

平成22年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「自動車構造部材用CFRP-金属ハイブリッド部品の
プレス成形加工技術に関する研究」

研究開発成果等報告書

平成23年 9月

委託者 関東経済産業局

委託先 矢島工業株式会社

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

- 1) 研究開発の背景
- 2) 研究の目的及び目標

1-2 研究体制

- 1) 研究組織
- 2) 管理体制
- 3) 開発日程

1-3 成果概要

- 1) 自動車構造部材に適したCFRP-金属ハイブリッド材料に関する研究
- 2) CFRP-金属ハイブリッド部材に適した金型技術に関する研究
- 3) CFRP-金属ハイブリッド部材のプレス成形加工に関する研究

1-4 当該研究開発の連絡窓口

第2章 本論

2-1 自動車構造部材に適したCFRP-金属ハイブリッド材料に関する研究

- 1) 概要
- 2) CFRP材料の材料仕様について
- 3) 鋼板とCFRP接合強度に関する評価試験について
- 4) 鋼板のプラズマ表面処理とCFRPの接合強度について

2-2 CFRP-金属ハイブリッド部材に適した金型技術に関する研究

- 1) 概要
- 2) ハット形、ハイブリッド B ピラー及びブレス部品の金型構造について
- 3) ハット形、ハイブリッド B ピラー及びブレス金型の表面温度解析結果について
- 4) ハット形・ハイブリッド B ピラー及びブレス金型表面温度分布の計測結果について

2-3 CFRP-金属ハイブリッド部材のプレス成形加工に関する研究

- 1) 概要
- 2) ハット形、ハイブリッド B ピラー及びブレス部品の成形加工性について
- 3) ハット形及び B ピラー部品の衝撃試験とブレス部品の静的強度試験について
- 4) ハット形及び B ピラー部品の衝撃解析とブレス部品の静的強度解析について

最終章 全体総括

- 1) 研究開発の概要(第1章)
- 2) 本論(第2章)

第1章 研究開発の概要

本研究開発においては、CFRPハイブリッド部品は自動車のBピラー及びブレス部品に特化し、この部品の成型加工技術に関する研究を行った。ハイブリッド部品の成型加工において、CFRP材料仕様の調査や、金型構造およびCFRP接合プレス成形法の開発は、本研究の主要課題である。CFRP材料仕様と金属接合の研究では、エポキシ樹脂をマトリックスとした炭素繊維複合材料仕様の調査と金属の表面処理について調査し、接合強度を得る的確な条件について検討した。CFRP金型の研究では、金型の構造解析や金型表面温度解析の結果と経験的ノウハウを融合させて金型設計を行い、CFRP成形金型構造を検討する。ハイブリッド成形金型の設計・製作は、プレス成形性、即ち、部品のしわ、割れ、寸法精度等の検討を行い、金型の熱膨張によるクリアランスやCFRP成形加工等を考慮して金型構造を決定し製作するプロセスを実施した。CFRPハイブリッド成形加工に関しては、CFRP部品のプリフォームや金型温度条件及び成形加工条件が必要となるため、それらの課題に付いて研究した。プリフォームについては、炭素繊維の配向性を変えてプリプレグを積層して強度・剛性の影響を研究する。CFRPハイブリッド部品の評価は側面衝突相当の落垂体衝突試験を実施し、ハイブリッドBピラーの動的衝撃特性を現生産Bピラーと比較調査するが同時に衝撃解析も行い相関性を検討した。ハイブリッドブレス部品は、静的強度試験を行うと共に静的曲げ強度解析を行い評価した。CFRP-金属ハイブリッド部品のプレス成形加工は、適切なCFRP材料や高精度な金型構造と的確な成形加工条件、即ち、金型表面温度やプレス成形圧力・成形時間等の要素を明確にし、的確なプレス接合強度・剛性が得られるハイブリッドBピラー及びブレス部品の成型加工技術を確立する研究とした。

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

近年、地球温暖化対策のためにCO₂の削減や省エネルギーのための燃費の向上など、自動車の軽量化による対策は、社会的に急を要し、軽量化に対する価値観が高まっている。特に経産省と国交省は2020年の燃費基準を2009年比24.1%、現行基準(2015年)比19.6%向上する基準案を発表した。また米国では2025年までに平均54.5mile/gal.(23.2km/l)の燃費規制を課す発表があった。一方自動車のCO₂排出自主規制は2012年においては120g/km(EU市場)を目標とする等の時代背景があり自動車の軽量化施行が急激に進んでいる。また、HV車や高効率な電気自動車の航続距離を伸ばすためには、車両の軽量化は必須の条件である。このような背景のなかで川下製造業者が抱える軽量化に対する研究開発のニーズは、軽量化材料としてCFRPの優れた特徴を生かした構造部品の開発が焦点となっており、図-1に示した車体骨格構造のBピラー部品等のCFRP金属ハイブリッド化の研究開発を期待している。更に、車両の機能部品等へ適用が考えられ、自動車部品のCFRP金属ハイブリッド化は、将来日本経済を支える21世紀の主要な自動車用部品として注目されている。これらの部品の軽量化が進み車両質量が約10%軽減されると燃料消費量は約7%向上し、CO₂削減量も約3.5%削減される試算があり、CFRP-金属ハイブリッド部品の生産性の向上とコスト低減に期待がかかる。また、CFRP金属ハイブリッド部品は、高強度・高剛性を有する

物性となるばかりでなく、エネルギー吸収特性に優れ、リサイクルが可能な部品であるため、他分野産業の商品に適用され、地域の新規産業と雇用の創出に貢献できる。構造部品のCFRP金属ハイブリッド化は、自動車の構造を画期的に変革する可能性を持つもので、自動車業界や他の産業界における軽量化対応の期待は大きい。このような社会的背景による自動車用骨格構造のCFRP-金属ハイブリッド B ピラー及びブレース部品の研究開発は期待が大きい。これらの部品の効率的な生産性を確立するためには、CFRP-金属ハイブリッドのプレス成形加工法が必要である。CFRP-金属ハイブリッドのプレス成形加工に関する研究開発の重要性はこの様な背景に基づくものである。

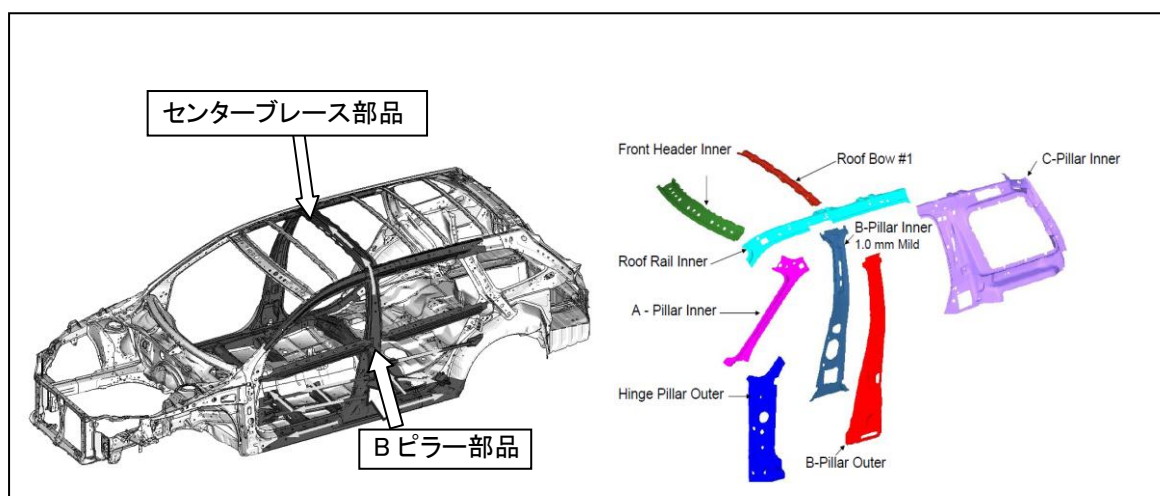


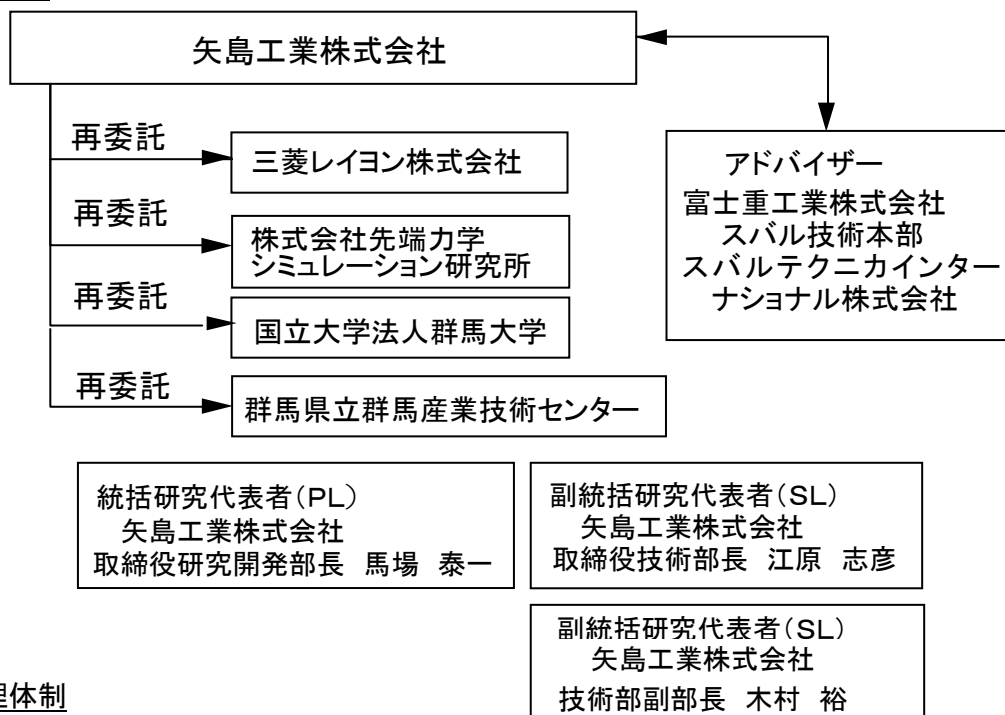
図-1 車体骨格構造の B ピラーとブレース部品

2) 研究の目的及び目標

本研究開発の目的は、車体軽量化のために、車体の構造部をCFRP-金属ハイブリッド部品に置換する場合、プレス成形加工において金型設計と製作、および成形加工性に関する技術的な課題がある。そこで金型設計に関しては、構造解析や金型温度解析技術と、技術的ノウハウを融合させてCFRP-金属ハイブリッド部品用金型の最適化を図る研究を行うこととした。また成形加工技術は、高精度な金型と高精密なプレス機による成形条件を整合させて、CFRP-金属ハイブリッド部品のプレス成形加工技術を確立することとした。CFRP材料と金属の接合強度に関しては、材料調査と表面処理の研究を行い、CFRP-金属ハイブリッド部品の成形に適用し、衝突特性や静的強度特性を解明することとした。本研究開発の目標は、CFRPプレス部品の金型設計に関する構造解析や金型の温度分布解析を基本とする高精度な金型技術の確立と、CFRP-金属ハイブリッド部品の成形加工に関する高度な基盤技術を確立することとした。CFRP-金属ハイブリッド部品の金型製作に関しては、経験的な技術的ノウハウに属する実用的技術を駆使して、効率的に金型の製作を行うこととした。また、CFRP-金属ハイブリッド B ピラー及びブレース部品の成形加工性に関しては、高精度な金型とCFRPプレス機により、生産的な成形加工条件を明らかにすることとした。以上の研究開発プロセスにより、金型設計・製作を合理的に実施し、CFRP-金属ハイブリッド部品に関するプレス成形加工技術の確立を図ると同時に、ハイブリッド部品の生産化対応の検討を行うこととした。

1-2 研究体制

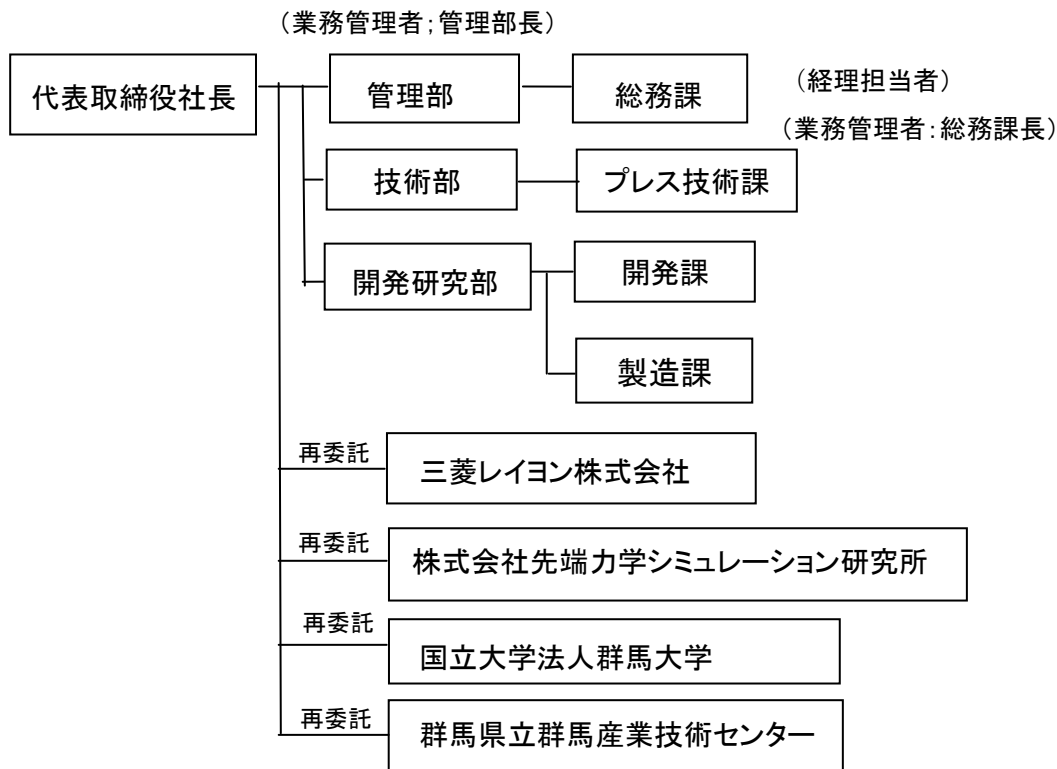
1) 研究組織



2) 管理体制

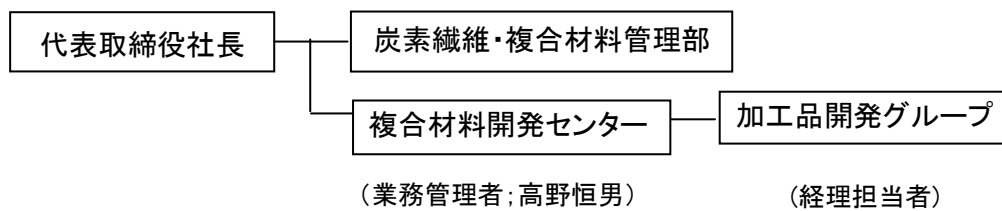
(1) 事業管理者

[矢島工業株式会社]

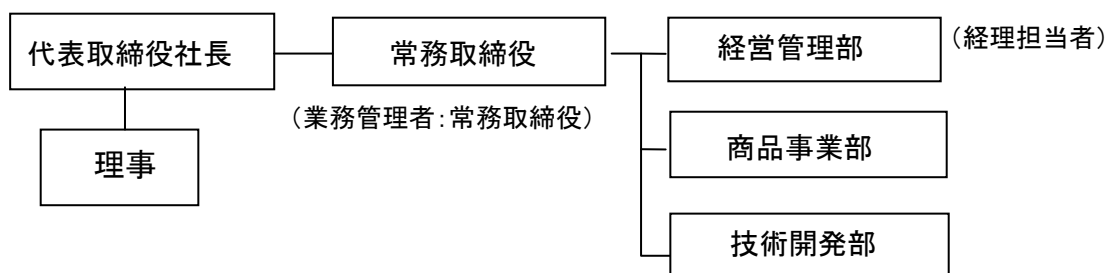


(2) 再委託先

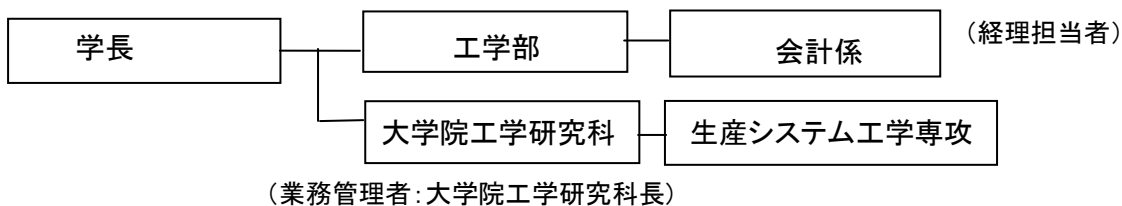
[三菱レイヨン株式会社]



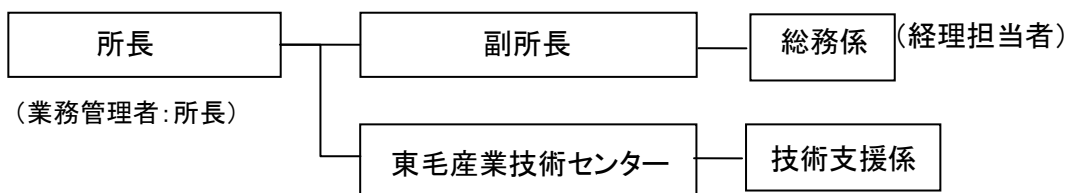
[株式会社先端力学シミュレーション研究所]



[国立大学法人群馬大学]



[群馬県立群馬産業技術センター]



(3) 管理員及び研究員

【事業管理者】 矢島工業株式会社

①管理委員

氏名	所属・役職	備考
小野寺 成悦	管理部 部長（事務統括）	

②研究員

氏名	所属・役職	備考
馬場 泰一	取締役 開発研究部・部長	
江原 志彦	取締役 技術部・部長	
木村 裕	技術部 副部長	
長田 弘明	開発研究部・製造課長	
田中 鋭次	技術部・プレス技術課長	
篠原 悦男	技術部・プレス技術課主任	
山本 重人	開発研究部・研究員	
永井 祥一	開発研究部・研究員	
生方 雅也	開発研究部・研究員	

【再委託先】

研究員

三菱レイヨン株式会社

氏名	所属・役職	備考
風早 雄二	加工品開発グループ副主任研究員	
柿本 佳秀	加工品開発グループ副主任研究員	

株式会社先端力学シミュレーション研究所

氏名	所属・役職	備考
法川 剛二郎	コンサルティングプロジェクト研究員	
生山 友博	コンサルティングプロジェクト研究員	
大川 由夫	経営管理部 部長	

国立大学法人群馬大学

氏名	所属・役職	備考
渡利 久規	大学院工学研究科生産システム 工学専攻 教授	

群馬県立群馬産業技術センター（東毛産業技術センター）

氏名	所属・役職	備考
小谷 雄二	東毛産業技術センター技術支援係 独立研究員	
薄波 圭司	群馬県立群馬産業技術センター 技術支援係・主任	

協力者及び開発推進委員

氏名	所属・役職	備考
馬場 泰一	矢島工業株式会社 取締役 開発研究部長	PL <input type="checkbox"/> 委
江原 志彦	矢島工業株式会社 取締役 技術部長	SL <input type="checkbox"/> 委
木村 裕	矢島工業株式会社 技術部 副部長	SL <input type="checkbox"/> 委
小川 繁樹	三菱レイヨン株式会社 AN 技術統括室 部長	<input type="checkbox"/> 委
大川 由夫	株式会社 先端力学シミュレーション研究所 経営管理部長	<input type="checkbox"/> 委
渡利 久規	国立大学法人群馬大学大学院工学研究科 教授 群馬県立群馬産業技術センター	<input type="checkbox"/> 委
小谷 雄二	(東毛産業技術センター)独立研究員 特定非営利活動法人 北関東産官学研究会	<input type="checkbox"/> 委
八木 正博	サブクラスターマネージャー	アドバイザー
荻原 浩	富士重工業株式会社 スバル技術本部 技術開発部長	アドバイザー
大和 正明	スバルテクニカインターナショナル株式会社 商品企画部長	アドバイザー

3) 開発日程

実施内容	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月
①自動車構造部材に適したCFRP-金属ハイブリッド材料に関する研究		←————→							
②CFRP-金属ハイブリッド部材に適した金型技術に関する研究		←————→							
③CFRP-金属ハイブリッド部材のプレス成形加工性に関する研究					←————→				
④プロジェクトの管理・運営 研究開発推進委員会 報告書作成	←———— プロジェクトの管理・運営 ———→								
				○			○	○	←→

1-3 成果概要

自動車用骨格構造のCFRP-金属ハイブリッドBピラー及びブレス部品のプレス成形加工技術に関する研究開発は、金属Bピラーおよび金属ブレスの表面とCFRP材(*¹プリプレグ)の接合技術の確立が極めて重要である。そこで、接合強度に影響を及ぼす金属表面処理方法の検討を行い、試験片による接合強度試験にて、最適処理方法を明らかにした。具体的には金属表面処理はプラズマ処理が安定的で、接合強度に有利であることが判った。成形金型構造は、構造及び熱解析等の効率的な設計手法と経験的技術の融合により、金型表面温度の均一化が図れ、高精度な成形金型を設計・製作することができた。ハイブリッドBピラーとブレス部品の成形加工は、適切なCFRPプリフォームと金型表面温度条件や、高精密なプレス機による成形圧力条件を設定し、成形加工を行った。成形時間は、生産的なサイクルタイムで成形することができた。この研究開発により、ハイブリッド成形加工技術は、ほぼ確立できた。ハイブリッド成形部品の強度・剛性に関しては衝撃解析や静的強度解析並びに、衝撃試験、静的強度試験を行い、接合強度を解明し評価した。その結果、ハイブリッド部品の強度・剛性特性は、解析結果と試験結果の相関がよくない結果のものも有ったが、ほぼ期待通りの成果を得ることができた。これらの研究開発により、ハイブリッド部品の成形加工技術の確立と、成形サイクル短縮化等の生産化対応に関する貴重な成果を得た。研究課題と成果の概要は下記に示した。

1) 自動車構造部材に適したCFRP-金属ハイブリッド材料に関する研究

- (1) 自動車構造部材に適したCFRP金属ハイブリッド材料の基本特性として、CFRP材の材料仕様を調査した。更にCFRP材料の積層による接合強度を知る必要があるため、金属表面処理と剥離強度について検討した。積層による剥離強度は、CFRPハット形部品(*²CF-PCM)構造に、衝撃荷重を加えて評価した結果、ハット形状部は問題なかった。底板との接合(接着)強度は不十分であった。
- (2) 金属鋼板とCFRPの接合強度に関しては、適切な表面処理を行い、安定的接合強度を得るために表面処理に関する研究を行った。その結果、鋼板表面の脱脂有り、無しによる接合強度の影響は大きく、CFRPとの接合強度を確保するためには、鋼板の表面処理が重要な要素であることが判った。接着強度は、3点曲げ剥離試験で評価したが、脱脂処理(*³プラズマ処理)にCFRPを接合した試験片の剥離強度は、優れた荷重-変位特性を有することが判った。

2) CFRP-金属ハイブリッド部材に適した金型技術に関する研究

- (1) CFRP-金属ハイブリッド成形加工プロセスは、Bピラー補強部品用*⁴プリフォーム(CFRP)を作成し、鋼板製Bピラー部品及びブレス部品に、プレス接合成形する方法である。CFRPプリフォーム型やBピラー及びブレス金型構造は、3次元データを基準に、構造解析を行い、金型設計・製作の最適化検討を行った。また、成形金型は加熱するため、熱膨張の影響を考慮した高精度な構造とした。更に金型表面温度の均一化を図るため、金型の熱解析を行い、適正な温度センサー位置やヒータ挿入位置を有する構造とした。金型の設計・製作は、金型に関する解析と実践的ノウハウを融合させたハイブリッド成形金型技術を駆使して設計・製作した。その高精度なハイブリッド成形金型と的確な成形条件により、CFRPハイブリッドBピラーとブレス部品のプレス成形加工に成功した。

- (2) 金型表面温度分布の解析は、CFRP-金属ハイブリッド金型構造を決定する際の重要な情報ツールとなる。成形用ハット形金型、ハイブリッド B ピラー金型、及びブレス金型は大きさや構造が異なるため、金型に最適な熱源ヒーター位置、本数・出力や温度制御法、断熱特性等の条件を設定し、表面温度分布の解析を行った。解析ソフトは ASU/MOLD 解析シミュレーションソフトを使用し、専用プリポストにより解析データの作成や計算の実行及び可視化を行った。また、その有効性を検証するために金型表面温度計測を行った結果、ほぼ一致した温度分布となった。金型表面温度分布の確認は、本手法が有効であることが解った。
- (3) CFRPハット形成形金型やハイブリッド B ピラー及びハイブリッドブレス金型は、鋼板とCFRPの接合や成形加工上、均一な温度分布を有する構造とする必要がある。したがって、金型構造は表面温度解析結果に基づき、熱源ヒーターの位置、設置本数、断熱材の設置等を考慮した構造とした。金型温度は樹脂を硬化させる最適温度に設定し、熱源ヒーターの的確なブロック制御を行い、金型表面温度の均一化を図った。検証の結果、ほぼ目標通りの金型表面温度分布を有する構造とすることができた。

3) CFRP-金属ハイブリッド部材のプレス成形加工に関する研究

- (1) CFRP(CF-PCM)材料の成形加工は、ハット形とハイブリッド B ピラー及びブレス部品のプリフォームを製作し、成形金型にプリフォームを設定して、適切な成形条件(金型温度およびプレス圧力・成形時間等の条件)により、プレス成形加工を行うものである。ハット形部品のプリフォームは、CFRPプリプレグを積層して賦形した。成形加工は、金型に離型剤を塗布して的確な成形条件にて、プレス成形加工を行い、ハット形部品の製作に成功した。ハイブリッド B ピラーおよびブレスのCFRP補強部品のプリフォームは、最適仕様に積層し、Bピラー及びブレス部品に、的確なプレス条件にて成形加工を行った。その結果、期待通りのハイブリッド部品を成形することができた。
- (2)ハイブリッド B ピラー及びブレス部品は、CFRPプリフォームを的確に接合するため、鋼板表面にプラズマ処理を行い、プレス成形を行った。プレス成形加工は、B ピラー及びブレス板金部品にプリフォームをセットし、それを成形金型上に設置して、的確な条件でプレス成形を行った。その結果、期待通りプレス成形加工ができた。
- ハイブリッド B ピラー、ブレス部品の接合強度の評価は、衝撃試験や静的強度試験で検証した結果、極めて有用な強度特性と破壊モードを確認することができた。
- ハイブリッド B ピラー部品は、落垂体衝撃試験、ハイブリッドブレス部品は、静的曲げ試験を行い、ほぼ目標通りの強度特性と、CFRPの曲げ荷重による破壊モードを確認することができた。
- (3)CFRPハット形部品及びハイブリッド B ピラー部品の強度は、衝撃シミュレーション解析と衝撃試験を行い、特性の相関性と、鋼製部品の衝撃特性の比較評価を行った。衝撃解析のソフトは LS-DYNA を使用して解析したが、試験結果と比較すると定性的には、妥当性のある相関が得られた。衝撃試験では車両の*⁵側面衝突時の条件を再現する衝撃荷重を負荷させた。ハット形部品の衝撃時の現象は、解析結果とは、あまり良い相関性を示さなかった。ハイブリッド B ピラーの衝撃試験では破壊モードを確認することが出来た。解析結果と比較すると、かなり良い相関性を示す結果が得られた。ブレス部品の強度・剛性は静的曲げ試験を行い評価したが、強度ほぼ期待通りの成果が得られた。解析結果との相関性は、あまり良くなかった。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

矢島工業株式会社 開発研究部 馬場 泰一
電話番号;0276-32-3633, Fax;0276-31-1315
E-mail;baba@syms.co.jp

専門用語の解説

- 1) *¹ プリプレグ(Prepreg); 数 μ mの炭素繊維に熱硬化性樹脂(エポキシ等)を含浸された複合材料で炭素繊維が一方向に並んでいるもの、繊維が90度に直交したもの、45度方向にクロスした繊維のものがある。それらの炭素繊維に樹脂を含浸させた複合材料で、薄いシート状になっている材料である。
- 2) *² CF-PCM; Carbon Fiber-Prepreg Compression Molding の略で、炭素繊維の長いプリプレグのプレス成形加工法を言う。
- 3) *³ プラズマ表面処理; 空気中の酸素や窒素などを高電圧にて、電離させることによりプラズマを発生させる。放電域では、このプラズマにより酸素や窒素などが活性ガス化し、材料表面の有機物と結合して除去作用を促進する処理方法である。
- 4) *⁴ プリフォーム; 部品形状の型にプリプレグを積層したCFRP部品形状。プリプレグ積層には、空気等を脱気させる工程が必要で、高精度なCFRPプレス部品を成形する場合、プリフォームの精度が重要となる。
- 5) *⁵ 側面衝突; 実際の市場で発生する側面衝突事故を、再現させて、乗員の生存空間の確保を評価する試験。試験方法は、米国方式、欧州方式の2種類があるが国内ではムービングバリア衝突速度50km/hrの速度としている。

第2章 本論

2-1 自動車構造部材に適したCFRP-金属ハイブリッド材料に関する研究

1) 概要

構造部材に適したCFRP-金属ハイブリッド材料は、炭素繊維にエポキシ樹脂をマトリックスとした複合材料で、三菱レイヨン製プリプレグ(125Sと250S)を使用して、CFRP材の接合特性や鋼板との接合特性を調査した。CFRP材の接合特性はハット形の衝撃試験を実施した。また鋼板との接合特性は、一般鋼板表面に一定の成形条件にて、CFRPを接合したテストピースを作製し、曲げ剥離試験を行った。鋼板の表面処理は、プラズマ脱脂法を主に適用した。CFRPハット形部品の衝撃試験では、底板部品との接合(接着)強度が不十分であった。試験片によるCFRPの曲げ強度特性は、鋼板表面の脱脂無しは、極めて低い荷重で剥離現象を起し、不適切な仕様であると判明した。プラズマ表面処理法による接合曲げ強度は、安定的な高い強度特性を示し、接合効果は高いことが判明した。

2) CFRP材料の材料仕様について

エポキシ樹脂をマトリックスとした炭素繊維複合材料は三菱レイヨン製プリプレグ(125Sと250S)を使用することとしCFRP材料仕様を調査した。その性状を表-1に示した。

	CFRP プリプレグ仕様 125S&250S 材料
繊維重量 [g/m ²]	125 & 250
樹脂重量含有率 [wt%]	30.0
樹脂重量 [g/m ²]	53.6 & 107.2
繊維密度 [g/cm ³]	1.82
樹脂密度 [g/cm ³]	1.25
プリプレグ重量 [g/m ²]	178.6 & 357.2
繊維体積含有率 [vol%]	61.6
プリプレグ厚み [mm]	0.112 & 0.223
プリプレグ密度 [g/cm ³]	1.60

表—1 CFRP 材料仕様

3) 鋼板-CFRP接合強度に関する評価試験について

鋼板脱脂あり・なしの接合強度は、脱脂ありのほうが最大曲げ荷重が大きく、脱脂無しは剥離強度のバラツキが大きかった。鋼板の表面油脂除去の有無による接合強度の影響は、大きく接合強度を確保するためには、鋼板の表面処理が重要である結果を得た。

4) 鋼板のプラズマ表面処理とCFRPの接合強度について

CFRP材と鋼板の接合強度を安定的に高め、且つ生産性のある脱脂処理として注目し、プラズマ処理法で鋼板表面の脱脂処理を行い CF-PCM 加工法によりCFRPを接合し、曲げ剥離強度を行った結果、剥離強度はバラツキが少なく安定的であることが判明した。図-2 に接合曲げ試験、図-3 に曲げ試験結果を示した。

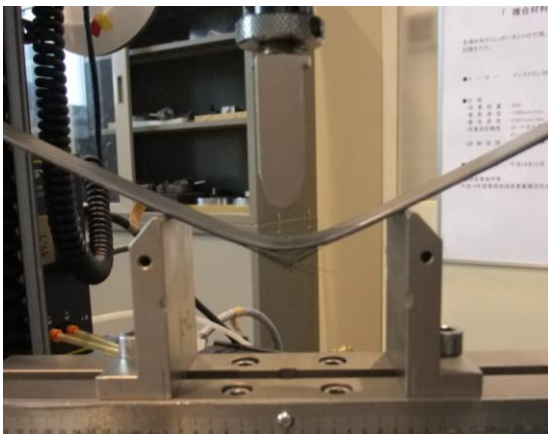


図-2 CFRP 接合曲げ試験

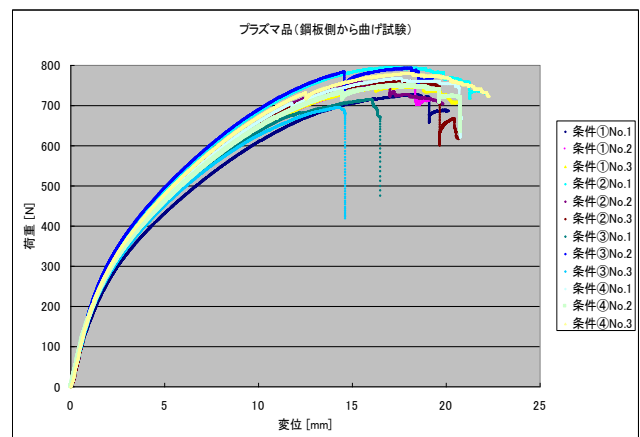


図-3 プラズマ処理 CFRP 曲げ特性

2-2 CFRP-金属ハイブリッド部材に適した金型技術に関する研究

1) 概要

金型設計は、CATIA ソフトを使用して部品形状に基づいた金型構造の設計を行った。その構造は、CFRP-金属ハイブリッドの加工性に適した構造とするために、構造解析を行い、更に、金

型温度分布の熱解析を行って金型構造を決定した。その金型データをNC化して経験的ノウハウを駆使して高精度な金型を製作した。ほぼ目標通りの成果を得た。

2) ハット形、ハイブリッドBピラー及びブレス部品の金型構造について

①ハット形部品金型の構造は図-4に示した。金型構造は、成形加工上、食い切り構造とし、金型クリアランスは、熱膨張を考慮した精度を有するものとした。また金型温度分布は、熱解析結果を反映した構造とした。

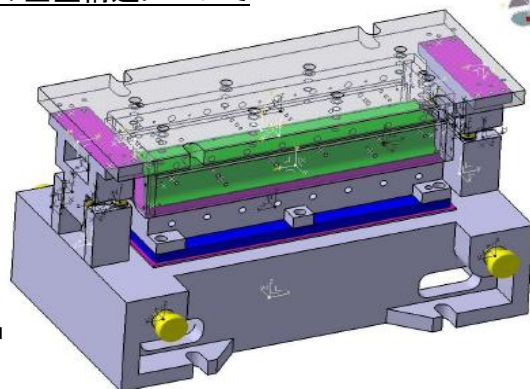


図-4 ハット形部品金型

②ハイブリッドBピラー金型は、鋼製Bピラー部品の3Dデータに基づき、CFRP補強部品構想を勘案して、通常金型設計手法で金型構造の設計を行った。金型クリアランスは、熱膨張を考慮した高精度な金型構造とし、表面温度均一化用のヒーター穴・温度センサー位置は、金型熱解析結果と切削加工技術を融合させて、マシニングセンターで連続加工を行い、ハイブリッド金型を製作した。図-5、図-6、図-7、に金型構造図を示した。

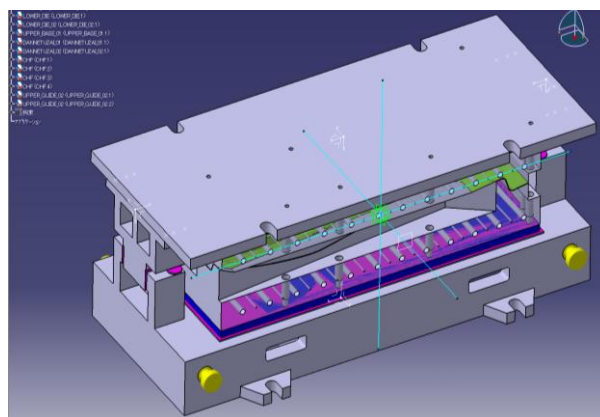


図-5 ハイブリッドBピラー金型

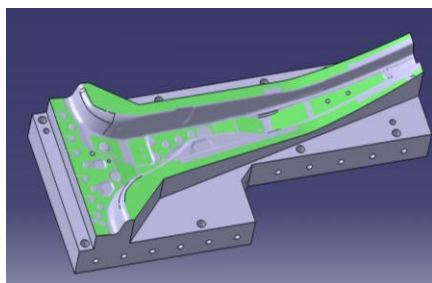


図-6 ハイブリッドBピラー下金型

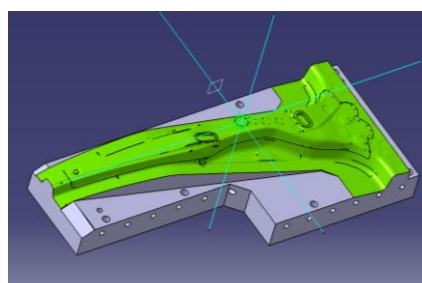


図-7 ハイブリッドBピラー上金型

③CFRPハイブリッドセンターブレス金型構造

ハイブリッドセンターブレス金型構造は、通常設計プロセスで、鋼製センターブレスの3Dデ-

ターに基づき、生産部品と強度・剛性を等価的にするために、板金ブレス部品とCFRP補強部品、および熱膨張を配慮した高精度な金型構造とした。金型表面温度均一化用のヒーター穴・温度センサー位置は、金型熱解析結果と切削加工技術を融合させて、マシニングセンターで連続加工を行い、金型を製作した。図-8、図-9、図-10にブレス金型構造図と金型 A' ssy 写真を示した。

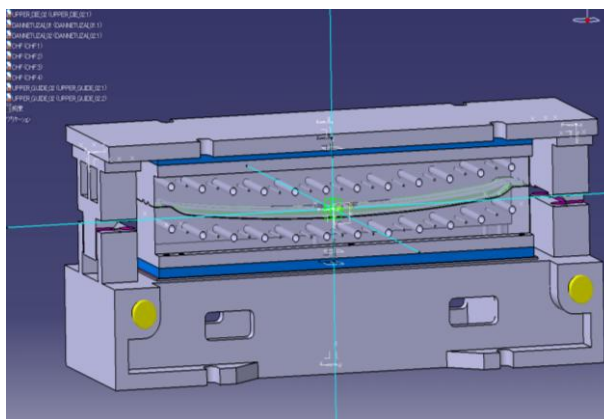


図-8 ハイブリッドセンターブレス A' ssy金型構造

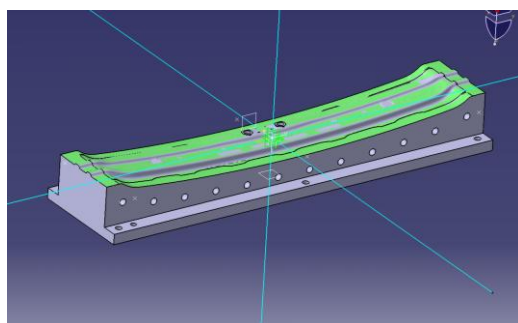


図-9 ハイブリッドブレス上金型構造

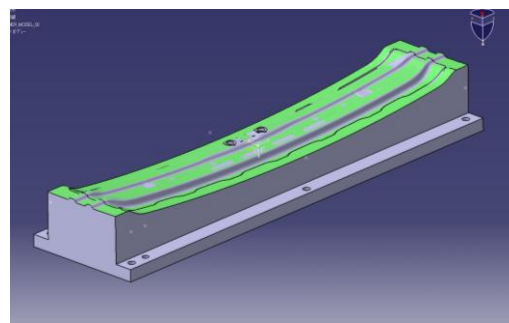


図-10 ハイブリッドブレス下金型構造

3) ハット形、ハイブリッド B ピラー及びブレス金型の表面温度解析結果について

金型温度解析モデルは、金型の3Dデータを基本に作成し、有限要素法を用いた熱解析ソフトで金型温度分布の解析を行った。金型を加熱する方法は電気ヒーター方式、蒸気加熱方式が一般的であるが、本研究では、電気ヒーター方式を使用して、金型を加熱する手法で金型表面温度の均一化を図る解析とした。その結果、ほぼ目標通りの成果が得られた。

①ハット形金型温度解析、解析結果を図-11、12に示した。

解析条件は、ヒーター本数上下金型各 8 本、総発熱量 11200W とした。

②ハイブリッド B ピラー金型温度解析、解析結果を図-13、14に示した。

解析条件は、ヒーター本数上下金型各 12 本、総発熱量 16800W とした。

③ハイブリッドブレス金型温度解析、解析結果を図-15、16、に示した。

解析条件はヒーター発熱量 700W、ヒーター本数上下金型各 8 本、総発熱量 11200W とした。

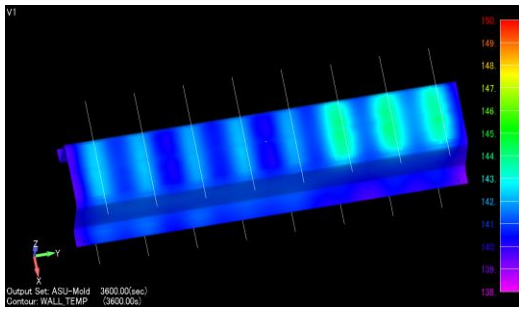


図-11 ハット形金型温度分布(表面)

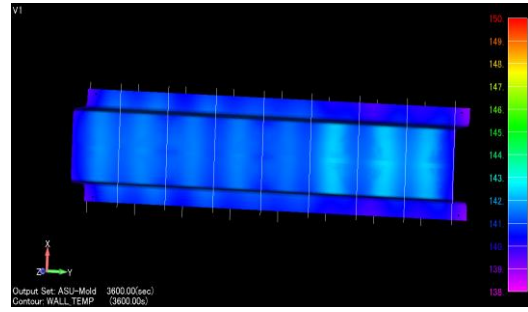


図-12 ハット形金型温度分布(裏面)

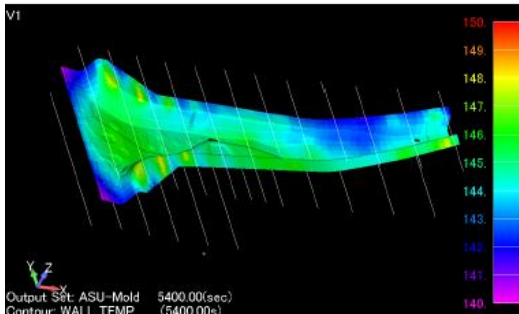


図-13 ハイブリッドBピラー下金型温度分布

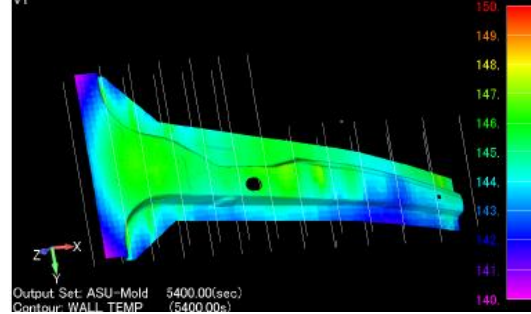


図-14 ハイブリッドBピラー上金型温度分布

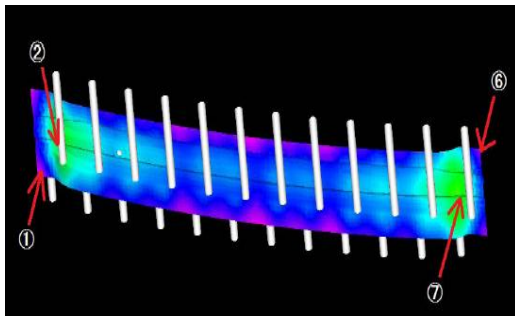


図-15 ハイブリッドブレス下金型温度分布

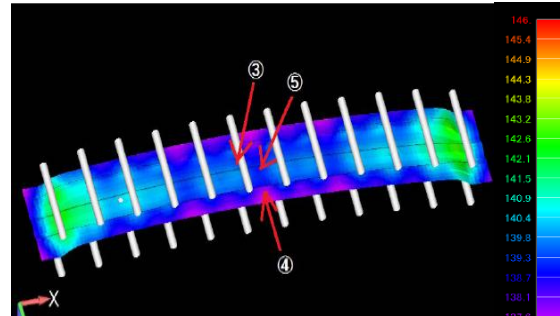


図-16 ハイブリッドブレス下金型温度分布

4) ハット形、ハイブリッド B ピラー及びブレス金型表面温度分布の計測結果について

金型の表面温度計測は熱解析結果に基づき上、下金型の加熱ヒータ制御による温度分布を計測した(図-17)。その結果、金型の表面温度は目標の $140 \pm 3^\circ\text{C}$ にほぼ入っており、温度制御の最適化が図れた。熱解析結果との相関性は比較的良かった。

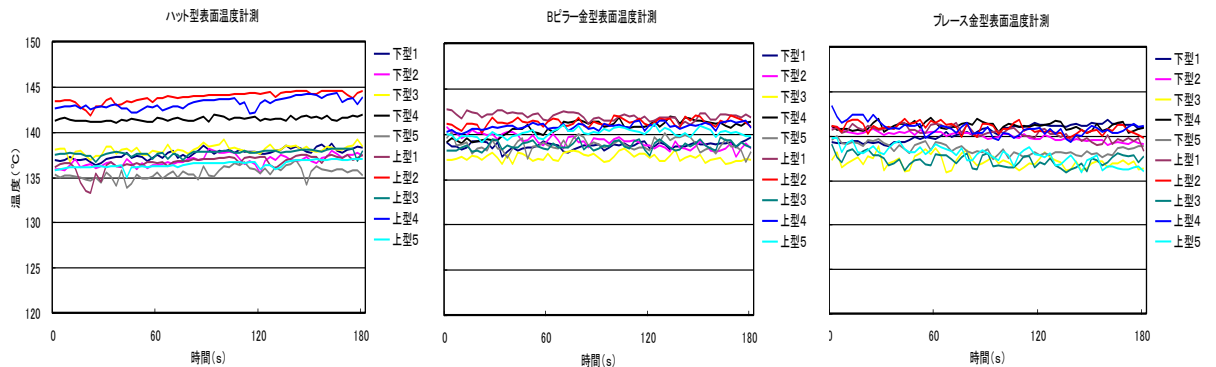


図-17 金型の表面温度計測結果

2-3 CFRP-金属ハイブリッド部材のプレス成形加工に関する研究

1) 概要

CFRP-金属ハイブリッド部材のプレス成形加工のプロセスは、CFRP部品のプリフォームを成形し、B ピラーやブレース(鋼板)のCFRP接合面における表面処理を行い、加熱された高精度な成形金型上にプリフォームと共に設置して、高精密なプレス機により、適正なプレス成形条件を加え、CFRP-金属ハイブリッド成形加工を行った。B ピラーやブレースのCFRP補強部品のプリフォームは、高精度なプリフォーム型により製作し、鋼板接合面はプラズマ処理を行い、金型表面温度を $140\pm 3^{\circ}\text{C}$ に制御して、適正な成形加工条件を加え、12 分/サイクルで成形加工を行った。ハット形の成形加工はプリフォームセッティング治具を金型に装着する必要があることが判った。

2) ハット形、ハイブリッド B ピラー及びブレース部品の成形加工について

①ハット形の成形加工はプリフォームセッティング治具を金型に装着し、成形条件を決めてプレス加工を行った。図-18 に示したように目標通りのCFRPハット形部品を成形することができた。



図-18 CFRP ハット形成形部品

②ハイブリッド B ピラーの成形加工はCFRP補強部品用プリフォームを精度良く製作し、B ピラー表面にプラズマ処理を施して、金型上に設置した。さらに、金型表面温度と鋼板 B ピラーの表面温度を確認し、離型材を塗布して、高精密プレス機にて適正な成形条件を設定して、成形加工を行った結果、ハイブリッド B ピラーの成形加工に成功した(図-19)。



図-19 ハイブリッドBピラーの成形部品

③CFRPハイブリッドブレース部品の成形加工は、鋼板ブレース部品にCFRPプリフォームを的確に接合する加工条件が必要である。成形加工プロセスはブレース用のプリフォームを製作し、鋼板ブレース接合面にプラズマ処理を行い、金型上にセットする。金型表面温度と鋼板ブレースの表面温度を確認し、離型材を塗布して、適正プレス成形条件を負荷し、成形加工を行った。

ほぼ目標通りのハイブリッドブレース成形部品を得た。図-20 にハイブリッドブレース部品を示した。

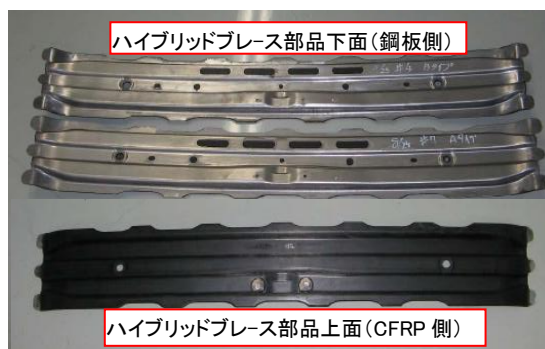


図-20 ブレース成形部品

3) ハット形及び B ピラー部品の衝撃試験とブレース部品の静的強度試験について

衝撃試験条件は落垂体衝突速度を自動車の側面衝突とほぼ同一条件として JARI(日本自動車研究所)にて実施した。その結果、ハット形部品の衝撃特性は鋼板製と比較するとCFR

P材の弾性率の差分を修正する必要があることが判明した。またBピラーは鋼板製部品と比較するとハイブリッドBピラーの衝撃特性は21.5~32.5%低いく構造的に改善する必要があることが解った。センターブレスは静的曲げ試験を実施したが、鋼板製部品の入手が出来なかったためハイブリッドブレス部品だけの試験となった。その結果曲げ強度はかなり高く、接合強度の効果は大きいことが判った。

- ①ハット形部品の衝撃試験状況を図-21に示した。鋼板製ハット形部品は完全に塑性変形をしていたが、CFRP製ハット形部品は弾性変形の形態を示していた。衝突荷重にたいし、CFRP部品は、底板との接合部に剥離が発生していた。鋼板ハイブリッド部品と等価的な吸収エネルギー特性を有するには、更なる検討が必要となった。



図-21 ハット形部品衝撃試験

- ②ハイブリッドBピラーの衝撃試験(図-22)は、鋼板製Bピラーの衝撃特性と比較評価する方法で実施した。衝撃荷重位置は、車両の側面衝突の荷重位置とした。衝撃特性についてハイブリッドBピラーと鋼板製Bピラーを比較するとハイブリッドBピラーの最大衝撃荷重は鋼板製Bピラー比88.5%、最大衝撃吸収エネルギー比は67.5%で、更なる強度・剛性の向上が必要であることがわかった。



図-22 ハイブリッドBピラー部品衝撃試験

- ③ハイブリッドブレス部品の力学的構造は、車体のBピラー・サイドストラクチャー部品からハイブリッドブレス部品(内側鋼板、外側CFRP補強接合)に荷重が伝達され、ブレス部品の鋼板側より曲げ荷重が負荷される構造となっている。負荷荷重は両端自由支持の3点曲げ試験方式で実施した結果(図-23)、曲げ強度はかなり高く接合強度の効果は大きいことが判った。

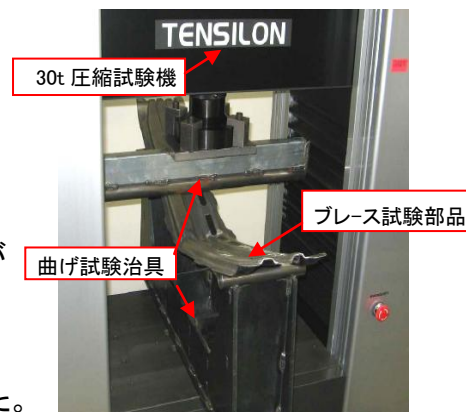


図-23 ハイブリッドブレス強度試験

4) ハット形及びBピラー部品の衝撃解析とブレス部品の静的強度解析について

衝撃構造解析ソフトはLS-DYNA(JSOL社)を使用し、解析条件の設定等にはLS-PrePost及びJvision Ver3を使用した。ハット形部品の衝撃解析結果と試験結果を比較すると、あまり良い相関性は得られなかった。Bピラーの衝撃試験結果との相関性は、ほぼ類似した解析結果を得ることが出来た。静的荷重によるハイブリッドブレス部品の解析結果を静荷重試験と比較すると、あまり良い相関性は得られなかった。複雑形状部品の衝撃解析はかなり難しい領域分野で、試験結果との相関性を取るためには、解析手法や条件を詳細に検討する必要がある。

①ハット形部品の衝撃特性解析は衝撃構造解析ソフトにLS-DYNA(JSOL社)を使用し、解析条件の設定等にはLS-PrePost及びJvision Ver3を使用した。

衝撃荷重によるハット形部品の解析結果は図-24に示した。衝撃試験ではCFRP部品の変形は弾性変形域と考えられる特性を示したが、本解析では、この現象を再現できなかった。②Bピラーの衝撃荷重による解析と衝撃試験結果との相関性は、鋼板製及びハイブリッド部品共に比較的良い結果を得ることが出来た。Bピラーの変形モードを図-25に示した。

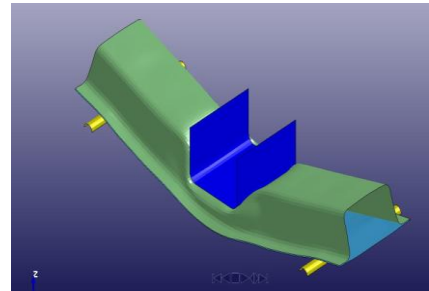


図-24 ハット形部品の解析結果

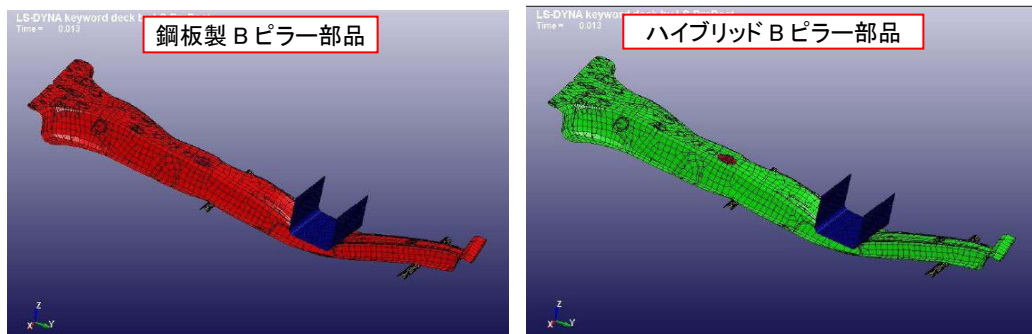


図-25 衝撃荷重によるBピラー(鋼板製部品、ハイブリッド部品)の解析結果

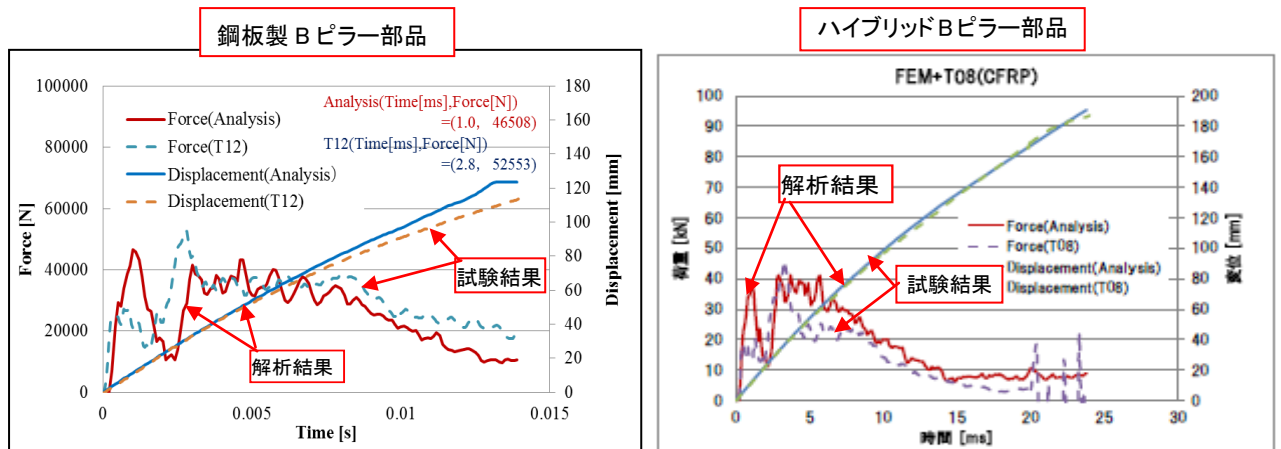


図-26 Bピラー(鋼板製部品、ハイブリッド部品)の衝撃特性

図-26にBピラーの衝撃特性(試験結果と解析)を示した。

③ハイブリッドブレス部品の静的解析結果は、静荷重試験と比較すると、変形状態が若干異なる結果となった。荷重-変位量特性では最大荷重は、ほぼ近似していたが、変形モードはあまり良い相関ではなかった。静的荷重によるハイブリッドブレス部品の解析結果(変形)を図-27に示した。



図-27 ハイブリッドブレスの解析結果

最終章 全体総括

1) 研究開発の概要(第1章)

研究開発の遂行は、委託業務実施計画に記述した研究内容を実行した。即ち本研究開発は、自動車構造部材用CFRP-金属ハイブリッド部品として、B ピラーとセンターブレス部品に特化したプレス成形加工技術に関する研究を行った。CFRP材料は、CF-PCM 用プリプレグを使用し、鋼板との接合強度の調査と、CFRP-鋼板ハイブリッド B ピラー及びブレス部品の成形加工を高精密なプレス機にて実施し、ハイブリッド成形加工技術の確立について研究した。具体的な研究課題は、①自動車構造部材に適したCFRP-金属ハイブリッド材料に関する研究、②CFRP-金属ハイブリッド部材に適した金型技術に関する研究、③CFRP-金属ハイブリッド部材のプレス成形加工に関する研究を行った。

本研究課題に対する成果概要は、以下に記述する。

1-1) 構造部材としてのCFRP材料は、エポキシ樹脂を、マトリックスとした熱硬化性炭素繊維複合材が適しているが、CFRP材と鋼板の接合強度を確保するためには、鋼板の表面処理が、極めて重要であることがわかった。その表面処理は接合強度試験の結果、プラズマ処理が適切であることが判明した。プラズマ表面処理法は効率的生産性を考慮した研究を行い、その処理仕様を明らかにした。

1-2) 成形金型技術に関しては、CFRPハット形金型やハイブリッド B ピラー金型及びハイブリッドブレス金型の構造設計と製作を、高度な金型技術を駆使して、その内容を明らかにした。特に金型の表面温度分布均一化に関する解析と検証、金型の熱膨張を考慮したクリアランス精度の確保等は、金型構造上、極めて重要な研究課題であるため、技術力を結集して研究を行い、期待通りの成果を得ることができた。金型表面温度を得るための加熱方式は、電気ヒーターを使用し、的確な温度制御により目標温度と温度分布の均一化に成功した。

1-3) CFRPハット形部品の成形加工は、高精度なプリフォームとセット治具が、必須であることが判った。ハイブリッド B ピラー部品の成形加工は、CFRPと鋼板の接合性が重要であるため、鋼板の表面処理は、プラズマ処理を行い、高精度な金型と高精密なプレス機で、ハイブリッド B ピラー部品の成形加工に成功した。成形条件は、プレス成形圧力、プレス速度、金型温度等を的確に制御し、成形サイクルは、12 分で成形した。また、ハイブリッドブレス部品も同様な手法で成形加工を行い、成形時間は同一時間で成形した。成形加工部品の強度・剛性評価は、衝撃試験や静的強度試験を行い評価した。その結果、有用な研究成果を得ることができた。また衝撃解析や強度解析を行い、試験結果との相関性を検討した結果、B ピラー部品は比較的良い成果が得られたが、他の部品は不満足の結果となった。

以上の研究成果は、研究実施マスタープランを作製し、再委託先の日程管理を徹底したことにより遂行できた。

2 本論(第2章)

2-1 自動車構造部材に適したCFRP-金属ハイブリッド材料に関する課題に対し、CFRP材料

仕様と材料特性の調査を行い、CFRP材料と鋼板の接合強度に影響する表面処理について研究を行った結果、次のことが判明した。

2-1-1) 構造部材に適したCFRP材料は、熱硬化性樹脂のエポキシ樹脂をマトリックスとした炭素繊維複合材料で、繊維体積含有率 61.6%、樹脂質量含有率 30.0%、の材料が強度・剛性的に有意であることが判った。

2-1-2) CFRP材料の積層による接合強度は、CFRPハット形構造で調査した。調査は、ハット形部品に衝撃荷重を負荷して、CFRP層間剥離等の接合強度を評価した結果、層間剥離はなかった。ハット形フランジと底辺部材の接合部(アラルナイト接着)では、剥離が発生した。

2-1-3) 金属鋼板とCFRP接合強度に関する剥離強度試験については、鋼板にCFRPをプレス接合成形し、試験片による曲げ試験にて剥離強度を評価した。その結果、鋼板にCFRPをプレス接合することにより曲げ強度は、著しく向上する結果が得られた。また、鋼板表面の処理方法によって接合強度が異なり、鋼板表面の脱脂処理有りの場合は、脱脂処理無しの状態より剥離荷重は約3倍以上の強度を示し、且つバラツキも少ないことが判った。

2-1-4) 鋼板の脱脂処理の方法として、プラズマ表面処理によるCFRPの接合強度試験を行った。その結果、プラズマ処理は、極めて効果的で安定した強度が得られ、CFRP接合による強度は、著しく向上することが判った。

2-2 CFRP-金属ハイブリッド部材に適した金型技術に関しては、ハット形、ハイブリッドBピラー及びブレス金型について、高度な設計技術と解析技術並びに技術的ノウハウを融合させて成形用金型を製作した。その結果、次のことが判明した。

2-2-1) ハイブリッド部材の成形金型の設計プロセスは、部品形状の3Dデータに基づき、成形加工性を専用ソフトで解析し、その結果を設計ソフトで修正を行い、金型構造解析により金型仕様を確認して、その金型仕様のデータベースでNC化し、金型を製作した。

2-2-2) ①ハット形金型構造は、CFRP材料と成形加工に関する条件を考慮して、フランジ部端面は喰い切り構造を付加した。またハット形プリフォームを安定的に設置できる構造とした。

②CFRPハイブリッドBピラー金型構造は、鋼板製Bピラー部品の3Dデータに基づき、CFRP補強設計構想を勘案して、効率的な金型設計プロセスで金型構造を決めた。金型クリアランスは、金型の熱膨張を考慮すると共に、金型熱解析による表面温度均一化構想と加工技術のノウハウを、駆視した高精度な構造とした。

③CFRPハイブリッドブレスの金型構造は、Bピラーと同様に通常的设计プロセスで、ブレス部品の3Dデータに基づき、生産部品と等価的な強度・剛性を有するハイブリッドブレス部品を、成形する金型構造とした。金型クリアランスは、金型の熱膨張を考慮すると共に、金型熱解析による温度分布均一化構想、並びに加工技術ノウハウを駆使した高精度な構造とした。

2-2-3) ハット形、ハイブリッドBピラー及びブレス金型の表面温度解析は、それぞれの金型の形状に則した熱源ヒーターのグループ制御を、有限要素法を用いた専用解析ソフトで、金型温度

分布均一化の解析を行った。ハット形金型は、上下金型にヒーターを装着し、温度センサーによりグループ制御を行った結果、金型表面温度は目標の $140\pm 3^{\circ}\text{C}$ の分布となる成果を得た。ハイブリッド B ピラー金型は、大型金型であるため、ヒーター本数を増し、ヒーター位置とグループ制御法の最適化を図り、金型の温度解析を行った結果、目標とする表面温度分布を得ることができた。ハイブリッドブレス金型の温度分布の解析は、上下金型にヒーターを金型に設置し、温度センサーによりグループ制御を行う解析で、目標の温度分布が得られた。

2-2-4) ハット形、ハイブリッド B ピラー及びブレス金型表面温度分布の計測は、加熱ヒーターと温度センサーを金型に設置し、熱源温度制御装置により設定温度を制御して金型表面温度をアルメルクロメル熱伝対で計測した。ハット形金型の表面温度分布は、加熱ヒーターと温度センサーを設置して、グループ制御を行い温度分布の計測を行った。熱解析結果との相関性は比較的良い結果であった。ハイブリッド B ピラー及びブレス金型は、加熱ヒーターと、温度センサーを上下金型に設置し、熱源温度制御装置により設定温度を制御して温度計測を行った。表面温度計測の結果は、目標の温度分布を得ることができた。温度分布の解析結果と比較すると、ほぼ良い相関関係が得られた。

2-3 CFRP-金属ハイブリッド部材のプレス成形加工に関する課題については、ハット形、ハイブリッド B ピラー、ハイブリッドブレス部材のプレス成形の研究を行った。また、ハット形及びハイブリッド B ピラー部材の衝撃試験やハイブリッドブレスの曲げ試験を行うとともに、衝撃解析や静的強度解析を実施した。その結果、次のことが判明した。

2-3-1) CFRP-金属ハイブリッド部材のプレス成形加工は、プリフォームを製作し、B ピラー及びブレス表面にプラズマ処理を施して、金型成形条件(離型材の塗布含む)を確認した後、高精度プレス機により、成形加工を行い、目標通りの成果を得た。

2-3-2) ①ハット形部材の成形は、高精度なプリフォームを製作して、金型温度 $140\pm 3^{\circ}\text{C}$ を確保し、的確な成形条件で、プレス成形を行った。成形サイクルは約3分で成形できた。

②ハイブリッド B ピラー部材の成形加工には、プリフォームの製作、B ピラー表面のプラズマ処理、金型温度 $140\pm 3^{\circ}\text{C}$ と成形サイクル 12 分の設定で、高精度プレス機で成形加工を行い、ハイブリッド B ピラー部材の成形に成功した。またCFRPと金属接合は、切断面の状況から、ほぼ期待通りと判断することができた。また、CFRP部材接合の温度変化に対する影響は、 35°C - 160°C の熱サイクルを、3 サイクル行ったが問題なかった。

③ハイブリッドブレスの成形加工は、ハイブリッド B ピラーの成形とほぼ同様なプロセスでプレス成形加工を行い、ほぼ目標通りの成果を得た。

2-3-3) ハット形、及び B ピラー部材の衝撃試験とブレス部材の静的強度試験は、成形部材の衝撃特性や曲げ強度の特性を把握し評価した。ハット形、及び B ピラーの衝撃試験は自動車の側面衝突相当の落垂体荷重を、試験体に付加し、その荷重-変形や吸収エネルギー特性を比較検討した。その結果、①ハット形部材は鋼板製部材と比較すると剛性が低いため、衝撃特性は低レベルであることと、荷重-変形特性は、弾性変形領域であることが判った。

②ハイブリッド B ピラー部材の衝撃特性は、鋼板製 B ピラー部材と比較すると、最大荷重で

88.5%、吸収エネルギーで 67.5%となった。鋼板製部品と等価にするには、更なる対策が必要であることが判った。

③ハイブリッドブレースの曲げ試験は、鋼板製部品が未入手のため、試験結果の比較ができなかったが、曲げ強度としては、かなり高いレベルで、CFRPの補強効果は大きいと考えられる。破壊モードは負荷荷重位置でCFRP補強部の曲げ破損が発生した。破損部は炭素繊維の破損が観測されたが、CFRP接合試験片の曲げ破損状況とほぼ同一現象であった。

2-3-4)ハット形、及びBピラー部品の衝撃解析とブレースの静的強度解析は、LS-DYNAを使用し、解析条件の設定等には、LS-PrePost、Jvision-Ver.3 を用いて解析モデルを作成し、強度解析を行った。

①ハット形部品の解析モデルの構成は、円形支持治具に試験部品をセットし、垂体を落下させたときの衝撃特性を解析した。鋼板製とCFRPハット形部品の解析結果を比較すると、衝撃荷重で 81.2%、CFRPハット形が低く、吸収エネルギーでほぼ同等の解析結果であった。

②ハイブリッド B ピラーと鋼板製 B ピラー部品の解析は、側突部位に負荷する解析モデルを製作し、ハット形部品と同様の負荷条件にて解析を行った。解析結果をハイブリッド B ピラー部品の実測値と比較すると、最大衝撃荷重では 89.8%、吸収エネルギーでは 75.5%の相関性を有する結果であった。また鋼板製 B ピラーの最大衝撃荷重は、実測値と比較すると、88.4%、吸収エネルギーでは、94.7%でかなり精度の良い結果が得られた。

③ハイブリッドブレース部品の静的強度解析は、B ピラーと同様な解析ソフトを使用した。解析結果は、静荷重試験と比較して、あまり良い相関は取れなかった。

以上を総合して本研究により、CFRP-金属ハイブリッド部品のプレス成形加工技術に関して、CFRP材料と金属の接合強度の調査、高精度なハイブリッド成形用金型の設計・製作と温度解析、ハイブリッドプレス成形加工技術の追求、さらにはハイブリッド部品の衝撃試験と解析等、革新的なハイブリッド成形加工部品の総合的な研究開発を行い、極めて貴重な成果を得ることが出来た。特にハイブリッド B ピラーのCFRP接合強度は、期待通りの評価がえられ、プラズマ表面処理によるCFRP接合効果の有効性を確認できたことは、大きな成果であった。さらに、今後研究を進めなければ成らないことは、成形サイクルの短縮化とCFRP接合の耐久信頼性を追及することである。また、CFRP熱可塑性材料とプレス成形加工技術の研究開発も進める必要がある。本研究を通して、自動車のCFRP軽量化部品として、多くの有用な知見を得たが、さらに、部品の軽量化を発展させ、自動車の CO₂ 削減や燃費の向上に役立てる所存である。

以上