

平成24年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「連続炭素繊維を骨格とした長繊維入熱可塑性 CFRP 射出成形技術開発」

研究開発成果等報告書

平成25年 3月

委託者 関東経済産業局

委託先 国立大学法人静岡大学

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
1-2 研究体制	1
(1) 研究組織（全体）	1
(2) 管理体制	2
(3) 管理員及び研究員	3
(4) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名	4
(5) 他からの指導・協力者	4
1-3 成果概要	5
(1) （サブテーマ①）連続炭素繊維の骨格を包み込むように長繊維入り樹脂を射出する成形方法の開発	5
(2) （サブテーマ②）熱可塑性CFRPプリフォームの賦形方法の開発	5
(3) （サブテーマ③）プランジャー式ノズルと長繊維入り樹脂供給装置の開発	5
(4) （サブテーマ④）駆動系部品の筐体の材質をアルミニウム合金から熱可塑性CFRPに代替する技術の開発	5
(5) （サブテーマ⑤）プロジェクトの管理・運営（国立大学法人静岡大学）	5
1-4 当該研究開発の連絡窓口	6
(1) 事業管理機関	6
(2) 総括研究代表者	6
(3) 副総括研究代表者	6
第2章 本論	7
2-1 （サブテーマ①）連続炭素繊維の骨格を包み込むように長繊維入り樹脂を射出する成形方法の開発	7
(1) 試験片を使った実験	7
(2) FFトランスファーのフロントカバーを使った実験	8
(3) FFトランスファーのサイドカバーを使った実験	9
(4) 成形品の再生（リサイクル）	10
(5) 成形品の寸法精度に関する研究	10
2-2 （サブテーマ②）熱可塑性CFRPプリフォームの賦形方法の開発	11
(1) 通電抵抗加熱方式の金型の開発	11
(2) 骨格の設計	12
(3) 骨格を成形するホットスタンピング金型の開発	12
(4) 連続繊維のホットスタンピング成形	12
(5) ホットスタンピング成形品の強度評価	13

(6) 連続繊維の成形シミュレーション	14
(7) サイドカバーの骨格部分のホットスタンピング成形	14
2-3 (サブテーマ③) プランジヤー式ノズルと長繊維入り樹脂供給装置の開発	16
(1) 長繊維の射出成形に適した成形機の開発	16
(2) 強化繊維の長さ	16
(3) 繊維の分散性	17
2-4 (サブテーマ④) 駆動系部品の筐体の材質をアルミニウム合金から熱可塑性CFRPに代替する技術の開発	17
(1) 軽量化したい部品	17
(2) FFトランスファーのケースに求められる性能	18
(3) 動力試験の方法	19
(4) 試験結果と改良	19
(5) まとめ	20
最終章 全体総括	21
3-1 研究開発成果	21
(1) (サブテーマ①) 連続炭素繊維の骨格を包み込むように長繊維入り樹脂を射出する成形方法の開発	21
(2) (サブテーマ②) 熱可塑性CFRPプリフォームの賦形方法の開発	21
(3) (サブテーマ③) プランジヤー式ノズルと長繊維入り樹脂供給装置の開発	21
(4) (サブテーマ④) 駆動系部品の筐体の材質をアルミニウム合金から熱可塑性CFRPに代替する技術の開発	22
3-2 研究開発後の課題・事業化展開	22

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

【研究背景】

自動車産業では環境対応のため、車体の軽量化が急務となっている。プラスチックは軽量化のために多くの部材に使われているが、強度や剛性が重要な部品には適用できていない。乗用車のアルミニウム使用率は重量で8%程度であり、その8割が鋳造品である。アルミニウム鋳造品を熱可塑性CFRPで代替することで車体重量を約3%低減することが可能になる。

自動車部品メーカーは自動車メーカーから厳しくコストダウンを要求されており、従来より軽量な部品を低価格で製造する技術が必要になっている。ダイカスト鋳造は後工程が多く、熱硬化性CFRPは成形時間が長く大量生産ができない。そのため、熱可塑性CFRPの量産技術の確立が求められている。

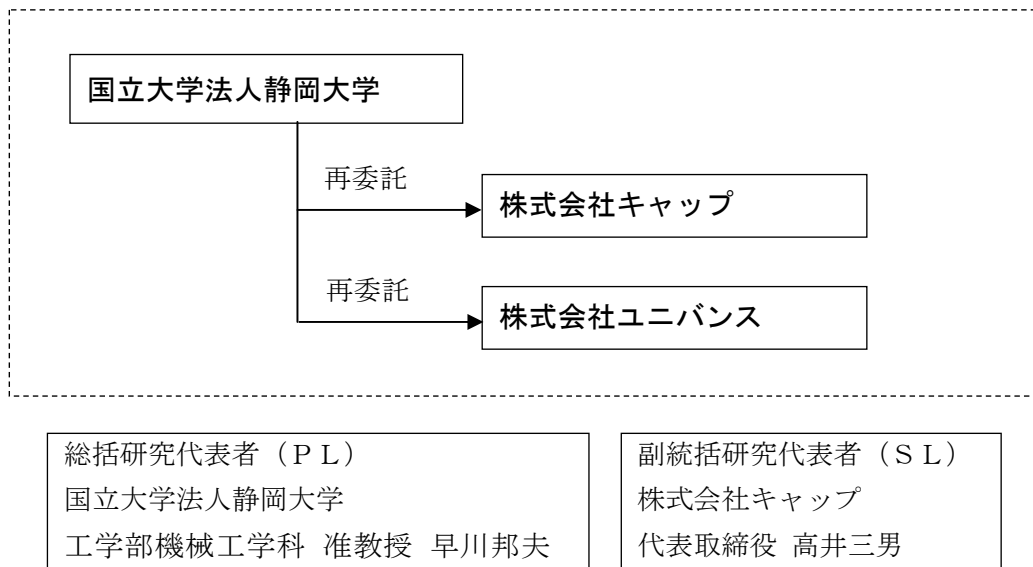
【研究目的及び目標】

従来、アルミニウムが使われていた駆動系部品の管体を熱可塑性CFRPで代替する成形技術を開発して、軽量化を実現する。さらに、電磁誘導を用いた金型温度調整技術を開発することで薄肉化を実現し、部品の重量を4割削減する。

後工程が多いダイカスト鋳造を、高精度な成形が可能のため後工程がほとんど必要ないプラスチック射出成形に置き換えることで製造コストを低減する。さらに、現在は高コストな炭素繊維入りプラスチック材料だが、複合材料を混練しながら成形を行うインライン混練機を開発することで複合材料のコストを1/3に引き下げる。

1-2 研究体制

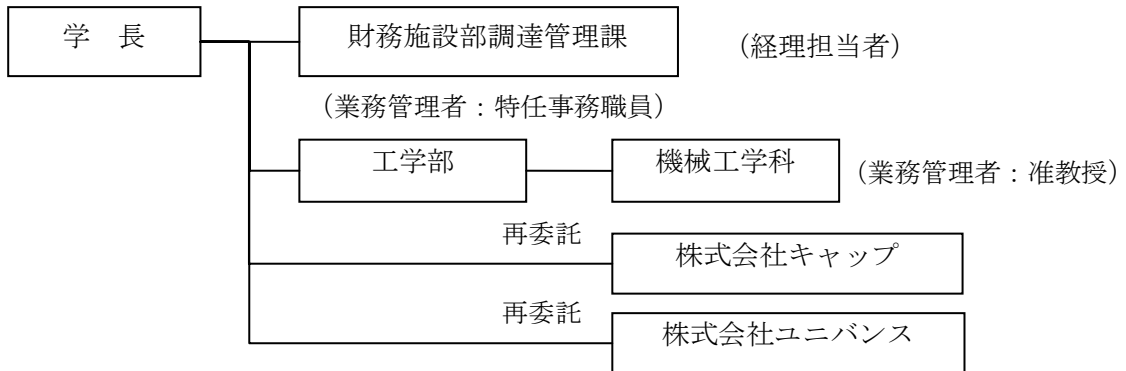
(1) 研究組織(全体)



(2)管理体制

①事業管理機関

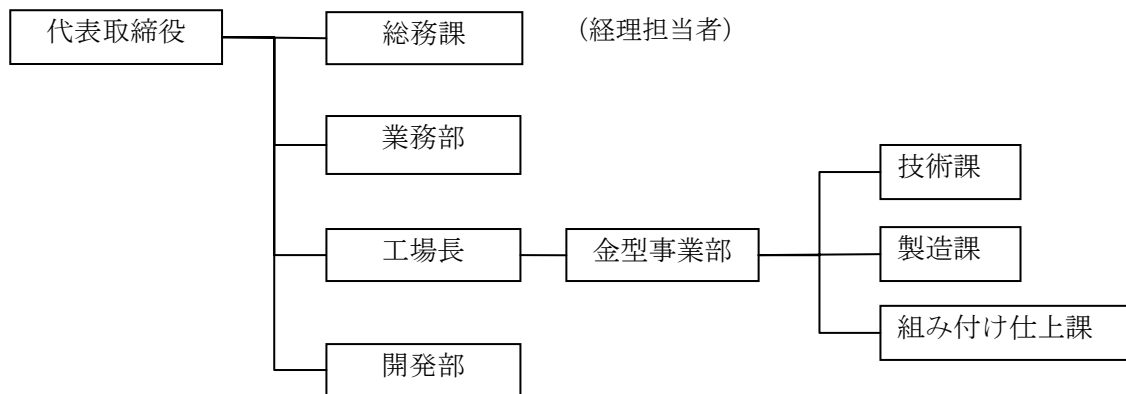
[国立大学法人静岡大学]



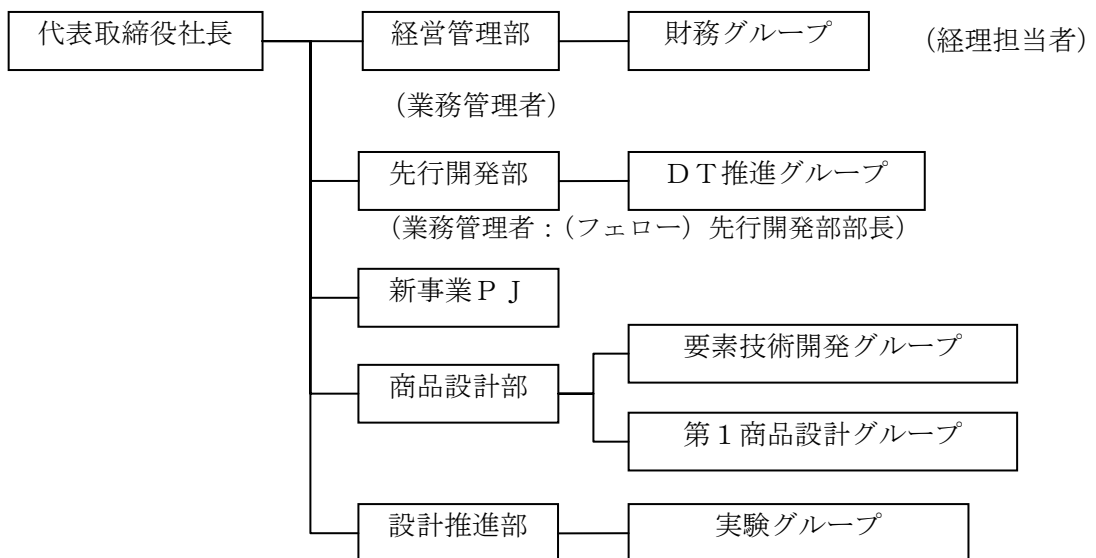
② 再委託先

[株式会社キャップ]

(業務管理者: 代表取締役)



[株式会社ユニバンス]



(3) 管理員及び研究員

【事業管理機関】 国立大学法人静岡大学

① 管理員

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
早川 邦夫	工学部機械工学科 准教授	⑤
牧澤 久光	工学部特任事務職員	⑤

② 研究員

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
早川 邦夫（再掲）	工学部機械工学科 准教授	①、②
矢代 茂樹	工学部機械工学科 准教授	①、②
中村 保	工学部機械工学科 特任教授	①、②

【再委託先】

（研究員）

株式会社キャップ

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
寺田 竹一	業務部長	①、②、③、④
神谷 清	業務部	①、②、③、④
吉田 透	開発部長	①、②、③、④
水谷 暢孝	工場長	①、②、③、④
鈴木 祐	金型事業部技術課	①、②、③、④
一木 洋憲	金型事業部技術課	①、②、③、④
高野 和也	金型事業部技術課	①、②、③、④
古畑 涼介	金型事業部製造課主任	①、②、③、④
藤川 晃一	金型事業部組み付け仕上課主任	①、②、③、④
谷口 司	金型事業部組み付け仕上課	①、②、③、④

株式会社ユニバンス

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
鈴木 正	新規事業PJリーダー	④
佐藤 徹也	先行開発部DT推進グループ主任	④
山下 晃浩	先行開発部DT推進グループ	④
鈴木 慶	商品設計部第1商品設計グループ主任	④
加藤 宣保	設計推進部実験グループ主任	④

(4) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理機関)

国立大学法人静岡大学

(経理担当者) 財務施設部調達管理課長 村松 祐
(業務管理者) 工学部機械工学科准教授 早川 邦夫
工学部特任事務職員 牧澤 久光

(再委託先)

株式会社キャップ

(経理担当者) 総務課 森下 雅子
(業務管理者) 代表取締役 高井 三男

株式会社ユニバンス

(経理担当者) 経営管理部財務グループ主担 山崎 純也
(業務管理者) (フェロー) 先行開発部部長 加藤 忠彦

(5) 他からの指導・協力者

研究開発推進委員会 委員

氏名	所属・役職	備考
早川 邦夫	国立大学法人静岡大学工学部機械工学科 准教授	P L
高井 三男	株式会社キャップ 代表取締役	S L
矢代 茂樹	国立大学法人静岡大学工学部機械工学科 准教授	
中村 保	国立大学法人静岡大学工学部機械工学科 特任教授	
鈴木 正	株式会社ユニバンス 新事業P J リーダー	
中村 穰治	株式会社ベンチャーラボ東海支社 支社長	アドバイザー
野口 敏彦	国立大学法人静岡大学工学部電気電子工学科 教授	

1-3 成果概要

(1) (サブテーマ①)連続炭素繊維の骨格を包み込むように長繊維入り樹脂を射出する成形方法の開発

(実施：株式会社キャップ、国立大学法人静岡大学)

骨格となる連続繊維の芯材を射出成形でインサートし、骨格と射出した長繊維入り樹脂とがしっかりと接合する成形方法を明らかにした。

連続繊維の骨格で補強した CFRP 製の自動車用トランスファーのケースを試作し、ダイカスト鋳造のアルミニウム合金の部品と同等の強度が得られた。

(2) (サブテーマ②)熱可塑性 CFRP プリフォームの賦形方法の開発

(実施：株式会社キャップ、国立大学法人静岡大学)

高周波電流を金型に直接通電して金型を高速に加熱する技術を開発した。高周波の電気回路の調整や、金型の形状や電極の取り付け方などを改良して、最短で3分という成形サイクルを実現した。

成形品の剛性と強度を高めるために、適切な成形材料を選択し、さらに成形条件の最適化を行うことで、炭素繊維織物に樹脂を十分に含浸させた高強度な成形品を作ることができた。約 50GPa の弾性率と約 600MPa の強度を実現した。

(3) (サブテーマ③)プランジャー式ノズルと長繊維入り樹脂供給装置の開発

(実施：株式会社キャップ)

炭素長繊維強化樹脂の成形に適した射出成形機を開発した。混練スクリーンの形状の改良や、サイドフィード方式のチョップド繊維投入機構の開発、成形条件の最適化などで、炭素繊維の能力を生かした射出成形ができるようになった。

(4) (サブテーマ④)駆動系部品の筐体の材質をアルミニウム合金から熱可塑性 CFRP に代替する技術の開発

(実施：株式会社キャップ、株式会社ユニバンス)

コンピュータシミュレーションによって自動車用トランスファーのケースを構成する材料に求められる弾性率と強度を明らかにした。

試作した部品を使って自動車用トランスファーを組み立て、動力試験を行った。実際の自動車のトランスファーに加わる最大トルクの 600N・m を大きく上回る 2200N・m の強度を実現した。

アルミダイカスト製に近い剛性と強度を実現し、重量はアルミダイカスト製の 50%と、大幅な軽量化を実現した。

(5) (サブテーマ⑤) プロジェクトの管理・運営 (国立大学法人静岡大学)

(a) 毎月 1 回、全研究開発実施機関のメンバーが研究打ち合わせを実施した。

(b) 定期的な検討会議だけでなく、川下ユーザ企業と部品製造企業同士が検討課題や問題が発生する都度相談をして課題解決にあたった。

必要に応じて外部から専門の技術情報やアドバイスを得るため、浜松地域で進んでいる CFRP 事業化研究会との連携を行った。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

(1) 事業管理機関

名称：国立大学法人静岡大学工学部
住所：〒432-8561 静岡県浜松市中区城北3丁目5番1号
連絡担当者：牧澤 久光
電話：053-478-1757、FAX：053-478-1005
E-mail：ttoyaz@ipc.shizuoka.ac.jp

(2) 総括研究代表者

名称：国立大学法人静岡大学工学部機械工学科
住所：〒432-8561 静岡県浜松市中区城北3丁目5番1号
連絡担当者：早川 邦夫
電話：053-478-1607、FAX：053-478-1043
E-mail：tmkhaya@ipc.shizuoka.ac.jp

(3) 副総括研究代表者

名称：株式会社キャップ
住所：〒437-0223 静岡県周智郡森町中川2022番地2
連絡担当者：高井 三男
電話：0538-49-1181、FAX：0538-49-0075
E-mail：takaim@cap-inc.co.jp

第2章 本論

2-1 (サブテーマ①) 連続炭素繊維の骨格を包み込むように長繊維入り樹脂を射出する成形方法の開発

繊維強化樹脂では、繊維が長いほうが強度が高い傾向がある。一方、複雑な形状を高精度に成形するには射出成形が優れているが、長い繊維を成形品中に残すことは難しく、アルミ合金と同等の強度は得られない。そこで、連続繊維の骨格を射出成形でインサート成形することで、強度がありながら、複雑な形状を高精度に成形する技術を開発した。

このような成形では、連続繊維の骨格と射出した樹脂とが強固に接合する必要がある。本事業では、ポリアミド樹脂をマトリックス樹脂に用いて、骨格の表面に接着性を改善するプライマーを塗布する方法と、155℃で熔融する熱可塑性エポキシ樹脂で骨格を作り、射出したポリアミド樹脂の熱で両者が接着させる方法の2種類で開発を行った。

(1) 試験片を使った実験

ポリアミド樹脂をマトリックス樹脂とした UD テープにポリアミド樹脂用接合プライマーを塗布して、インサート成形することで次の写真のような試験片を製作した。接合プライマーは株式会社型善がポリアミド樹脂の接合用に特別に開発したプライマーである。



図 1 連続繊維の UD テープを貼り付けたダンベル形試験片 (厚さ 3mm)



図 2 ポリアミド樹脂接合プライマー (型善 NP-221)

この試験片に対して、曲げ試験を行い、連続繊維がない場合と比較を行った。長繊維強化だけのときの曲げ強度 300Mpa に対して、厚さ 0.3mm の UD を接合した場合は曲げ強度が 600MPa と 2 倍に向上することが分かった。また弾性率も 10GPa から 20GPa に 2 倍に向上している。

また、破断面を見ると (図 5)、2 種類の材料の界面では破壊が起きないことが確認できた。

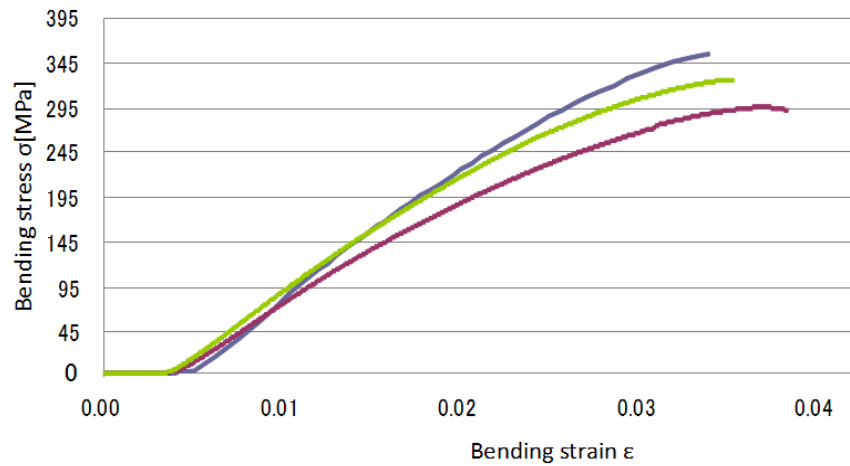


図 3 長繊維強化ポリアミド樹脂の曲げ試験結果

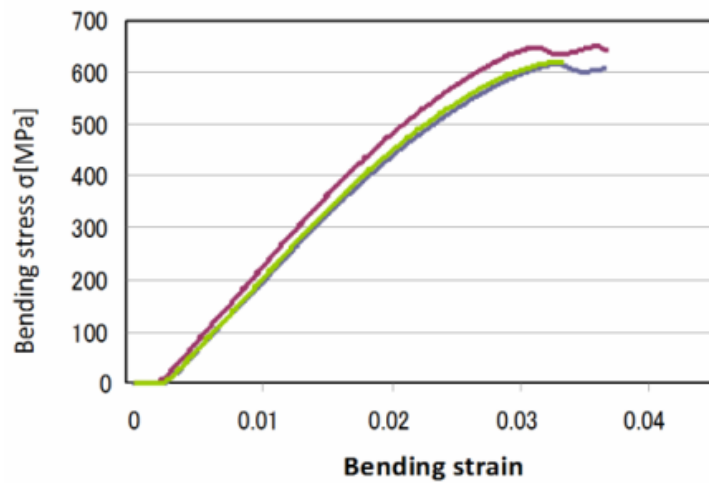


図 4 UD テープ付きの場合の曲げ試験結果

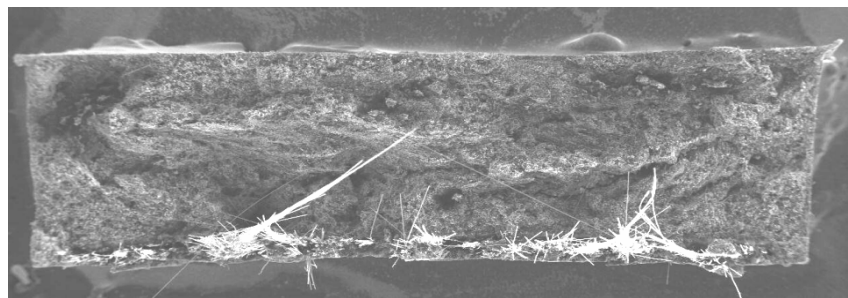


図 5 UD テープを貼り付けた試験片の破断面

(2) FF トランスファーのフロントカバーを使った実験

FF トランスファーのフロントカバーについて、骨格をインサートする成形実験を行った。しっかり接合したことが確認できた。また、骨格をインサートすることで、成形ひずみが低減し、成形品の寸法精度が向上するという効果もあった。

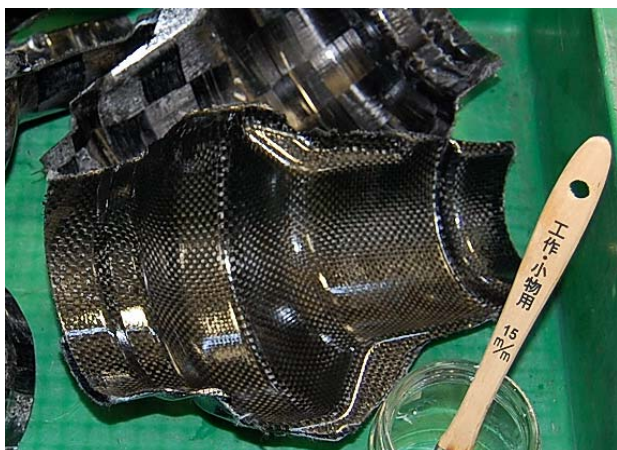


図 6 フロントカバーの骨格



図 7 連続繊維の骨格で補強した複合成形品

(3)FFトランスファーのサイドカバーを使った実験

次に、炭素繊維織布と熱可塑性エポキシ樹脂で成形した骨格を使って、FF トランスファーのサイドカバーを試作した。熱可塑性エポキシ樹脂はナガセケムテックス株式会社の開発品で、融点 155℃でホットメルト接着剤のような性質を持っている。この性質を利用することで、射出成形のポリアミド樹脂の熱で一時的に熱可塑性エポキシが熔融し、両者が接合することが分かった。



図 8 サイドカバーの骨格

この部分に芯材をはめ込んで射出成形

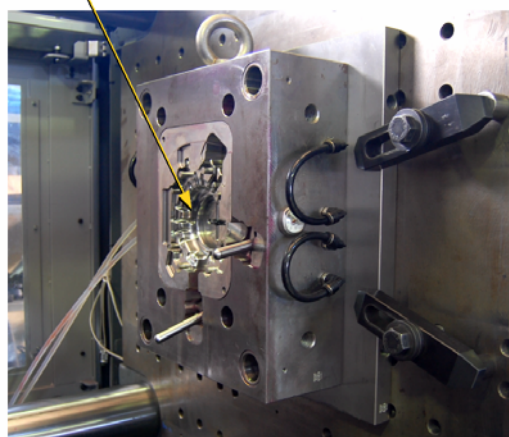


図 9 骨格を射出成形金型でインサート成形

インサート成形の結果、図 10 のような成形品を作ることができた。2-4 節で報告するように、アルミダイカスト鑄造の部品と同等の強度と剛性を得ることができた。



図 10 サイドカバーの複合成形品 (外側)



図 11 サイドカバーの複合成形品 (内側)

(4) 成形品の再生(リサイクル)

熱可塑性の繊維強化樹脂はリサイクルできることが熱硬化性の繊維強化樹脂に対する大きな優位点である。成形品から樹脂材料を再生してリサイクルができるか確認した。

一般的な樹脂のリサイクルと同じ工程でペレットに再生することができた。ただし、ペレタイザ一のカッターの摩耗が樹脂単体の場合より早く、カッターを頻繁に交換する必要があった。

再生ペレットに含まれる炭素繊維は短くなっているため、強度が不十分と考えられる。また樹脂も劣化している可能性もあり、高い強度が要求されない用途に用いたり、新しい材料に少量混ぜるといった使い方が適切である。



図 12 成形品を粉砕した状態



図 13 再生ペレット

(5) 成形品の寸法精度に関する研究

成形ひずみの傾向を探るため、成形品全体をコニカミノルタの非接触 3 次元デジタイザ RANGE7 で計測した。さらに、測定点群と CAD のモデルデータとの照合ができるアルモニクスの spGauge を使って誤差の評価を行った。



図 14 非接触 3 次元デジタイザを使った計測

この結果、射出成形した長繊維強化樹脂は、予想よりも大きな寸法の誤差を生じることが分かった。試験片の成形では、成形収縮率は 0.1%程度と非常に小さいが、厚肉で複雑な形状の場合は、0.5%程度の成形収縮率になることが分かった。0.5%でも樹脂単体のときの半分程度であり、寸法精度を確保しやすい材料であることが分かった。

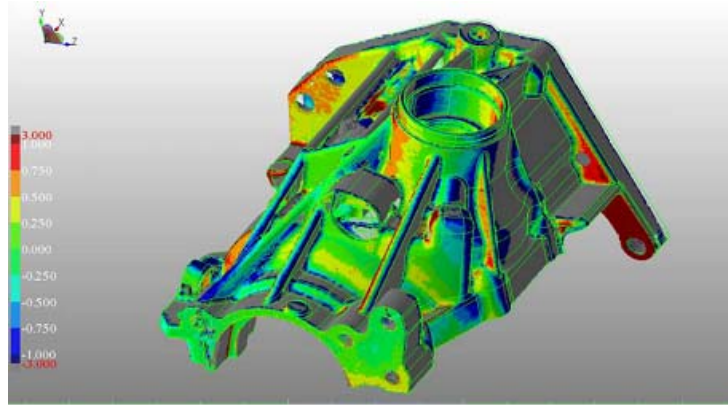


図 15 spGauge を使った評価

2-2 (サブテーマ②) 熱可塑性 CFRP プリフォームの賦形方法の開発

(1) 通電抵抗加熱方式の金型の開発

金型に高周波電流を流してジュール熱で加熱する成形方法を開発した。金型の構造を図 16 に、電気回路図を図 17 に示す。金型は大きな鋼鉄製ブロックのため、電気抵抗が小さく抵抗加熱は難しい。そこで、50kHz の高周波電流による表皮効果によって、電流を金型の表面に集中させ、抵抗を大きくしている。

金型内部の空間に冷却水を大量に流すことで効率よく冷却ができるようになっている。

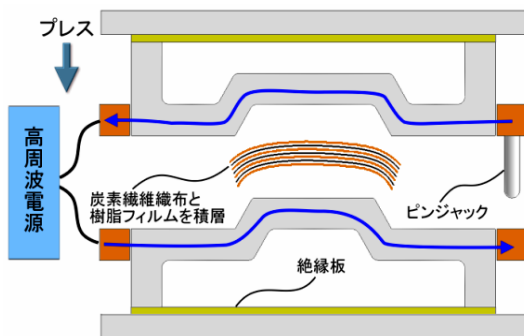


図 16 通電抵抗加熱方式の金型の構造

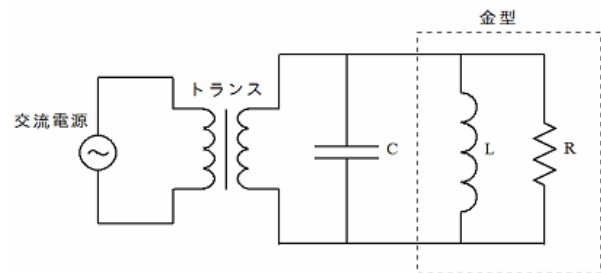


図 17 通電抵抗加熱方式の金型の回路図

この成形方法の成形サイクルを次に図 18 に示す。図の下部は金型温度を示す。

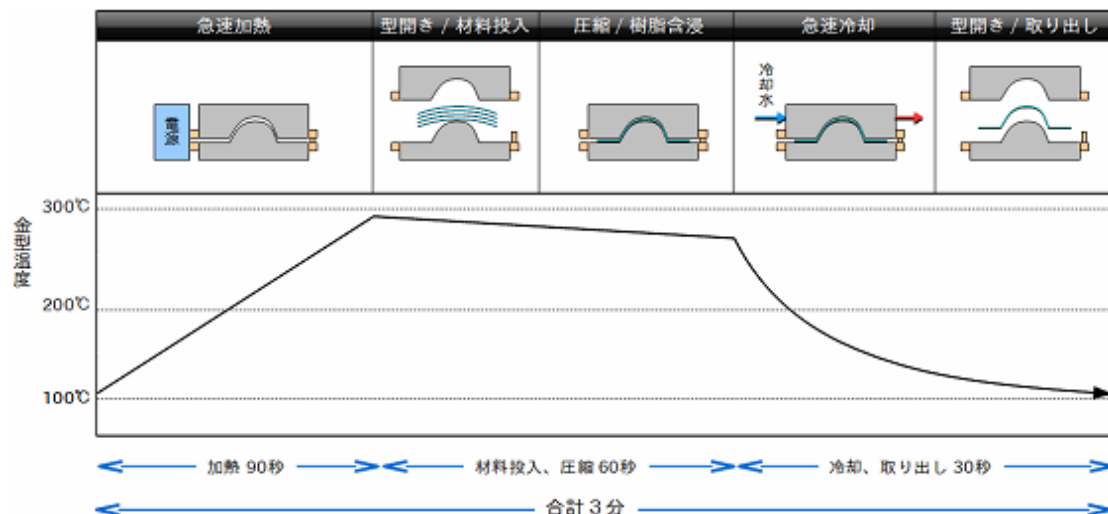


図 18 ホットスタンピング成形の成形サイクル

(2) 骨格の設計

連続繊維の骨格は高い強度と剛性を持つため、その性能を活かすように骨格を設計した。FF トランスファーのサイドカバーでは、ベアリング圧入部分に高い強度と剛性が必要であり、その部分を集中して強化する形状になっている。

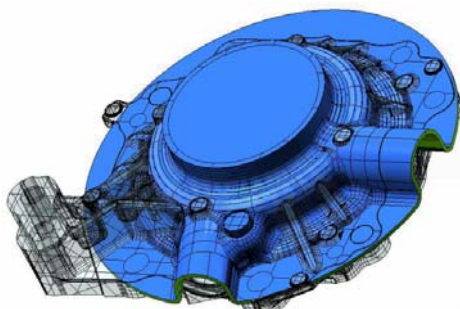


図 19 サイドカバーに重ね合わせた骨格

(3) 骨格を成形するホットスタンピング金型の開発

図 20 のように、骨格をホットスタンピング成形する金型を設計した。

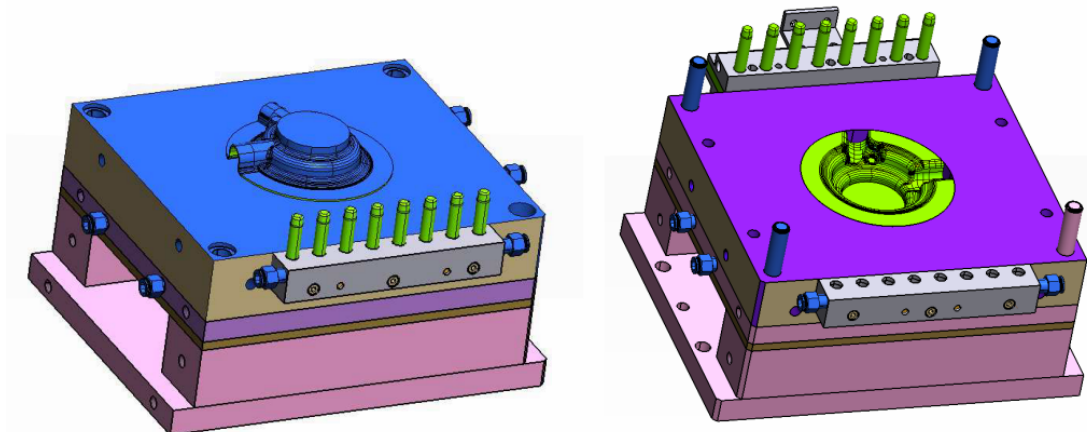


図 20 サイドカバーのホットスタンピング成形金型（左が上型、右が下型）

(4) 連続繊維のホットスタンピング成形

炭素繊維織布に熱可塑性エポキシ樹脂を含浸させた材料を用いて骨格を成形した。エポキシ樹脂の原料に硬化剤を混ぜて、刷毛で炭素繊維織布に塗布し、140℃の熱風乾燥機で重合し（図 21）、図 22 のようなプリプレグを製作した。



図 21 熱風乾燥機でエポキシ樹脂を重合

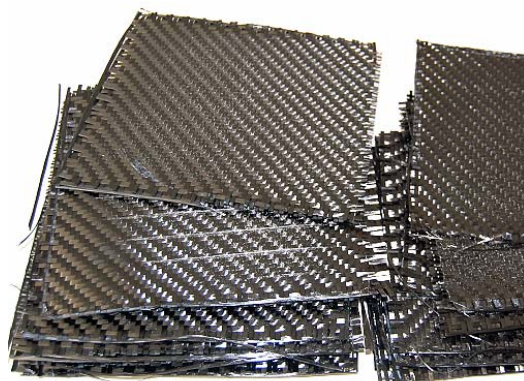


図 22 完成してプリプレグになった成形材料

(5)ホットスタンピング成形品の強度評価

前項のプリプレグを使って平板を成形し、曲げ試験で強度と弾性率を評価した。成形用の金型は図 23 のような通電抵抗加熱方式のホットスタンピング成形金型である。

金型温度 200℃、成形圧力 5MPa、加圧時間 1 分の条件で成形した。

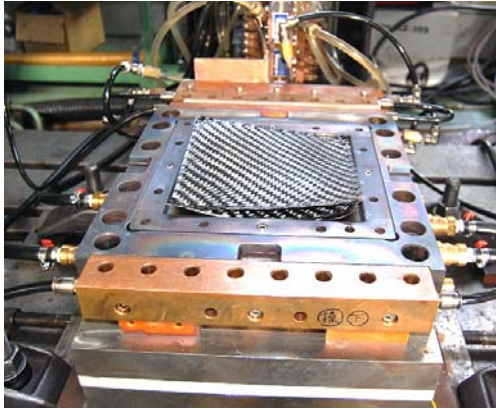


図 23 平板のホットスタンピング成形金型

成形した平板から短冊状に試験片を切り出し、曲げ試験で行い、強度と弾性率を評価した。ピッチ系と PAN 系の 2 種類の炭素繊維について評価した。ピッチ系炭素繊維を使ったものの方がやや大きな弾性率であったが、その差は当初期待したほどではなかった。また、PAN 系炭素繊維を使ったものの方がはるかに大きな強度を示した。



図 24 平板から短冊状に試験片を切り出し試験片を製作

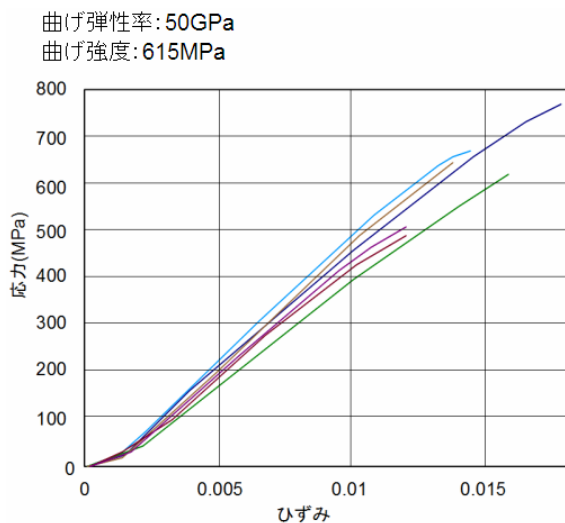


図 25 曲げ試験結果 (PAN 系炭素繊維)

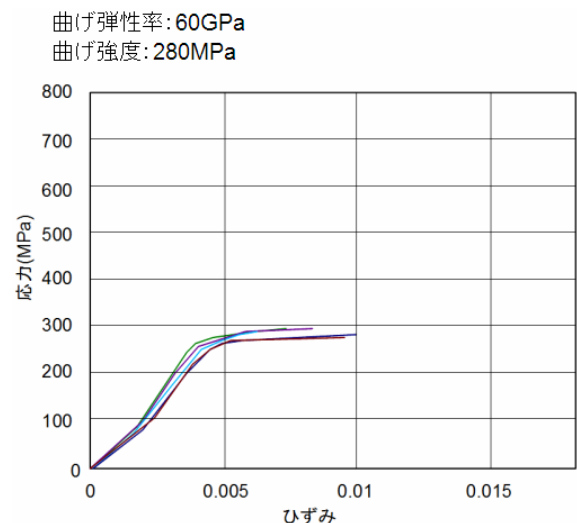


図 26 曲げ試験結果 (ピッチ系炭素繊維)

(6) 連続繊維の成形シミュレーション

樹脂・複合材成形解析ソフトウェアの PAM-FORM を使って炭素繊維織布の成形シミュレーションを行い、材料の特性と賦形性との関係を検証した。

せん断弾性係数とせん断角の制限角度の 2 種類のパラメータを変化させることで、現実の成形に近い結果が得られることが分かった。

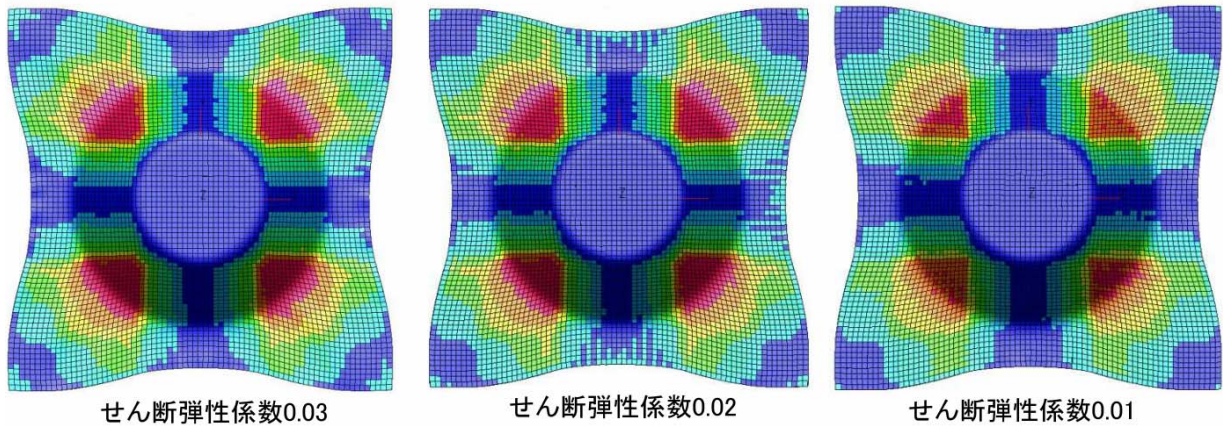


図 27 せん断弾性係数 0.01~0.03、制限角 45°

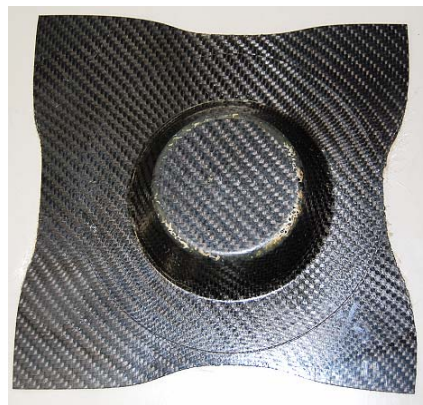


図 28 現実の成形品

(7) サイドカバーの骨格部分のホットスタンピング成形

FF トランスファーの動力試験の結果を踏まえて、最初はピッチ系炭素繊維を、次に PAN 系炭素繊維を用いて成形を行った。マトリックス樹脂はいずれも熱可塑性エポキシ樹脂である。

抜き勾配が小さく、脱型が難しいことが予想されたため、事前に離型剤については様々な実験を行った。最も良好な離型性を示したのは、ケムリースジャパン株式会社のケムリースで、補助的に信越化学工業の耐熱性シリコンオイルスプレーを利用した。

ケムリースは、シリコン樹脂を水の中に分散させた液状の離型剤で、100°C程度に加熱した金型にスプレーすると、数分で金型表面に焼き付いて、シリコン樹脂の強固な皮膜が形成される。

非常に複雑な形状だが、12k の目付けの大きな炭素繊維織布でも賦形性に問題はなかった。熱可塑性エポキシ樹脂の融点は 155°Cで、200°Cの金型でプレスすると、樹脂が十分に可塑化しているため、複雑な形状が賦形できると考えられる。

成形材料は長方形に裁断して作ったため、余分な部分があるため、図 31 のように汎用フライスを使ってトリム加工した。

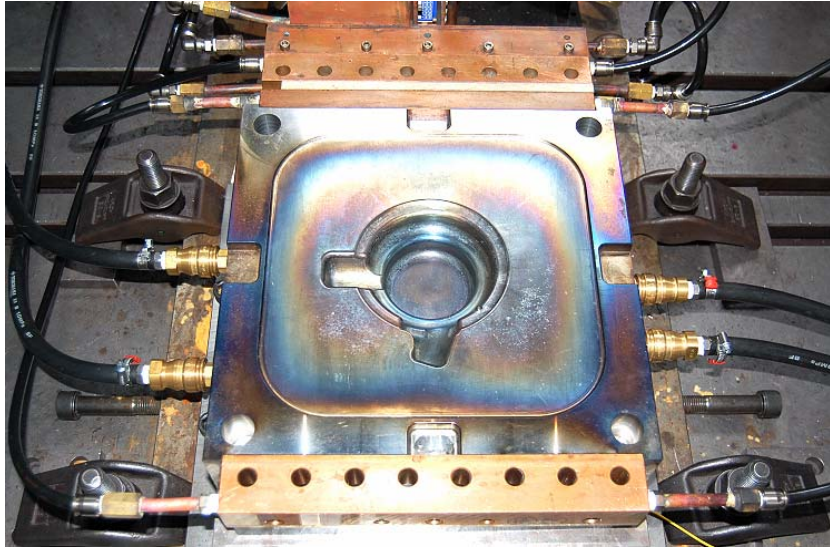


図 29 サイドカバーのホットスタンピング成形金型（下型）

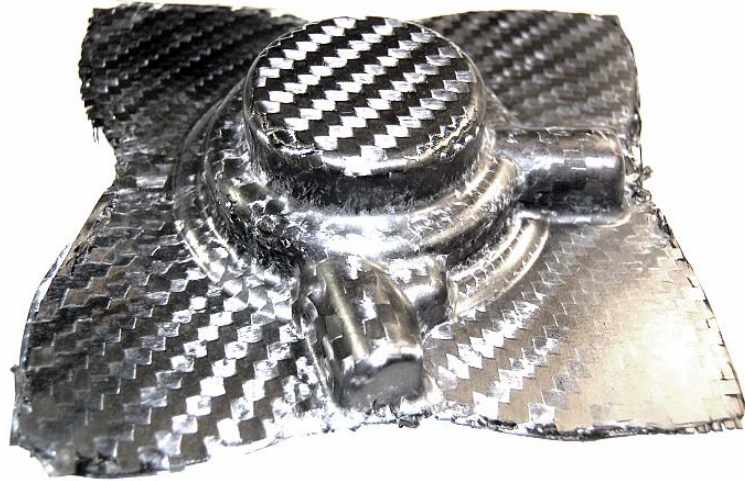


図 30 成形したサイドカバーの骨格

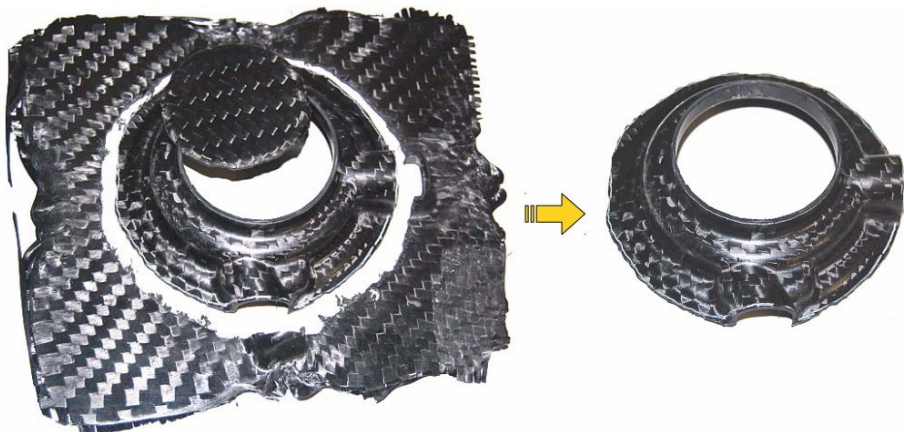


図 31 不要部分のトリム加工

2-3 (サブテーマ③) プランジャー式ノズルと長繊維入り樹脂供給装置の開発

(1) 長繊維の射出成形に適した成形機の開発

長繊維入りの成形に適した射出成形機の仕様を策定して、成形装置を開発した。製作は東芝機械株式会社が実施した。この成形機は、以下の様な特徴を持つ。

- 炭素繊維が折損しにくいスクリー形状を持つ。
- 混練機のパレルの中央からチョップド繊維を投入するサイドフィード機構を持つ。
- 炭素繊維で摩耗しにくいように、耐摩耗性のスクリーを採用する。
- 繊維の分散性を高める高分散ミキシングヘッドを備える。



図 32 射出成形機の外観

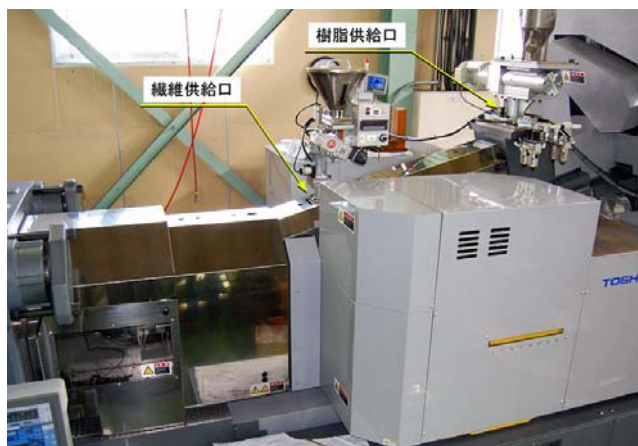


図 33 チョップド繊維を投入する機構

(2) 強化繊維の長さ

強化繊維が長いほうが成形品の様々な機械的性質が良くなるため、繊維の長さを評価した。本事業で開発した成形機は、繊維の折損が少なくなるように設計したスクリーを採用している。さらにφ80mmという大径のスクリーのため、成形機内部における繊維の折損は非常に少ないことが分かった。図 34 のように、成形機のノズルでは、ほとんど繊維が折損していない。ただし、金型内では、スプルーからランナー、ゲート、成形品の形状部と、複雑に樹脂が流れ、圧力も急激に変化するため図 35 のように繊維は短くなる。

一般的な射出成形機では、成形品中の繊維長は0.5mm程度と言われているが、この成形機を使った場合、1mm以上の繊維が多く含まれることが分かった。

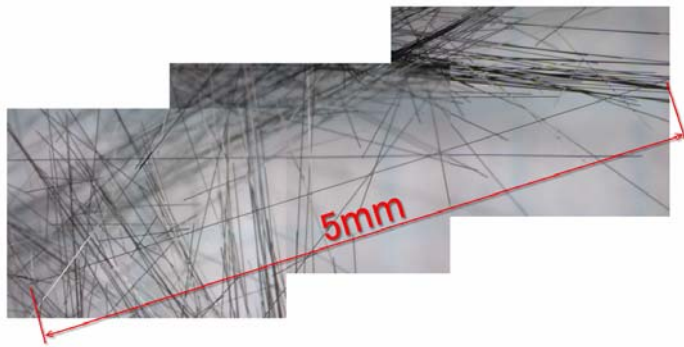


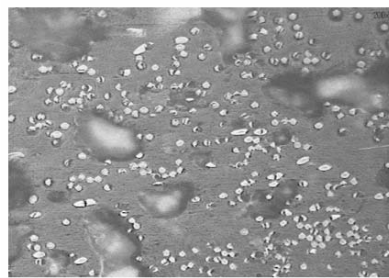
図 34 成形機のノズルにおける繊維の状態



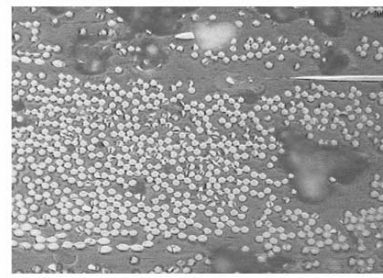
図 35 成形品中の繊維の状態

(3) 繊維の分散性

長繊維強化樹脂の機械的性質を左右する因子として、繊維の分散性がある。開発の初期の段階では、期待したような性能が得られなかったため、成形機のスクリー形状を変更した。スクリー先端に分散性を向上させるミキシングヘッドを取り付けるという改良を実施したところ、図 36 のように繊維の分散性が大幅に向上した。

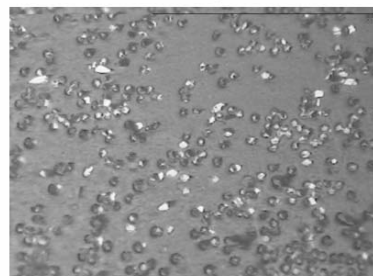


繊維濃度が低い部分



繊維濃度が高い部分

↓ スクリュー形状の改良



繊維の分散性が大幅に向上

図 36 成形品中の繊維の分散

2-4 (サブテーマ④) 駆動系部品の筐体の材質をアルミニウム合金から熱可塑性 CFRP に代替する技術の開発

(1) 軽量化したい部品

自動車の駆動系には、アルミのダイカスト鋳造で製造されている部品が多い(図 37)。本事業では、駆動系部品のアルミ合金製ケース類を熱可塑性 CFRP に置き換えることで軽量化することを目標とした。

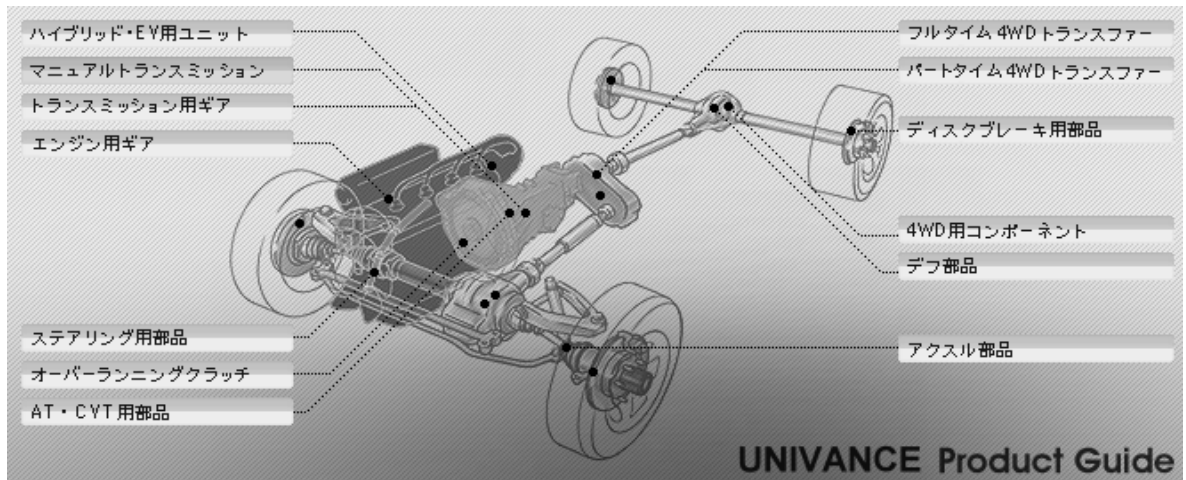


図 37 自動車の各種駆動系部品

最終的に図 38 のような FF トランスファーのケースのサイドカバー部分を熱可塑性 CFRP で試作し、動力試験によって必要な性能が得られるか確認した。

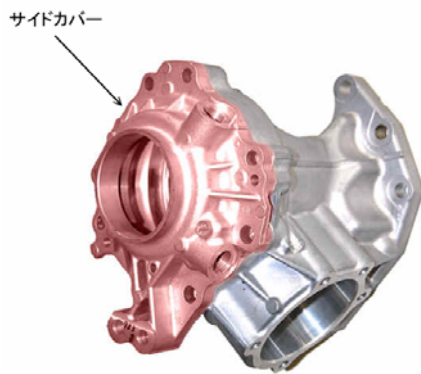


図 38 題材にした自動車の FF トランスファー

(2) FF トランスファーのケースに求められる性能

CAE 解析によって、FF トランスファーのケースに求められる性能について分析した。ハイポイドギアとピニオンギアの噛み合わせに問題を生じない程度の弾性率を検討した。次の図は、弾性率 47GPa の解析結果で、この程度であれば、トランスファーの機能を実現できると考えた。

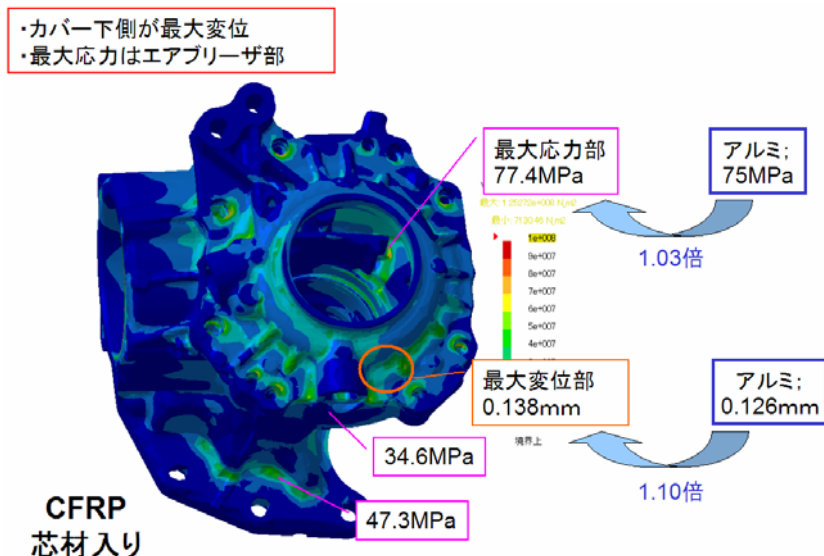


図 39 トランスファーの CAE 解析

(3) 動力試験の方法

株式会社ユニバンスの動力試験機を用いて、トランスファーの動力試験を実施した。この部品は自動車のトランスミッションに固定され、トランスミッションの動力軸とつながるが、試験装置で同じ状態を再現している。



図 40 動力試験機にセットしたトランスファー

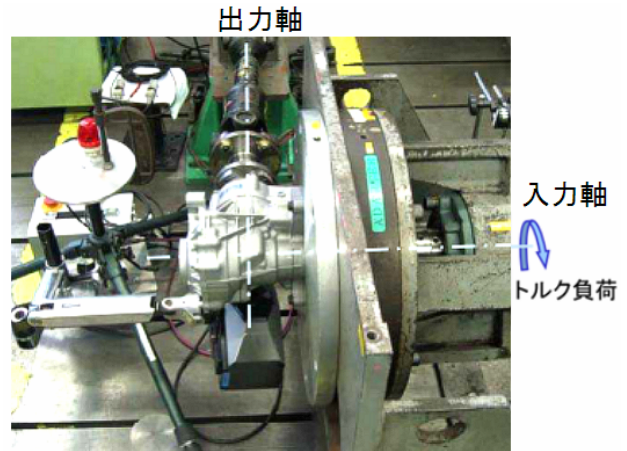
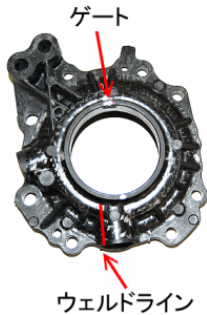
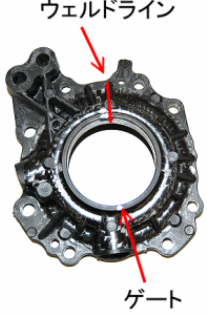


図 41 トルク負荷の入力方法

(4) 試験結果と改良

最初の試験では、アルミニウムの部品よりずっと小さな負荷で破壊したため、次の表のように成形方法と成形材料を変更して、強度向上をはかった。

変更項目		初回試作	改善試作
成形材料変更	芯材	強化繊維;三菱樹脂ピッチ系CFクロス 弾性率:60GPa 強度:300MPa	強化繊維;三菱レイヨンPAN系CFクロス 弾性率:50GPa 強度:600MPa
	射出成形部	強化繊維:東邦テナックスPAN系 チョップドCF(40wt%) 樹脂:三菱エンジニアリング ポリアミド PA-MXD6 弾性率:30GPa 強度:250MPa	東レ炭素繊維入り PA6(30wt%) 弾性率:19GPa 強度:280MPa
射出口変更		 <p>ゲート</p> <p>ウェルドライン</p>	 <p>ウェルドライン</p> <p>ゲート</p>
重量(対ADC12比率)		384g(53%)	354g(48%)

改良後の動力試験では、目標としたトルク 1400 N・m を大きく超えて、2200 N・m で破壊を生じた。このとき、トランスミッションと接続している軸にも塑性変形が生じており、動力試験ができる限界のトルクでもある。

図 43 のように、主として骨格部分が剥がれるような破壊を起こしている。骨格部分は破壊して

いないため、骨格と射出成形部分との接合に改良の余地があると言える。また、ウェルドラインが見られる部分に小さなクラックが生じていた。



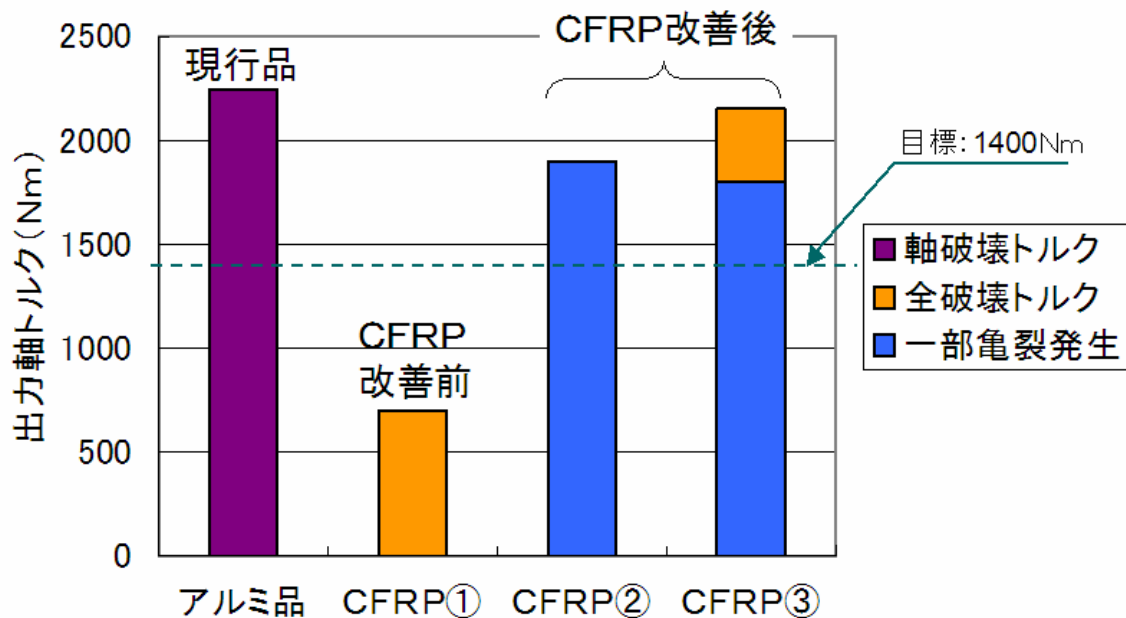
図 42 2200N・m で破壊したサイドカバー



図 43 破壊したサイドカバーの表側

(5)まとめ

連続繊維の骨格には破壊している部分はなく、ダイカスト鋳造の ADC12 よりも高強度であると推測できる。逆に長繊維強化の射出成形部分は、やや低強度であり、特にウェルドラインが発生している部分の強度が低い。また、全体に及ぶ破壊は連続繊維の骨格と射出成形の外形の界面で生じている。さらに強度を高めるには、界面の接着強度を高める、骨格部分の範囲をもっと広くするなどの対策が考えられ、今後の課題としたい。



最終章 全体総括

3-1 研究開発成果

(1) (サブテーマ①)連続炭素繊維の骨格を包み込むように長繊維入り樹脂を射出する成形方法の開発

炭素繊維強化樹脂には連続繊維を使った成形方法と、短く切断された繊維を使った成形方法とがある。連続繊維を用いた複合材料の成形品は、強度と剛性の両面で優れた機械的性質を持つが、複雑な形状の成形が難しい。一方、短い繊維を用いた複合材料では、肉厚が変化したり、穴があいたりといった複雑な形状の成形が可能だが、十分な強度や剛性が得られない。

本事業では、この2種類の複合材料の成形技術を複合することで、高強度・高剛性でありながら複雑形状の成形を可能にする成形技術を開発した。連続繊維の成形品を骨格として、この部分で強度と剛性を実現する。一方、形状が複雑な部分は長繊維を加えた射出成形で形成した。

この成形技術を実現するうえで重要なことは、2種類の材料をしっかりと接合することである。骨格となる連続繊維の芯材を射出成形でインサートし、骨格と射出する長繊維入り樹脂とがしっかりと接合する成形条件を明らかにした。樹脂の種類によっては、骨格となる成形品の表面をプライマーで処理することで強固な接着力が得られることを明らかにした。試験片を使ったせん断強さ試験で接合強度を評価し、2種類の成形材料の界面で剥離が起きないことを確認できた。

また、射出成形では成形ひずみと呼ばれる現象があり、成形品の精度を損なうことがある。一方、炭素繊維は熱膨張率が非常に小さな素材であり、連続繊維の成形品は温度による寸法変化が小さい。成形ひずみが避けられない射出成形品だが、連続繊維の骨格を加えることで、成形ひずみを小さくできることが分かった。

(2) (サブテーマ②)熱可塑性 CFRP プリフォームの賦形方法の開発

熱可塑性樹脂を使った繊維強化樹脂の成形では、樹脂を十分に熔融させる工程が必要である。本事業では、金型を樹脂の融点以上の温度に加熱して、そこに成形材料を投入して加圧することで成形する技術を開発した。このような方法で成形を繰り返すには、短時間で金型の温度を上下させる技術が必要になる。

金型を急速加熱するには、金型に高周波電流を流すことで、ジュール熱で発熱させる方法を用いた。高周波電流には表皮効果と呼ばれる性質があり、導体の表面付近の電流密度が大きくなる。この性質を利用して、成形を行う金型の表面を効率よく加熱する技術を開発した。一方、金型の冷却は、金型内部に冷却水が入る大きな空間を作り、冷却水を大量に入れることで高速に冷却できるようにした。

このような成形方法によって、最短で3分程度のサイクルで連続繊維と熱可塑性樹脂を使った複合材料の成形を可能にした。この成形方法では、樹脂を繊維に含浸させる工程を成形工程と同時に行うことが可能である。プリプレグを必要としない他に類を見ない画期的な成形技術である。

(3) (サブテーマ③)プランジャー式ノズルと長繊維入り樹脂供給装置の開発

長繊維強化樹脂の成形に適した射出成形機を開発し、装置の特性を活かすために成形条件の最適化を行った。長繊維強化樹脂では、繊維を折損させずに長く残すことと、繊維を均一に分散させることが重要である。材料の混練をしっかりと行えば、分散性は向上するが繊維長は短くなる。一方、混練を弱くすると、繊維長は長くなるが分散性は悪くなる。繊維を長く残し、かつ分散性を高める

ために、混練装置と射出装置とを分離した構造の射出成形機を開発し、特殊な形状の混練スクリーを開発した。

また、繊維と樹脂の接着強度を高めるために、繊維の表面処理が成形品の強度に与える影響を調査した。また、樹脂に添加剤を加える事で成形品の強度が高くできる場合があることを明らかにした。

(4) (サブテーマ④) 駆動系部品の筐体の材質をアルミニウム合金から熱可塑性 CFRP に代替する技術の開発
コンピュータシミュレーションによって自動車用トランスファーのケースを構成する材料に求められる弾性率と強度を明らかにし、この結果に基づいて材料の選択や芯材の設計を行った。

試作した部品を使って自動車用トランスファーを組み立て、負荷試験を行った。実際の自動車のトランスファーに加わる最大トルクの $600\text{N}\cdot\text{m}$ を大きく上回る $2200\text{N}\cdot\text{m}$ の強度を実現した。

アルミダイカスト製に近い剛性と強度を実現し、重量はアルミダイカスト製の 50% と、大幅に低減することができた。

3-2 研究開発後の課題・事業化展開

ダイカスト製のアルミニウム合金と同等の強度を持つ炭素繊維強化樹脂の成形技術を開発した。アルミニウム合金と同等の強度と剛性を維持しながら、50%もの重量軽減を実現した。しかし、現状では材料コストが高く、成形に要するコストも実用的とは言えない部分がある。強度と剛性を高めるために連続繊維を利用しているが、この部分の材料コストと成形コストが高いことが今後の課題である。

一般的な連続繊維は平織りや綾織りなどの織物だが、織物に加工するコストが高いという問題がある。本事業では UD テープやノンクリンプファブリックなどの材料について開発品のサンプルを入手して評価したが、量産されて低コスト化される時期については明らかではない。

また、成形方法についても、自動車部品に要求される 1 分以内の成形サイクルは実現できていない。さらなる効率化が必要である。

自動車産業では環境対応のため、車体の軽量化が急務となっている。自動車メーカーおよび、自動車部品メーカーは、炭素繊維強化樹脂の成形技術について調査、検討を行なっている。本事業の成果についても数多くの問い合わせがあることから、まずは試作品の製作や、共同開発などを進めたい。すでに自動車メーカーと大手自動車部品メーカーとの共同開発を始めた案件もあり、本事業で開発した技術のさらなる高度化や実用化に向けて取り組んでいるところである。

他にも、車椅子のフレーム、農業用ヘリコプターの部品、スポーツ用プロテクター、スーパーエンプラを用いた航空機エンジン部品など、様々な応用の可能性がある。本事業で開発した技術を広く紹介し、事業への展開を積極的に図りたい。