

平成26年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「自動車車体部品に対応した  
熱可塑性 CFRP 材のプレス成形技術の開発」

研究開発成果等報告書概要版

平成27年 3月

委託者 中部経済産業局

委託先 公益財団法人石川県産業創出支援機構

この報告書には、委託業務の成果として、産業財産権等の対象となる技術情報（未出願又は未公開の産業財産権等又は未公開論文）、ノウハウ等の秘匿情報が含まれているので、通例の取扱いにおいて非公開とする。ただし、行政機関の保有する情報の公開に関する法律（平成11年法律第42号）に基づき情報開示請求の対象の文書となります。

## 目 次

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	4
1-2	研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）	6
1-3	成果概要	9
1-4	当該研究開発の連絡窓口	11
第2章	熱可塑性 CFRP のプレス成形金型設計技術の課題への対応	
2-1	加熱・冷却と加圧制御が可能な金型の設計	12
2-2	成形実験による金型の加熱・冷却と加圧性能評価	13
2-3	縦壁加圧に対応した金型の設計	16
2-4	成形実験による金型の縦壁加圧特性評価	17
2-5	シートおよび成形品の接合方法の開発	18
第3章	熱可塑性 CFRP のプレス成形に対応したプレス機械制御技術の課題への対応	
3-1	熱可塑性 CFRP 用金型の作動に対応したプレス機械制御の設計	22
第4章	熱可塑性 CFRP のプレス成形ハイサイクル化技術の課題への対応	
4-1	加熱装置と搬送装置の設計・試作	24
4-2	炭素繊維微粉末の飛散防止対策技術の開発	27
4-3	開発した金型とプレス機械および周辺装置の集合実験評価	28
第5章	全体総括	
5-1	研究開発成果	30
5-2	研究開発後の課題・事業化展開	31

## 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

#### (1) 研究開発の背景

乗用自動車の車体には、約 500kg の鋼板製プレス加工部品が使われており、安全性の向上および快適な乗り心地を求めて使用する鋼板重量は今後も増加傾向にある。

しかし、地球温暖化の要因である CO<sub>2</sub> 排出量を削減するためには、車体重量を少なくとも 30%以上軽量化することが必要とされ、加えて、ガソリン、軽油および石化ガスなどの化石燃料の使用量を削減する燃費改善のためにも一層の車体重量の削減を早急に実現しなければならない状況にある。

従来の車体重量軽量化は高強度鋼板（ハイテン材）の使用が中心で、高強度鋼板はイコール難成形材であることから、デザイン性が重要視される自動車車体部品への高強度鋼板を使うことによる車体軽量化は限界にきている。中でもBピラーは図1-1-1に示す通り車体のほぼ中心にあり、ルーフレールとアンダーレールとに結合して乗員空間を形作るとともに、ドアを取付ける部材であり、更に重要なのは側面からの衝突エネルギーを吸収し、キャビンの安全性を確保しなければならない重要部品である。現在は普通鋼板から高張力鋼板に変わり上記目的を達成しているが、重量軽減に逆行している状況である。

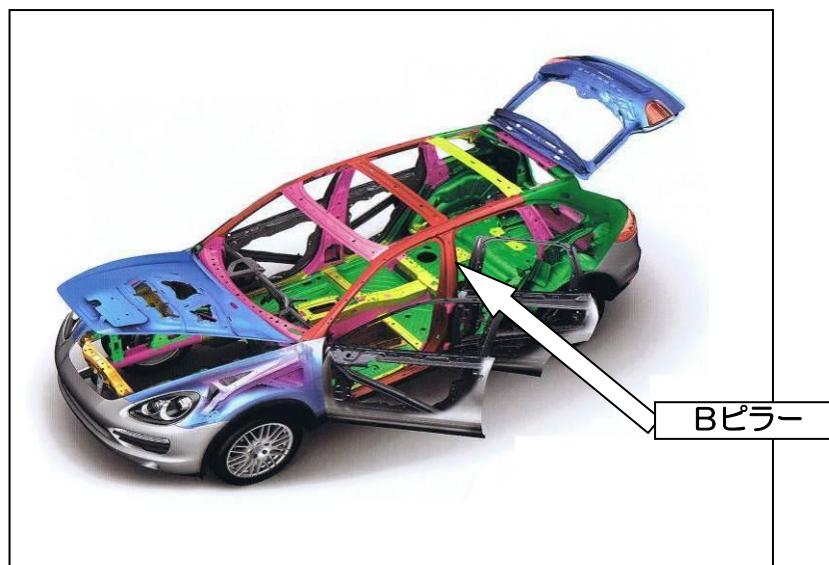


図1-1-1 約 500kg の鋼板プレス加工部品で組み立てられた乗用自動車例

材料の軽量化策としては、軽量で強度があるガラス繊維強化プラスチックがあるが、車体用途材としては上記要求に耐える十分な性能は無く、従来は、外板部品となるバンパーやスポイラーなどに限られ、そのほかは内装部品に限られている。

それに対して炭素繊維強化複合材料（CFRP）は質量で鋼の 5 分の 1、強度では普通鋼板の 10 倍以上と自動車車体の軽量化と強度向上に叶った材料である。しかしながら、現在多く使用されている CFRP のプラスチックはほとんどが熱硬化性樹脂のため、成形に数時間を要するなど生産性が低い。さらに、薄い熱硬化樹脂を金型表面に一枚一枚重ねて所定厚さに積層してから加熱と加圧を行わなければならないという熱硬化性樹脂独特の生産方式となるため、部品単価が高価となることも含めて、量販車の自動車部品には使われていない。しかし、レーシングカーやスーパーカーなどの価格は二の次のような高級車には CFRP が大量に使われるなど、軽量・高強度材としての特性は十分に持っている材料である。

量販自動車部品のための低コスト成形化には、熱可塑性樹脂を複合した CFRP が適しているが、現在のところ熱可塑性炭素繊維強化複合材料のプレス加工技術はない。

近時、プレス加工用としてのスタンパブルシートも量産され始め、まだまだ高い材料コストも少しずつ下がりつつあることから、早急なプレス加工技術の確立が期待されている。

## （2）研究目的及び目標

### 1) 研究目的

本研究開発の最終目標は「自動車の高強度および剛性要求部品であるBピラー（センターピラー）」に熱可塑性 CFRP 材を採用し得るプレスシステム設計製造できる知見を得ることである。

そのため CFRP 材の短時間加熱技術、軟化した CFRP の安定高速搬送システム、プレス加工に適した金型設計技術、金型の温度制御システム、CFRP 成形に適した加圧が可能なプレス機械システムなどの要素技術を研究開発する。

そして、トータルシステムとして、それらの要素システムを統合した熱可塑性 CFRP のプレス加工システムを開発する。

今後、適材適所で設計される自動車車体に、熱可塑性 CFRP 製プレス部品を採用するには、鋼板製車体部品との接合技術も重要で、接合技術も研究する。

1本の炭素系の太さは数ミクロンで可撓性はあるが、穴あけ加工や切断加工において

は微細なCF微粉が発生し、作業現場雰囲気中に飛散する可能性があるため、労働災害を未然に防ぐための飛散防止技術の研究開発も合わせて行う。

## 2) 研究目標

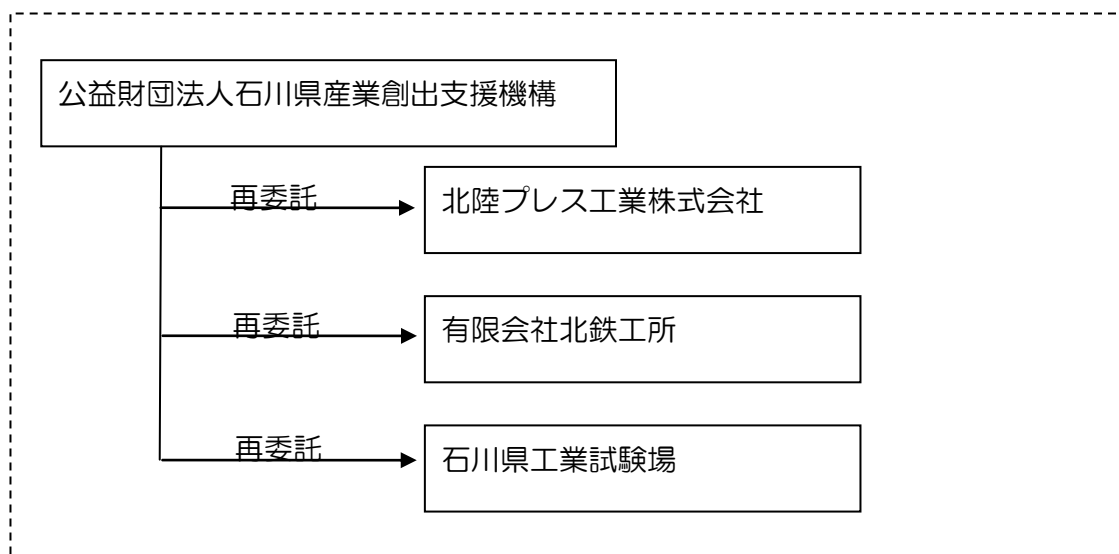
本研究開発の目標は、1製品のプレス加工時間が30秒以内で完了する熱可塑性CFRP材のプレス加工システムを実現することにある。

そのために必要な熱可塑性CFRP材の予熱を含めた短時間加熱装置の設計技術、加熱されて軟化するCFRPを、温度低下が少ない状態で金型内に投入する搬送装置の設計技術、熱可塑性CFRPのプレス加工に適した金型設計技術、金型の温度制御システム設計技術、金型内で冷えて収縮が進むCFRP材成形を追い込み加圧が可能な金型とプレス機械システムの設計技術、CFRPの微粉末の飛散防止システム設計技術を確立することを目標とする。

## 1-2 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）

### (1) 研究組織・管理体制

#### 1) 研究組織



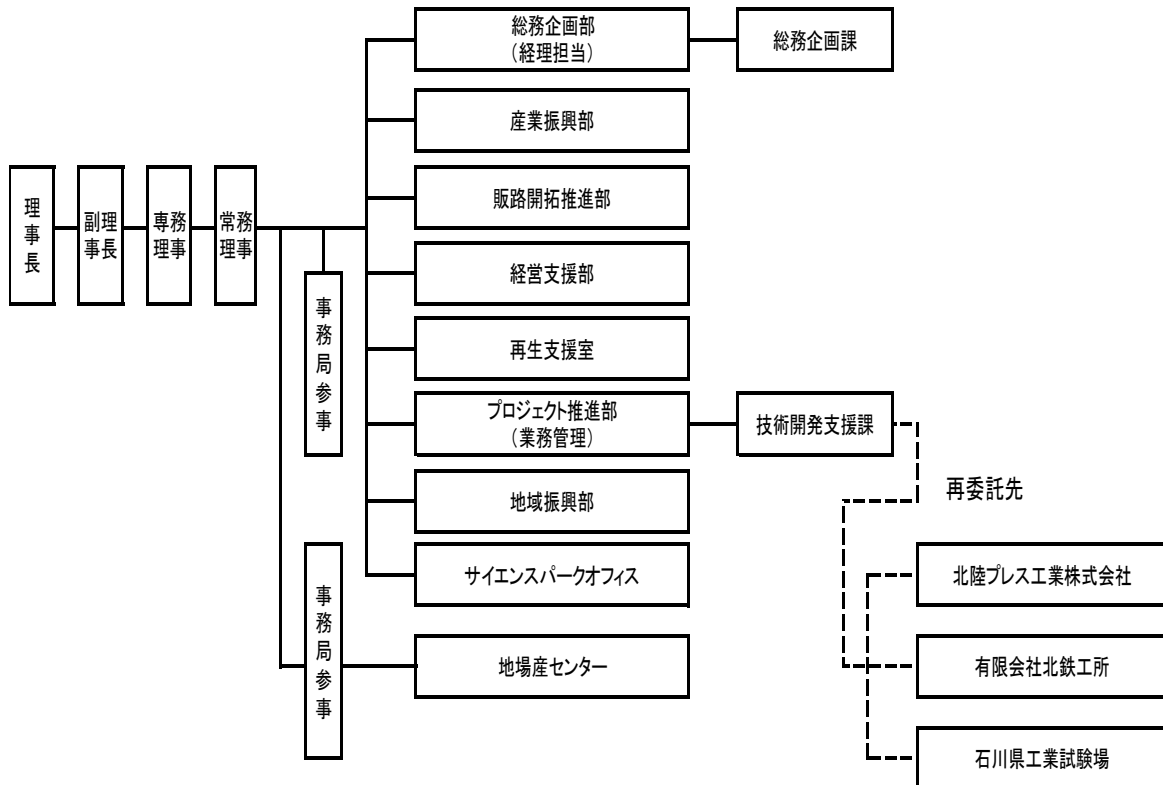
総括研究代表者（PL）
所属 北陸プレス工業株式会社
役職 代表取締役社長
氏名 来丸 秀俊

副総括研究代表者（SL）
所属 有限会社北鉄工所
役職 専務取締役
氏名 北 文雄

## 2) 管理体制

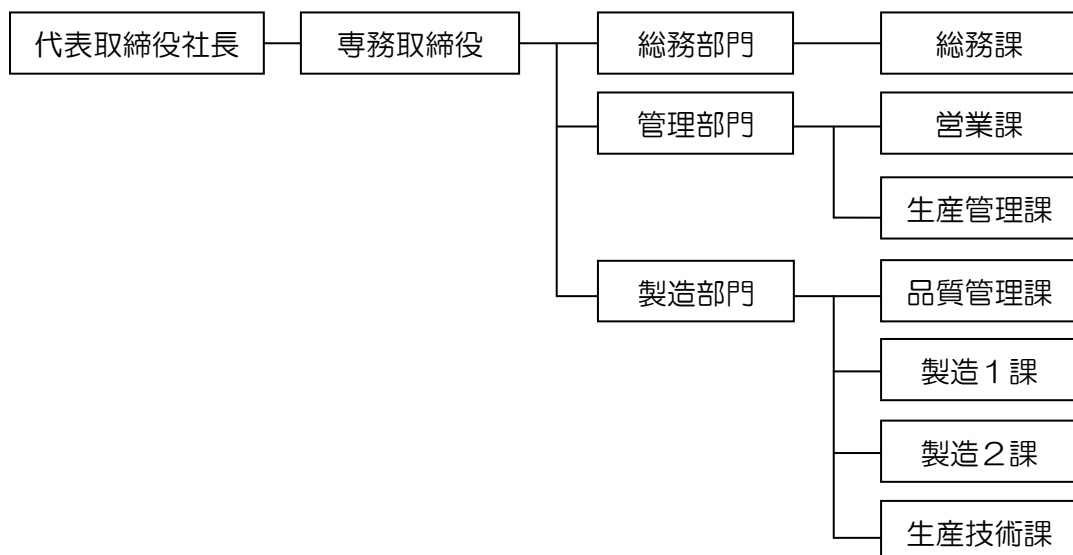
(事業管理機関)

公益財団法人石川県産業創出支援機構

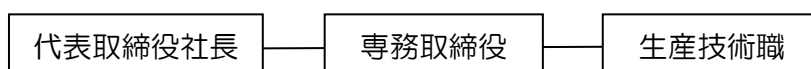


(再委託先)

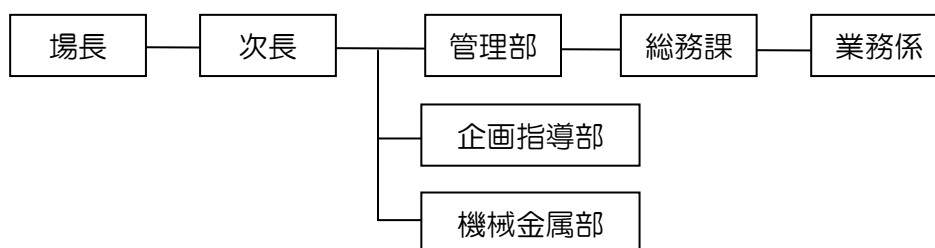
北陸プレス工業株式会社



有限会社北鉄工所



石川県工業試験場



(2) 研究者氏名

(事業管理機関)

財団法人石川県産業創出支援機構

氏名	所属・役職
平崎 直純	プロジェクト推進部長
木村 孔明	プロジェクト推進部技術開発支援課
中尾 一也	総務企画部総務企画課長

(再委託先)

北陸プレス工業株式会社

氏名	所属・役職
来丸 秀俊	代表取締役社長
来丸 雅信	専務取締役
南 俊彦	製造2課・課長
桜井 義一	生産技術課・課長
貫山 敬一郎	製造2課・係長
藤野 淳	生産技術課・スタッフ

有限会社北鉄工所

氏名	所属・役職
北 文雄	専務取締役
福野 保男	生産技術職

石川県工業試験場

氏名	所属・役職
多加 充彦	企画指導部・次世代技術開発支援室 室長
廣崎 憲一	企画指導部・主任研究員
木水 貢	企画指導部・主任研究員
根田 崇史	機械金属部・主任技師



### (3) 協力者

#### アドバイザー

氏名	所属・役職
中島 孝敏	三恵技研工業株式会社 技術センター・技師
小松 隆	リンツリサーチエンジニアリング株式会社・代表取締役社長
小松 勇	小松技術士事務所・所長
鶴澤 潔	金沢工業大学・教授
門前 重厚	石川県プレス工業協同組合・専務理事

### 1-3 成果概要

#### (1) 熱可塑性 CFRP のプレス成形金型技術の課題への対応

##### ①加熱・冷却と加圧制御が可能な金型の設計

成形中の温度、圧力を樹脂物性に合わせた適正制御に対応して作動する金型設計技術を開発するため、自動車車体強度部品であるBピラーを対象に、要素モデル金型および縮尺モデル金型の設計・試作を行った。これにより、熱可塑性 CFRP 成形用金型の設計指針となるモデル形状、加工する熱可塑性 CFRP 材の樹脂物性や板厚に対応した型構造、ヒータによる温調方法についての技術・ノウハウを蓄積した。

##### ②成形実験による金型の加熱・冷却と加圧性能評価

試作した B ピラーの要素モデルおよび縮尺モデル金型を用いた成形実験と加工した成形品の諸特性の評価を行いながら、成形時間 30 秒以内とする最適な成形条件の探索を行った。これらの成形実験の過程において、金型温度、ダイハイトの調整によるプレスの加圧力などの成形条件と成形品の光沢性、寸法精度、剛性・強度などの特性との関係に関するデータを蓄積した。

##### ③縦壁加圧に対応した金型の設計

金型内で成形品縦壁部の樹脂密度を高め、強度・剛性を向上させるために必要な縦壁加圧を可能にするため、縦壁部の加圧特性を調べ、駆動カムを用いてスライド方向に作用する加圧力を水平方向に変換してする機構などについて検討し、Bピラー縮尺モデル成形金型の設計・試作に適用した。

##### ④成形実験による金型の縦壁加圧特性評価

駆動カムを用いてスライドの加圧力を水平方向に変換し、縦壁部を加圧する機構を導入したBピラー縮尺モデル成形金型による成形実験の結果、成形品縦壁部の曲げ特性は、水平部と比較してほぼ同等の値が得られ、80%以上の目標を達成した。

## ⑤シートおよび成形品の接合方法の開発

成形品の部位を厚肉にして、強度に違いをもたらせることを目的に、CFRP シートを重ね合わせて加熱し、金型で圧着接合しながら成形する方法を確立した。

また、CFRP と金属の接合方法として、接着剤による方法について調査・検討した。市販の接着剤により PPS 製 CFRP と金属との接合実験の結果、いずれもはく離は接着剤で生じ、接着剤の接合強度が支配的であることがわかった。

また、母材と同じ CFRP で作製したリベットによる接合技術を開発した。引張せん断試験評価の結果、目標の 20MPa 以上の高い接合強度が得られた。

## (2) 熱可塑性 CFRP のプレス成形に対応したプレス機械制御技術の課題への対応

サーボプレスのスライドモーション機能を利用し、金型の作動と同期して熱可塑性 CFRP シート材を適正な速度で成形し、冷却と成形後の形状安定化に必要な下死点保持時間を有するスライドモーション制御方法を構築した。この制御を行うことにより成形時間 30 秒以内の目標を達成した。

## (3) 熱可塑性 CFRP のプレス成形ハイサイクル化技術の課題への対応

### ①加熱装置と搬送装置の設計・試作

赤外線ヒータにより CFRP シートの加熱温度と加熱時間が制御でき、サーボモータ制御により金型上の決められた位置に高速・高精度で搬送できる加熱・搬送装置を開発した。CFRP 材の樹脂特性や板厚に応じて成形可能な温度に 180 秒以内で全面を均等に加熱でき、加熱終了後、金型上の所定の位置に投入されるまでの搬送時間 10 秒以内を実現させた。

さらに、この加熱・搬送装置をプレス機械の制御と同期させることにより、熱可塑性 CFRP 材の加熱から成形に至る一連の工程を自動で行うことができるプレス成形システムを完成させた。

### ②炭素繊維微粉末の飛散防止対策技術の開発

熱可塑性 CFRP 材の取り扱い時などで問題となる炭素繊維の微粉末の発生状況について調査を行い、飛散防止の対策について検討した。特に、裁断した CFRP シートやトリム加工直後の成形品の切断面に付着する炭素繊維微粉末の飛散を防止するため、プレス成形とトリム加工を同時に行う方法により、端面を平滑化する方法を確立した。

### ③開発した金型とプレス機械および周辺装置の集合実験評価

B ピラー縮尺モデル金型と加熱・搬送装置およびプレスのスライド制御を用いた集合

実験を行い、種々の熱可塑性 CFRP の成形に対応する金型の作動確認と金型の加熱・冷却および加圧とプレス制御方法について検討した。その結果、PPS、PA66、PC をマトリクス樹脂とする熱可塑性 CFRP に対し、成形時間 30 秒で完了するための成形データを蓄積した。

#### 1-4 当該研究開発の連絡窓口

(事業管理機関)

公益財団法人石川県産業創出支援機構

(経理担当者) 総務企画部総務企画課長 中尾 一也

(業務管理者) プロジェクト推進部長 平崎 直純

連絡先 Tel : 0.76-267-6291 Fax:0.76-268-1322

E-mail: hirasaki@isico.or.jp

(再委託先)

北陸プレス工業株式会社

(経理担当者) 総務部長 小林 武則

(業務管理者) 代表取締役社長 来丸 秀俊

連絡先 Tel : 0.76-248-2147 Fax : 0.76-248-2144

E-mail : hidetoshi\_raimaru@hokurikupress.com

有限会社北鉄工所

(経理担当者) 代表取締役社長 北 久芳

(業務管理者) 専務取締役 北 文雄

連絡先 Tel : 0.76-275-2113 FAX : 0.76-275-2114

E-Mail: kita.tk-re@estate.ocn.ne.jp

石川県工業試験場

(経理担当者) 管理部 業務係 主任主事 廣田 健太

(業務管理者) 企画指導部・次世代技術開発支援室 室長 多加 充彦

連絡先 : Tel : 0.76-267-8089 FAX : 0.76-267-8090

E-Mail : [taka@iriii.jp](mailto:taka@iriii.jp)

## 第2章 熱可塑性 CFRP のプレス成形金型設計技術の課題への対応

### 2-1 加熱・冷却と加圧制御が可能な金型の設計

#### 2-1-1 概要

本研究開発では、乗用自動車の重要車体部品であるBピラーを対象に、形状要素を含む成形テストモデルを決定するための調査・選定を行い、Bピラー要素モデル金型の設計・試作を行った。さらに、Bピラー要素モデル金型の設計・試作および成形実験により得られたノウハウや技術データを活用し、現行自動車に使われているBピラーとほぼ同じ形状で、成形可能な大きさに縮小したBピラー縮尺モデル金型の設計・試作を行った。これらの金型の性能評価を行い、問題点を抽出することにより、温度、圧力により樹脂物性が変化する熱可塑性 CFRP 材に対し、温度調整や適正な作動制御を行うことが可能な金型技術・ノウハウの蓄積を図った。

#### 2-1-2 Bピラー要素モデル金型の設計・試作

Bピラーを成形するために必要な段付きの絞りやフランジなどの要素形状を取り込んだBピラー要素モデルを作成し、この形状モデルを成形するための金型を設計・試作した。

試作したBピラー要素モデル金型は、QDC のダイセットに図2-1-1に示すパンチ、ダイおよびストリッパーで構成される型構造を有し、型内にヒータと温度センサを組み込むことでフィードバックにより温度制御が可能で、室温から 150℃以上の間で温度調整が可能である。

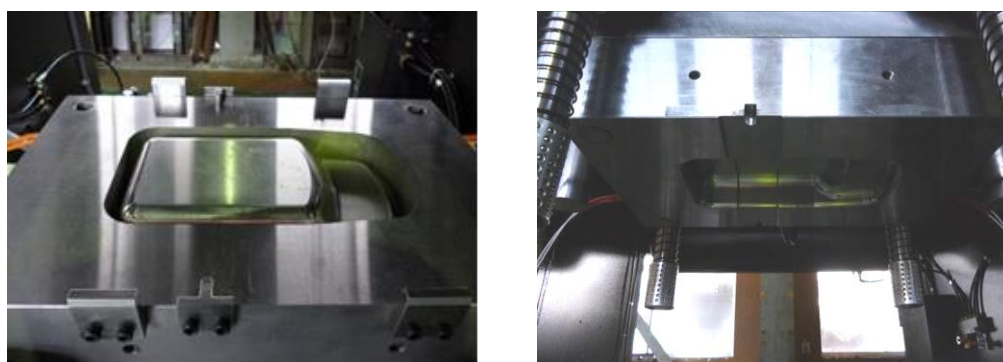


図2-1-1 Bピラー要素モデル金型（左：パンチ、右：ダイ）

#### 2-1-3 Bピラー縮尺モデル金型の設計・試作

Bピラー縮尺モデル金型は、現行車のBピラーを参考にして形状を作成し、プレスの加圧能力と想定する面圧から、実寸の3分の1に縮尺した寸法のモデルを作成した。

試作した金型は、QDC のダイセットに図2-1-2に示すようなパンチ、ダイおよびストリッパーで構成され、下型のストリッパーと上型のダイは、成形部周囲のフランジ部のみを曲面に加工し、それ以外はフラットにした。ヒータは上下のストリッパー部のみに内蔵した結果、金型温度は、図2-1-3に示すようにパンチとダイの部分でヒータ設定温度よりも低くなったが、ストリッパーからの伝熱で加熱できることを確認した。

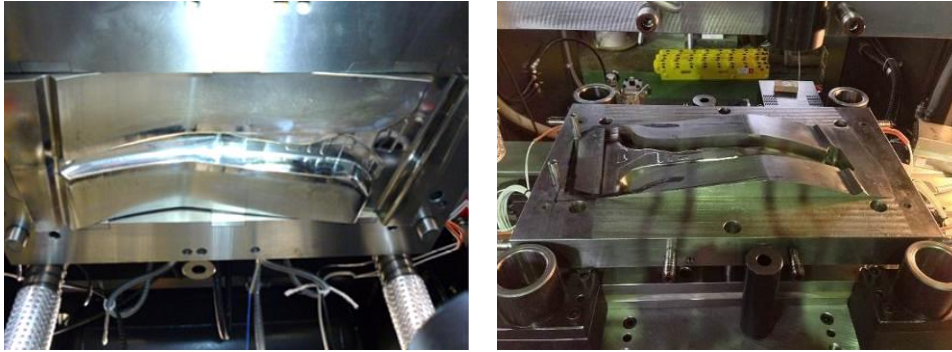


図2-1-2 Bピラー縮尺モデル金型

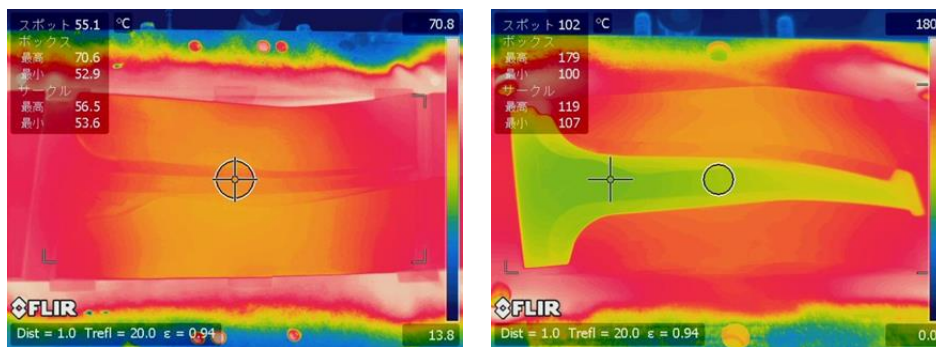


図2-1-3 金型表面の温度分布（左：ダイ表面、右：パンチ表面）

## 2-2 成形実験による金型の加熱・冷却と加圧性能評価

### 2-2-1 概要

試作したBピラー要素モデル金型および試作したBピラー縮尺モデル金型を用いて、金型温度、加圧力などの種々の条件でプレス成形実験を実施した。試作した成形品について外観観察、板厚測定、強度試験などの特性評価を行うことで、最適条件を探索した。

### 2-2-2 Bピラー要素モデル金型を用いた成形実験

Bピラー要素モデル金型によるプレス成形実験は、図2-2-1に示すように、厚さ1mmのPPS樹脂3K綾織のCFRPシートを400mm×300mmで4隅を面取り加工したCFRP材を準備し、加熱後、金型に投入し成形した。成形条件は、金型温度50℃～

140℃、プレスの下死点保持時間 10s~30s の間で実験を行い、成形品の外観評価等により最適条件を探索した。

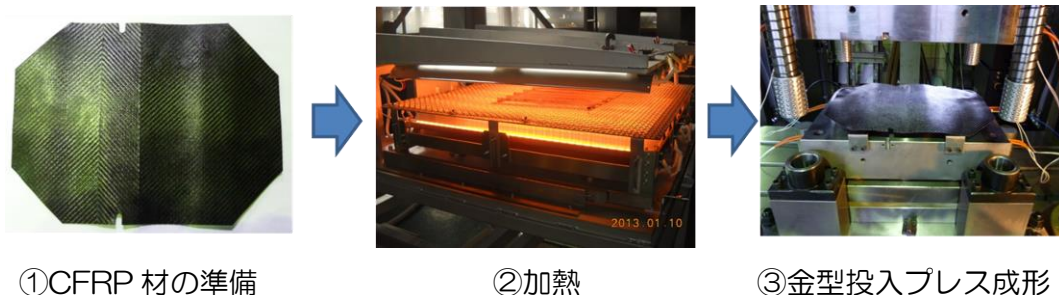


図2-2-1 プレス成形の流れ

金型温度による成形品を比較した、図2-2-2に示すように金型温度 80℃で良好な成形面が得られ、140℃では、樹脂が表面に流出し光沢性がなくなった。また、図2-2-3に示す繊維方向が (0/90) と (-45/45) のシートの比較では、材料の引き込み位置に相違があり、R 部での光沢性に違いが生じた。

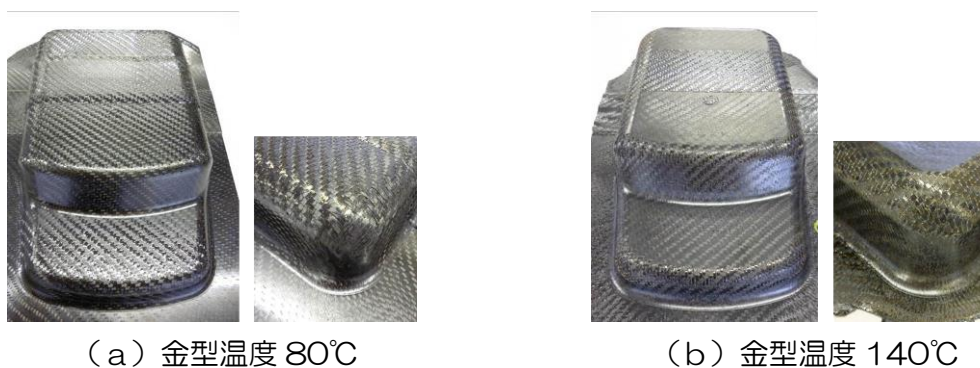


図2-2-2 金型温度による成形品の外観比較



図2-2-3 繊維方向の違いによる成形品の外観比較 (左: 0/90、右-45/45)

さらに、図2-2-4 に示す成形品の部位から試験片を切り出し、図2-2-5に示す3点曲げ試験を行った。その結果、金型温度や部位により曲げ強度が異なり、水平部の光沢性のある部分の強度が高くなった。

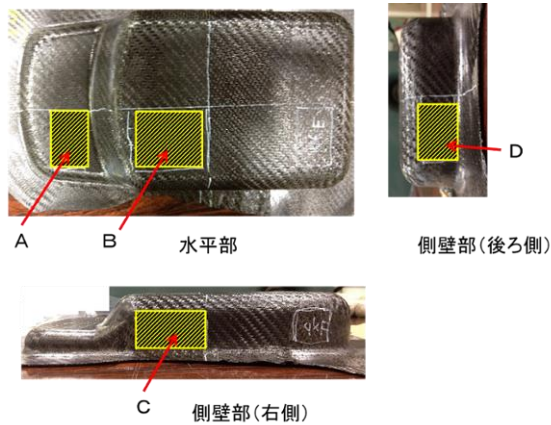


図2-2-4 試験片切り出し箇所

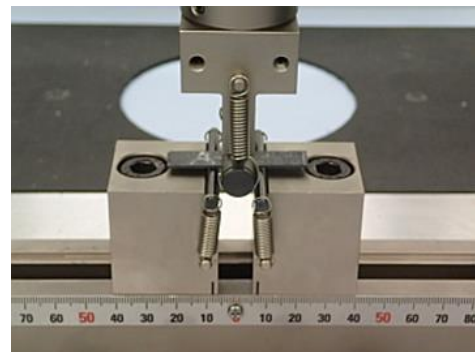


図2-2-5 3点曲げ試験

### 2-2-3 Bピラー縮尺モデル金型を用いた成形実験

Bピラー縮尺モデル金型を用いた成形実験は、図2-2-6に示すように CFRP シートを試作した加熱・搬送装置を用いて加熱し、自動搬送によりプレス加工し、不要部分をトリム加工して成形品を作製した。材料には 1mm 厚、3K 綾織、PPS 樹脂の CFRP を用い、0.7mm 厚の SPCC（鋼板）と比較した。

成形品の輪郭形状の測定では、図2-2-7に示すように金型形状を基準としたときの偏差を比較した結果、CFRP の形状偏差は SPCC に比べ、約5倍大きい値を示した。

また、図2-2-8に示すような成形品の曲げ強度試験を実施した結果、1mm 厚の CFRP の剛性は 0.7mm 厚の SPCC の約 40%であった。

そこで、剛性の向上を図るため、1.5mm 厚以上の CFRP の成形が可能になるようパンチを改良し、1.5mm 厚の CFRP 材の成形実験を実施した。その結果、図2-2-9に示すように、1.5mm 厚の剛性は SPCC と同等以上に向上した。

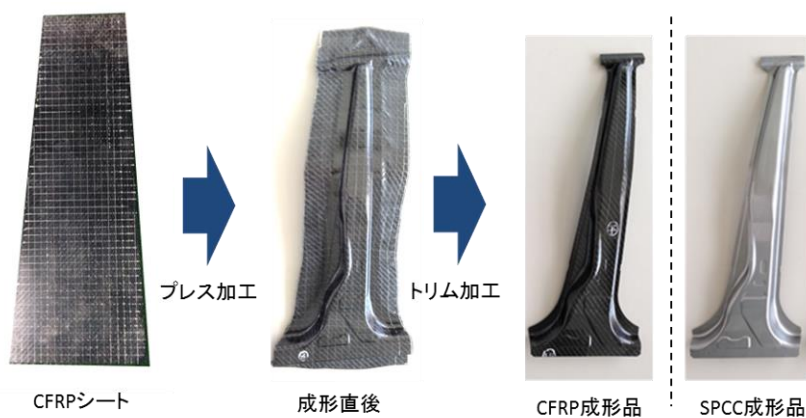


図2-2-6 Bピラー縮尺モデル成形品

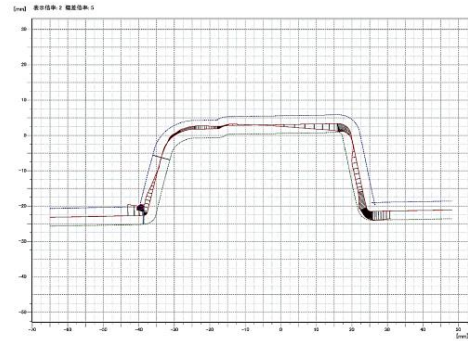
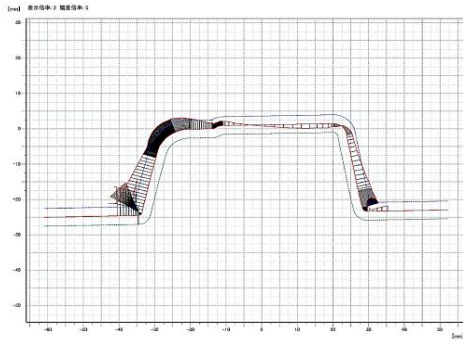


図2-2-7 輪郭形状の比較（左：CFRP、右：SPCC）

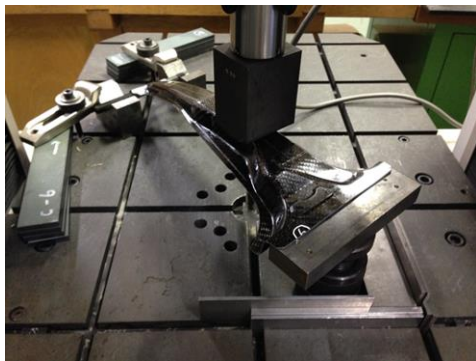


図2-2-8 成形品の曲げ強度試験

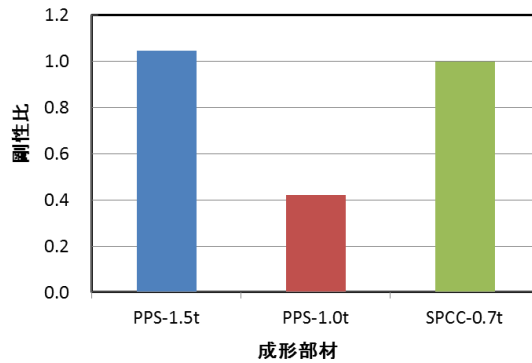


図2-2-9 成形品の剛性比較

## 2-3 縦壁加圧に対応した金型の設計・試作

### 2-3-1 概要

CFRP の成形では、プレスにより金型内部で形状を付与した後、冷却に伴い樹脂が収縮する。そこで、金型内で CFRP 成形品の樹脂密度を高め、必要な強度・剛性を得るため縦壁部において加圧追い込みを可能にする方法について検討した。

### 2-3-2 縦壁加圧方法の検討

CFRP の成形において、金型内の圧力状態は、図2-3-1に示すように水平部はスライドによる加圧がそのまま垂直に作用し、成形面には高い面圧が生じる。一方、縦壁部の成形面には傾斜角に応じた分力しか作用しないため、面圧が低くなる。

そこで、図2-3-2に示すように駆動カムをダイに組み込み、カムの上端がスライドの下降により押し込まれると、ダイが水平方向に移動することにより縦壁の成形面を加圧する機構をBピラー縮尺モデル金型に導入した。



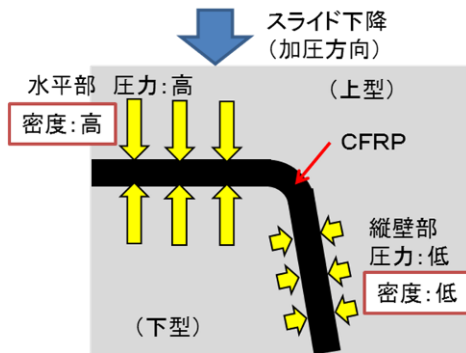


図2-3-1 金型内のCFRPの圧力状態

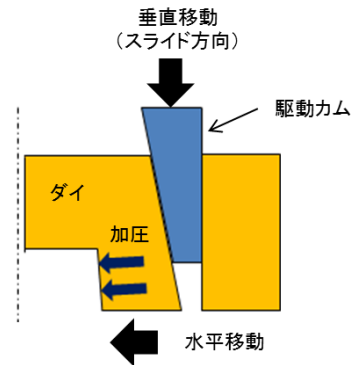


図2-3-2 縦壁加圧方法

## 2-4 成形実験による金型の縦壁加圧特性評価

### 2-4-1 概要

成形品の縦壁部を加圧するため、駆動カムを導入したBピラー縮尺モデル金型を用いた成形実験を行った。縦壁部を加圧した場合と加圧しない場合の成形品について、水平部と縦壁部から試料を採取し、曲げ特性を比較することにより提案した駆動カムによる縦壁加圧方法の効果について評価した。

### 2-4-2 駆動カムを用いた金型の成形実験と成形品評価

縦壁加圧の効果を知るため、板厚 1mm の CFRP を使い、駆動カムで縦壁部を加圧した場合（加圧有り）と、縦壁加圧しない場合（加圧無し）で成形実験を行った。

成形品縦壁部の表面観察の結果、図2-4-1に示すように加圧有りの場合は、光沢のある表面が得られ、加圧無しの場合は織物組織の凹凸により、光沢のない表面となった。また、縦壁加圧有りとし無しの成形品に対し、図2-4-2に示す部位から試料を採取し、板厚、曲げ弾性率、曲げ強度を求め縦壁部と水平部を比較した。その結果、図2-4-3に示すように板厚は、加圧有りの場合は水平部とほぼ同じとなり、曲げ弾性率や曲げ強度は、加圧有りの場合、水平部の90%以上の値が得られた。



図2-4-1 成形品の縦壁部表面観察（左：加圧有り、右：加圧無し）

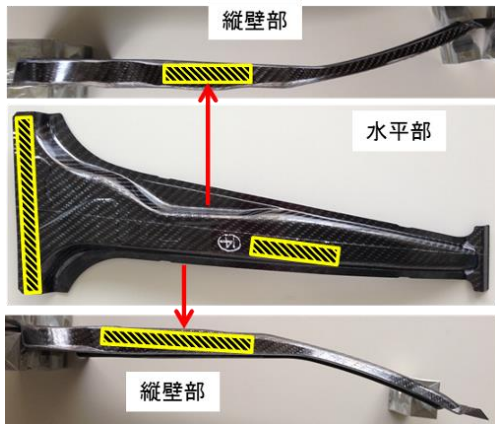


図2-4-2 試験片採取箇所

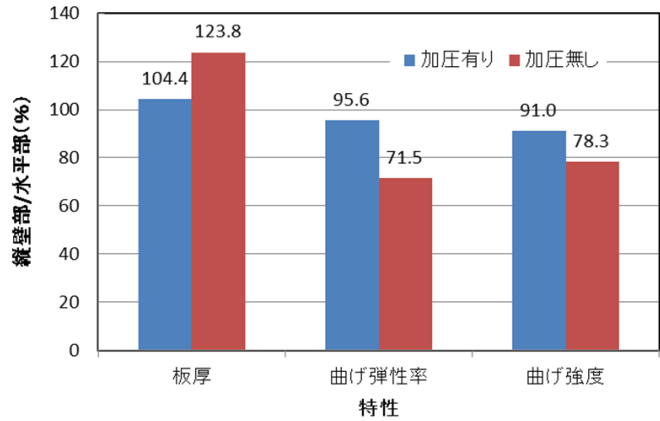


図2-4-3 水平部と縦壁部の諸特性比較

## 2-5 シートおよび成形品の接合方法の開発

### 2-5-1 概要

鋼板製のBピラーは、衝突安全性の仕様から部位により強度に違いを持たせている。CFRP材を用いる場合、部分的に複数のシートを重ね、シート間を加熱圧着して厚肉化することで強度を変えることを検討した。

また、Bピラーは車体構造物のひとつであり、他の車体の床(プラットフォーム)や屋根(ルーフ)と組み付ける必要がある。そこで、熱可塑性CFRP部品同士や金属品の接合方法について調査・検討を行った。

### 2-5-2 CFRP積層シート圧着接合による厚肉部品の成形

部分的に厚肉のCFRP部品を成形するため、サイズや厚さの異なるCFRPシートを重ね合わせて加熱し、プレス金型の中で圧着接合と同時に成形する方法を開発した。この方法をBピラー要素モデル金型に適用した結果、図2-5-1に示すような部分的に薄肉部に対し2.5倍(目標3倍)の厚みをもつ成形品が試作できた。

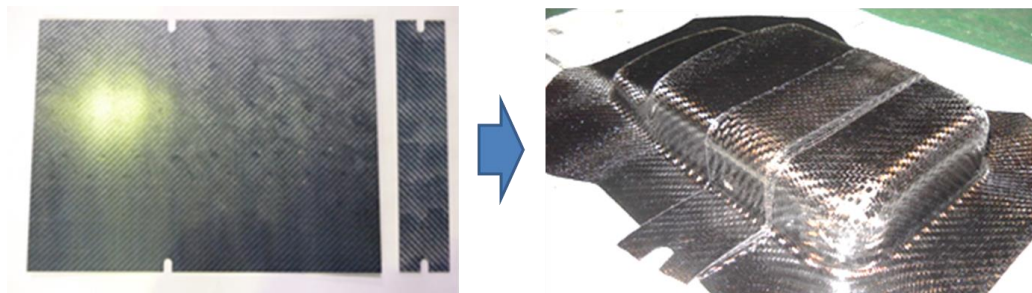


図2-5-1 部分厚肉したBピラー要素モデル成形品

このような圧着接合した部品の強度や接合面の強度を評価するため、図2-5-2に示すような厚さ2mmで幅30mmと厚さ1.5mm幅15mmの2枚のCFRPシートを重ね合わせ、圧着接合すると同時にハット形状の部品を成形し、図2-5-3に示す恒温槽付き材料試験機を用い、試験温度-30℃、23℃、60℃で強度試験を実施した。その結果、図2-5-4に示すように試験温度により強度が変化することが確認された。

また、各試験温度で実施した試験後の成形品断面の観察を行った結果、図2-5-5に示すようにいずれの試験温度の場合も負荷の反対側にき裂が発生し、接合面での離れはみられなかった。破壊は負荷状態と成形品の構造上に起因するもので、接合部によるものではないことから、この圧着接合が低温や高温下においても十分適用できると判断した。

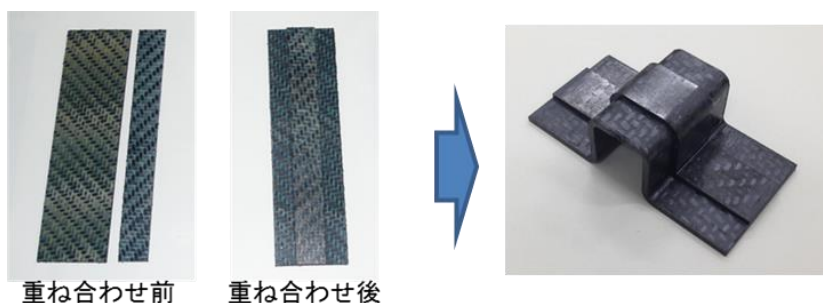


図2-5-2 CFRP材の重ね合わせによる部分厚肉したハット曲げ成形品



図2-5-3 恒温槽付き材料試験機による強度試験

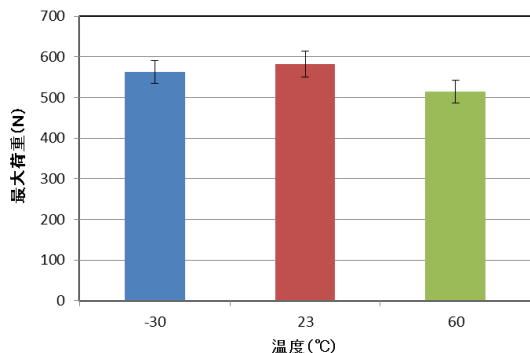


図2-5-4 最大荷重の比較

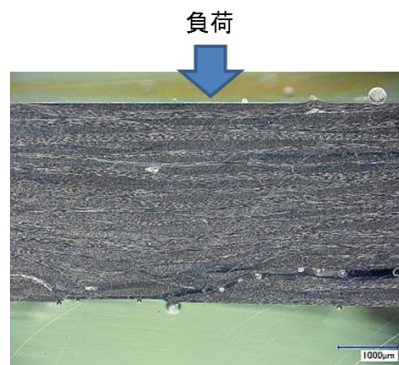


図2-5-5 断面観察(試験温度-60℃)

### 2-5-3 接着剤を用いた接合方法の検討

CFRP 材と金属材料との接合方法として、入手可能な市販製接着剤の調査および評価を行った。母材には PPS 製 CFRP と SPCC 材を用い、表 2-5-1 に示す 6 種類の接着剤により、図 2-5-6 に示すような寸法形状の接合試験片を作製し、引張せん断試験を実施した。その結果、いずれの試料も図 2-5-7 に示すように接着面がはく離し、母材での破断は生じなかった。引張せん断試験により接合強度を比較した結果、最大でも 12MPa であり、目標の 20MPa に達しなかった。

表 2-5-1 接合試験用の試料

試料	接着剤
①	PPS 用瞬間接着剤 A
②	PPS 用瞬間接着剤 B
③	PPS 用瞬間接着剤 C
④	エポキシ樹脂系（化学反応型）D
⑤	エポキシ樹脂系（化学反応型）E
⑥	PPS 用瞬間接着剤 B（接着 2 時間後、150℃で 5 分加熱）

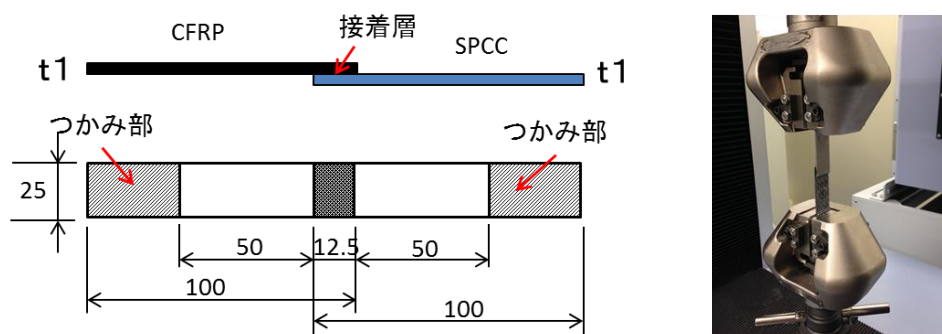


図 2-5-6 接合試験片と引張せん断試験

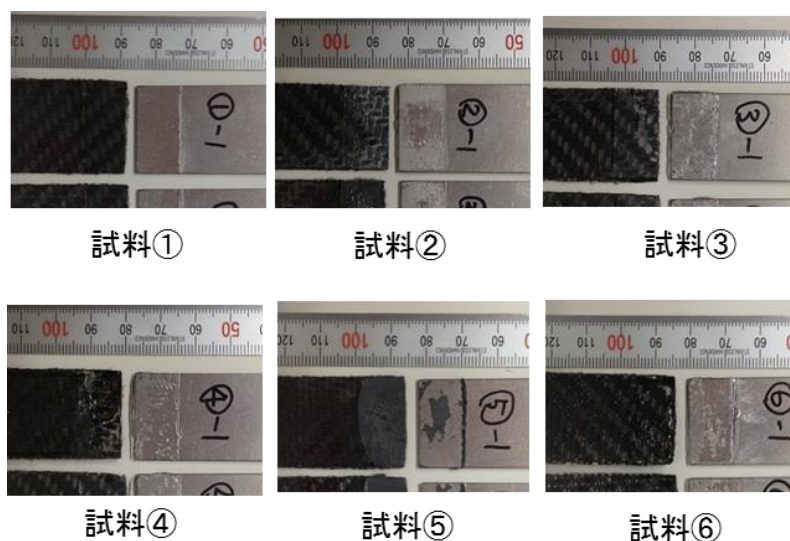


図 2-5-7 試験後の接着部の状態

さらに、母材表面に凹凸加工を施し、接着剤との接触面積を増やしてアンカー効果を高めることにより接着剤の接合強度を向上させる検討を行ったが、接合強度の向上はわずかであり、接合強度は、接着剤自体の強度が支配的であることがわかった。

#### 2-5-4 リベットを用いた接合方法の検討

CFRP と金属部品をより強固に接合する方法として、CFRP 製のリベットピンを作製し、これを図2-5-8に示すような CFRP と金属材の接合面に開けた穴に挿入して締結することを試みた。

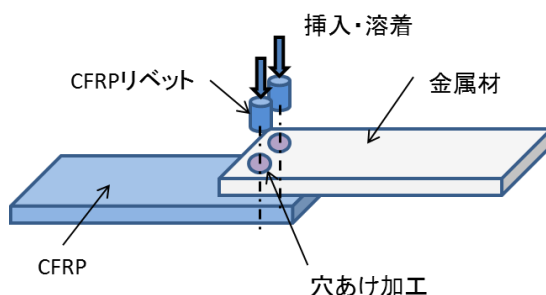


図2-5-8 リベットによる接合

このリベット締結による接合強度を評価するため、図2-5-9に示すような PPS 製 CFRP とアルミを母材とする試験片に同じ PPS 製 CFRP で作製したリベットピンを挿入し、加熱溶着した接合試験片を作製し、引張せん断試験を行った。その結果、図2-5-10 に示すように接合部の破断は、ピンが穴から抜けることによって生じ、最大荷重から求めた接合強度は目標の 20MPa 以上となり、接着剤に比べて非常に大きい値が得られた。

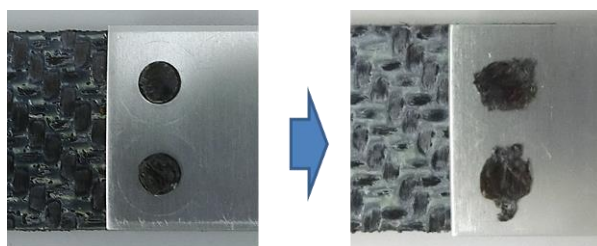


図2-5-9 リベット挿入部の加熱溶着

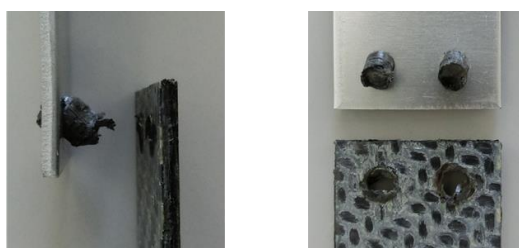


図2-5-10 リベット接合部の破断

### 第3章 熱可塑性 CFRP のプレス成形に対応したプレス機械制御技術の課題への対応

#### 3-1 熱可塑性 CFRP 用金型の作動に対応したプレス機械制御の設計

##### 3-1-1 概要

熱可塑性 CFRP の成形では、プレス成形直前で加熱した CFRP の樹脂が金型内で冷却されながら成形される。樹脂は温度により粘度（流動性）が変わるため、成形中に適切な温度制御と加圧制御が必要であるとともに、良い製品を得るために必要な適切な冷却温度の時間制御も必要である。また、冷却に伴い樹脂の収縮が生じるから、これに対応した追い込み加圧が可能な機能を持たなければならない。

本研究では、サーボプレスのスライド制御機能を活用し、加熱と冷却と加圧が行える金型をフレキシブルに作動させ、熱可塑性 CFRP のプレス成形に適した制御方法について検討した。

##### 3-1-2 プレス制御技術の検討

CFRP 材は、使用されている樹脂の融点温度以上に加熱すれば、軟化して成形可能であるが、樹脂が冷却して再び固化すると成形できなくなる。そのため、金型内で樹脂が固化温度に達する前にプレスのスライドを下死点まで下降させることが必要である。

スライドの下降時間を短縮させるため、プレスの最大ストローク速度を用い、スライドの開始位置を上死点から下に下げることができる振り子モーションを採用した。

また、下死点到達後、形状が安定化するまでの保持時間を求めるため、熱電対を貼付した CFRP 材の温度変化を測定した。1mm 厚の CFRP 材の場合、図 3-1-1 に示すように下死点に到達すると表面は急速に温度が低下し、CFRP 材の表面と内部がともに同じ温度に落ち着くまでに約 10 秒の時間を要した。

以上より、図 3-1-2 に示すような振り子モーションと下死点保持時間によってスライドを制御するモーションを設定した。

設定したスライドモーションに対し、良好な成形品が得られたダイハイトでの成形中の荷重変動を測定した。その結果、図 3-1-3 に示すように CFRP が下死点に到達するまでは低い加圧力であるが、下死点に到達すると同時に高い加圧力が生じ、下死点保持の間は高い加圧力が維持されていた。すなわち、樹脂の収縮に追従して追い込み加圧されていると判断した。

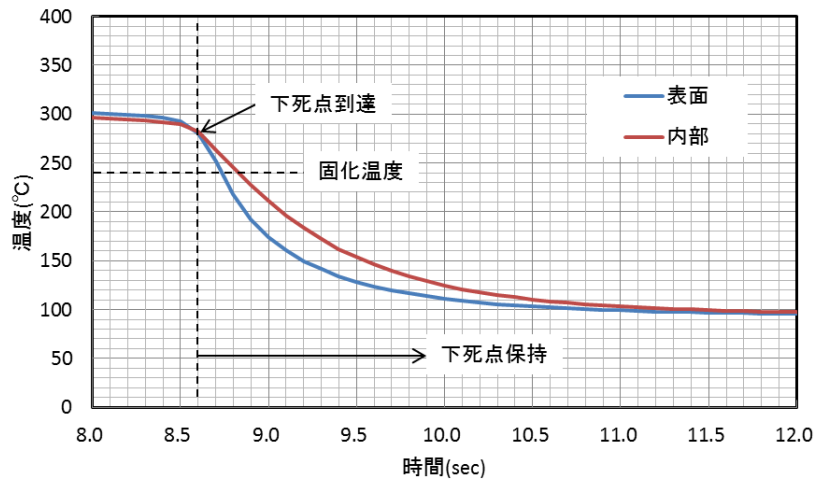


図3-1-1 成形中のCFRP材の温度変化

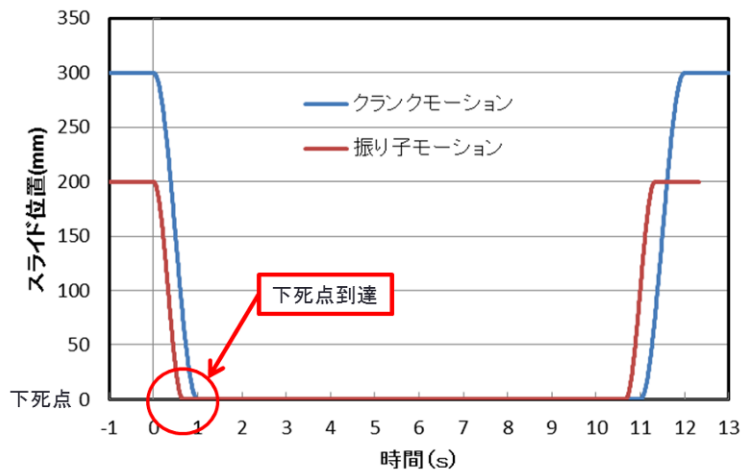


図3-1-2 1mm厚CFRP成形のスライドモーション

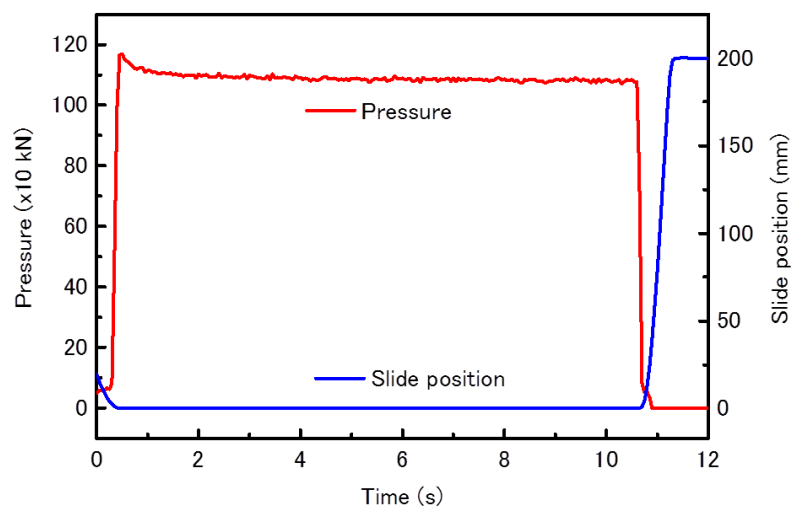


図3-1-3 Bピラー縮尺モデル成形時の荷重変動

## 第4章 熱可塑性 CFRP のプレス成形ハイサイクル化技術の課題への対応

### 4-1 加熱装置と搬送装置の設計・試作

#### 4-1-1 概要

熱可塑性 CFRP シートは、常温では成形不可能なためプレス加工の前工程として、加熱によりシートを軟化させ、再硬化する前に素早く搬送して金型に正確な位置に設置する必要がある。

本研究では、短時間加熱が可能な赤外線方式の加熱装置と加熱後に軟化したシートを金型に高速・高精度で搬送する装置の設計・試作を行い、材料を均一に加熱するための制御について検討した。

#### 4-1-2 加熱・搬送装置の設計・試作

試作した加熱・搬送装置を図4-1-1に示す。装置はプレス機の左側に設置されており、CFRP 材の搬送はプレス機の右側のサイドオープニングを通して行われる。

加熱装置は、加熱部本体と制御盤からなり、制御盤で加熱温度、加熱時間などの条件を設定する。ヒータの出力は、3系統のヒータを独立して設定することができ、温度制御は、放射温度計によりCFRP 材の温度をモニタリングし、PID 制御方式により設定温度に近づけるようにした。

加熱部本体は、材料の両面を加熱するよう、赤外線ヒータを上下9本ずつ並べた構造とし、上下ヒータは、CFRP 材との距離をそれぞれ調整できるようにした。

搬送装置は、サーボモータ駆動によりステージを移動させるもので、加熱装置内の送り位置、金型上の送り位置を手動で設定した後は、自動で所定の位置に移動・停止および戻りが可能である。さらに、加熱の間のステージの移動距離、停止時間、移動速度を自由に設定することができる。

CFRP 材の設置から加熱および金型への投入までのプロセスは以下のとおりである(図4-1-2)。

- ①CFRP 材を加熱装置の左側の投入口からステージに設置する
- ②ステージとともに右側の加熱装置内部に移動し、加熱が開始される
- ③加熱が終了するとステージがプレス機械の左側のサイドオープニングを通過して、金型上まで搬送する
- ④CFRP 材が金型上に投入され、ステージは元の位置に戻り、成形を開始する



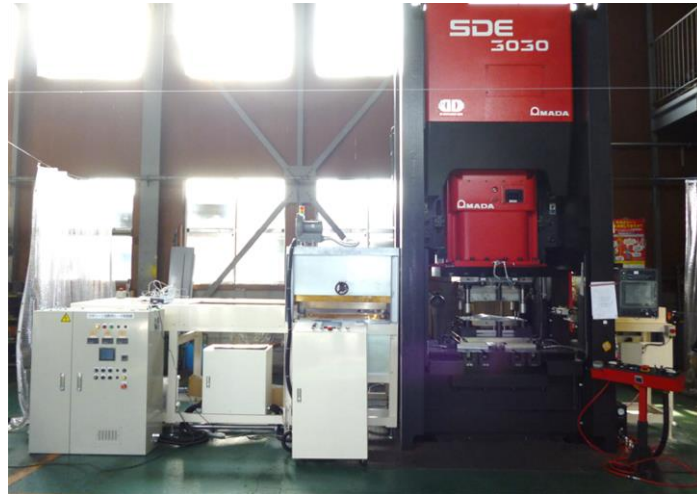
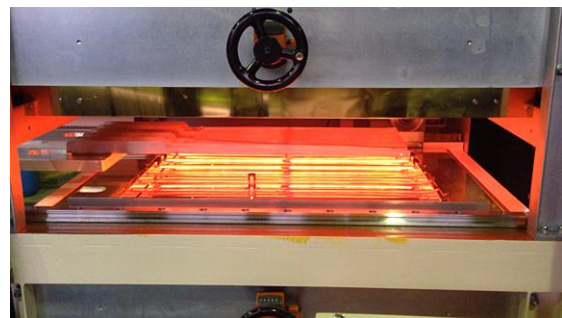


図4-1-1 加熱・搬送装置の外観



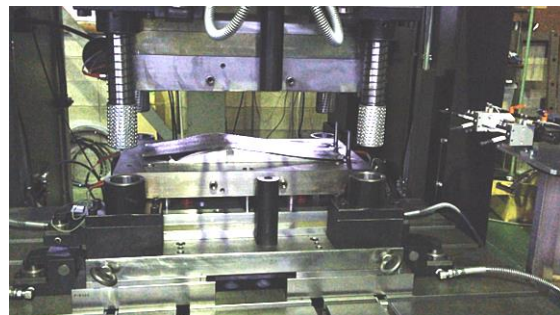
①CFRP 材の設置



②材料の加熱



③金型への搬送



④金型に投入後、成形開始

図4-1-2 加熱・搬送のプロセス

試作した加熱・搬送装置の加熱性能を評価するため、PPS 樹脂製 CFRP 材の加熱実験を行った。図4-1-3に加熱中のステージを固定し、3系統のヒータ出力比を同じにした場合（条件1）と、ステージを往復運動させ、ヒータ出力比を変えた場合（条件2）の温度分布の測定結果を示す。図より、条件1では均一に加熱される領域が中央部分に限られているが、条件2では均一な加熱領域が拡大した。

このように成形するシートの寸法形状に合わせてステージの往復運動とヒータ出力比を調整し、CFRP の均一な加熱条件を収集した。

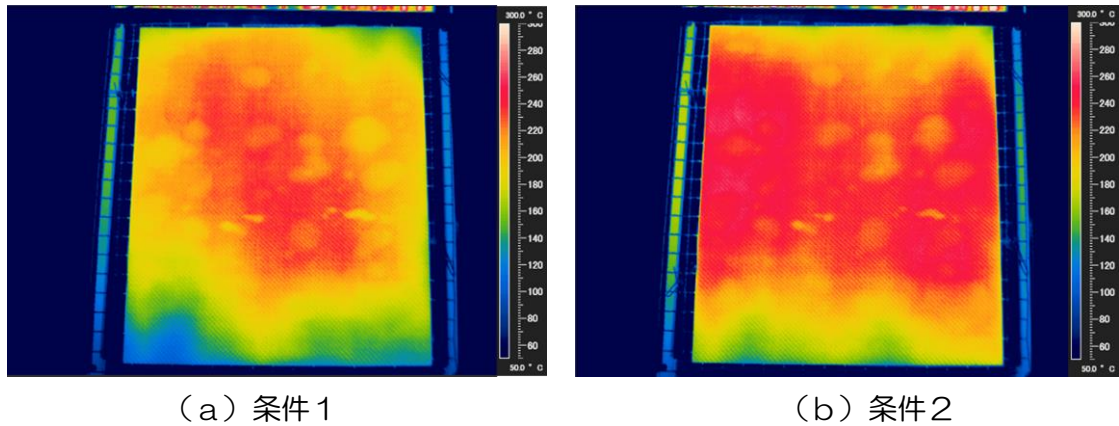


図4-1-3 温度分布（熱画像）の測定結果

搬送は、サーボモータにより移動の高速化と高精度化が可能となり、加熱終了後、金型投入までの時間は5秒（目標 10 秒以内）を達成した。

以上の結果、試作した加熱・搬送装置は、CFRP 材の加熱温度の制御および金型搬送の高速化と自動化を実現することを確認した。熱可塑性 CFRP は温度により樹脂粘度が異なるため成形性に大きく影響することから、本加熱・搬送装置を用いることで、CFRP 材の温度のバラツキが抑えられ、結果的に製品品質のバラツキを軽減するのに有効であると考えられる。

#### 4-1-3 種々のCFRP 材に対応した加熱・搬送データの蓄積

熱可塑性 CFRP を用いた成形品の用途拡大を図るためには、用途に応じた材料の選択が必要である。そこで、様々なマトリクス樹脂の CFRP 材を成形するための加熱条件についてのデータ蓄積を行った。

CFRP 材として、PPS 樹脂、PA66 樹脂、PC 樹脂製 CFRP（TEPEX： BOND LAMINATE 社（独））を入手し、加熱実験によりシートが柔らかくなる温度と時間の条件を求めた。1.5mm 厚の CFRP に対し得られた結果を表4-1-1に示す。

表4-1-1 各樹脂のCFRP 材の加熱条件

種類	樹脂	板厚(mm)	加熱温度(°C)	加熱時間(秒)
1	PPS	1.5	310	120
2	PA66	1.5	280	120
3	PC	1.5	250	120

## 4-2 炭素繊維微粉末の飛散防止対策技術の開発

### 4-2-1 概要

熱可塑性 CFRP 材の前加工、成形加工、搬送および取り扱い時などで炭素繊維の微粉末が板端面から発生し、空気中に広く飛散するため、作業員、工場電気設備などに障害を与えると予想される。本研究開発では、集合実験を通して、プレス加工時に発生する炭素繊維の微細粉塵埃を抑える工法を開発した。

### 4-2-2 CFRP 材端面処理の検討

Bピラー縮尺モデル金型による CFRP の成形では、成形直後は成形品のフランジ部分に不要部分が残る。これを除去して部品形状に整えるために、トリム金型による打ち抜き加工を行う必要がある。しかし、トリム金型による加工は、せん断によるもので、図 4-2-1 に示すように金型とトリム刃による切込みが入ったあと、切断面中央の最終破断部は材料が引き裂さかれることにより、右図のような炭素繊維が露出するのが観察される。

そこで、プレスの一行程で成形とトリムを同一金型で行い、切断した端面をプレスの加圧によって流動する樹脂で覆うことで平滑にする方法について検討した。

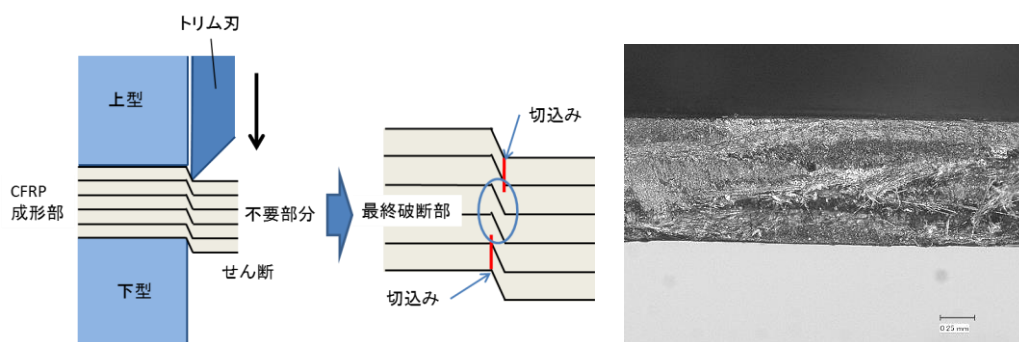


図 4-2-1 トリム加工によるせん断とその切断面

成形時にトリムを行い、成形されたハット曲げ部品の端部をマクロ観察した結果を図 4-2-2 に示す。端面は非常に平滑化されているのがわかる。さらに、成形品のフランジ部を切り出し、端部の断面を観察した結果を図 4-2-3 に示す。断面の炭素繊維層が端面に沿って曲げられており、さらに端面表層部に樹脂が入り込むことにより炭素繊維層を覆う状態となっているのが観察された。

この結果から、トリムと同時にプレス成形を行い、端面を平滑化する方法が炭素繊維微粉末の飛散防止に有効であると考えられる。

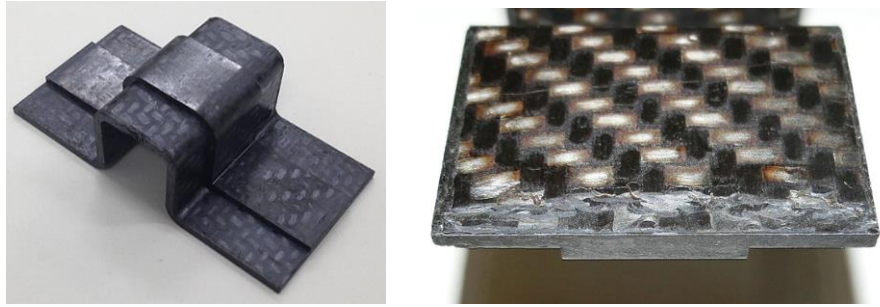
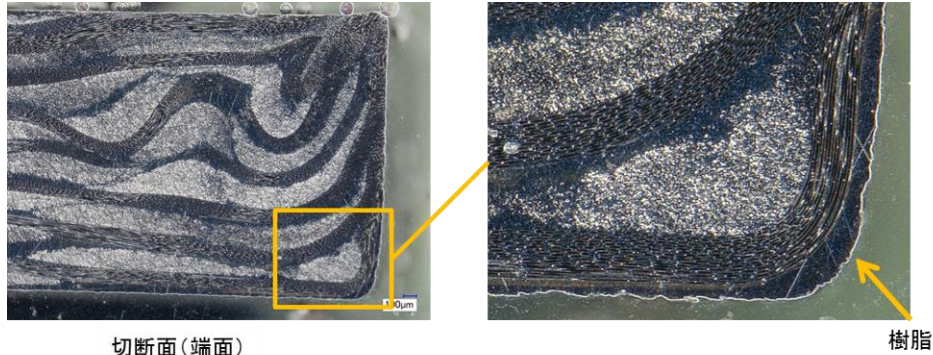


図4-2-2 成形品の外観および端面部のマクロ観察



切断面(端面)

樹脂

図4-2-3 光学顕微鏡による端面の断面観察

#### 4-3 開発した金型とプレス機械および周辺装置の集合実験評価

##### 4-3-1 概要

種々の CFRP 材に対し、本研究開発で開発したBピラー縮尺モデル金型を開発したプレスのスライド制御で集合実験を行い、金型の作動確認と金型の加熱・冷却および加圧におけるプレス制御方法について検討した。これにより、Bピラー縮尺モデル金型における成形時間30秒以内を実現するプレス成形技術の確立（成形時間の定義：加熱装置出口から離型までの時間）を目指した。

##### 4-3-2 ハイサイクル化のための集合実験評価

Bピラー縮尺モデル金型を用い、マトリクス樹脂の異なる CFRP 材を用いて成形実験を行い、成形品の曲げ試験による強度評価を行うことで成形品の諸特性と成形条件との関連性を調べ、最適条件を探索した。

CFRP 材は、厚さ 1.5mm で3K綾織りの炭素繊維に PPS、PA66、PC 樹脂製の市販品 TEPEX ((独) BOND LAMINATE 社) を用い、各 CFRP 材に応じた条件で加熱した後、自動搬送により金型に投入し、振り子モーシヨンによるスライド制御で成形した。

成形実験は、成形した成形品表面の状態を確認しながらダイハイトの位置を下げ、最適

な成形品を得るための加圧力を探索した。その結果、図4-3-1に示すように外観品質の良好な成形品を得るための加圧力は樹脂の種類によって異なり、同じ1.5mm厚であってもダイハイトを樹脂の種類に応じて変更することが必要であることがわかった。

これらの集合実験を行った結果、いずれのCFRPに対して、加熱取り出し後から金型上への搬送時間は約5秒で、成形時間は振り子モーショント下死点保持時間を15秒とすることで30秒以内での成形が実現された。

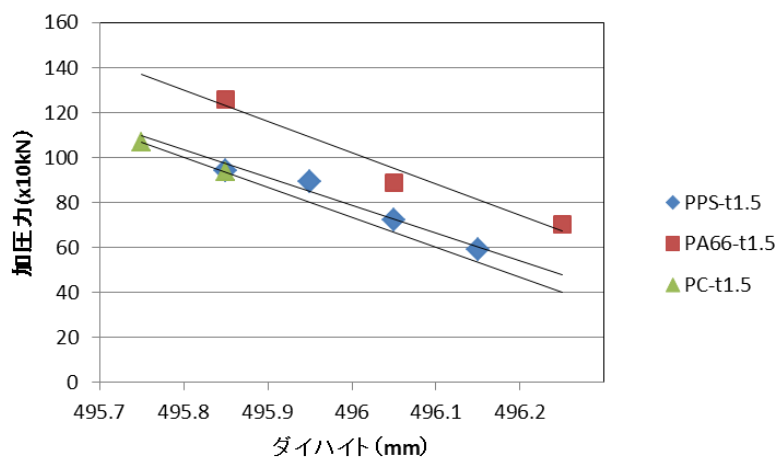


図4-3-1 ダイハイトと加圧力の関係

次に、1.5mm厚の各種CFRP材で成形したBピラー縮尺モデル成形品に対し、曲げ試験を実施し、SPCCを基準として剛性及び強度を比較した結果を、厚さ1mmPPS樹脂、0.7mmのSPCCの結果と併せて図4-3-2と図4-3-3に示す。これらの結果から、PA66樹脂の曲げ剛性や曲げ強度が最も良好な値を示し、PPSと同様にSPCCと同等以上の値が得られた。

以上より、各種CFRP材での成形条件および成形品に関するデータを蓄積することができた。

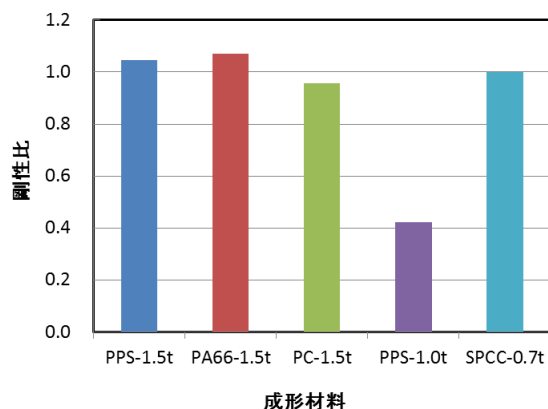


図4-3-2 剛性比較

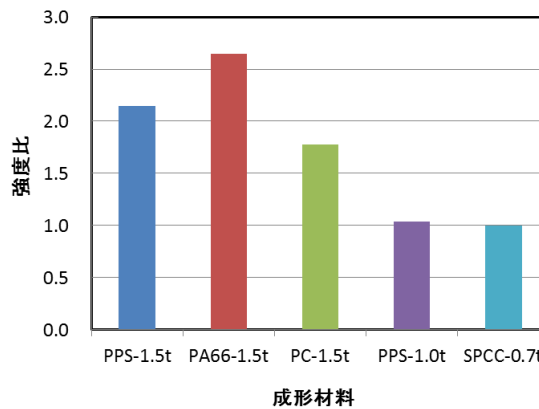


図4-3-3 強度比較

## 第5章 全体総括

### 5-1 研究開発成果

平成 24 年度から平成 26 年度までの研究開発期間において、軽量化のための利用が期待される熱可塑性 CFRP 製の自動車部品を短時間で成形するためのプレス成形システムを開発することを目的に、金型設計技術、プレス制御技術、ハイサイクル成形技術および接合技術の課題に取り組み、以下の成果を得た。

- (1) 自動車車体強度部品であるBピラーを対象として、この形状をモデル化した金型を設計・試作し、金型の性能評価および成形実験による成形品評価から、温度、圧力により樹脂物性が変化する熱可塑性 CFRP 材に対し、温度調整や適正な作動制御を行うことが可能な金型技術・ノウハウを蓄積した。これにより、表面品質に優れ、鋼板製部品と同等以上の剛性と強度を有する成形が可能となった。
- (2) 金型内で成形品縦壁部の樹脂密度を高め、必要な強度・剛性を得るための縦壁加圧を可能にする方法について検討した。特に、駆動カムを用いてスライド方向に作用する加圧力を機械的に水平方向に変換する機構を B ピラー縮尺モデル金型に適用した結果、縦壁部は水平部と比較して 90%以上の剛性と強度が得られ、縦壁加圧に有効な方法であることを確認した。
- (3) サーボプレスのスライドモーション機能を利用し、金型の作動と同期して熱可塑性 CFRP シート材を適正な速度で成形し、冷却と成形後の形状安定化に必要な下死点保持時間を有するスライドモーション制御方法を構築した。この制御を行うことにより成形時間30秒以内の目標を達成した。
- (4) 赤外線ヒータにより CFRP シートの加熱温度と加熱時間が制御でき、サーボモータ制御により金型上の決められた位置に高速・高精度で搬送できる加熱・搬送装置を開発した。CFRP 材の樹脂特性や板厚に応じて成形可能な温度に 180 秒以内で全面を均等に加熱でき、加熱終了後、金型上の所定の位置に投入されるまでの搬送時間 10 秒以内を実現させた。  
さらに、この加熱・搬送装置をプレス機械の制御と同期させることにより、熱可塑性 CFRP 材の加熱から成形に至る一連の工程を自動で行うことができるプレス成形システムを完成させた。
- (5) 部分的に厚肉な部品の成形を可能にするため、積層したシート材を加熱し、プレスによる加圧で溶着接合しながら成形方法を確立した。この方法を B ピラー要素モデル

に適用し、部分的に薄肉部に対し 2.5 倍の厚さ（目標 3 倍）の成形品を作製した。

(6) CFRP で成形した部品と金属製部品と接合する方法として、CFRP 製リベットを作製し、これを用いて接合する方法を開発した。

(7) 成形品のフランジ部の不要部分を除去するトリム加工と成形をと同時に行うプレス加工方法により成形品の端面を平滑化して炭素繊維微粉末の飛散を防止する方法を確立した。

## 5-2 研究開発後の課題・事業化展開

### (1) 研究開発後の課題

#### ①成形品の寸法形状精度の向上の検討

熱可塑性 CFRP 材で成形した成形品は、製造過程で加熱・冷却を行うため、樹脂の膨張・収縮がある。また、炭素繊維組織の異方性の影響もある。そのため、鋼板品に比べ寸法精度の誤差が大きくなる問題がある。

本研究では、入手できる CFRP 材の種類が限定されていたこともあり、炭素繊維の組織による検討が不十分であった。現在、県内中間基材メーカーにより様々な材料構成の CFRP シートが入手可能な状況になりつつあることから、これらの CFRP 材について成形実験を行うことにより、成形精度の向上させるための金型技術、プレス技術の開発を進めていく。

#### ②成形品の信頼性（耐久性）に関するデータの蓄積

熱可塑性 CFRP で作製した成形品を自動車部品等に適用していくためには、長期間にわたる強度信頼性に関するデータの蓄積が必要と考えられる。そのため、今後、試作した成形品について疲労強度特性評価等を実施していく。

#### ③接合技術のさらなる検討

本研究開発では、CFRP 材の接合技術についても検討を行ってきたが、特に PPS 樹脂に対しては市販の接着剤で良好な結果が得られなかった。そのため、接着剤の利用に適した CFRP 材の探索等を行う。また、本研究開発で提案したリベット接合についても信頼性向上の検討を進めていく。

特に、良好な接着技術の確立が不十分であったため、テストピースによる評価にとどまり、成形品に対する接合評価ができなかった。今後、これらについても検討を進めていく。

## (2) 事業化展開

### ①実証試験可能な CFRP 部品（保持器）の開発

熱可塑性 CFRP 製の保持器について、製品の知財化の検討を行っている。これまでの特許検索の結果、プレス成形によるものはなく、特許取得のための取り組みを行っていく。

また、本研究開発で製品トライ用として CFRP で試作した主要製造部品を取引先に提示したところ、現在鋼板や樹脂で加工している部品について、CFRP 材による成形試作の問い合わせを受けている。今後、このニーズに対応した実証試験可能なテスト部品の試作について検討し、事業化に結び付けたいと考えている。

### ②CFRP プレス品の量産加工体制の構築

石川県では産学官連携により熱可塑性 CFRP の中間基材（スタンパブルシート）の開発も行われており、県内の中間基材メーカーによる CFRP 中間基材の量産化による安定供給が期待されている。

現在、CFRP 材は海外製のものを使用しており、コストが高く、量産に限界があると考えている。そこで、量産化に向けては、低コストで高品質な材料供給が必要不可欠なことから、県内の中間基材メーカーとの連携を図っていく。具体的には、開発材料の提供により成形試作を行い、相互に情報交換を行うことで、CFRP 材の改良・改善に結び付けるとともにプレス成形技術データの蓄積を行っていく。

また、石川県プレス工業協同組合の会員企業による研究会を実施し、本研究成果であるプレス成形技術の普及や技術者の育成を図っていく。県内のプレス加工企業グループ内で技術を共有することにより、石川県プレス工業協同組合が共同受注窓口とする CFRP プレス品の量産加工体制づくりを目指していく。