

平成29年度
戦略的基盤技術高度化・連携支援事業
戦略的基盤技術高度化支援事業

「CFRPと金属材料の直接接合技術の開発」

研究開発成果等報告書

平成30年4月

担当局 東北経済産業局
補助事業者 株式会社インテリジェント・コスモス研究機構

目 次

第1章 研究開発の概要	1
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1-1-1 研究概要	1
1-1-1(1) 川下製造業者等の抱える課題及びニーズ	1
1-1-1(2) 研究開発の背景	3
1-1-2 実施内容	3
1-2 研究体制	5
1-2-1 研究体制	5
1-2-2 管理体制	5
1-2-3 研究者等氏名	6
1-2-4 他からの指導・協力者及び指導・協力事項	7
1-3 成果概要	8
1-3-1 CFRTPと金属材料の強固な直接接合（接着剤等を使用しない）技術の開発	8
1-3-2 CFRTPと金属材料の接合界面における、高度な気密性確保に関する研究	8
1-3-3 金属材料に生成するレーザパターニング処理の最適化	9
1-4 当該研究開発の連絡窓口	10
第2章 本 論	11
2-1 CFRTPと金属材料の強固な直接接合（接着剤等を使用しない）技術の開発	11
2-1-1 CFRTPと金属の 直接接合設備の開発	11
2-1-2 CFRTP材の流動性・充填性調査、および接合強度との相関調査	12
2-1-3 接合界面における、CFRTPの接合形状最適化	13
2-1-4 CFRTPと金属材料の 直接接合モデルの製作	14
2-2 CFRTPと金属材料の接合界面における、高度な気密性確保に関する研究	15
2-2-1 レーザ処理接合界面の濡れ性調査	15

2-2-2	CFRTP と金属材料接合面に発生している応力の可視化及び数値化……………	16
2-2-3	接合界面に発生している応力と、その気密性の関連調査……………	17
2-3	金属材料に生成するレーザパターンニング処理の最適化 ……………	18
2-3-1	レーザ装置の照射信頼性調査および、パターンニング劣化による接合性 推移の研究 ……………	18
2-3-2	CFRTP の接合に適した金属材料へのレーザ処理パターンニングの確立……………	19
最終章	全体総括 ……………	20

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

CFRP は多くの分野で利用が拡大している。この CFRP と金属を一体化する場合、それぞれの材料の特徴を活かした技術が必要とされており、接着剤や締結によらない強固な一体化技術が求められているが、現状では様々な問題をかかえ大きな課題となっている。

そこで、本研究ではレーザーによる異種材料一体化技術を活用し、金属表面にレーザーによる微細アンカー構造を生成し、接着剤を使用しない CFRP と金属の強固な直接接合を実現する。

1-1-1 研究概要

1-1-1(1) 川下製造業者等の共通の課題およびニーズ

- ア. 高強度化
- イ. 軽量化
- ウ. 難接合素材の部材接合

自動車構造部品や環境機器関連等においては、接合部の高強度化、信頼性の向上や軽量化、接合位置精度の向上等が求められており、接合部の機能の高付加価値化（気密性向上・放熱性向上など）、信頼性の付与に答える研究課題が挙げられている。さらに、近年は技術革新に伴い、新素材を利用した最終製品も数多く生み出されてきており、接合技術もこうした変化への対応が求められている。一方、コスト競争も厳しくなっており、接合における生産性の向上は勿論のこと、製品の製造、修理、再利用、廃棄までを考えたライフサイクルコストやこれらの課程でのエネルギー使用の最小化も課題となっている。

ア. 高強度化

CFRP は、金属に代わる軽量化材料として、自動車をはじめとする様々な産業分野での利用が期待されている。しかし、現在、航空機などに利用されている CFRP は熱によって固くなる熱硬化性樹脂を使用しているため、高価な設備が必要で、しかも成形時間がかかることから、安価で量産向きの部品製造への適用が困難といわれている。近年、

加熱すると軟らかく、常温では固くなる性質をもつ熱可塑性樹脂を炭素繊維織物に含浸させた板材（熱可塑性 CFRP プリプレグ）の製造技術が確立され、製品の加工方法の簡便化、製造コストの低減が提案されている。この、プリプレグと金属の接合ではプリプレグ内のバインダ樹脂を接合に使用する物、また接着剤を使用し接合するものがあるが、いずれもバインダや接着剤の強度に依存しており、プリプレグの持つ本来の強度を接合界面で如何に発揮した形で接合するか課題となっている。

イ. 軽量化

自動車構造材は、これまでの鉄鋼主体から、アルミニウムやマグネシウム、複合材等の軽量化素材の比率を増加させ多様化に向かうとみられる。ただし現状では鉄鋼が圧倒的に主流で、アルミニウムが拡大を狙い、マグネシウムと CFRP が実用化を目指して開発中、という段階にある。今後、各材料において高性能化やコスト低減等の開発が進められるとともに、これら材料の組み合わせによる最適化を図る必要がある。異種材料を接合する技術の必要性は既にうたわれているが、同じ素材で特性の異なるものを複層化することや、異種材料を複合化することによりおのおのの長所を兼ね備えさせることも検討されている。単一材料の進化だけでなく、異種材併用を前提とした開発へと動き始めている。そのような新たな複合素材の開発には、強固で安定した接合技術が求められている。

ウ. 難接合素材の部材接合

複雑な形状をした自動車部品に CFRP を適用するためには、CFRP 同士の接着や金属材料などの部品との接合技術の開発が必要である。現在、航空機等で使用されている製法で製造した CFRP は、ボルトやリベット等の機械的接合や接着剤を用いた接着接合により接合されている。

金属材料と CFRP の接着に関しては、金属材料同士を接着した場合と比較して、せん断破断力及び引っ張り破断力が低下する傾向にあった。金属材料と CFRP の強固な接着は、航空機や船舶等の様々な分野で待望されている。しかしながら、金属材料と CFRP を 1 液性エポキシ接着剤で接着した場合に、金属材料同士の接着と同等の接着力を安定的に得ることができないことが課題となっている。

また、金属材料同士の接着力と比較して CFRP と金属合金の接着力が劣る要因とし

て、CFRP と金属合金の複合体が破断する要因は接着界面及び、CFRP 中の炭素繊維とバインダとなる樹脂間の接着力にあることが調査されている。材料強度の強いチタン合金と CFRP の異種材料接合においては、特に接合強度の強い、接合力のバラツキを抑えた接合技術が望まれている。

1-1-1(2) 研究開発の背景（これまでの取り組みなど）

近年、このような課題解決のため、多様な金属と CFRP の一体化接合技術が提案されてきている。異種材料の一体化技術としては、ボルト・ナットなどによる締結方法以外に、主に以下に大別される。

- ① 金属表面に、薬品等により物理的に腐食させ細かい穴を生成し、またはプラズマ処理などで金属表面を清浄化処理し、その処理面に接着剤を塗布し、そこに CFRP を加熱・加圧そして固化させることにより接合させる。
- ② 金属と CFRP を重ね合わせ、金属の裏面からレーザー光を照射し、金属と CFRP の接合界面を発熱させ、加圧することにより接合させる。

これらの製法の場合、接合工程数が多岐にわたりその製造管理を含めコスト的に課題があったり、接合原理がまだ十分に解明されていないため、接合強度信頼性の観点から、まだ十分な対応ができていない。

このように、接合処理の信頼性・コスト等の問題、多様な金属種に対応できない等から、幅広い普及には至っておらず、信頼性の高い高強度で低価格の「異種材料接合技術」が望まれていた。

1-1-2 実施内容

本研究開発では、独自の異種材料の一体化技術を用いた下記 a～c の研究開発項目の実現により、「高強度」「軽量化」「難接合素材の部材接合」も同時に満たす、車載用構造部品・航空機用部品・風力発電用ブレードなどの環境機器部品を開発する。

（本研究にて検討した CFRP は、全て“熱可塑性 CFRP” (= CFRTTP) で、以下 CFRTTP と表記を行う）

研究項目及び目標値について、以下に示す。

- a. CFRTP と金属材料の強固な直接接合（接着剤等を使用しない）技術の開発

目標値：CFRTP の母材破壊レベルの接合を達成することを目標とする。

CFRTP と金属材料を接着剤を介さずに強固に接合した車載用構造物をイメージした直接接合具現化モデルを製作する。

- b. CFRTP と金属材料の接合界面における、高度な気密性確保に関する研究

目標値：気密性のレベルにおいて、 $1.0E-06 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ レベルの高度な気密性を満足する接合の実現を目標とする

- c. 金属材料に生成するレーザーパターニング処理の最適化

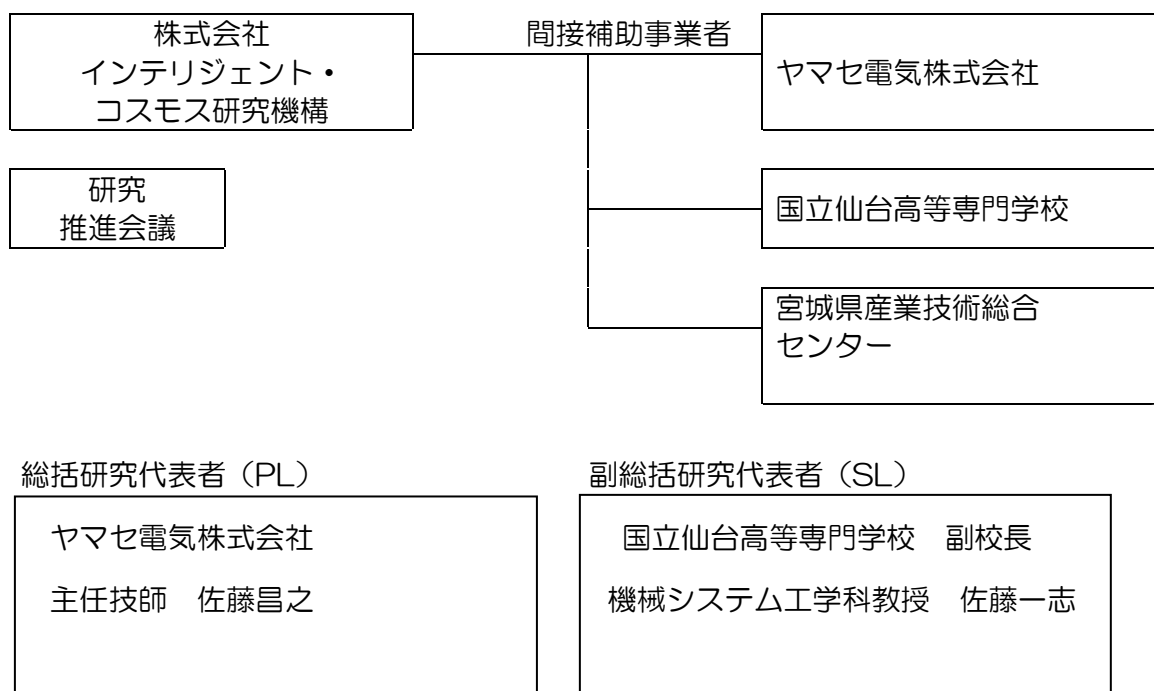
目標値：実績のある一般樹脂材料と金属材料の異種材料接合同等の処理時間での接合を達成する。具体的には、アルミの場合処理面積 1cm^2 のレーザー処理時間を 10sec 以下とする。

本研究開発の最大の特徴は、レーザー処理による複雑なアンカー形状を生成させた金属材料に、熔融状態の異種材料を充填・固化させて接合させるところにある。これは、他の異種材料の一体化技術のように、ナノメートルレベルの表層部分のみの処理ではなく、処理素材の奥まで入り込んだアンカー構造により、より強固により安定した(表層部の影響を受けにくい)接合を実現するための技術である。また、このアンカー構造は、他の機械加工で、例えばフライス盤による超微細加工やプレス加工などでは成し得ない独自の接合に適した重畳的な処理面を短時間に生成できる技術で、射出成形機を使用した一体化製法においては、接合する樹脂の母材強固な接合を実現している。

今回、CFRP プリプレグは熱可塑性の樹脂バイндаを使用したもの選定し、金属との接合の際は、接合界面を如何に高速で安定した方法で加熱し、金属面にレーザー処理で生成したアンカー構造内に CFRP の樹脂バイнда成分を充填させることにより、高強度な直接接合の実現を狙っている。

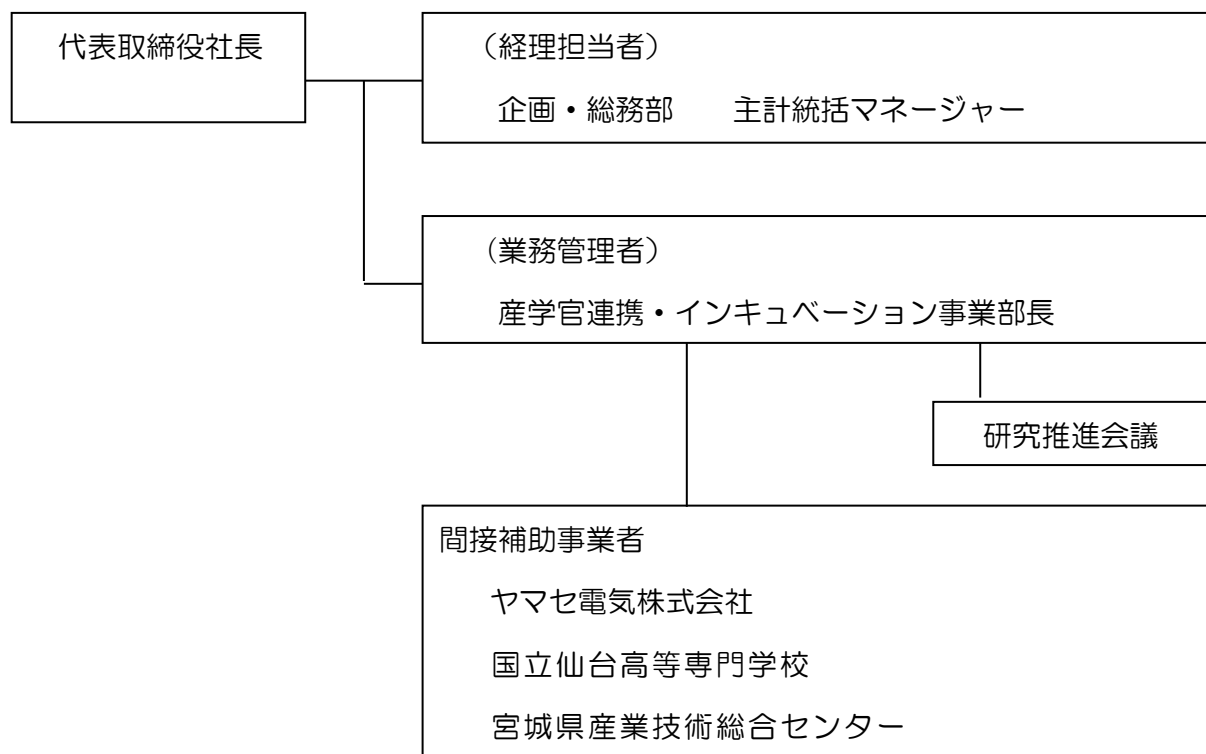
1-2 研究体制

1-2-1 研究体制



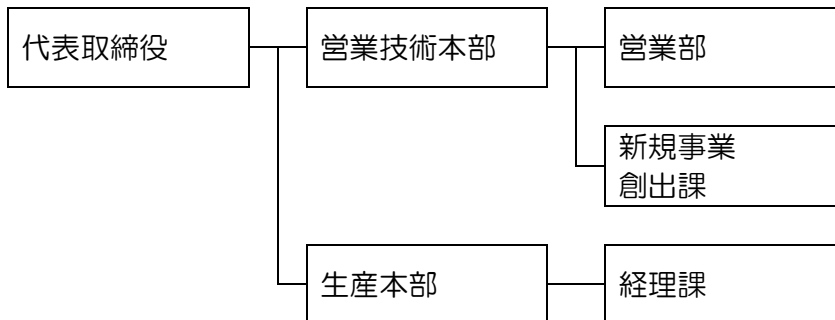
1-2-2 管理体制

① 事業管理者 [株式会社インテリジェント・コスモス研究機構]



②（再委託先）

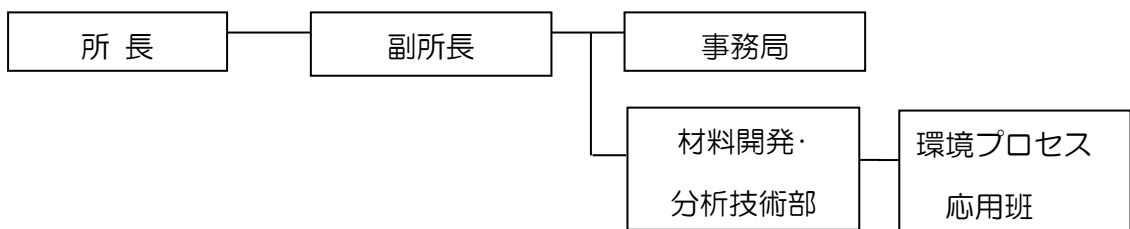
ヤマセ電気株式会社



国立仙台高等専門学校



宮城県産業技術総合センター



1-2-3 研究者等氏名

ヤマセ電気株式会社

氏名	所属・役職	
浅井 晃	営業技術本部新規事業創出課	主任技師
佐藤 昌之	営業技術本部新規事業創出課	主任技師

国立仙台高等専門学校

氏名	役職・所属	
佐藤 一志	副校長 機械システム工学科	教授

宮城県産業技術総合センター

氏名	役職・所属	
佐藤 勲征	材料開発・分析技術部環境プロセス応用班	上席主任研究員
四戸 大希	材料開発・分析技術部環境プロセス応用班	研究員
遠藤 崇正	材料開発・分析技術部環境プロセス応用班	技師

1-2-4 他からの指導・協力者及び指導・協力事項

研究推進会議 委員

氏名	役職・所属	
菱沼 厚 浅井 晃	ヤマセ電気株式会社 代表取締役社長 ヤマセ電気株式会社 営業技術本部 新規事業創出課 主任技師	PL
佐藤 昌之	ヤマセ電気株式会社 営業技術本部 新規事業創出課 主任技師	
佐藤 一志	国立仙台高等専門学校 副校長 機械システム工学科 教授	SL
大田 靖 今野 政憲 佐藤 勲征 四戸 大希 遠藤 崇正	宮城県産業技術総合センター 材料開発・分析技術部 部長 宮城県産業技術総合センター 材料開発・分析技術部 総括研究員 宮城県産業技術総合センター 材料開発・分析技術部 環境プロセス応用班 上席主任研究員 宮城県産業技術総合センター 材料開発・分析技術部 環境プロセス応用班 研究員 宮城県産業技術総合センター 材料開発・分析技術部 環境プロセス応用班 技師	オブザーバ オブザーバ
矢口 仁 猪股 則夫 齋藤昭一郎 池田 由美	株式会社インテリジェント・コスモス研究機構 産学官連携インキュベーション事業部 事業部長 同上 統括マネージャー 同上 プロジェクト・マネージャー 同上 事務局	
八島 晃宏 竹田 智	八千代工業株式会社 埼玉研究所 技術主幹 宇宙航空研究開発機構（JAXA） 航空技術部門 研究員	アドバイザー アドバイザー

アドバイザー

アドバイザー 氏名	主な指導・協力事項
八島 晃宏	自動車用途についての展開のアドバイス、開発動向についてのアドバイスを 行う
竹田 智	航空機用途についての展開のアドバイス、開発動向についてのアドバイスを 行う

1-3 成果概要

1-3-1 CFRTP と金属材料の強固な直接接合（接着剤等を使用しない）技術の開発

本研究では、CFRTP と金属を接合する際に、加熱プレス方式・高周波誘導加熱方式・超音波溶着の直接接合方式を比較検討し、それぞれの接合方式にて接合試験片を製作し評価を行った。

接合に関しては、レーザー処理を行った金属に CFRTP の成分を隙間無く充填する方法を確立し、強度試験の際に CFRTP の母材破壊レベルでの接合性を得ることができた。

本研究では、CFRTP と金属の直接接合技術を展開した、車載構造用部品をイメージした直接接合モデルを製作することができた。金属材料としては、軽量で高強度なアルミニウム合金、及び航空機や宇宙関連の展開も意識しチタン合金を使用して接合モデルを製作した。

1-3-2 CFRTP と金属材料の接合界面における、高度な気密性確保に関する研究

本研究では CFRTP と金属材料接合面に発生している応力の可視化及び数値化を進めた。レーザー処理の相似モデルを使用した光弾性法による観察を行い、接合界面に発生している応力分布状態を可視化することができた。また、有限要素法により接合界面に発生する応力シミュレーションを行い、発生応力の観察結果と比較を行ったところ、同様な応力分布形態が確認された。さらに、本研究では、応力の測定実験など界面残留応力の測定実験を行い、実験結果を基に接合界面に働いている残留応力について予測を行った。その結果、接合の際に選定した樹脂(ポリカーボネート)には、10MPa 程度の引張応力が作用しているものと推定された。

CFRTP と金属の接合界面での気密性については、CFRTP と金属の直接接合試験片を製作し、ヘリウムリークテスト装置を使用し熱衝撃試験前後の気密性評価を行い、どの程度の耐久性が得られるかを調査した。その結果、CFRTP の積層状態や接合部の構成の影響が大きいものの、 -40°C ~ 120°C の温度設定状態で、1000 回の繰り返し試験に耐えられる接合結果を得ることができた。

1-3-3 金属材料に生成するレーザパターニング処理の最適化

レーザビーム照射と金属に生成されるアンカー構造の生成過程を詳細に観察することにより、効率の良いアンカー生成に寄与するレーザ設定条件の研究を推進した。その結果、これまで最適と考えていたレーザ処理条件に対し、処理時間を 25%削減でき、照射エネルギーも 5%ほど低減し、接合強度のバラツキが少ない方向で、同等の接合強度の得られる接合条件を見きわめることができた。

研究の結果、CFRTP と金属の直接接合に於いて、実績のある一般樹脂材料と金属材料の異種材料接合と同等の処理時間、具体的には処理面積 1cm²当たりのレーザ処理時間で 10sec 以下という目標値を達成することができた。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

研究実施機関 (機関名)	連絡先
ヤマセ電気株式会社	① 現在地 〒987-0015 宮城県遠田群美里町青生字柳原 80 ② 連絡先担当者氏名：佐藤 昌之 所属： 営業技術本部 新規事業創出課 ③ 電話番号：0229-32-5663 ④ F A X 番号:0229-31-2235 ⑤ E-mail アドレス：m-satoh@yamase-net.co.jp
国立仙台高等専門学校	① 現在地 〒981-1239 宮城県名取市愛島塩手字野田山 48 ② 連絡先担当者氏名：佐藤 一志 所属： 機械システム工学科 ③ 電話番号：022-381-0328 ④ F A X 番号:022-381-0336 ⑤ E-mail アドレス：kazushi@sendai-nct.ac.jp
宮城県産業技術総合センター	① 現在地 〒981-3206 宮城県仙台市泉区明通 2 丁目 2 番地 ② 連絡先担当者氏名：四戸 大希 所属： 材料開発・分析技術部 ③ 電話番号：022-377-8700 ④ F A X 番号:022-377-8712 ⑤ E-mail アドレス：shinohe-da949@pref.miyagi.jp

第2章 本 論

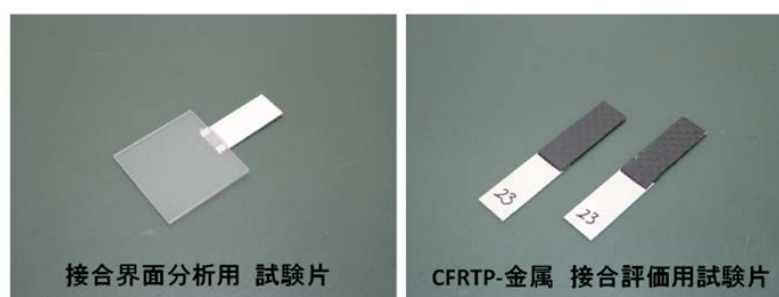
2-1 CFRTP と金属材料の強固な直接接合（接着剤等を使用しない）技術の開発

2-1-1 CFRTP と金属の直接接合設備の開発

CFRTP プリプレグとレーザー微細溝加工(アンカー構造付与)した金属とを直接接合する場合、基本的な接合方法としては、金属(及び CFRTP)を加熱し、加熱された金属と接合する CFRTP とを接触させ加圧することで、CFRTP 内のマトリクス樹脂が熔融し、金属表面のレーザー微細溝加工部に流動・充填される。その状態で冷却し樹脂成分を固化することで、アンカー効果による強固な接合が得られる。

本研究では、CFRTP と金属を接合する際に4つの直接接合方式を検討し、製作した接合試験片にて接合性検討を行った。第 2-1-1_1 図に接合性評価に使用した試験片事例を示す。

第 2-1-1_1 図 接合試験片



本研究で検討した接合方式は以下の4種類である。

- ① 加熱プレス方式（CFRTP プリプレグの成形と接合を同時に行う形態）
- ② 加熱プレス方式（CFRTP はあらかじめ成形加工済みで接合のみ行う形態）
- ③ 高周波誘導加熱方式
- ④ 超音波溶着方式

製作設備の外観は第 2-1-1_2 図のようになっている。

一番左の図は、熱ヒータを上下に内蔵した加圧プレス設備で、加熱温度・加圧力・加圧時間を調整できる構造となっている。中央の設備は加熱方法に高周波誘導加熱を利用し、金属材料のみ加熱できることから、熱ヒータ方式と比較し加熱・冷却時間を短縮できる。右の画像は、超音波溶着方式で、上部の発振子から 20kHz～40kHz の上下振動を試験片の接合界面に与え、それで発生する摩擦熱により互いを接合するものである。

第 2-1-1_2 図 製作した接合方式検討設備

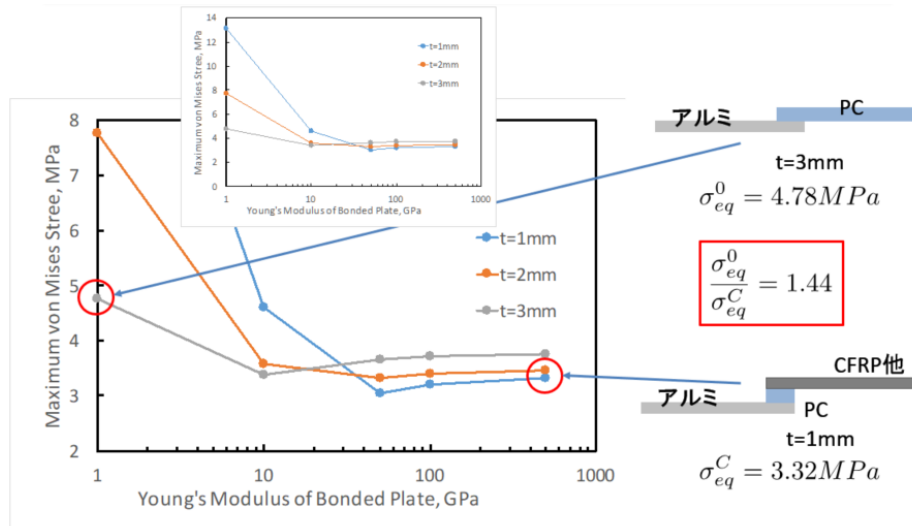


それぞれの接合方式にて接合サンプルを製作し、接合性や接合力などを検討した結果、各接合方式に特徴があることが判明した。接合方式の選定については、接合アイテムの形態や用途・生産数量などから生産に適した方式を選定していくのが望ましい。基本的には、加熱プレス方式が比較的汎用性の高い製法であるので、これをまず基準にし、他方式への展開を検討する流れとなると考えられる。

2-1-2 CFRTP 材の流動性・充填性調査、および接合強度との相関調査

レーザ処理により生成した金属と CFRTP の接合については、接合界面の層構成を最適化することにより、接着剤の接合と比較し強固な接合となり優位性を得ることができた。

CFRTP と金属の直接接合において、樹脂と金属の接合と比較しどのように接合性が向上するのかについて、有限要素法による応力解析を行った。その結果、第 2-1-2_1 図のようなグラフが得られた。このグラフは、縦軸は von Mises 応力（相当応力）横軸は、結合されたプレートのヤング率を示す。計算の結果、金属と樹脂の接合における相当応力は 4.78MPa、樹脂層のある CFRTP と金属の相当応力は 3.32MPa という数値が得られた。CFRTP のように剛性の高いプレートとの接合により、応力状態は変化していき、モーメントによる変形が拘束されることで、応力が低下するものと考えられる。相当応力が降伏応力に達すると降伏することから、樹脂層を介した CFRTP の接合構成の場合、樹脂のみの構成と比較し変形が抑えられ応力集中が緩和され、より高い接合力が得られたと思われる。



第 2-1-2_1 図 応力解析グラフ

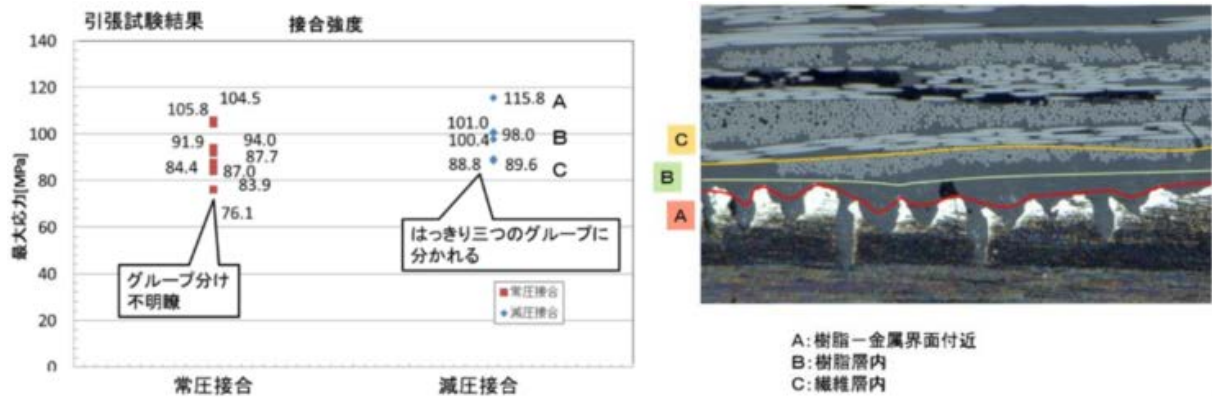
2-1-3 接合界面における、CFRTP の接合形状最適化

接合強度のバラツキについては、検証の結果次のような要因が挙げられる。

- 樹脂 : 強度、弾性率、靱性、厚さ
- 金属板 : 凹凸形状、表面状態 (官能基、汚れ等)
- CFRTP : 繊維-樹脂界面強度、織物物性

樹脂と CFRTP にまつわるこれらの要素に関連して悪影響を与える要因として、樹脂・CFRTP 層内の気泡発生が考えられる。この気泡による接合性への影響について調査を行った。CFRTP と金属を直接接合する際に、気泡の発生を低減するため減圧した環境内にて接合し、常圧での接合と接合性の差について調査を行った。使用した CFRTP は PA6 をマトリクス樹脂としたもので金属はアルミ合金である。その組合せに於いては、接合強度としては 100MPa を超える接合が得られた。

気泡発生による強度低下量としては、10%位との数値が得られた。また、気泡発生を防止しての実験を進めたことにより、さらなる結果として破壊試験の際に CFRTP と樹脂側の破壊のモードを分離でき、それと接合強度の関連を確認することができた。第 2-1-3_1 図は気泡発生低減での接合強度の変化、及び破壊モードの分類を示す。



第 2-1-3_1 図 気泡発生低減による効果及び破壊モード

破壊モードとしては、3 つのグループに分類することができ、接合強度としては、A: 樹脂-金属界面付近での破壊モードが最も強固であることがわかった。

2-1-4 CFRTP と金属材料の 直接接合モデルの製作

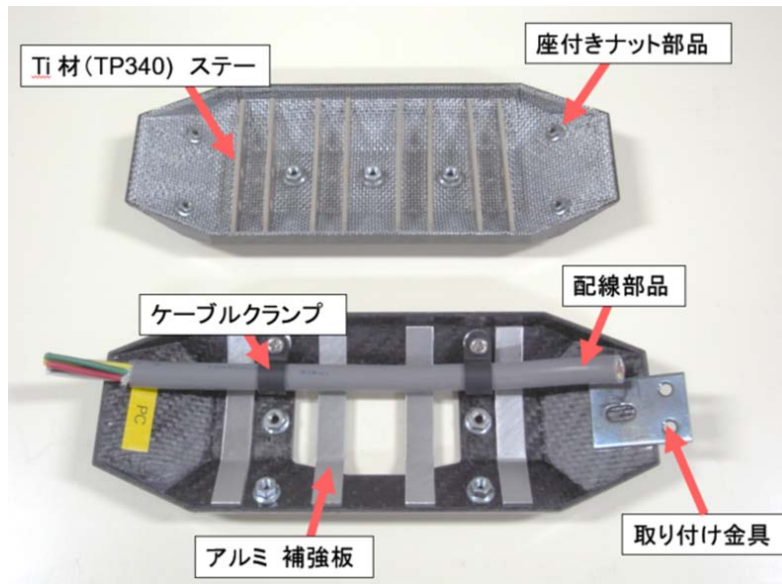
CFRTP と金属の直接接合技術を展開した、車載構造用部品をイメージした直接接合モデルを製作した。金属材料は、軽量で高強度なアルミニウム合金を採用した。アルミニウム素材を選定した理由としては、車載用構造材料やの構造物として鉄系材料からより軽量の素材が求められてきていること、そしてレーザによる異種材料接合用の金属材料として、最も処理の最適化が進んでいる材料であることが選定の理由である。

第 2-1-4_1 図に直接接合モデルの画像を示す。接合は、熱プレス方式と高周波誘導加熱方式を活用した金属部の加熱を行い、CFRTP 成形品と組み合わせて一体化を実現している。



第 2-1-4_1 図 直接接合モデル ①

また、航空機や宇宙関連の展開も意識しチタン合金を使用して接合モデルを製作した。接合形態については、本異種材料接合技術について展示会やセミナー等で展示し情報発信を行ったところ、さまざまな要望情報が得られたため、その内容を反映させたものとした。製作した接合モデルの一例を、第 2-1-4_2 図に示す。

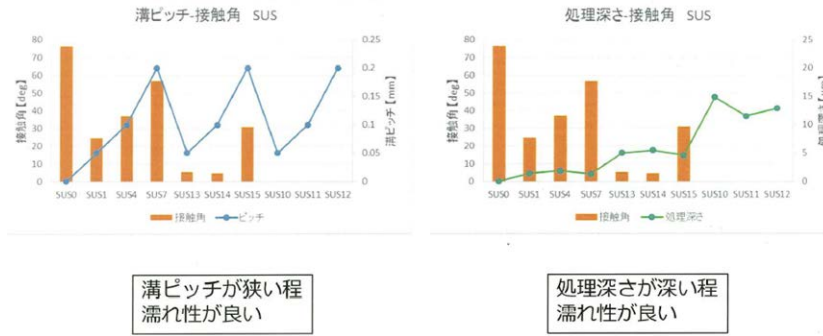


第 2-1-4_2 図 直接接合モデル②

2-2 CFRTP と金属材料の接合界面における、高度な気密性確保に関する研究

2-2-1 レーザ処理接合界面の濡れ性調査

一般的に材料同士を接着する場合、材料の濡れ性が大きいほど密着性が向上すると言われている。金属にレーザー照射を行うと、表面の有機物等の不純物を除去し清浄化が図られる。CFRTP と金属の直接接合に於いても、金属表面の濡れ性が大きい方が互いの密着性が向上することが期待される。そこで、レーザー処理前、処理後の金属表面の濡れ性について調査を行った。その結果第 2-2-1_1 図に示すように、レーザー処理パターンニングにおいて、起伏のピッチが細かいほど、また起伏の状態が大きいほど濡れ性が向上し、レーザー処理パターンニングにおける金属表面の濡れ性の向上、及び濡れ性の推移について明確にすることができた。

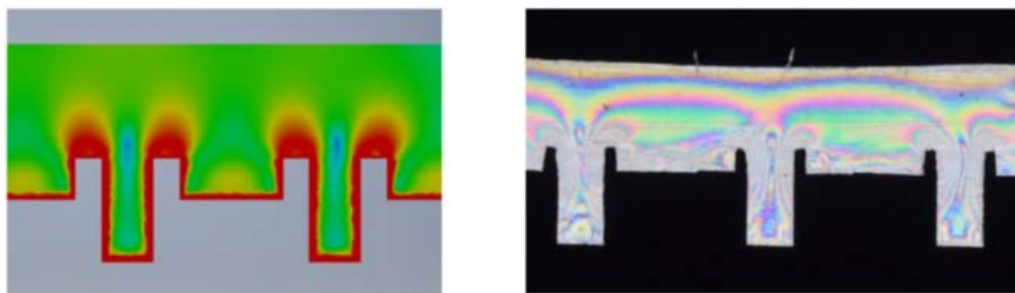


第 2-2-1_1 図 レーザパターニングと濡れ性の推移

2-2-2 CF RTP と金属材料接合面に発生している応力の可視化及び数値化

CF RTP と金属材料を接合させた場合、CF RTP 内のマトリクス樹脂の加熱及び接合後の熱収縮で、レーザによる接合化処理面には何らかの界面応力が残留し、つねに金属と樹脂の接触面を接触し続ける界面応力が働いていると考えられる。この応力により、お互いの面が接触し続け、結果として異種材料間にシール効果が働き、気密性が発生していると予測される。この現象を可視化し、発生応力の数値化を試みた。

応力の可視化については、金属へのレーザ処理部近傍の応力状態を、光弾性法を用いて可視化した。レーザ処理の相似金属モデルを用意し、加熱しながら透明樹脂板を加圧し、樹脂と金属の接合サンプルを製作する。このサンプルの切断面を観察することで、界面に発生している応力分布状態を可視化することができた。また、有限要素法により接合界面に発生する応力シミュレーションを行い、発生応力の観察結果と比較を行ったところ、同様な応力分布形態が確認された。第 2-2-2_1 図にその観察比較事例を示す。



第 1-3-2(2) 図 接合界面付近の応力分布状態

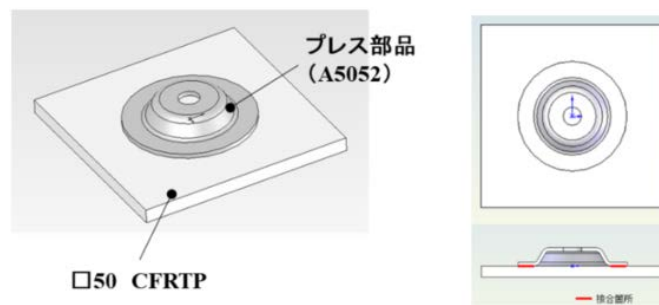
図の左側が有限要素法 (von Mises 応力) での解析結果、左側がレーザ処理の相似モデルを使用した光弾性法による観察状態である。並べてみるとまったく同じような応力分布形態が確認できた。この結果から共通して言えることをまとめてみる。

- ① レーザ加工溝部を掴むような応力が作用している。

- ② バリがあると、各々のバリを掴むような応力が作用する。
- ③ バリの頂点付近の応力が高い

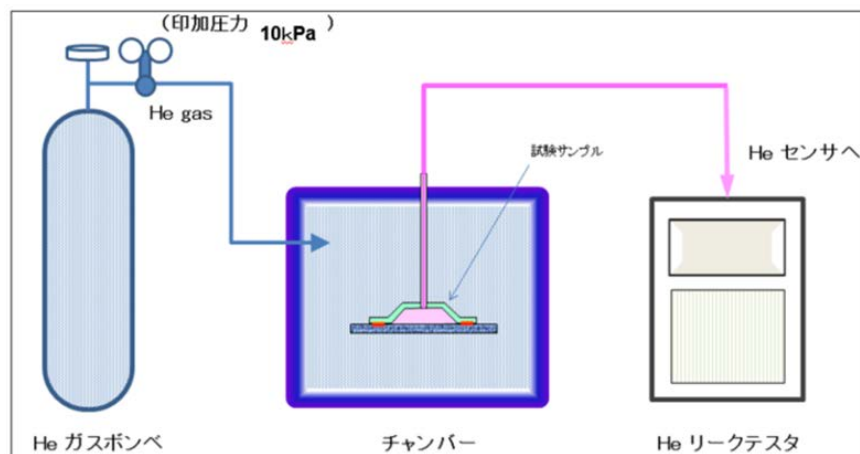
また本研究では、ひずみゲージ法による界面応力の数値化及び、応力発生箇所に薬液を塗布すると割れが発生しやすくなる現象を利用した環境助長割れによる応力の測定実験など界面残留応力の測定実験を行い、実験結果を基に接合界面に働いている残留応力について予測を行った。その結果、接合の際に選定した樹脂(ポリカーボネート)には、10MPa 程度の引張応力が作用しているものと推定された。

2-2-3 接合界面に発生している応力と、その気密性の関連調査



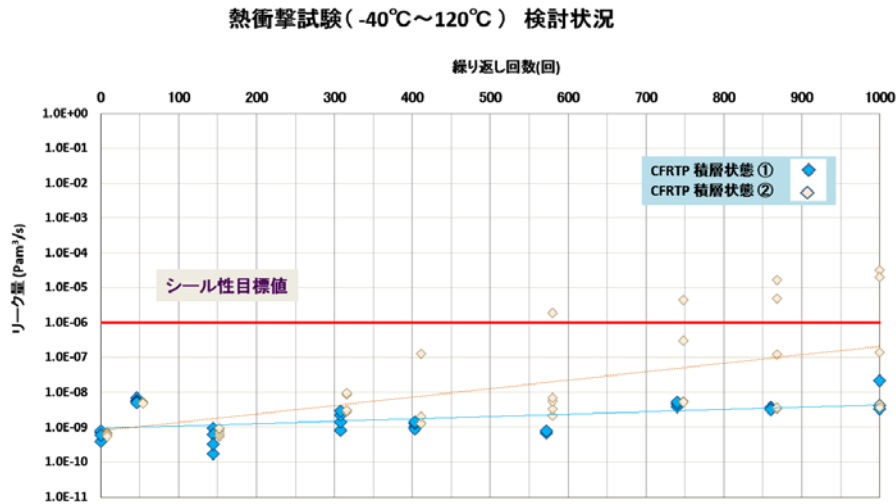
第 2-2-3_1 図 気密性評価試験片形状

第 2-2-3_1 図に示すような CFRTP と金属の直接接合試験片を製作し、ヘリウムリークテスト装置を使用し熱衝撃試験前後の気密性評価を行い、どの程度の耐久性が得られるかを調査した。ヘリウムリークテストは第 2-2-3_2 図に示すような構成で、試験片を He ガスの充満しているチャンバーの中に入れ、接合界面から漏れ量をヘリウムリークテスト装置で検知するような方式となっている。良否判断の基準としては、車載向けセンサ等で要求される $1.0E-06 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ を越えた場合「NG」とした。



第 2-2-3_2 図 ヘリウムリークテスト構成

金属部品は A5052 で、CFRTP 材は PC をマトリクス樹脂としたものを選定した。結果としては、CFRTP の積層状態や接合部の構成の影響が大きいものの、 -40°C ～ 120°C の温度設定状態で、1000 回の繰り返し試験に耐えられる接合結果を得ることができた。第 2-2-3_3 図参照



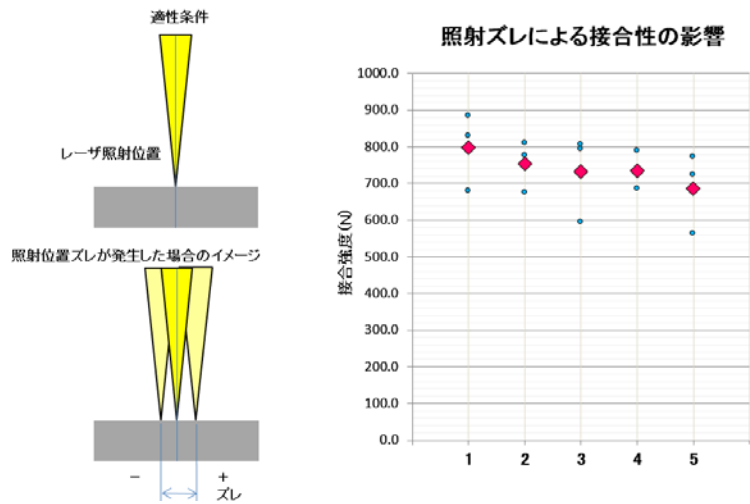
第 2-2-3_3 図 気密性評価試験状況 (1000 回)

2-3 金属材料に生成するレーザーパターニング処理の最適化

2-3-1 レーザ装置の照射信頼性調査および、パターニング劣化による接合性推移の研究

レーザー装置の制御系劣化を想定した加工動作を設定し、適切な処理面からかけ離れていくパターンを推定し、接合サンプルによる処理面の状況とその接合性についての研究を行い、接合性の推移を調査した。パターニングの劣化想定としては 5 水準の形状を設定した。この金属各処理面へ CFRTP を加熱接合し、接合強度の推移を調査した。

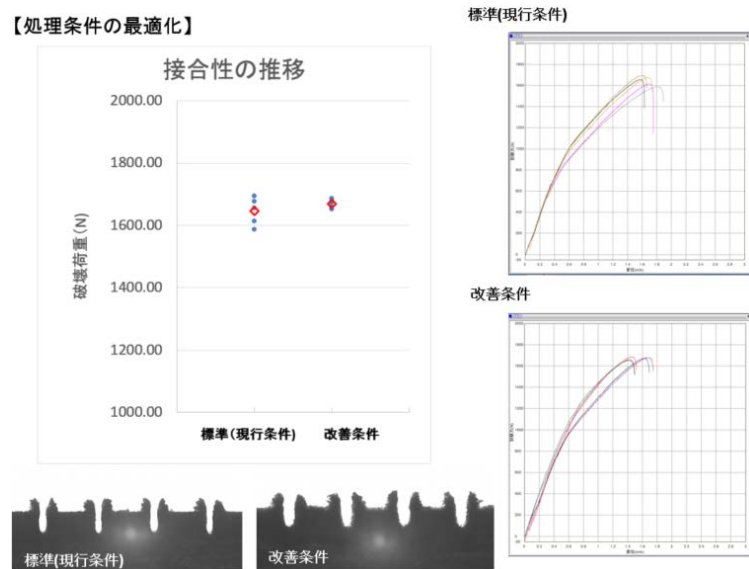
CFRTP と金属の直接接合において、照射ズレ量が大きくなるに従い、アンカー構造が崩れ接合強度がゆるやかに低下していく様子が確認できた。第 2-3-1_1 図に示すように、正規状態と比較すると最大で 15% 程度の強度低下が認められる。この結果は、設備の管理ポイントの目安として活用する予定である。



第 2-3-1_1 図 レーザパターニング劣化とその接合強度事例

2-3-2 CFRTP の接合に適した金属材料へのレーザ処理パターニングの確立

レーザビーム照射と金属に生成されるアンカー構造の生成過程を詳細に観察することにより、効率の良いアンカー生成に寄与するレーザ設定条件の研究を推進した。その結果、これまで最適と考えていたレーザ処理条件に対し、処理時間を 25%削減でき、照射エネルギーも 5%ほど低減し、さらに第 1-3-3(2)_1 図に示すように接合強度のバラツキが少ない方向で、同等の接合強度の得られる接合条件を見きわめることができた。



第 2-3-2_1 図 レーザパターニング検討事例

研究の結果、CFRTP と金属の直接接合に於いて、実績のある一般樹脂材料と金属材料の異種材料接合と同等の処理時間、具体的には処理面積 1cm^2 当たりのレーザ処理時間で 10sec 以下という目標値を達成することができた。

最終章 全体総括

29年度の戦略的基盤技術高度化支援事業として、今年度は昨年までの研究成果を盛り込んだ技術展開を行った結果、車載用構造部品をイメージした直接接合具現化モデルを成果物として完成させることができた。

今回、各研究機関との連携の元に、接合技術の高度化・接合メカニズムの解明という点で、さらなる技術蓄積が図られた。また導入した設備を使用し、量産化を意識した目標値に対して、実施計画通りの成果を得ることが出来た。

以下に本研究成果の総括を行う。

(1) CFRTP と金属の強固な直接接合

- CFRTP と金属の直接接合設備を製作できた。
- CFRTP(PA6)とアルミ合金の接合では 100MPa 以上の接合強度を達成。
- 車載部品等をイメージした直接接合具現化モデルを製作した。

(2) 接合面に発生している応力の可視化及び数値化

- 実験及び有限要素法解析により、接合界面の応力分布を可視化できた。また、接合界面に発生する応力を推定できた。
- CFRTP と金属の直接接合において $1.0E-06\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ の気密性を得ることができた。

(3) 金属材料に生成するレーザパ処理の最適化

- 接合強度のバラツキを低減した形で、処理時間の短縮化を実現できた。

レーザによる金属-樹脂接合技術の引き合いは、自動車・車載部品メーカーを含め、多様な分野から入っており、年々増加傾向にある。そのようなルートを活用し、CFRTP と金属の接合サンプルを営業活動の中で提示し、具体的な展開用途の情報収集や顧客側との検討を進め、顧客側の CFRP 関連技術に共同開発として入り込めるような動きを取っていく。

本技術は要素技術であるので、車載部品メーカー以外のさまざまな分野にも、本技術の採用に結びつくよう提案を進めていく。