EV 向け軽量化部材の開発（第２報）

鈴木貴行*、浅倉秀一*

Development of lightweight composite materials for Electric Vehicles（Ⅱ）

SUZUKI Takayuki* and ASAKURA Shuichi*

電気自動車（EV）の軽量化のために、注目されている熱可塑性炭素繊維複合材料(CFRTP)における炭素繊維の配向性を位相コントラスト X 線 CT 測定およびシンクロトロン光 X 線 CT 測定で評価した。その結果、炭素繊維の配向性を広い範囲で確認できることが分かった。また、連続繊維の CFRTP 板材に短繊維を含有した CFRTP を射出して成形したハニカム構造部材を 4 点曲げ試験により評価した。その結果、本研究で検討した試験片の中では、見かけの曲げ強度は PEEK+CF30(741MPa)が、見かけの曲げ弾性率は PA6+CF25(110GPa)が一番高いことが分かった。

1　はじめに

環境配慮への関心が高まり、従来のガソリンを燃料とした自動車から電気自動車(EV: Electric Vehicle)への転換が注目を集めている。しかし、EV ではバッテリーが重いため、ガソリン車と比較して航続距離が短いという課題がある。この課題を解決するために現在行われている対策は、バッテリーで車体重量が増加した分、金属製の自動車部品を軽量な樹脂製品に代替する方法である。耐熱性や高強度などの物性が必要な部品の場合、エンジニアリングプラスチック等を軽量で高強度な繊維である炭素繊維と複合化した熱可塑性炭素繊維複合材料(CFRTP)が使用されている。生産効率が求められる自動車部材においては、射出成形によって CFRTP 製部品を製造する必要があるが、炭素繊維の配向や樹脂の歪みは、耐熱性や強度に大きく影響する。

前報 [1]では、ポリエーテルエーテルケトン樹脂(PEEK)と炭素繊維を複合化した CFRTP の射出成形を行い、炭素繊維の配向と歪みの関係性について評価した。繊維配向の評価は、レーザースポット周期加熱法による繊維配向同定装置と断面をマイクロスコープで観察することで行った。しかし、レーザースポット周期加熱法で繊維配向を同定する方法では、レーザーが当たった付近でしか繊維配向を評価できないという課題があった。また、マイクロスコープを使用した断面観察では、試験片を切断および研磨する必要があるため、狙った箇所を評価することが困難であった。そこで、本研究では局所的ではなく、広い範囲で観察が可能な位相コントラスト X 線 CT システムおよびシンクロトロン光 X 線 CT 撮影を活用して炭素繊維の配向性を評価した。

一方、軽量で高強度かつ高剛性を達成するためには、CFRTP を用いるだけでなく、構造による強化も重要である。ハニカム構造部材は、隙間なく正六角形が集まっているため、曲げ強度や曲げ弾性率に優れている。また、ハニカムサンドイッチパネルにすることで、優れた遮音性も示す。EV においては、主な音の発生源であるエンジンがモーターに置き換わったため、車内では、道路ノイズや風切り音がより鮮明になり、静音材料による遮音が注目されている。したがって、ハニカム構造部材は、軽量、高強度、高剛性、遮音性を有するため EV 向け軽量化部材に適していると考えられる。

一般的なハニカム構造部材は、ハニカムコア材料を板材に接着することで一体化している。そのため、接着剤の塗布や乾燥のための時間が必要であるだけでなく、接着不良が発生するリスクを抱えている。また、ハニカムコア材料の成形方法は、板材を折り曲げて成形する方法が一般的である。しかし、CFRTP などの複合材料は、高強度のため、折り曲げることが困難である。仮に折り曲げたとしても繊維の破断などが起こるため、強度が低下すると推測される。その他に、ハニカムコア材料を押出成形する方法も考えられる。CFRTP を押出成形した場合、前報で記載した通り、炭素繊維が樹脂の押出方向に配向していくと予想される。したがって、成形したハニカムコア材料に面外力を加えた際に、力に対する炭素繊維の強化方向が異なるため、CFRTP による高強度化および高剛性化を十分に発揮できないと推察される。

そこで、CFRTP を板材の面に平行に射出成形してハニカム構造部材を成形する方法を考案した。CFRTP を板材の横から射出することで、板材の面に平行に樹脂が流れる。この方法であれば、繊維は樹脂の流動に沿うように配向するため、面と平行に繊維が配向していくと推測される。また、射出成形では溶融した CFRTP が板材に接触し、板材との溶着が起こる。そのため、接着剤を用いずにハニカムコア構造部材の成形が可能である。

現状では、ハニカム構造部材を繊維強化樹脂の射出成形により作製した研究は報告されていない。そのため、本研究では連続炭素繊維織物を積層した CFRTP 板材に CFRTP を射出してハニカム構造部材を作製し、曲げ強度および曲げ弾性率を評価した。

＊　次世代技術部

2　実験

2.1　試験片の作製

2.1.1 ダンベル試験片の成形

材料として、PEEK に炭素繊維を 30wt.%複合化した PEEK+CF30(住友化学株式会社製 スミプロイ CK4600)を使用した。射出成形機は、可塑化部と射出部が分離した V-LINE 方式の 75ｔの竪型射出成形機(株式会社ソディック製 TR75VRE；図 1)を使用した。図 2 に示すダンベル試験片を射出成形により作製し、点線で囲んだ箇所の位相コントラスト X 線測定を実施した。

2.1.2 ハニカム試験片の成形

図 3 に示すハニカム試験片は、CFRTP 板材にハニカムコア部を横から射出成形して作製した。CFRTP 板材は、3K 綾織クロス材とナイロン 6 樹脂(PA6)を複合化した厚さ 2mm の CFRTP 板材(Bond-Laminate 製 TEPEX202)を用いた。この CFRTP 板材を 275℃で 7 分間加熱後、ダイヤフラム成形機(Ring Maschinenbau GmbH 製 MEMBRA6)を使用し、0.5MPa で成形型に 50 秒間加圧することでコの字型に成形した。

ハニカムコア部は図 1 の射出成形機を使用し、材料は PEEK(VICTREX plc.製 PEEK 450G)、PEEK 樹脂に炭素繊維を 30 wt.%複合化した PEEK+CF30（住友化学株式会社製 スミプロイ CK4600）、PA6 に炭素繊維を 25 wt.%複合化した PA6+CF25(LANXESS AG 製 Durethan TP737-201)、炭素繊維を 30 wt.%複合化した PA6+CF30 (LANXESS AG 製 Durethan BCF30H2.0EF)を用いた。ハニカムコア部を射出成形後、100×60mm に切り出し、ハニカム試験片を作製した。

2.2 樹脂流動解析

流動解析ソフト(Autodesk, Inc.製 Moldflow Insight Premium)を使用して PEEK+CF30 を用いた射出成形をシミュレーションし、繊維配向および体積収縮を評価した。

2.3　X 線 CT 測定

2.3.1　位相コントラスト X 線 CT 測定

株式会社島津製作所製位相コントラスト X 線 CT システム(図 4)を使用して、2.1.1 の試験片を測定した。測定条件は管電圧 50kV、管電流 800μA とし、図 2 の点線で囲んだ範囲を測定した。カラーサークルに対応した方向に炭素繊維が配向していることを示し、色の明暗が炭素繊維の配向性の強さを示す。

2.3.2　シンクロトロン光 X 線 CT 測定

あいちシンクロトロン光センターの BL8S2 にて X 線 CT 測定を実施した。X 線は白色 X 線を使用し、観察倍率は 10 倍(視野サイズ 1.3mm×1.3mm、0.65μm/voxel)および 5 倍(視野サイズ 2.6mm×2.6mm、1.3μm/voxel)で測定した。また、PEEK+CF30 のペレットを 10 倍で測定し、PA6+CF25 のハニカム試験片を 5 倍で測定した。

2.4　4 点曲げ試験

2.1.2 で作製したハニカム試験片の見かけの強度および見かけの弾性率を 4 点曲げ試験で評価した。ここで、見かけの弾性率および見かけの強度としたのは、ハニカム試験片で使用した CFRTP 板材を測定した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。

試験機は万能試験機(Instron Co., Ltd.製 5985 型)を使用し、外側支点間距離は 81mm、内側圧子間距離を 27mm とした。また、圧子および支持治具の先端半径は 5mm とした。ハニカム試験片は、CFRTP 板材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℃、湿度 50%)とし、試験速度は、2mm/min とした。試験結果は n=5 の平均値とした。

図 1　竪型射出成形機

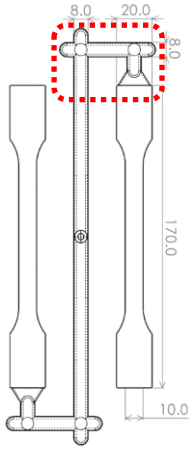

図 2　ダンベル試験片の成形寸法

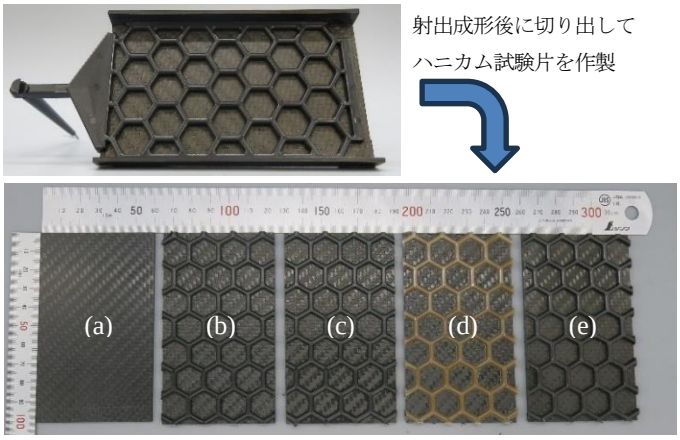

図 3　ハニカム試験片の写真
(a)CFRTP 板材 (b)PA6+CF25 (c)PA6+CF30 (d)PEEK (e)PEEK+CF30

図 4　位相コントラスト X 線 CT システム
(a) Xctal 5000　(b)配向解析ユニット

3 結果及び考察

3.1 X 線 CT 測定

3.1.1 位相コントラスト X 線 CT 測定

図 5 に位相コントラスト X 線 CT の測定結果を示す。ランナーの直線部では樹脂の流動方向の色が明るく表示されている。これは、色の方向(矢印の方向)に繊維が強く配向していることを示している。また、①および②のコーナー部では、それぞれ矢印で示した方向に炭素繊維が配向していることが分かった。ランナー中央部の変色箇所はボイドによるものである。

樹脂流動解析による繊維配向の結果を図 6 に示す。矢印で示した方向に炭素繊維が強く配向する結果となった。この結果は、図 5 の位相コントラスト X 線 CT の結果と類似している。また、流動解析による体積収縮の結果を図 7 に示す。図 5 のボイドの箇所と体積収縮部において変色が強く出ている箇所が一致していることから、体積収縮によるヒケでボイドが発生したと推察できる。

位相コントラスト X 線 CT を使用することで、炭素繊維の配向を非破壊かつ広範囲で測定することができた。また、流動解析の結果から、ランナー中央のボイドは体積収縮によって発生していることが分かった。

3.1.2 シンクロトロン光 X 線 CT 測定

PEEK+CF30 のペレットをシンクロトロン光 X 線 CT で測定した結果を図 8 に示す。白く見える部分が炭素繊維であり、グレーの部分が PEEK である。炭素繊維 1 本 1 本の配向方向やペレット内の空隙が確認できた。点線で囲った枠内を拡大した画像からの炭素繊維と PEEK の面積分率を計算すると炭素繊維が占める面積の割合は約 21%となった。PEEK の密度[2]が 1.30g/cm^3 であり、炭素繊維の密度[3] が約 1.8g/cm^3 であるため、重量分率に換算すると約 27 wt.%である。測定した PEEK+CF30 は炭素繊維を 30wt.%複合化した樹脂であるため、炭素繊維の含有量を X 線 CT 測定から評価することができた。

図 9 にシンクロトロン光にてハニカム試験片を測定した結果を示す。CFRTP は矢印の方向に射出されており、炭素繊維の配向方向が樹脂の流動方向と揃い、CFRTP 板材と平行に配向していることが分かる。また、CFRTP 板材と射出された樹脂の間に隙間がないことが分かる。

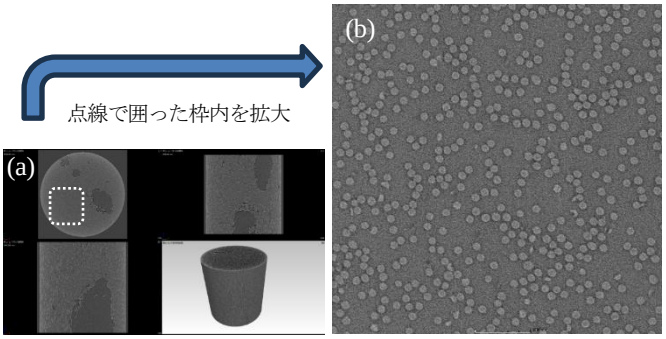

図 8　PEEK+CF30 ペレットのシンクロトン光 X 線 CT 画像
(a)CT 測定結果　(b) 拡大写真

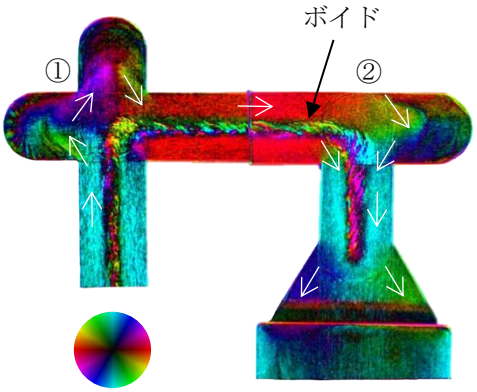

図 5　位相コントラスト X 線 CT 画像

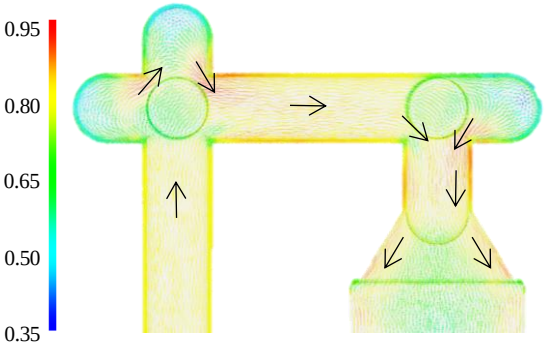

図 6　流動解析による繊維配向の結果

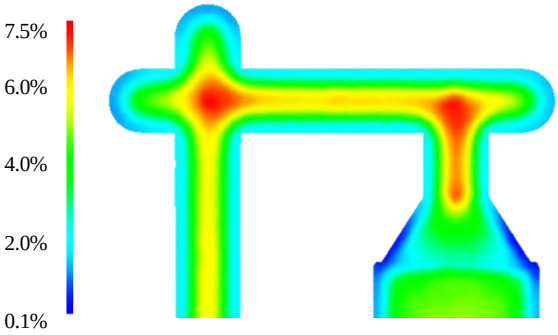

図 7　流動解析による体積収縮の結果

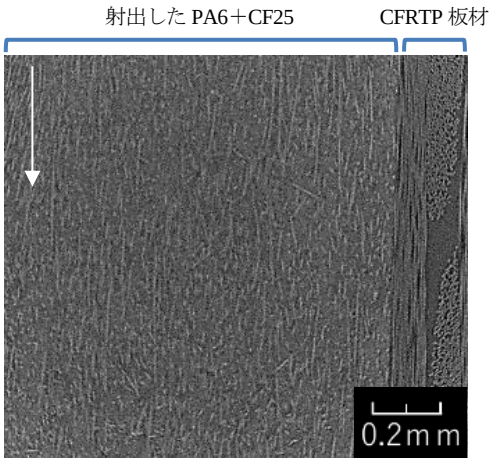

図 9　ハニカム試験体のシンクロトロン光 X 線 CT 画像

3.2　4 点曲げ試験

ハニカム試験片の見かけの曲げ強度および見かけの弾性率の結果を図 10 に示す。

見かけの曲げ強度は PA6+CF25 が 686MPa、PA6+CF30 が 705MPa、PEEK +CF30 が 741MPa、PEEK が 723MPa、CFRTP 板材が 636MPa であった。本研究で作製したハニカム試験片の中では、PEEK+CF30 が一番高い曲げ強度を示した。また、炭素繊維を複合していない PEEK 樹脂においても、CFRTP 板材より曲げ強度が向上していた。PEEK 樹脂で成形したハニカムコア部は柔軟性が高く、図 11 に示すように CFRTP 板材が破断するまで荷重を支えることができたためと推察される。

見かけの弾性率は PA6+CF25 が 110GPa、PA6+CF30 が 105GPa、PEEK+CF30 が 94GPa、PEEK が 58GPa、CFRTP 板材が 60GPa であった。炭素繊維を複合化した樹脂でハニカムコア部を成形した試験片では、CFRTP 板材よりも高い弾性率を示し、作製したハニカム試験片の中では、PA6+CF25 が一番高い弾性率を示した。PEEK+CF30 で弾性率が向上しなかったのは、ハニカムコア部の PEEK 樹脂と CFRTP 板材のマトリックス樹脂である PA6 樹脂が相溶しないことによると仮定される。つまり、ハニカムコア部が CFRTP 板材と溶着して一体化しているのではなく、アンカー効果によって接合しているため、弾性率が向上しなかったと考えられる。一方、PA6 +CF25 および PA6+CF30 では、マトリックス樹脂が CFRTP 板材と同じ PA6 であり、射出成形時に溶着により CFRTP 板材と一体化できるため、弾性率が高くなったと推察される。また、PA6+CF25 の方が高い弾性率となったのは、PA6+CF25 の方が PA6+CF30 よりも樹脂量が多く、CFRTP 板材と溶着しやすいためと予測される。実際に破断後のハニカム試験片を確認すると、PEEK および PEEK+CF30 では、破断後にハニカムコア部が CFRTP 板材からすべて剥離したのに対し、PA+CF25 および PA+CF30 では破断後でも破断部付近以外のハニカムコア部が CFRTP 板材に溶着したままであった。また、PEEK の弾性率は PEEK 樹脂自体の弾性率が低いため、CFRTP 板材と同程度となった。

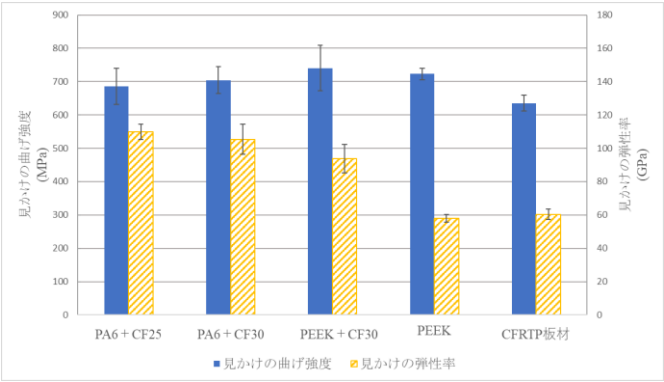

図 10　見かけの曲げ強度および見かけの弾性率

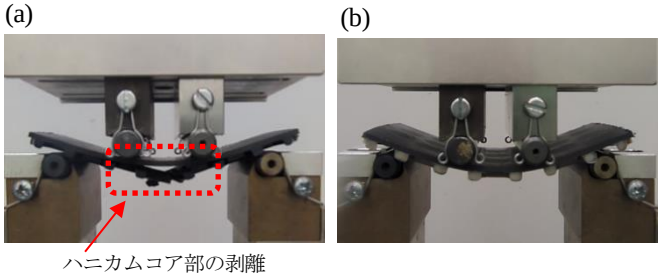

図 11　4 点曲げ試験時の写真
(a) PA30+CF　(b)PEEK

4　まとめ

CFRTP の位相コントラスト X 線 CT 測定およびシンクロトロン光 X 線 CT 測定と射出成形によるハニカム構造部材の成形において、以下のことが分かった。

1.位相コントラスト X 線 CT 測定をすることで、炭素繊維の配向方向を広い範囲で確認することができた。
2.シンクロトロン光 X 線 CT 測定では、炭素繊維 1 本の配向方向を確認することが可能であり、CT 画像から炭素繊維の含有量を計算することができた。
3.板材の面方向に CFRTP を射出成形して作製したハニカムコア構造部材では、面に対して平行に炭素繊維が配向するため、高強度化および高弾性化が可能であることが分かった。本研究で検討した試験片では、見かけの曲げ強度は PEEK+CF30(741MPa)が、見かけの曲げ弾性率は PA6+CF25 (110GPa)が一番高いことが分かった。

位相コントラスト X 線 CT 測定により広い範囲で炭素繊維の配向方向を確認できるため、様々な CFRTP 製品の評価で応用が可能であると考えられる。また、射出成形を活用したハニカム構造部材は、板形状以外に複雑な形状でハニカム構造を成形できる可能性があることや、射出成形を活用できるため、自動車部材の生産に適していると考えられる。

【謝　　辞】

本研究の一部は、東北経済産業局公設試等放射光利活用実践等支援事業により実施しました。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)　化学工業日報社, プラスチック成形材料商取引便覧, 改訂第 37 版, 2020
3)　技術情報協会,炭素繊維およびその繊維複合材料における分析試験、評価解析に関する最新事例集,第 1 版, pp28-29, 2019