

EV向け軽量化部材の開発（第3報）

鈴木貴行*、浅倉秀一*

Development of lightweight composite materials for Electric Vehicles (III)

SUZUKI Takayuki* and ASAKURA Shuichi*

本研究では、炭素繊維熱可塑性樹脂（CFRTP）を用いたハニカム試験片を射出成形により作製し、その特性を評価した。流動解析と位相コントラスト X 線 CT 測定の結果、CFRTP を一定方向に均一に射出することで、ウェルドラインがなく、炭素繊維がリブ方向に強く配向したハニカム試験片が成形できることが確認された。また、樹脂単体でハニカムコア部を成形した場合には収縮が生じるが、CFRTP を用いることで収縮を抑制できることが明らかとなった。さらに、4 点曲げ試験により、CFRTP 板単体と比較して、ハニカム試験片の見かけの曲げ強度および見かけの曲げ弾性率が向上することが示された。加えて、CFRTP 板の異方性による影響をハニカムコア部が軽減することが分かった。

1 はじめに

環境意識の高まりに伴い、電気自動車（EV）への移行が注目されている。EV では航続距離を延ばすためにバッテリー容量を増やすと、バッテリーの総重量が増加し、それに伴い消費電力も増加してしまう。そのため、バッテリー容量を増やしても、必ずしも航続距離の延長にはつながらない。この課題を解決するために、EV では車体を軽量化し、バッテリー重量の増加分を軽減することが求められている。具体策の一つとして、金属製部品を軽量かつ高強度な炭素繊維複合材料に置き換える手法がある。一方、自動車産業においては大量生産が求められるため、射出成形が適している。以上のことから、射出成形が可能な炭素繊維強化熱可塑性樹脂（CFRTP）の利用が注目されている。CFRTP を射出成形する場合、炭素繊維の配向方向が強度や収縮に影響を与えるため、繊維配向の制御や評価が重要となる¹⁾。

また、軽量化と高強度化を両立させるためには、材料の選定に加え、構造設計も不可欠である。ハニカム構造部材は隙間なく正六角形を集積させることで、高い曲げ強度と曲げ弾性率を有している。しかし、一般的なハニカム構造部材の成形では、板材とハニカムコア部の接着工程を必要とし、接着剤の硬化不良のリスクがある。CFRTP の射出成形では、熔融した CFRTP が固化する際に板材と一体化するため、接着剤を使用せずに成形が可能である。CFRTP を板材に対して垂直に射出してハニカムコア部を成形した場合、ウェルドラインの形成に加え、不均一な流動により炭素繊維の配向制御が困難となる。そこで、第 2 報²⁾ では、板材に対して平行な方向に CFRTP を射出する方法でハニカム構造部材を成形することを検討した。この方法により、炭素繊維が曲げ荷重に対して最適な配向方向となるため、高強度なハニカム構造

部材の成形が可能である。

本報では、CFRTP を用いたハニカム構造部材の成形および構造特性の評価を目的とした。そのために、流動解析を実施し、位相コントラスト X 線 CT により炭素繊維の配向を評価した。さらに、作製したハニカム試験片の 4 点曲げ試験を実施したので、その結果を報告する。

2 実験

2.1 ハニカム試験片の成形

ハニカム試験片は、CFRTP 板に対し、ハニカムコア部が平行となる方向に CFRTP を射出成形して作製した。

CFRTP 板には、3K 綾織クロス材とナイロン 6 樹脂（PA6）を複合化した厚さ 2 mm の CFRTP 板（Bond-Laminate 製 TEPEX202）を使用した。この CFRTP 板を 275℃で 7 分間加熱後、ダイヤフラム成形機（Ring Maschinenbau GmbH 製 MEMBRA6）を用い、0.5MPa で成型型に 50 秒間加圧することで、コの字型に成形した。

ハニカムコア部の成形は、堅型射出成形機（楦ソディック製 TR75VRE）を使用し、材料には PEEK と、炭素繊維を 30 wt.% 複合化した PEEK+CF30（住友化学楦製 スミプロイ CK4600）、PA6 と、炭素繊維を 30 wt.% 複合化した PA6+CF30（LANXESS AG 製 Durethan B CF30H2.0EF）を用いた。コの字型に成形した CFRTP 板を金型に設置し、ハニカムコア部の厚さが 3 mm および 8 mm となるように射出成形を行った。また、ウォータージェット加工機（Flow International Corporation 製 Flow Mach3 1313b-XD）を用い、図 1 に示すパターンで穴を

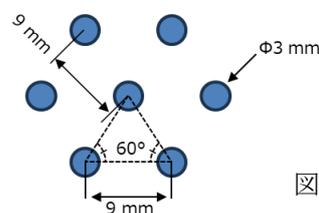


図 1 穴形状とパターン

* 次世代技術部

開けた CFRTP 板を、同様の手順でコの字型に成形後、金型に設置してハニカムコア部の厚さが 3 mm および 8 mm となるように射出成形を行った。

ハニカムコア部（厚さ 8 mm）では、コの字型に成形した CFRTP 板を使用せず、図 2 に示す CFRTP 板のプレス成形と射出成形を同時に行うハイブリッド成形によるハニカム構造部材の作製も実施した。CFRTP 板を 275°C で 3 分間加熱後、型締めによる CFRTTP 板のプレス成形を行うと同時に、ハニカムコア部に射出成形した。また、CFRTP 板の異方性による影響を評価するために、PA6+CF30 を用いて CFRTP 板の方向が射出方向に対して、0°、30°、45°、60° となるハイブリッド成形も実施した。ハニカム試験片は、ハニカムコア部の射出成形後に試験片を 100×60 mm に切り出したものとした。

2.2 樹脂流動解析

流動解析ソフト（Autodesk, Inc. 製 Moldflow Insight Premium）を使用し、ハニカムコア部の射出成形時のシミュレーションを実施した。想定材料には PEEK および PEEK+CF30 を用いた。収縮の予測は変位量を用い、炭素繊維の配向予測は繊維配向テンソルを用いて評価した。

2.3 位相コントラスト X 線 CT 測定

位相コントラスト X 線 CT システム（株式会社島津製作所製 Xctal 5000）を使用して、PEEK+CF30 で成形したハニカムコア部（厚さ 3 mm）のハニカム試験片を測定した。測定条件は管電圧 70kV、管電流 714 μA とした。

2.4 4 点曲げ試験

2.1 で作製したハニカム試験片の見かけの曲げ強度および見かけの曲げ弾性率を評価するため、万能試験機（Instron Corporation 製 万能試験機 5985 型）を使用し、4 点曲げ試験を行った。ここで、見かけの曲げ強度および見かけの曲げ弾性率としたのは、ハニカム試験片で使った CFRTP 板の厚みと幅から算出した断面積を用いており、ハニカム部の断面積や断面二次モーメントを考慮していないためである。4 点曲げ試験治具は、外側支点間距離は 81 mm、内側圧子間距離を 27 mm とした。また、支持治具および圧子の先端半径は 5 mm とし、CFRTP 板が上面になるように荷重をかけた。試験環境は標準状態（温度 23°C、湿度 50%）とし、試験速度は、2 mm/min とした。試験片は 80°C で 8 時間乾燥後、標準状態で一晩静置したものを用い、試験結果は n=5 の平均値とした。

3 結果及び考察

3.1 樹脂流動解析

厚さ 3 mm のハニカムコア部を CFRTP 板に対して平行に射出成形した場合のウェルドサーフェイスに関する予測結果を図 3(a) に示す。分岐した樹脂が合流する箇所ではウェルドサーフェイスが形成される。しかし、射出方向に対して平行な辺を持つように六角形のグリッド構造を配置したハニカムコアでは、樹脂を一定方向に均一に射出することで、図 3(b) に示すようにウェルドサーフェ

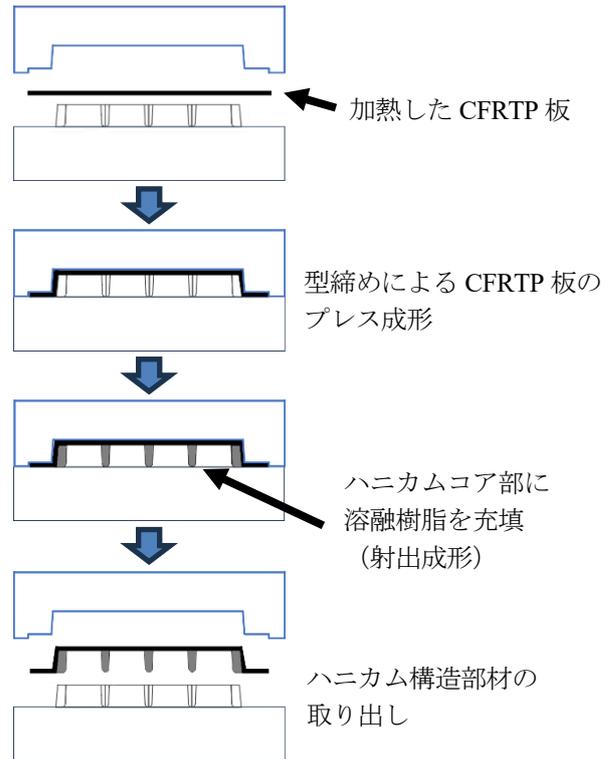


図 2 ハイブリッド成形の手順

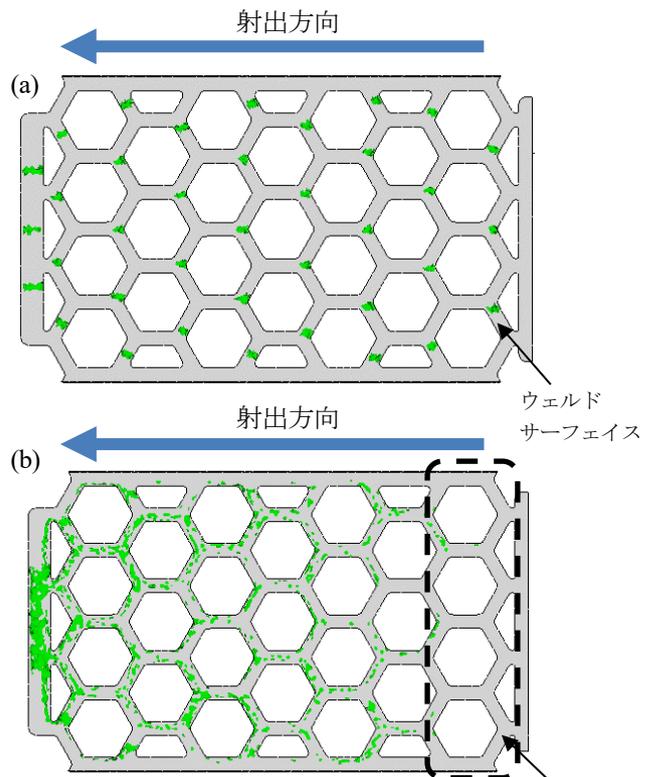


図 3 ウェルドサーフェイスの予測結果
(a) ウェルドサーフェイス形成予測位置
(b) ウェルドサーフェイスの移動予測結果

スはその場にとどまらない。そのため、図 3(b) の点線線で囲んだ箇所のように、樹脂の合流点で形成されたウェルドサーフェイスが移動し、最終的に消失することが予測された。したがって、図 3 のような金型設計により、

ウェルドラインが無いハニカムコア部が成形できるため、ハニカムコア部の高強度化が可能であると考えられる。

また、ハニカムコア部（厚さ8mm）におけるPEEK および PEEK+CF30 の収縮による変位量の予測結果を図4に示す。カラーバーは元の形状からの変位量を示している。図4(a)より PEEK 樹脂のみの場合、元の形状から1mm以上の収縮が予測された。実際に樹脂単体であるPA6およびPEEKを用いてハニカム試験片を成形すると、図5のようにハニカムコア部がCFRTP板から剥離するハニカム試験片が確認された。また、穴を開けたCFRTP板材を使用した場合や、ハイブリッド成形によるハニカム試験片では、ハニカムコア部がCFRTP板から剥離せず、図6に示すような反りが発生した。したがって、ハニカムコア部を樹脂のみで射出成形すると、流動解析の予測結果と同様の収縮が発生していると推察される。

一方、図4(b)より PEEK+CF30 の場合、ハニカムコア部の収縮が発生しない予測結果となった。さらに、炭素繊維の配向予測結果を図7に示す。カラースケールバーは炭素繊維の配向度を示しており、数値が大きいほど強く配向していることを表す。樹脂を一定方向に均一に射出することで、ハニカムコア部のリブで炭素繊維が強く配向することが分かった。また、図7の点線で囲った樹脂が分岐する箇所では、炭素繊維の配向度が低下することが予測された。炭素繊維がリブ方向に強く配向したことで、第1報で報告したように収縮を抑制する予測になったと推察される。実際にPA6+CF30 および PEEK+CF30 を用いて射出成形したハニカム試験片において、試験片の反りは確認されなかった。CFRTP板に対し、ハニカムコア部が平行となる方向に樹脂を射出成形する場合、繊維強化樹脂を用いることで収縮を抑制し、反りのないハニカム試験片が成形できることが分かった。

3.2 位相コントラスト X線 CT 測定

PEEK+CF30を用いてハニカムコア部（厚さ3mm）で作製したハニカム試験片を位相コントラスト X線 CTで測定した結果を図8に示す。第2報で報告したとおり、位相コントラスト X線 CT測定では、X線の位相差を利用するため、炭素繊維の配向を広い範囲で評価することが可能である。炭素繊維の配向方向は色で表示され、カラーサークルと同じ方向に炭素繊維が配向していることを示す。また、色が明るいほど配向が強いことを意味する。

図8(a)よりウェルドラインのないハニカムコア部が成形されていることが確認できた。さらに、図8(b)に図8(a)の点線部の拡大図を示す。ハニカムコア部のリブ方向とカラーサークルの色が、点線の矢印方向で一致している。つまり、ハニカムコア部のリブ方向に炭素繊維が強く配向していることが分かった。また、樹脂の分岐地点では色が暗くなっていることから、樹脂流動解析の結果と同様に配向度が低くなっていることが確認された。したがって、流動解析で予測したとおり、ウェルドラインが無く、リブ方向に炭素繊維が強く配向したハニカム

コア部が射出成形できていることが分かった。

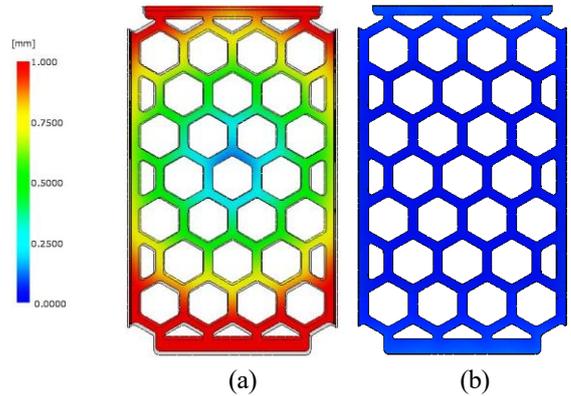


図4 ハニカムコア部の収縮予測結果
(a) PEEK (b) PEEK+CF30



図5 ハニカムコアの剥がれ



図6 ハニカム試験片の反り

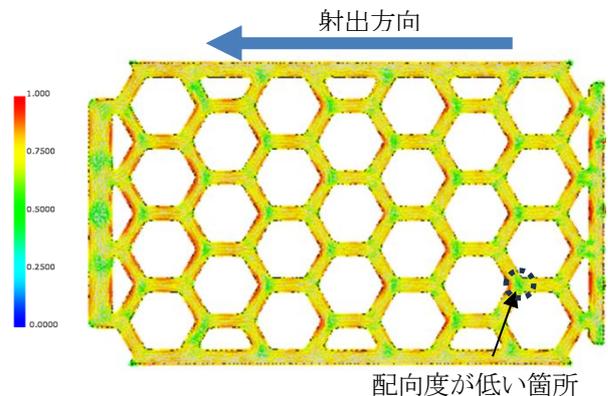


図7 繊維配向予測結果

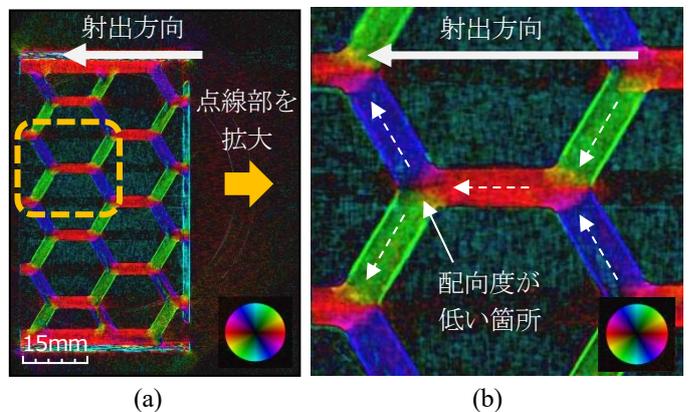


図8 位相コントラスト X線 CT の測定結果
(a) 位相コントラスト X線 CT の測定結果
(b) 点線部の拡大図

3.3 4点曲げ試験

3.3.1 ハニカムコア部のみ

ハニカムコア部のみの4点曲げ試験における最大荷重を図9に示す。PA6+CF30 および PEEK+CF30 ではハニカムコア部が破壊したが、PA6 および PEEK ではハニカムコア部が破壊せずに変形したのみであったため、降伏点を最大荷重とした。ハニカムコア部の厚さを3mmから8mmに増やすことで耐荷重が向上し、PA6 よりも PEEK を使用した方が高い耐荷重を示した。さらに、樹脂単体の PA6 および PEEK よりも、炭素繊維を複合化した PA6+CF30 および PEEK+CF30 の方が高い耐荷重を示した。0° 方向の CFRTP 板の耐荷重は約 1.9 kN であり、耐荷重が最も高かった PEEK+CF30 のハニカムコア部(厚さ8mm)と比較すると約1.5倍であった。

3.3.2 CFRTP 板で作製したハニカム試験片

コの字型に成形した CFRTP 板を用い、射出成形によりハニカムコア部を作製したハニカム試験片の4点曲げ試験における見かけの曲げ強度の結果を図10に、見かけの曲げ弾性率の結果を図11に示す。

見かけの曲げ強度は、PEEK を用いたハニカムコア部(厚さ8mm)が最も高く、1118MPaであった。ハニカムコア部の厚さが3mmの場合、ハニカムコア部の耐荷重が低いため、見かけの曲げ強度の向上は限定的であった。一方、ハニカムコア部の厚さが8mmの場合、見かけの曲げ強度の向上が確認された。また、樹脂単体の PA6 および PEEK の方が、炭素繊維を複合化した PA6+CF30 および PEEK+CF30 よりも見かけの曲げ強度が高い結果となった。PA6 および PEEK では、ハニカムコアの厚さが3mmと8mmのいずれの場合でも、CFRTP 板が破断したのに対し、PA6+CF30 および PEEK+CF30 では、CFRTP 板の破断ではなく、ハニカムコア部が破断した。PA6+CF30 および PEEK+CF30 では、ハニカムコア部の破断が先に起こるため、樹脂単体である PA6 および PEEK のように、CFRTP 板が破断するまで荷重を支えることができず、結果として見かけの曲げ強度が向上しなかったと推察される。

穴を開けた CFRTP 板をコの字型に成形し、射出成形によりハニカムコア部を作製したハニカム試験片の見かけの曲げ強度は、穴を開けていない CFRTP 板を用いて作製したハニカム試験片よりも低い値を示した。これは、穴を開けたことにより CFRTP 板自体の強度が低下したためと推察される。ハニカムコア部(厚さ8mm)の試験片では、穴を開けていない CFRTP 板を用いて作製したハニカム試験片と同様に、樹脂単体の PA6 および PEEK の方が、PA6+CF30 および PEEK+CF30 よりも見かけの曲げ強度が高い結果となった。また、ハニカムコア部(厚さ3mm)の試験片では、すべての材料で CFRTP 板が破断したのに対し、ハニカムコア部(厚さ8mm)の試験片では、PA6 および PEEK を用いた場合は CFRTP 板

が破断し、PA6+CF30 および PEEK+CF30 を用いた場合は CFRTP 板ではなく、ハニカムコア部が破壊した。

見かけの曲げ弾性率は、樹脂単体の PA6 および PEEK よりも炭素繊維を複合化した PA6+CF30 および PEEK+CF30 の方が向上した。PA6+CF30 および PEEK+CF30 においては、穴を開けた CFRTP 板を用いて作製した試験片の方が、穴を開けていない CFRTP 板を用いて作製した試験片よりも高い見かけの曲げ弾性率となった。穴を開けた CFRTP 板を使用することで、開けた穴に射出した樹脂が流れ込み、アンカー効果によりハニカムコア部が CFRTP 板と一体化したためと推察される。

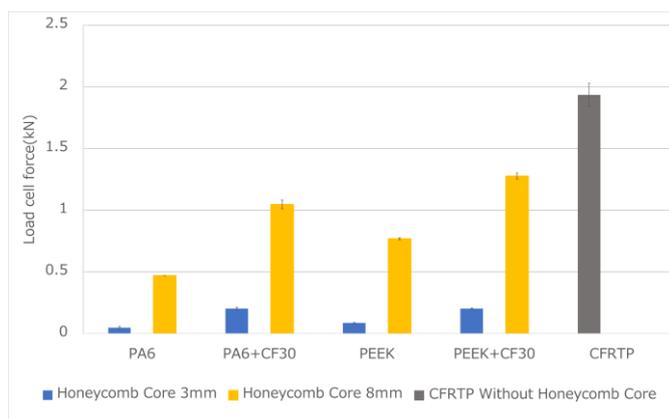


図9 ハニカムコアのみの4点曲げ試験結果

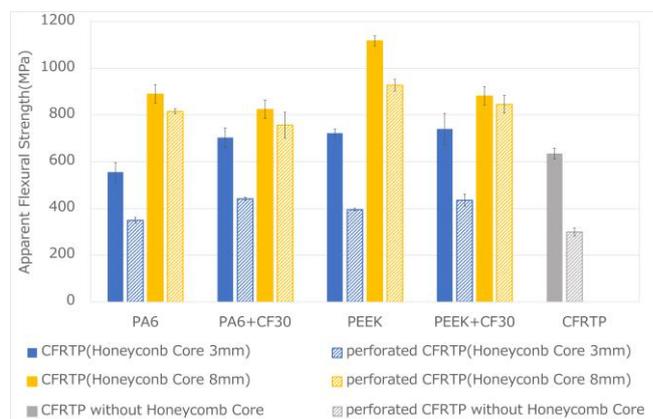


図10 ハニカム試験片の4点曲げ試験結果
(コの字型 CFRTP における見かけの強度)

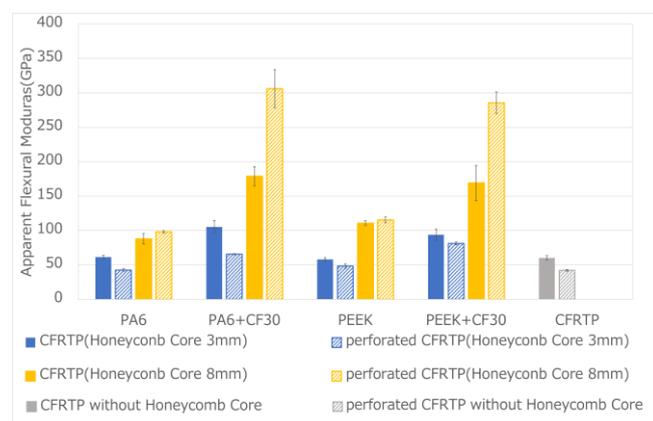


図11 ハニカム試験片の4点曲げ試験結果
(コの字型 CFRTP における見かけの弾性率)

3.3.3 ハイブリッド成形で作製したハニカム試験片

ハイブリッド成形により作製したハニカムコア部（厚さ8mm）のハニカム試験片を用いた4点曲げ試験における見かけの曲げ強度の結果を図12、見かけの曲げ弾性率の結果を図13に示す。樹脂単体のPA6およびPEEKにおける見かけの曲げ強度では、ハイブリッド成形により作製したハニカム試験片よりも、図10に示すコの字型に成形したCFRTP板を用いて作製したハニカム試験片の方が高い結果となった。また、穴を開けたCFRTP板材を用いてハイブリッド成形により作製した試験片の見かけの曲げ強度には、穴を開けていないCFRTP板を用いてハイブリッド成形したハニカム試験片と比較すると、樹脂単体のPA6では見かけの曲げ強度が低下し、PEEKでは向上していた。炭素繊維を複合化したPA6+CF30およびPEEK+CF30では、同程度の見かけの曲げ強度であった。PA6、PA6+CF30およびPEEK+CF30ではハニカムコア部が破壊したのに対し、PEEKではハニカムコア部の部分延伸(ネッキング)が確認された。

一方、見かけの曲げ弾性率においては、PA6+CF30およびPEEK+CF30を用いてハイブリッド成形により作製したハニカム試験片は、コの字型に成形したCFRTP板を用いたハニカム試験片よりも高い結果とな

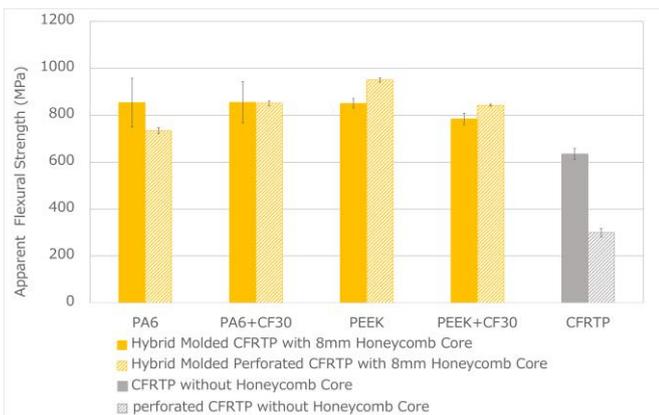


図12 ハニカム試験片の4点曲げ試験結果 (ハイブリッド成形における見かけの強度)

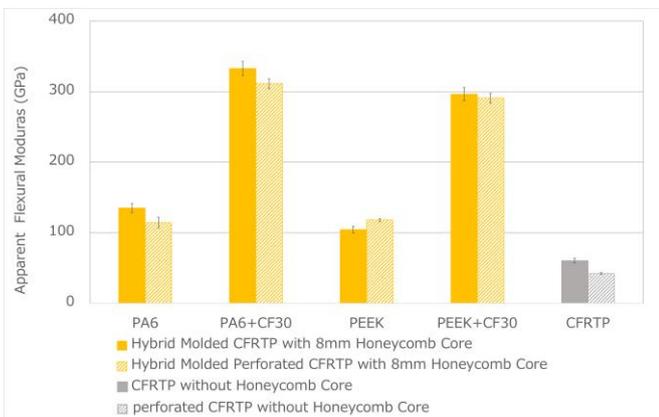


図13 ハニカム試験片の4点曲げ試験結果 (穴あきCFRTPを用いてハイブリッド成形で作製したハニカム試験片)

り、PA6+CF30を用いてハイブリッド成形により作製したハニカム試験片が最も高く、333GPaであった。

樹脂単体のPA6およびPEEKを用いてハイブリッド成形により作製したハニカム試験片の見かけの強度が、コの字型に成形したCFRTP板を用いて作製した試験片のように向上しなかったのは、CFRTP板とハニカムコア部が一体化したことで、ハニカムコア部の変形が集中したためと考えられる。コの字型に成形したCFRTPを用いたハニカム試験片では、ハニカムコア部の剥離が発生したため、図14に示すようにCFRTP板とハニカムコア部の一体化が不十分な箇所があると推察される。このような状態の試験片を曲げた場合、ハニカムコア部の樹脂が変形を広い範囲に分散させるため、曲げ荷重を分散して支えることが可能となり、見かけの曲げ強度が向上したと考えられる。

一方、ハイブリッド成形したハニカム試験片では、CFRTP板とハニカムコア部が強固に一体化していると考えられる。この状態の試験片を曲げた場合、図15に示すように、ハニカムコア部の変形が局所的に集中する。その結果、曲げ荷重を分散させることができないため、PA6で成形したハニカム試験片では、樹脂単体であるにも関わらず、ハニカムコア部が破壊したと考えられる。また、穴を開けたCFRTP板とPEEKを用いてハイブリッド成形により作製したハニカム試験片では、CFRTP板に穴を開けたことで強度が低下し、PEEKの部分延伸(ネッキング)が発生する条件となったことで、荷重の一部を分散させることができたと考えられる。そのため、穴を開けたCFRTP板とPEEKを用いてハイブリッド成形により作製した試験片が穴を開けていないCFRTP板とPEEKを用いてハイブリッド成形により作製した試験片よりも見かけの曲げ強度が向上したと推察される。

したがって、ハイブリッド成形で作製したハニカム試験片はCFRTP板とハニカムコア部が一体化したことで、PA6+CF30およびPEEK+CF30では見かけの曲げ弾性率が向上し、樹脂単体であるPA6およびPEEKにおい



図14 コの字型CFRTPを用いたハニカム試験片のイメージ

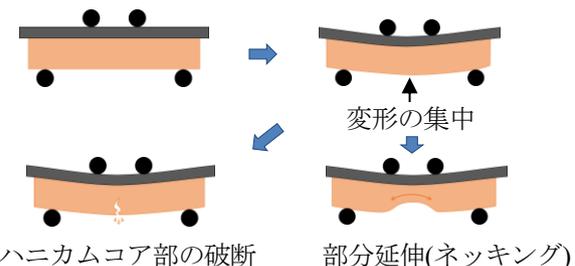


図15 ハイブリッド成形したハニカム試験片のイメージ

てはコの字型に成形したCFRTP板を用いて作製したハニカム試験片と異なり、見かけの曲げ強度が向上しなかったと推察される。

3.3.4 異方向のCFRTP板におけるハニカム試験片

CFRTP板の異方性による見かけの曲げ強度および見かけの曲げ弾性率の影響を評価するため、図16に示すように、CFRTP板の方向が射出方向に対して0°、30°、45°、60°となるハニカム試験片を作製した。ハニカム試験片はハイブリッド成形により作製し、ハニカムコア部はPA6+CF30を用い、厚さは8mmとした。

作製したハニカム試験片の4点曲げ試験結果を図17に示す。CFRTP板単体およびハニカム試験片(8mm)のいずれにおいても、0°方向が最も高い見かけの曲げ強度および見かけの曲げ弾性率を示し、45°方向で最も低い値を示した。0°方向と45°方向の見かけの曲げ強度および見かけの曲げ弾性率を比較すると、CFRTP板単体の場合、見かけの曲げ強度は636MPaから425MPaに約3分の2に低下し、見かけの曲げ弾性率は60GPaから29GPaに約50%低下した。一方、ハイブリッド成形したハニカム試験片(厚さ8mm)では、見かけの曲げ強度が856MPaから752MPaへと約12%低下し、見かけの曲げ弾性率は332GPaから260GPaへと約22%低下した。

以上より、ハニカムコア部がCFRTP板の異方性を補助することで、異方性による強度の低下を12%に、弾性率の低下を22%に抑えることができた。また、CFRTP板単体では、曲げ荷重により急激な破断が発生するが、ハニカム試験片ではハニカムコア部が先に破断するため、CFRTP板の破断が抑制された。このため、ハニカム構造部材とすることで、荷重がかかった際の破断形態において、安全性の向上が期待できる。

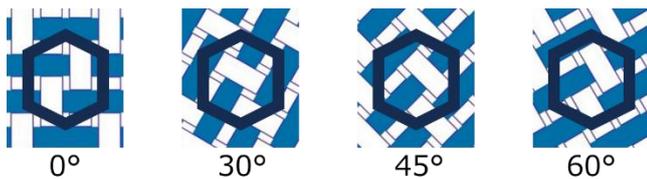


図16 CFRTP板方向とハニカムコア方向のイメージ

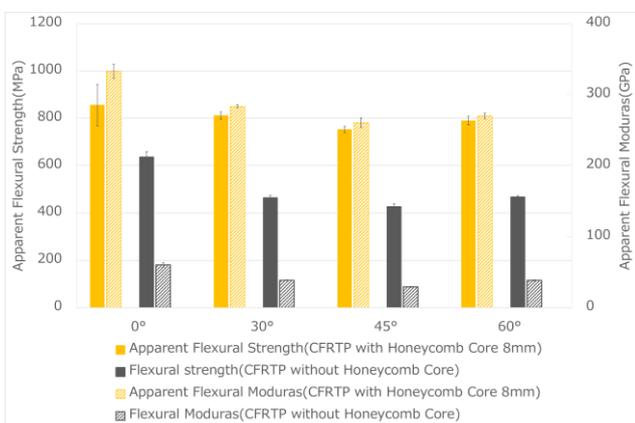


図17 ハニカム試験片の4曲げ試験結果 (CFRTPの方向違い)

4 まとめ

本研究では、ハニカム試験片における流動解析結果と成形した試験片の位相コントラストX線CT測定と比較、および4点曲げ試験から、以下の知見が得られた。

1. 金型を設計およびCFRTPの射出条件を最適化することで、ウェルドラインがなく、リブ方向に炭素繊維が強く配向したハニカムコア部を成形できることが分かった。
2. CFRTPではハニカムコア部のリブ方向に炭素繊維を強く配向させることで成形後の収縮を低減し、剥離や反りを抑制できることが分かった。
3. 今回検討したハニカム試験片においては、見かけの曲げ強度は、CFRTP板をダイヤフラム成形し、PEEKを用いてハニカムコア部の厚さを8mmで作製した試験片が最も高く、1118MPaであった。また、見かけの曲げ弾性率は、PA6+CF30を用いてハイブリッド成形により作製した試験片が最も高く、333GPaであった。ハニカム試験片ではCFRTP板とハニカムコア部の一体化の有無に加え、それぞれの厚さおよび物性が重要な要素であることが分かった。
4. CFRTP板の異方性による影響をハニカムコア部が補助し、全体の機械的特性を向上させる効果があった。また、0°方向で曲げ荷重をかけた場合の破断形態において、CFRTP板では激しく破断するのに対し、ハニカム試験片ではハニカムコア部が先に破断し、CFRTP板の破断が起こらないため、安全性が高いことが分かった。

ハニカムコア部で破断したハニカム試験片を観察すると、多くの試験片が六角形の頂点で破断していた。六角形の頂点で荷重が集中することに加え、流動解析の結果で示されたように炭素繊維の配向が弱くなっているためと考えられる。したがって、六角形の頂点部の形状を改良することで、ハニカム試験片のさらなる高強度化が可能であると考えられる。また、CFRTP板単体では、曲げ荷重により破断すると、使用不能となり廃棄するしかないが、ハニカムコア部と一体化させることで、CFRTP板よりも先にハニカムコア部が破断することが分かったため、ハニカムコア部を交換することでCFRTP板を再利用する活用方法も検討できる可能性がある。

【謝 辞】

本研究の一部は、株式会社島津製作所のご協力のもと実施いたしました。ここに深く感謝いたします。

【参考文献】

- 1) 鈴木ら,岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.4, pp61-64,2023
- 2) 鈴木ら,岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.5, pp75-78,2024