

プレス・射出ハイブリッド成形による熱可塑性 CFRP 衝撃吸収部材の作製

メカニクス系工学専攻 准教授 西藪 和明
理工学部機械工学科 学生 山崎 陽平

1. 緒言

近年、環境・エネルギー問題の深刻化により、航空機をはじめ自動車などの輸送機器用の材料として炭素繊維強化プラスチック（Carbon Fiber Reinforced Plastics, CFRP）が注目されている。CFRP は比強度や比弾性率が高く、耐食性に優れているため、自動車や航空機等の輸送機器の省エネルギー化を目的に構造材料の軽量化が進んでいる。ボーイング社製の大型旅客機 B-787 には、従来の二次構造部材から尾翼や床支持材のような一次構造部材に CFRP の使用が拡大し、尾翼、主翼および胴体等を含む構造重量の約 50%以上が CFRP で製造され、軽量化が行われている。また、プラグインハイブリッド車（PHEV）、電気自動車（EV）および燃料電池車（FCEV）などの需要が世界的に高まっている。基本的に動力が何であろうと車体の重量が小さいほど低燃費で、環境負荷を抑制できる。しかし、自動車の主要材料は加工性や再利用性に優れ、低価格な鋼板が用いられている。自動車分野への CFRP の使用は、材料および製造コストが非常に高く、生産性が低く、再利用も困難であるため、高級スポーツカーに限られてきた。しかし、EV 車のモーターや大型バッテリー等の電気機器部品の重量が大幅に増加するため、車体重量をより一層軽量化することが求められている。そのため、今後は CFRP の適用範囲を拡大する動向がある。すでに、2013 年に BMW 社製の EV 車に、アルミ合金製シャーシに RTM 成形により製造された CFRP 製のパッセンジャーセルが接合された量産車が市販されている^[1]。

CFRP はマトリックス樹脂の性質から、熱硬化性 CFRP と熱可塑性 CFRP に大別される。これまで、スポーツ用品や航空宇宙機器に用いられているのはエポキシ樹脂をマトリックスとする熱硬化性 CFRP であるが、生産性が低く、再利用性に乏しく、さらに耐衝撃性にも課題がある。一方、熱可塑性 CFRP は、生産性が高く、再利用が容易であり、さらに耐衝撃性も高いという点から、自動車等の構造部材に期待の高い材料である。すでに、2011 年に日産より、熱可塑性 CFRP を用いた EV 車のコンセプトカーが公表されている^[2]。また、2014 年 11 月 19 日にトヨタ自動車製の燃料電池車「MIRAI」に、東レ製の熱可塑性 CFRP 構造部材が燃料電池を保護するスタックフレーム（自動車のフロア部分に相当する大型部品）に採用されている^[3]。このような熱可塑性 CFRP は、従来のような短繊維や長繊維を強化材とする射出成形品や圧縮成形品ではなく、一方向繊維や織物などの連続繊維で強化した積層材などであり、それらに使用される熱可塑性樹脂はエンジニアリングプラスチックやスーパーエンジニアリングプラスチックなどの耐熱性および力学的特性が高い高性能な樹脂である。

熱可塑性プラスチックは、ガラス転移温度以上に加熱すると樹脂が軟化し、金属のようにプレス成形が可能であり、冷却すると固化して形状が保持される。さらに、融点以上に再加熱することにより熔融加工も可能であり、金属に比べて比較的低温で再成形・再加工が容易な材料である。また、熱可塑性プラスチックは一般的に衝撃性に優れている。しかし、熱可塑性樹脂は熱硬化性プラスチックに比べて熔融粘度が高いため、繊維への樹脂含有が非常に困難であることに加え、熱可塑性樹脂のガラス転移温度や融点は熱硬化性樹脂に比べて低いため、耐熱性に乏しいことなどが課題である。熱可塑性 CFRP を再利用するためには、加熱により樹脂を変形または熔融させて、繊維を元のシート状に戻すことが最も優れたマテリアルリサイクル法であるが、繊維の連続性から容易に元の形態に復元することは容易ではな

い。そのため、熱可塑性 CFRP を所望の形状に制御して破砕し、再利用しやすいサイズや形状に“加工”する必要がある。これは、不用品や廃棄物を減容化または燃焼・埋め立てする廃棄処理とは全く異なる。

本研究は、「金型プロジェクト」の一環として、機械機能設計研究室で行われる予定の衝撃試験で使用される試験片を熱可塑性 CFRP とアルミ材を用いて製造するプロセスの開発を目的とした。そこで、加熱プレス成形とインサート射出成形を融合したハイブリッド成形法を提案し、その製造装置として、専用の加熱装置および金型を設計・製作した。本研究では、織物 CFRP 積層板を加熱プレス成形し、その後短繊維 CF/樹脂ペレット材を射出成形して V 形の衝撃吸収部材の作製を試みた。この短繊維 CF/樹脂ペレット材の代わりに、熱可塑性 CFRP の破砕・粉砕した再生材を用いることも可能である。

2. 加熱プレス・射出ハイブリッド成形法

加熱プレス成形は、熱可塑性 CFRP シートや積層板を融点近傍に加熱・軟化させ、金型により腑形させて形状転写を行うため、連続した繊維への適用が可能である。そのため、高強度・高剛性な部材の作製が可能であるが、微細で複雑な形状および肉厚の変化の大きい形状の成形は困難である。一方、射出成形は材料を加熱溶融させてスクリュウや金型内の流動を伴うため複雑な形状に適しているが、短繊維を混合した樹脂材に制約されるため高い力学的特性を得ることは困難である。そこで、加熱プレス成形と射出成形を組み合わせることにより、加熱プレスでは成形が難しい複雑な形状の成形品の成形を可能にし、また射出成形では得られない高強度・高剛性および耐衝撃性に優れた成形品の製造が可能になる。

本研究で提案する加熱プレス・射出ハイブリッド成形プロセスの概念図を図 1 に示す。織物や一方向繊維で強化した熱可塑性 CFRP 積層板を赤外線ヒータ等で加熱し、金型に挿入して型締めを行い、プレス成形を行った直後に、短繊維で強化した熱可塑性 CFRP を溶融後に射出成形し、金型内で冷却固化後に離型すると、一工程で成形品が得られる。このプロセスは単純であるが、高性能な成形品を安定して量産するには様々な技術課題がある。例えば、素材のトリム方法や固定方法、および加熱方法、金型内への搬送・位置決め方法、プレス成形時のシワの発生抑制、金型設計、射出成形のタイミングなど、成形品に及ぼす影響因子は多々ある。

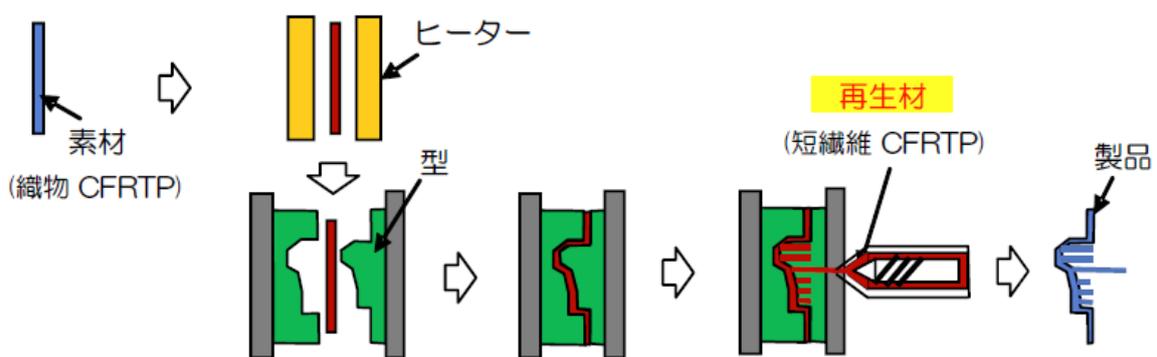


図 1 熱可塑性 CFRP の加熱プレス・射出ハイブリッド成形プロセス

3. 試験片および作製方法

本研究で作製対象とした衝撃吸収部材の図面を図 2 に示す。V 形状で、外側に織物 CFRP を配置して表面硬度と曲げ剛性を向上させ、さらに剛性を高めるために内部にリブ構造を設けた。V 部の角度は 90°とし、先端部にわずかな円弧を有し、両側には短繊維 CF/樹脂で囲まれるボックス構造で、衝撃吸収に必要なクラッシングゾーンを確保している。

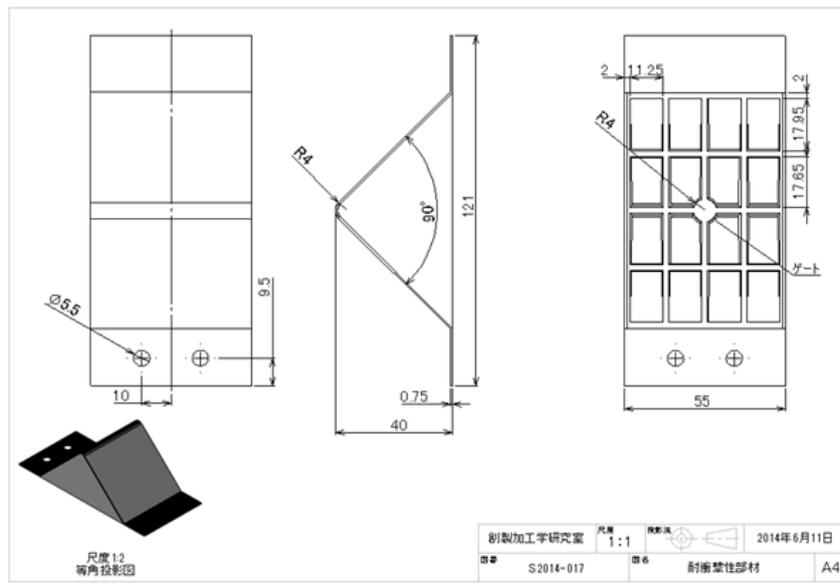


図2 衝撃吸収部材の図面

加熱プレス・射出ハイブリッド成形による衝撃吸収部材の製造プロセスを図3に示す。織物CF/PA66樹脂積層板（3層，厚さ0.75mm）を後述の方法で切断および穴あけを行った後，(i)金型内に挿入し，(ii)型締前にヒータを金型内に移動させて織物CF/PA66積層板の片面から加熱した。ヒータを金型外に移動させて，(iii)型締め動作によりV曲げ成形を行った。その直後に，(iv)溶融した短繊維CF/PA66樹脂を格子状に射出成形し，金型内で冷却固化させた後，(v)型開き動作により離型し，(vi)製品を取り出し，スプルーを切断して衝撃吸収部材を得た。

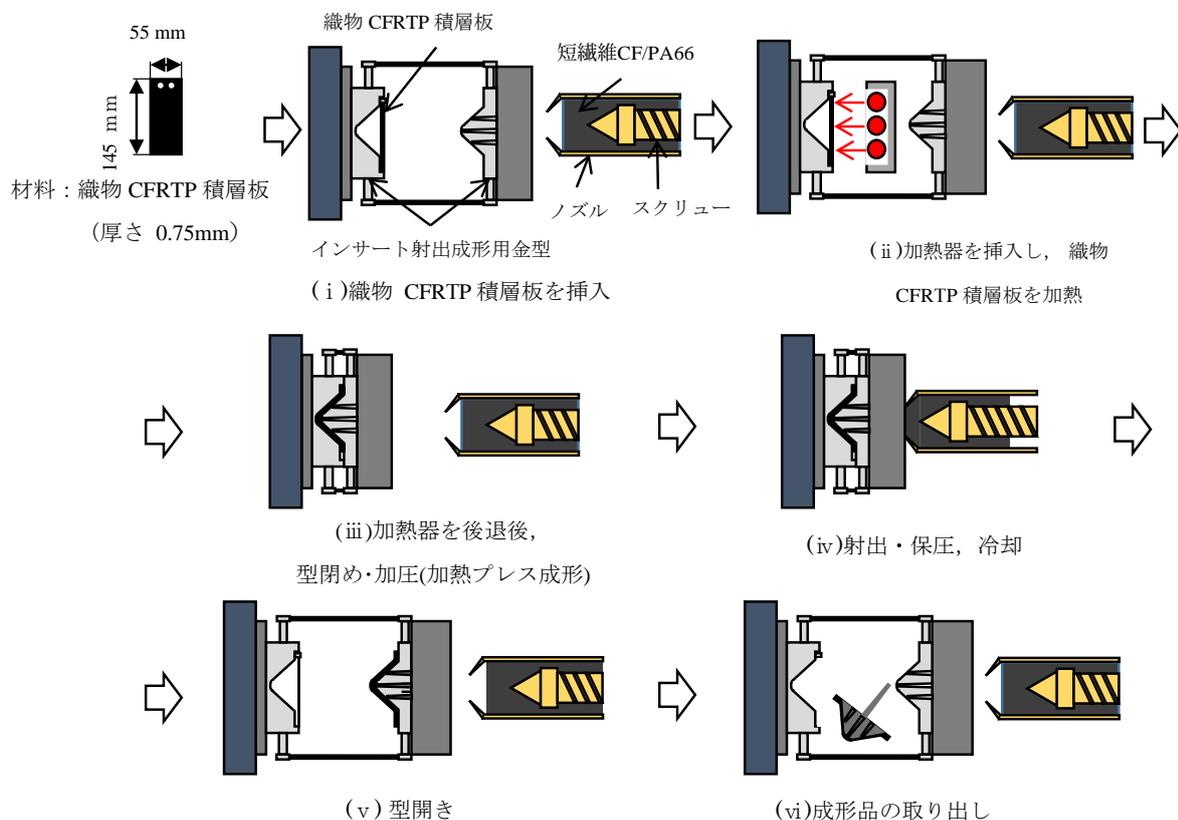


図3 加熱プレス・射出ハイブリッド成形による衝撃吸収部材の製造プロセス

図4に示すように、織物CF/PA66積層板を長さ145mm、幅55mm、厚さ0.75mmにダイヤモンドカッターで切断した後、インサート射出成形金型の固定用のピンに通すため、図5に示すような手動プレス装置および打ち抜き型を用いて穴あけを行った。

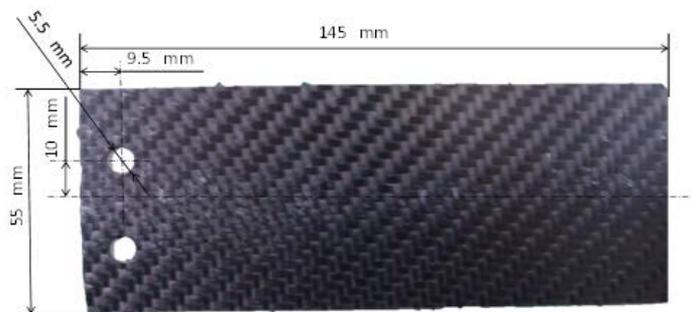


図4 織物CF/PA66積層板製の試験材料



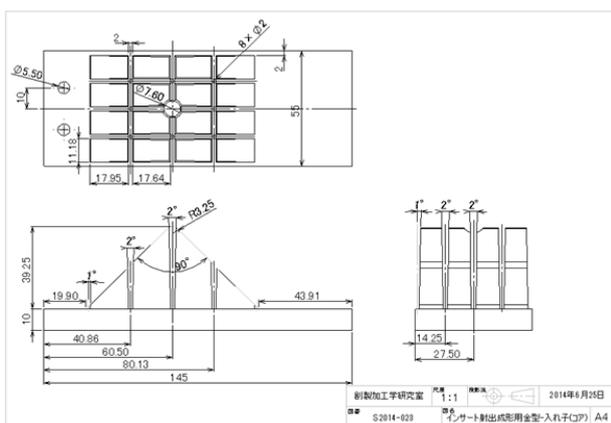
(a) 手動プレス装置



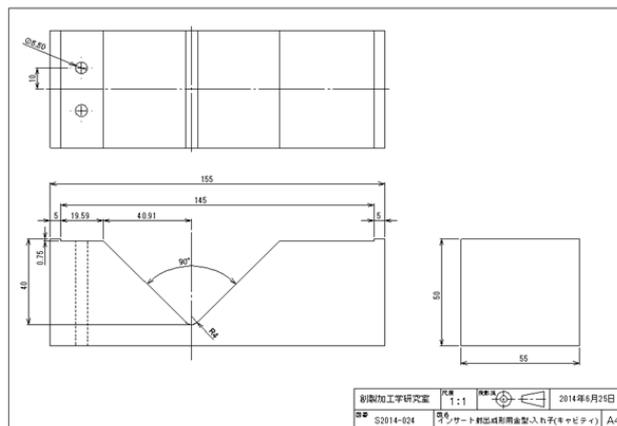
(b) 外形打抜き金型

図5 織物CF/PA66積層板の外形抜き装置

衝撃吸収部材を加熱プレス・射出ハイブリッド成形により製造するために用いたインサート射出成形金型を、三次元CAD (SolidWorks2011) を用いて設計した。入れ子の図面を図6に示す。入れ子は主にワイヤ放電加工機と型彫り放電加工機を用いて製造した。



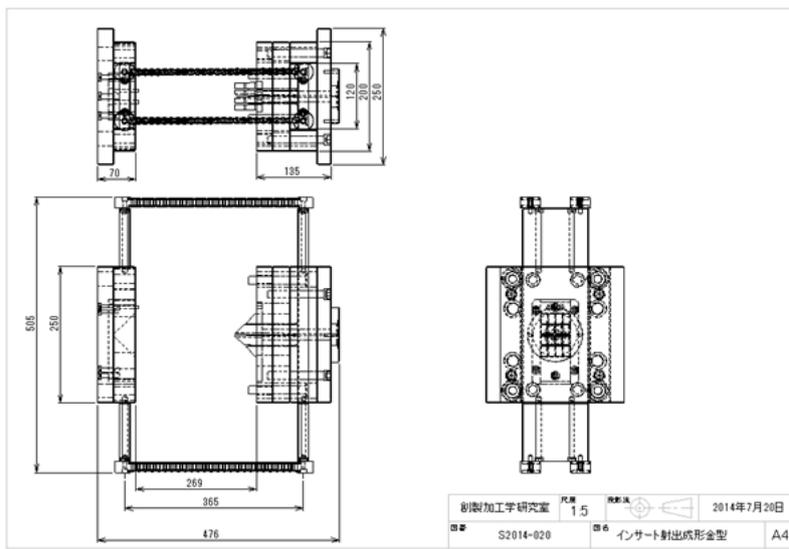
(a) コア側



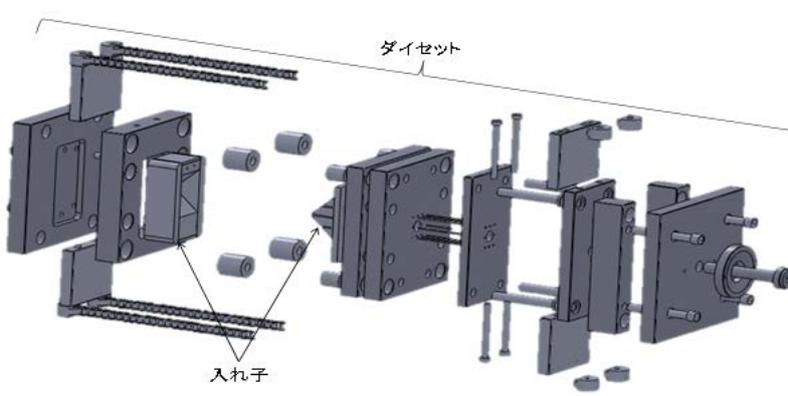
(b) キャビティ側

図6 インサート射出成形金型入れ子

これらの金型入れ子をダイセット（双葉電子工業㈱製，Sシリーズ2025）に固定した．その組立図および拡散分解図を図7に示す．成形品の形状やゲートの位置から，射出成形機のエジェクタ機構を使用することは困難であるため，チェーンを用いてダイセットのエジェクタプレートを引きることによりエジェクタピンを動かし，成形品を押し出す機構を採用した．また，チェーンの位置は加熱プレス成形時に挿入する加熱機の位置を考慮し，加熱機に接触しないような位置に取り付けた．さらに，ヒータを挿入した際にインサート射出成形金型に接触しないように，キャビおよびコア金型間の隙間を調整した．金型の開閉時の幅はチェーンの長さにより調整した．



(a) 組立図



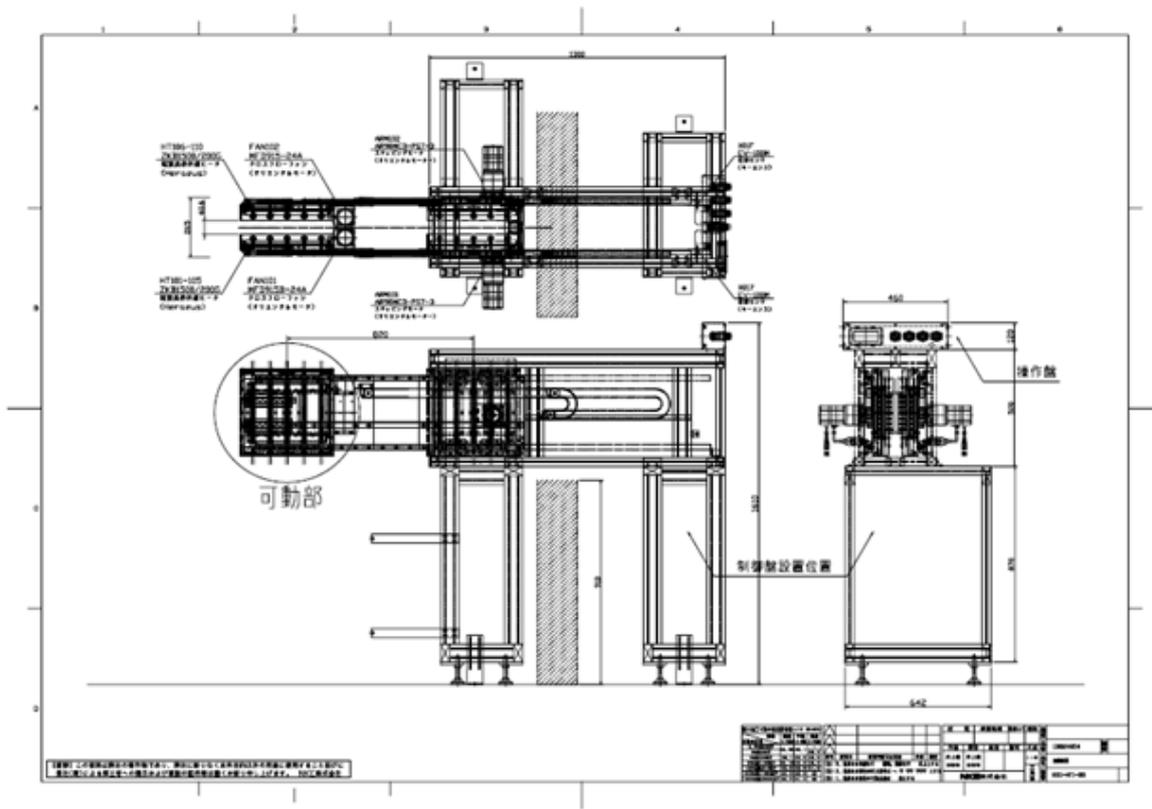
(b) 拡散分解図



(c) 外観写真

図7 インサート射出成形金型（全体図）

加熱プレス・射出ハイブリッド成形専用加熱装置を図8に示す。本加熱装置は、単相電力調整器（オムロン製，G3PW），クローズドループステッピングモーターユニット（オリエントルモーター製），加熱装置制御盤（三菱電機製，GOT1000）を用いて作製した。本加熱装置の特徴は、金型の背面で加熱装置を設け、搬送ロボットで金型上部より加熱された材料を掴み、金型にインサートする一般的な手法を採用せず、ヒータを金型内に挿入して予め材料を金型内にインサートされた状態で加熱する方式を採用した点にある。そのため、加熱された材料を搬送およびインサートする必要がないため、加熱直後に射出成形が可能である。しかし、本研究では安全性を優先させて、加熱プレス工程と射出成形工程の間に、作業者がその都度判断して手動で次の工程への始動を行うことにした。



(a) 組立図



(b) 外観写真

図8 加熱プレス・射出ハイブリッド成形専用加熱装置

本実験で用いた成形条件を表 1 に示す。この条件は、短繊維 CF/PA66 樹脂を射出成形した際に適した成形条件を用いた。加熱温度を 60s, 90s, 120s の三因子とした。試験片を加熱後に加圧するまでの時間は 10s, 金型にインサートした材料とヒータとの距離は約 50mm に設定した。シリンダ温度は、PA66 樹脂の一般的な成形温度である 270°C~300°C に設定した。なお、短繊維 CF/PA66 樹脂ペレットは使用前に加熱温風機にて 80°C で 17~20hr 間乾燥し、水分を除去した。CF/PA66 樹脂は PA66 樹脂と比較して温度低下による凝固が急激に生じるため、シリンダのノズル先端部の温度を 270°C に設定した場合は CF/PA66 樹脂がノズルの先端部で固化し、ノズルで詰まり、射出成形を行うことができなかった。そのため、ノズル先端部の温度を上げてノズル詰まりを解消した。しかし、300°C では CF/PA66 樹脂の粘度が低すぎ、ノズルからの樹脂漏れが著しかったため先端部以外の温度を 280~290°C に下げた。金型温度は金型温度調節機（松井製作所製，MCH-25）を用いて 70°C に設定した。

表 1 織物 CF/PA66 積層板の加熱および短繊維 CF/PA66 樹脂の射出成形条件

織物 CF/PA66 積層板の加熱時間	60s, 90s, 120s
加熱後型締めまでの時間	10s
射出速度	60mm/s
最大射出圧力	80MPa
保圧力および保圧時間	60Mpa, 3s
背圧力および回転数	3MPa, 100rpm
シリンダ内温度（ノズル先端からの温度）	280°C / 280°C / 290°C / 290°C / 80°C

4. 成形実験の結果および考察

4. 1 熱可塑性 CFRP のみを用いた場合

ハイブリッド成形により得られた衝撃吸収部材の外観写真を図 9 に示す。また、完全充填およびショートショットした成形品の例を図 10 に示す。織物 CF/PA66 積層板の温度は加熱後の時間経過とともに低下するため、短繊維 CF/PA66 樹脂との接着強度が低くなると考えられる。また、図 10(b) の V 先端部の温度は高い状態で短繊維 CF/PA66 樹脂が射出成形されるため接着は良好であるが、図 10(c) のように V 部の両端へ行くほど織物 CF/PA66 積層板の温度低下が著しいため、短繊維 CF/PA66 樹脂と織物 CF/PA66 積層板との接着強度は低くなると思われる。



図 9 ハイブリッド成形により得られた衝撃吸収部材の外観

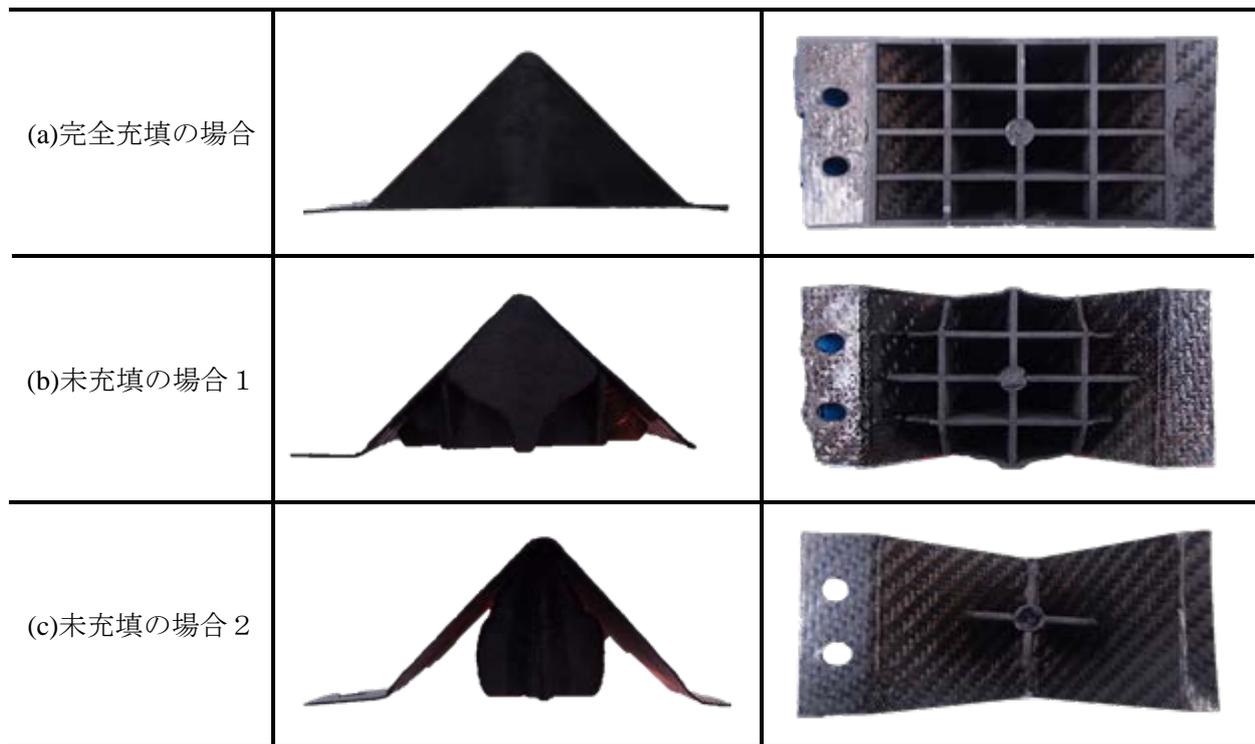


図 10 完全充填およびショートショットした成形品の例

加熱時間を種々変化させて得られた衝撃吸収部材の外観写真を図 11 に示す。加熱時間が 60s および 90s の場合、織物 CF/PA66 積層板の V 曲げ部分に微細な亀裂が見られた。また、織物 CF/PA66 積層板と射出成形した短繊維 CF/PA66 樹脂の間に隙間が見られ、接着が不十分であった。これは加熱時間が短かったため、織物 CF/PA66 積層板がガラス転移温度以上に到達していなかったか、または加圧時に温度低下が生じ、ガラス転移温度以下でプレス・射出成形を行ったためであると考えられる。

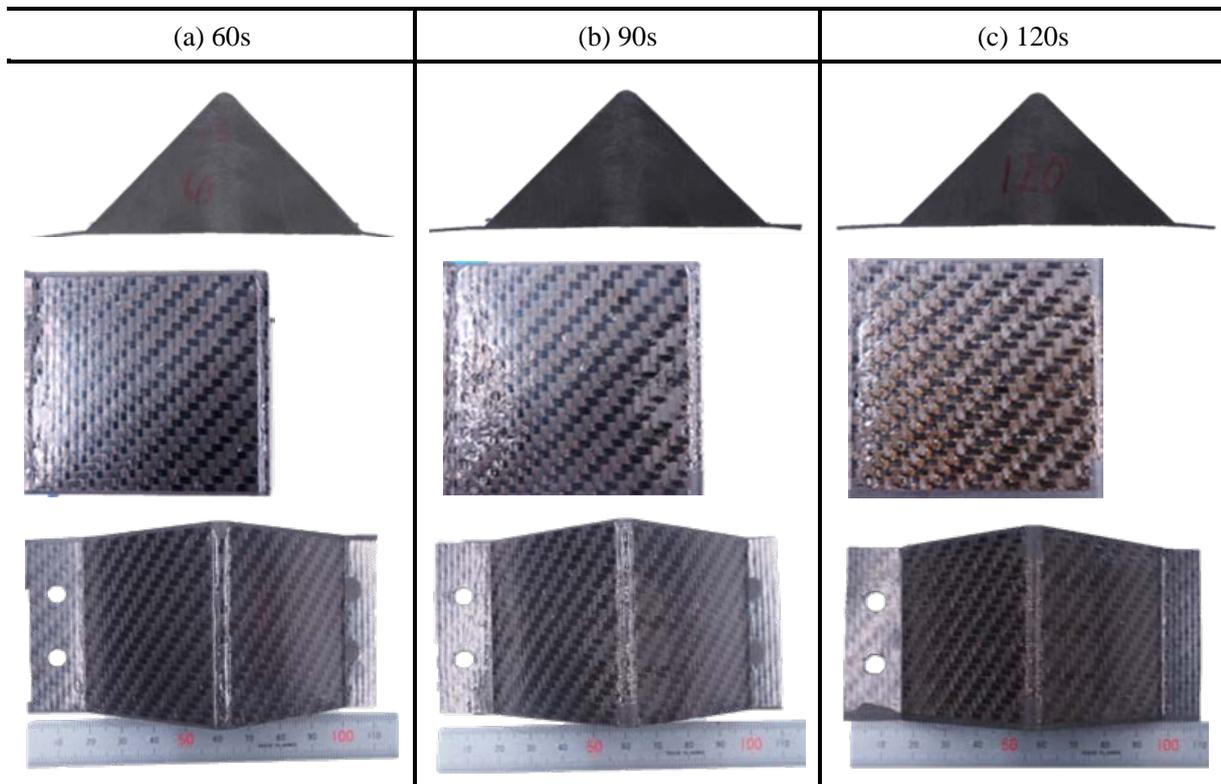


図 11 加熱時間を変化させて成形した衝撃吸収部材の外観写真

一方、加熱時間が 120s の場合、織物 CF/PA66 積層板の V 曲げ部分に亀裂は見られず良好に成形されているが、織物 CF/PA66 積層板の表面に金型が接触した跡や樹脂が焼けたような変色が見られた。

4. 2 アルミ板と熱可塑性 CFRP をハイブリッドした場合

より高い衝撃吸収性を得るために、織物 CF/PA66 積層板に加え、塑性変形に優れたアルミ板をハイブリッドした衝撃吸収部材の作製を試みた。表 2 に示すような射出成形条件で、(a)アルミ板（幅 55mm、長さ 145mm、厚さ 0.7mm）のみを用いた場合と、(b)織物 CF/PA66 積層板（幅 55mm、長さ 145mm、厚さ 0.5mm）とアルミ板（幅 55mm、長さ 145mm、厚さ 0.2mm）のハイブリッド材を用いた場合に対して、加熱プレス・射出ハイブリッド成形を行った。その際、V 形構造材の外層にアルミ板を配置した場合と、逆に内層にアルミ板を配置した場合について試作した。なお、ハイブリッド材は、予め接着剤が塗布されているアルミ板を用いて織物 CF/PA66 積層板に接着を行い、アルミ板のみの場合は加熱を行わずにプレス・射出ハイブリッド成形を行った。

表 2 ハイブリッド材の成形条件

	(a)アルミ板の場合	(b)ハイブリッド材の場合	
		(外層) アルミ板 (内層) 織物 CF/PA66 積層板	(外層) 織物 CF/PA66 積層板 (内層) アルミ板
V 形構造材	アルミ板	(外層) アルミ板 (内層) 織物 CF/PA66 積層板	(外層) 織物 CF/PA66 積層板 (内層) アルミ板
リブ構造材	短繊維 CF/PA66 樹脂	短繊維 CF/PA66 樹脂	短繊維 CF/PA66 樹脂
V 形構造材の加熱時間	0s (加熱無し)	90s	90s
加熱後型締めまでの時間	10s		
射出速度	60mm/s		
最大射出圧力	80MPa		
保圧力および保圧時間	60MPa, 3s		
背圧力および回転数	3MPa, 100rpm		
シリンダ内温度 (ノズル先端からの温度)	280°C / 280°C / 290°C / 290°C / 80°C		

アルミ板およびハイブリッド材で作製した衝撃吸収部材の外観写真を図 12 に示す。これらの衝撃吸収部材の目視観察では、射出成形した短繊維 CF/PA66 樹脂はアルミ板に対して概ね良好に融着接合されていた。一方、ハイブリッド材で衝撃吸収部材の成形は行えたが、インサートしたハイブリッド材と射出成形した短繊維 CF/PA66 樹脂との融着接合が不完全な個所が見られた。これは、織物 CF/PA66 積層板とアルミ板をハイブリッドしたことにより、温度低下が著しく、射出成形時のハイブリッド材が融着に必要な温度を保持できなかったことが原因の一つであると考えられる。アルミ板のみの場合は加熱しないでプレス成形を行ったため問題は生じなかったが、内層にアルミ板を用いたハイブリッド材の場合は織物 CF/PA66 積層板の V 曲げ部で破断が生じた。この原因は、ハイブリッド材の内層に配置したアルミ板を近赤外線ヒータで加熱した際、アルミ板の表面が光沢を持つため赤外光が反射し、織物 CF/PA66 積層板が十分に加熱されずにプレス成形されたためであると考えられる。

(a)アルミ板の場合	(b)ハイブリッド材の場合	
	(外層) アルミ板 (内層) 織物 CF/PA66 積層板	(外層) 織物 CF/PA66 積層板 (内層) アルミ板
		
		
		

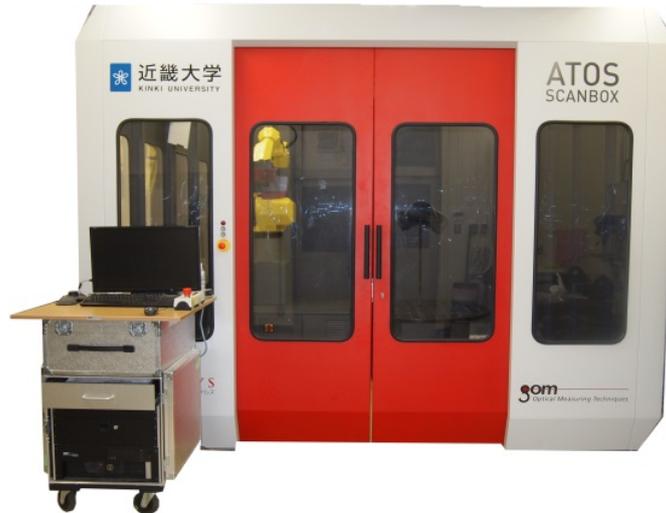
図 12 アルミ板およびハイブリッド材を用いて成形した衝撃吸収部材の外観写真

5. デジタル画像計測ロボットによる形状測定

5. 1 測定装置および方法

本章ではデジタル画像計測ロボットを用いて、第 4 章で作製した衝撃吸収部材の形状測定を行った。形状測定後、成形品の三次元 CAD モデルの設計値と実測値の比較を行い、成形品を評価した。図 13 に今回の評価で用いたデジタル画像計測ロボットシステム (GOM 社, ATOS™ SCANBOX) の外観図を示す。デジタル画像計測ロボットの測定原理は、三角測定の測定原理に基づき、測定対象物に投影されたフリンジパターンを 2 台の CCD カメラで計測し、各カメラのピクセル上の 3 種類の光学測定アルゴリズムを用いて、三次元座標を高精度に計算し、オブジェクト表面のポリゴンメッシュを生成するものである。

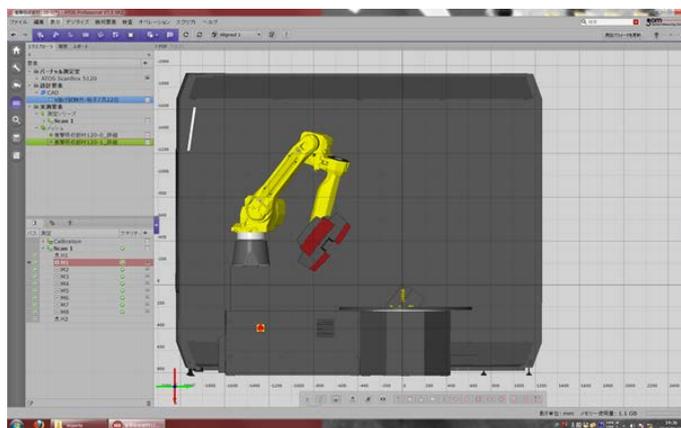
成形品の形状測定を行う際、デジタル画像計測の特性上、測定対象の表面によっては探傷剤(株)タイホーコーザイ、マイクロチェック現象液)などのスプレーを使用する。次にこの成形品などの測定対象をデジタル画像計測ロボット内の回転テーブル上に配置する。その後、実機動作を伴う測定のプログラミング作業 (ティーチング) を行う。図 14 にプログラミング作業画面を示す。プログラミングは測定対象の三次元 CAD モデルをデジタル画像計測ロボット専用の PC ソフト (GOM 社, ATOS™ Professional V7.5) に測定対象の三次元 CAD モデルをソフト上の仮想空間にインポートし、実機や回転テーブルのグラフィックモデルをマウスでドラッグするだけで行える。このソフトウェアは後の測定結果の評価にも用いる。このプログラムは同一形状の測定対象の測定に対して使い回しが可能である。プログラミング終了後は実機による形状測定を行い、測定終了後に測定対象の寸法計測および評価を行う。



(a) 装置の外観写真



(b) 撮像状況



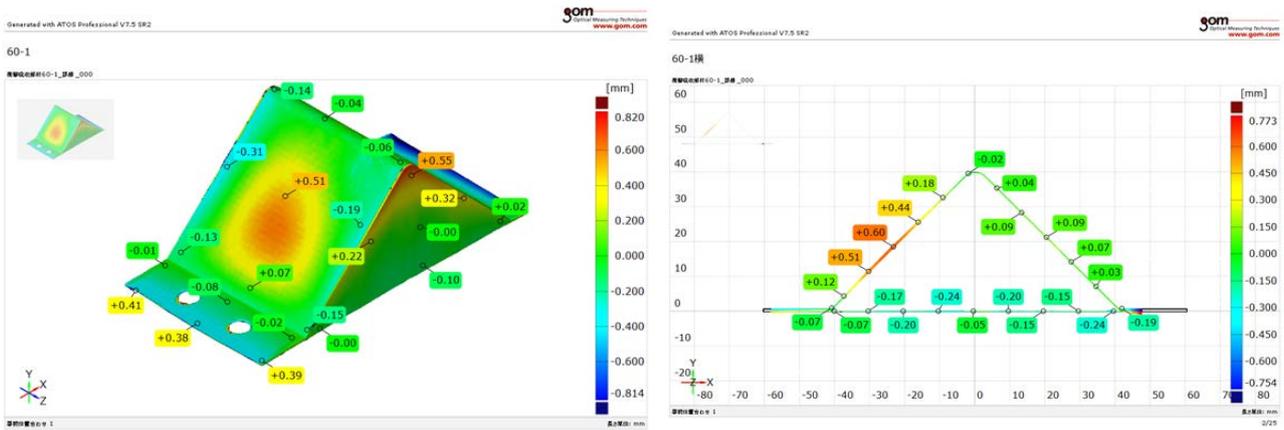
(c) プログラミング作業画面

図 13 デジタル画像計測ロボットシステム

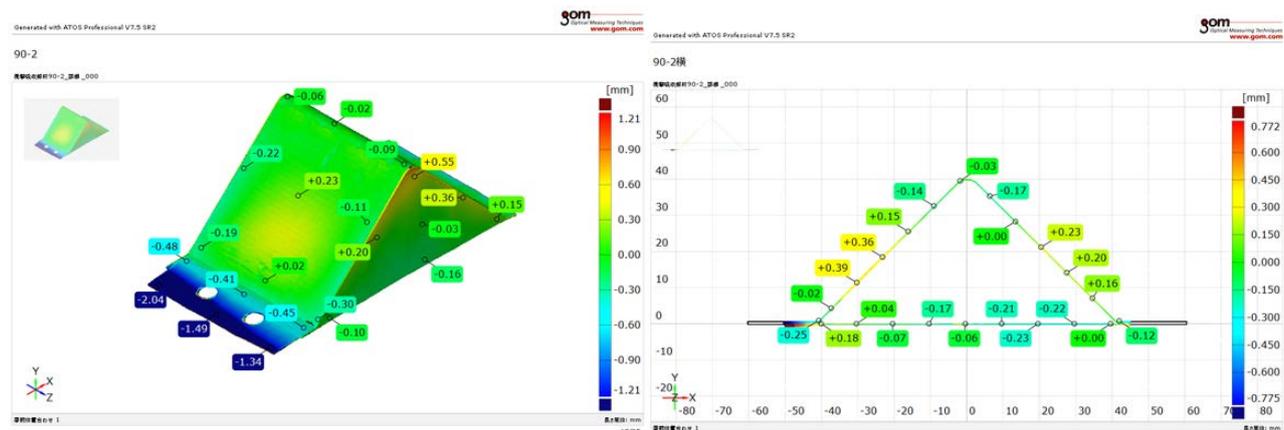
5. 2 熱可塑性 CFRP のみを用いた場合の測定結果

図 14 は、デジタル画像計測ロボットより出力された加熱時間毎の成形品の形状測定結果を示す。前述したように、成形品には探傷剤を吹き付けて測定を行った。測定結果画像から分かるように、探傷剤を使用したことにより概ね良好に形状の撮影ができています。探傷剤を使用しなかった場合は撮影が正確に行われなかったことがあり、その場合はメッシュの全体に欠損が広がり、寸法の計測は難しくなる。ただし、軽度の欠損であれば問題なく寸法の計測ができる。

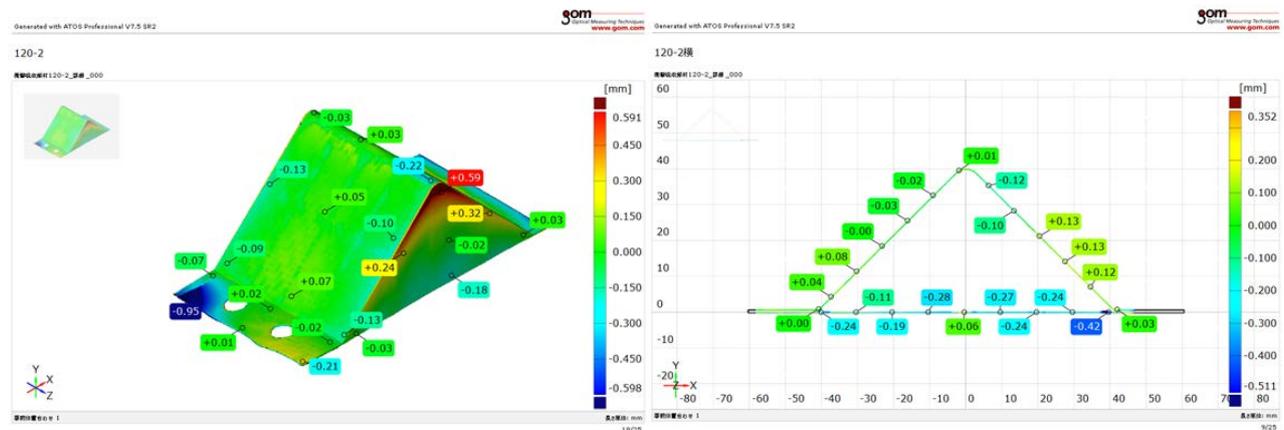
図 14 より、加熱時間が長い場合ほど表面の偏差が少ないことが分かる。このことから、織物 CF/PA66 積層板と短繊維 CF/PA66 樹脂を接着させるためには、織物 CF/PA66 積層板の温度が高い状態であることが望ましいと考えられる。しかし、前述したとおり加熱時間が長いと、織物 CF/PA66 積層板にシワや表面が変色するという成形不良が発生するため、織物 CF/PA66 積層板と短繊維 CF/PA66 樹脂の接着が行われ、織物 CF/PA66 積層板にシワや表面の変色などの成形不良が発生しない、適切な成形条件の調査が必要である。



(a) 加熱時間 60s の場合



(b) 加熱時間 90s の場合



(c) 加熱時間 120s の場合

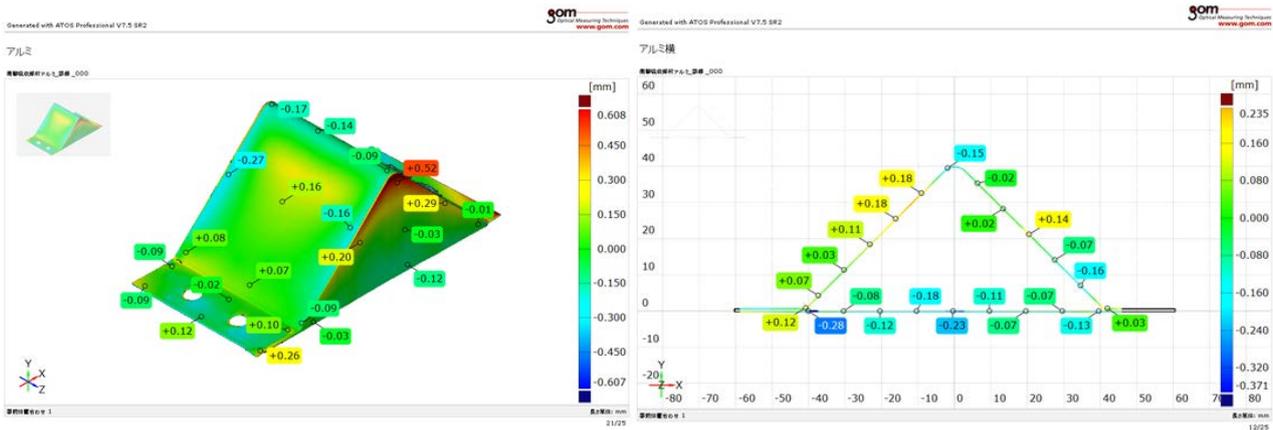
図 14 加熱時間毎の成形品の形状測定結果

5. 2 アルミ板と熱可塑性 CFRP をハイブリッドした場合の測定結果

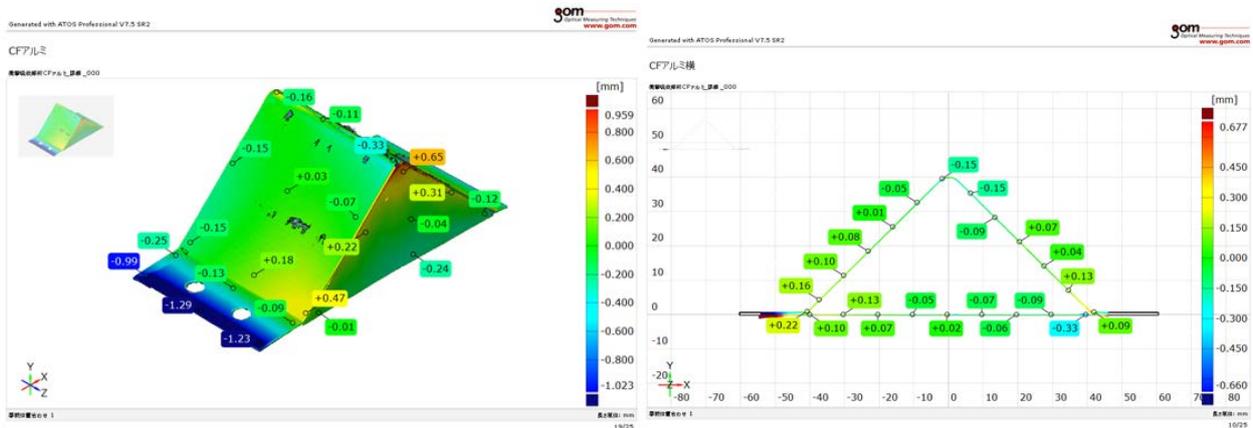
図 15 は、(a)アルミ板を用いた成形品、(b)表面が織物 CF/PA66 積層板のハイブリッド材料の成形品、および(c)表面がアルミ板のハイブリッド材料の成形品の形状測定結果を示す。アルミ板と短繊維 CF/PA66 樹脂による衝撃吸収部材の成形はできたが、表面にプラスの偏差が発生し、外側に開いていることが分かる。これは目視でも確認できたが、アルミ板と短繊維 CF/PA66 樹脂との接着が不完全な部分があることが分かる。アルミ板と CF/PA66 樹脂の接着は、アルミ板の表面に紙ヤスリなどを使い表面粗さを粗くすることや、短繊維 CF/PA66 樹脂の表面積を増大させることなどにより、接着強度を向上させることができると思われる。

図 15(b)の表面が織物 CF/PA66 積層板のハイブリッド材料の成形品の場合、表面は問題がないが、織物 CF/PA66 積層板が衝撃吸収部材の頂点部分で破断しているため、ハイブリッド材料にスプリングバックが発生しなかったと考えられる。また、アルミ板の表面を塗装したものはハイブリッド材料と短繊維 CF/PA66 樹脂の部分が剥がれてしまったため、形状評価を行わなかった。

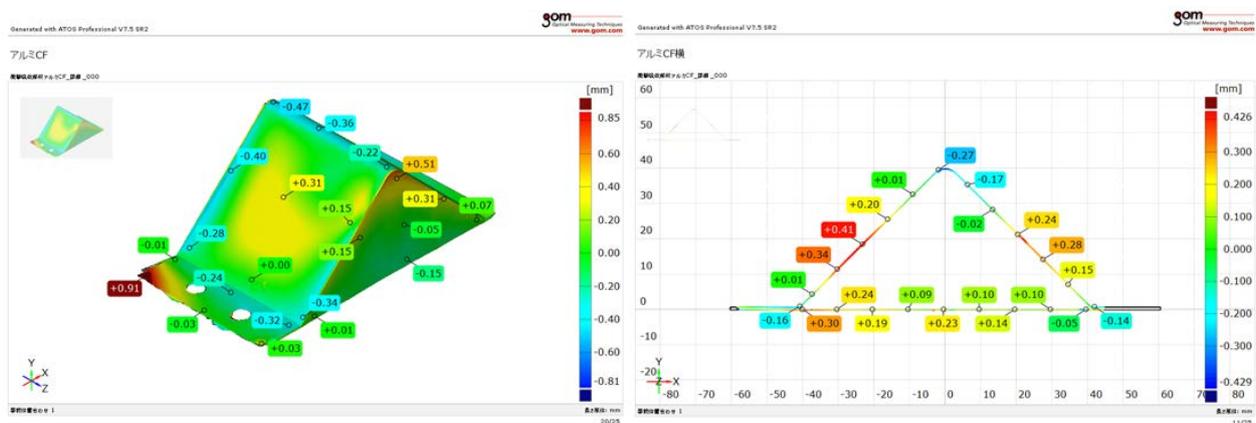
図 15(c)の表面がアルミ板のハイブリッド材料の成形品の場合、面の中心部に偏差が見られるが、断面図を見ると中心部が大きく膨らんでいることが分かる。中心部ではハイブリッド材料と短繊維 CF/PA66 樹脂の接着が行われていないことが分かる。この中心部が大きく膨らんでいる原因は明らかでないため、今後詳細に調査する必要がある。



(a) アルミ板を用いた成形品の場合



(b) ハイブリッド材料(織物 CF/PA66 積層板表面)を用いた成形品



(c) ハイブリッド材料(アルミ板表面)を用いた成形品

図 15 アルミ板と熱可塑性 CFRP をハイブリッドした場合の形状評価結果

6. まとめ

本研究は、機械機能設計研究室で使用される衝撃吸収部材の作製を目的に、加熱プレス成形とインサート射出成形を融合したハイブリッド成形法を提案し、その製造装置として専用の加熱装置および金型を設計・製作した。この装置を用いて、織物 CFRP 積層板を加熱プレス成形し、その後に短繊維 CF/樹脂ペレット材を射出成形して V 形の衝撃吸収部材の作製を試みた。

デジタル画像計測ロボットを用いて作製した衝撃吸収材の形状評価を行った結果、織物 CF/PA66 積層板、およびアルミ板とのハイブリッド材料と短繊維 CF/PA66 樹脂の接着状態によって、形状変化が生じることが分かった。

熱可塑性CFRP の加熱プレス・射出ハイブリッド成形における加熱時間の影響を調査し、加熱プレス成形した織物 CF/PA66 積層板と、射出成形した短繊維 CF/PA66 樹脂との接着が良好な成形品を得ることができた。しかし、織物CF/PA66 積層板のV 部の先端部に微細な亀裂が発生しており、この亀裂を減らすために加熱時間を延長すると表面に変色が見られたことなどから、高品質な成形品を得ることができたとはいえない。また、アルミ板と織物CF/PA66 積層板のハイブリッド材料による加熱プレス・射出成形により、衝撃吸収部材の作製を行うことはできたが、成形条件の適正化を行うには至っておらず、今後さらなる調査が必要である。

7. 参考文献

[1] BMW, <http://bmw-i.jp/BMW-i3/>

[2] 帝人, <http://www.teijin.co.jp/rd/technology/cfrp/>

[3] 東レ, <http://www.toray.co.jp/news/carbon/detail.html?key=9F400D6925A872E249257D94002BE6F8>