間基材の開発では、高い機械特性と複雑形状の賦形性を併せ持つ炭素繊維ランダムシートの「フレックスカーボン」をサンコロナ小田(株)が商品化し、陸上短距離用シューズのピン無しスパイクやアシストスーツの材料として採用されるなど、革新的な材料として国内外で高く評価されている。装置開発では熱可塑性樹脂の高速含浸を可能にしたダブルベルトプレス装置（IPC0(株)での製品化）は複合材料用途だけでなく連続加圧加熱装置として、各種の産業分野から注目されている。

また、科学技術・学術上の成果として特筆する点としては、新たな材料である熱可塑性樹脂をマトリックスとした複合材料の評価技術として、時間温度換算則から引張クリープ寿命予測が可能なることを見出し、長期耐久性の予測を可能にしたことは学術的にも重要な成果である。また熱可塑性エポキシ樹脂を用いたテンションロッドでは、より線の応力比 R （＝最小荷重／最大荷重）を変化させた疲労試験、室温クリープ試験等により、損傷・破壊メカニズムを含めたデータの蓄積を行ったことで、耐震補強材としての規格化（JIS 制定）にも至っている。製造技術の面では熱可塑性複合材料のプレス成形において、これまでの経験やトライアンドエラーに頼るノウハウ構築から、金型やプレス機の計装化によるセンシングデータから材料挙動を解明し、AI を活用したプレス制御や、プロセスシミュレーションによる解析も可能となり、モノづくりに関するデジタルツインの技術として非常に重要な成果と言える。



航空機や自動車へ適用可能な長尺構造材



ランダムシートによるピン無しスパイク
（出典：サンコロナ小田 HP）



開発した DBP 装置

4 今後の課題と活動方針

今後の活動として、研究開発については COI 参画機関・企業や「土木分野への革新材料実装研究会」等で構築してきたネットワークを継続し、革新複合材料研究開発センター（ICC）を産学連携のプラットフォームとして引き続き研究成果の社会実装を進めていく予定である。また、各参画機関においても COI での成果や活動と呼び水として、京都大学では「インフラ先端技術コンソーシアム」を立上げ土木分野での研究活動やネットワークの構築を図っている。また金沢大学では COI の研究成果を活用し、本年度より新たに「共創の場形成支援プログラム」に採択され、植物由来プラスチック分野での研究開発をテーマに拠点の形成を進めていく計画である。

本拠点の中心実施場所として活動してきた革新複合材料研究開発センター（ICC）の COI 終了後の課題としては、設備の維持管理、研究開発費等の活動資金、人材の育成・確保等、活動資金の確保が喫緊の課題となる。そこで、資金面では、大学としての先端研究を担う役割だけでなく、産業界の要望を受け、企業の商品開発に直結する、設計・解析や分析・評価、試作開発まで対応するための新規事業会社を ICC のプラットフォーム内に設置し、マネタイズ（収益）も含め自立的な拠点運営を行う計画である。また、教育面では企業との連携を活用し、コーオプ教育による学生の実践的な教育を ICC で行うことで、大学の教育体系とも連携した人材育成、拠点の人材確保、企業の研究課題の呼び込みにもつなげていく計画である。

5 ひとが変わる、大学が変わる、社会が変わる

本事業を実施してきた 9 年間の社会変化として、世界的に SDGs による持続可能な社会の構築への取組が定着してきたなか、日本においては再生可能エネルギーへの転換や水素社会の構築が社会課題として明確化したと言える。そうしたなか、軽量・高強度で長寿命な複合材料は、風力発電ブレードや水素タンクさらに自動車軽量化など、ますます必要不可欠な材料との認識が進んでいる。

COI の成果により、東京オリンピックで陸上短距離のスパイクシューズに CFRP が採用されるなど複合材料がより身近な存在となっているなか、さらに鉄筋代替として FRP 筋が本格的に普及することで、これまで鉄とコンクリートが主であった地上人工物レベルの構造材料にまで新たに複合材料を利用する事が認知され、安心・安全で持続可能な社会の実現に向け、人のマインド、社会の認識が大きく変革していくことが実現できる状況となっている。

また、大学では COI の取組において、大学単独では出来ない社会実装を産学連携で実現してきたことを踏まえ、企業との取組をさらに教育にも結び付け、ICC をコーオプ教育のプラットフォームにしていくことで人材育成と研究推進を進める体制を整備している。またこれまでに構築してきた ICC の研究開発環境は産業界から大学の研究領域に留まらない活用が求められており、エンジニアリングサービスの窓口となる企業を立上げたことは、従来の大学の仕組みを超える大きな変化と言える。本仕組みにより拠点の持続可能なマネタイズ（収益）も担うことで自立したイノベーション拠点の活動を引き続き推進する計画である。

ICC は、COI 活動を通して築き上げた人工物への複合材料利用のマインドや社会認識を背景に、持続可能な産学に跨る研究拠点機能による複合材料の社会実装に向けた研究開発活動を通じて、SDGs の達成に貢献していきたいと考えている。

A イノベーション創出に向けた活動実績

1 目指すべき将来の姿の設定

本拠点では、ビジョン3「活気ある持続可能な社会の構築」に向け、「革新素材」と「革新製造プロセス」により次世代インフラシステムを構築することで、安全・安心で地球と共存できる数世紀社会の実現を目指している。図A1-1に目指すべき将来の姿を示す。これらを実現することにより、「社会コストの低減」、「新たな価値の創造」、「都市・住宅環境の再整備」、「持続可能な地球環境」という社会的、経済的な価値を創出することが可能になる。



図 A1-1 目指すべき将来の姿

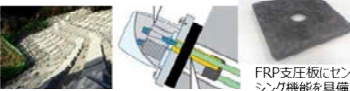
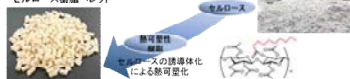
これらの社会実装は製造技術の確立と各種実装検証を完了し、事業終了後も継続して、社会実装を進めていく計画である。また社会実装を担う企業は、材料メーカー、ゼネコン等の施工会社、装置メーカー等、非常に幅広い業種が必要であり、参画企業のみでなく、「土木分野への革新材料実装研究会」の参加企業や、新たな担い手も探索し社会実装を図っていく。

表 A1-1 に現在想定している、具体的なアプリケーションについて、いつ、誰が、どのような価値を生み出すのか、それら製品・サービスのニーズ・優位性等について示した。これら以外にも、垂直軸型風力発電ブレードや橋梁など、地元自治体とも連携し、具体的なアプリケーションへの実装を図っていく予定である。

A イノベーション創出に向けた活動実績

1 目指すべき将来の姿の設定

表 A1-1 想定するアプリケーション

主な社会実装アプリケーション	どのようなサービスを 生み出すか	いつだれが	ニーズ・優位性	効果の規模と実現時期
耐震補強  カボコーマストランドロッド	軽量・高強度、錆びない、 熱的寸法安定性など、 CFRPロッドを耐震補強等 の建築部材として提供する	<社会実装時期> ・カボコーマストランドロッド として商品化(H27年) ・耐震補強他、実装済 <担い手> ・小松マテレ他	・建築基準法適用外の文化 財の補強や転落防止柵、意 匠部材としてのニーズ ・軽量で可撓性があり施工の 省力化が可能 ・PC鋼線に対タイする緊張材	・H28年度の文化財の耐 震補強予算231億円 ・木造建築以外の耐震補 強の他、ホームの転落防止 柵、その他用途拡大を推 進
FRP筋  緊張材 定着具 FRP補強筋	PC緊張材、鉄筋の代替え としてFRPロッド、および定 着方法等を含む新たな施 工方法を提供し、腐食しな い長寿命なコンクリート/ FRP構造を実現する	<社会実装時期> ・R03年度末までにリニア 中央新幹線のコンクリート 構造への適用を検討 <担い手> ・COI参画企業でFRP筋 製造立上げを計画中	・塩害対策や、非磁性材料 としてのニーズ ・高速成形による低コスト化、 熱可塑性材料による容易な曲 げ加工や定着方法等、従来 に無い優位性	・リニア中央新幹線のコン クリート構造では非磁性材料 が必要であり、緊急の課題 である。 ・東京-名古屋間で約300 kmの工事区間
グランドアンカー  FRP支柱板にセン シング機能を具備	グランドアンカーの支柱板を 軽量で耐食性、耐候性に 優れたFRPを適用し、さらに 長期の状態監視を可能に する光ファイバセンシング機 能を具備したアンカーシステ ムを提供する	<社会実装時期> ・H30年7月より現場実証 試験を開始（継続中） <担い手> ・エスイー（株）（グランド アンカーの製造会社）他	・従来の鋼製支柱板に対し 軽量化による省施工 ・材料の高耐久に加え、長寿 命な光ファイバセンサと一体化 し長期モニタリングを可能にす る	・NEXCO3社で2015年よ り27,000か所の大規模修 繕を実施中、予算規模は 約5,000億円。その他地 滑り地区の対策にも市場は 拡大が予想
風力推進船/硬翼帆  硬翼帆パネル 15m×15m	大型サンドイッチパネルの低 コスト化を実現する連続製 造技術を確立し、硬翼帆 のパネル材料、および組立 製造技術を提供する	<社会実装時期> ・COI終了後 <担い手> ・商船三井、大島造船、 相浦機械他 ・FRP製造メーカー	・硬翼帆の大判パネルは 15m×15mのサイズであり従 来の工法から大幅な生産性 の効率化、低コストが必須 2022年に風力推進船の1 号船が運航開始	・大島造船で年間最大35 隻に搭載した場合、事業 規模は280億円。全世界 では最大450隻3,600億 円/年の事業規模となる
床版  施工の省力化、移築が可能 「カーボンキューブ」	・高層ビル等に適用可能な、 2時間耐火性能を有する 軽量なFRP床板（FRPサ ンドイッチパネル） ・500℃を超える耐熱樹脂	<社会実装時期> ・2024年目標 <担い手> ・建材メーカー、鹿島建設	・FRP床板での軽量化により 超超構造ビルの実現 ・少子高齢化による作業者 不足のため現場施工の省力 化、短工期化のニーズ	・2024年に高層ビルでの 実装を実現し、適用拡大を 図る ・構造体だけでなく、外装 等への展開を検討
垂直軸型洋上風車 	連続成形技術による長尺 部材(ローのフォーミング/間 欠プレス/DBP)と、連続加 工/接合技術による風車ブ レードの超低コスト/ハイレ ート製造	<社会実装時期> ・COI終了後 <担い手> ・FRP製造メーカー	・垂直軸風車 →一定断面 形状 →熱可塑性CFRP、 GFRPの連続成形・連続組 立による高速化、自動化	・洋上風力発電の導入目標 2050年まで45,000MW ・国内調達比率を2040年 までに60%にする
セルロース樹脂CFRPベレット  セルロース樹脂ベレット セルロースの繊維体化 による熱可塑性化	既存のプラスチック (PP,PA6等)の脱石油 を図る、パルプを原料とする 熱可塑性セルロース樹脂を 開発する	<社会実装時期> ・2025年までに企業での セルロース樹脂の製品化 <担い手> ・ダイセル、日本製紙他	・CO2の排出削減に向けて、 石油由来からカーボンニュート ラルな自然由来材料への転 換が求められている ・イオン液体を使った1段合成 で大幅に反応時間を短縮	・2025年度から環境プラ 用途での商業運転の計画 ・CFRTP用熱可塑性樹脂 の市場は2030年で約560 億円の予測

A イノベーション創出に向けた活動実績

2 目指すべき将来の姿からのバックキャストिंग

目指すべき将来の姿からバックキャストिंगした課題として、フェーズ1では素材開発、製造プロセス、加工技術、装置開発等のシーズ技術の基礎開発を実施した。この結果を踏まえ、フェーズ2ではシーズ技術を集約し、想定するアプリケーションを構成する共通部材となる大型平板や長尺構造材の製造技術を開発する「①共通部材成形技術開発」、長期的かつ革新的な材料技術開発と評価技術を行う「②基盤技術開発」、および具体的なアプリケーションを推進する技術分野を垂直連携した「③アプリケーションタスクチーム」の3グループ体制で研究を推進した。

各研究テーマは企業、機関の枠を超えた異分野・異業種融合の連携により、シナジー効果を発揮することで単独ではできない開発を実施し、フェーズ3ではアプリケーション毎に最適な技術を組み合わせた技術横断型のタスクチームにより社会実装を進めた。

3. アプリケーション（タスクチーム）



1. 共通部材成形技術

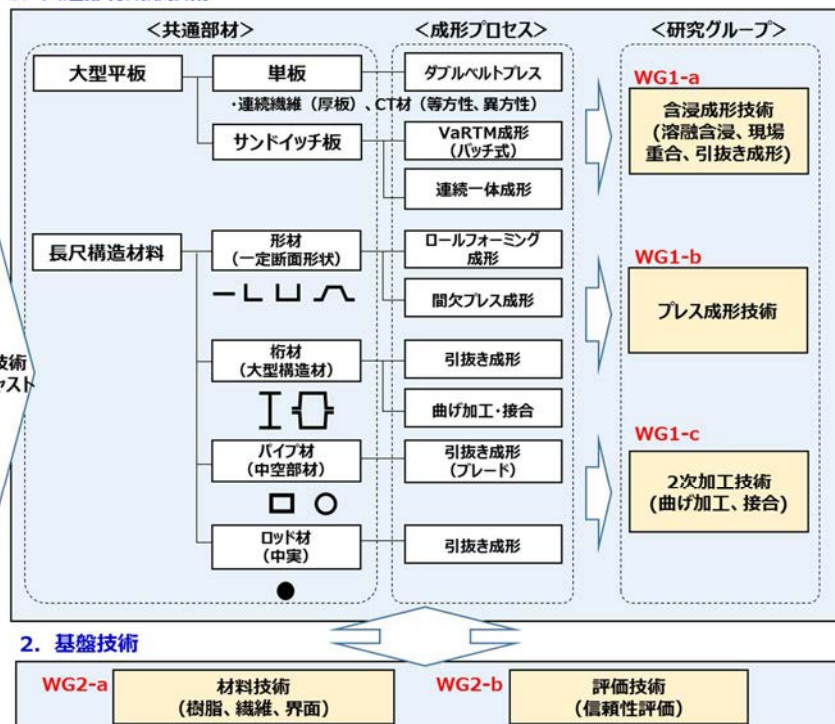
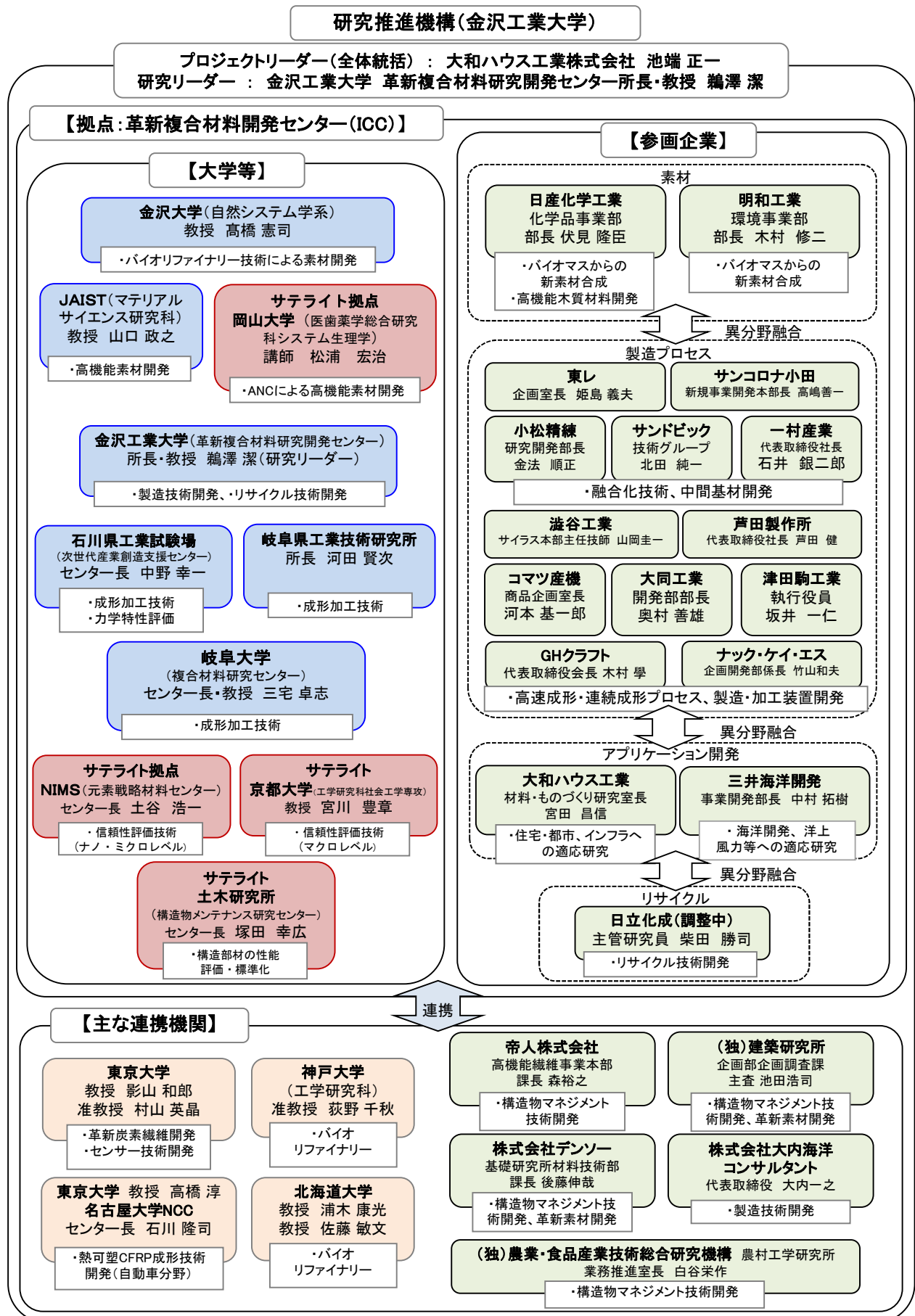


図 A1-2 バックキャストによる研究テーマ

A イノベーション創出に向けた活動実績

3 アンダーワンルーフ

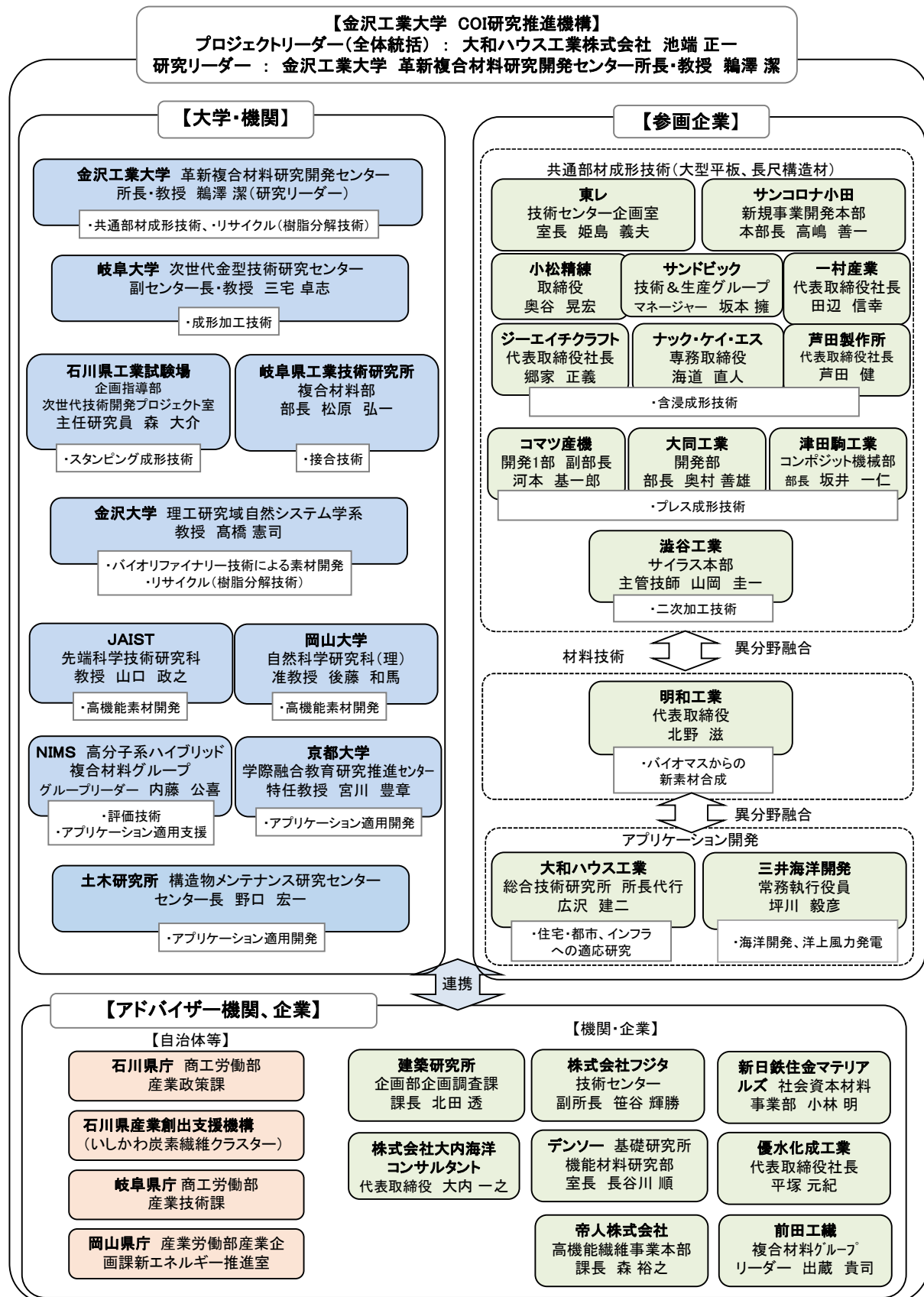
3.1 拠点体制



A イノベーション創出に向けた活動実績

3 アンダーワンルーフ

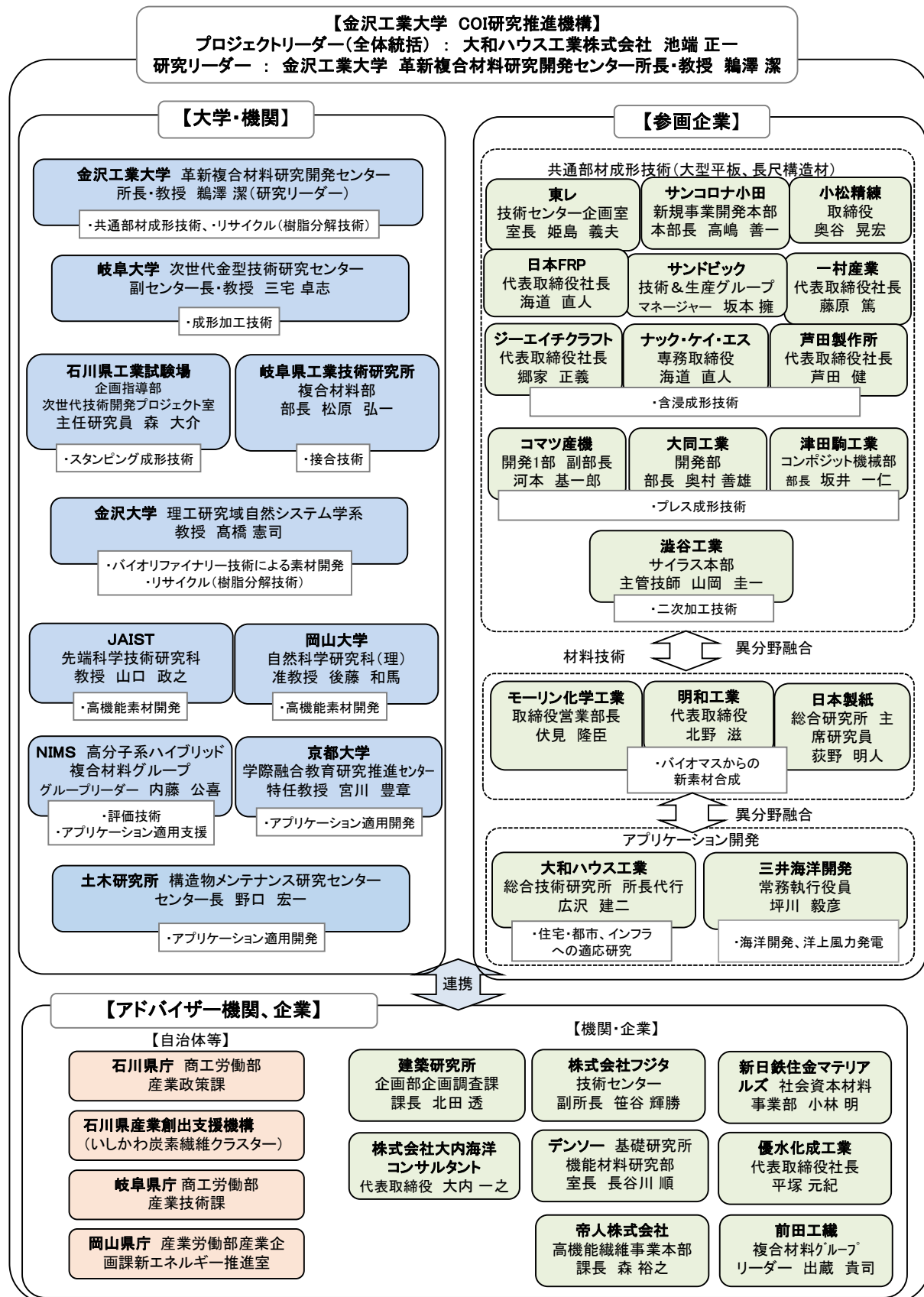
(H28.4.1 研究開発体制再編に伴う変更)



A イノベーション創出に向けた活動実績

3 アンダーワンルーフ

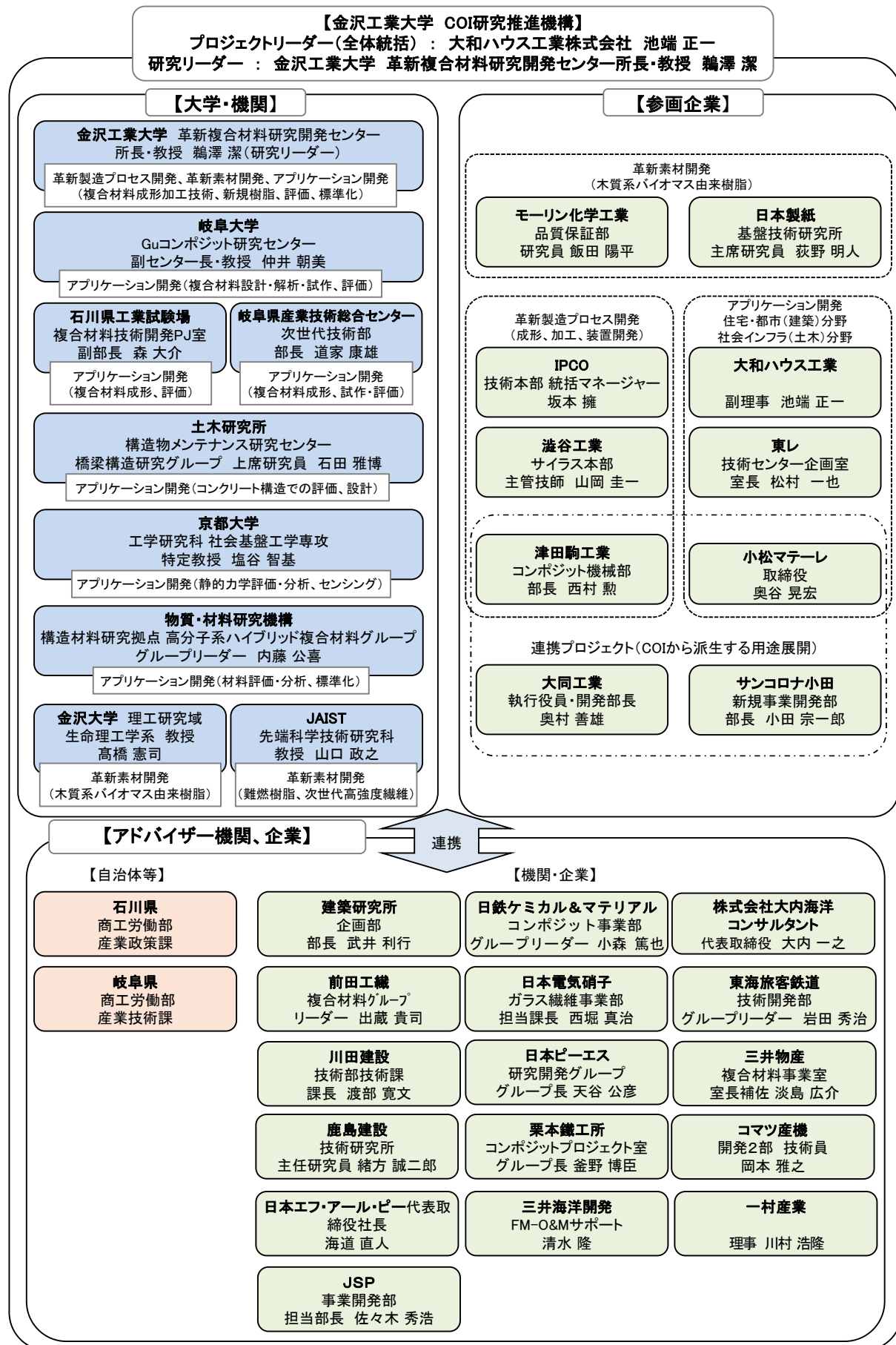
(H28. 8. 1 参画機関追加に伴う変更)



A イノベーション創出に向けた活動実績

3 アンダーワンルーフ

(R1.10.1 参画機関追加削除に伴う変更)



A イノベーション創出に向けた活動実績

3 アンダーワンルーフ

3.2 参画機関 ※一覧は別紙3「参画機関一覧」参照

A イノベーション創出に向けた活動実績

3 アンダーワンルーフ

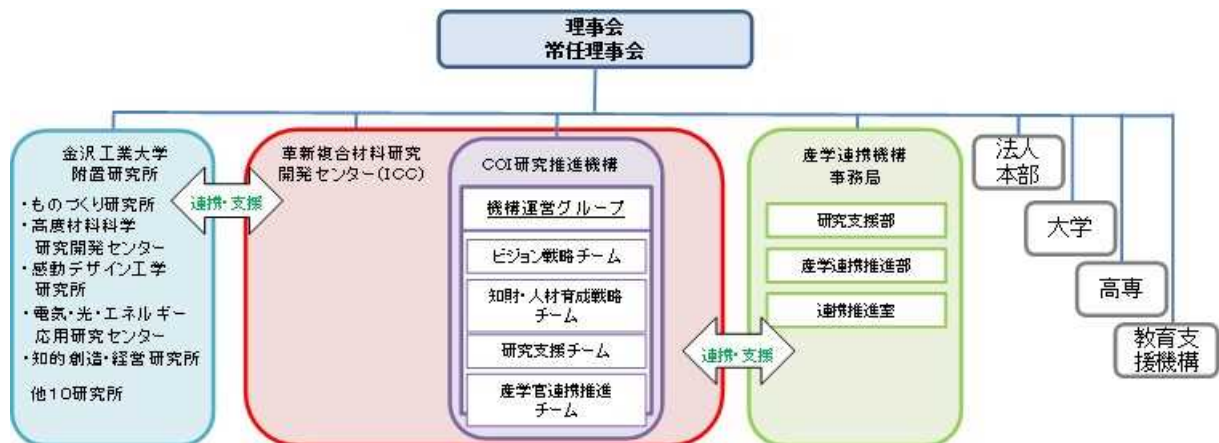
3.3 拠点のマネジメント体制と仕組み・実績

(1) 拠点マネジメント体制

拠点の研究開発活動を円滑に推進するためには、独立した権限を有する組織体制の整備が必要であり、大学組織と同格の位置付けで、理事会の直下に新たに、COI 研究推進機構を設置した。さらに、本事業の研究開発の中心の実施場所である「革新複合材料研究開発センター」を COI 研究推進機構内に位置づけることにより、COI 研究推進機構が直接運営する体制を整備した。

これにより、拠点マネジメント組織である本機構に、強力な権限が付与されることになり、本部組織のルールに縛られない独立した運営体制を可能とすることで、迅速な意思決定と大学内外の機構スタッフの能動的な活動を可能とした。

また、本機構は NIMS や岡山大学等のサテライト拠点と連携して戦略立案や調整等の役割を果たし、本拠点から派生する新たなシーズ・ニーズを対話型ワークショップ等により発掘を行った。さらに、本機構の運営に当たっては、これまで、同大学の附置研究所及び研究センターの運営で蓄積してきたコーディネート活動等の知見が活用できるほか、革新的な成果を生む源泉として、柔軟で様々な属性の幅広い意見を取り入れるため、学内外から参画機関の若手、女性人材を含む人的、リソースの提供を積極的に受け入れている。



※H28. 4. 1 産学連携機構事務局は産学連携局に、産学連携推進部は連携推進部に改称。連携推進室は廃止。

※H30. 4. 1 ものづくり研究所と高度材料科学研究開発センターを統合し、高信頼理工学研究センターを開設。

※H31. 4. 1 研究支援部と連携推進部を統合し、研究支援推進部を設置。

図 学校法人金沢工業大学におけるCOI研究推進機構の位置付け

(2) PL、RLによる拠点マネジメントの仕組み・手法と実績等

金沢工業大学では、本提案を実現するために、新たに、本機構内に「機構長（プロジェクトリーダー）」、「副機構長（研究リーダー）」、研究開発を統括する「研究推進グループリーダー」、さらに、拠点活動を支える「機構運営グループ」を設置することで、本事業を円滑に運営するための体制を構築した。

また、本拠点の取り組みを指揮する機関として、外部の有識者からなる推進委員と参画機関などで構成される「研究推進会議」を設置することで、運営方針についての助言を得ている。

運営に関しては、参画機関、経済界や産業界の外部有識者等から構成される運営委員会が、本事業全体の方向性を審議し、それらに基づき、本機構が、組織運営及び研究開発活動を推進した。

なお、研究開発の進捗を円滑に進めるため、ビジョン戦略チームが中心となって、研究推進グループと合同で拡大ワーキンググループ会議（以下拡大WG）や研究テーマ毎のワーキンググループ会議（以下、WG）を運営することにより、本事業全体の進捗管理と情報共有を図り、ビジョナリーチームや構造化チームの評価結果を、活動内容にフィードバックすることで、本拠点のパフォーマンスを高めた。

A イノベーション創出に向けた活動実績

3 アンダーワンルーフ

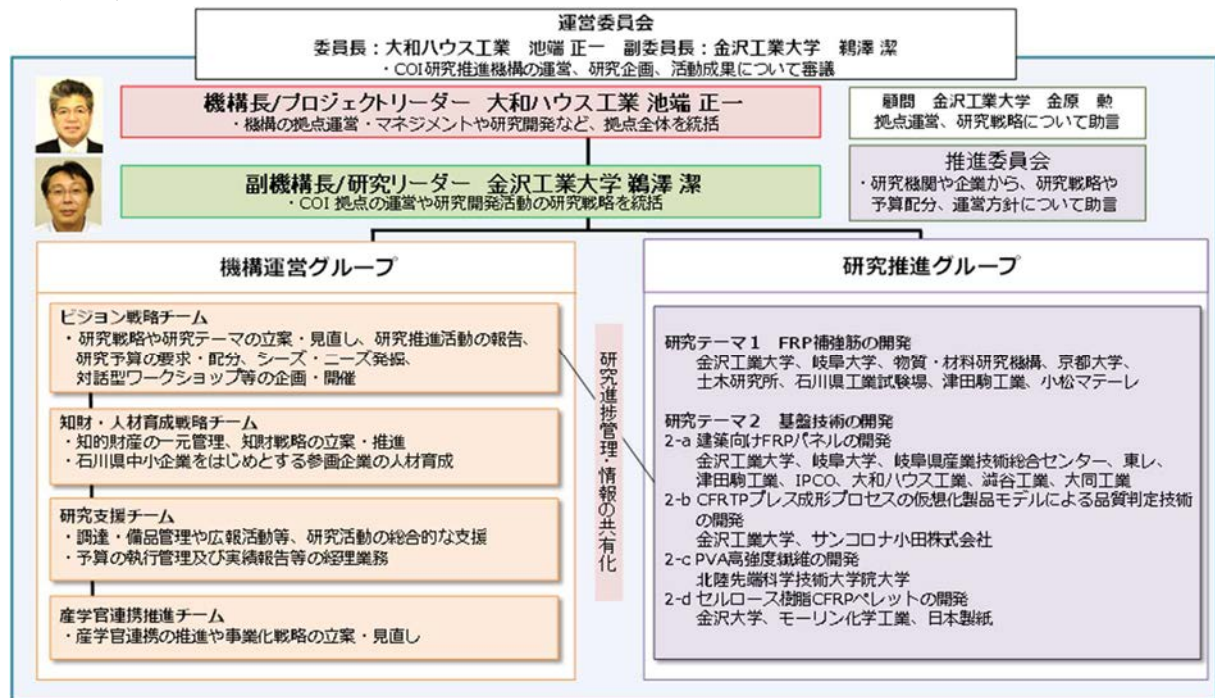


図9 金沢工業大学 COI 研究推進機構 (2020.4.1 現在)

以下に、それぞれの役割について、記載する。

<機構長（プロジェクトリーダー）：大和ハウス工業（株）総合技術研究所 副所長 池端 正一>

機構長は、本拠点の活動を強力なリーダーシップで牽引していくことが期待されているが、基礎研究段階から事業化に至るフェーズを通じて、切れ目なくイノベーションを実現していくためには、企業活動の実績に裏付けられた高いマネジメント能力を発揮した。

成果の社会実装にも力を入れ、インフラ以外の分野への用途展開も積極的に推進した。（アシックスのピンなしスパイクやアルケリスの工場用アシストスーツなど。）

<副機構長（研究リーダー）：金沢工業大学 教授 鶴澤 潔>

副機構長は、機構長の役割を補佐し、本機構の研究戦略やアジェンダ（行動計画）に沿った研究開発を強力に推し進めるため、機構運営グループと研究グループを一体的に運営した。

人員・予算・施設利用等の調整、知財戦略マネジメントの統括等を行うとともに、対外的には、ビジョナリーチームや構造化チームとの連携・調整窓口を担い、改善・見直しを含めた研究開発活動の進捗管理を行った。

本拠点は、多数の組織により構成され、バイオ原料の育成から材料、装置及び社会実装やリサイクルまで、広範囲に跨る研究開発を実施していくため、本副機構長を機構長の直下におき、垂直連携と異分野・多企業の技術融合を実現しつつ、拠点の研究開発の全体最適化を図るためのスーパーバイズ（管理・監督）を行い、産学間両者の橋渡し役としての役割を果たした。

<機構運営グループ>

本拠点の特徴である多大学・多企業融合による研究を効率的に進め、かつ研究成果を社会実装にまで到達させるために、機構長、副機構長、研究グループリーダーの指揮のもとに、研究グループの活動とリンクさせながら機構運営を行う機構運営グループは、「ビジョン戦略チーム」、「知財・人材育成戦略チーム」及び「研究支援チーム」から成り、単なる拠点運営の枠を超えた能動的な活動を行った。

（ビジョン戦略チーム）

ビジョン戦略チームは、社会背景の変化によるシーズ・ニーズを把握することにより、随時、研究体制を見直していくことで、円滑に研究開発を進める体制を整える役割を担った。

A イノベーション創出に向けた活動実績

3 アンダーワンルーフ

具体的には、異分野・異業種、さらに女性や若手人材を参加対象とした対話型ワークショップを開催するとともに、先端技術の分野で常に日本とトップ争いを演じている欧米地域などを対象とした国際技術動向の調査や材料から生産技術までの広範な技術分野やその用途開発などの特許調査・マーケティング調査を実施。参画企業の組み替えや外部の研究機関からの研究者の招へいによるチームの再編なども含めた研究体制の見直しを行った。

（知財・人材育成戦略チーム）

知的財産については、本提案を通じて生み出される知的財産の出願から、維持管理、ライセンス契約の締結までを担当した。アンダーワンルーフで複数の参画機関が共同で研究テーマに取り組むという特徴を最大限に活かすために、本機構が特許を一元して管理することにより、参画企業が積極的に特許を出願できる体制を構築した。

また、人材育成についても、異分野融合・技術融合による研究開発活動を通じて、プロジェクトマネジメント能力やコミュニケーション能力に長け、知的財産にも精通した若手や女性人材を含む研究者や研究開発のコーディネータ人材を育成している。

（研究支援チーム）

研究支援チームは、学内の既存組織と連携し、拠点における研究資金の経理、調達・備品管理、業務管理、広報活動等、総合的な支援を行うとともに、本拠点と学外組織（研究機関、企業、自治体等）との連携・調整窓口を担当した。

また、経理等に関する業務従事者については、本提案に参画する他大学などから経験豊富な人物を出向等の形で、本拠点の専任者として受け入れることで、組織間の連携と円滑な事業の運営を図った。

（産学官連携推進チーム）

C0I プログラムでは得られた成果からベンチャー企業の立ち上げや参画企業の事業化などを実現していくことが重要な課題となる。そこで C0I 研究推進機構に産学官連携推進チームを設置し、石川県産業政策課と連携する（県から C0I 機構への人材の派遣等）ことで、アプリケーションの許認可や事業化資金支援など行政側からの支援についても重点的な取り組みを実施した。

4 研究開発テーマの成果

4.1 FRP 補強筋

テーマリーダー（氏名、所属、役職）：	石田 応輔、金沢工業大学、研究員（～H31.3） 上田 久偉、金沢工業大学、研究員（H31.4～）
サブテーマリーダー（氏名、所属、役職）：	内藤 公喜、物質・材料研究機構、グループリーダー（R2.4～） 保倉 篤、金沢工業大学、研究員（R2.4～）
研究開発実施期間：	H30 年 4 月～R4 年 3 月
参画機関：	金沢工業大学、物質・材料研究機構、小松マテーレ（H31.4～）、岐阜大学（R2.4～）、京都大学（R2.4～）、土木研究所（R2.4～）、石川県工業試験場（R2.4～）、津田駒工業（R2.4～）

（1）テーマの概要と目指すべき将来の姿（拠点ビジョン）との関係

コンクリート補強筋における鉄筋やエポキシ被覆筋の代替として FRP 補強筋を開発することで、軽くて腐食しない補強筋を実用化する。FRP 補強筋は腐食しないためコンクリート構造の寿命を大幅に伸ばすことが可能であり、またクラックによる水分の侵入を考慮する必要がないため、かぶり厚を最小にするなどコンクリート構造自体を軽量化することも可能となる。さらに FRP 筋の軽量化により運搬や現場施工が軽減でき現場の省人化、工期短縮も可能となる。このように新たな設計手法や施工から維持管理、長寿命化まで含め LCC の観点で大きなメリットがあると言える。従来技術として FRP 補強筋はすでに製品化させているものも存在するが、本開発では FRP 補強筋（FRP ロッド材）の高速引抜成形技術を確認することにより、従来技術よりも生産性が高く、これまで採用のハードルであったコストについても大幅に下げることが可能となる。また FRP 筋のマトリクス樹脂に熱可塑性樹脂を使う事により、容易な二次加工が可能である点も従来にないメリットと言える。コンクリート構造全般に適用可能であるが、腐食しないことから、特に塩害地域や港湾等での利用が期待されている。また、非磁性の材料を用いることが要求されているリニア中央新幹線のコンクリート構造への適応も期待され実装化にむけた研究開発を進めている。また、前述の検討項目を活かし道路、橋梁等、土木構造への FRP 補強筋の応用までを目指すことで長寿命なコンクリート構造を実現し、社会コストの低減を図り安心・安全な次世代インフラの構築に貢献することが出来る。

（2）想定する製品・サービスについて（担い手、社会的インパクト・経済的インパクト）

①リニア中央新幹線 コンクリート構造用 FRP 筋

リニア中央新幹線 コンクリート構造への非磁性 FRP 補強筋の適応

JR 東海によるリニア中央新幹線は、2027 年に東京 - 名古屋間（285km）が開通予定であり、更に 2035 年には東京 - 大阪間（438km）まで延伸予定である。リニア中央新幹線では非磁性の材料が求められており、コンクリート構造の補強筋も非磁性体であることが必須である。また、材料も安価であることが要求されている。非磁性体のコンクリート補強筋としてマンガン鋼等が挙げられるが、非常に高価であり、金属のため腐食する欠点がある。そこで、非磁性体であり腐食しないバサルト繊維を用いた FRP ロッド材（BFPP）の FRP 補強筋としての適応が期待されている。現在、事業化に向けて体制を整理しており、2023 年に生産供給開始を目指している。

②高弾性が要求されるコンクリート構造体を対象とした FRP 補強筋の開発

道路、鉄道関係の梁や桁、まくらぎなど、より高弾性が要求されるコンクリート構造体への FRP 補強筋の適応を目的に、バサルト繊維 FRP 補強筋（BFPP）よりも高弾性な炭素繊維 FRP 補強筋（CFPP）の開発を行う。また、本拠点で開発した CFRP 補強筋（カボコーマ）と併せて、PC 緊張材としてのコンクリート構造体の評価を進めることで、軽量かつ腐食しない省施工なコンクリート構造体の用途が拡大できる。

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

(3) 研究開発期間終了時の達成目標

- ・リニア中央新幹線のコンクリート構造への FRP 補強筋の適応のために FRP 筋の仕様の決定。
- ・FRP 筋の高速引抜成形の事業化に向けた事業者の決定と技術移管や製造ラインへのスケールアップの準備と体制を整える。

(4) 主な成果と達成状況

OFRP 筋の高速引抜成形（金沢工業大学、津田駒工業）

図 4.1-1 引抜成形モデルに現場重合型の熱可塑性樹脂を用いた従来型の引抜成形の成形モデルと、熱可塑性樹脂を用いた成形モデルの概要を示す。押出機内で加熱により熔融した樹脂を押出して含浸ヘッドの槽に満たし、ロービングヒーターにより温められたガラス繊維や、バサルト繊維を投入することで熔融した樹脂が繊維内部に含浸する。樹脂が含浸したストランドロッド材をダイに通しながら引抜装置によって引抜くことで成形できる。この装置の最大の特徴は引抜装置のローラーの角度を可変できることである。角度をつけて引抜くことでロッド材に撚りがかかる構造になっている。撚りをかけながら引抜くことで、繊維の毛羽立ちを抑えることと、高速成形が可能になる。従来の現場重合型の熱可塑性樹脂を用いた引抜成形は、重合反応を要するため成形速度が 0.8 m/min 程度が最速とされている。対して、本研究では、硬化反応や重合反応を必要とせず、既存の樹脂ペレットやパウダーを熔融し、繊維に含浸させ冷却・固化することによって引抜成形が出来ることも、高速成形が可能となる一因である。本研究における成形速度の最終的な目標は 1m/sec である。

これまで、引抜機の増設および含浸ヘッドの改造など装置改造に加え、バサルト繊維の糸道の検討をしたことにより、 V_f とロッドの径の制御が可能となった。

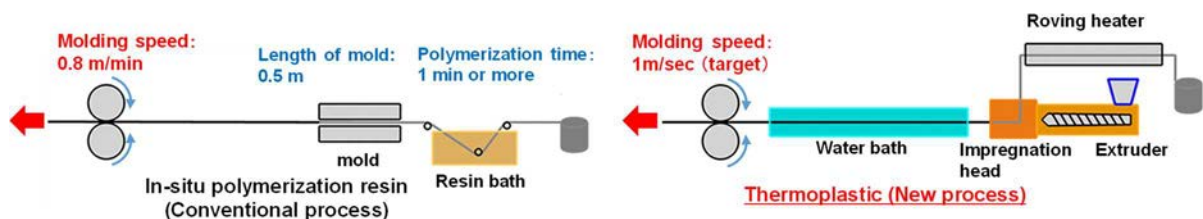


図 4.1-1 引抜成形モデル

FRP 筋の事業化・連続生産を見越して、巻取機の開発を行った。成形された FRP ロッドを連続的にリールに巻取り、長尺の FRP ロッドを成形するための装置である。連続で巻取ることによって将来的には事業化におけるオペレーションの少人数化と、撚線加工による太径化および長尺のロープ化が可能となる。図 4.1-2 に開発した巻取装置の写真を示す。本引抜装置は撚りを加えながら成形することにより、繊維の毛羽立ちや糸切れを抑えることができ、そのため、高速成形を可能にしている。しかし、撚りを加えながら高速で引抜成形を行うことで、出口以降では、解撚（撚りを取り除く）が必要であり先端は常に拘束されてはいけなない。解撚が滞ると、撚りが引抜装置内部まで伝搬し、ロッドの折れやキックなどが発生するため成形が出来なくなる。巻取機は解撚と同時に高速でリールに巻取る必要がある。解撚と巻取りをそれぞれ二軸で回転させることでロッドを連続的に巻取れることが可能となった。



図 4.1-2 開発した FRP ロッド巻取機

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

BFPP の耐アルカリ性の向上

コンクリートは pH11 以上の高アルカリ性の性質である。そこで FRP 補強筋として FRP ロッド材を使用する際の信用性確認のため、強化繊維、FRP ロッド材のアルカリ浸漬を行い、引張試験により物性確認を行った。ロッドの耐アルカリ性対策として、繊維の量（ロービングの本数）と出口の大きさにより樹脂により被膜層の厚みを変更させ、それぞれの耐アルカリ性を確認した。

図 4. 1-3 にそれぞれの耐アルカリ性試験の結果を示す。ロッドのアルカリ浸漬後の強度の保持率を示している。詳細は省略するが、a, c は被膜層が厚く、b, d は被膜層が薄いロッドである。被膜層が厚かった a と c の保持率が 100% 近くとなり高い耐アルカリ性を示した。特に、c は 28 日間のアルカリ浸漬後においても引張強さがほぼ保持率が低下することなく変化がなかった。そこで c の構成を現在の BFPP の仕様とした。

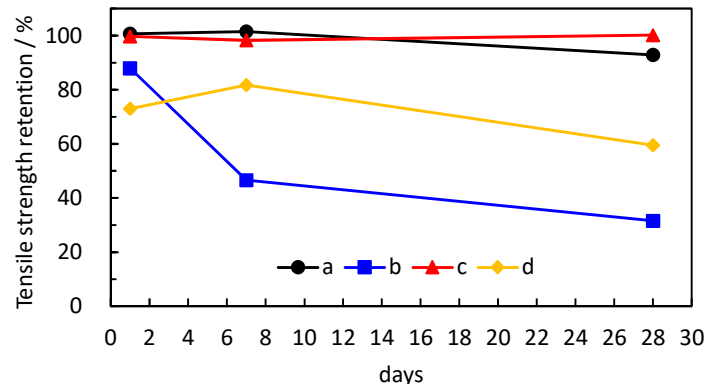


図 4. 1-3 アルカリ溶液浸漬後の BFPP の強度保持率

OBFPF ロッドにおける撚り角度が力学的特性に及ぼす影響（石川県工業試験場）

鉄筋相当の太径化した BFPP ロッドの性能評価の一つとして BFPP を 7 本束にした BFPP 撚線の撚り角度の影響を評価した。撚り角度を変えた BFPP 撚線の引張試験によって、撚り角度が引張物性に与える影響を明らかにした。検討した撚り回数（撚り角度）では、引張強度、および、引張弾性率ともに影響しないことが分かった。

OCF および BF を用いた熱可塑性樹脂による FRP 材料の非破壊品質評価に関する検討（京都大）

FRP 筋の品質管理技術として 2 種の非破壊検査による検討を行った。超音波加振と赤外線サーモグラフィとの組み合わせにより CF を用いた熱可塑性樹脂による FRP 素線の損傷箇所を可視化する手法（以下、品質管理法 A）、およびオートエンコーダを用いたニューラルネットワークの形成による画像データに基づく BF を用いた熱可塑性樹脂による FRP 素線の損傷箇所を検知する手法（以下、品質管理法 B）とした。超音波加振を与えることで図 4. 1-4 に示すような赤外線画像内の温度上昇の可視化結果が得られる。図中の①の領域は上述の損傷箇所として表面に亀裂が確認でき、画像として温度上昇（+10℃程度）が確認できる。

いずれの手法についても熱可塑性樹脂による FRP 材料の非破壊品質評価として提案できる可能性が高いことが分かった。

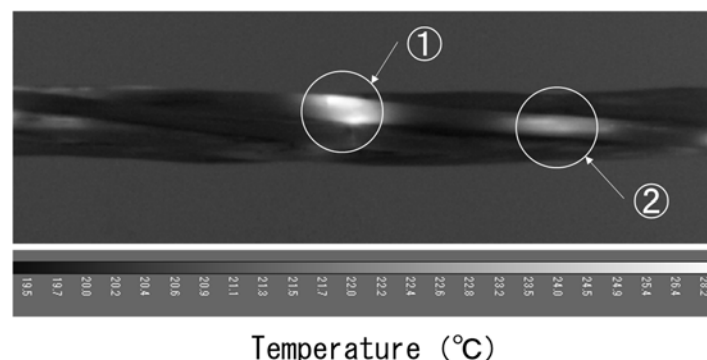


図 4. 1-4 CFRTF 撚り線の超音波加振に伴う赤外線画像

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

○ポリプロピレンを用いた CFRP のドライ環境下での引張クリープ強度評価（金沢工業大学）

樹脂の粘弾性挙動に成立する時間－温度換算則（Time-temperature Superposition Principle: TTSP）を基盤として、CFRP の時間および温度に依存する静的、クリープ、疲労強度のばらつきを考慮した統計的定式化を行ない、長期疲労挙動を予測するための加速試験法（Accelerated Testing Methodology: ATM）を開発した。そして、汎用的なポリプロピレンを用いた一方向 CFRP を対象に、時間および温度に依存する引張および曲げの静的、クリープ、疲労強度のばらつきを考慮した定式化を行ない、長期のクリープおよび疲労強度を予測し、それぞれの特徴を明確にした。

○信頼性評価技術の開発（物質・材料研究機構（NIMS））

本 FRP 補強筋の力学特性データは非常に少ない。実構造部材に適用する場合、本材料の信頼性を保証する各種の力学特性データが必要である。信頼性評価技術では、FRP 補強筋の複数の温度環境下での静的強度のバラツキを含めた静的引張試験、異なる平均応力／負荷振幅（応力比 R （＝最小荷重／最大荷重））での疲労引張試験および引張クリープ破壊試験を行った。本成果により、FRP 補強筋の長期負荷耐久性がデータ駆動型で予測できる。

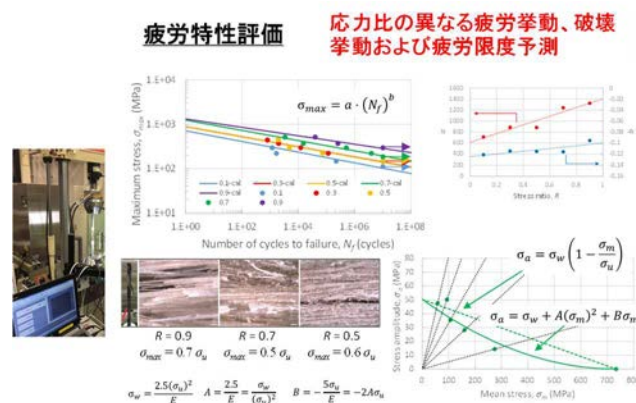


図 4.1-5 FRP 補強筋の長期負荷耐久性評価

(5) 今後の課題と対応方針

FRP 筋の事業化に向けて、特許等の知財を整理し企業への技術移管を本年度中に目途をつけることが必要である。現在、COI 参画企業との協議を進めており、生産拠点（場所）の確保、設備投資、生産体制の整備を進め、本年度中に事業化の体制を立上げる計画である。

(6) その他特記事項

なし。

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

4.2 建築向け FRP パネル

テーマリーダー（氏名、所属、役職）：	関戸 俊英、金沢工業大学、技監・教授 中島 正憲、金沢工業大学、研究員（H31.4～R2.3）
サブテーマリーダー（氏名、所属、役職）：	宮田 昌信、大和ハウス工業（H31.4～R2.3） 高岩 裕也、金沢工業大学、研究員（H31.4～R2.3） 中島 正憲、金沢工業大学、研究員（R2.4～） 西田 裕文、金沢工業大学、研究員（R2.4～）
研究開発実施期間：	H30 年 4 月～R4 年 3 月
参画機関：	金沢工業大学、東レ（～R2.3）、大和ハウス工業、石川県工業試験場（H31.4～R2.3）、岐阜大学（R2.4～）、岐阜県産業技術総合センター（R2.4～）、津田駒工業（R2.4～）、IPC0（R2.4～）、大同工業（R2.4～）、サンコロナ小田（R3.4～）

（1）テーマの概要と目指すべき将来の姿（拠点ビジョン）との関係

建築分野や土木分野の構造の軽量化は超高層建築や従来インフラ構造の再利用に有効であり、柔軟な設計が可能な FRP パネルの開発、更に、FRP パネル構造を建築分野に適用するために、大臣認定に対する新規耐火構造試験評価方法の検討/整備を進める。また、従来に存在しないマトリックス樹脂を開発し、建築構造物の更なる軽量化に貢献する。

拠点は超高層建築を成立させるためには、床構造の軽量化を実現させるための FRP 床版を完成させるとともに、その評価方法を業界に提案していく。

（2）想定する製品・サービスについて（担い手、社会的インパクト・経済的インパクト）

ゼネコンから大きな要望のある超高層建築の FRP 床版を製品として想定。FRP パネルを適用することにより、従来構造に対して大幅な軽量化を実現し、地盤強化（杭打ち等）の削減、建材の軽量化による施工性（搬送、組立など）が軽減、省人化も可能となるため、自動施工化、工期短縮により、従来建材よりトータルコストの軽減も図れる。

（3）研究開発期間終了時の達成目標

本事業において、建築向け FRP パネルの耐火構造、革新的な耐火構造用樹脂の開発を完了させる。また、FRP パネルを建築構造に適用、開発速度を加速する新規耐火構造試験評価方法の検討を完了する。

（4）主な成果と達成状況

分野問わず、FRP に関わる耐火試験方法を収集した結果を図 4.2-1 に示す。他分野と比較して建築分野は長時間、高温の試験となっており、これが建築分野への FRP 適応の妨げとなっている要因であることが考えられる。そこで、長時間、高温の試験に耐えて、かつ軽量の耐火被覆構造を開発した。開発した耐火被覆構造 SK3/GR8 の試験結果を図 4.2-2 に示す。発泡断熱層 SK3 単体および吸熱層 GR8 単体では実現できなかった耐火性能を複合化することで達成した。これは、発泡断熱層の裏面温度の急激な上昇を吸熱層が抑えているため、SK3 の過剰な材料の軟化が抑制されたためであると推察する。また、吸熱継続時間が大幅に長くなることが確認されたが、GR8 の蒸発した結晶水が発泡断熱層を通過、冷却するためであると推察する。

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

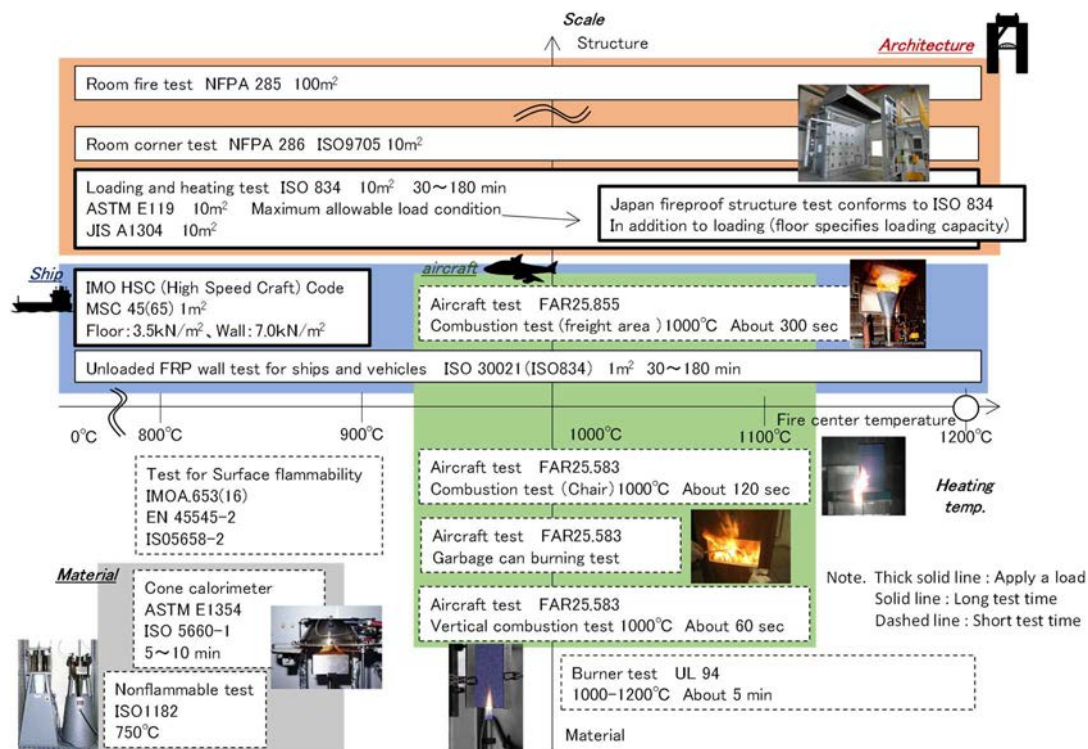


図 4.2-1 Position of fire test in architecture field

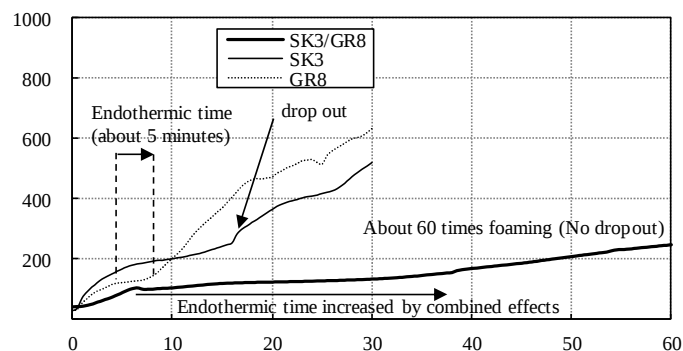


図 4.2-2 Continuation of thermal insulation effect by combined effect

FRP 製のパネル材（床版）を開発するに当り、建築法に基づく耐火基準に準拠することが求められる。2 時間耐火試験にクリアするためには、図 4.2-3 に示すような、軽量コア部分を FRP がサンドイッチする構造体の両面に断熱性能の高い耐火被覆材を貼り付けることにより、パネル材を構成することが有効であるとの結論に至った。すなわち、火災時 FRP 部分は直接炎に曝されることはなく、耐火被覆材により温度上昇がかなり抑えられる。その時の FRP のマトリックス樹脂に関する設計思想としては二通り考えられる。一つ目は、2 時間耐火試験中に FRP の温度上昇が 200°C 以下に抑えられるほど耐火被覆材が厚く、マトリックス樹脂の T_g が 250°C 以上あれば 200°C 以下の荷重性を維持することができる（ストラテジー 1）。二つ目は、更なる軽量化のため耐火被覆材を薄くし、FRP の温度が 500°C 付近まで達する場合、マトリックス樹脂の耐熱分解性が 500°C 以上であり且つ T_g レスであれば、荷重性を維持できる（ストラテジー 2）。ストラテジー 1 用の樹脂として、室温での粘度が 681mPa・s で 40°C 程度の加温で VaRTM も可能なアクリル系樹脂「FPS-5」を開発した。80°C という比較的低温での硬化が可能で、従来の成形方法にマッチしている上、硬化後 T_g レスとなり、目標の $T_g \geq 250^\circ\text{C}$ をクリアした。図 4.2-4 に示す「FPS-5」をマトリックスとする GFRP の動的粘弾性測定（DMA）結果によると、GFRP が完全な T_g レスとなっているため、200°C でも優れた荷重性を有していることが分る。

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

ストラテジー2用樹脂として、500℃での耐熱分解性を有することはもはや有機物ではほぼ不可能であるため、図4.2-5の化学構造式で示される「ケイ素酸化物骨格の樹脂」で、環状部分を開環させ

ることにより硬化させる‘Me-SQ-Siloxn’を開発した。これにより、樹脂硬化物は主骨格及び架橋点のいずれもがケイ素酸化物となり、有機物特有の500℃以下の温度での熱分解を引き起こさないことが期待される。

この樹脂をマトリックスとしたGFRPは、図4.2-6に示す通り、示差熱重量分析(TG-DTA)において500℃以下での積極的な熱分解は生じないことが明らかとなった。また、図4.2-7に示すDMA測定結果から、本樹脂をマトリックスとするGFRPもまたT_gレスであることが確かめられた。以上の結果より、500℃でも化学的に分解せず、T_gレスであることから、火災時FRP層の温度が500℃近辺になっても載荷性を有していることが期待できる。

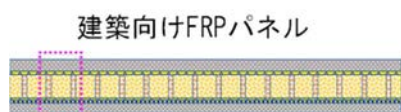


図3 建築向けFRPパネル

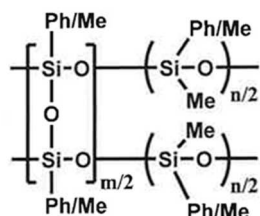


図4.2-5 ケイ素酸化物骨格樹脂の化学構造

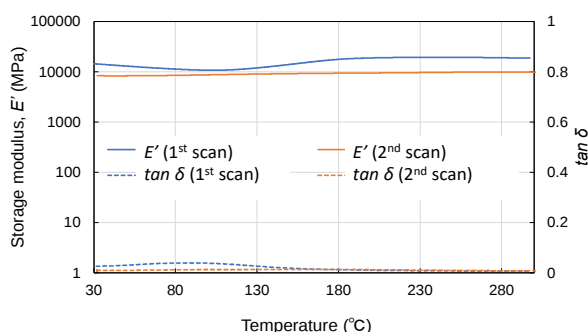


図4.2-4 ‘FPS-5’ をマトリックスとするGFRPのDMA測定結果

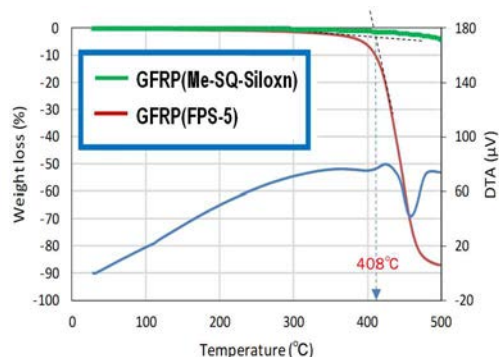


図4.2-6 ‘Me-SQ-Siloxn’ をマトリックスとするGFRPの熱重量分析結果

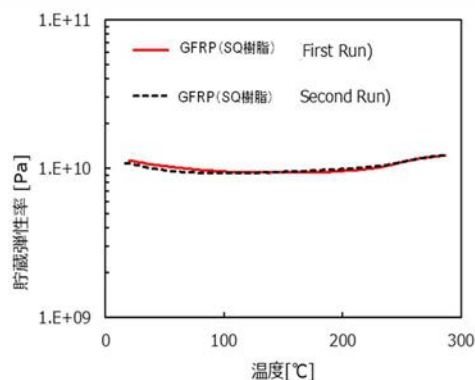


図4.2-7 Me-SQ-Siloxn' をマトリックスとするGFRPのDMA結果

建築、歩道橋、土木分野を対象としたサンドイッチパネルの低コスト製造方法に関して、連続成形の製造コンセプトを検討、ダブルベルトプレス方式の成形方法及び材料選定等を実施した。

建築、土木分野の床版を対象としたサンドイッチパネルの低コスト製造方法に関して、検討を進めてきたダブルベルトプレス方式の連続成形コンセプトに対する課題を明確するために、既存のダブルベルトプレスの小規模改造を行い、連続成形の実証試験を実施（図4.2-8）、1m幅のサンドイッチパネルに対して、成形速度30m/hを達成するめどを得た。

サンドイッチパネルの連続成形装置の開発検討に関しては、IPC0社と既存のダブルベルトプレスの問題点及び解決策の議論を重ね、開発装置概要をまとめた。（図4.2-9）

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

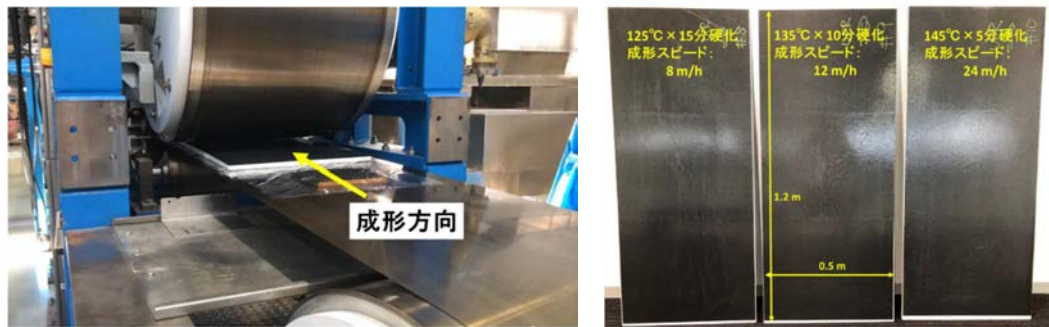


図 4.2-8 サンドイッチパネルの連続成形試験状況及び成形サンドイッチパネルの外観

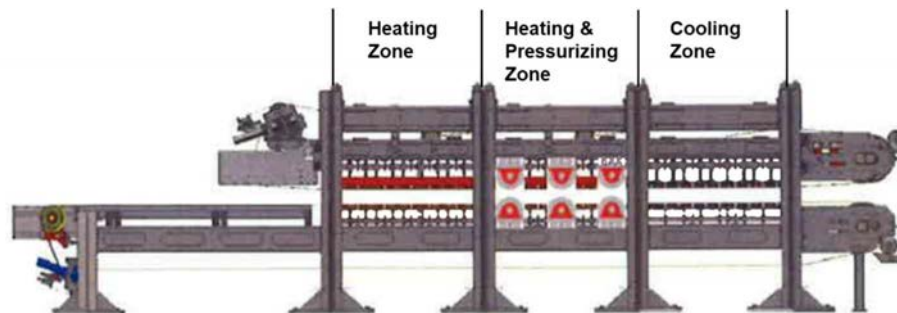


図 4.2-9 IPCO 株式会社にて検討したサンドイッチパネル連続成形装置の概要図

FRP パネルを建築に適用する場合、出火から鎮火に至るまでに人命と建物（構造）の安全を確保するために、長時間の耐火要求が建築基準法により規定されており、新規の材料を建築物に適用する場合、最終的に実大規模の実証試験による国土交通省大臣の認定が必要になる。図 4.2-10 に伝統的な耐火構造の開発プロセスの概念図及び検討してきた FRP パネルにおける耐火構造の開発プロセスを示す。FRP パネルに対する耐火構造の評価は、耐火試験と構造試験に分けて評価することが大きな特徴となる。耐火試験は、小型もしくは中規模炉にて、ISO 834 に準拠した加熱下（2 時間耐火基準等）で耐火被覆材の評価及び FRP 床（構造）パネルの耐火被覆材界面の温度上昇曲線を取得する。一方、構造試験は FRP ではクーポンレベルの各種強度試験を耐火試験で得られた上限温度下で実施する。また、実大構造レベルの FRP 床パネルを耐火試験で取得した FRP 床パネルと耐火被覆材界面の最大温度を模擬した環境で載荷し、要求事項である最大たわみ量及び最大たわみ速度を評価する。

耐火構造の FRP に対する温度要求特性を取得し、その温度領域（最大温度 200℃）での静的引張／静的圧縮試験のクーポンレベルの特性試験を実施。ガラス転移温度 T_g 以上で著しい強度低下及び弾性率の低下が確認できた（図 4.2-11）。更に、引張強度よりも圧縮強度の方がより温度の影響を受けていることが確認できた。また、通常はクーポンレベルの試験を実施しない高温域における試験ノウハウも習得することができた。

更に、新規開発の大型高温構造試験装置を導入した。導入した装置は長さ 4000 mm × 幅 600 mm × 最大高さ 350 mm 規模の試験供試体の評価が可能である。装置の写真を図 4.2-12 に示す。最終年度に大型高温構造試験装置で高温下の試験を実施、クーポンレベルの強度試験との相関関係についての検証をスタートさせた。COI プロジェクト終了後、共同研究先との継続される研究活動の中で、詳細な検証、解析を進める予定である。

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

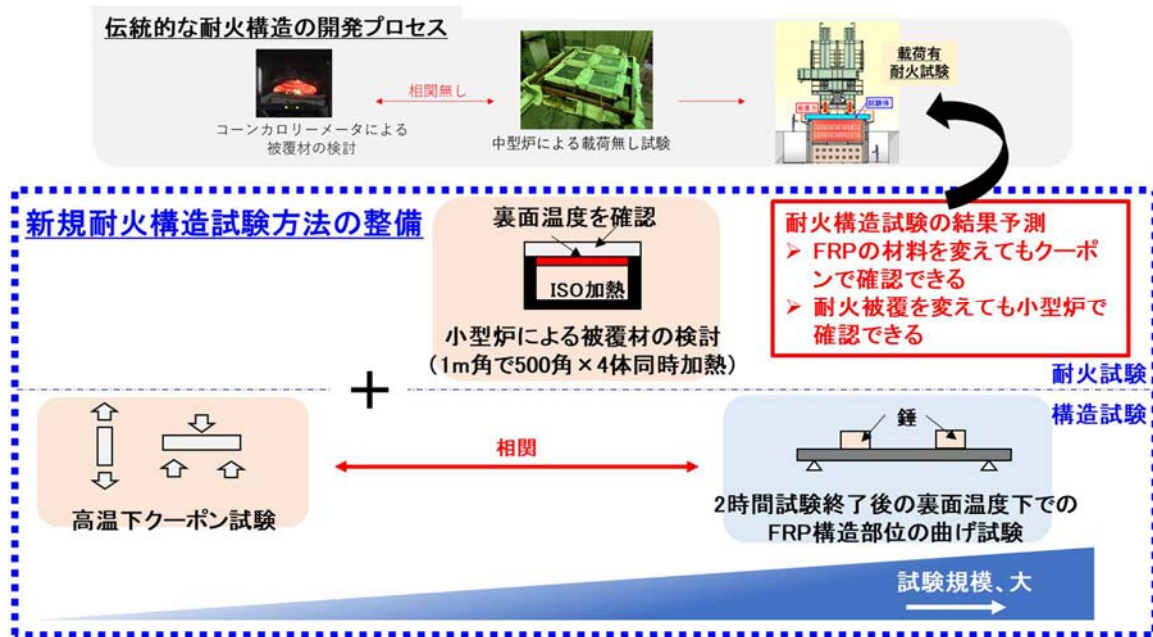


図 4. 2-10 建築向け FRP パネルにおける耐火構造の開発アプローチ

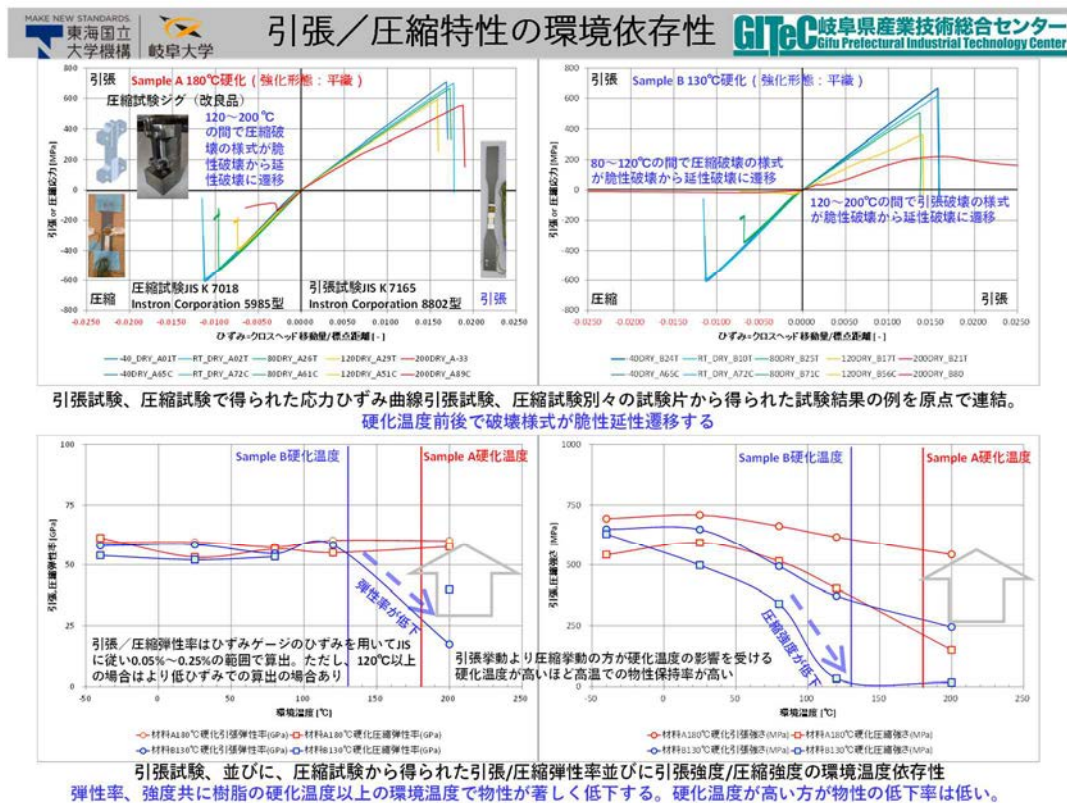


図 4. 2-11：引張圧縮特性の環境依存性評価結果

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

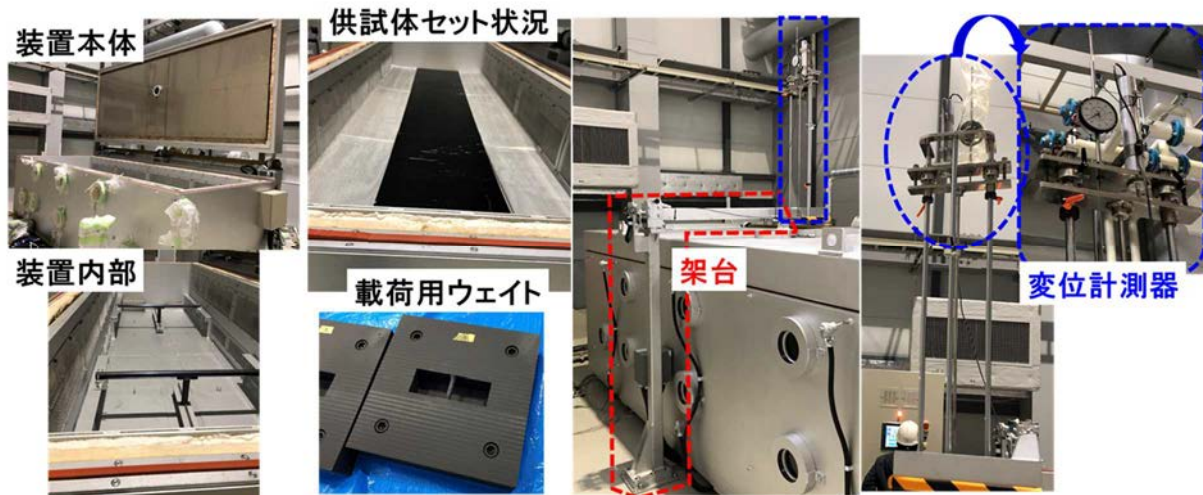


図 4.2-12 大型高温構造試験装置

(5) 今後の課題と対応方針

拠点は超高層建築を成立させるために、ゼネコン等との共同研究等により、床構造の軽量化を実現させるための低コスト FRP 床版及びその製造方法を完成させるとともに、その評価方法を業界に提案していく。

(6) その他特記事項

なし。

(引用：高岩裕也，軽賀英人，田中康典，鵜澤潔：建築用 CFRP サンドウィッチパネルの耐火性能評価，日本複合材料学会誌，研究論文 47(1) 32-41 2021 年 1 月)

(引用：高岩裕也，軽賀英人，田中康典，鵜澤潔：建築用 CFRP サンドウィッチパネルの耐火性能評価，日本複合材料学会誌，研究論文 47(1) 32-41 2021 年 1 月)

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

4.3 “Carbon CUBE”

テーマリーダー（氏名、所属、役職）：	宮田 昌信、大和ハウス工業（H28.4～H31.3） 関戸 俊英、金沢工業大学、技監・教授（H31.4～R2.3）
サブテーマリーダー（氏名、所属、役職）：	宮田 昌信、大和ハウス工業（～H28.3、H31.4～R2.3） 越智 寛、東レ（H28.4～H31.3） 高岩 裕也、金沢工業大学、非常勤研究員（H31.4～R1.5）、研究員（R1.6～R2.3）
研究開発実施期間：	H25年11月～R2年3月
参画機関：	大和ハウス工業、金沢工業大学、東レ、岐阜大学（H31.4～）、岐阜県工業技術研究所（H31.4～）

(1) テーマの概要と目指すべき将来の姿（拠点ビジョン）との関係

- ・本テーマは、本COIプログラムの目指すべき社会実装時のアプリケーションとして絞り込んだ3分野の中の「都市住宅（インフラ）分野」に位置する。
- ・将来の社会構造の変化として少子高齢化の方向に向かっていることや、建築物をスクラップ&ビルドではない循環型社会に向けたまちづくりなどに対応する住居形態のケーススタディを行った。
- ・その結果、効率の良い住居形態、既存不適格住宅の改修やリノベーションが比較的容易に可能なあ

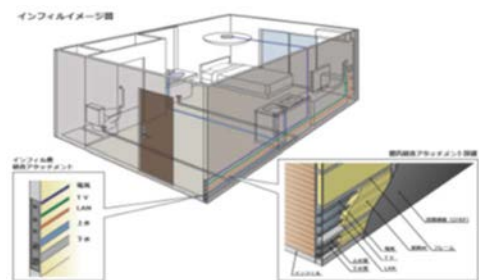
り方、住環境の変化を最小限にする引越しの可能性、移築建築のシステム化といった課題を抽出した。

- ・それらの課題に対して、革新材料であるFRP材料の特徴を生かした住居形態や構造として、一戸建てではなく下図の様な集合住宅を基盤として、各部屋が個別に独立しており、部屋単位で改造や移設（移築）が可能である住居形態を創出した。
- ・この集合住宅の特徴は、建築物を支えるスケルトン（構造躯体）とインフィル（住宅内装）を分離

し、インフィルはユニット構造をなすため 改装や移動が可能である。（通常の建物はスケルトンとインフィルは分離してはず、一体である。）



スケルトン・インフィル構造



- ・インフラ（水道、ガス、電気、通信）用の配管は側面パネルにインサート成形

(2) 想定する製品・サービスについて（担い手、社会的インパクト・経済的インパクト）

- ・スケルトンは住宅建造物を支える構造躯体であるので、鉄骨やコンクリート製になるが、インフィルを軽量のFRP材料で構成することによって、移設が容易であるばかりでなく、改修や組立が容易な構造に設計可能となる。
- ・更に、この様な分離されたスケルトン・インフィル(SI)構造のインフィルは、基本的にFRP

材料による（サンドイッチ）パネル材料の組立構造である為、従来材による住宅建築と対比す

ると建築工事に以下の様な大きな利点がある。

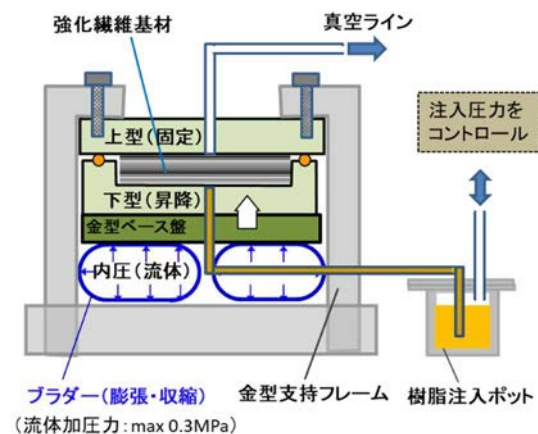
A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

- ①建築組立の作業者が少ない（省人化）、②建築工期が短い（短納期）、③建築組立費用が安い（低コスト）。近年建築業界では、工事作業者の要員不足の傾向にあるため、前述の特長はその問題の解消に繋がる。
- ・住宅内装であるFRP材料からなるインフィルは、スケルトンとの組合せによる集合住宅が主要製品である。また、インフィル単体でも各種商業施設や作業室、更にトラックの荷台に設置して移動式の診療所や小売店などへの展開も想定され、商品化の可能性がある。
- ・従来材による集合住宅より、組立作業費が大幅にコスト低減可能なため、トータルコストも安価になる。
- ・集合住宅への実装化はフェーズ3で耐火材を開発し、耐火認定を取得した後になる。その時、FRPパネルはFRP専門メーカーが、実装工事は建築メーカーが各々担当することになる。
- ・一方、FRP（サンドイッチ）パネルの成形方法は、安価に大量生産可能な成形技術を検討した。最大の特徴は、設置費用が安価な製造設備である。特に、成形用金型の移動を高価な油圧設備を適用しない方法と大掛かりな金型加圧設備を用いない成形方法を開発した。
- ・成形方法は樹脂加圧（行っても極低圧）が不要なV a R T M成形方法を採用し、金属製両面型を用いながらも、門型フレームではない簡便な金属桁材構想としたことにより、製造コストの大幅な低減を達成した。
- ・本成形技術や設備を用いることによって、中小の企業でも容易に量産に参入できるようになった。

<安価に量産可能な成形方法(概略図)>

- ・下型の昇降を流体で収縮・膨張が可能な（消防ホースの様な）ブラダーで行う。
- ・ブラダーの流体を抜いて、下型を下降させて、強化繊維基材をセットする。
- ・ブラダーに流体を加圧充満させて、金属桁材で構成した支持フレームに固定した上型に向かって下型を上昇し、密閉する。
- ・両面型内を真空吸引した状態で、真空圧にて樹脂を型内に注入し、含浸する。
- ・樹脂が硬化後、下型を降下して脱型する。



簡易RTM成形原理(略図)

(3) 研究開発期間終了時の達成目標

- ・集合住宅に用いるFRPサンドイッチパネルの建築材として適用可能な仕様の決定をフェーズ2までに確立することであり、耐火仕様をフェーズ3までに決定することが当初の目標である。住宅用パネルとして、具体的に以下の様な特性を満足することが目標である。
 - ①力学特性 : 全体及び局部曲げ強度及び剛性、落下物による衝撃強度
 - ②機能特性 : 音響特性（遮音性能）、断熱特性、
 - ③耐火特性 : 1時間耐火性能
- ・更に次の目標は、このFRPパネルを用いて住宅用インフィルを開発して、試作品をフェーズ2までに実用化の実証試験をフェーズ3までに実施することであり、特にインフィルの組立が「ハイパーインフィル工法」の実現性の検証を行う事である。

<FRPパネルの成形技術>

- ・住宅材仕様のFRPサンドイッチパネルが、安定して製造可能な成形方法、製造設備をフェーズ2までに確立すること。
- ・量産性として、フェーズ2までに実用パネルの成形タクトが20分(1台で1万枚/年以上)を達成可能なことを実証すること。

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

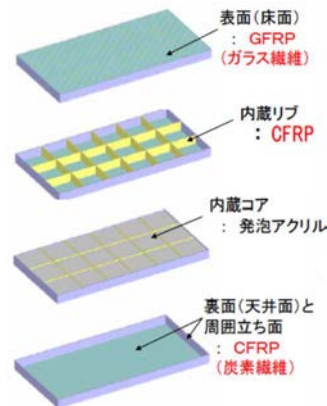
(4) 主な成果と達成状況

①住宅用として適用可能なFRPサンドイッチパネルの開発結果

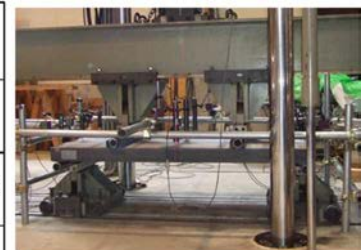
種々材料によるパネル特性のシミュレーションと評価実験によって得られた下記の様な仕様によるFRPパネルは、住宅用要求特性をほぼ満足することと追加の検討課題が判明した。

右図は、住宅用サンドイッチパネルであり、最も力学要求特性が厳しい床パネルの構成仕様であり、材料コストも考慮し、表面(床面)はGFRPを、裏面はCFRPで構成し、内蔵した格子状のリブはCFRPとした。コア材は機能性を考慮してアクリル製を選定した。

上記構造(仕様)のFRP床パネルの力学特性及び機能特性の評価結果を下表にまとめた。
(課題：音響特性はまだ改善の必要がある)

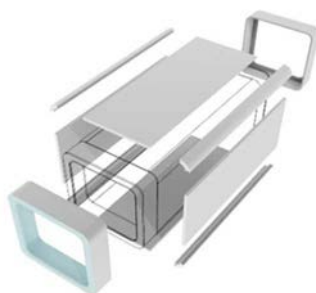


評価項目	曲げ試験	局部載荷試験	衝撃試験	音響試験	断熱試験
	3点曲げ	3点曲げ	サンドバッグ 落下方式	空気音 遮断性能	熱貫流率
試験結果	最大荷重 70.50 kN	最大荷重 70.50 kN	破壊なし	Rr-17	0.53w/m ² 以下
	○	○	○	△	○



3点曲げ試験

上記仕様の住宅用サンドイッチパネルを用いて、下図の様な実用品の1/3サイズのインフィリットモデルを試作した。“Carbon Cube”と呼称する。



Carbon Cube の構造は、床面、天井面、左右の側面はそれぞれ2枚のFRPサンドイッチパネルを接合させ、前後の固定枠で組み立てた構造である。但し、接合部材は金属製(アルミ)であり、FRP化はフェーズ3での課題である。

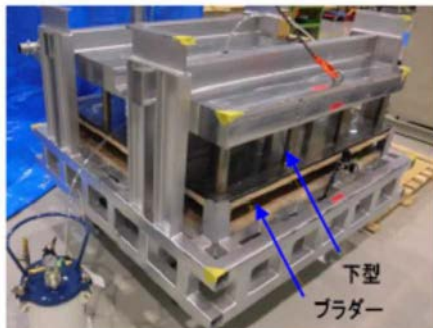
A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

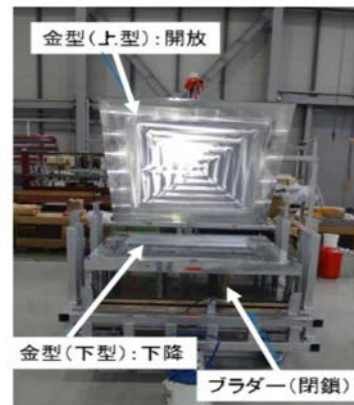
実用サイズの1/3ながら、インフィルユニットとしてのイメージの構築及び実用化の可能性を検証できた。特に、Carbon Cubeの最大の特徴である軽量のFRPパネル構成であることやパネルの接合部への嵌めこみ／接着作業によって組立施工が比較的簡単に実施可能なことから、組立作業において従来工法より施工の省力化、省人化と共に短時間であることが実証できた。本実際の実装展開時には、建築基準に合う断熱特性の達成が必要なため、全パネルの外表面には耐火材が配設された構成となる。この耐火特性の検討はフェーズ3の重要課題である。

②FRPパネルの成形技術の開発結果

実際のFRPサンドイッチパネル(900mm×900mm×150mm)を前項(4)で記載の装置構成及び強化繊維基材構成、樹脂はエポキシ樹脂、コアはアクリル製の条件で試作試験を実施し、成形タクト約20分で成形可能なことを実証した。この時、瞬時の脱型が可能な様に、自動脱型手段として、圧空シリンダー式エジェクターと共に、初期の離型用圧空噴射口を併設した。また、厚肉のリブ付きサンドイッチFRPパネルのボイドレス成形方法として、側面(肉厚部)からのライン注入し、中央から吸引する新規な成形方法を開発した。



簡易RTM成形試験装置



(5) 今後の課題と対応方針

FRP(サンドイッチ)パネルを建築用に適用するための大きな課題である耐火特性の開発である。建築基準法に定められた1時間耐火では約1000℃に耐えねばならず、FRPのマトリックスである一般的な樹脂では不可能であるため、FRPパネルに耐火材を貼り合わせる方法とマトリックス樹脂の耐火性能の向上の2面でフェーズ3にて実施している(R3年9月現在)。上記課題を解決した後、耐火認定試験を申請すると共に、集合住宅への実装化のための展開先の探索検討とFRP製住宅のモデル設置に取り掛かることになる。

(6) その他特記事項

なし。

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

4.4 テンションロッド

テーマリーダー（氏名、所属、役職）：	石田 応輔、金沢工業大学、研究員 (H28.4～H30.3、H31.4～) 内藤 公喜、物質・材料研究機構、 主任研究員（～H26.3）、主幹研究員（～H28.3）、 グループリーダー（H28.4～H31.3） 林 豊、小松精練（H28.4～H31.3）
サブテーマリーダー（氏名、所属、役職）：	中田 政之、金沢工業大学、教授 清水 徹、三井海洋開発（～H28.3） 林 豊、小松マテーレ（H31.4～）
研究開発実施期間：	H25 年 11 月～R2 年 3 月
参画機関：	小松精練、金沢工業大学、物質・材料研究機構、京都 大学（～H28.3）、土木研究所（～H28.3）、三井海洋開 発（～H28.3）

(1) テーマの概要と目指すべき将来の姿（拠点ビジョン）との関係

地震大国日本にとって重要な課題である建築物の耐震強化を解決するために、耐震補強用材料として従来の金属に代わり使用可能な、施工しやすく、軽量・高強度、錆びない炭素繊維複合材のロッド材を開発する。この革新的なロッド材の社会実装を推進することで、本拠点の目指すビジョン「革新材料による次世代インフラシステムの構築」の住宅都市分野における災害に強いまちづくりの実現に貢献する。

(2) 想定する製品・サービスについて（担い手、社会的インパクト・経済的インパクト）

想定する製品は、耐震補強用材料として用いる組紐の技術を用いたロープ状の炭素繊維複合材である。参画機関である小松マテーレ(株)が「カボコーマ・ストランドロッド」として 2015 年に商品化し、製造販売を開始している。2019 年には炭素繊維複合材の耐震補強材として初の JIS 化を達成しており、建築分野における炭素繊維複合材料の普及という面からも、大きな社会的インパクトを与えている。耐震補強が必要な建物の市場規模に基づいてカボコーマ・ストランドロッドとして 30 億円の販売を目指している。

(3) 研究開発期間終了時の達成目標

- ・カボコーマ・ストランドロッドの製造販売を推進し、実績の拡大を図る。木造の耐震補強の実装を推進中であるが、さらに、S 造への実装、最終的に新築への実装を目指す。
- ・端部定着の改良により木造文化財における更なる実績の拡大を図る。
- ・ロッド、ロープでのクリープ評価、ロッドでの耐候性評価、破壊機構の解明、耐久性予測・評価結果をとりまとめる。

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

(4) 主な成果と達成状況

〇ロッド材の製造技術の開発

ワイヤーや鉄筋、緊張材等の代替えとして実用化開発を進め、自社内建屋での震補強材としての実証試験を開始することで、実証データの蓄積により標準化、規格化を推進する取組を行っている。ボイド低減の試みとして、

- ①無溶剤熱硬化性エポキシ樹脂を用いたラボ試作
 - ②加熱絞りダイスを用いたラボ試作
 - ③加熱絞りダイスを用いた実機試作
 - ④回転絞り、加熱絞りダイスを用いた実機試作
 - ⑤ダイスによる加熱・加圧方法のラボ試作
- を行った。④加熱絞りの方法により一定の効果が見られた。

〇施工技術の開発、実装例、JIS 化への取り組み

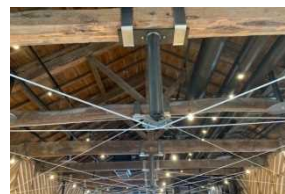
施工事例（耐震補強）



『fa-bo』



善光寺経蔵



富岡倉庫 3 号倉庫



二条城雁之間



旧富岡製糸場西置繭所



三菱ケミカル楽友会館



富士屋ホテル花御殿



富岡倉庫 1 号倉庫



美川 IC 雪氷詰所



三菱ケミカルハイテクニカ



清水寺



中尾食品工業工場棟

施工事例（その他）



昇降式ホーム柵（JR 六甲道駅）



能美根 IC モニュメント



スターバックス・カフェ



G 2 0 展示会場



北千住駅西口美観商店街



福井銀行本店建替 PJ



プレスポ東日暮里

木造建築の耐震補強用途での採用が進み、さらに駅ホームの転落防止柵用カーボンロープとして採用されるなど、社会実装に実績を拡大している。

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

○端部定着技術の開発（小松マテール）

テンションロッドを躯体と接合するには何らかの端部が必要となる。ワイヤーロープのような楔やカシメによる接合が出来ない為、用途に応じて、接着剤を用いて様々な形状の端部を開発した。靱性を有する仕様については、接着剤を用いず、ホットプレスにより成形した。



○端部定着技術の開発（金工大）

テンションロッドは、靱性を有していないことから、地震時に大変形を許容しなければならない鉛直構面に適用することは難易度が高く、多くは大変形が生じない水平構面に適応されている。そこで、図 4.4-1 に示すような脆性破壊しないテンションロッドの端部定着構造を開発し、鉛直構面に適応可能な端部定着構造を開発した。開発した端部定着構造を適応したテンションロッドで補強した木造軸組の実大試験体を作製し、面内せん断試験（図 4.4-2）によって構造性能を評価した。

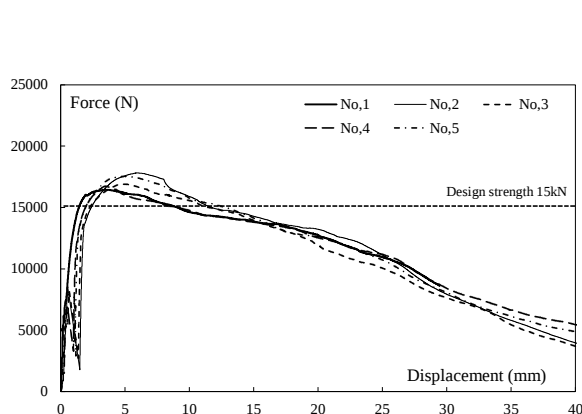


図 4.4-1 脆性破壊しない端部定着構造の開発

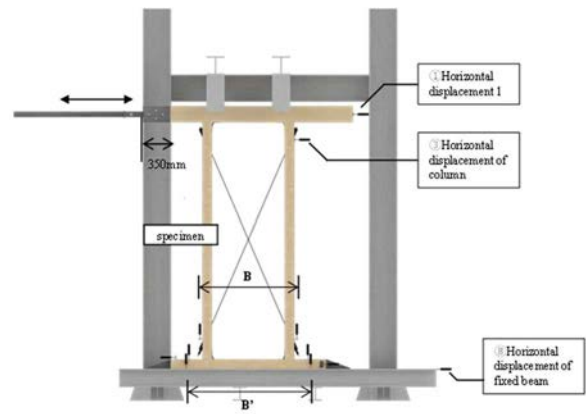


図 4.4-2 補強した木造軸組の実大試験による性能評価

○信頼性技術の開発（金工大）

マトリックス樹脂は、強度と剛性が炭素繊維に較べて極端に低く、炭素繊維の周りを埋める形で含浸・成形される。この CFRP 構造物に力が作用すると骨格を形成する炭素繊維が荷重の大半を受け持ち、マトリックス樹脂は炭素繊維から隣接する炭素繊維に荷重を伝える役割を受け持つ。マトリックス樹脂の荷重伝達能力はそれ自身の剛性によって決まるが、この剛性が低下すると構造物としての形状が保持できなくなり CFRP 構造物は破壊する。樹脂の剛性は時間の経過や温度の上昇によって大きく低下し、いわゆる粘弾性挙動を示す。さらに樹脂の粘弾性挙動における時間依存性と温度依存性の間には、低温における長時間の現象が、高温においては短時間であらわれるとする時間と温度の等価性、すなわち時間 - 温度換算則が成立する。樹脂の粘弾性挙動が CFRP 構造物の強度の時間および温度依存性を支配し、さらに樹脂の粘弾性挙動に成立するものと同じ時間 - 温度換算則が CFRP 構造物の強度にも成立することは理の当然と考える。

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

本プロジェクトにおいて、上述の科学的根拠に基づいて CFRP の時間および温度に依存する静的、クリープ、疲労強度のばらつきを考慮した統計的定式化をおこない、長期疲労寿命を予測するための加速試験法を開発して本に纏めた¹⁾。そして、プロジェクトでの開発対象である熱可塑エポキシ樹脂を用いた炭素繊維樹脂含浸ストランド（CFRP ストランド）を取り上げ、開発した加速試験法を用いて、任意の温度および荷重下での引張クリープ破断時間と疲労破断時間を予測できることを確認した。そして、これらクリープや疲労寿命は、従来の熱硬化エポキシ樹脂を用いた CFRP ストランドのそれとは異なる特徴的な時間および温度依存性を示すこともわかった。さらに、マトリックス樹脂が吸水した場合の粘弾性特性を評価することにより、吸水した CFRP ストランドのクリープ寿命や疲労寿命も推定可能であることを見出した。これらの成果を国際学術誌に公表した^{2)~4)}。

○信頼性技術の開発（NIMS）

テンションロッドにまず求められるのは引張方向の性能である。そこで、テンションロッドの複数の温度環境下での静的強度のバラツキを含めた静的引張試験（定着部構造で特許、特許第 6586695 号 繊維強化プラスチックケーブルの定着構造体及びその製造方法、強度試験方法、並びに強度試験用サンプル）、異なる平均応力／負荷振幅（応力比 R （＝最小荷重／最大荷重））での疲労引張試験および引張クリープ破壊試験を行った。テンションロッドのデータ蓄積およびデータに基づいた信頼性評価技術を開発した。本成果により、テンションロッドの長期負荷耐久性がデータ駆動型で予測できる。また、テンションロッドの様々な社会実装への展開が可能なデータとなる。

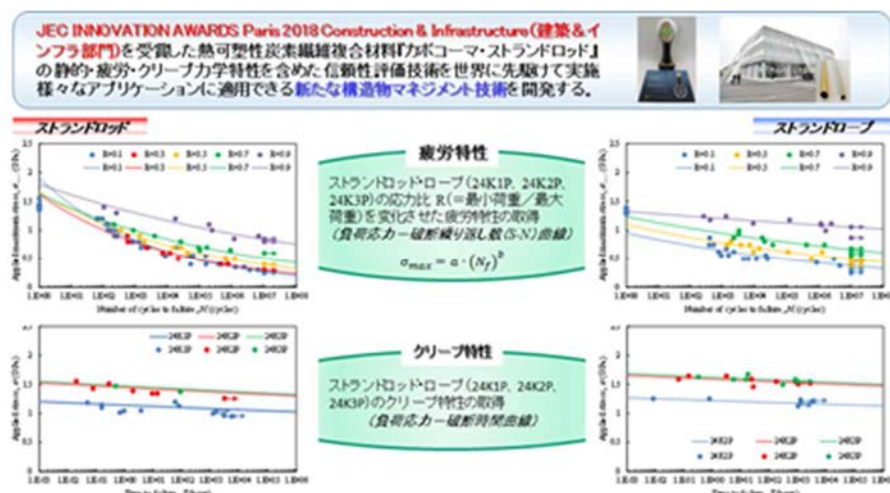


図 4.4-3 テンションロッドの長期負荷耐久性と様々な負荷条件でのデータ駆動型予測

また、引張方向だけでなく、圧縮方向や材料界面における評価試験も行い、テンションロッドのより詳細な破壊機構の解明も実施した。従来とは異なる信頼性評価技術、構造物マネジメント技術となっているものと考えている。多くの社会的（実装化・規格化（JIS 化）に繋がったテンションロッドの社会全体への認知）、経済的（データ蓄積による構造物マネジメント技術の確立と海外展開）・学術的（論文投稿）価値を有している。

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

(5) 今後の課題と対応方針

2019年11月に耐震補強より線として、JIS 制定されたが、個別毎に端部仕様の強度を測定しながら、木造建物等の耐震補強を施工してきた。しかし、広く全国の工務店等で使ってもらうためには、単にテンションロッドの端部仕様のみでは使い難く、建物に接合する金物の標準化が必要である為、これまでの施工例を整理し、建物と接合に用いる金物の標準化を推進する。



(6) その他特記事項

・本文中で言及した業績（一部）

- 1) Miyano Y, Nakada M. *Durability of Fiber-Reinforced Polymers*. WILEY-VCH, 2018.
- 2) Nakada M, Miyano Y, Morisawa Y, Nishida H, Hayashi Y and Uzawa K. Prediction of statistical life time for unidirectional CFRTP under creep loading. *J Reinforced Plastics and Composites* 2019; 38: 938-946.
- 3) Nakada M, Miyano Y, Kageta S, Nishida H, Hayashi Y and Uzawa K. Prediction of statistical life time for unidirectional CFRTP under cyclic loading. *J Reinforced Plastics and Composites* 2021; 40: 749-758.
- 4) Nakada M, Miyano Y, Kageta S, Nishida H, Hayashi Y and Uzawa K. Prediction of statistical life time for unidirectional CFRTP under water absorption. *J Reinforced Plastics and Composites* 2021; in press.

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

4.5 橋梁部材（PC 緊張材）

テーマリーダー（氏名、所属、役職）：	宮里 心一、金沢工業大学、教授（～H28. 3） 保倉 篤、金沢工業大学、研究員（H28. 4～） 宇佐美 惣、土木研究所、主任研究員（H28. 4～H28. 7） 山口 岳思、土木研究所、研究員（H28. 8～H30. 7） 山本 将、土木研究所、主任研究員（H30. 8～R3. 7）
サブテーマリーダー（氏名、所属、役職）：	（指定無し）
研究開発実施期間：	H25 年 11 月～R4 年 3 月
参画機関：	土木研究所、金沢工業大学、物質・材料研究機構（～H27. 3）、京都大学（H26. 4～H27. 3、H28. 4～R2. 3）、小松精練（H30. 4～）

(1) テーマの概要と目指すべき将来の姿（拠点ビジョン）との関係

コンクリート橋（PC 橋）の塩害劣化による PC 鋼材や鉄筋の腐食・破断、コンクリート片落下する事例が多数発生しており、その対策が課題となっている（図 4-5-1）。そこで、PC 緊張材の代替えとして熱可塑性 FRP（以下、FRTP）緊張材、および定着方法等を含む新たな施工方法を提供し、腐食しない長寿命な FRP 構造を実現する。そのためには、設計等に必要となるデータの取得が必要となる。



図 4-5-1 塩害による劣化事象の概要

(2) 想定する製品・サービスについて（担い手、社会的インパクト・経済的インパクト）

[担い手]

- ・ FRP 緊張材製作：製作メーカー等
- ・ 橋梁工事発注・施工監督・維持管理：道路管理者等
- ・ 橋梁工事施工：工事業者等

[社会的インパクト]

国内の国道・地方道において、高度経済成長期の終盤（1970 年）における建設数が最も多く、それから 10 年間はピークであった。これに伴い、建設後 50 年を経過する橋梁の割合は、2018 年時点では約 28%であったが、2023 年では約 39%に、2033 年では約 63%に急増することが予想されている。したがって、大規模更新などを実施する可能性が大きい。

[経済的インパクト]

FRP の特長として、高耐久性を有している。そのため、鋼材と比較して腐食しないことから、塩害劣化に有利となり、橋梁の安全性が向上し、長寿命化により維持管理にかかるコスト低減が期待できる。さらに、熱硬化性 FRP（以下、FRTS）と比較して FRTP の方が、製造工程が短縮されるため、生産性向上に伴い、コスト低減が期待できる。

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

(3) 研究開発期間終了時の達成目標

T 桁橋梁に FRP 緊張材を用いたプレテンション方式、ポストテンション方式の実大供試体の載荷試験等により、設計指針となる物性値、耐荷性能等を把握する。

(4) 主な成果と達成状況

革新材料の性能評価

①見かけのリラクセーションの検討

表 4-5-1 見かけのリラクセーションの実験ケース

No.	使用緊張材	初期引張強度/ 保証引張強度	補強材
1	FRTP ($\phi 18.0$)	0.8Pu	FRTP
2			鉄筋
3	FRTS ($\phi 17.2$)	0.8Pu	FRTS



図 4-5-2 FRTP の外観の様子

緊張材の物性値である、見かけのリラクセーション計測を実施した。リラクセーションは PC 鋼材に引張応力を与え、一定の長さを保持したとき、時間経過とともにその引張応力が減少する事象である。見かけのリラクセーションは上記に加え、コンクリートのクリープと乾燥収縮の影響を考慮したものである。

実験ケースを表 4-5-1 に示す。No.1 および No.2 に用いた緊張材は本研究対象である CFRTP ($\phi 18.0$) を使用した。なお、補強材を鉄筋とした場合および FRTP としての試験体を用いて、補強材の影響についても分析した。No.3 に用いた緊張材は従来の CFRTS ($\phi 17.2$) を使用した。FRTP の外観の様子を図 4-5-2 に示す。 $\phi 6.3$ の 7 本撚りを 7 本束ねることにより、太径化とした。

No.1~No.3 の測定結果および外気温の変化を図 4-5-3 に示す。前年度 (2019 年) の同時期よりは少し下がるものの、初期の緊張荷重低下は約 2 年後 (740 日経過後) に落ち着いた。この時の見かけのリラクセーション率は、No.1 が 17.71%、No.2 が 20.61%、No.3 が 10.92%である。すなわち、CFRTS に比べて、CFRTP の見かけのリラクセーション率は 1.62 倍から 1.88 倍となった。補強材による違いについては、No.1 に比べ No.2 は 3%程度大きい値となった。ここで、150 日を経過したタイミングで、No.1 および No.2 の見かけのリラクセーション率が急激に低下していることを確認できる。外気温の変動に着目すると大きな変動はないことから、別の要因になると考えられる。今後、原因を解明する必要がある。

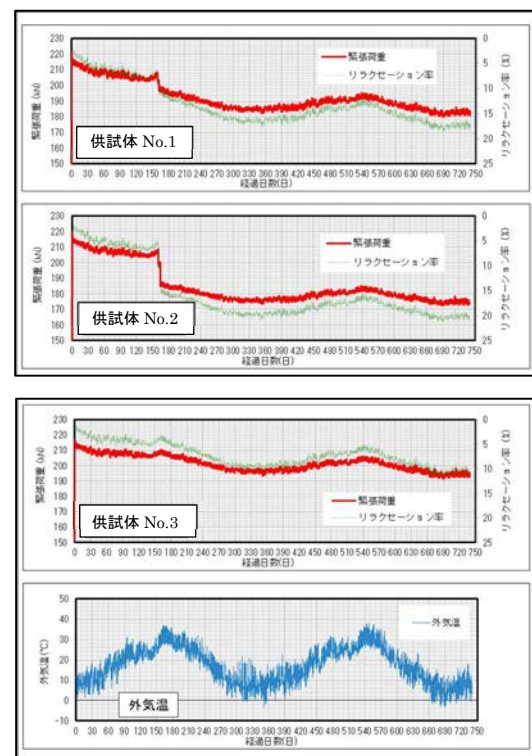


図 4-5-3 見かけのリラクセーション試験の結果および外気温の変化

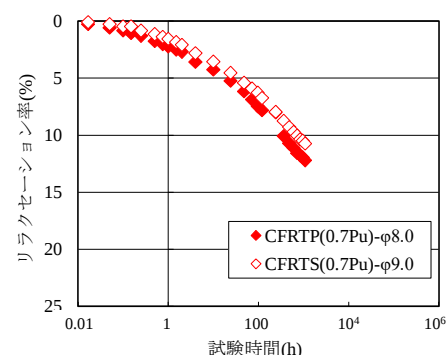


図 4-5-4 純リラクセーション試験の結果

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

次に、図 4-5-4 に補強筋単体の純リラクセーションの結果を示す。これによれば、CFRTS と比較して CFRTS の方が、リラクセーション率は大きい。したがって、前述の見かけのリラクセーション試験と同様の結果になることを確認できた。

②緊張力の有無がコンクリートとの付着強度に及ぼす影響

CFRTS に緊張力を導入した場合における、補強筋とコンクリートとの引抜き試験を行った。図 4-5-5 に CFRTS を用いた、緊張力の有無における付着応力-すべり変位曲線を示す。これによれば、緊張ありの方が、抜け出すまでの自由端のすべり量はほとんど増加しないことを確認できた。ここで、図 4-5-6 に緊張有無における引抜き試験後の供試体断面の様子を示す。これによれば、緊張ありでは、周囲の素線との間に隙間がなく、セメントペーストが入り込んでいる様子は確認できない。一方、緊張なしでは、周囲の素線との間にセメントペーストが入り込んでいる様子を確認できる。さらに、径の計測結果によると、緊張ありの方が、緊張なしと比較して、径は 1mm 程度小さくなることを確認できた。以上より、緊張力の導入により撚り線が絞られるため、付着応力-すべり量変位曲線の挙動と断面形状が変化したと考えられる。

モニタリング技術の評価

①AE 法による FRP 補強筋の付着挙動の解明

AE（アコースティック・エミッション）とは、個体対象物が変形あるいは破壊する際に、それまで蓄えていたひずみエネルギーが解放されて、弾性波の生じる現象、またはそのようにして発生する弾性波動と定義される。

ここでは、AE の発生により検出される AE 波の特性を踏まえ、CFRTS をコンクリート内部に緊張力を変化（最大値の 60%、25%、20%、15%、10%、5%および手締め）させて定着した供試体に対して引抜き試験を実施した。図 4-5-7 に CFRTS とコンクリートとの引抜き供試体の様子を示す。また、図 4-5-8 に AE センサの設置位置概略図を示す。すなわち、4 つのセンサを供試体の 4 面に三次元的に配置した。図 4-5-9 に示すように、引抜き試験から検出された AE ヒット数に基づいて、CFRTS の付着挙動の解明を試みた結果、以下の知見が得られた。

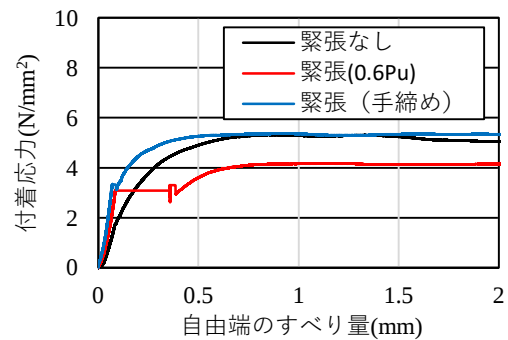


図 4-5-5 CFRTS とコンクリートとの付着応力-すべり量変位曲線



(a)緊張(0.6Pu) (b)緊張なし

図 4-5-6 引抜き試験後の供試体断面の様子



図 4-5-7 引抜き供試体の様子

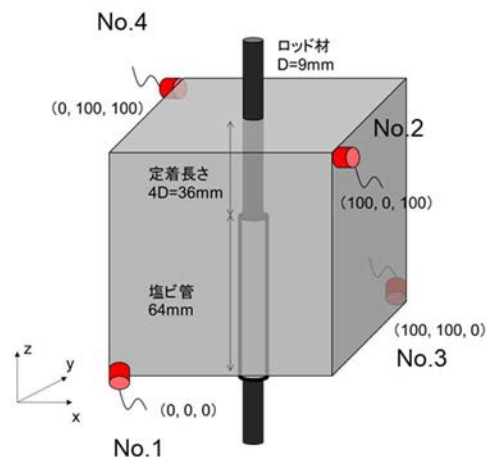


図 4-5-8 AE センサの設置位置概略図

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

- ・自由端すべり量-荷重の関係から得られる付着強度を把握することで評価できる付着強度の定量的な値は、試験結果のバラツキが大きいため、補強筋として緊張力の付与に伴う破壊挙動の考察を行うには十分な情報が得られない。
- ・付着-すべり量関係と同時に、AE ヒット数の増加挙動が変化する。特に、AE ヒット率においては、本実験の範囲内で最大の緊張力を与えた場合には、AE ヒットの増加率が低下することから高い緊張力を付与することで破壊挙動に影響を及ぼす可能性がある。

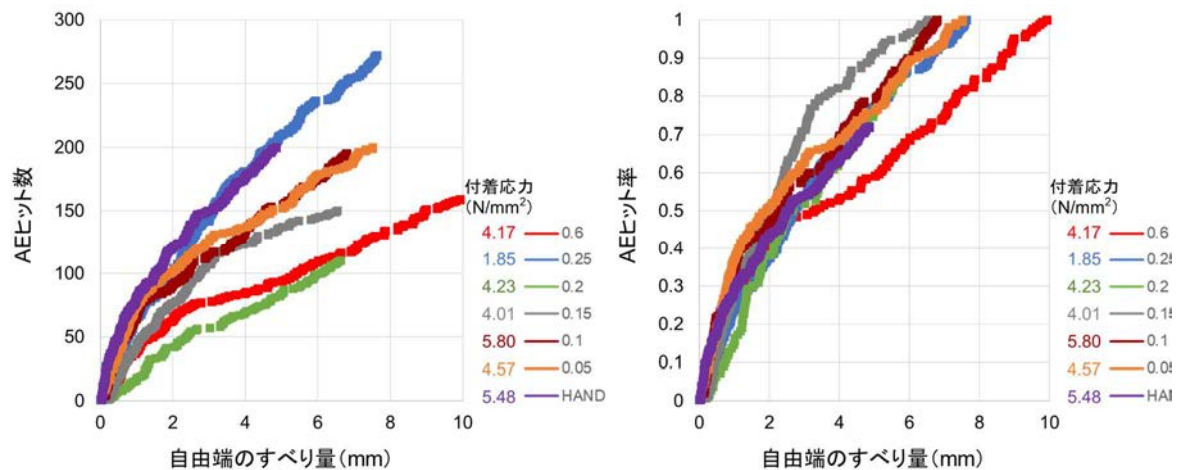


図 4-5-9 引抜き試験中の自由端すべり量に伴う AE ヒット数
(左：AE ヒット数 右：AE ヒット率)

②AE 法と DIC 法による FRP 補強筋 RC コンクリート梁供試体の破壊挙動解明

FRP 補強筋（バサルト繊維材）を有する RC 供試体における耐荷性能試験を実施した。その際、図 4-5-10 に示すとおり、AE 計測と DIC 法（デジタル画像相関法）計測を実施することで、破壊挙動の解明を試みた。その結果、AE 法により、通常の鉄筋 RC 供試体と異なる破壊挙動が確認できた。また、DIC 法により破壊時の応力変化やひび割れ状況を確認できた。



図 4-5-10 耐荷性能試験の様子

(5) 今後の課題と対応方針

革新材料の性能評価

①見かけのリラクセーションの検討

150 日経過時点において、CFRTP を用いた No. 1 および No. 2 の緊張荷重が大きく低下したことがわかった。実装のためにはこれらの要因解明が課題であり、解明を踏まえた見かけのリラクセーション率の設定などの対応が必要であると考えます。

②緊張力の有無がコンクリートとの付着強度に及ぼす影響

形状が撚り線のため、緊張力の有無によってコンクリートとの付着に及ぼす影響は異なることを確認できた。しかしながら、バラツキが大きいため、試験体数を増やすなどの対策を講じる必要があると考えられる。

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

モニタリング技術の評価

①AE 法による FRP 補強筋の付着挙動の解明

本研究により、緊張力の違いが AE 発生に与える影響が確認できたことで、破壊挙動の違いが推定できた。今後は、非破壊試験である AE 法をモニタリングすることで FRP 補強筋の損傷状況を評価できる手法の確立を目指す。

②AE 法と DIC 法による FRP 補強筋 RC コンクリート梁供試体の破壊挙動解明

本研究により、降伏する材料である鉄筋と、降伏しない材料である FRP 補強筋による RC コンクリートの破壊挙動の違いを明らかにできた。今後は、AE 法のモニタリングにより、FRP 補強筋 RC コンクリートの損傷状態を確認することで、劣化・損傷状態のどのステージにあるかを評価できる手法の確立を目指す。

(6) その他特記事項

- ・BF RTP の曲げ加工で生じる劣化損傷を弾性波手法で評価するための基礎的実験を実施中である。これを基にして、現場レベルで実施した曲げ加工により生じる損傷の非破壊試験が可能となり、品質確保の高度化を目指す。
- ・2014 年度から、革新材料を適用することがふさわしい社会インフラを抽出・提案すべく、建設的な意見を頂ける協力者を集める体制を整備するため、「土木分野への革新材料実装研究会」を立ち上げた。これまで 10 回に亘り開催し、意見交換を行ってきた（2021 年 10 月現在）。今後も継続していく予定である。

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

4.6 大型パネル（風力ブレード）

テーマリーダー（氏名、所属、役職）：	宮里 心一、金沢工業大学、教授（～H28.3） 金崎 真人、金沢工業大学、特別研究員（～H29.9）、 研究員（H29.10～）
サブテーマリーダー（氏名、所属、役職）：	清水 徹、三井海洋開発（～H28.3）
研究開発実施期間：	H25 年 11 月～H30 年 3 月
参画機関：	金沢工業大学、三井海洋開発

（1）テーマの概要と目指すべき将来の姿（拠点ビジョン）との関係

現在の洋上風車開発の主流は、陸上で発展した大型水平軸型風車を、浅い海の海底に置いた基礎の上に載せる着床式洋上風車である。しかしこれが経済的に成立するには、欧州の北海のように遠浅の海が広がる特殊な環境が必要である。このため、日本をはじめ浅海が少ない多くの地域では、着床式ではなく浮体式洋上風車の開発に注力する必要がある。着床式と浮体式の適用の境界となる水深は 60m 付近（図 1）であるため、日本における着床式風車の開発は陸から数 km にすぎない。欧州の着床式風車は、沖合 20-50km の安定した強風によって高い経済性を実現しており、これと同レベルの風力資源は、日本では浮体式風車によってはじめて可能となる。

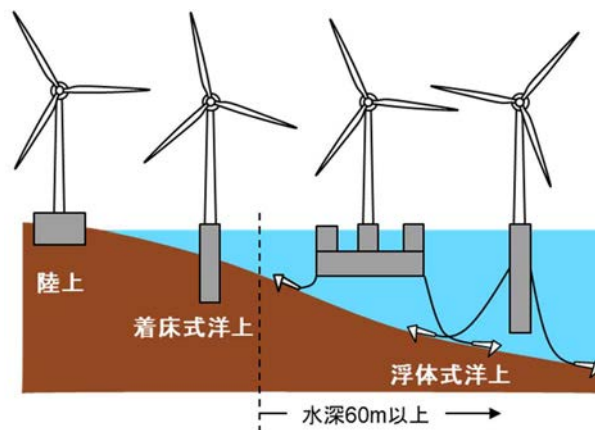


図 4. 6-1 着床式洋上風車と浮体式洋上風車

ただし陸上で発展してきた水平軸型風車は、実は本質的に浮体式に向いていない。これは、発電機等の重量物を高いタワーの上に搭載するので、これを風・波の中で直立に保つための浮体が巨大で高コストとなるためである。例えば、国際エネルギー機関(IEA)が参照用として公開する 15MW 風車で、タワー高さ 150m、ブレード長さ 120m、風車ヘッド重量 1017 トン、タワー重量 860 トンに達し、これを載せる浮体の排水量は 2 万トンを超えてしまう。また、風車ブレードは、1 本あたり 92 トンの最大推力を受ける「片持ち梁」であるにもかかわらず軽量化を必要とするため、複合材料の長大な一体成形品となり、困難な技術開発を必要とする。

4 研究開発テーマの成果



図 4.6-2 浮遊軸型風車

上記の困難を解決し、洋上風力の低コスト化によって持続可能な社会の実現に貢献する技術が浮遊軸型風車 (Floating Axis Wind Turbine; FAWT) である (図 2)。これは浮体式の垂直軸型風車の一種であるが、円筒浮体が風車と一緒に回転する事を特徴とする。発電機等の重量物を風車の下方に搭載するため低重心となり、海水が軸受けとなる単純構造であるため、コンパクトで低コストの浮体式風車となる。ブレードは、「両持ち梁」の連続となるため、台風などの極限海象を想定する強度設計は、従来型 (水平軸型) 風車よりも容易である。

複合材分野で特に注目すべき点は、この風車ブレードが一定断面形状 (2 次元的な形状) の複合材大型パネルである事である。3 次元複雑形状の水平軸型風車ブレードと異なり、FAWT ブレードは一定断面であるため、連続成形・連続組立による製造プロセスの高速化と自動化が可能となる (図 3)。これによりコスト競争力が高いブレード成形品を国内生産する事ができる。ブレードに加えて、回転シャフト、およびブレード支持アームも複合材で構成される。風車部分が、ほぼ全て複合材の軽量構造となるため、その重量は水平軸型風車 (タワー含む) の半分以下である。

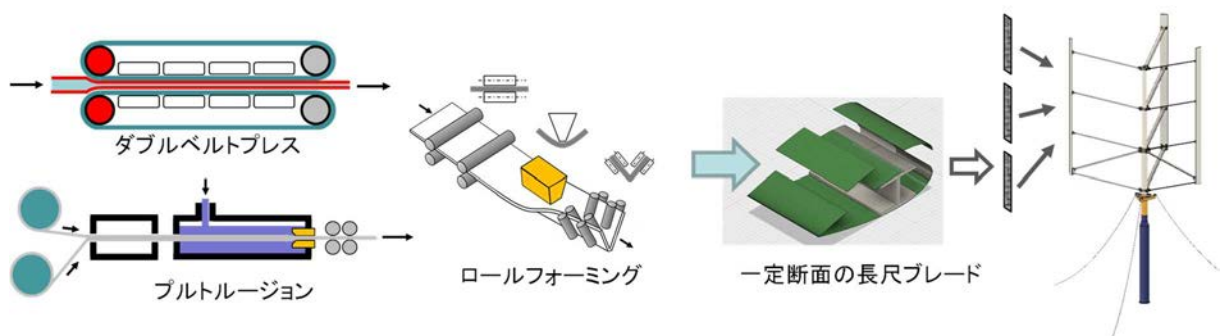


図 4.6-3 連続成形・連続組立パネルによる大型風車ローター製造

浮体式垂直軸型風車は、FAWT の他にも三井海洋開発による SKWID プロジェクト、スウェーデンの SeaTwirl 社による開発がある (図 4)。特に SeaTwirl 社は、30kW 風車の海上実験を 2018 年より実施し、NASDAQ Nordic への上場により大型実証機開発の資金調達に成功している。この 1MW 実証機の製造が始まっており、2023 年末に海上設置の予定である。今はまだ、洋上風力参加者の多くが水平軸型風車による浮体式開発の将来を信じているが、浮体式垂直軸型風車へのシフトが起ると、複合材ブレードの関連産業は大きく変わらざるを得ない。

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果



図 4.6-4 浮体式垂直軸型風車：（左）SKWID（500kW、三井海洋開発）、（右）SeaTwirl 30kW 実験機および 1MW 実証機想像図

（2）想定する製品・サービスについて（担い手、社会的インパクト・経済的インパクト）

浮体式風車開発は、浮体、風車、係留設備、設置工事などの分業であり、これらの企業と連携して開発を行う。浮体式風車システムの直接の購入者は風力発電事業者であるが、これによる電気料金の低下による一般消費者のメリット、国内製造への波及効果が社会・経済的なインパクトである。低コストの軽量ブレードにより浮体システムが小型・低コストとなるため、本コンセプトの設備費は、従来型の浮体式風車の 50%に削減され、沖合の風力開発費用を半減、あるいは同じ開発費用で 2 倍の導入量が期待できる。運転・維持費も含めた発電コストでも従来コンセプトより 30%削減を見込む。

国内の浮体式洋上風力のポテンシャルは 424GW であり、世界第 2 位の資源量である。これは着床式洋上風力 128GW の 3.3 倍と大きい（日本風力発電協会 2020 年）。ここで連続成形パネルによる垂直軸型風車ローターの低コスト化は、このポテンシャルを利用するうえで鍵となる技術である。

垂直軸型風車は、高い国内生産率が期待できる事もメリットである。

従来の水平軸型風車のブレードは、長大な一体成形品であるため、大きな工場敷地面積と幅広のアクセス道路を必要とする。また複雑 3 次元形状のブレード成形は、自動化に限界があるため人件費が安い地域が有利である。中国はこの条件を揃え、洋上風力の市場規模も一国で欧州と同程度に成長するため強力なライバルである。また水平軸型ブレードの主な素材はガラス繊維であり、この世界シェアは中国系企業が 80%である。このため水平軸型風車ブレードの国内生産を再開したとしても熾烈な国際価格競争が待っている。

一方、垂直軸型風車ブレードは、片持ち梁ではないため長さ方向に分割して成形・出荷できるため、工場面積は小さく、アクセス道路の要求も低い。ブレード連続成形による自動化も、人件費の高い日本向けの製造プロセスである。また垂直型ブレードは、遠心力に耐えるため、オールカーボン（ラージトウ炭素繊維）による軽量化で最も総合コストが下がる事が判っている。日系企業の世界シェアが大きい炭素繊維の利用は、国内製造に有利である。

国内メーカーが大型風車製造から全撤退した現状では、従来型風車の国内生産率を高めようとすると、海外メーカーの下請けとならざるを得ないが、提案の風車コンセプトであれば、ほぼ 100%の国内生産となり、輸出産業化も期待できる。

（3）研究開発期間終了時の達成目標

大型垂直軸型風車ブレードの連続成形プロセスの基本検討とコスト評価を行い。浮体式垂直軸型風車の事業性を検証する事が必要である。

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

(4) 主な成果と達成状況

- NEDO 新エネルギーベンチャー技術革新プログラム「新形式浮体式垂直軸型風車の小型模型試験」(2015 年)(アルバトロス・テクノロジー、金沢工業大学、大阪大学)

複合材ブレードの製造コスト初期検討、複数の発電機から成る動力取出機のモデル実験、水槽模型実験(図 5)を行い、コンセプトの妥当性を確認した。

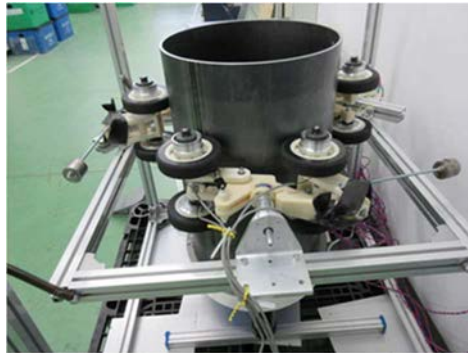


図 4.6-5 動力取出機構モデル(金沢工業大学)と水槽試験(大阪大学)

- JST/A-STEP シーズ顕在化タイプ「次世代浮体式洋上風車開発」(2016)(大林組、大阪大学、金沢工業大学、NTN)

規模拡大した水槽模型実験および風車ブレードの材料選定とコスト評価を行った。水槽模型用の風車ローターは、水力学的な相似則から軽量化が必要なためカーボンで製作した(図 6)。実機ブレードの素材選択、コスト評価を行い。アルミや GFRP よりも、CFRP(ラージトウ)で軽量に製作する事で、浮体を含む総コストが最小となる事が示された。

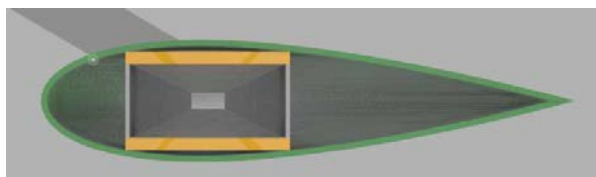


図 4.6-6 水槽実験用模型(左)と構造検討用に単純化したブレード断面モデル(右)

発電コスト推定では、一般的なセミサブ型風車に比較して製造コスト 50%削減、保守・運転維持も含めた総合的な発電コストで 30%削減との評価を得た(図 7)。CFRP パネルによる風車ローターの軽量化と低重心化は、浮体部の小型化・鋼材使用量削減に波及してコストが削減される。現時点では、本コンセプトによる保守費用の削減を算入していないため、実際の削減幅はもっと大きくなる。

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

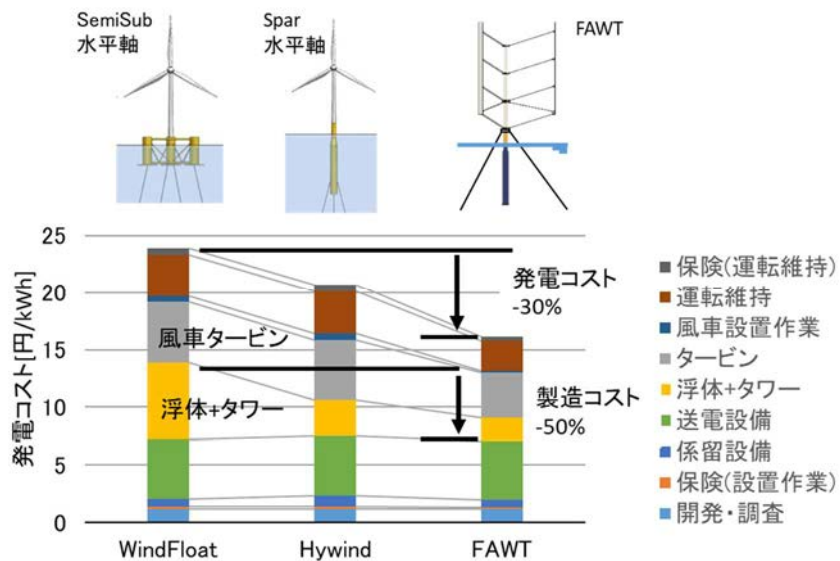


図 4.6-7 FAWT による発電コスト低減（従来型浮体式に対し製造コスト 50%減、総合的な発電コストで 30%減を見込む。定格風速 11m/s、沿岸設置想定）

- 特許出願 PCT/JP2020/018523 浮体式水上風車および浮体式水上風車の設置方法（金沢工業大学と大阪大学の共同出願）
- 特許出願 PCT/JP2020/018524 浮体式垂直軸型タービン（金沢工業大学と大阪大学の共同出願）
- 連続成形・連続組立を想定した風車ブレードの部分模型を試作した（図 8）



図 4.6-8 連続成形を想定した風車ブレード断面モデル

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

(5) 今後の課題と対応方針

◇小型機による海上実験

本技術に関心を持つ企業は多いものの、大型プロジェクトとなる浮体式開発に参加を表明するには、水槽実験のデータでは不十分と考えられる事が多い。このため現在の産学連携のコンソーシアムにより 20kW 規模の小型風車の海上実験を実施する。この資金獲得に向けて各種の公的助成金等への応募を続けている。

◇大型風車の経済性評価

運転維持・保守(O&M)コストが高い洋上風力では、風車の大型化により発電コストを削減する事が重要であるため、FAWT についても大型化によるコスト削減メリットを評価していく。数年後の洋上風車の標準サイズは 15MW になる見込みであるため、この大型ブレードを実現する連続成形プロセスおよびパーツ分割の詳細を検討する。FAWT のブレードと浮体は、大型化に向くデザインであるため、大型化のメリットが水平軸型よりも大きい。

(6) その他特記事項

なし。

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

4.7 大型パネル（硬翼帆）

テーマリーダー（氏名、所属、役職）：	宮里 心一、金沢工業大学、教授（～H28.3） 白井 武広、金沢工業大学、研究員（H28.4～）
サブテーマリーダー（氏名、所属、役職）：	（指定無し）
研究開発実施期間：	H25 年 11 月～H30 年 3 月
参画機関：	金沢工業大学、三井海洋開発（H28.4～）

（1）テーマの概要と目指すべき将来の姿（拠点ビジョン）との関係

海洋構造物及び再生可能エネルギー利用分野への革新材料の実装に向けた技術の検討として、本節では以下の研究テーマについて述べる。

a) 3-②-c 海洋構造物及び再生可能エネルギー利用分野への革新材料の実装技術検討 ※～H28.3

（1）TLP テンドン

海洋石油生産設備 TLP（Tension Leg Platform）係留索テンドンを現状の鋼鉄製から複合材料を適用し軽量化による大水深化（1,500m 以上）海域での石油生産を実現する。

（2）深海海底資源開発用ドリリングライザー、フレキシブルライザー

海底から海上設備まで石油輸送パイプを現状の鋼鉄製から複合材料を適用し軽量化による大水深化（3,000m 以上）海域での石油生産を実現する。

（3）海洋深層水温度差発電

層水との温度差エネルギーを電力に変換した海洋深層水温度差発電の高効率化のため、深層水くみ上げ配管に複合材料を適応し軽量化により大深度水（800m）を採水を実現する。

b) 1-a-2 大型平板の成形技術（単板、サンドイッチ材） ※H29.4～H31.3

大型風力推進船の硬翼帆パネルや住宅パネルの連続成形による低コスト長尺構造成形技術を検討する。

c) T-e 大型パネル（硬翼帆） ※H28.4～H30.3

複合材パネルの硬翼帆を搭載した大型風力推進船を開発し、海洋船舶が発生する温室効果ガス低減を実現する。

（2）想定する製品・サービスについて（担い手、社会的インパクト・経済的インパクト）

a) は、海洋資源採掘の大水深化に貢献するテーマであるため、担い手は海洋資源採掘、利用企業などの企業であり、今まで採掘不可であった大深度水海での資源採掘は、資源が乏しい日本では社会的、経済的インパクト大である。

b, c) は、海洋航行船舶の温室効果ガス低減による環境負荷低減に貢献するテーマであるため、造船企業、船舶運用企業、船舶貨物荷主などが担い手となる。

（3）研究開発期間終了時の達成目標

a) 3-②-c 海洋構造物及び再生可能エネルギー利用分野への革新材料の実装技術検討 ※～H28.3

（1）TLP テンドン

TLP のテンドンへの革新材料テンションロッド材の使用可能性を検討し、材料に要求される仕様を調査・確定する

（2）深海海底資源開発用ドリリングライザー、フレキシブルライザー

素材研究や研究テーマ 2 製造技術における要求仕様を明確にし、炭素繊維複合材料の軽量かつ高強の特徴をライザーパイプに適用することを実現するために課題の設定や数値目標を決める。

（3）海洋深層水温度差発電

高効率発電のための配管仕様などの要求仕様、技術を整理する。

b) 1-a-2 大型平板の成形技術（単板、サンドイッチ材） ※H29.4～H31.3

帆の主構造部材である大型パネルの連続成形技術の検討

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

- c) T-e 大型パネル（硬翼帆） ※H28.4～H30.3
陸上実証機を用いた性能評価、耐久試験を実施

(4) 主な成果と達成状況

- a) 3-②-c 海洋構造物及び再生可能エネルギー利用分野への革新材料の実装技術検討 ※～H28.3
(1) TLP テンドン

三井海洋開発で以前に行った FRP テンドンの適用可能性検討の結果について調査し、革新材料テンションロッド材に要求される概要仕様の検討を行った。過去の検討例から水深 8,000ft (2,400m) を想定した TLP テンドンの概略要求仕様を調査した。



• Load bearing material:	Carbon Fibre rods
• Youngs Modulus:	34 msi (for fibre only)
• Ultimate tensile strength	700 ksi (for fibre only)
• % of fibre in rods	60 – 65%
• Youngs modulus for rods	21,7 msi (150 GPa)
• Ultimate tensile strength for strands	203 ksi (1400 MPa) (failure in terminations)
• Maximum tension during service	68 ksi (470 MPa) (for extreme loading)
• Safety to failure at extreme loading	3,0

図 4.7-1 TLP の構成
出典：三井海洋開発
ホームページ

表 4.7-1 TLP テンドンの概略要求仕様

(2) 深海海底資源開発用ドリリングライザー、フレキシブルライザー

ライザーパイプに用いる材料を変えて、その材料の破断強度と深度との関係と比較した結果、スチール材によるライザーパイプでは水深 3000m 程度が限界となるが、CFRP を用いた複合材料では水深 6000m 以上の大深海への適用が可能であった。更なる大水深化のためには比強度と比剛性に優れる複合材料の利用が効果的であるが、複合材料製ライザー管ではジョイント接続部の強度不足という問題があり、社会実装へむけて、接続部の構造検討も合わせて進める必要がある。

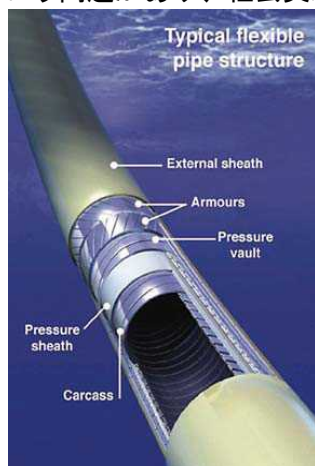


図 4.7-3 フレキシブルライザー
構造図（Deepflex 社ホーム
ページ）

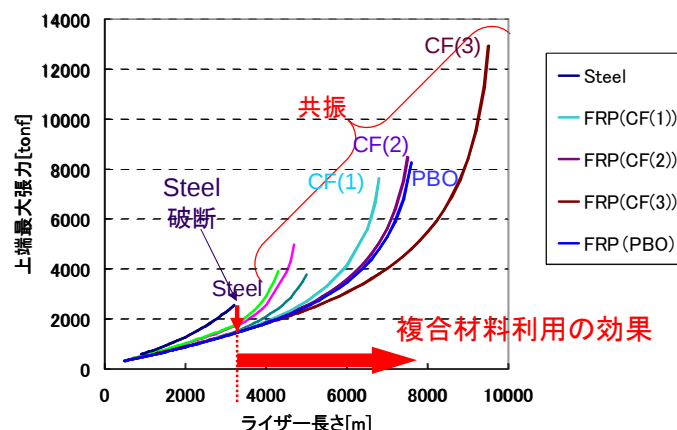


図 4.7-4 掘削可能水深及びライザー長と上端最大張力の関係

(3) 海洋深層水温度差発電

高効率発電のためには大量の深層水が必要であり、要求仕様は直径 5m 以上、長さ 800m の大口径配管が必要であるため、その製造技術と洋上での施工技術などの課題を整理した。

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

b) 1-a-2 大型平板の成形技術（単板、サンドイッチ材） ※H29.4～H31.3

大型風力推進船の硬翼帆パネルや建築パネルのサンドイッチ構造を、連続成形技術により低コストで長尺構造物を成形する検討を行った。スキン層は、繊維基材に熱可塑エポキシを含浸させ、金型レスで加熱重合させパネルを製作する。コアは、連続成形コルゲートや発泡フォームなどを使用し、成形金型上でスキン層とコア層を加熱接合する成形方法を考案した。

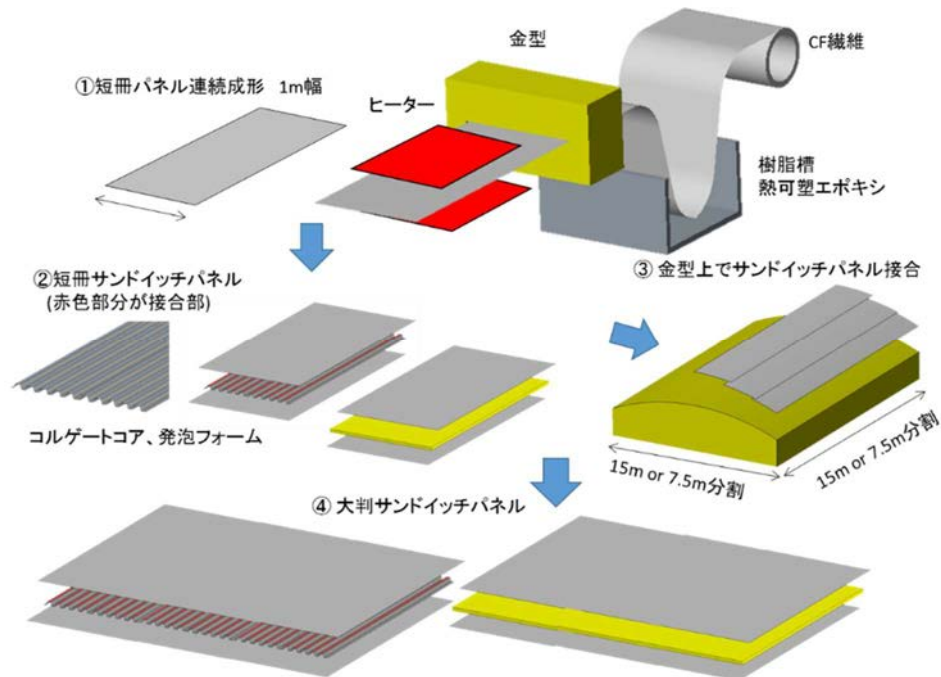


図 4.7-5 大型平板サンドイッチパネルの連続成形工程の説明図

c) T-e 大型パネル（硬翼帆） ※H28.4～H30.3

大型 FRP サンドイッチパネルを帆とした硬翼帆を搭載した大型風力推進船建造プロジェクト（東京大学ほか）において製作した、大型 FRP サンドイッチパネルを実装した陸上実証試験機を用いて、空力特性や耐久性の試験を行った。



図 4.7-5 硬翼帆搭載大型風力推進船のイメージ図
(東京大学ホームページ)



図 4.7-6 陸上実証試験機
(長崎県佐世保市)

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

FRP サンドイッチパネルを搭載した空力特性は、ほぼ設計値とおりの結果(図 4. 7-7)であり、またパネル変形や剥がれなど損傷破壊の発生は無かった結果から、大判 FRP サンドイッチパネルを実装した硬翼帆設計は問題が無いと判断し、実船に搭載する硬翼帆設計のモデルとした。

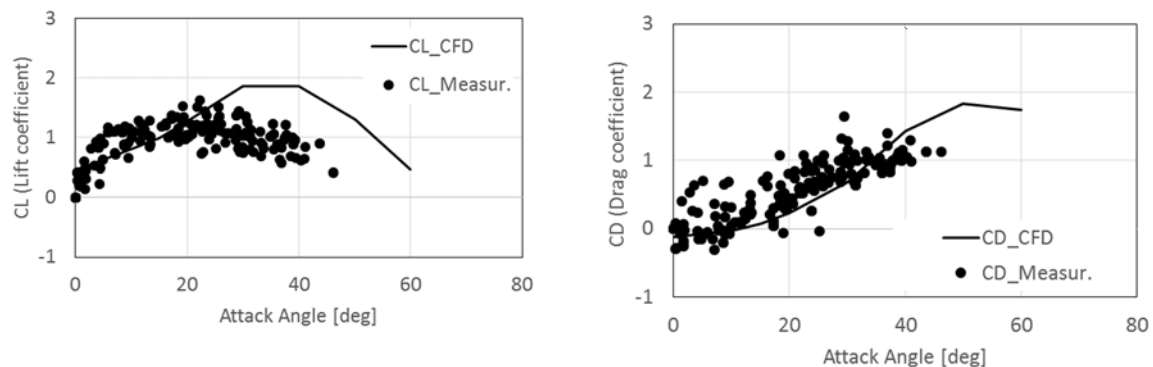


図 4. 7-7 陸上実証機の空力特性試験結果(左図：推力係数、右図：抗力係数)

第 1 号船に搭載する硬翼帆の FRP サンドイッチパネル試作品の試験を行った。曲げ試験耐久性とスキンコア剥離強度の試験を行い、試作品パネル構造に問題は無いことを確認した。

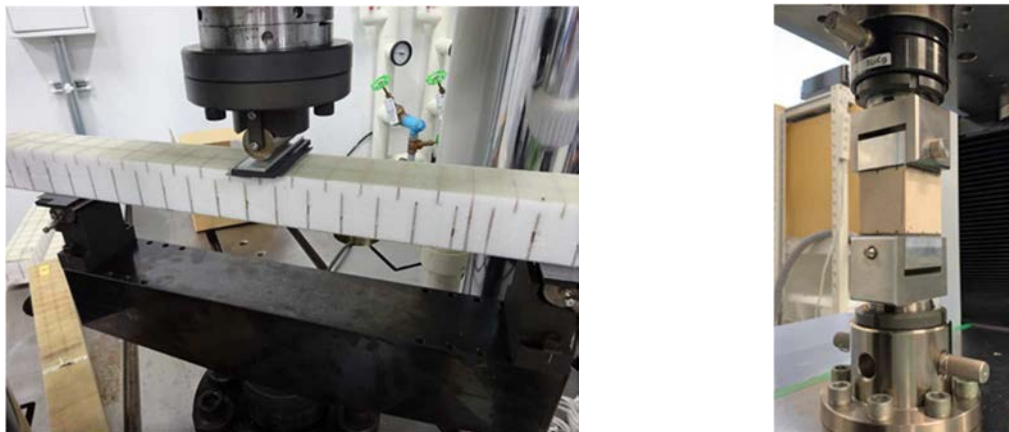


図 4. 7-8 実船搭載硬翼帆の試作 FRP サンドイッチパネル試験の写真
(左写真：曲げ疲労試験、右写真：スキンコア剥離試験)

(5) 今後の課題と対応方針

a) 3-②-c 海洋構造物及び再生可能エネルギー利用分野への革新材料の実装技術検討 ※～H28. 3

(1) TLP テンドン

海洋構造物として新規に参入していくためには大規模な実証実験を経てその性能を証明することが求められ、大規模な財源確保等の課題がある。

(2) 深海海底資源開発用ドリリングライザー、フレキシブルライザー

ドリリングライザー、フレキシブルライザーについては技術的には可能であるが、メーカーによる開発が先行して進んでおり、後発で参入するための独自性を見出すことが必要である。

(3) 海洋深層水温度差発電

熱可塑性樹脂材料ベースの複合材料の特徴を生かして、洋上で二次加工を加えながら敷設・設置を行う、等々の搬送・施工技術の検討が必要である。

b) 1-a-2 大型平板の成形技術(単板、サンドイッチ材) ※H29. 4～H31. 3

連続成形装置や、熱可塑コア材の選定など材料選定に課題があるため、今後は装置改良、開発、連続成形に適したコア材の開発などを行う必要がある。

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

c) T-e 大型パネル（硬翼帆） ※H28.4～H30.3

VaRTM 成形 FRP サンドイッチパネルを搭載した第 1 号線が 2022 年就航予定であるため、航行時の課題を確認し第 2 号船以降の仕様を検討する。

(6) その他特記事項

なし。

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

4.8 グラウンドアンカー

テーマリーダー（氏名、所属、役職）：	塩谷 智基、京都大学、准教授（～H26.9）、特定教授（H26.10～）
サブテーマリーダー（氏名、所属、役職）：	石田 応輔、金沢工業大学、研究員（H31.4～） 麻植 久史、京都大学、特定准教授（H31.4～）
研究開発実施期間：	H25 年 11 月～R2 年 3 月
参画機関：	京都大学、物質・材料研究機構、土木研究所（～H28.3）、小松精練（H28.4～）、金沢工業大学（H30.4～）

（1）テーマの概要と目指すべき将来の姿（拠点ビジョン）との関係

革新材料を使用したグラウンドアンカー支圧板の社会実装に向けて、第 1 フェーズで開発された材料自体の性能を評価しつつ、社会が受け入れやすい材料としての高付加価値化を目指す。そのためにまず、支圧板として必要な仕様を整理し、使用環境での応力レベルで開発された支圧板が十分な性能を有しているか評価する。同時に、革新材料と親和性が高く、長期耐久性に優れる光ファイバセンサを支圧板に埋込み、支圧板として上記の性能評価への適用可能性を明らかにする。加えて、社会に受け入れられる際に重要なファクターとなる経済性、利便性および汎用性のある計測システムを構築する。将来的には、支圧板だけでなくアンカーロードにも革新材料と光ファイバセンサを導入し、グラウンドアンカーだけでなく、斜面全体の維持管理を可能とするシステムを構築する。これより、従来のグラウンドアンカーと異なり、耐食性、耐候性があり、機械的な故障の無い維持管理システムを構築することが可能とあり、維持管理費用を抑えた社会インフラの作成に寄与できる。

（2）想定する製品・サービスについて（担い手、社会的インパクト・経済的インパクト）

革新材料と光ファイバセンサ導入したグラウンドアンカー支圧板は、グラウンドアンカーの部材自体にセンサ機能を具備させたものである。通常、センサと部材は別に設けられるが、これは維持管理を重要視していなかった過去の状況や、機械式、電気式センサの寿命が 5 年程で長期間使用できないことなどが原因である。本製品は、高耐久性で、電氣的故障がない光ファイバセンサと耐食性・耐食性の高い従来の鋼材に比べ著しく軽量である CFRTP を組み合わせることで、作業効率が高まり、さらに信頼性のある長期的アンカー劣化監視を可能とした部材製品である。

これからの土木構造物は、人口減少に伴う公共事業費や土木技術者の減少などの背景もあり、限られた予算の下で効率的な維持管理が望まれている。これには、構造物に大規模な変状が生じる前に補修・補強などの対策を実施して、長寿命化を可能とする予防保全が重要である。そのため、変状を早期に検知できるような長期間センシングシステムを部材自体に組み込み、昨今のセンシング需要状況に応じたサービスを提供する。また、各支圧板を光ファイバケーブルで連結することで、近年激増している集中豪雨や地震災害による斜面の広域監視がリアルタイムに可能となる防災減災にも大きく貢献できる。加えて、更に大規模な適用（市場）が見込まれる、プレストレストコンクリートの PC 緊張材の定着具にも応用できる。

以上に示したように CFRTP と光ファイバセンサ（FBG）を組み合わせた支圧板は、他分野においても有用で、長期間、安定した供用が前提となるインフラ構造物においては欠くことのできない部材であり、実際に修繕、補修、取り替えが行われているインフラ構造物を長期に信頼性のある永年の構造物とすることで、従来に比べ著しく省材料、省エネルギー、さらには低炭素社会を掲げた SDG（持続可能な開発目標）に大きく貢献できる。CFRTP は炭素繊維（カーボンファイバー）とプラスチックの複合材料であるが、炭素繊維については日本が製法を発明したこともあり、世界市場の 7 割を日本企業が占めている。そのため、本研究を先駆けとして鋼製品から FRP 製品へ

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

の素材転換が促進され、FRP 市場が広がれば、日本国内における FRP 製造業の活性化にもつながるため、極めて大きな経済的波及効果が期待できる。

我が国において、斜面・法面の新規保全を要する地すべり危険箇所は 21,381 箇所、地すべり防止区域指定地は 7,355 箇所ある。近年増加している集中豪雨による崩壊で、地すべり危険箇所はさらに増加する傾向にある。これらの危険箇所を市場規模として捉えると、今後の市場成長性は大きく、斜面の同時モニタリングを兼ね備えたグラウンドアンカー手法としては競合相手もないので、スマートグラウンドアンカーシステム実装時の経済的な波及効果は大きく、社会的インパクトも強いと考えられる。

(3) 研究開発期間終了時の達成目標

本研究の達成目標は、CFRTP 製支圧板と CFRTP 製アンカーロッドの作成である。支圧板の FBG で計測されるひずみ値は、FBG を設置する位置の状況（斜面・法面の水平角や表層土質など）により変化するため、アンカーロッドにおいて、深度方向に対し、等間隔に複数の FBG を設置して正確なひずみ分布を計測する必要がある。先述した通り、FRP 製品は優れた寸法安定性に加え、軽量、高強度、高剛性、疲労強度に強い、および腐食しないといった特性を持つ。その一方で、生産性・生産コスト面においては既往素材である鉄・鋼に劣るため、インフラ構造物への素材として用いる際には、生産から補修補強に要する LCC に基づき評価を行う必要がある。そのためには、FBG を具備した CFRTP 製アンカーロッドにおける品質変動の安定性（初期生産コストの算出に必要）と長期力学的性能（補修補強サイクルの算出に必要）とを検証する必要がある。国交省は「ICT の全面的な活用（ICT 土工）」等の施策に基づき、建設現場等における新素材の積極的な採用を後押ししており、その中においてはコスト算出に LCC を用いることが前提とされている。課題 2 の解消は、こうした国交省の方針にも沿ったものであり、我が国における建設生産システム全体の生産性向上に資するものである。

(4) 主な成果と達成状況

光ファイバセンサを具備した CFRTP 支圧板の評価（京都大）

光ファイバセンサ（FBG）を具備した CFRTP 支圧板に加えた緊張力と FBG で得られた歪み値との関係を、支圧板側面に貼付した歪みゲージで得られた歪み値と比較した。この実験ではアンカーロッドにより生じる緊張力を、静的載荷による荷重で再現している。この結果を見ると、中央の孔に設置した FBG でも荷重に対応した歪みが計測できている。実際の使用環境下で 200 kN 程の緊張力が掛かることを考えると、その時のひずみは $2200 \mu\epsilon$ 程度となる。これより、この支圧板に掛かる緊張力の変化を光ファイバセンサで計測できることが証明された。

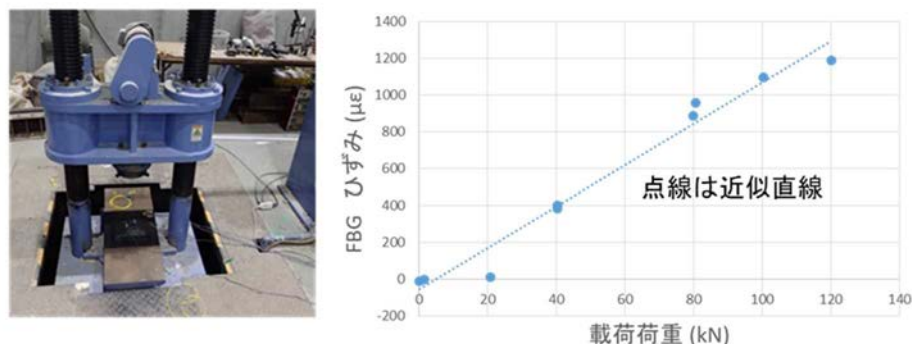


図 4.8-1 静的載荷における光ファイバセンサひずみ計測テスト

一般的に FRP は、既往素材である鉄や鋼に比してごく僅かではあるが、周辺温度に依存した熱膨張特性を有する。また、FBG の歪み値も温度の影響を受けるため、CFRTP 支圧板に FBG を埋設して -20°C から 40°C に外部熱を変動させ FBG における歪み値の測定を行った。

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

その結果, CFRP 支圧板における歪み値と温度変化との直線的関連性 (図 4.8-2 中央参照: FBG 1-4 は偏心を考慮して, 支圧板内に 4 カ所設置されているもの) から, 正確な緊張力を推定できる温度補正式を得ることができた。温度依存性を補正することで, CFRTP 支圧板への荷重 (緊張力) と FBG の波長シフト量との直線性は, $\pm 30\%$ 以内のばらつきに収まった (図 4.8-2 右参照)。この波長シフト量のばらつきは, 緊張力の最小分解能を決定づける重要な要素であるが, FBG が検出した信号を受信する計測装置 (インテロゲータ) の性能にも依存するため, 更なるデータの蓄積が必要である。

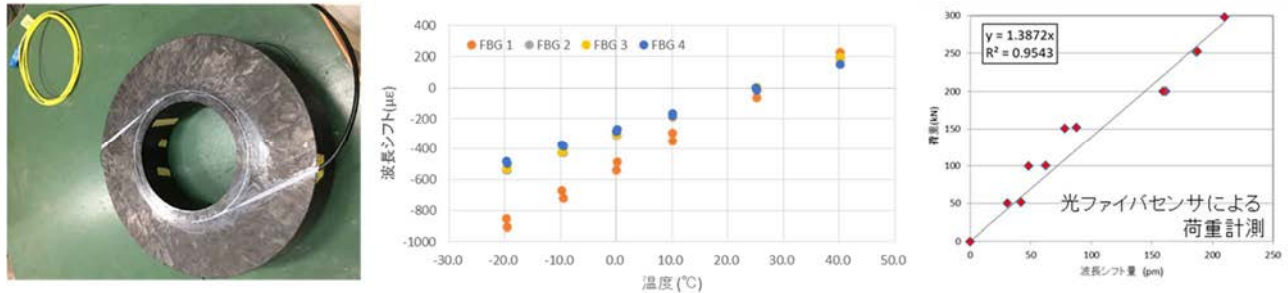


図 4.8-2 実装試験のための光ファイバセンサ FRP 支圧板における基礎データ収集

光ファイバセンサを具備した CFRTP 支圧板の実装試験 (京都大)

光ファイバセンサを具備した CFRTP 支圧板試験体を高速道路沿いの斜面補強工事に試験施工した (図 4.8-3)。このうちの 2 カ所に, 同支圧板を 2018 年 7 月に施工した。1 カ所は図 4.8-4 のように同支圧板とロードセルを同位置に設置し, FBG によるモニタリング機能を評価した。FBG による軸力を算出する式は, 室内実験の値から以下のように設定した。

$$WS_{ave} = \left[\frac{FBG1 + FBG2 + FBG3 + FBG4}{4} \right] \quad (1)$$

$$WS = WS_{ave} - (13.373T - 348.72) \quad (2)$$

$$P = -0.7159WS + 92.546 \quad (3)$$

ここで, FBG1~FBG4 は各 FBG の波長シフト, WS_{ave} は全 FBG に対する平均波長シフト, WS は温度補正された平均波長シフト, T は温度, P は軸力である。得られた結果を図 4.8-5 に示す。ロードセルは不具合によりデータの取得できていない期間がある。これより, 光ファイバセンサによる軸力計測は, ロードセルによる計測と比べて, 軸力値の 10% の誤差に収まっており, 精度よく計測出来ていると考えられる。また, 本支圧板は現在も故障なく稼働している。



図 4.8-3 試験施工現場の外観

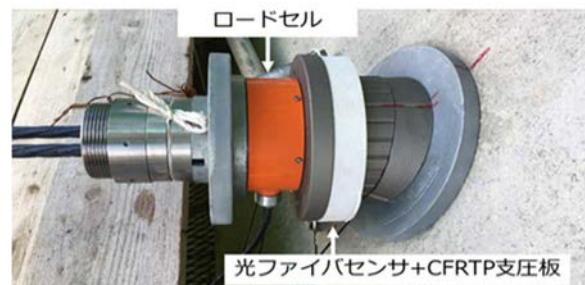


図 4.8-4 支圧板とロードセルの位置

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

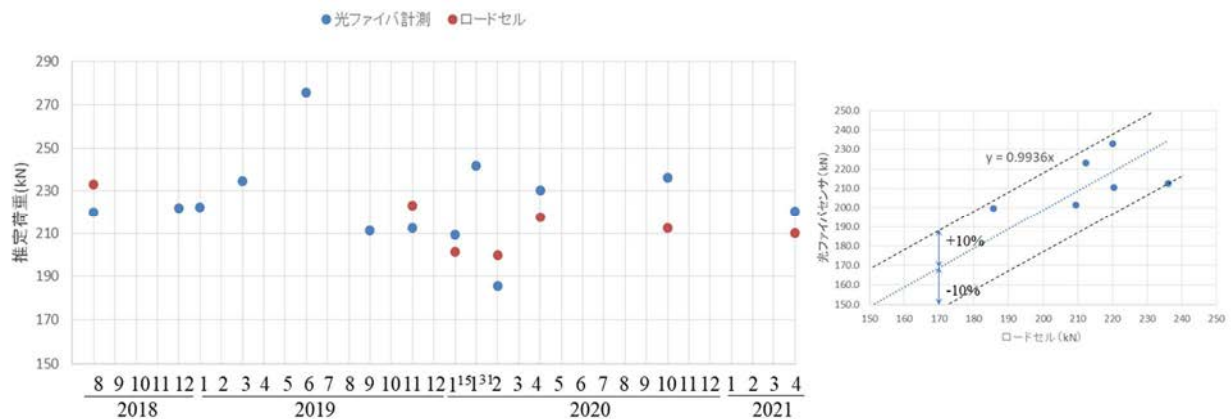


図 4.8-5 各月における光ファイバセンサで計測された軸力とロードセルによる軸力（左図），光ファイバセンサで計測された軸力とロードセルによる軸力の比較（右図）

材料評価（NIMS）

グラウンドアンカープレートに用いるランダム材の板厚および横方向の圧縮試験を実施した。また、破壊様相の観察により、板厚方向は、層すべりを伴う破壊過程であり、横方向は、縦割れを伴う破壊過程であることがわかった。本成果は、本製品での有限要素法解析に活用できる。

ランダム材を用いた製品では、非破壊、製品サイズ、時間を考慮した品質保証が求められる。そこで、レーザ加振とアコースティック・エミッションセンサーを用いた品質評価方法の提案を行った。全体的な弾性波の伝播の形状から、簡単な品質保証手法として適用できると考えられる。

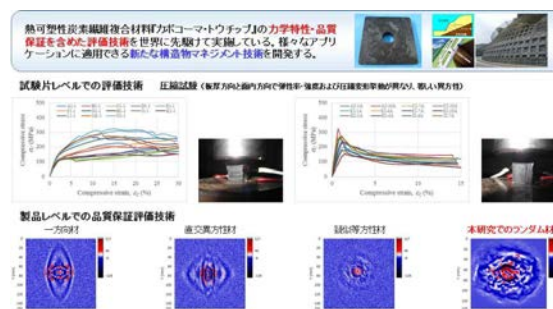


図 4.8-6 ランダム材の圧縮試験と品質保証方法提案

(5) 今後の課題と対応方針

光ファイバセンサ（FBG）は CFRTP 支圧板に対し、中央の孔の中に 4 つの FBG がらせん状に配置されている。そのため、各 FBG はそれが配置されている場所によって高さ方向の角度が異なるため、偏心の影響を抽出することが困難である。そのため、新しい光ファイバ埋設方法を検討している。すなわち CFRTP 支圧板の上面中央側に凸型の形状を作成し、その中に同一の高さで FBG を設置する方法である。この設置形態を模擬した数値モデルによるシミュレーションを実施し、最適な設置位置を定めて、試作品を作成し、力学試験を実施することで対応する。

(6) その他特記事項

なし。

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

4.9 プレス成形

テーマリーダー（氏名、所属、役職）：	布谷 勝彦、金沢工業大学、研究員（～H31.3） 白井 武広、金沢工業大学、研究員（R1.11～）
サブテーマリーダー（氏名、所属、役職）：	米山、金沢大学、教授（～H28.3） 白井 武広、金沢工業大学、研究員（H28.4～H31.3） 河本、コマツ産機（H28.4～H31.3）
研究開発実施期間：	H25 年 11 月～H31 年 3 月、R1 年 11 月～R3 年 3 月
参画機関：	金沢工業大学、金沢大学（～H31.3）、コマツ産機（～H31.3）、一村産業（～H29.3）、石川県工業試験場（～H30.3）、東レ（～H28.3）、サンコロナ小田（R2.4～R3.3）

（1）テーマの概要と目指すべき将来の姿（拠点ビジョン）との関係

本節では以下の研究テーマについて述べる。これら研究テーマは、熱可塑 CFRP プレス成形製品を、インフラ構造物への適用を図るための製造技術に関する内容であり、高機能構造部材を低コストで成形する技術(a, b, e)と、高品質で成形する技術(c, d)により長期信頼性の高い長寿命製品の実装を目指した。

- a) 2-①-b コミングル、牽切紡、長繊維 UD シート ※～H28.3
コミングル系織物基材の熱可塑 CFRP プレス成形の賦形性、成形品の機械特性評価
- b) 2-②-a サーボプレスによる成形技術 ※～H28.3
サーボプレス機による熱可塑 CFRP プレス成形技術、プレス成形装置を開発
- c) 2-②-i 検査技術 ※H27.4～H28
繊維複合材のあらたな検査原理の非破壊検査技術を開発
- d) 1-b-2 スタンピング成形プロセス（立体成形、複雑形状） ※H28.4～H31.3
油圧プレス成形機による、熱可塑 CFRP のスタンピングプレス成形技術を開発
- e) ①CFRTP プレス成形プロセスの仮想化製品モデルによる品質判定技術の開発 ※R1.11～R3.3

熱可塑 CFRP プレス成形技術の高度な成形条件最適化技術を開発する。

（2）想定する製品・サービスについて（担い手、社会的インパクト・経済的インパクト）

各研究テーマの担い手は、主に熱可塑 CFRP 成形を行う加工企業、プレス機など成形装置の製造企業である。これら企業では、各研究テーマの成果により、従来技術では不可能だった製品形状、機械特性の製品加工が可能となり、また成形品生産効率の向上、歩留まりの向上による廃棄ロスの低減、成形加工に関わるエネルギー削減の効果が期待できる。

（3）研究開発期間終了時の達成目標

- a) 2-①-b コミングル、牽切紡、長繊維 UD シート ※～H28.3
今後、各種構造部材へのコミングル系基材適用を図るため、プレス成形加工の基礎技術を得る。
- b) 2-②-a サーボプレスによる成形技術 ※～H28.3
サーボプレス機による熱可塑 CFRP 成形技術を検証し、専用プレス成形装置の仕様を作成する。
- c) 2-②-i 検査技術 ※H27.4～H28
新たな検査技術による非破壊検査手法を提案し実証性を確認する。
- d) 1-b-2 スタンピング成形プロセス（立体成形、複雑形状） ※H28.4～H31.3
熱可塑 CFRP スタンピングプレス成形プロセスを解明し、高精度、高品質の成形品を得るための成形条件最適化手法を検討する。

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

- e) ①CFRTP プレス成形プロセスの仮想化製品モデルによる品質判定技術の開発 ※R1.11～R3.3
熱可塑 CFRP プレス成形技術の高度な成形条件最適化技術を開発する。

(4) 主な成果と達成状況

a) 2-①-b コミングル、牽切紡、長繊維 UD シート ※～H28.3

ダブルカバリングヤーン法は、フィルムスタッキング法よりも含浸特性、機械特性、賦形性が向上し、ダブルカバリングヤーン法は、立体形状成形に適していることがわかった。

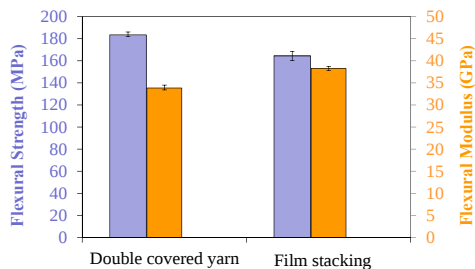


図 4.9-1 Double covered yarn とフィルムスタッキング複合材料の曲げ弾性率と強度 (Vf= 40wt%)

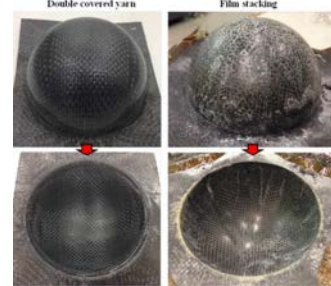


図 4.9-2 ダブルカバリングヤーンとフィルムスタッキングの賦形性評価

また、牽切紡複合系 (SBCF) は、連続炭素繊維 (CCF) よりも複合材の半球形状への賦形でよい表面性状が得られ、よい含浸性と低ボイド率を得た。これら結果より、コミングル系による立体形状プレス成形の優位性が示されたため、今後は中空部材などの構造物成形への適用が期待できる。

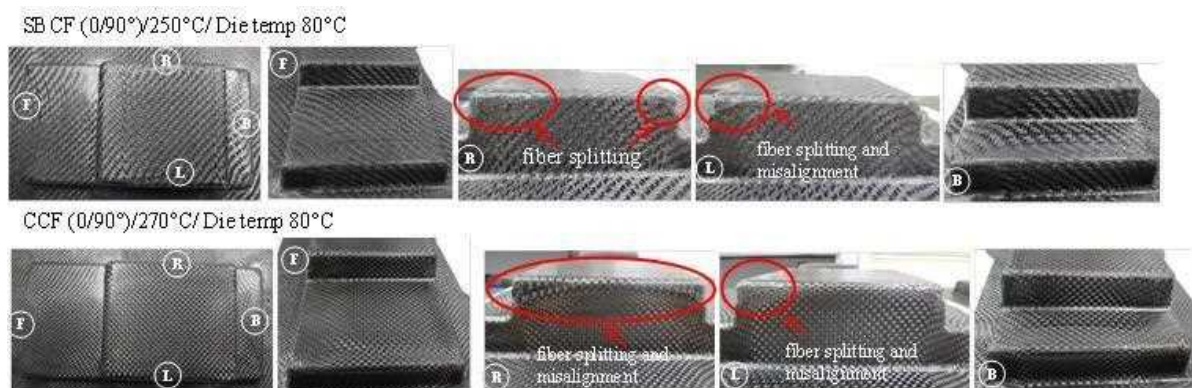


図 4.9-3 The formability performance of SBCF (0/90°) composites and CCF (0/90°) composites by using square shape molding at 80° C

b) 2-②-a サーボプレスによる成形技術 ※～H28.3

ベルト式加熱搬送装置と、サーボプレス機ダイクッション機能による側圧付与を有した金型で、長さ 950mm の大型 U 字構造部品をサーボプレス機で成形した。U 字構造部品の曲げ強度は、側圧荷重が大きいくちがいが大きく、側圧付与機構の有効性を示した結果であった。



図 4.9-4 ベルト式加熱搬送装置と側圧付与機構金型の断面図

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

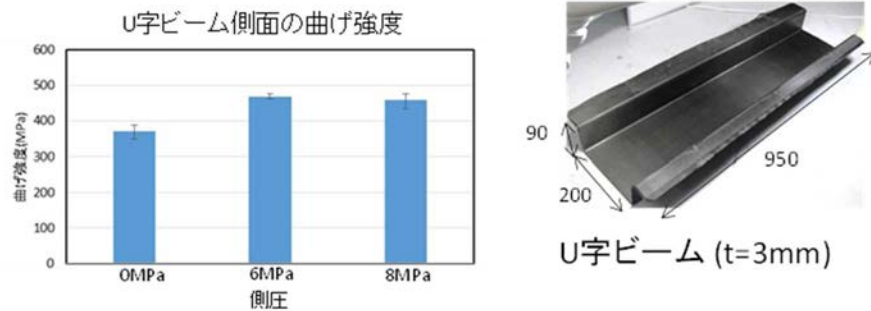


図 4.9-5 U 字構造成形品の側圧荷重に対する曲げ強度結果と成形品写真

金型内に搭載したビレットをダイクッション機能で押出してリブを成形、さらにパネル側からも不連続繊維を流動させた複合成型技術を開発し、リブ付き平板の成形試作を行った。



図 4.9-6 リブ付き平板試作品写真

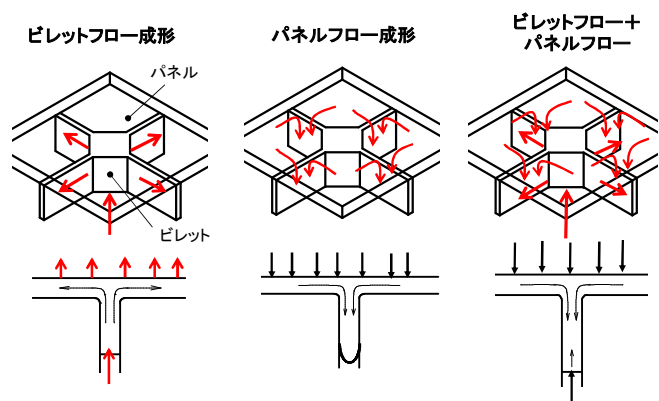


図 4.9-7 各種リブ成形方法の説明

c) 2-②-i 検査技術 ※H27.4～H28

超音波共振法による繊維複合材料の空隙率測定技術の開発を行った。繊維複合材料中に 1 次共振モードを励起させて共振周波数を測定し、音速と空隙率(X 線 CT 画像解析)の関係が線形である結果を得た。この技術により、超音波共振法で共振周波数の音速から成形品内部の空隙率測定が可能である。



図 4.9-8 電磁超音波共振法の測定構成の写真

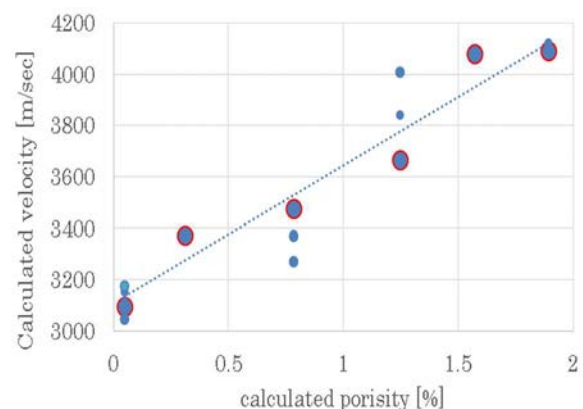


図 4.9-9 CFRP 成形試験体の空隙率と 1 次共振周波数の音速の関係

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

d) 1-b-2 スタンピング成形プロセス（立体成形、複雑形状） ※H28.4～H31.3

熱可塑 CFRP スタンピング成形プロセスを、金型に搭載した圧力、樹脂温度、金型変位の各センサ計測データを解析し、4つの領域に分かれることを解明した。そして、プレス成形圧縮荷重による材料流動に伴い金型速度が変化することを見出した。

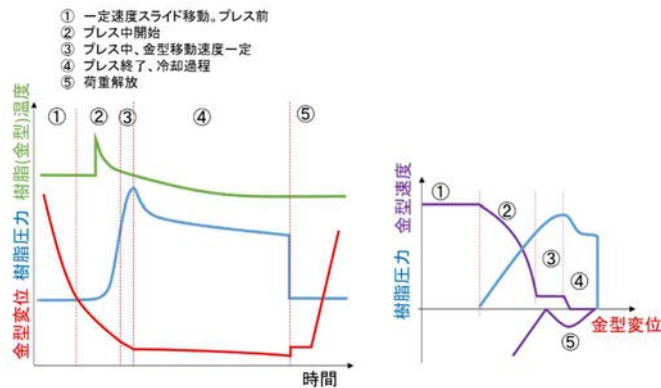


図 4.9-10 4つの領域に分割した熱可塑 CFRP スタンピングプレス成形プロセス

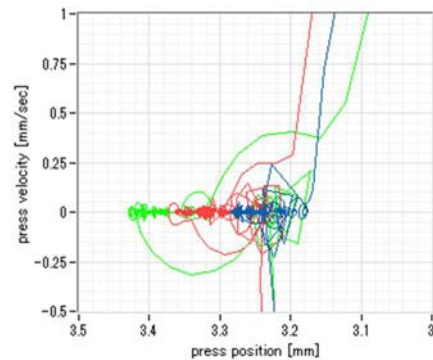


図 4.9-11 図 4.9-10 領域③の金型位置を速度変化の結果

e) ①CFRTP プレス成形プロセスの仮想化製品モデルによる品質判定技術の開発 ※R1.11～R3.3

研究テーマ d) で得た知見から、従来の試作評価による成形条件最適化ではなく、センサデータにより成形中の材料状態を推定して自律的に最適条件に適応した成形条件へ制御を行う高度化技術開発を検討し、要素技術である成形中の金型内材料流動粘度（みかけ粘度）を測定する手法を開発した。

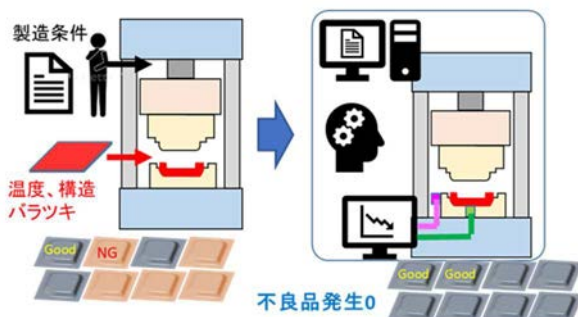


図 4.9-12 従来の条件最適化手法（左図）と自律適応型成形条件最適化手法（右図）を説明した図

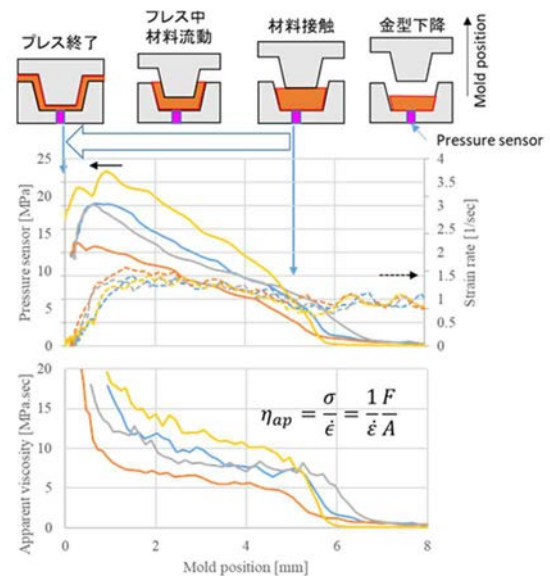


図 4.9-13 成形プロセス（上段図）の圧力とひずみ速度の変化（中段図）から計算したみかけ粘度変化（下段図）

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

(5) 今後の課題と対応方針

コミングル系基材の立体形状プレス成形性を活用できる構造部材の今後の要望次第で、コミングル系を適用した試作検討を行う予定である。検査技術は、各研究テーマの構造品形状が異なるため、共通検査技術研究ではなく各テーマ内で個別の検査技術研究として継続する。サーボプレス機の成形技術は、フェーズⅡ以降は、金沢大学の研究テーマとして継続し、本事業ではフェーズⅡから導入した油圧プレス機を用いた、成形条件最適化の高度化技術開発の研究を継続し実装化を目指す。

(6) その他特記事項

なし。

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

4.10 ダブルベルトプレス

テーマリーダー（氏名、所属、役職）：	石田 応輔、金沢工業大学、研究員（～H31.3） 中島 正憲、金沢工業大学、研究員（H31.4～）
サブテーマリーダー（氏名、所属、役職）：	北田 純一、サンドビック（～H31.4）、IPC0（R1.5～）
研究開発実施期間：	H25 年 11 月～R2 年 3 月
参画機関：	金沢工業大学、サンドビック（～H31.4）、一村産業（～H31.3）、東レ（～H28.3）、石川県工業試験場（H28.4～H31.3）、IPC0（R1.5～）

（1）テーマの概要と目指すべき将来の姿（拠点ビジョン）との関係

次世代インフラの共通部材として、従来の金属に代わって軽量・高強度、錆びずに現場での二次加工が可能な熱可塑性 CFRP 板を、ダブルベルトプレス（DBP）装置を用いて高い生産性と低コストで製造する技術を開発する。本拠点の目指すビジョン「革新材料による次世代インフラシステムの構築」において長寿命で軽量の社会インフラ部材（床版）、長大構造の実現による海洋インフラ部材（風力ブレード）の平板共通部材として貢献を図る。

（2）想定する製品・サービスについて（担い手、社会的インパクト・経済的インパクト）

想定する製品は土木分野の床版や海洋風力発電ブレードの構造部材として使用できる熱可塑性 CFRP の厚肉の長尺平板である。担い手は最終製品メーカー、FRP 部材メーカーで、本テーマで開発した DBP 装置を参画機関である IPC0(株)が製造販売し製造技術を適用する。社会インフラ部材として維持費用の低減効果、海洋インフラ部材として新規長大構造の実現といった社会的インパクトが期待できる。

（3）研究開発期間終了時の達成目標

インフラ部材として適用可能な厚肉（ $t6\text{mm}$ ）の熱可塑性 CFRP 板を高速成形（ 1m/分 ）する製造技術と装置開発を行う。成形品質についてバッチプレスで作製する場合と同等の力学物性、ボイド率 1%以下を達成する。

（4）主な成果と達成状況

・成形基材の開発

熱可塑性 CFRP (CFRTP) においては、炭素繊維に塗布されているサイジング剤が CFRTP の機械的強度に影響を及ぼす。そこで、炭素繊維基材に施すサイジング剤の処理条件について検討した。材料には炭素繊維平織物と PA6 樹脂フィルムを用い、フィルムタック法での熱プレス成型によりスタンパブルシートを作製した。サイジング剤処理として大気中 $240^{\circ}\text{C}8\text{h}$ および $400^{\circ}\text{C}10\text{min}$ での加熱処理を施した。図 1 に各サイジング剤処理条件における CF/PA6 界面せん断強度とスタンパブルシートの曲げ強度を示す。図 1 より、 $240^{\circ}\text{C}8\text{h}$ において CF/PA6 界面せん断強度と曲げ強度が共に最大値を示し、 $240^{\circ}\text{C}8\text{h}$ が最適なサイジング剤処理条件であることが分かった。

次に、DBP 成形によるスタンパブルシートの高板厚化を目的とし、予め繊維織物と樹脂フィルムを貼り合わせたラミネートシートを成形基材とするラミネート法について検討した。

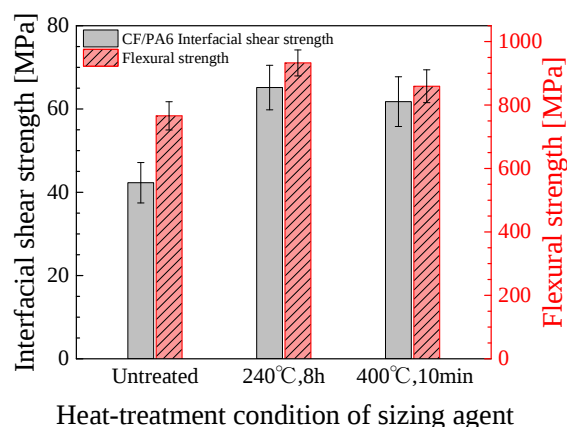


図 4.10-1 サイジング剤処理条件による CF/PA6 界面せん断強度と曲げ強度の

4 研究開発テーマの成果

ラミネート法(図 4. 10-2)では事前に炭素繊維織物と樹脂フィルムを一体化したラミネートシート(図 4. 10-3)を供給する。材料には前述と同じ炭素繊維平織物と PA6 樹脂フィルムを使用し、DBP 成形により板厚 $t=3\text{mm}$ と $t=6\text{mm}$ のスタンパブルシート(L1. 5m×W0. 55m)を成形した。ベルト速度は板厚 $t=3\text{mm}$ では 0. 4m/min、 $t=6\text{mm}$ では 0. 3m/min とした。フィルムスタック基材およびラミネートシート基材により成形した板厚 3mm と 6mm のスタンパブルシートの 3 点曲げ強度試験結果を図 4. 10-4 に示す。図 4. 10-4 より、板厚 6mm では、ラミネートシート法の方がフィルムスタック法より約 10%高い曲げ強度を示した。これにより、ラミネート法を用いた DBP 成形により高板厚かつ高性能なスタンパブルシートを得ることができた。

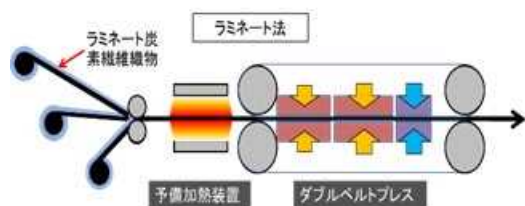


図 4. 10-2 ラミネート法による DBP 成形

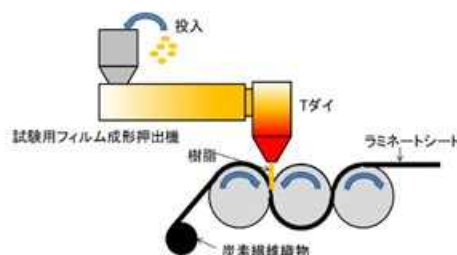


図 4. 10-3 フィルム成形押出機による CF/PA6 ラミネートシート加工方法

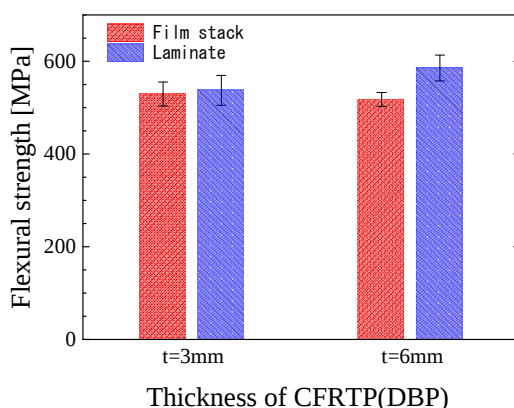


図 4. 10-4 フィルムスタック基材およびラミネート基材から DBP 成形したスタンパブルシートの曲げ強度試験結果

・成形技術の開発(含浸予測シミュレーション、ローラー含浸解析)

DBP を用いた成形技術の鍵となったのは、炭素繊維の配向乱れを生じさせずに熱可塑性樹脂を炭素繊維束に完全に含浸させるためのプロセス最適化である。

本装置は加熱ゾーンに固定ローラー式プレスを使用しており、ベルト間の隙間(Gap)を固定する位置制御方式である。ローラー直下で圧力は一定でなく、含浸流動挙動に依存して一意に定まらない。そして、面内方向の圧力分布が樹脂の面内流動と繊維配向の乱れを引き起こす。図 4. 10-5 に示すようにシミュレーション(PAM-RTM)を使用してローラー直下の圧力変化、樹脂含浸・流動挙動を解析した。図 4. 10-6 には樹脂粘度の違いによる圧力の変化の例を示す。このように様々なプロセス条件(ベルト速度、樹脂粘度、Gap、etc.)が圧力変化と樹脂含浸流動挙動へ与える影響を明らかにすることで、最適なプロセス条件選択の指針を得ることが出来た。

もう1つの成果は DBP 含浸プロセスをモデリングしたシミュレータの構築である。基本的なプロセスでは熱風により加熱されたベルトからの板厚方向の伝熱によって基材は昇温される。そこで熱伝達理論に従ってその加熱挙動を定式化した。さらに、各ローラー直下の圧力、上記温度から推算される樹脂粘度、滞留時間、及び、ホットプレス実験により得られた繊維基材の浸透係数を入力値として、Darcy 則に基づいて含浸距離を算出する手法を開発した。

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

図 4. 10-7 に開発したシミュレータの全体像を示す。DBP の含浸進行を予測できるようになったことで、プロセス最適化の試作コストを低減し、装置のスケールアップ設計が容易となった。

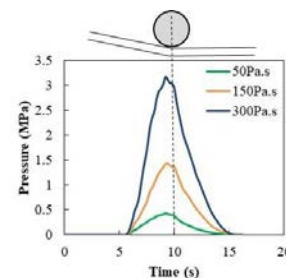
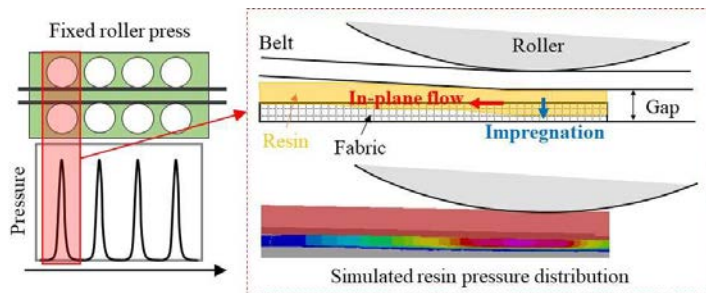


図 4. 10-5 ロールー直下の含浸流動とシミュレーション圧力分布 図 4. 10-6 異なる粘度での圧力変化

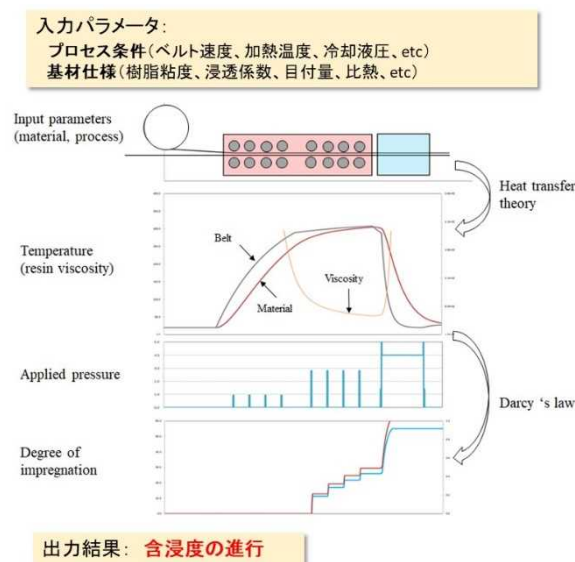


図 4. 10-7 開発した DBP 含浸プロセスのシミュレータ

・高速成形プロセスの開発（IH 予熱装置、高速成形プロセス検証）

DBP を用いた厚肉 CFRTP シート成形は図 4. 10-8 のように実施される。炭素繊維織物と樹脂フィルムを積層したものを連続的に DBP へ投入する。加熱及び冷却プレスゾーンで構成される DBP に投入され、昇温した熱可塑性樹脂は溶融し、加圧によって炭素繊維へ含浸していく。十分に繊維内に熱可塑性樹脂が含浸した後、冷却加圧を経て、CFRTP シートが得られる。

しかし従来の方法では、熱可塑性樹脂が溶融し、炭素繊維内へ速やかに含浸可能な温度に到達するまでの昇温時間が長く、効率的なプロセスとは言えなかった。そこで炭素繊維と樹脂フィルムの多積層体を連続的に予熱するプロセス開発と DBP の昇温効率を飛躍的に向上させる装置開発を実施した。その開発結果を図 4. 10-9 に示す。図 4. 10-9 の①連続加熱装置は、炭素繊維が誘導加熱によって加熱可能であることを活用した新技術である。最大の特徴は、多積層体（例；炭素繊維織物 28 枚 + PA6 フィルム 29 枚）であっても厚み方向の熱伝導に関係なく直接加熱出来ることにより、従来の熱風炉や赤外線加熱では達成し得ない昇温効率を得られたことである。

続いて②IH プレスモジュールは、誘導加熱によって、スチールベルトを直接加熱が可能な新規のプレスモジュールである。従来の熱風加熱式と比較すると、約 10 倍の速度でスチールベルトを昇温出来る。更に③ドラム加熱（既存技術）と組合せた。この高速成形プロセスにて、板厚 6mmt の CFRTP を 1m/分での成形を試みた。その温度プロファイルを図 4. 10-9 中に示す。なお改良前の DBP での最大成形速度 [0. 2M/分] からは 5 倍の生産速度上昇を達成した。

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

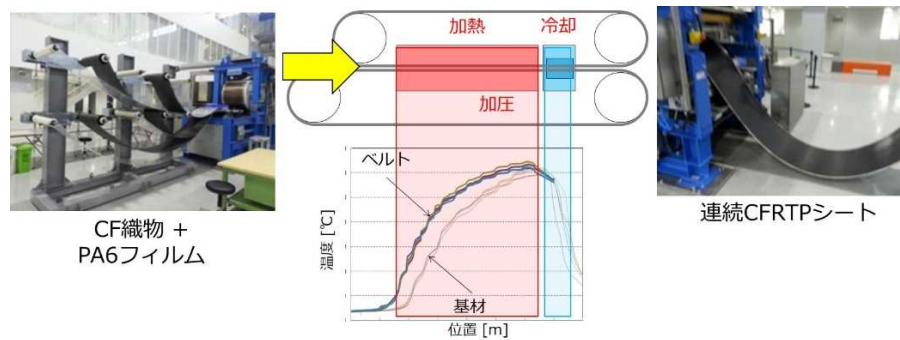


図 4.10-8 ダブルベルトプレスを用いた CFRTP 連続シート成形概要

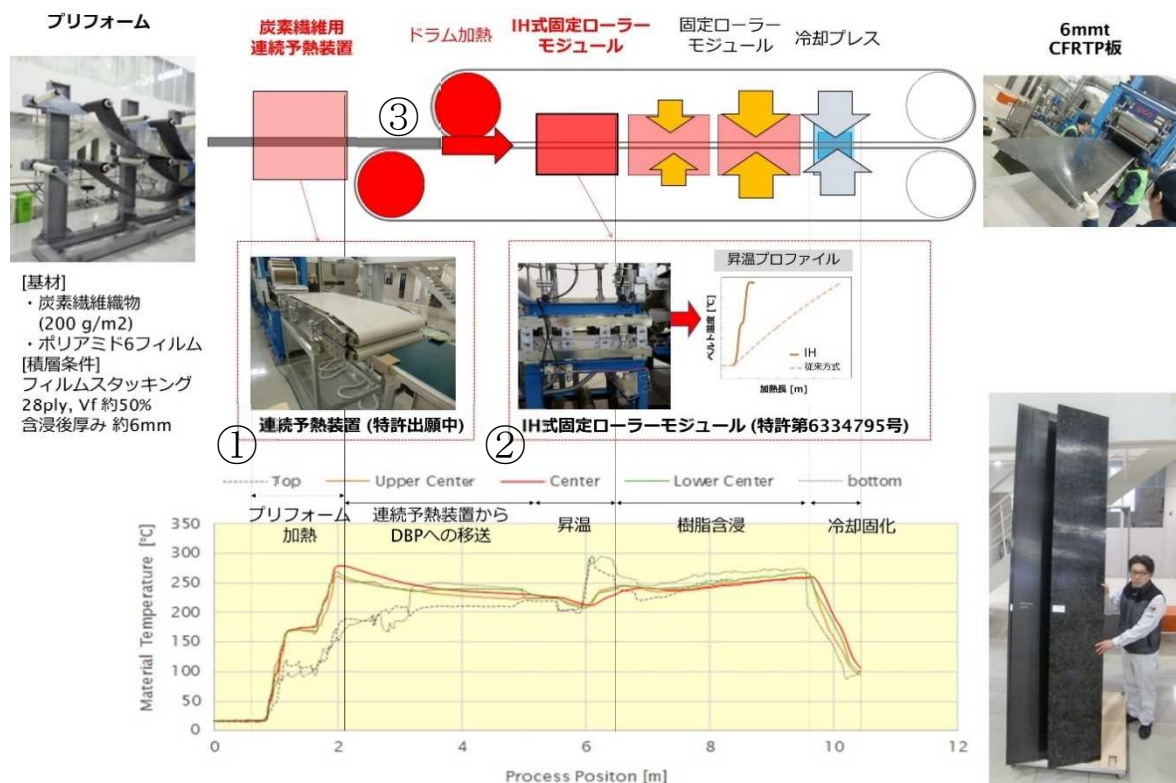


図 4.10-9 ダブルベルトプレスを用いた高速成形プロセス開発結果

(5) 今後の課題と対応方針

本研究開発は最終目標である 6mm 厚の熱可塑性 CFRP 平板を 1m/分で連続成形するプロセスの確立を達成した。今後は建築分野、海洋分野のインフラ部材を中心として用途展開を図っていく。

また、本技術は、従来方式と比較して大幅にコストを削減したプロセスを提供出来るだけでなく、初期検討から導入までに必要な生産技術検討期間の削減も可能となるため、他の最終製品メーカー（自動車）、中間材製造メーカー、化成品メーカーと様々な業界から注目されており、多岐にわたる製品開発案件にも取り組んでいく。

(6) その他特記事項

・2020 年度繊維学会論文賞 杉俣悦郎「サイジング剤の熱処理が CFRTP 複合材料の機械的強度に及ぼす影響」

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

4.11 ランダムシート

テーマリーダー（氏名、所属、役職）：	石田 応輔、金沢工業大学、研究員
サブテーマリーダー（氏名、所属、役職）：	（指定無し）
研究開発実施期間：	H25 年 11 月～H31 年 3 月
参画機関：	金沢工業大学、サンコロナ小田、サンドビック（H28. 4～H31. 3）

（1）テーマの概要と目指すべき将来の姿（拠点ビジョン）との関係

炭素繊維のトウを開織し一定長にカットしたテープに熱可塑性樹脂を含浸させ、それをランダム配向に積層させたランダムシートを高い生産性と低コストで製造する技術を開発する。ランダムシートは軽量・高強度の特性を持ちながら、不連続繊維であるため賦形性にも優れており、従来の金属材料にはない特徴を有する。その特徴を生かして、本拠点の目指すビジョン「革新材料による次世代インフラシステムの構築」において、社会インフラ部材、海洋インフラ部材の複雑形状が必要な部分の中間基材として適用を図る。

（2）想定する製品・サービスについて（担い手、社会的インパクト・経済的インパクト）

想定する製品は社会インフラ部材、海洋インフラ部材の複雑形状が必要な部分の中間基材として使用可能な熱可塑性 CFRP ランダムシートである。担い手は、参画機関であるサンコロナ小田（株）であり、2017 年に「フレックスカーボン」という名称で開発したランダムシートの製造販売を開始している。本製品は従来の炭素繊維複合材料では成しえない複雑成形性と高強度を同時に実現し、かつ量産が可能であり、大きな社会的インパクトが期待できる。また、インフラ部材以外の用途としても、ランダムシートをプレス成形することにより複雑な部品を量産可能であることから、多様な業界からニーズがあり、サンコロナ小田（株）によって事業展開が進められているところである。

（3）研究開発期間終了時の達成目標

等方性品質（力学特性の $0^\circ/90^\circ$ 方向の差 8%以内）を満たしたカットテープ散布技術と共に、ダブルベルトプレスを用いた任意長のランダムシート的高速連続生産技術を確立する。

（4）主な成果と達成状況

・ランダムシート製造の基礎技術の確立

薄層に開織した炭素繊維（CF）に現場重合型の熱可塑エポキシ樹脂を完全含浸させてテープ形状を連続的に製造する技術を確立した。そして、その薄層 CF テープを一定長にカットした後、テープ片をシート状に等方且つ均一に積層する技術を開発した。この一連の製造技術は自動化された製造ラインとしてサンコロナ小田社にて確立した。

等方性品質の指標として、成形シートから $0^\circ/90^\circ$ 方向に各々切り出した試験片の引張強度の CV 8%以下を目標として掲げ、最終的にそれを達成した。また、シート厚み分布に関しても、CV1%以下の良好な均一性を達成した（図 4.11-1）。

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

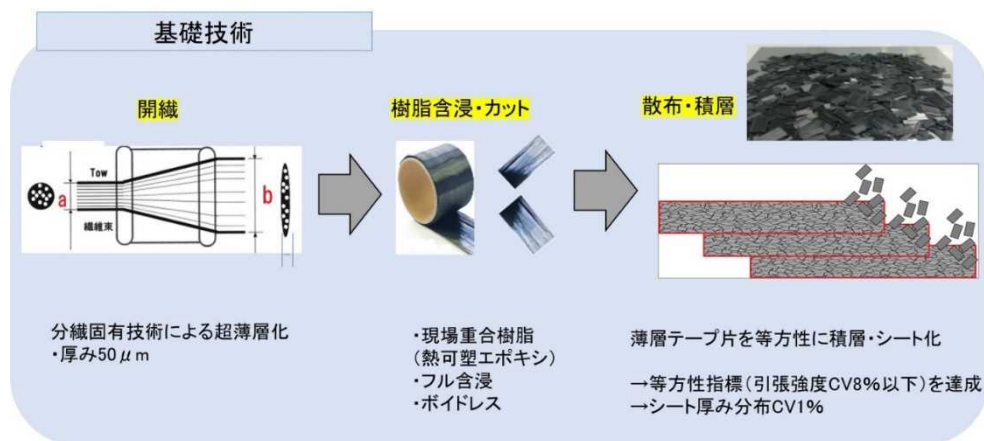


図 4. 11-1 ランダムシートの基礎技術（開織、樹脂含浸、カット、散布積層）の概要

・ランダムシートの量産技術の確立

均一にシート状に積層された CF テープ片を熱プレスすることで一体化させて、ランダムシートを成形する。本研究では、まず、ダブルベルトプレス（DBP）装置を用いて連続的に 4m の長尺のシートを製造する技術を開発した。加熱温度、ベルト速度、ベルト Gap 等のプロセス条件を最適化して、最終的に 1m/min の速度において、外観および物性が良好なシートを作製できる条件を確立した。

さらに、広幅化を想定し、1000mm 角シートを多段プレスにて作製する技術を開発し、従来同等の物性で複数のランダムシートを同時成形する技術を確立した（図 4. 11-2）。

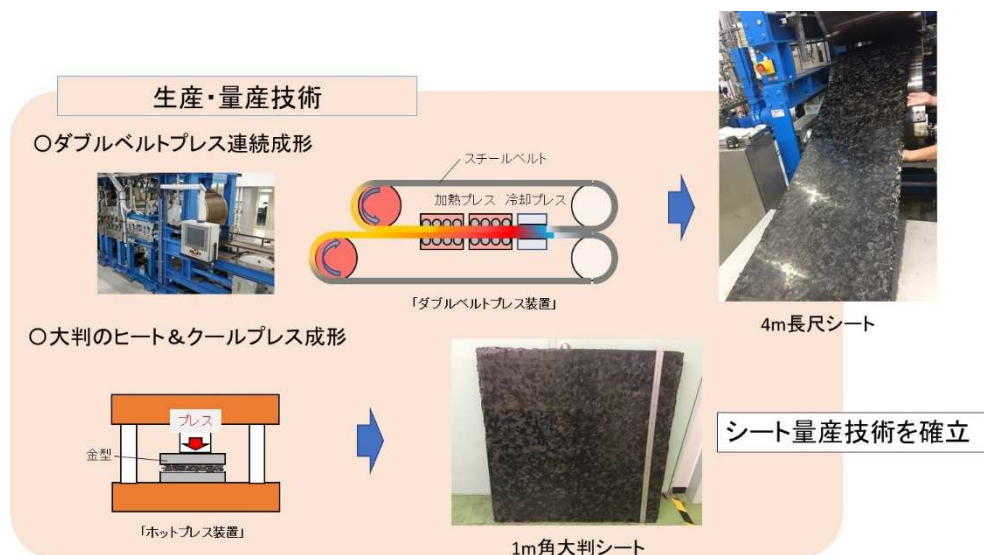


図 4. 11-2 ランダムシート生産・量産技術の開発

・社会実装への取り組み

本テーマで開発したランダムシートから 3 次元複雑形状の部材を成形する技術の開発を進めた。図 4. 11-3 に示すように、ランダムシートを IR ヒーター等で加熱して樹脂を溶融させた後、ロボットでプレス機へ搬送し、プレス成形により賦形させた。その結果、金型面を転写した優れた表面平滑性と、リブ・ボスへも流動した繊維が充填された複雑形状の部材を成形できる技術を開発した。

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果



図 4.11-3 ランダムシートからの複雑形状部材のプレス成形技術

上記の特徴を生かして、サンコロナ小田社によって様々な分野での社会実装を進めている。大きな成果として、アシックス社の陸上スプリントシューズ（ピンなしスパイク）「METASPRINT」の靴底に採用され、また、ニッター社の医療・工場現場用ウェアラブルチェア（作業者の負担を軽減するアシストスーツ）「archelis」への採用が進んだ（図 4.11-4）。

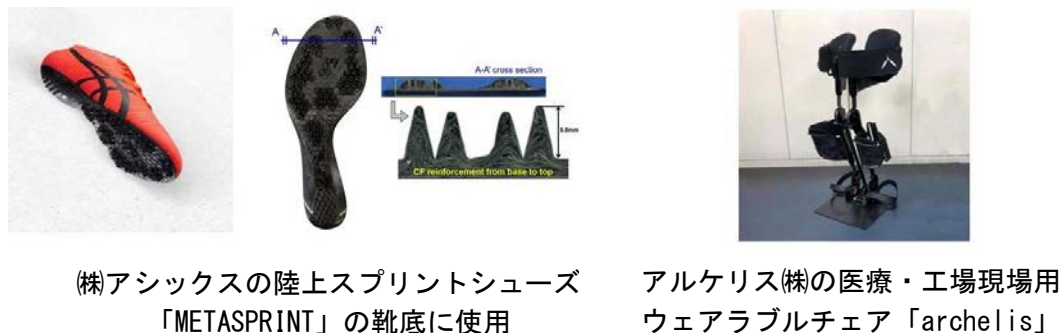


図 4.11-4 スポーツ、医療・福祉分野での用途展開

(5) 今後の課題と対応方針

2019 年には NexTEP 事業に採択され、ランダムシート量産のパイロットプラントの整備を進めている。現状ではインフラ部材用途を超えて、様々な業界からの引き合いがあり、先方のユーザーとの協業によって社会実装に向けた取り組みを進めている。今後必要な技術的課題として、テープのランダム積層パターンとプレスでの流動性の予測技術の研究、成形部材の疲労特性のデータ取得を進めている。

(6) その他特記事項

受賞歴

- ・コンポジットハイウェイ・アワード 2017・グランプリ受賞
- ・2019 年 先端材料技術協会・製品技術賞
- ・2020 年 JEC Composites Innovation Awards スポーツ&ヘルスケア部門最優秀賞

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

4.12 長尺構造材

テーマリーダー（氏名、所属、役職）：	布谷 勝彦、金沢工業大学、研究員（～H31.3） 中島 正憲、金沢工業大学、研究員（H31.4～）
サブテーマリーダー（氏名、所属、役職）：	布谷 勝彦、金沢工業大学、研究員（H31.4～）
研究開発実施期間：	H25 年 11 月～R2 年 3 月
参画機関：	金沢工業大学、津田駒工業、大同工業、石川県工業試験場（H29.4～H31.3）、芦田製作所（～H28.3）、ナック・ケイ・エス（～H29.3）、日本エフ・アール・ピー（H28.8～H29.3）

(1) テーマの概要と目指すべき将来の姿（拠点ビジョン）との関係

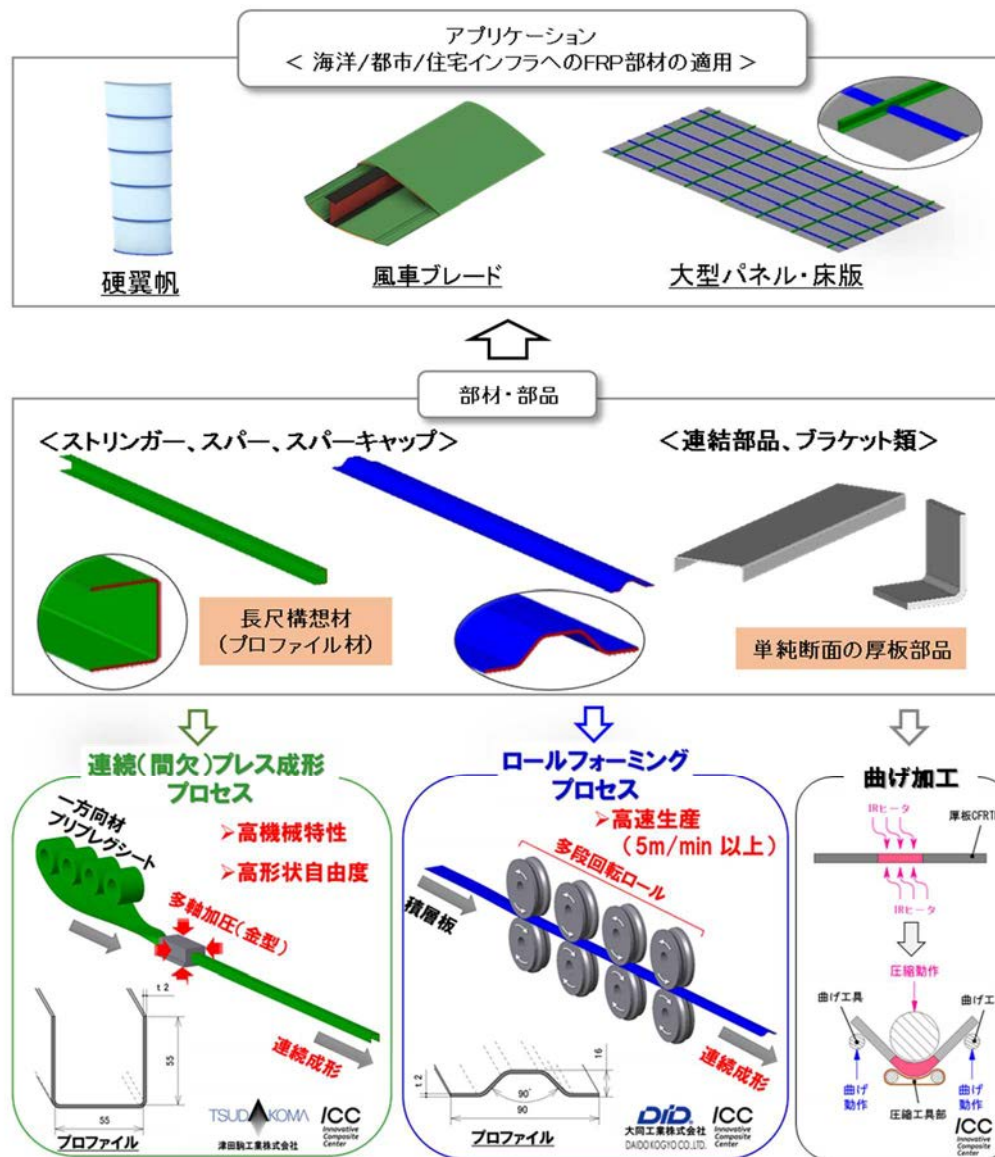


図 4.12-1 長尺構造材

図 4.12-1 にテーマ概要を示す。4.12「長尺構造材」は、ビジョン「次世代インフラシステムの構築」にあげる海洋/都市/住宅インフラにFRP部材を適用/実装するために、FRPの長尺構造材の連続成形プロセスの各成形プロセスおよび製造装置の研究開発を実施した。

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

連続成形プロセスは、硬翼帆/風車ブレード/大型パネルなどの大構造物に適用するための長尺材（プロファイル材）の製造を目的として、主に連続プレスとロールフォーミングの2タイプの成形プロセスおよび装置の研究開発の推進、および他の成形手法（回転成形、オートクレープ成形、引抜成形）の可能性評価を実施した。ここで、連続プレスの特徴は、高機能樹脂材料に対応した多軸加圧プレスを採用し、一方向炭素繊維積層材料（UD材）による高機械特性の成形品が得られ、また成形品の高形状自由度も高いことである。ロールフォーミングの特徴は、回転工具（成形ロール）による多段ロール方式を採用し、連続高速生産が可能なことである。インフランの大型構造物（例えば、床版、軽量パネル材など）は、上述の「長尺構造材」や4.10「ダブルベルトプレス」で製造する大型厚板の平板、4.9「プレス成形」で成形する小～中型の複雑形状の連結部品やカバー類、および「曲げ加工技術」で加工する厚板/単純形状のブラケット類（例えば、L字断面部品など）や厚板/単純形状のビーム材やブラケット部品などにより構成される。

(2) 想定する製品・サービスについて（担い手、社会的インパクト・経済的インパクト）

本テーマの研究開発は、フェーズ1より企業が主体となり実施しており、開発する技術や装置の社会実装を以下のように具体的に視野に入れている。

連続プレスプロセスは、繊維機械/工作機械用アタッチメントのメーカーである津田駒工業（株）が主体となり、研究開発を実施している。複合材向け加工装置もすでに製造販売しており、開発中の連続プレス装置も製造販売を行う。装置販売で、年間5台（1億円×5=5億円/年）を見込んでいる。また、フェーズ1で開発した自動積層機とフェーズ2-3で開発した連続プレス装置は、すでにカタログラインアップし上市しており、自動積層機は国内重工業メーカーに導入実績がある。

ロールフォーミングプロセスは、オートバイ/自動車/産業機械用のチェーンやコンベアシステムなどのメーカーである大同工業（株）が主体となり、研究開発を実施している。新規事業展開であるが、連続成形によるCFRTP長尺部材の製造/販売を展開する予定であり、建築メーカーや車両メーカー等への部材供給（12億円/年）を見込んでいる。また、連続成形装置の製造/販売も視野に入れている。

(3) 研究開発期間終了時の達成目標

連続成形プロセス（長尺プロファイル材）では、長尺構造部材の量産技術＜製造コストの低減、生産速度の向上＞の確立を最終目的とし、成形プロセス開発および製造装置の開発を目指す。それぞれの具体的な目標は、

[連続プレス]

60×60mmコの字断面の長尺材において、

- ・ 曲がり±0.5mm/m以内の高寸法精度な連続成形
設定理由 【アルミプロファイル材の寸法精度と同等】
- ・ ボイド率2%以下の高品質/高物性な連続成形
設定理由 【熱硬化プリプレグ成形品と同等】
- ・ 生産速度 2m/分的高速生産
理由 【熱硬化FRP引抜成形 以上】

[ロールフォーミング]

- ・ 生産速度 5m/分 以上的高速生産
設定理由 【熱硬化引抜成形より数倍高い生産性】
- ・ 機械特性において成形前材料と同等特性を実現
設定理由 【熱硬化FRP引抜成形 以上】
- ・ 形状精度において熱硬化性樹脂引抜部材と同等以上を実現

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

[曲げ加工]

- ・ シミュレーションを用いて、部分加熱/部分曲げを適用した曲げプロセスのコンセプトを決定
- ・ 実証試験装置を用いた曲げの基本プロセスを実証する
- ・ 曲げ部強度【熱硬化 CFRP と比較して 75%以上】
- ・ 曲げ部剛性【他の成形方と比較して同等】
- ・ バラツキ【プレス成形 CFRTP と比較して同等以上】
- ・ 低下加熱容量と低加工力の実現

(4) 主な成果と達成状況

4.12「長尺構造材」は、熱可塑性樹脂をマトリクスとした CFRTP 長尺部材の製造に可能性のある成形技術を検討した結果、連続成形プロセスとして「連続プレスプロセス」、「ロールフォーミングプロセス」を選択し、プロセスおよび装置の開発を進めた。「連続プレスプロセス」はフェーズ2の2年目(H31～)、「ロールフォーミングプロセス」フェーズ3(H28～)より、C0Iの研究開発から連携プロジェクトへ移行し、高付加価値の長尺 CFRTP 部材の需要が高い航空機部材向けの適用開発へ移行した。また、連続成形予材料を製造するための[自動レイアップ装置の開発]は、フェーズ1(～H28)で開発を完了し、津田駒工業(株)より装置販売を開始した。[曲げ加工]は、厚板の CFRTP 積層材の部分曲げ加工プロセスとして、実証実験を完了し、基本プロセスの開発を完了した。主な成果達成状況は以下である。

[連続プレス]

繊維アライメントの向上により安定した成形品質を得るため、成形材料の張力をコントロールしながら送り出しが可能なクリール装置の開発・製造を行った。張力コントロールにより成形後の炭素繊維のアライメントが向上することを確認した。また、物性においても、製品の曲げ強度が向上し、測定箇所による物性のバラツキが改善されることを確認した。達成目標に対しては、曲がりについては目標 0.5mm/m 以内を僅かに越えた方向があるが、概ね目標精度内に収まった。ポイド率においては、0.5～1.5%程度であり、目標 2%以下を達成した(図 4.12-2)。

連続プレスとクリール装置を連動させ、材料の張力をコントロールした連続成形試験を実施し、連続プレス成形システムを完成させた(図 4.12-3)。

[自動積層装置]

連続プレスプロセスに用いる一方向繊維の多軸積層材を効率よく生産するための自動積層装置の開発を行った(図 4.12-4)。連続繊維多軸積層材生産の確立したことにより、連続成形装置へ材料供給が可能となった。また、開発した自動積層装置は、既にプレス成形やオートクレープ成形用の積層材プリフォーム製造装置として上市し、販売実績も上がっている。

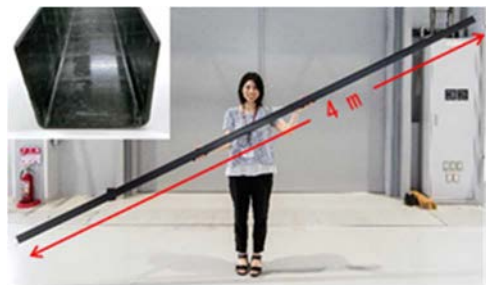


図 4.12-2 連続プレス成形品



図 4.12-3 連続プレス成形システム



図 4.12-4 自動積層装置

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

[ロールフォーミング]

プロトタイプ成形装置（図 4.12-5）の開発を終了し、最適成形プロセスの検証を実施している。t2mm の成形（図 4.12-6）において、目標成形速度：5m/分、連続成形：2m を達成した。成形品質は、フェーズ 2 で実施したプロセスと装置改良により、プレス成形相当を達成した。ただし、加熱はバッチ加熱であり、連続加熱（連続成形）を実現していない。現在は、長尺 2m 以上の成形および更なる高機械特性を目指し一方材積層材の適用に向けて、開発を進めている。



図 4.12-5 ロールフォーミング装置



図 4.12-6 ロールフォーミング成形品

[曲げ加工]

曲げ加工は、フォーミングシミュレーションを用いたプロセス開発を実施し、実証加工装置（図 4.12-7）を設計製作した。実証加工により、厚板 CFRTP 積層材の部分加熱による曲げ加工を実施し、圧縮後に曲げをおこなう多段モーションが、曲げ部に分散したシワを形成できることが実証できた。この曲げ部に分散したシワは、シワのない熱硬化 CFRP と比較して、同等の強度と剛性を有していることを実証できた。

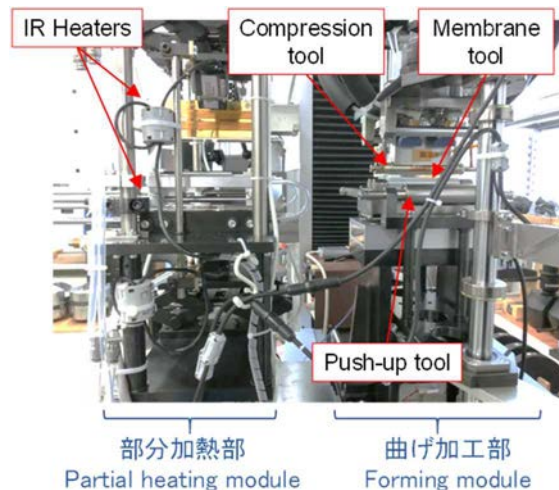


図 4.12-7 曲げ加工実証装置



図 4.12-8 分散したシワの曲げ部

(5) 今後の課題と対応方針

4.12「長尺構造材」により開発した長尺成形プロセスは、形状自由度、様々な熱可塑樹脂への適用性、高品質成形を特徴とした「連続プレス」プロセスと超高速成形を実現した「ロールフォーミング」プロセスの大きく特徴の異なる長尺成形プロセスと装置を開発した。今後、「連続プレス」はさらなる高速化や形状自由度を、「ローフォーミング」はさらなる高品質成形が課題である。しかしながら、この異なる特徴を持つ 2 種類の CFRTP 長尺成形技術が開発できたことにより、これらを適材適所で選択することが可能となった。この 2 つのプロセスを得たことは、CFRTP 長尺構造材の社会実装の可能性を大きく前進できたと考える。

また、曲げ加工においては、基本プロセスを確立できたことで、実用加工装置への展開が見えている。他のテーマで開発した成形プロセスとあわせて、大型構造物への展開を図りたい。

(6) その他特記事項

なし。

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

4.13 中空部材

テーマリーダー（氏名、所属、役職）：	石田 応輔、金沢工業大学、研究員
サブテーマリーダー（氏名、所属、役職）：	（指定無し）
研究開発実施期間：	H25 年 11 月～H31 年 3 月
参画機関：	石川県工業試験場（～H28. 3）、金沢工業大学、ナック・ケイ・エス（～H26. 3、H28. 4～H30. 7）、岐阜大学（H26. 4～）、日本エフ・アール・ピー（H28. 8～）

（1）テーマの概要と目指すべき将来の姿（拠点ビジョン）との関係

本テーマでは軽量・高剛性・高耐力・高耐久の大型コンポジット部材提供を目的として、H28 年 3 月までのフェーズ 1 では①【2-①-c】「ブレード（組紐）、中間基材の開発（中空部材）」（金沢工業大学、石川県工業試験場、岐阜大学）と②【2-①-d】「ハイブリッド基材、成形技術の開発」（岐阜大学、金沢工業大学）の 2 テーマ、H28 年 4 月～H3 年 3 月のフェーズ 2 では③【1-a-3】「各種部材の現場重合引抜成形技術」（岐阜大学、金沢工業大学）を実施した。テーマの狙いは、大型構造物の軽量化を行うに有利な長尺・大型の中空閉断面構造を有する軽量部材を一発成形する技術の開発（①、③）とその耐久性の向上のための表面処理技術（②）を構築する事であった。検討の結果、②は可能性の確認を行って終了した。①、③は、製紐したブレード※と現場重合型樹脂の組み合わせにより、中空閉断面構造を有する大型長尺構造物の一発成形技術の構築に目途が付き、テーマ中断後も岐阜大学を中心に技術の深化と用途探索を継続して行っている。

本テーマが目指す将来の姿は、COI が目指す「革新材料による次世代インフラシステムの構築」のいずれの分野へも適用可能な部材を提供できる成形技術を構築して社会実装する事である。本テーマでは大型長尺構造部材をコストパフォーマンスに見合う大量生産技術の構築、具体的にはコンポジットの現場重合引抜成形技術の構築を目指す。この技術を構築するためには製紐したブレードと現場硬化型樹脂を合わせた現場重合引抜成形技術が必要不可欠である。更にこの技術の製造インフラを小型化できれば省エネルギーにも繋がる。このような製造インフラの小型化・省力化は将来、現場施工性の可能性を広げるものであり、まさしく次世代インフラを担う製造技術として極めて有望である。特に製紐したブレードと現場重合型樹脂の組み合わせは後述の通り製造インフラを小型化する可能性を秘めており、次世代インフラシステムの構築に向けて有望な技術である。

※本項で「ブレード」は組紐（braid）を意味する。風力発電の羽根（blade）とは意味が異なる。ここでは炭素繊維束単独、またはマトリックス樹脂含浸束（混織、含浸を問わず）の組紐をブレードと呼ぶ。

（2）想定する製品・サービスについて（担い手、社会的インパクト・経済的インパクト）

土木・建築分野においてコンポジット実用化の成功例として東京オリンピックの年に開業した初の超高層ホテル「ホテルニューオータニ」のユニットバスルームを上げることができる。このユニットバスルームは、①「セミキュービック方式」の開発による工期短縮化、②「ステンレス製防水パン」による高い防水性、③FRP（繊維強化プラスチック）採用による軽量化、④浴室内側から部材ごとに交換可能な高いメンテナンス性が謳われており、その落成によりこれを実証した。

（<https://jp.toto.com/tips/tidbit/bath/008.htm>）

更に、例えば、独立行政法人 土木研究所などは「FRP を用いた橋梁の設計技術に関する 共同研究報告書」で FRP 製歩道橋への適用性を検討している。これによれば、建築・土木分野へのコンポジット適用の経済的インパクトは、Ⅰ）軽量化による施工コストの低減、Ⅱ）耐食性向上による維持管理コストの低減、Ⅲ）成形コストに優れる引抜成形による共通部材化を行い、大量生産することによって更なる低コスト化が可能であるとしている。

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

(<https://www.pwri.go.jp/team/imarrc/research/tech-info/co360.pdf>)

以上のように、社会的インパクト、並びに、経済的インパクトとしては、適用構造物の施工期間の短縮、維持管理の容易さとコストダウンを上げることができる。これらに加えて、本テーマで検討する可搬性のある現場重合引抜成形技術を開発する事が出来れば、社会実装に際してより一層の大きなインパクトを与え、その展開を加速する事が出来ると考える。

そして、近年の航空機産業における軽量化技術を引くまでもなく、更なる構造・部材の軽量化を目指して炭素繊維強化コンポジット製の中空閉断面構造体の研究・開発が盛んに行われている。そのために国内成形メーカー各社のみならずエンドユーザー自らが成形を手掛けており、本テーマの技術開発が成功した場合は、その事業化の担い手としてこれらのメーカーを上げることができると考えた。

(3) 研究開発期間終了時の達成目標

本テーマでは、製紐技術と現場重合型樹脂を用いて中空閉断面構造部材を作製し、その連続成形技術である現場重合引抜成形技術の確立を目指す。本テーマでは中空閉断面構造部材の製品目標として、インフラ構造部材の基本部材である一次構造部材への適用可能性を明らかにすることを目標とした。

(4) 主な成果と達成状況

フェーズ1の H25 年度は石川県工業試験場にて円断面を有する炭素繊維束のみの製紐の基礎検討を行った。製紐装置の例とブレードの例を示す。

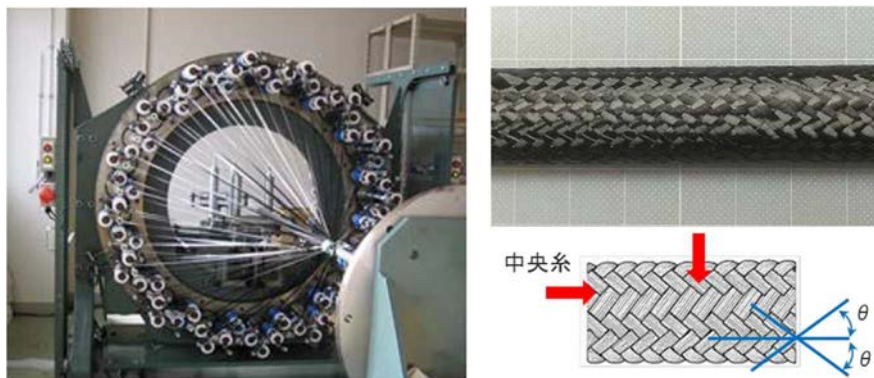


図 4.13-1 製紐装置の例とブレード、ブレード概略図

H26 年度は石川県工業試験場にて製紐したブレードにビニルエステル樹脂を VaRTM 法で樹脂含浸を行い、円断面を有する中空構造のモデル部材を作成した。また、熱可塑性樹脂をマトリックスとする炭素繊維とのコミングルド（混織）を想定するナイロンのマルチフィラメントの紡糸も実施した。H27 年度は、石川県工業試験場と岐阜大学が炭素繊維とナイロンのマイクロブレードヤーン（MBY）の製紐を行い、これの引抜成形の検討を行った。

H28 年度から H29 年度にかけて材料選択、製紐加工基礎検討、成形加工基礎検討を行うフェーズ1から量産実用化に向けた成形技術開発を検討するフェーズ2に移行した。岐阜大学は熱可塑性樹脂をマトリックス樹脂とする炭素繊維強化ブレードの成形加工技術の開発を行った。ここで用いた熱可塑性樹脂はナガセケムテック社製熱可塑性エポキシ樹脂である。まずは樹脂の反応条件の見極めを実施した後に、ブレードの樹脂含浸、並びに、成形加工時の条件検討を行った。成形条件は円断面を有する中空パイプの曲げ試験によって決定した。物性の一例を下記に示す。

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

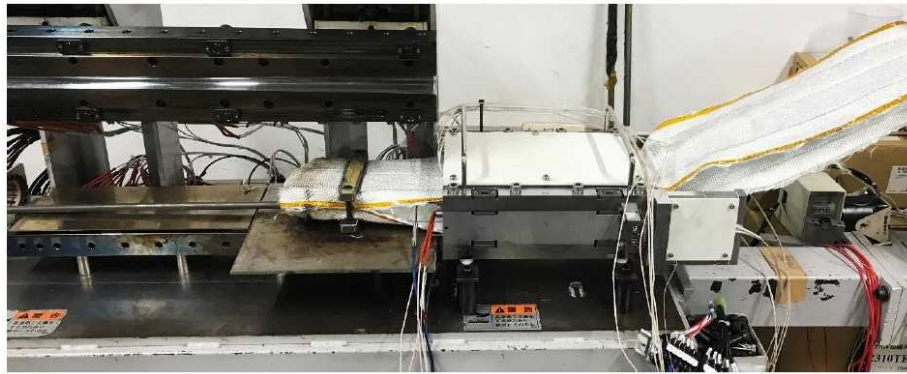


図 4.13-5 新規引抜成形機

ブレードと、新規に開発した引抜成形装置を用いた現場重合引抜成形技術という革新技術を用いてパネル材の継手構造用途などの中空閉断面構造の部材を検討した。試作では三次元製紐したブレードのプリフォームに、引き抜き成形装置を用いて、連続で現場重合型樹脂を直接含浸し、工程内で樹脂硬化を行った。これに用いた引抜成形装置は図に示すように卓上に設置できるほどの大きさであり、製造設備の小型化の可能性を有していると考え。本検討では、この成形装置を用いて現場重合型樹脂を用いた中空閉断面形状の引抜成形条件を最適化、具体的には最終製品（インフィル構造の継手部）を想定した成形条件を検討して、中空閉断面構造製造の要素技術の実証を試みる事が出来た。

(5) 今後の課題と対応方針

本テーマでは、製紐技術と現場重合型樹脂を用いて中空閉断面構造部材を作製し、その連続成形技術である現場重合引抜成形技術の確立を目指して検討を行った。その結果、製紐による中空閉断面構造のブレード中間基材製作、並びに、現場重合型樹脂を含浸・硬化して中空閉断面構造部材を作成する現場重合引き抜き成形技術の基礎検討を行いその可能性を明らかにした。更に、インフラ構造部材の基本部材である一次構造部材への適用可能性を明らかにすることを目標としフェーズ3ではT-a 建築向けFRPパネルで検討を継続する。

今後、岐阜大学にて技術のさらなる深化を図ると共に、社会実装化に向けて想定ユーザーへのプレゼンテーションの機会を設け、社会実装化を試みる。

(6) その他特記事項

なし。

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

4.14 接合技術

テーマリーダー（氏名、所属、役職）：	植村 公彦、金沢工業大学、研究員 （～H29.12、H31.4～） 佐藤 和夫、金沢工業大学、研究員 （H30.1～H31.3）
サブテーマリーダー（氏名、所属、役職）：	山岡 圭一、澁谷工業 植村 公彦、金沢工業大学、研究員（H30.1～H31.3）
研究開発実施期間：	H25 年 11 月～R2 年 3 月
参画機関：	金沢工業大学、澁谷工業、金沢大学（～H28.3）、岐阜 県工業技術研究所（～H31.3）

（1）テーマの概要と目指すべき将来の姿（拠点ビジョン）との関係

本テーマでは、高速・連続製造される大型平板や長尺構造材といった単純な形状の共通部材を用いて様々な形状や構造に適合させることを目的としている。従来の鉄やコンクリートに代わる、軽量・高強度で長寿命な複合材料を、低コストで大量生産可能な「革新構造材料」として地上人工物に広く利用するために、連続含浸成形技術やプレス成形技術により成形された熱可塑性複合材の共通部材を、その高い生産性を損なうことなく高効率に加工する技術と組み合わせることで、実構造物としての社会実装を実現する。具体的には熱可塑性の特徴を生かし大型で厚板の部材を接合する、連続溶着接合技術の開発とその実用化が本テーマの目標となる。

（2）想定する製品・サービスについて（担い手、社会的インパクト・経済的インパクト）

複合材の接合は、様々な構造体形成の場面で必要とされる汎用技術である。

一例として垂直軸式風力発電用ブレードにおいては、図 4.14-1 に示すように翼両面のサンドイッチパネル間や桁材との接合、補強部材や補強部材の曲げ加工を組み合わせることで、従来のブレード一体成形と異なった、単純形状・長尺部材の組合わせによるブレード製造が実現可能となる。上記のブレード製造は、従来の複合材料では製造品質管理の制約からすべて同一の工程・工場で行うことが必須であったが、熱可塑性の特徴を生かした本テーマの接合技術を用いることで、部材成形と接合・組み立て別工程や別工場でも行うことが可能となり、プロセスチェーンサプライチェーンの確立にも通じる、大きな社会的・経済的インパクトを与える事が可能となる。

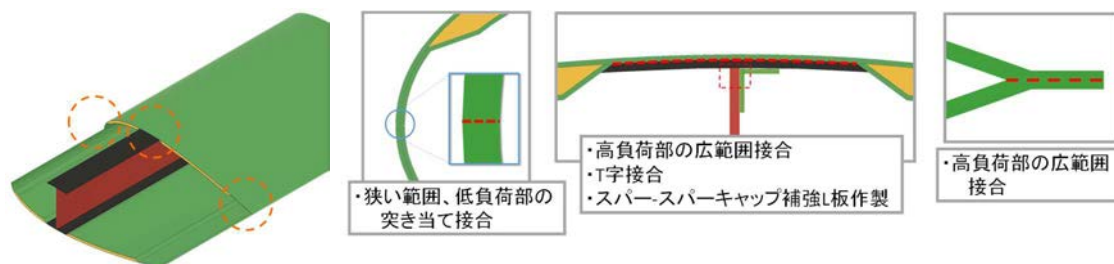


図 4.14-1 垂直軸式風力発電用ブレードに求められる接合箇所

（3）研究開発期間終了時の達成目標

本接合技術テーマを共通部材の製造技術の一つとして考え、

まず、フェーズ 2 にて、従来技術と異なる厚板部材・連続接合の観点から、各種接合技術の比較評価と適用化検討を行ない、革新的で新規な接手法・技術を見出すことを目標とした。

次に、フェーズ 3 では、各接合技術の特長を生かしたアプリケーション／タスクチーム毎にて、具体的な継手構造とその目標とする接合強度やプロセス速度を満足する連続プロセス接合技術の実用化までを目標とした。

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

(4) 主な成果と達成状況

・各種溶接技術の比較評価と適用化検討

本拠点が目指す大型パネルや長尺部材を熱可塑性の特徴を生かして低コストで高生産を実現する接合技術として、厚板部材の連続接合技術の実用化に取り組んだ。熱可塑性樹脂複合材料の溶着技術は多種多様だが、その多くは未だ実用化されていない。また、接合する部材形状やアプリケーション毎に最適なプロセスは異なることが予想される。

そこで、まず各種の溶着技術について、本拠点ビジョンで研究開発を進めている成形部材に適合した成形条件の最適化やプロセスの改善等新規接合技術の開発をおこなった。

[電磁誘導接合]

電磁誘導により CFRP 内の CF を発熱させて材料を熔融させて接合する電磁誘導溶着接合は、既に一部の航空機部材の接合方法として実用化されている。しかし、本拠点が取り組む大型部材の接合には、大型部材を低コストで加工する為に高い生産性が求められることから、電磁誘導による材料の加熱能力が解決すべき課題となる。そこで、加熱効率の高い金属メッシュを接合面にインサートする事で接合面を高速に加熱熔融させることが可能となり、連続式移動接合の実現目途を得ることが出来た(図 4.14-2)。そして、そのインサートをグリップ形状にして、熔融した CFRP 内に金属グリップ部を吻合させることで、さらに高強度の接合を得ることが出来た。

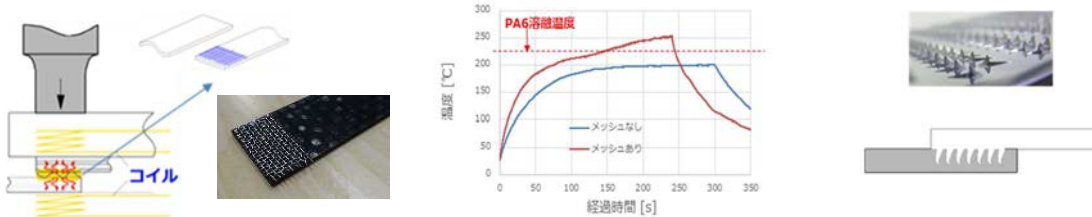


図 4.14-2 金属メッシュ(左)による発熱促進効果(中)、金属性グリップ材(右)

[超音波接合]

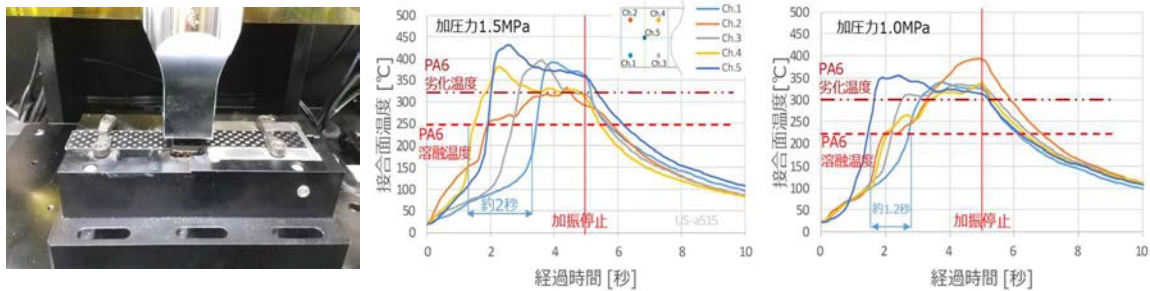
超音波接合は、超音波の振動により接合界面に発生する摩擦熱により溶接する接合技術である。本技術は、接合面のみを効率的に加熱し、数秒で熔融することが可能なことから高速の連続式移動接合が期待できる。

しかしながら、厚肉部材では、超音波振動の減衰が生じることと接合面同士の接触状態の僅かな差異により摩擦熱の発生量が大きく変化することから、溶接プロセスの品質管理が困難なことが実用化に対する課題であることが明らかになった。

そこで、台上超音波溶着機とクーポン試験片により、加振ホーンの振動条件や加圧力・印加時間等、様々な条件による接合プロセスの挙動を分析した結果、接合部の加圧力が熔融加熱の品質管理と接合強度に大きな影響を与える事が分かった。図 4.14-3 は、過度な加圧力を与えずに適切な加圧力により接合面内に均質な熔融状態が得られた結果である。

一方で、図 4.14-4(左)に示す様に、加圧力が十分でない場合は接合力の低下を招いてしまう。そこで、図(中)に示す様に、加振により材料を熔融した後で加圧力を増すことで、接合面内で均質な加熱熔融と高い接合力を両立させることが可能となった。図 4.14-4(右)は 1.5MPa 一定の加圧力による接合に比べて、1.0MPa で加振熔融させた後に 1.5MPa に加圧力を変化させて接合した場合に接合強度のバラつきが減少し、平均接合力も増加した例を示している。

4 研究開発テーマの成果



図

4. 14-3 超音波溶着の加振ホーンと試験片(左)、加圧力による接合面内の温度分布の比較(右)

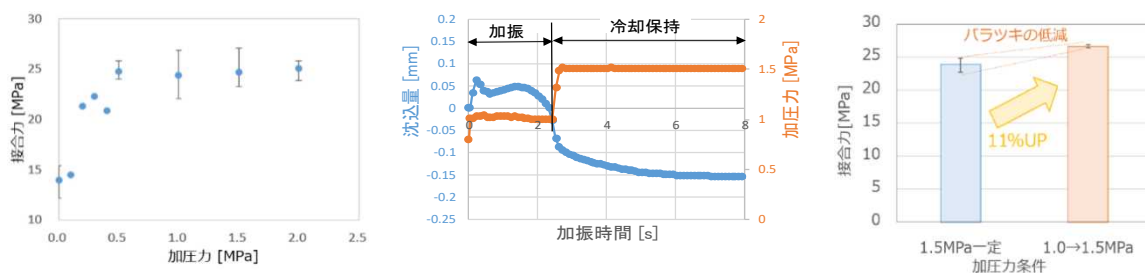


図 4. 14-4 加圧力の接合力への影響(左)、2 段階加圧プロセス(中)、二段階加圧による安定した接合力(右)

[レーザー接合]

レーザー光はその高いエネルギー密度と高速高精度な出力制御が可能なことから、溶着の熱源として利用することが期待される。しかしながら、光を透過しない CFRP 部材、とくに本テーマが目指す大型厚肉部材においては、重ねた部材同士の接合面を直接加熱できないことから何らかの工夫が必要となる。そこで、本研究テーマでは、2 段階プロセスの接合技術と突き合わせ接合技術を開発した。

図 4. 14-5 は 2 段階プロセスによるラップシアー接合プロセスとその接合部の外観を示している。まず高い集光レーザー光により上側の部材のみを穿孔した後に、下側部材へ照射して溶融させ上側部材と溶着させる。このプロセスを高速で繰り返すことで、ラップシアー接合を完成するプロセスである。本プロセスでは、図 4. 14-6 に示す様な、光の強度をビーム内で一定に保つトップハットモードのレーザー光と適切な照射径と照射時間の最適化により、45 穴の穿孔と溶着を 10 数秒で完了し、接合面当たりの接合強度 20MPa を達成した(CF/PA 材)。

また本トップハットモードのレーザー光を用いることで、突き合わせ接合技術も確立した。

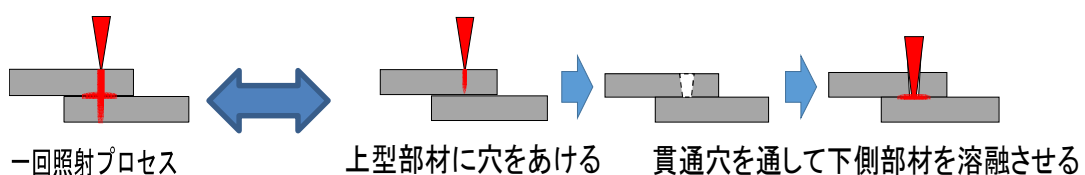


図 4. 14-5 1 回照射プロセス(左)と 2 段階プロセスによるラップシアー接合(右)

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

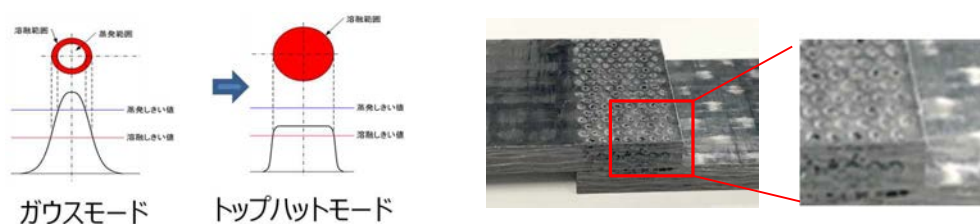


図 4.14-6 レーザー光強度分布比較と接合部外観(右)

[プラズマ接合]

プラズマ照射は既に接着前処理として実用化されている。本研究テーマでは、従来の大気圧プラズマと異なる革新的な新規高性能プラズマ照射技術により、高密度で長寿命の官能基を生成し、活性化された官能基間の反応を利用して熱可塑性材料を溶融せずに接合することを目標に、そのメカニズムの解明と実用化の検討に取り組んだ。

図 4.14-7 にプラズマ照射による接合のメカニズムと、表面分析装置(XPS)により照射により生成された官能基の計測例をしめす。この官能基により、適当な加熱/加圧条件の下で CFRP 同士を高い強度で接合することが出来た(図 4.14-8)。本接合技術は溶融や接着剤を用いないため、CFRP 厚板や異材(CFRP/金属)の接合が可能となる。また、照射面に高密度に官能基を生成していることから超長寿命な官能状態の維持も可能である。

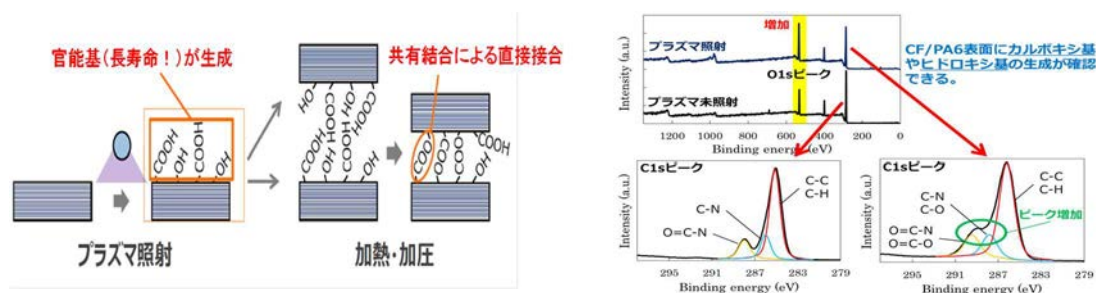


図 4.14-7 プラズマ照射による接合のメカニズム(左)とプラズマ照射前後の XPS 測定例(CF/PA6)(右)

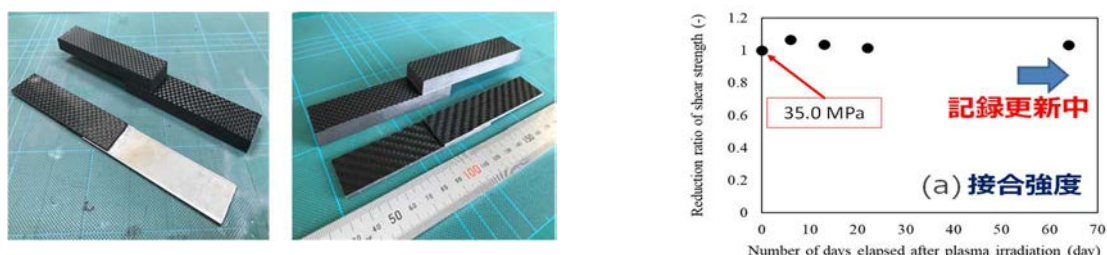


図 4.14-8 プラズマ照射による CFRP 厚板や異材(CFRP/金属)接合の例(左)、プラズマ照射効果の持続性の例(CF/PA6)(右)

(5) 今後の課題と対応方針

熱可塑性の特徴を生かした溶着技術に着目し、従来技術の最適化や改善、および新規の接合技術など、各種の接合技術の基礎的研究を行った。本接合技術は、CFRP ロッドによる耐震補強の端部定着に利用しているが、さらに、本拠点が目指す大型パネルや長尺部材の低コストで高生産を実現する接合技術として、研究を継続している。

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

下図(左)は、本研究の成果である超音波接合とプラズマ照射技術を一体化して、加工時間と接合強度の両立を図った例である。本手法によれば、超高速の移動式連続成形が期待できるので、今後も継続的な研究に取り組んでいきたいと考えている。

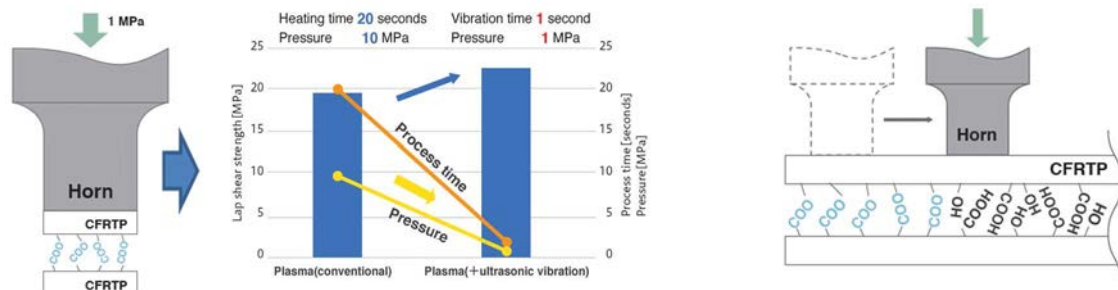


図 4.14-9 超音波接合とプラズマ照射の一体化による加工時間と接合強度の比較（左）とメカニズム（右）

(6) その他特記事項

プラズマ照射接合技術については、プラズマ照射により官能基を付与した高接着性 CFRP シートを用いて建設物の補修補強工事に適用することを目的として、地元石川県の支援もうけてベンチャーが創設された。現在、社会実装にむけて活動中である。

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

4.15 界面

テーマリーダー（氏名、所属、役職）：	山口 政之、北陸先端科学技術大学院大学、教授（～H28.3） 仁宮 一章、金沢大学、准教授（H28.4～）
サブテーマリーダー（氏名、所属、役職）：	附木 貴行、金沢工業大学、研究員（H28.4～）
研究開発実施期間：	H25 年 11 月～H31 年 3 月

4.15 ①界面に関する技術開発 大気圧プラズマ処理

（1）テーマの概要と目指すべき将来の姿（拠点ビジョン）との関係

力学特性・耐熱性・リサイクル性・コストに優れるポリプロピレン（PP）は、化学結合に必要な極性基が PP 表面上にほとんど存在しないため、CFRP の破壊特性・信頼性に決定的な影響を及ぼす炭素繊維（CF）との界面接着性がきわめて低い。しかし、従来の CF/PP 界面特性改善方法は、CF や PP への侵襲性が高いだけでなく、複雑な工程や限られた処理空間などの問題により量産性が低い。そこで、量産性が高く侵襲性の低い CF/PP 複合材料の界面接着性最適制御方法確立し、最適な界面特性を有する中間素材（CF/PP プリプレグ）を素材から自動・連続に量産可能な装置を開発することを最終的な目的とした。そのためには、開放プロセスであるために連続性を持たせることが可能となる大気圧プラズマ技術の応用が有効でと考えられる。加えて、比較的単純な装置・工程によって高いラジカル発生密度を得ることが可能であり、かつ作動流体を自由に選択可能であるため、ラジカル発生密度と大気圧プラズマ処理時間を変化させることで、付与する官能基の量や種類だけでなく、CF および PP 分子構造へのダメージ付与度を設計・制御可能であると期待される。PP 以外の熱可塑性樹脂への適用も可能であり、インフラへの熱可塑 CFRP 適用時に想定される高性能中間素材の安価かつ量産的な供給が可能になると期待される。

（2）想定する製品・サービスについて（担い手、社会的インパクト・経済的インパクト）

図 4.15-1 に模式的に示すように、COI プログラム終了後も継続して構築・完成を目指す高性能熱可塑 CFRP 中間素材量産システムは、大気圧プラズマにより最適に表面処理された CF シートと PP シートを連続的に供給しながらプリプレグ成形をおこなうことを目指すものである。インフラ等向けの熱可塑 CFRP 中間素材メーカーをターゲットユーザーとし、最適特性を持つ熱可塑 CFRP 中間素材の大量生産を可能とすることで、きわめて広範囲に及ぶインフラ等向け CFRP の需要に対応可能となると期待される。素材への侵襲性の低減しつつ最適な界面状態を達成可能で、界面制御工程の簡易化・密閉空間の不要化・多様な材料種への適用性といった優位性がある。

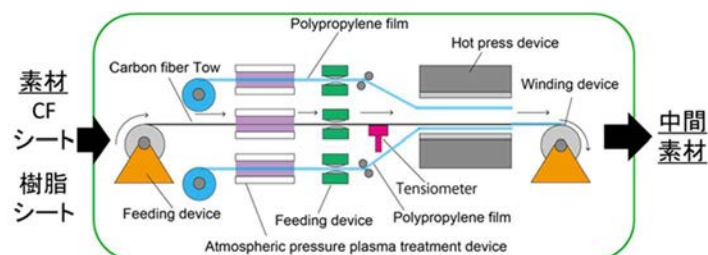


図 4.15-1 高性能熱可塑 CFRP 中間素材量産システム

（3）研究開発期間終了時の達成目標

COI プログラム終了時には、高性能熱可塑 CFRP 中間素材量産システムの各構成要素の開発および条件最適化を達成することを目指した。具体的には、ほぼ限界性能と考えられる繊維直角方向引張強度 20 MPa 以上を達成することを目指した。COI プログラム終了には、これまでに開発してきた各構成要素の精微化をはかるとともに、これらをインテグレートした上で大型化したシステムを構築・最適化し、社会実装を実現することを目指す。

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

(4) 主な成果と達成状況

大気圧プラズマ処理小型モデル装置（図 4. 15-2）を用いて、PP の素材の破壊特性を低下させることなく CF/PP 界面引張強度を改善可能な処理条件の存在範囲を探索・特定した。また、CF に対しても安定的に大気圧プラズマ処理を施すために繊維巻取装置を設計・作製し、CF に対する大気圧プラズマ処理条件が CF 表面性状・ぬれ性に及ぼす影響を明らかにするとともに、CF 束の破壊特性を劣化させない範囲で CF/PP 界面引張強度を向上させることが可能な CF に対する処理条件の存在範囲を探索した（図 4. 15-3）。さらに、プレテンション付与機構を設計し、プレテンション量が界面引張強度に及ぼす影響を調査した。また、吸引方式とオゾン分解器を併用したオゾン処理システムの設計・開発によりオゾン飛散量 0[ppm]を達成するとともに、ポリアミド（PA）に対しても有効な大気圧プラズマ処理条件が存在することを明らかにした。さらに、CF へのプレテンション付与装置との組合せにより CF/PP 繊維直角方向引張強度約 18[MPa]を達成し、PP サイジング技術と組み合わせることで CF/PP 繊維直角方向引張強度約 20[MPa]を達成した（図 4. 15-4）。

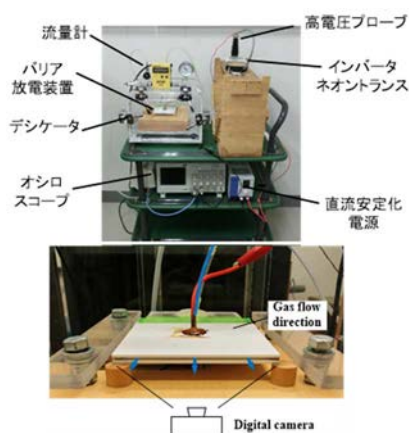


図 4. 15-2 小型モデル装置

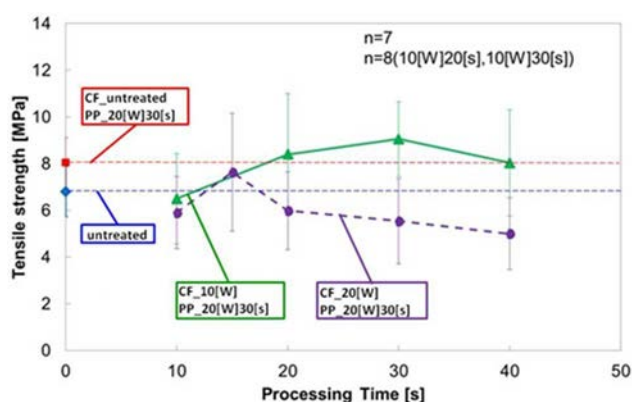


図 4. 15-3 CF/PP 繊維直角方向引張強度に及ぼす処理条件の影響

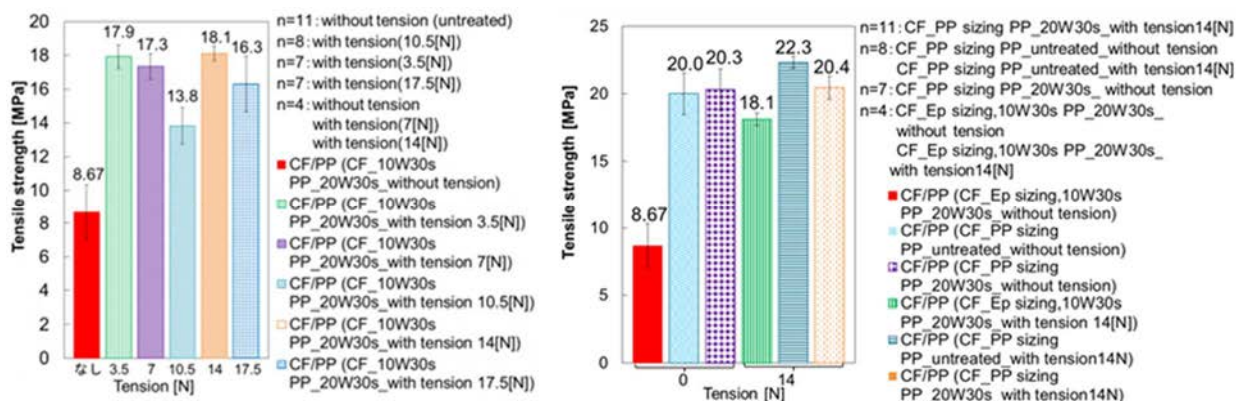


図 4. 15-4 CF/PP 繊維直角方向方向引張強度

(5) 今後の課題と対応方針

これまでに開発してきた全構成要素をインテグレートした上で大型化したシステムを構築・最適化し、社会実装を実現する課題が残されている。独自の予算申請・調達により達成し、将来的に社会実装可能としたシステムを本プロジェクトのタスクチームの成果に還元することを目指す。

(6) その他特記事項

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

4.15 ②界面に関する技術開発 相溶化剤

(1) テーマの概要と目指すべき将来の姿（拠点ビジョン）との関係

テーマ2：樹脂・炭素繊維間 界面特性制御による高機能材料の創出

炭素繊維に含浸させる樹脂として、成形加工性がよく、リサイクル可能な熱可塑性樹脂の利用を促進している。そして、熱可塑性樹脂でも最も生産量が多いポリプロピレンに注目し、研究に取り組んでいる。このたび開発された熱可塑性炭素繊維複合材料は、高比強度、高比弾性率などの機械的特性が要求される自動車や航空機関連の部材や建材などでの用途が期待されるほか、静電気などの帯電防止性能が高いレベルで求められる半導体などの精密部品の成形分野で利用価値が特に高く、今後の需要が見込まれている。

(2) 想定する製品・サービスについて（担い手、社会的インパクト・経済的インパクト）

炭素繊維と樹脂を混ぜると軽くて強い材料となり、省エネルギーが求められる航空機や自動車分野での用途が近年進んでいる。一方、炭素繊維と樹脂は一般的には相性が良くないため、上手に混ざらないことが多く、強度の面で課題となっていた。また樹脂は電気絶縁性を有するため、半導体や電子部品などの精密部品の分野では、静電気などを帯電しない、導電性に優れた複合材料が特に求められている。

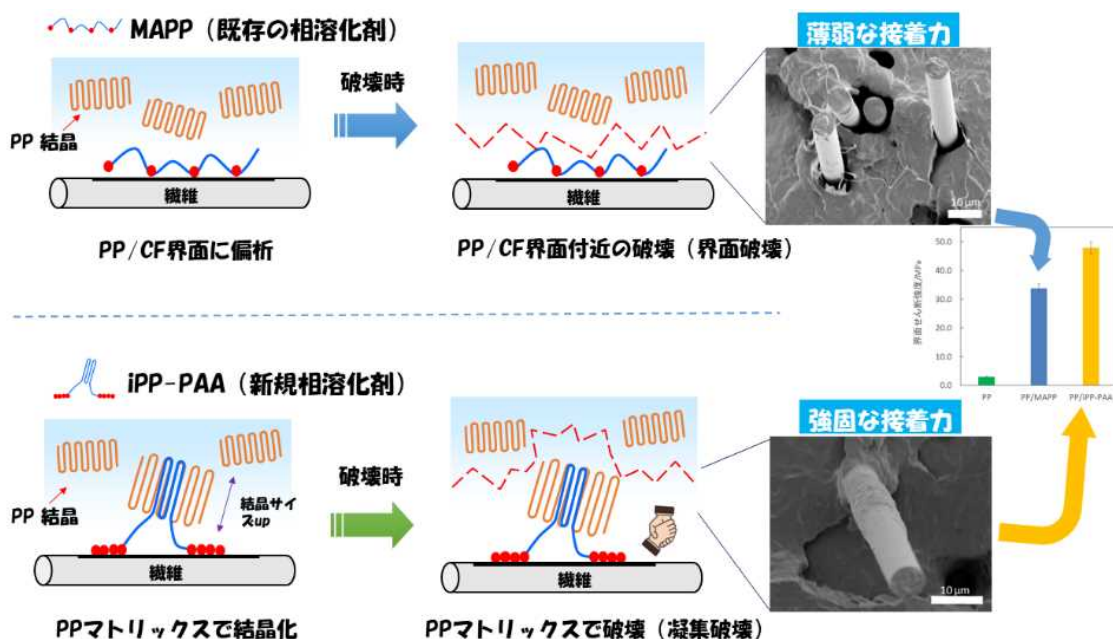


図 4.15-5 iPP-PAA の炭素繊維複合材料への効果

（図 4.15-5 上）相溶化剤として既存の MAPP（無水マレイン化ポリプロピレン）を用いた複合材料では、PP マトリックスの結晶性が低下し、炭素繊維と樹脂間は面ではなく点で接着するため、界面接着性が十分でなく、接着力が薄弱である。

（図 4.15-5 下）相溶化剤として新開発の iPP-PAA（アイソタクチックポリプロピレンポリアクリル酸共重合体）を用いた場合は、PP マトリックス内の結晶と結合して結晶性が向上し、かつ炭素繊維と樹脂間が面で結合するため、接着力が強く、優れた機械的特性（高比強度、高比弾性率）が得られる。

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

評価：

合成したサンプルをマイクロドロップレットおよびフラグメンテーション試験 → 界面せん断強度の確認（混合割合の最適化）

ダンベル型試験片（スケールアップ） → （射出成形や押出成形機による成形方法の違いによる物性を検討）

界面接着性への効果が確認され、今までにないメカニズムの新規相溶化剤として接着材料業界や、構造部材の業界に大きな衝撃を与えた。

炭素繊維と樹脂を混ざりやすくする「相溶化剤」として、従来から、無水マレイン化ポリプロピレン（MAPP）が使われているが、MAPP を用いた複合材では、炭素繊維と樹脂間は面ではなく点で接着するため、界面接着性が十分でなく（接着力が薄弱）、母材であるPPの結晶性を低下させ、さらに導電性も十分に得られないという問題があった（図 4. 15-5 参照）。また複合材の界面接着性を向上させるために、MAPP を大量に添加する必要があり、MAPP の配合量を増大させると、複合材の結晶性と導電性が低下してしまうという問題もあった。iPP-PAA には二重結合が存在し、導電性にも有利であることが、証明された。

(3) 研究開発期間終了時の達成目標

金沢工業大学と株式会社三栄興業の研究チームが共同開発した iPP-PAA（アイソタクチックポリプロピレンポリアクリル酸共重合体）は炭素繊維と樹脂間が面で結合する相溶化剤で、少量でも界面接着性が向上するため、優れた機械的特性（高比強度、高比弾性率）が得られるばかりでなく、導電性（静電気の帯電防止）にも優れた複合材を可能にした。さらに本研究により、炭素繊維の繊維長が 0.1～50mm の短繊維でも剛性が保てるため、熱可塑性炭素繊維複合材料としての射出成形や押出成形などの成形性も向上し、幅広い分野での用途の拡大が期待される。基礎研究、実証試験から商品化まで達成している。

(4) 主な成果と達成状況

2017 年に特許を申請し、令和 3 年に登録完了した。また、株式会社三栄興業による iPP-PAA の商品化（図 4. 15-6 参照）を行い、成果が出ている。



図 4. 15-6 iPP-PAA

(5) 今後の課題と対応方針

商品化までに行い、さらに普及・展開することが、課題である。そのためには、産学官のオープンイノベーションを含むイノベーション創出の取り組みとして、その技術を収斂し、飛躍的に成長させる。具体的には、効率の良い合成方法の確立、合成のスケールアップを行い、大量生産によるコスト低下に対応する。（新たなファンドに応募）

(6) その他特記事項

4 研究開発テーマの成果

4.16 PVA 高強度繊維

テーマリーダー（氏名、所属、役職）：	山口 政之、北陸先端科学技術大学院大学、教授（～H31.3） 松村 和明、北陸先端科学技術大学院大学、准教授（H31.4～R1.9）、教授（R1.10～）
サブテーマリーダー（氏名、所属、役職）：	松浦 宏治、岡山大学、講師（～H28.3）、岡山理科大学、准教授（H28.4～H28.6）、岡山大学、非常勤講師（研究）（H28.7～H31.3）
研究開発実施期間：	H25 年 11 月～R4 年 3 月
参画機関：	北陸先端科学技術大学院大学、岡山大学（～H31.3）、金沢工業大学（～H26.3）

（1）テーマの概要と目指すべき将来の姿（拠点ビジョン）との関係

複合材料を幅広く社会に普及し持続可能な社会を構築するため基盤技術としては高い性能でかつ低コストな素材が必要となる。複合材料の性能を決める最も重要な素材である強化繊維については、炭素繊維は高い機械特性を持つが価格が高いため航空機等の一部の適用に限られる。また FRP の約 9 割に使用されるガラス繊維は低コストであるが軽量効果が小さいデメリットがある。本テーマでは複合材料で最も多く使われているガラス繊維をターゲットに、同等以上の強度、弾性率を持ち、かつ比重が炭素繊維よりも低い、低価格な強化繊維を実現することで、複合材料の適用範囲を広げることを目指す。

（2）想定する製品・サービスについて（担い手、社会的インパクト・経済的インパクト）

ポリビニルアルコール(PVA)樹脂をベースに、ガラス繊維より大幅に軽く、炭素繊維よりも大幅に安価な高強度繊維を実現できれば、適用例として近年ますます大型化する洋上風車ブレードや帆船の帆など大型構造用材料としての利用が見込める。具体的な効果としては、風力推進船の FRP 帆のケースでは、高さ 50m の帆 1 本で 10t を超える重量となりそのうちガラス繊維の重量だけで約 6t 程度を占める。これを PVA 繊維に替えることで FRP の重量を 2/3 程度に軽量化することが可能となり、伸縮機構等の負荷が大幅に削減できることから帆の軽量化は非常に期待されている。船舶からの CO₂ の排出規制については、2050 年までに 50% の削減（2008 年度基準）が目標であり、このような大幅な削減目標の達成には風力推進の実用化に期待が大きく世界的に実用化への取組が進められている状況である。また風力発電のブレードについては年々大型化が進み、最大規模の 10MW 級では 1 本のブレードが 40 t 程度になる試算で、主要な材料であるガラス繊維を PVA 繊維に替えることで FRP の重量を 2/3 程度に軽量化することが可能になる。ブレードの軽量化により支柱や関連する構造などの負荷が削減できることから、さらなる大型化の実現にも期待できる。また連携プロジェクトで検討を進めている垂直型浮体式システム（5MW）では PVA 繊維の使用により 40% の重量削減、製造コスト 50% が見込めることを試算している。このように、PVA 繊維を FRP の強化繊維として実用化することで、大型 FRP 構造の大幅な軽量化を可能にし、再生可能エネルギー等の分野に貢献することが期待できる。

（3）研究開発期間終了時の達成目標

繊維として市販最高レベルの高弾性率(43GPa)を目指す。43GPa というのは一般的な市販品では達成出来ていないチャンピオンデータである。これを達成出来れば、繊維メーカーの本格参入の期待が出来る。

4 研究開発テーマの成果

(4) 主な成果と達成状況

本研究テーマは、既存の複合材料では達成出来ない用途である、より軽量、より高強度、高付加価値付与などの機能強化を目指した高強度高機能な複合材料に関する基盤技術の確立を目指したものである。従ってフェーズ1から多くの基盤技術に関する課題を取り上げ、その中から取捨選択を行いながら最終的に高強度繊維の開発に絞ったという経緯がある。基盤技術のため、シーズ主導的な側面はあるものの、各課題については、目的に合致したバックカスティング研究を意識した進め方をしてきており、例えば、岡山大学によるアドバンスナノカーボン（ANC）の製造および利用技術開発により既存の炭素繊維複合材料よりも高い耐久性や耐熱性を目指し、さらに、北陸先端科学技術大学院大学の炭素系微細繊維の局在化の利用技術を融合することにより表面近傍に繊維を局在化させることで使用量の低減に伴うコスト減と機能性の両立を目指す研究を推進した。また、炭素繊維系材料における自己修復作用の検討は、複合材料の使用時における損傷の回復を目指す画期的な研究であった。これらの基盤的研究の成果を元に、フェーズ2ではPVAに微細炭素繊維のみならず金属塩を高効率に分散させる手法を開発し、その結果PVA繊維の強度の向上が確認された。そこでフェーズ3においてはリチウム塩の添加によるPVA繊維の高強度化に関する開発に研究を絞り、洋上風力発電やFRP帆で問題となっているガラス繊維による重量と強度を解決するべく安価かつ炭素繊維並みの高強度繊維の開発に取り組んだ。

岡山大学は、ANC合成技術確立し、カーボンナノチューブ（CNT）や酸化グラフェン（GO）の大量生産法を開発した。グラフェンやGO、CNTを既存材料に分散させる技術に取り組み、ナノフィラーとしての性質を調べ、既存材料に比べ引張弾性率の10%向上、ガラス転移温度の上昇などを確認した。北陸先端科学技術大学院大学では、炭素系微細繊維の局在化を利用した複合材料の開発において、汎用性の高いポリプロピレン（PP）系樹脂を用いて、カーボンナノチューブ（CNT）を連続相にのみ局在化させることで、剛性が高く、破壊靱性に優れた材料を設計した。破壊靱性を大きく損なうことなく、高剛性化を達成することで、製品厚みの低減とそれに伴う軽量化や、製品軽量化に伴う製造エネルギーの低減に資する研究である（図4.16-1）。

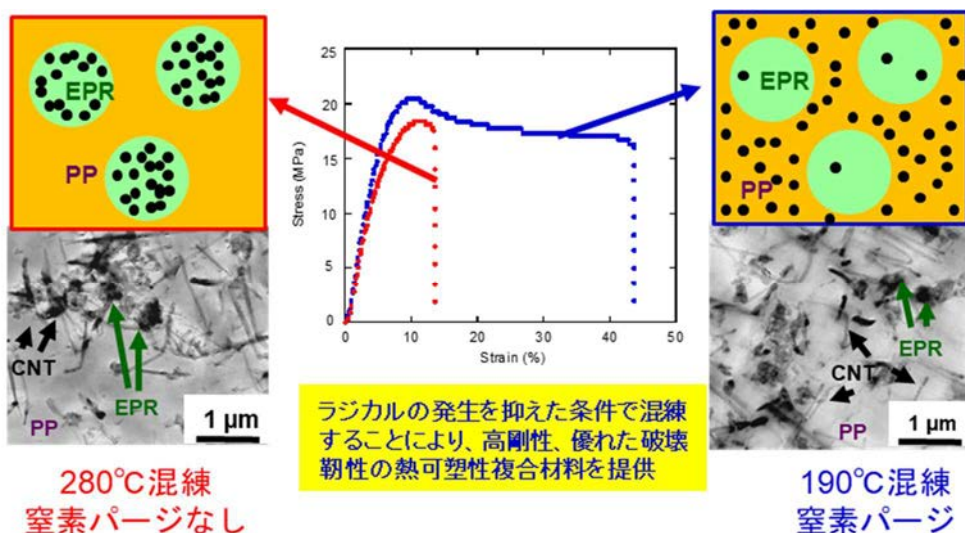


図4.16-1 カーボンナノチューブのゴムブレンド中での局在化制御

また、この分散手法を利用し、ポリビニルアルコール（PVA）樹脂へのGOの均一分散を検討した。その結果、GOを0.5%分散させたPVAにおいて、元の樹脂に比べ約8倍のヤング率の向上が確認された。この結果をもとに研究を継続したところ、PVAに対して塩を分散させることで高強度繊維が得られる知見を得たことで高強度コンジット繊維の開発に向け研究方針を変更した。

4 研究開発テーマの成果

PVA 配向繊維はその結晶性の高さから、ポリエステルやナイロンに比べて高い強度を示す事が知られている（表 4.16-1 汎用繊維では世界最高レベル）。しかし、PVA 繊維の強固な水素結合が一定以上の延伸を阻害するため分子鎖の高度な配向は達成されていない。近年、環境問題における CO₂ の排出量削減などの観点から素材の軽量化などを目的として繊維強化プラスチック (FRP) の研究は数多く行われている。FRP の用途は様々で、特に航空宇宙産業や自動車などにおいては強度と軽さなどの利点から多くの利用がされている。特に炭素繊維 (CF) やガラス繊維 (GF) といった繊維は FRP の強化繊維としては代表的なものである。しかしこれらは高価であり、GF では重量の問題点がある。近年ますます大型化する洋上風車ブレードや帆船の帆など大型構造用材料として、より軽量で安価な材料が必要とされている。具体的には、風力推進船の FRP 帆のケースでは、高さ 50m の帆 1 本で 10t を超える重量となりそのうちガラス繊維の重量だけで約 6t 程度を占める。これを PVA 繊維に替えることで FRP の重量を 2/3 程度に軽量化することが可能となり、伸縮機構等の負荷が大幅に削減することから帆の軽量化は非常に期待されている。船舶からの CO₂ の排出規制については、2050 年までに 50% の削減（2008 年度基準）が目標であり、このような大幅な削減目標の達成には風力推進の実用化に期待が大きく世界的に実用化への取組が進められている状況である。フェーズ 3 ではそのような要求に応えるため、ガラス繊維並の強度、弾性率を持つ PVA 繊維の開発に取り組むこととした。

表 4.16-1 各繊維の物性

	弾性率 (GPa)	強度 (GPa)	比重
炭素繊維	294-324	5.9-7.0	1.81
ガラス繊維	73	2.1	2.54
PVA繊維			
市販品の最高値	43	2.0	1.30
理論値	281	27	

・塩添加による PVA の水素結合ネットワークの制御

さまざまな塩を用いて、水素結合の強さを固体物性および水溶液のレオロジー特性の観点から調べた。特に水溶液のレオロジー特性では、水の揮発を抑制して高温でも安定的に測定できる手法を確立し、水素結合の温度依存性について調べることに成功した。その結果、ホフマイスターシリーズと呼ばれるタンパク質の溶解度を理解するために提案された理論により、実験結果が整理できることを見出した。それによると、水を構造化するような塩を添加しても PVA 鎖間の水素結合はほとんど影響を受けないものの、水の構造形成を阻害する塩を添加すると水素結合は弱まる。その結果、リチウム塩、特に臭化リチウムやヨウ化リチウムが最も PVA の水素結合を弱める役割を示すことを発見した（図 4.16-2）。

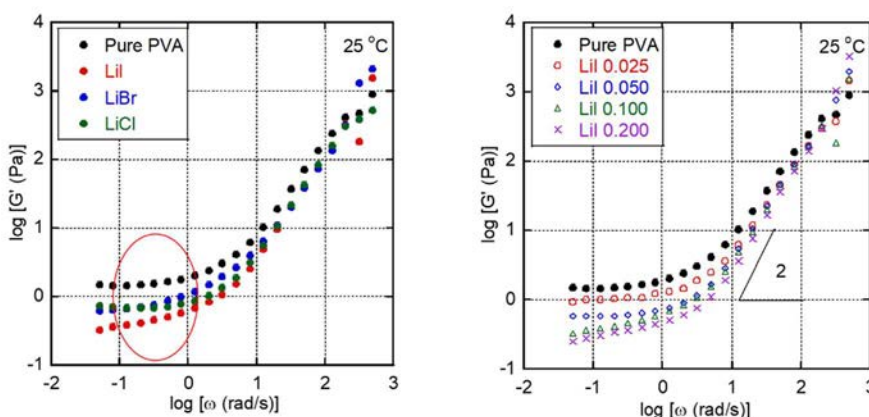


図 4.16-2 レオロジー測定によるリチウム塩添加の水素結合抑制効果

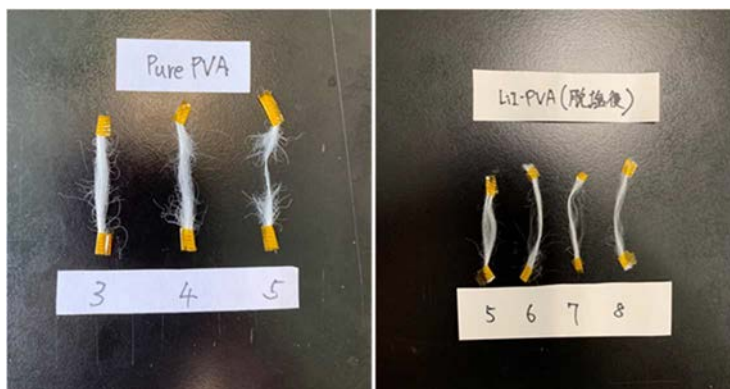


図 4.16-3 加熱延伸による破断(左)塩無添加 PVA 繊維 (5 倍延伸で破断)。(右) LiI 添加 PVA 繊維 (8 倍延伸でも破断せず)

4 研究開発テーマの成果

リチウム塩を PVA の水酸基に対し 0.1 程度の割合で添加した時に最も水素結合ネットワークが弱められることが分かる。そこで、この割合でリチウム塩を添加し、紡糸を行った。

・塩添加 PVA 繊維の湿式紡糸

小型の紡糸装置を作成し、巻き取り、吐出速度を制御する事で一次延伸倍率を 4 倍として紡糸する事に成功した。紡糸後、5-8 倍程度の加熱延伸を行い、配向繊維を得た。図 4.16-3 に示すように、塩無添加の PVA 繊維では、紡糸後の加熱延伸では 5 倍程度でほぼ切断されてしまうが、LiI 添加 PVA 繊維では 8 倍まで延伸することが可能となった。これは、水素結合ネットワークが抑えら

れた状態で欠陥無く配向繊維が得られたためと考えられる。結晶化度も高くなることを確認しており、図 4.16-4 に示した 2 次元 XRD 写真とその解析から配向度が大幅に向上したことが確認された。その後、引張試験で弾性率と最大強度を測定したところ、リチウム塩無添加繊維で弾性率で 5 倍以上、強度で 2 倍程度の向上が見られた。

このことから原理

的に PVA の水素結合ネットワークを抑制した状態で配向度を向上させて紡糸する事で、高強度高弾性率の繊維が得られるということが実証できたと考える。ただし、まだ現状では弾性率はガラス繊維の半分以下である。紡糸条件や熱処理条件、延伸条件などを最適化する必要がある。また、引張試験の評価法として、専用の装置を用いるなど、ばらつきを無くして安定的な試験を行うことも重要である。

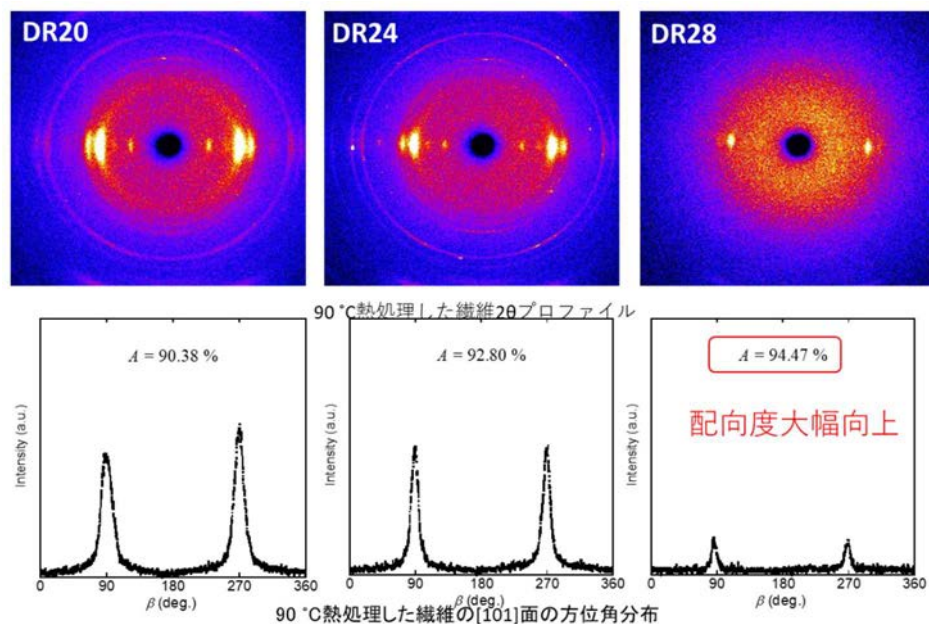


図 4.16-4 LiI 添加 PVA 繊維の 2 次元 X 線回折写真と方位角分布。
(左) 延伸倍率 20 倍 (4×5) (中) 24 倍 (4×6) (右) 28 倍 (4×7)

(5) 今後の課題と対応方針

ガラス繊維の強度弾性率に達するためのさらなる条件の工夫を行う。

具体的には、残存 Li 塩は結晶化の際に欠陥となるため、紡糸後の Li 塩の効率的除去を徹底的に行う。加熱延伸の温度、延伸速度、冷却速度などに注意し、緩和が起きない条件で配向度および結晶化度の高い繊維を作成する。

試験機や紡糸装置を改良し、安定的な紡糸技術および評価技術を確立する。

結晶化度 70%以上、配向度 96%以上、弾性率 43GPa を目指し、大手繊維メーカーと技術提携を目指す。

エポキシとの接着性評価など、複合材としての使用のための接着試験を行い、コンポジット材料としての実用化へ向けた研究を進め、企業との提携による実用化・量産化を目指す

(6) その他特記事項

なし。

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

4.17 バイオマス由来樹脂

テーマリーダー（氏名、所属、役職）：	仁宮 一章、金沢大学、准教授（～H31.3） 高橋 憲司、金沢大学、教授（H31.4～）
サブテーマリーダー（氏名、所属、役職）：	前田 勝浩、金沢大学、 准教授（～H27.5）、教授（H27.6～H28.3）
研究開発実施期間：	H25 年 11 月～R4 年 3 月
参画機関：	金沢大学、日産化学工業（～H28.3）、明和工業（～H30.3）、金沢工業大学（～H27.3）、大和ハウス工業（～H28.3）、モーリン化学工業（H28.8～）、日本製紙（H28.8～）

(1) テーマの概要と目指すべき将来の姿（拠点ビジョン）との関係

CO2 の排出増加による気候変動が世界的な課題であり、持続可能な社会の構築に向けて、材料分野においては石油由来の材料から低環境負荷、カーボンニュートラルな自然由来材料への転換が求められている。

軽量で成形性に優れる FRTP 用樹脂は、石油を原料として世界で年間、最大で約 130 万トンが使用されている。これらのプラスチック（PP、PA6）の脱石油を図ること、完全なマテリアルリサイクルを達成することによって低環境負荷な循環型社会が訪れる。これらを達成するために、最適な原料と樹脂をバックキャストして検証した結果、パルプを原料として CFRTP 等の複合材料に適した熱可塑性セルロース樹脂の開発が欠かせないとの結論に至った。本開発テーマでは、最適に設計したセルロース樹脂の大量生産を可能とする生産プロセスを開発する。また、セルロース樹脂由来の FRTP ペレットを開発し、PP および PA 由来の FRTP ペレットを代替する。これらの製品の社会実装によって、将来的には低環境負荷かつ環境持続性のコンポジット材料が広く社会に利用されている社会に資する。



(2) 想定する製品・サービスについて（担い手、社会的インパクト・経済的インパクト）

SDGs への対応の必要性から、低環境負荷かつ環境持続性の汎用樹脂を必要とする企業は今後増加し、ユーザーニーズは増大の方向である。参考までに、現在の酢酸セルロース樹脂の市場規模は 20 万トン/年程度である。富士経済のマーケット調査によると、CFRTP 用熱可塑性樹脂の市場は 2015 年実績で 113 億円、2030 年における予測は約 560 億円としている。

このような社会的背景のもと、本テーマでは、PP および PA 由来の FRTP ペレットを代替するセルロース樹脂由来の FRTP ペレットを製品として想定する。既に PP ベースの FRTP はバスユニットや水道管の継ぎ手として利用実績があり、それらの代替を視野にいれて開発を行う。その他、屋外で使用する PE や PP フィルム（農業フィルムなど）、空気・水浄化装置用フィルターなども熱可塑性セルロース樹脂で代替する候補である。社会実装の担い手は、株式会社ダイセルなどに代表される樹脂関連会社、日本製紙などに代表されるバイオマス関連企業であり、COI プロジェクト終了後の 2025 年までの社会実装を目標に開発を行う。

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

(3) 研究開発期間終了時の達成目標

セルロースをベースとした熱可塑性樹脂

- ・ イオン液体による均一系反応を確立し、任意のエステル置換基を任意の置換基でセルロースに導入できる基盤技術を確立すること。
- ・ セルロースエステル樹脂を連続的に生産できる技術(二軸混練押出機による reactive extrusion 技術)を確立し、高い生産性(2 トン/年/台)を達成可能なことを実証すること。
- ・ 現在の酢酸セルロースの市場価格を元に試算した結果、90%以上の回収率でイオン液体を分離精製可能なリサイクルプロセスを確立すること。

熱可塑性セルロース樹脂をベースとした CFRTP

- ・ CFRP の母材として最適なセルロース樹脂の分子構造を明らかにすること。
- ・ 母材となるセルロース混合エステル樹脂の製造プロセスを確立すること。
- ・ 炭素繊維織物に対するセルロース樹脂の含浸条件の最適化や相溶化剤による界面制御などによって、既存石油樹脂ベースの CFRP に比肩する CFRTP を得ること
例えば、短繊維 CFRTP として、ナイロンベースと比肩して加工温度<230℃、吸水性<8%、曲げ強度>100 MPa、曲げ弾性率>7.0 GPa、ポリプロピレンベースと比肩して引張強さ>120 MPa、曲げ強さ>180 MPa、曲げ弾性率>10.5 GPa、シャルピー衝撃強さ 15 kJ/m²、荷重たわみ温度 160℃など。

(4) 主な成果と達成状況

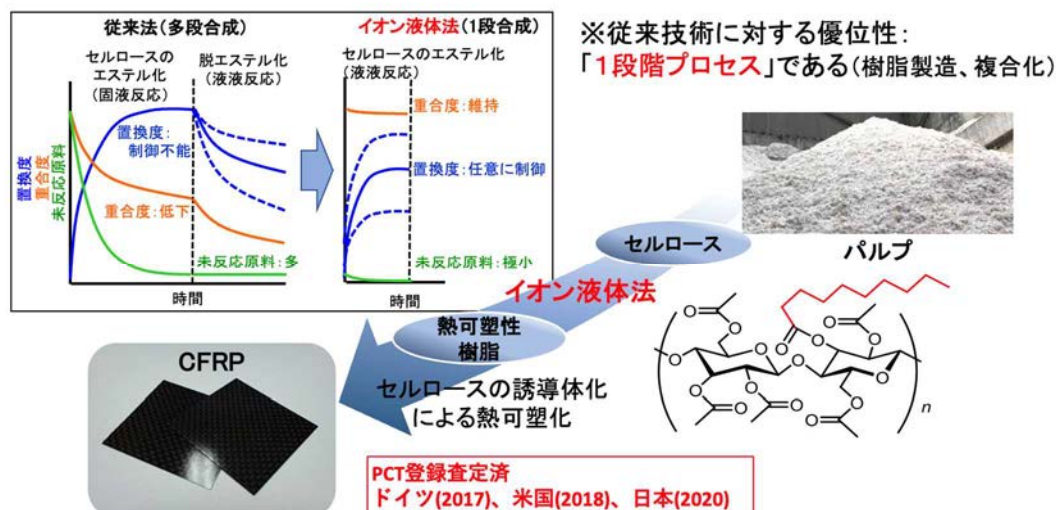
セルロースを原料とした熱可塑性樹脂

従来のセルロース修飾反応は、セルロースが溶媒に溶解していない不均一系での反応であり、さらに強酸触媒や高温が必要であるなど、過酷な条件での反応である。そのため、反応中にセルロースの分子量が低下すること、置換基の割合(置換度)を制御不能であること、未反応の原料が残るなどの課題がある。そのため、社会実装に至ったセルロースエステル樹脂は酢酸セルロースのみに限られている。これらの課題に対し、セルロースを溶解するイオン液体という次世代溶媒を反応媒質に用いることで、均一系での反応が可能となり、未反応原料の最小化および置換度のワンステップ制御が可能となった。さらに、イオン液体のアニオン種を適切に設計することで、セルロースの溶解性に加えてエステル交換反応の触媒作用を与えられることを見出した。これによって、従来より遥かに穏和な反応条件(酸触媒不要、反応温度は室温以上)でエステル化が可能となり、セルロースの分子量を維持できることも明らかにした。

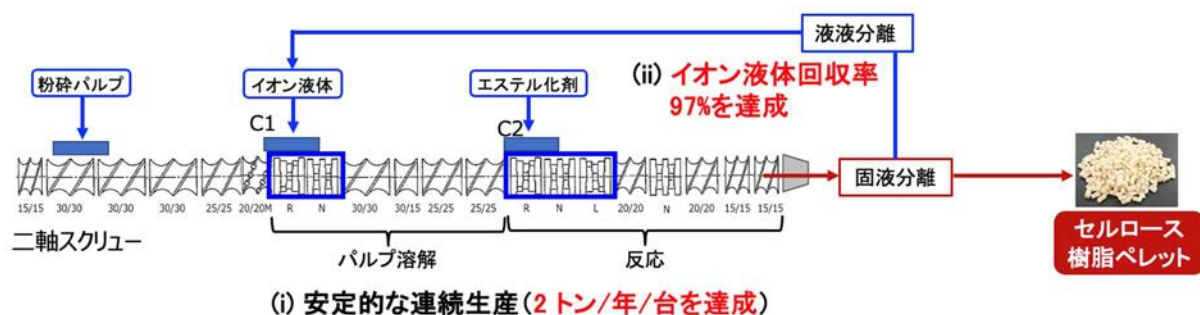
例えば、モデルセルロースとして結晶性セルロース(アビセル)を高い反応率(約 98%)でアセチル化できること、置換度を 0.5 程度から 3.0 まで任意に制御できることを実験的に確認した。この成果は、これまでにない革新的なセルロースの修飾反応プロセスとして学術論文誌(*RSC Adv.* 2015, 5, 72071-72074 および *RSC Adv.* 2017, 7 (16), 9423-9430 など)に掲載された。また、知的財産も申請し、日米欧で PCT 登録済みである(特許 6799259 (W02016068053A1), ドイツ(2017), 米国(2018), 日本(2020))。また、本技術は代表的なセルロース源であるパルプの他にも、リグノセルロースを成分とするバガスなどの実バイオマスにも応用可能であることを実証した。

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果



工業的な生産を視野に入れて連続的にセルロース樹脂を生産するため、二軸混練押出機を反応器として応用した Reactive Extrusion 技術に上記技術を応用した。原料パルプの溶解およびエステル化のためにニーディングエレメントを設計し、混練機内での原料パルプの完全溶解、プラグフローの達成、滞留時間の制御、高置換度の達成のために、原料の供給方法、原料の供給量、バイオマス/イオン液体比、エステル化剤の投入量、スクリー回転速度、反応温度などの各種運転条件を最適化した。例えば、酢酸イソプロペニルとデカン酸ビニルによるセルロースの混合エステル化反応(樹脂構造の選定は後述)を混練機で行い、各種条件を最適化したところ、スクリー直径が 20 mm の実証装置の性能上限として 2 トン/年/台で生産可能なことを明らかにした。本技術には、極高粘度で攪拌可能なために高濃度化による反応時間が短縮できる(従来 48 時間 → 10 分)こと、省エネなプロセスであること、副反応を完全に抑制できること、連続的な樹脂生産が可能であることなどの強みがある。その革新性のため、株式会社ダイセルとの共同出願による知財化に至り(PCT/JP2019/22237)、以降も継続的に金沢大学での研究開発活動を協働して行う(詳細は(6)その他特記事項を参照)。なお、極めて近い将来の工業化において生産量を増大するには、スクリー径の増大や混練機台数の増大で対応可能である。例えばスクリー径を 104 mm に増大すれば、生産量は 142 倍に増大可能と試算済みである。



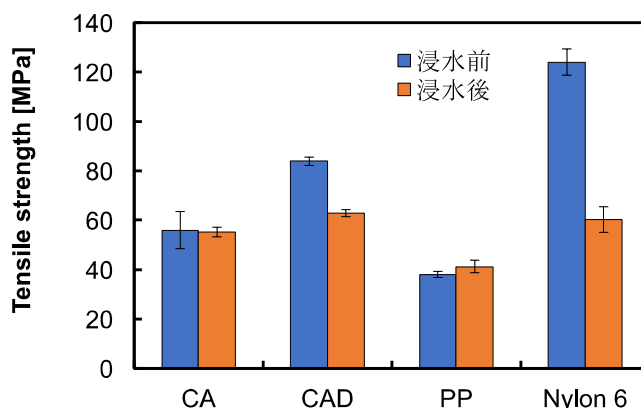
反応溶液からイオン液体を回収して再利用するプロセス開発では、ビニルエステルをエステル化剤として用いた場合、96%以上の回収率で回収に成功し、少なくとも 4 回の再利用においてセルロース樹脂の置換度および収量に問題のないことも確認した。一方、酸無水物をエステル化剤として用いた場合、反応によって副生するカルボン酸をイオン液体から分離することが困難であることが新たに判明した。イオン液体とカルボン酸の相互作用を弱めるために、第 3 成分としてプロトン性溶媒が機能することを明らかにした。いずれの場合においても、イオン液体を高い回収率で再生可能なプロセスを確立した。

4 研究開発テーマの成果

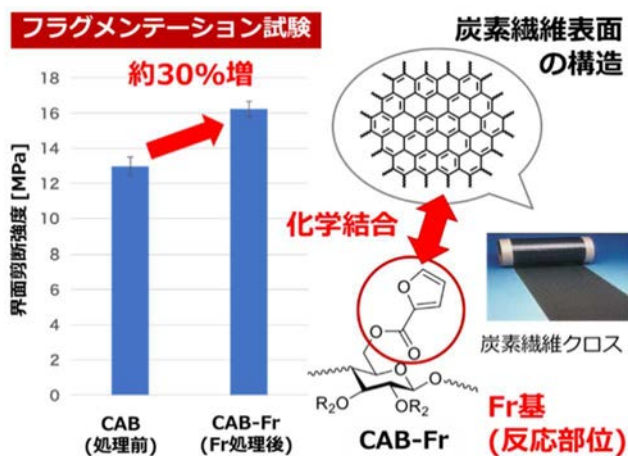
熱可塑性セルロース樹脂をベースとした CFRTP

CFRTP に適したセルロースエステル樹脂の化学構造を明らかにするため、様々な側鎖置換基を有するセルロース混合エステルを化学合成した。それらを母材樹脂として用いた CFRP ダンベル試験片(射出成形品、ランダム材)の力学試験を行うことで、最適なセルロースエステル樹脂の化学構造を選定した。ダブルベルトプレスでの含浸性や熱分解を伴わない成形加工性を考慮した結果、長鎖の飽和脂肪族カルボン酸基と短鎖のカルボン酸基でエステル化した混合エステル(酢酸デカン酸セルロース(CAD))をベースとする CFRTP が、低い成形加工温度(200℃以下)を維持しつつ、C-H/ π 相互作用に基づく高い力学強度(乾燥時の引張強度>85 MPa, 弾性率>6.0 GPa)を示すこと、石油由来樹脂と比肩する力学特性を有することを明らかにした。

また、CFRP の吸水に伴う力学強度変化を石油樹脂と比較した。CAD ベースの CFRTP の吸水率は3%であり、従来のナイロン6ベース CFRP の吸水率8%と比較して十分に小さかった。また、CAD ベース CFRTP は吸水開始後に速やかに飽和に達したが、ナイロン6ベース CFRTP は徐々に吸水した。各樹脂をベースにした CFRP の力学強度を乾燥時と吸水時で比較評価した。その結果、吸水時において、CAD ベース CFRTP はナイロン6ベース CFRP と同等以上の力学特性を示すことが判明した(CAD ベース CFRP 試験片(短繊維)の引張強度:約65 MPa, cf. ナイロン6ベース CFRP の引張強度:約60 MPa)。本結果は、CAD ベースの CFRP が、吸水性、成形加工温度、力学強度の面で石油由来ナイロン6ベース CFRTP を上回ることを示している。



CF 表面との間に適度な分子間相互作用(もしくは共有結合)を生じるよう、母材樹脂としてのセルロース誘導体を設計した。具体的には、バイオマス原料から容易に誘導されるフラン構造を側鎖に導入したセルロースベース樹脂を合成した。得られた樹脂を母材に用いた CFRTP を作成し、引張試験を行ったところ、フラン構造未導入の類似セルロース樹脂と比べて、CF との界面剪断強度を約30%向上することに成功した。さらに、同樹脂の使用量を削減するため、少量の樹脂と炭素繊維を混ぜて加熱することで表面のみを修飾した炭素繊維を作成した。得られた修飾炭素繊維を用いてセルロースベース CFRP を作成したところ、修飾されていない炭素繊維を用いた場合と比較して CF 界面強度はさらに約15%向上、引張強度は約5.1%向上した。このように炭素繊維と化学結合を作るセルロース樹脂を用いることで力学強度の向上に成功した。これらに関連する研究成果は、特許出願している(特願2017-200476)。



(5) 今後の課題と対応方針

セルロースを原料とした熱可塑性樹脂の技術開発は全て COI 期間内で終了し、社会実装を担う企業である株式会社ダイセルへの技術移転も完了した。事業化に向けた開発を企業と協働で進めており、2023 年頃の商品化の予定である。生産設備の関係上、CFRTP に最適なセルロース樹脂である CAD の実生産は、2023 年以降、順次展開される計画である。一方で、セルロースの樹脂生産と CF との複合化を混練機を用いてワンステップで達成する技術は現在開発中であり、COI プログラム終了後、企業との共同開発によって研究開発を加速し、2023 年度までの企業への技術移転、2025 年までの商品化を念頭に開発を進める。

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

(6) その他特記事項

マイクロプラスチック問題や SDGs への対応のため、バイオマス樹脂の普及が世界規模で求められている。バイオマス樹脂がインフラ等で広く社会で活用されるためには、企業による新しいバイオマス樹脂の生産体制が整えられ、工業的に大規模に生産されたそれらバイオマス樹脂を加工して多様な製品を生み出す産産連携が重要である。さらに、そこで生まれる新たなニーズに対応しうる新規材料の開発も必要となる。このため、産産学の連携による研究と開発を加速しうる「ハブ」の設立が極めて重要となる。COI プログラムの支援期間終了後、金沢大学は株式会社ダイセルと産学連携拠点施設(総工費約 30 億円)を学内に設置し、2022 年度から供用開始することに合意している。「新産学協働研究所(仮称)」は、バイオマスを活用したオープンイノベーション拠点となる。そこでは、森林資源・穀物資源などを、環境にやさしい次世代化学変換プロセスによって、さまざまなバイオマス新素材に変換する技術を共同研究し、「バイオマスプロダクトツリー構想」を実現する。

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

4.18 超耐熱樹脂

テーマリーダー（氏名、所属、役職）：	金子 達雄、北陸先端科学技術大学院大学、准教授（～H28.3）、教授（H28.4～）
サブテーマリーダー（氏名、所属、役職）：	（指定無し）
研究開発実施期間：	H25 年 11 月～R2 年 3 月
参画機関：	北陸先端科学技術大学院大学

（1）テーマの概要と目指すべき将来の姿（拠点ビジョン）との関係

従来の技術では成し遂げられない革新的な技術や手法等により、環境性能に優れ、高機能（軽量、長期耐久性、自己修復性、難燃性等）、かつ柔軟な設計が可能で、施工がしやすく、さらには、建設後も移設やリサイクルが容易な革新材料を開発するという拠点ビジョンの中で、本研究テーマはバイオ由来のスーパーエンジニアリングプラスチックの創成を目標に開始した。環境適合性の高いバイオ由来のモノマーを用いた高強度樹脂や高耐熱性樹脂などを目指し様々な分子設計を行った結果、無機ガラス代替の超耐熱透明樹脂の開発に最終的に絞った。これにより、軽量化が見込まれ、（2）に想定される社会的なインパクトが期待される。

（2）想定する製品・サービスについて（担い手、社会的インパクト・経済的インパクト）

住宅・ビルなどに使用されている無機ガラスは重く破損により鋭利となるのが問題である。そこで軽量の難燃有機ガラスへと置き換えることで、災害時の安全性確保や建築物の長寿命化につながる。これによる、社会的インパクトは極めて高い。売り上げ規模に関しては、初期は防煙垂れ壁などのニッチ産業を対象とし、高さ 100m 以上の高層ビル（全国 1000 戸程度）1 戸当たり 1 kg 相当の有機ガラス 100 枚（2 千円／枚）で代替した場合には 2 億円規模となる。さらに、国内 6 千万戸の住宅の窓ガラス（1 kg 相当の有機ガラス 10 枚（2 千円／枚）で代替）を対象とし市場占有率を 1 割とした場合に 1200 億円規模となる。その後、市場占有率の増加や低層ビルなどターゲットの多様化および海外展開を考えると 1 兆円は優に超える規模となる。

（3）研究開発期間終了時の達成目標

熱分解温度が 400℃を超えるバイオ由来ポリマーの合成。ナノシリカとの複合化により燃焼時のアンチドロップ性の付与。

（4）主な成果と達成状況

本テーマでは、バイオ由来のスーパーエンジニアリングプラスチックのスクリーニングを経て、その成果の中で超耐熱樹脂に注力を行い、最終的にはガラス代替の透明超耐熱樹脂の開発に注力した。その成果を報告する。

一般的にバイオ由来製品というと高価だというイメージがあるが、図 1 に示す様に、超耐熱性エンジニアリングプラスチックの場合、その機能と値段は比例するが、発酵生産物（バイオ由来）の場合、価格はほぼ同じであるため、機能性が高いと石油由来よりもむしろ安価となる。そこで、本テーマにおいては、グルコースから発酵で生産される 4-アミノフェニルアラニンに着目し、ポリイミドやポリアミドなどのエンジニアリングプラスチックの分子設計を行った。

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

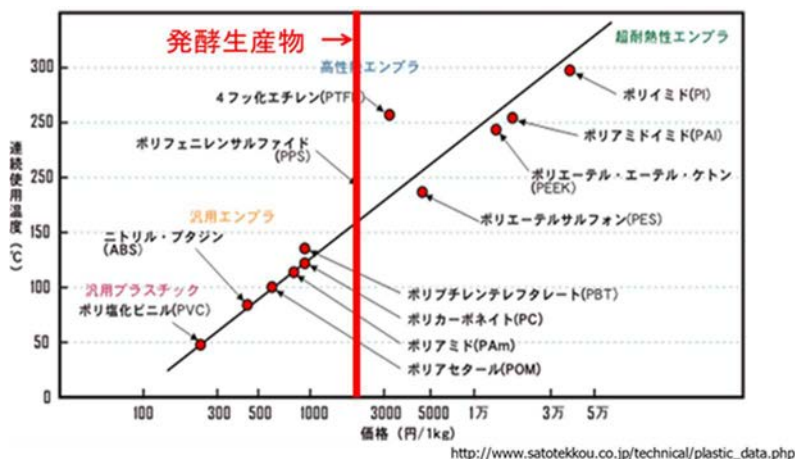


図1 耐熱樹脂の性質と価格の関係

遺伝子組み換え大腸菌から生産した新しい微生物資源である4-アミノフェニルアラニン(4-APA)をジアミンモノマーとして用いて種々の構造のバイオポリイミドの分子設計を行った(図2)。これらの最終産物であるポリイミドは溶媒に溶けず、融点も示さないため、前段階のポリアミド酸の状態でも炭素クロスと組み合わせることでCFRPプリプレグの作成が可能となった。続いて加熱処理することでポリイミドCFRPプリプレグの試作を行った。この複合材料は強度も高く、耐熱性にも優れていたが、工程の複雑さなどから、耐熱樹脂そのものの設計に注力する事とした。

4APAと3,3',4,4'-ベンゾフェノンテトラカルボン酸二無水物という酸無水物を反応させることで、10%熱分解温度 T_{10} が420℃という非常に高い耐熱性を持つポリイミドの合成に成功した(図3)。このような有機物で高耐熱性のフィルムは、無機ガラス代替材料としての有用性が期待される。しかしこれは写真から明らかなように黄色に着色しており、白色透明性が必要とされる有機ガラス代替材料としては不適合であった。そこで、着色を抑制するために酸二無水物の共役性を減じた3,3',4,4'-ビフェニルテトラカルボン酸二無水物を用い、4-APAの代わりに4,4'-ジアミノトルキシル酸を用いてポリイミドを合成した。

これを合成する際にイミド化温度が極めて重要であることが分かり、250℃まで段階的に加熱することで溶解性の高いポリイミドを合成した。その結果 T_{10} が427℃となるものの合成に成功した。

また、4,4'-ジアミノトルキシル酸由来のバイオポリイミドに関してはその塩をシリカと複合する条件を見出し、最適組成のサンプルは溶媒に溶解可能で分解温度400℃を超えかつ100MPaを超える力学強度となり10gのスケールでの合成にも成功した(図4)。したがって、燃焼試験の行えるサイズのコンポジットを得ることが可能となった。UL94燃焼試験の結果、残炎時間が1秒以下でアンチドリップ性を確認する事ができたため、最高のV-0規格であることが分かった。従来技術・競合技術としてはフッ素を導入した難燃性有機ガラスがあるが強熱時に発生するハロゲン系の有毒ガスが問題となっている。本技術はハロゲンを含まないためこのような有毒ガスの発生する可能性は無いことが利点である。また非ハロゲンによるコスト減も期待でき、建築材料としての高耐熱樹脂の開発を目指したが、透明性とアンチドリップ性を活かした防煙垂れ幕への応用が期待される(図5)。

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

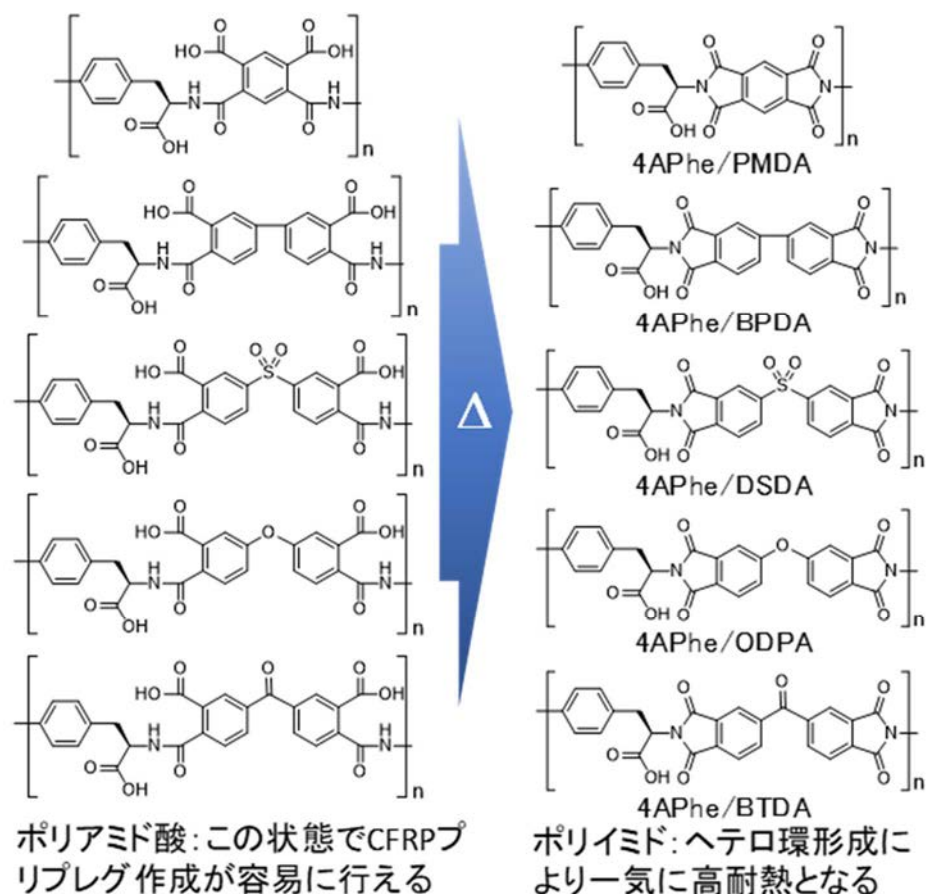
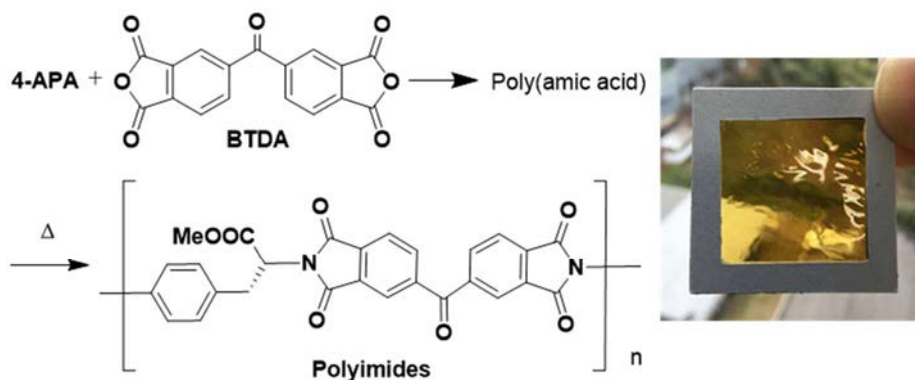
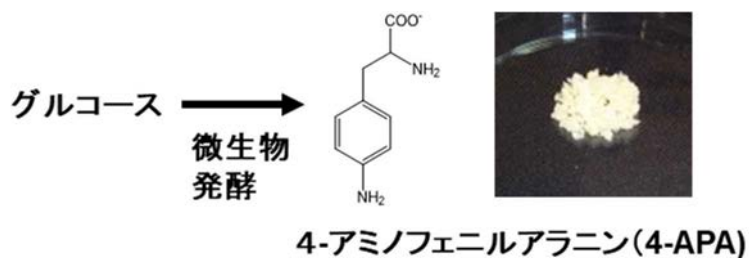


図2 種々のバイオポリイミドの合成



芳香族ポリイミドのフィルム作成にも成功し、**420°C**の熱分解温度(T_{d10})を達成

図3 超高耐熱ポリイミドの合成

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

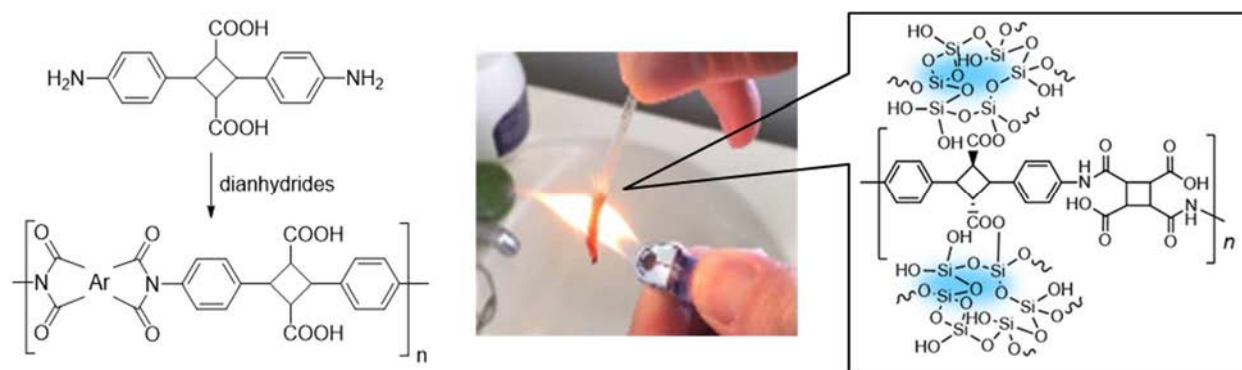


図4 シリカ複合難燃性ポリイミド



図5 高耐熱有機ガラスおよび防災垂れ幕

(5) 今後の課題と対応方針

超高耐熱および難燃性ポリイミドの合成に成功し、防煙垂れ幕や有機ガラスなどへの応用が期待される成果を得た。今後は、アミノ酸由来ポリイミドという新たな学術的領域を広げることで、種々のアミノ酸の一部を合成論的にアミノ基を付与すれば、いずれのアミノ酸もポリイミドの原料となり得る。これにより溶解性ポリイミドなどの真に有用なスーパーエンプラの開発指針を打ち立てることが可能となる。同時にバイオベースプラスチックの材料設計の枠を一気に広げることとなり、企業と共同で量産化に取り組み、持続可能社会の実現に貢献することとなる。

(6) その他特記事項

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

4.19 リサイクル

テーマリーダー（氏名、所属、役職）：	佐野 元昭、金沢工業大学、准教授（～H28.3）、教授（H28.4～）
サブテーマリーダー（氏名、所属、役職）：	（指定無し）
研究開発実施期間：	H25 年 11 月～H30 年 3 月
参画機関：	金沢工業大学、岡山大学（～H28.3）、金沢大学、一村産業（～H28.3）

（1）テーマの概要と目指すべき将来の姿（拠点ビジョン）との関係

使用済み CFRP より、高品質な炭素繊維及び樹脂を再生する処理技術の研究を行い、低コストなリサイクル技術開発を目指す。この技術開発により、CFRP の炭素繊維および樹脂の完全リサイクルを目指す。

（2）想定する製品・サービスについて（担い手、社会的インパクト・経済的インパクト）

CFRP の分離・回収技術開発では、ウォータージェットで研った炭素繊維を、水素気泡法で発生させたマイクロバブル（MB）による分離・回収効果の検証を行う。また、分離された樹脂を分解させる技術開発では、生分解性プラスチック（APEXA）と熱可塑性樹脂（ナイロン：PA6）に候補を絞り、常温・常圧下で高速かつ効率的に分解するための基礎技術の開発を行う。

現在、CFRP の廃棄は埋め立てが主流であるが、本プロジェクトの進展にともない各種大型構造物で CFRP が利用されるようになると、埋め立てや焼却での廃棄が困難となり、本テーマで開発した技術が必要となる。また、高価な炭素繊維を再利用可能とすることで、CFRP の価格低下にもつながると期待される。

（3）研究開発期間終了時の達成目標

CFRP の分離・回収技術開発では、ウォータージェットを用いた効果的な研り条件を決定する。炭素繊維と樹脂の分離・回収では、テーブルトップスケールでどのようなナノカーボン水素気泡法で発生した MB を用いて分離可能か検証を行うことを目的とした。検証終了後は、100 L スケールの処理を目指して試作装置を作製し、炭素繊維を水中での浮上分離の検証を行う。

CFRP の樹脂を分解促進する技術開発では、生分解性プラスチック（APEXA）ではリパーゼ・エステラーゼ等を利用した高速分解活性系の確立を目指す。熱可塑性樹脂（ナイロン）では、ナイロンを迅速に分解する菌の探索と、既存のナイロン分解酵素の分解速度を向上させる両親媒性タンパク質（RoIA, B, C, D）の大量生産を目指し、効率的分解系の確立を目指す。

（4）主な成果と達成状況

炭素繊維の分離・回収技術開発

・ウォータージェット技術は、難削材の加工や複合材料などの切断に効果的に利用され、水を使用する特性から熱発生がなく歪みを生じさせずに被加工部分を選択的に除去できると言った利点がある。そこで、ウォータージェットを用いた CFRP の研りで、炭素繊維を傷つけずに分離・回収を行った。まず、ウォータージェットの噴流ジェットおよび噴霧ジェットを用いて、噴流形態が材料表面に与える影響について調べた。図 4.19-1 に実験に使用した装置の概略図、図 4.19-2 に今回使用したノズルの概略図を記す。

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

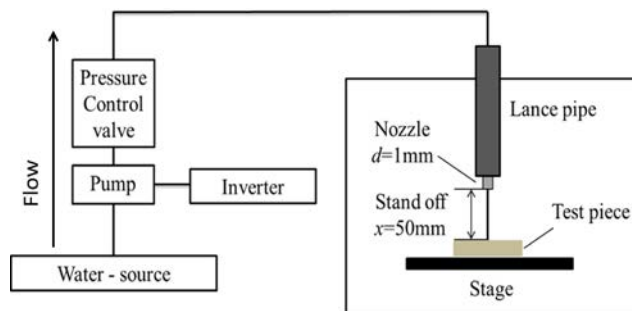


図 4.19-1 実験装置の概要図

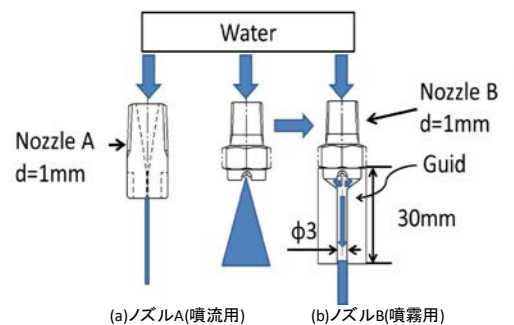


図 4.19-2 各ノズルの概略図

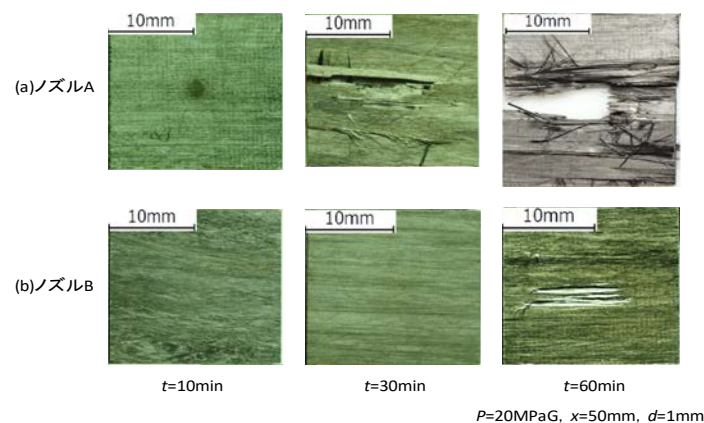


図 4.19-3 ジェット噴射後の CFRP の表面写真

その結果、噴流ジェット（ノズル A）を用いると材料がより短時間で深く損傷することが確認できた。しかし、CFRP のリサイクルを対象として考えた場合、少し時間がかかるが、60 分程度の噴霧ジェット（ノズル B）の噴射によって、繊維へのダメージを軽減しながら分離可能であることが実証された。（図 4.19-3）

・MB による分離・回収では、破碎された樹脂内のフィラーや炭素繊維をリサイクルできるかどうか検討することを目的として、疎水性のマイクロ・ナノ粒子を本手法で分離を試み、可能であることを実験的に示した。テーブルトップスケール MB 発生装置について図 4A に示す。観察容器底部から 5 mm の位置に MB 発生部である金属電極を取り付けた。直径 100 μm のタングステン線を陰極に、直径 1 mm のステンレス棒を陽極に用いて、それぞれ水素 MB と酸素 MB を発生させた。MB を発生させマイクロ・ナノ粒子の分離上昇反応を観察した。分離上昇反応が著しく現れたサンプルは 5 分、それ以外は 10 分とした。分離可能な粒子は主に MB が吸着する疎水性の粒子で、浮上による分離が可能であることが実験的に示された。ガラス繊維と炭素繊維を両方含む複合材料も対象となることもあり、図 4B に示されるように本手法によってガラス繊維と炭素繊維を分離に成功した。その後、100 L スケールの処理を目指して試作装置を作製し、炭素繊維を水中での浮上分離の検証を行い、本手法の有効性が確認された。

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

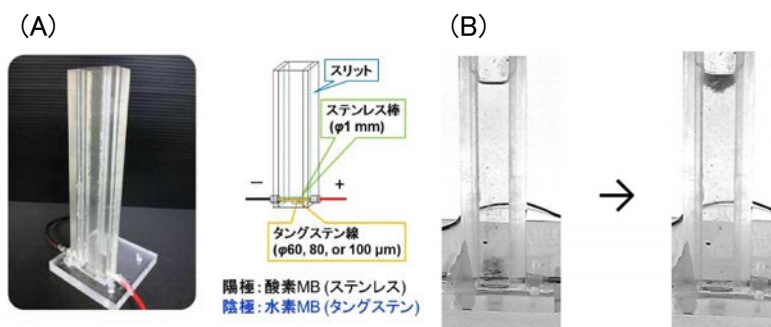


図 4.19-4 (A) テーブルトップスケール MB 発生装置とその電極構成および発生する MB の種類
(B) 電圧印加前後のテーブルトップスケール容器 (幅: 3 cm) 内炭素繊維分散液の写真
右側の図は通電 5 分後の写真である。

樹脂を分解促進技術開発

・生分解性プラスチック (APEXA) では、生分解性プラスチック (APEXA) のリパーゼ・エステラーゼ等を利用した酵素分解系の確立を目指す。表 4.19-1 に APEXA の分解条件の検討に使用したリパーゼ酵素を示す。また、APEXA 分解活性が確認された産業用リパーゼの反応条件検討の結果を図 4.19-5 に示す。

表 4.19-1 検討したリパーゼ酵素

Product Name	Source	Activity [U/g]	Optimum pH	Optimum Temperature [°C]
AK	<i>Pseudomonas fluorescens</i>	25,000	8.0	60
OF	<i>Candida cylindracea</i>	386,000	6.0-7.0	45-50
PL	<i>Alcaligenes</i> sp.	112,000	8.0-9.5	50
TL	<i>Pseudomonas stutzeri</i>	87,600	7.0-8.0	50
QLM	<i>Alcaligenes</i> sp.	98,000	7.0-9.0	60-70

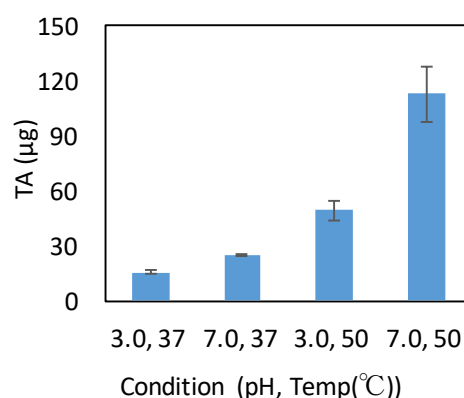


図 4.19-5 反応条件による分解速度向上

名糖産業 (株) のリパーゼ TL で 50°C、pH7.0 の条件が最も APEXA が分解されていた。また、酵素の活性維持期間は最低でも 1 週間あることが判明した。中温・中性条件下での分解が可能であるが、酵素による分解速度は遅く、前処理が必要だと判断した。

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

前処理により、酵素と APEXA 樹脂が接触できる面積増大や、酵素が分解しやすいとされる不規則な構造をとる部分(非晶部位)の割合増加が期待される。そこでアルカリ処理による APEXA フィルム表面変化の確認を行った。水酸化カリウムによるアルカリ処理を行った後、走査型電子顕微鏡で観察を行った結果を図 4.19-6 に示す。その結果、亀裂や隙間ができ、酵素と APEXA が接触できる面積が増大し、酵素が分解しやすいとされる不規則な構造をとる部分(非晶部位)の割合が増加していることが確認された。前処理と複数の酵素を利用して分解速度の向上が期待される。

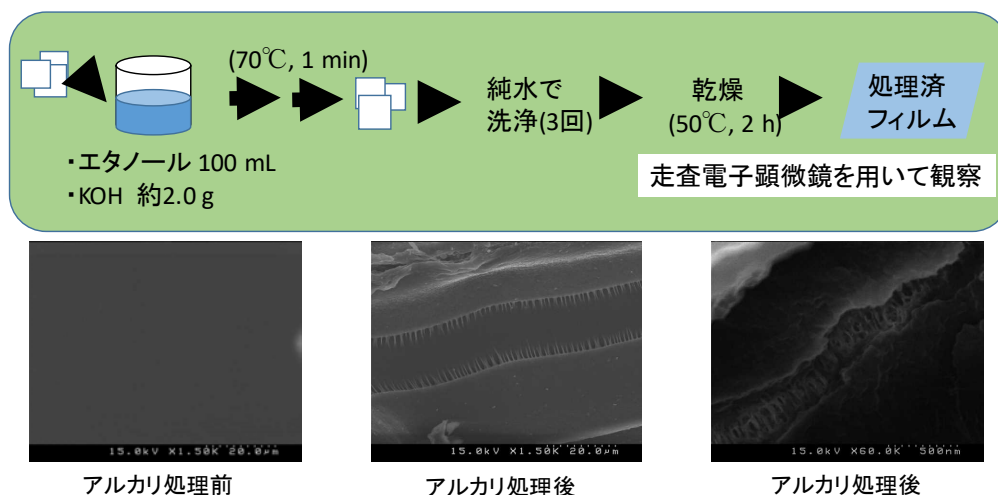


図 4.19-6 アルカリ前処理による APEXA フィルム表面変化

・熱可塑性樹脂(ナイロン)では、既存のナイロン分解酵素では反応速度が遅く、遺伝子改変技術等を用いた酵素の改変でも工業レベルの分解速度に達するのは難しい。そこで新規ナイロン分解酵素の探索を行うため、土中に CFRP を埋め分解する微生物の探索を行った。土中に 10 ヶ月埋めた後、実体顕微鏡により観察を行ったが CFRP の分解は確認できず通常の土壌ではナイロン分解酵素の探索は難しいと判断した。一方、既存のナイロン分解酵素のナイロン分解速度が遅いのは、分解酵素がナイロン表面にしっかりと結合することが出来ないためと推測されている。そこで、両親媒性タンパク質(Rol)を用いることで、ナイロン分解酵素をナイロン表面にしっかりと結合させればナイロン分解速度の上昇が期待される。最初に、ナイロン分解酵素とナイロン表面を結合させる両親媒性タンパク質の探索を行った。使用する微生物には各種データや実験ツールを有している麹菌(*Aspergillus oryzae*)を選択し、麹菌の有する両親媒性タンパク質(RolB, C, D)の大量生産を目指し、両親媒性タンパク質の高発現に成功した(図 4.19-7)。ナイロン分解酵素とこの両親媒性タンパク質を活用すれば、ナイロンの効率的分解系の確立が期待される。

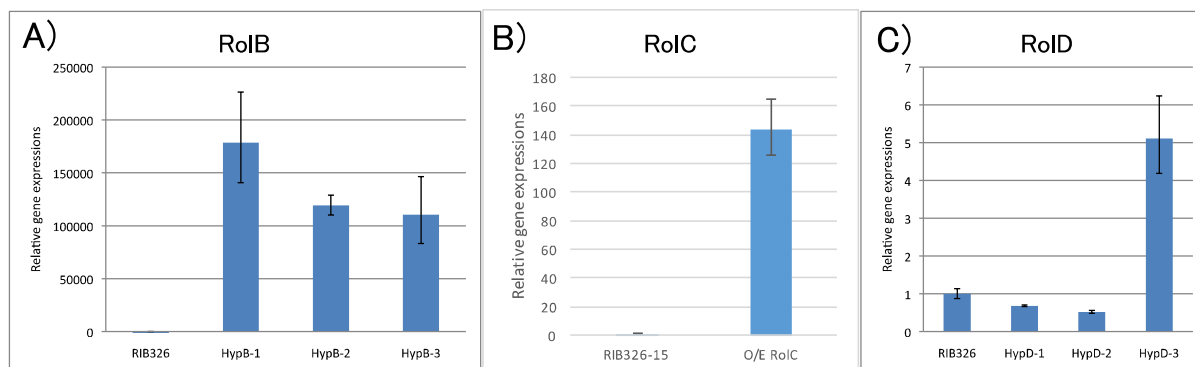


図 4.19-7 遺伝子発現量の比較 A) RolB, B) RolC, C) RolD

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

(5) 今後の課題と対応方針

CFRP の炭素繊維の分離・回収技術開発

- ・ウォータージェットによる CFRP の研りは基礎的技術開発は終了し、実際の用途に応じた技術開発が必要となる。
- ・MB による分離・回収技術開発は目的を果たし、出願した特許については適宜技術移転を図る。

CFRP の樹脂を分解促進する技術開発

- ・生分解性プラスチック（APEXA）では、さらなる分解速度の向上のため、樹脂の前処理条・分解条件の検討を進め、生分解性樹脂を現状の分解速度の 10 倍以上を目指す必要がある。
- ・熱可塑性樹脂（ナイロン）では、分解技術の実現化のため、両親媒性タンパク質と分解酵素の検討をすすめ、熱可塑性樹脂を 6 ヶ月以内に分解可能にする技術の探索が必要である。

(6) その他特記事項

なし。

4 研究開発テーマの成果

4.20 研究開発全体の成果について（科学技術・学術上の新たな体系的知見等）

・ダブルベルトプレス機（DBP）による連続成形技術

熱可塑性樹脂複合材料の大きな課題の一つは樹脂の溶融後粘度が高く繊維束への含浸が難しい点である。これを解決する手法の一つが DBP 機による連続含浸技術である。連続含浸プロセスは、従来のバッチプレスで行う手法に対し大幅に生産性が向上できる極めて優位性が高い技術である。ICC で保有する DBP 機はローラー式の加圧方式が特徴であり、ランダム材やマット材（リサイクル材）などの流動性の高い材料についてもギャップ制御（ローラーの位置制御）が可能のため多様な基材に対応できる点も優位な点である。一方、加圧行程では一様な圧力でなくローラー直下でのみ圧力が加わる含浸方式のため材料の板厚方向の含浸性、樹脂の温度・粘度等のパラメータにより含浸挙動は非常に複雑となり品質確保と効率的な稼働との最適化は困難な装置でもある。本テーマではこの含浸挙動をモデル実験手法を構築しメカニズムの解明を進め、本結果を元にソフトウェアによる含浸流動シミュレーション解析を実施した。開発した成形シミュレーションと実成形の整合性を確認することができ、高速成形の事前予測が可能となった。現在、さらにソフトウェアメーカーとも連携してシミュレーションの高度化を図っている。このようなダブルベルトプレスでの高速含浸に取り組む事例は国内外でもほとんどなく、熱可塑 FRP の実用化で先行する海外からも注目されている技術である。さらに、電磁誘導によるベルトの連続加熱技術（特許を出願済み）と材料の直接加熱技術を組み込みことで熱可塑複合材料の高速・連続含浸技術として確立し、世界的に先行した技術となることから、本拠点のコア技術として引き続き注力していく。

・プレス成形技術

熱可塑性複合材料のプレス成形技術は国内外で多くの研究開発が行われている。しかし、いまだにトライアンドエラー以外に形状の付与と表面品質や力学的強度等を最適化する手法が無い事が課題であり、精密なプレス挙動や圧力、温度などプロセスのパラメータと成形品質との因果関係については十分に解明されていない。本研究テーマでは金型に取り付けた各種センサやプレス機の出力値による成形モニタリングにより、特徴的データの機械学習手法による解析を行い、成形中の材料挙動が判別できる可能性を示した。これによりこれまで十分に定量化されていなかった最適なプレス条件を見出し、さらに AI 等を活用して各種計測データからの品質推定手法を開発し、そしてプレス成形条件最適化制御や材料流動のシミュレーションを可能にすることまでを目標としている。

本テーマの取り組みは、従来技術の高度化が可能な技術であり、引き続きプレス装置メーカーやシミュレーションソフトのメーカーとも連携し実用化を目指して取り組んでいく。さらに関連するロールフォーミング成形、間欠プレス成形の実用化に対して不可欠な基礎的知見である。

・評価技術（長期耐久性、寿命予測）

熱可塑性樹脂をマトリックスとした複合材料を構造材料として適用する開発は、従来の熱硬化樹脂を用いた複合材料に比較し新しい技術・材料であり、長期信頼性のデータや評価方法そのものも十分であるとは言えない。本拠点は長期の耐久性、信頼性が要求されるインフラシステムへ革新材料を適用することが目標であり、力学挙動の解明から耐久性、信頼性を明らかにすることは必須の課題である。

本テーマでは、材料の寿命予測に関して、従来の熱硬化性複合材料に適用可能であった時間温度換算則による寿命予測を熱可塑性樹脂に拡大した適用可能性についての検討を行った。まず耐震補強等に実用化が進みつつある熱可塑性エポキシ樹脂を用いたストランドロッドについて引張強度と温度の関係、静的引張強度のワイブル分布、熱可塑性エポキシ樹脂のクリープコンプライアンス、引張強度とマトリックス樹脂の粘弾性コンプライアンスの関係から、引張クリープ寿命の予測を行い実験結果とよく一致する結果を得られた。さらに PP（ポリプロピレン）についても同様に時間温度換算則が適用可能なことが見いだせ、熱可塑性複合材料の長期耐久性の予測を可能にする学術的にも評価できる成果である。

A イノベーション創出に向けた活動実績

4 研究開発テーマの成果

また熱可塑エポキシ樹脂テンションロッド、より線の応力比 R ($=$ 最小荷重/最大荷重) を変化させた疲労試験、室温クリープ試験等も実施しており、損傷・破壊メカニズムを含めたデータの蓄積が実装化・規格化 (JIS 化) に繋がっていると言える。

順次、他の材料についてもデータの蓄積を図り、学術的な知見から用途の拡大につなげていく。

・新規耐火構造試験の整備

建築分野への FRP の適用では、火災時の耐火性能が最大の課題と言える。高層ビル等の大型建築では建築基準法により 2 時間耐火が求められており、約 1,000℃の温度環境で所定の载荷性能が求められている。FRP 単体でこの耐火性能を満足することは現実的に無理であり、何らかの耐火被覆との組合せが必要となる。これまでの開発により、既存の材料の組合せで 2 時間耐火条件で FRP 側の温度を 200℃程度に抑えることが検証できた。そこで FRP として 250℃程度の T_g を持つ樹脂が開発されれば 2 時間耐火の要件をクリアすることが出来る。そのため樹脂そのものの開発と合わせて、これまで FRP では扱ってこなかった 200℃を超える領域 (航空機の 1 次構造では T_g 180℃) での FRP 性能評価、把握が必要である。高温性能についてはクーポン試験での評価だけでなく、最終的には大臣認定で構造部材としての実大サイズの評価も必要であるが、COI での取組としては被覆材と構造材を分けて性能評価することで開発を効率的進めることが可能なため、大型高温試験装置を開発して ICC に整備した (国内にこのような装置は存在していない)。これにより長さ 3m、幅 600 mm、約 300℃の载荷試験が可能となった。本年度から試験を開始しており、引き続きデータを蓄積し、高温領域での FRP の性能把握により、建築への FRP の適用を進めていく。

A イノベーション創出に向けた活動実績

5 社会実装に向けた必要な対応

5.1 知的財産マネジメントの状況

知的財産については、本拠点ではアンダーワンルーフで複数の参画機関が共同で研究開発に取り組むという特徴を最大限に活かすために、特許の一元管理を実施することとしており、本研究開発を通じて生み出される知的財産の特許出願から、維持管理、ライセンス契約の締結までの知財に関する決定機関である知財専門委員会を運営し、参画企業・機関が積極的に特許を出願できる体制を構築している。

また知財戦略の立案・推進のため、特許技術動向調査を平成 26 年度より開始している。これまで特許庁の特許出願技術動向調査データ「炭素繊維材料及びその応用技術」を元に本事業に関する特許出願状況の把握を目的とした特許マップの作成、WG 毎に独自編集した特許出願状況のリストの作成と各 WG への提供、欧州の特許動向調査、特定技術に関する調査などを行った。

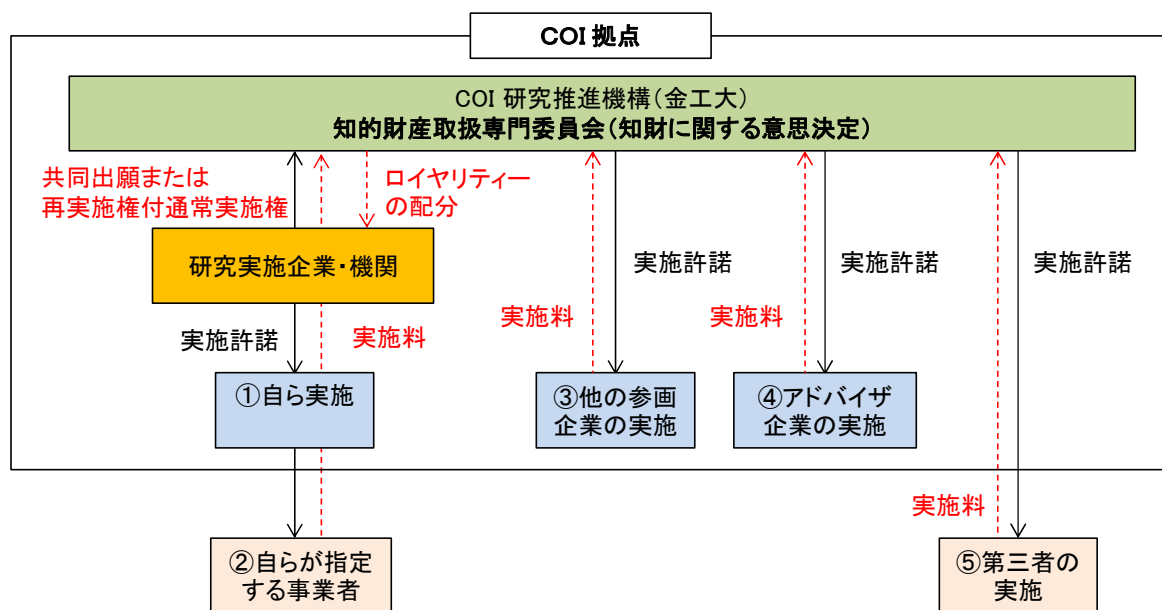


図 A5-1 知的財産権に関する取扱い方法

本拠点は多数の組織により構成され、複数の参画機関が共同で研究テーマに取り組むことによりその成果が生み出されることから、知的財産権の取り扱いに関しては、参画企業の利害関係について配慮しつつ、積極的な特許の取得と、研究成果を共有することにより研究開発、事業化を促進する仕組みを構築する必要がある。そこで、本拠点では知的財産権をCOI機構で一元管理する独自ルールを策定し運用している。図 A5-1 に知的財産権の取り扱い方法について示す。

一元管理の具体的方策としては、COI機構に設置する知的財産取扱専門委員会を知財取扱いに関する決定機関として設置し、本事業により得られた成果の特許出願の可否、COI機構（金沢工業大学）への権利譲渡の割合、実施許諾の可否等を決定し、COI機構による一元管理を実施する仕組みを構築した。この仕組みについては、全ての参画機関による共同研究契約において合意し、契約締結を完了している（平成 26 年 8 月）。なお、令和 3 年 10 月末時点で 77 件（国内 50 件、海外 22 件、内 13 件特許登録済み）の特許出願を行っており、出願後に参画機関内に共有することで、実装化の実現性を高めていくとともに積極的に特許取得の支援を行った。

A イノベーション創出に向けた活動実績

5 社会実装に向けた必要な対応

5.2 社会実装に向けた課題（規格標準化、規制対応、社会規範・倫理等）の抽出と対応

「革新材料を適用した次世代インフラシステムの構築」による社会実装に向け、本事業で開発する革新材料を鉄やコンクリート等の既存材料に代替し広く汎用材料として普及させていくためには既存材料にはない価値を生み出し、単なる代替でないことが第一条件である。

アプリケーションの要求性能、施工性、コストを満たすことや、安全性、環境配慮の点で、十分な検討、検証を進めることが必須であるとともに、新規材料の規格化、標準化が重要な課題となる。特に、国内の建築分野においては建築基準法における構造部材として適用可能となるよう法整備の面からの取り組みも必要な課題となっており、引き続き関係機関と連携した取り組みを行っていく。

建築分野においては、平成 27 年度に国土交通省や建築研究所との連携・協議を開始し「建築研究会」を発足させ、技術面と法制度に関する検討を行った。その一つの成果として、建築分野における炭素繊維複合材料（CFRP）の普及に向けたロードマップが提言された。また、こうした取組みを背景に、COI 参画企業の小松精練（現：小松マテーレ）が開発する炭素繊維ストランドロッドが経済産業省「新市場創造型標準化制度」を活用して標準化を行なうことが決定され、2019 年度に耐震補強材として JIS に制定された。

フェーズ 3 で重要テーマと位置付けた鉄筋代替の FRP 筋については、腐食しないことから、コンクリート構造の長寿命化を可能にするという潜在的に非常に大きなニーズがあるが、新規材料を使うことへのハードルは高い。一方で JR 東海のリニア中央新幹線のコンクリート構造では腐食しないメリットに加え、非磁性が必須となることから FRP 筋への期待が高い。

港湾関連のコンクリートについても FRP 筋の要望はあることから、施工者、発注者等とも連携し、国交省の「NETIS（新技術情報提供システム）」への登録等も今後活用していく。

A イノベーション創出に向けた活動実績

5 社会実装に向けた必要な対応

5.3 マーケティング・試験的な取組の状況（必要に応じて記載）

本COI事業が掲げている「革新材料による次世代インフラシステムの構築」というビジョンの達成に向けて、研究成果をできるだけ早期に社会実装につなげるため、市場動向やニーズの把握が重要となる。

その為の具体的な取り組みとして、土木分野については、インフラを施工するゼネコンや橋梁メーカー、資材メーカー、また道路、鉄道、電力等インフラを所有する側の企業、自治体等から革新材料の実装にあたっての諸問題や要求仕様などを検討することを目的に「土木分野への革新材料実装研究会」を平成26年10月に設置した。この実装研究会の参画メンバーは表2に示すように、実務に精通した企業を中心にした構成で実施しており、ユーザー側の立場から従来技術では困難な取り組みを革新材料によって解決できるような建設的な意見を取り入れる体制を行っている。平成26年度から合計9回の研究会を実施し、実装研究会でまとめられた内容については、随時、研究推進グループへ共有することで、ユーザー側の意見を把握しながら、革新構造材料の実装化を推進してきた。

平成27度の第6回目研究会では今後の展開検討とともにWGへの提言がまとめられた。この結果を踏まえて、革新材料への転換が期待できる具体的な土木構造物の抽出を行ってきた。これまでにFRP補強筋と橋梁ポストテンション方式PC緊張材の締結部のテーマについて具体的な検討が開始されるなど、COI終了後も引き続き研究会のニーズから実装化への検討を進めていく。

A イノベーション創出に向けた活動実績

5 社会実装に向けた必要な対応

5.4 研究開発成果の多様な展開の状況（必要に応じて記載）

本拠点の目指す社会実装は、技術分野としては、素材開発から成形プロセス、加工技術、製造装置、設計・分析技術と幅広い領域をカバーしている。また、複合材料は軽量・高強で長寿命な材料であるため、本拠点のテーマ以外にも多くの産業分野で適用が期待されている。特に軽量化ニーズの高い輸送機器分野等からは高速成形・連続成形による高い生産の実現、低コスト化に期待が大きく、中間基材や汎用部材についてはニーズが高い。

具体的には間欠プレスやロールフォーミング成形による長尺構造材については、航空機のストリンガーやリングフレーム、トラックのシャー等の一定断面形状の部材の高速成形技術への適用が期待されている。2020年4月より日独17企業の参加による国際共同研究が開始しており、日本側は津田駒工業、大同工業、ICC、ドイツ側はFraunhofer IWU、Airbus (CTC) や中型トラックの軽量化開発を行っているベンチャー企業のCTT社等が参加し2022年度までの3か年の計画で進められている。

また、複雑形状の成形性と機械強度を併せ持つランダムシートについては、スポーツ用品メーカーのASICSとサンコロナ小田の共同開発で陸上用ピン無しスパイクを製品化し、東京オリンピックの日本代表選手にも提供された。さらに表面平滑性も高いことから自動車の外装部品等にも自動車メーカーとの検討を進めている。ランダムシートを「フレックスカーボン」として商品化しているサンコロナ小田では2019年度にはNexTEP-B採択もうけ、COIの成果の量産開発を進めている。

浮体式垂直軸型風力発電については、当初からブレードが一定断面形状であることから、COIで開発してきた長尺構造の連続成形プロセスの展開を狙ってきたが、大型実証の資金獲得が出来なかったため要素技術までの検討となったが、洋上風力発電はグリーン成長戦略においても重要な課題であり、実現に向け活動を継続していく。

他の材料や装置等についても、積極的に成果の用途展開や外部資金の獲得を図っていく計画である。

B イノベーションが連続的に創出される自立的なプラットフォーム構築に向けた活動実績

1 自立的なイノベーション・プラットフォームの構築について

1.1 自立的なプラットフォームの構築に向けた拠点の強み・資産の形成状況

【金沢工業大学】

本 COI 拠点である金沢工業大学 革新複合材料研究開発センター（以下、ICC）では、フェーズ 2 の【研究テーマ 1】共通部材成形技術として繊維強化ポリマー系複合材料の製造技術をメインに研究開発を実施してきた。

複合材料の製造技術は、成形プロセスの研究開発だけでは具現化できないため、ICC では、材料開発/成形装置/評価技術/設計エンジニアリング技術（シミュレーション）など関連分野を連携/融合した研究体制を取っている。ICC は、ダブルベルトプレス、200 トン油圧サーボプレス、300 トン機械サーボプレス、オートクレープ、連続成形装置（ロールフォーミング、連続プレス成形機）、自動積層機、自動裁断機などの多くの大型製造装置、および X 線 CT/各種熱分析装置/機械特性評価装置などの評価分析装置を保有しており、企業の試作レベルの開発が可能である国内最大級の複合材料研究開発拠点となっている。

運営組織としては ICC 内に産学連携コーディネーターを中心に企画戦略チームを設置し、県や公的研究機関との連携、公的研究費や企業共同研究の獲得、海外研究機関との連携、国内外へ展示会やシンポジウムへの出展を戦略的に実施し、単に企業と大学を結ぶだけでなく、研究開発をプランニングし、コーディネートまでを行う点が強みである。また非常勤として、石川県県庁の産業政策課職員から 2 名、民間企業の三井物産株式会社より 1 名を産学コーディネーターとして委嘱し自治外や商社のネットワークを生かした事業化の支援、情報提供等を行っている。R3 年度までの外部資金獲得の実績として、公的資金 19 件（COI 事業を除く）、共同研究 113 件、海外研究機関との連携についてはこれまでの累積で 4 件（MOU の締結）がある。

また、ICC では、メンバーシップ・プログラム（受入研究員制度）を実施しており、現在 43 機関、52 名の企業研究員を受け入れている。メンバーシップ・プログラムでは、ICC 内の装置を利用した研究開発活動だけでなく、ICC 独自の技術情報誌を毎月発行し国内外の技術情報を提供している。また国内外の研究者を招いてのフォーラムを毎月実施しており、複合材料の研究開発ネットワーク形成を担っている。これらの活動の成果として、ドライ繊維シート含浸性評価法の研究会の発足など複数企業による産産連携にもつながっている。また、民間企業との取組みとしては三井物産株式会社との協力協定により HP-RTM 成型システムの提供を受け、ICC の装置運転、維持管理により共同研究、技術普及などを実施し、事業化につなげることで企業と大学の双方がメリットとなる連携のケースとして取組んでいる。この他、企業から試作機・評価装置等も受け入れることで ICC での先端的な研究成果が蓄積されつつあり、研究開発のプラットフォームとして産業界からの期待も大きい。

これらの様々なハード・ソフトを利用することで、ICC では複合材料の統合的な研究活動および共同研究を実施し、これまでに 77 件（国内 50 件、海外 22 件、内登録 13 件）の知財を出願している。

【金沢大学】

バイオマス由来樹脂の開発を担当する金沢大学 高橋憲司研究グループでは、イオン液体を利用したバイオマス変換による樹脂合成反応および生産プロセスの開発から、それらを母材として利用した炭素繊維複合材料（CFRP）の開発までの、学術的に幅広い分野に渡った研究活動を行なっている。本研究グループには、モーリン化学工業や日本製紙株式会社などの企業が参画している。専門化が進んだ現在において、本グループのように様々な研究上の問題に柔軟に対応できる大規模な研究体制は珍しく、本 COI の他にも株式会社ダイセルとセルロース樹脂について進めてきた共同研究をきっかけに、2019 年に金沢大学と株式会社ダイセルとの包括連携協定が締結された。さらに、COI プログラムの支援期間終了後、株式会社ダイセルの一部出資により産学連携拠点施設（総工費約 30 億円）を学内に設置し、2022 年度から供用を開始する。「新産学協働研究所（仮称）」は、バイオマスを活用したオープンイノベーション拠点であり、森林資源・穀物資源などを、環境にやさしい次世代化学変換プロセスによって、さまざまなバイオマス新素材に変換する技術を共同研究し、産産学連携による「バイオマスプロダクトツリー構想」を実現する。

B イノベーションが連続的に創出される自立的なプラットフォーム構築に向けた活動実績

1 自立的なイノベーション・プラットフォームの構築について

【NIMS】

・全体構想・設計

物質・材料研究機構 高分子系ハイブリッド複合材料グループは、金沢工業大学C O I のサテライト機関として革新材料の構造物マネジメント技術開発、ナノ・ミクロ信頼性評価および長期信頼性評価を中心的に実施している。また、本事業とは別に複合材料の接合技術としての接着接合技術開発や複合材料のマテリアルズ・インフォマティクスとしてのデータ駆動型の材料開発にも取り組んでいる。

物質・材料研究機構は、前身が金属と無機材料の研究機関であり、複合材料・接合の研究者は少ない。また、国立研究開発法人の材料研究のバランスから複合材料・接合の研究者の飛躍的な増加も難しい。社会的および学術的に価値ある研究を推進するためには、国内外の複合材料・接合を行う研究機関とのネットワーク化が重要である。

C O I プログラムの支援期間終了後は、革新複合材料研究開発センター（I C C）と連携し、革新材料の社会実装を検討している企業の信頼性評価に関する研究開発を継続的に行う。I C Cでの自立・持続的な“イノベーション・プラットフォーム”の“信頼性評価”を担う機関となる。特に、C O I プログラムで注力している革新材料ロードについては多くの信頼性データが蓄積されてきている。また、国内外の複合材料・接合を行う研究機関と連携し、複合材料・接合に関するデータを蓄積し、最終的には“データ駆動型の複合材料・接合技術開発”を担う機関となることを目指している。

人材育成に関しては、国内外の複合材料・接合を行う教育機関の博士課程修了の研究者の受け入れを行い、複合材料・接合研究のプロフェッショナルを育成する機関となることを目指している。

・実現に向けた計画

上記全体構想・設計は本事業開始後の物質・材料研究機構 高分子系ハイブリッド複合材料グループ発足当初からの目標である。グループの研究人員も飛躍的ではないが、着実に増加している。本事業とは別の事業にも精力的に参画し、国内の複合材料・接合を行う研究機関とのネットワーク化も進んでいる。C O I プログラムの参画機関である京都大学では2020年4月にインフラ先端技術コンソーシアムが設置された。物質・材料研究機構 高分子系ハイブリッド複合材料グループは本コンソーシアムの革新材料（先端材料）分野の幹事となっている。また、東北大学の工学部機械知能・航空工学科とクロスアポイント化している。海外の講演会にサイエンス・コミッティーとして参画し、国際的なネットワーク構築を進めている。

107

B イノベーションが連続的に創出される自立的なプラットフォーム構築に向けた活動実績

1 自立的なイノベーション・プラットフォームの構築について

先に述べたように、仲井研究室では、コア技術（テキスタイルコンポジットの設計・成形・評価技術）の深化と拡大目指して、研究・開発活動を行っている。

仲井研究室は、テキスタイルコンポジットの分野において、その①設計、②材料開発すなわち強化繊維束もしくは樹脂含浸のプリフォーム、混織糸を用いた③中間加工技術である織・編から、④賦形するための成形加工技術、⑤成形品の評価技術に至るまで一貫して取り扱うことが可能な国内唯一の研究室である。このテキスタイルコンポジットの設計（①）・製作（②③④）・評価（⑤）のコア技術を活かして、民間企業との委託・共同研究、岐阜県産業技術総合センター等の公的研究機関との連携、金沢工業大学や京都工芸繊維大学との大学間協業を行っている。

仲井研究室は、テキスタイルコンポジットに関するノウハウ（無形資産）、製織・製紐装置、各種成形装置、評価用試験機等（有形資産）を有している。それを活かして今回の COI の検討では新規に引抜成形機を設計・製作・導入、更には加工技術のノウハウの構築などを行ってきた。

B イノベーションが連続的に創出される自立的なプラットフォーム構築に向けた活動実績

1 自立的なイノベーション・プラットフォームの構築について

1.2 産学連携を効果的にするルール・運営方法の工夫

中核機関である金沢工業大学では、「産学協同」の建学の理念の下、大学と産業界を結ぶ窓口として「産学連携局」を設置し、研究支援部を窓口として共同研究等の契約締結を行っている。研究支援部では外部からの相談に応じて、研究者とのコーディネートから大学による研究内容の審議・審査まで一貫して支援を実施。本学の設備を使用したデータの収集・解析から大手企業や政府機関と行う大型プロジェクトまで、さまざまな依頼に対応している。知財については学校法人金沢工業大学知的財産ポリシーを定め、共同研究においては大学と企業等との共有、委託された研究については大学への帰属を基本としている。また、企業や個人などから「工学アカデミア計画寄付金」として学術研究や教育を目的とした資金を受け入れる制度を設け、社会に貢献する学問研究を推進している。

一方で、新規の材料である複合材料分野はまだ市場規模がニッチで中小企業が多く、関連する技術情報も広く周知されていない特殊な産業分野であることから、ICC 内に独自の産学連携機能を構築し、大学の研究支援部と連携して効率的な運営を実現している。

サテライト機関である金沢大学では、産学官連携・知的財産活動を本学の重要な使命の一つとしてとらえ、本学の社会貢献のさらなる充実と教育研究のより一層の発展を目指すために「金沢大学産学官連携・知的財産活動ポリシー」を定めている。

併せて、本ポリシーの円滑な運用を図るために体制・啓発活動、共同研究・受託研究の活性化、知的財産権の機関帰属・保護・活用、教育・人材育成、指針の遵守、産学官連携の国際的展開などについて、具体的な展開を示した「金沢大学産学官連携・知的財産活動ポリシーの運用ガイドライン」を定めて、組織的に産学官連携等に取り組んでいる。

同じくサテライト機関である北陸先端科学技術大学院大学では、産学連携活動への取組みを積極的に進めており、多くの民間企業と情報交換を行える体制が整っている。地元の中小企業と連携し、それらの企業の国際競争力を引き延ばすことは極めて重要な大学の使命であるものの、研究に経費を計上することへのハードルは高い。北陸先端科学技術大学院大学ではその支援策として、北陸3県に立地する企業と共同研究に進展する可能性のある場合、その予備検討として研究費を助成する制度を実施している。

また、産業界のニーズと大学の研究シーズのマッチングを推進するための「Matching HUB」などの産学連携の引き金となる事業を本学が主体となり実施しており、最近では地元企業との連携活動も積極的に促しているところである。

これらの取組みにより、大学の研究シーズや大学との連携の重要性を企業に発信するとともに、将来的には地元産業の振興に欠くべからざる存在になりたいと考えている。

同じくサテライト機関である岐阜大学では、外部連携を推進するために大学全体として地域企業のサポートに重点を置いて取組みを進めている。具体的には、GCC（Gu コンポジット研究センター）パートナーズ、CFRP 研究会、炭素繊維リサイクルコンソシアム等の交流の場を設け、積極的な活動を行っている。

学内では、前期組織に基づく、外部との協業を担当する連携推進部門や法務・知財部門を有し、ワンストップでの後方支援が可能な体制をすでに構築している。

サテライト拠点である物質・材料研究機構では、「材料開発支援」において中核機関の金沢工業大学の「材料評価技術の開発」グループならびに材料提供先としての小松マテーレ株式会社と連携し、実材料での長期耐久性予測の実現を進めている。「アプリケーション適用支援」においても中核機関の金沢工業大学、サテライト機関の京都大学、材料提供先としての小松マテーレ株式会社と連携し、実材料での実証試験・実装の実現を進めている。

実証・社会実装を進めるタスクチームと目的型の基礎評価を推進する評価技術が融合した研究活動が産官学連携を効率的に進める手法であり、本活動も含めた構造物マネジメント技術開発が期待できる。

B イノベーションが連続的に創出される自立的なプラットフォーム構築に向けた活動実績

1 自立的なイノベーション・プラットフォームの構築について

また、今後のポスト COI を見据え、材料提供先である小松マテーレ株式会社や中核機関である金沢工業大学と、革新材料の共通部材製造技術と評価技術で相補的な関係を構築すべく連携の強化を推進しており、ポスト COI においても拠点となりうる金沢工業大学のほか、本 COI でのサテライト拠点・大学機関・民間企業と長期的に連携を継続していく。

B イノベーションが連続的に創出される自立的なプラットフォーム構築に向けた活動実績

1 自立的なイノベーション・プラットフォームの構築について

1.3 自立的なプラットフォームの構想・設計・稼働の状況

(1) 革新複合材料研究開発センター（ICC）

組織の名称	革新複合材料研究開発センター
組織の位置付け・種別	附置研究所組織
組織の長となる者の職位	所長（部局長相当、教授）
運営資金（財源）	COI 終了 2 年後 総額規模：300,000 千円 収入の構成割合：学内予算 10%、民間資金 40%、外部資金（競争的資金含む）50% ※想定される資金源：学内予算（学内との教育連携による運営費）、民間資金（共同研究費、メンバーシップ会員費、セミナー受講料等）、外部資金（石川県次世代ファンド、サポイン、科研費、NEDO、A-STEP 等）
体制（マネジメント体制を含む）	COI 終了 2 年後 マネジメント：所長、事務室長 人員体制：教授 2 人、客員教授 6 人、研究員 4～6 人、技師 10～12 人、事務職員 5～7 人、大学院生 4～6 人、海外インターン 2～4 人
概要	目的：繊維・機械産業の集積といった地域のポテンシャルのほか、他地域の有力大学、研究機関及び企業等と広域・異分野融合することにより研究開発推進体制を構築し、日本のみならず世界が抱える課題の解決をはかる「国際科学イノベーション拠点」を支える場となること。金沢工業大学 COI 事業のテーマとなる持続可能で安全・安心な社会実現のための革新複合材を創出すること。 機能：研究開発、連携活動（学内外）、教育のプラットフォーム 現在までの準備や活動開始状況等、今後の整備計画： 「国際科学イノベーション拠点」としてアンダーワンルーフのもと産学官連携のオープンアクセス・プラットフォームとして、既に研究開発・連携活動・教育の観点で取り組んでいる。2018 年には「地域科学実証拠点」を整備し、COI プログラム終了後の自立・持続的な活動を可能にするためのイノベーション・プラットフォーム構築計画を具体化し遂行する。

(2) 自律的なイノベーション・プラットフォームの構築

(1) イノベーション・プラットフォームの全体構想・設計

革新複合材料研究開発センター（ICC）は、「国際科学イノベーション拠点」としてアンダーワンルーフのもと産学官連携のオープン・プラットフォームとしての実績を積み上げてきた。特に、中心的な実施場所として本事業に継続して取組んできたことから、プログラム終了後には、COI 拠点の研究開発活動や機能を活かし、複合材料の適用拡大に貢献し、イノベーション創出に向けた取組みを自立・持続的に推進するための「イノベーション・プラットフォーム」の確立を目指すこととする。

ICC は、既に本事業以外にも、研究開発・連携活動・教育を柱とした拠点活動を展開しているが、自立・持続的な「イノベーション・プラットフォーム」となるため、引き続き、特に以下の活動項目に重点的に取組むことで、拠点の機能の充実化・強化を図っていく。

(2) プラットフォームの構想の実現に向けた計画

上記（1）の構想（複合材料の適用拡大に貢献し、イノベーション創出に向けた取組みを自立・持続的に推進するための「イノベーション・プラットフォーム」）を実現するため、以下の 2 つの観点で取り組む。

1 自立的なイノベーション・プラットフォームの構築について

【複合材料のエンジニアリング（設計・解析、試作開発）支援機能の充実とサービス体制】

複合材料の普及に対する主な課題は「生産性／コスト低減」と「品質保証」であり、新規開発においては「企業間の連携」が大きな障害となっている。

ICC は、本拠点の中心的な実施場所として年間 3,000 人日の研究開発のベースとなり、実証開発エリアの拡張により、従来の基礎研究環境に加えて企業の製品や装置開発を支援する環境も整備された。この間、北陸・東海エリアのコンポジットハイウェイコンソーシアムや海外研究拠点との国際連携活動等を通して、ICC のオープン・プラットフォーム機能は広く認知されほぼ確立しているといっても過言ではない。また、「生産性／コスト低減」は本拠点の最重要研究テーマとして取り組み、複数の連続成形技術の実用化を実現している。

以上の金沢工業大学 COI 拠点の成果（レガシー）をもとに、さらに強固な複合材料の適用技術の研究開発機能を有する自立・持続の新しい拠点として実現するために、大学の附置研の枠を超えた**複合材料のエンジニアリング（設計・解析、試作開発）支援機能の充実とサービス体制**を構築する。

具体的には、現在の「研究員による研究推進」主体の大学研究機関体制に、「新規事業組織によるエンジニアリングサービス」機能を ICC 内に設置し以下の活動を行う

- ・各種試験装置、分析装置によるマテリアルデータの取得、評価・分析
- ・取得データによる、解析、設計
- ・各種製造設備による試作開発
- ・大学知財の事業化、商品化

なお、新規事業組織である株式会社 ICEMI は 2021 年 4 月に金沢工業大学と包括的協力協定を締結し、パートナー企業として大学の先端研究と複合材料の産業化について協力し、プラットフォームの持続的な発展に資する活動について連携することとしている。

従来の ICC は、大学の附置研究機関として、基礎研究（TRL1～3）とさらに企業の実用研究（TRL7～9）までの橋渡しとして、製造技術にフォーカスした適用技術研究をこれまで行ってきた。この間、本拠点では、建築・インフラ分野において、ひとつでも多くの実用化・社会実装を目指してその活動を伸張している。

複合材料の実用化には、製造技術に加えて、膨大な実材料／実構造材による強度試験や実証試験が不可欠であるが、国内には複合材料の材料試験を行える企業材料は少なく、また高価である。さらに、複合材料は試験規格が十分整備されておらず、個々の材料や構造に合わせて試験形態や条件を考慮する必要もある。そこで、複合材料研究機関である ICC と ICEMI が連携し研究領域を超えたエンジニアリングサービスの一環として材料試験・評価を支援することは、大いなる社会貢献と拠点の資金調達を両立する活動となる。

以上のように、R&Dの研究機関にエンジニアリング機能が加わった拠点として、ICC 発ベンチャー企業の ICEMI のエンジニアリングサポート機能や三井物産（株）・（株）GSI クレオス等の商社機能による大学知財のアウトリーチ活動やサプライチェーン構築の連携強化も進めている。

【教育拠点】

現在の ICC は研究活動が主であるが、学生への教育活動は 2017 年度から本学大学院の授業として社会人と合同の革新複合材料特別講義を開催している。ICC に学生を取り込むことで、TRL1 から TRL3 の基礎、基盤研究を更に進めることも可能となる。

大学附置研究所として学生教育に参加するにあたり、多岐に渡る学術分野の集合である複合材料という特長を考慮し、学部/専攻を超えた学際的複合材料教育の実践の場（コンポジットアライアンス）を形成することで、ICC の Professorship 制度を確立し全学教育 FD への貢献を実現する事を目指す。

また、企業との連携を活かしたコーオプ教育を行うことで学生の実践教育だけでなく、ICC をコーオプ教育の場として共同研究を実施するなど、企業の研究を呼び込むことにもつながる。

B イノベーションが連続的に創出される自立的なプラットフォーム構築に向けた活動実績

1 自立的なイノベーション・プラットフォームの構築について

海外との連携については、既に海外の大学や産業クラスター、研究拠点とMOUを締結していることから、海外からのインターンシップ受入も進んでいるが、今後は本学の宿泊施設の利用等により、さらに国際的人材交流、海外連携を深めて、国際研究拠点としてのプレゼンス向上の実現を図る計画である。

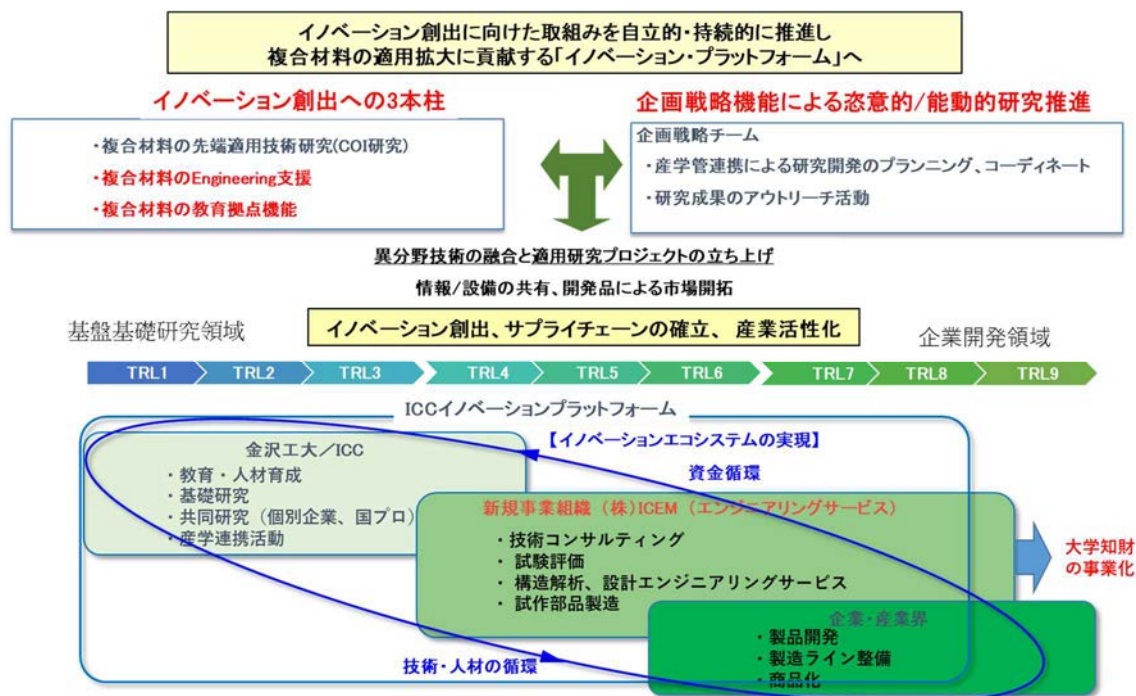


図 B1.4-1 自律的なイノベーション・プラットフォームの構築

2 若手を中心とする多様な人材の活躍促進について

2.1 次代を担う若手等の多様な人材の育成・活躍促進の状況

本事業は、材料開発から製造技術の開発、リサイクル技術やバイオ技術によるサステナブルな材料循環等、広範な技術領域をカバーするため、異分野融合による研究開発体制が必須であることから、複合材料工学、機械、電気、化学系の研究者に加えて、人文系の研究者、木質系バイオマス利用における地域経済分析まで、多くの分野における研究者等が幅広く参画している。

特に、中心的な実施場所である ICC のメンバーシップ・プログラム制度や出向を活用して、参画企業の若手・女性研究者が ICC に入り込んで研究開発に従事することを可能にし、事業開始当初より研究開発に参画する機関・企業が一体となった取組みを行ってきた。

また COI 拠点間の若手研究者を中心とする交流、ネットワーク作りに関して、2015 年度から始まった JST COI 構造化チームにおける若手部会の開催や COI 2021 会議の取組みに参加してきた。イベント開催毎に拠点参画機関に案内を行なうとともに、COI 機構において参加者を調整し拠点の若手研究者や機構関係者を積極的に派遣するよう努めた。それにより、若手部会、COI 2021 会議、COI 若手研究者による学術交流会（COI 学会）、NIN（Next Innovators Network）Meeting などへ継続的に参加するようになってきた。

さらに、若手研究者を中心とする拠点間の連携活動とネットワーク形成への取り組みとして、2016 年度より開始された COI 若手連携研究ファンドに慶応大学 COI 拠点と本拠点との連携による申請を行い、研究テーマ「大型 3D プリンティングによる CFRP ペレットを用いた革新的建築壁モジュールの設計方法に関する研究」に関する申請が 2018 年 3 月に採択を受けた。両拠点の若手研究者が主体的に密に連絡を取りあいプロジェクトを遂行した。期間中には、金沢工業大学 COI 機構長の主導により、本連携ファンドの出口側に位置づけられ本拠点の参画企業でもある大和ハウス工業にもプロトタイプを示しアドバイスを受け、2018 年 10 月に開催した本拠点の金沢工大 COI 中間成果報告会や同年の JST フェア等で発表を行うなど積極的な活動を行った。一定の成果や知見を得てファンドとしては同年度で終了し、以降も各拠点での課題への取組みや応用研究を行った。さらに、2019 年度新設のデジタル若手ファンドにも申請を行い、採択には至らなかったものの、追加配賦を受け本事業での新たな取組みを行った。

また、複合材料分野における人材育成に関し、サプライチェーンの確立で先行する欧米では、同分野の専門教育を研究機関のみならず、民間企業でも盛んに教育訓練が行われている。そこでは複合材料に関する基礎座学や各種成形方法に関する講習など、実体験に基づいて、その技術を習得できるコースとなっている。このような技術者の育成環境の充実が、多様な技術者やノウハウを産み出し、製造技術・装置開発の強みを高める要因の一つと見られる。他方、我が国においては、研究機関における学部・大学院などで専門的な教育は行われているが、社会人を中心とした集中的な複合材料技術者育成プログラムは、ほとんど取り組まれていない。こうした状況を背景とした産業界における人材育成への取組も行ってきた。中核機関である金沢工業大学では、企業技術者を対象とする複合材料に関する特別講義（高信頼ものづくり専攻特別講義〔複合材料材料特論〕通年 30 コマ〔4 単位相当〕）が行われているが、本事業の中心実施場所である ICC を活用して授業を行い、2019 年度からは大学院の授業と社会人の授業を合同で行う取組みを行っている。さらに地域イノベーション戦略支援プログラムの終了（2016 年度）以後に継続している地域での人材育成に関する取組み、業界団体や学会等の人材育成に関する取組みなどとも連携し、産業界の多様な人材の活躍促進に資する取組みを行ってきた。2020 年度以降、コロナ禍のため、対面形式の講義やセミナーが難しくなったが、オンラインにより動画なども取り入れた形式とするなど、人材育成に関する取組みは継続した。

またポスト COI の取組みも含め、産学の人材交流を活性化に関する施策について中核機関である金沢工業大学と協議を行ってきた。その中で、学生が長期に渡り企業と合意した研究テーマをもって企業内に入り産学共同での研究開発・教育を行うコーオプ教育をさらに発展的に展開していく計画を検討してきた。具体的には、産業界から企業研究者や技術者が、大学からは学生が本事業の中心的な実施場所である ICC に集い、産学共同研究のテーマに、コーオプ教育としてのテーマも兼ねて、社会人と学生が実践的に研究開発に取り組めるようにするものである。

B イノベーションが連続的に創出される自立的なプラットフォーム構築に向けた活動実績

2 若手を中心とする多様な人材の活躍促進について

2.2 人材の育成・人材循環整理表

○人材の育成、人材循環整理表

※大学等：大学・研究機関 単位：人

(人材の育成等の状況)		合計 (H25-R3)
昇格	同一機関	23
	他機関	11
定年制の取得	同一機関	8
	他機関	11

(出向・クロスアポイントメント等の人事交流状況)		合計 (H25-R3)
大学等→大学等		4
大学等→企業		1
企業→大学等		9

※転籍出向や兼業は含みません。

(転籍等の人材流動の状況)		合計 (H25-R3)
大学等→大学等		68 (22)
大学等→企業		155 (151)
企業→大学等		33

(外国機関との滞在型研究交流の状況)		合計 (H25-R3)
短期	派遣	2
	受入	0
2 ヶ月以上	派遣	0
	受入	0