

## CFRTP の低コスト成形加工技術の開発 (第 1 報)

# 1 CFRTP 解析技術の確立と機械的特性に与える成形条件の影響の考察

松永尚徳, 西田裕紀, 池田慎哉\*, 下原伊智朗, 藤井敏男, 松葉 朗, 河野洋輔

Development of low-cost molding processing technology of CFRTP (1st Report)

MATSUNAGA Hisanori, NISHIDA Hironori, IKEDA Shin-ya, SHIMOHARA Ichirou, FUJII Toshio, MATSUBA Akira and KOUNO Yousuke

Bending behavior of structural parts fabricated with several process conditions by press forming of the CF/PA6 cross-ply lamination sheet were investigated.

The analytical accuracy of CFRTP having anisotropic and nonlinear mechanical properties was improved by applying the yield function of Hill(1948). The stiffness of products increased with increasing mold temperature and forming pressure when the mold temperature was lower than the melting point of PA6. In addition, dispersion of the stiffness was reduced by heating the mold temperature above the melting point of PA6.

キーワード：炭素繊維複合材料, 熱可塑性樹脂, プレス成形, 非線形解析, 機械的特性, 成形条件

## 1 緒 言

近年, 環境問題, 石油価格高騰への対応策として, 自動車の燃費向上, エネルギー転換が重要な課題となっており, そのためには車体・部品の軽量化が不可欠である。部品軽量化のための材料として, 炭素繊維複合材料 (CFRP) が注目され, 自動車部品として採用される事例も見られるようになってきた。さらに, 成形速度やリサイクルの面から, 熱可塑性炭素繊維複合材料 (CFRTP) の普及が期待されている。総合技術研究所では, 平成 21 年度からプロジェクト研究として, CFRTP を用いて自動車部品の生産に適した高速・低コストの成形技術の開発を開始し, この中で CFRTP の異方性の特徴を活かし, かつ成形時間短縮を図るため, 一方向繊維 (UD 材) の積層材のプレス成形技術を取り上げて研究に取り組んでいる。

本研究では, CFRTP の異方性かつ非線形の物性を考慮した解析技術を確認して構造解析の解析精度を向上するとともに, プレス成形中の材料挙動についての解析を試みた。また, 成形技術として成形性に優れるポリアミド 6 (PA6) をマトリックス樹脂とする CFRTP を用い, その機械的特性に及ぼす成形条件の影響を検討した<sup>1)</sup>。

## 2 CFRTP 解析技術の確立

### 2.1 CFRTP の異方性非線形の取り扱い

CFRTP は, 繊維方向に大きな強度・弾性率を有するが, 繊維と直交する方向は母材となる樹脂と同程度となり, 方向による差が数十倍と著しい異方性を有する。このた

め, CFRTP の構造解析では, この異方性を考慮することが必須となる。繊維配向方向を軸力方向から任意の角度だけ傾けた CFRP 板の引張試験 (off-axis 引張試験) で得られた応力-ひずみ線図の一例を図 1 に示す。角度  $\theta$  により弾性率が大きく異なる異方性を示すとともに, 非線形性もみられた。このため, 解析では, この非線形性も合わせて考慮する必要がある。

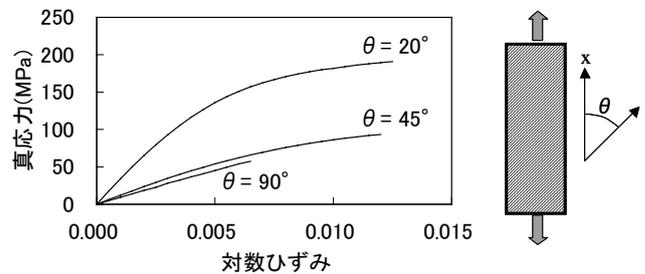


図 1 off-axis 引張試験

ここで, 繊維強化複合材料において試験片に生じる応力場を平面応力状態と仮定し, 単軸応力  $\sigma_x$  と単軸塑性ひずみ  $\varepsilon_p$  を用いて相当応力  $\bar{\sigma}$  と相当塑性ひずみ  $\bar{\varepsilon}_p$  を表すと, 次式となること隠田ら<sup>2)</sup>により報告されている。

$$\bar{\sigma} = h(\theta)\sigma_x$$

$$\bar{\varepsilon}_p = \varepsilon_{px}/h(\theta)$$

$$h(\theta) = \sqrt{\frac{3}{2}(\sin^4 \theta + 2a_{66} \sin^2 \theta \cos^2 \theta)}$$

本式のパラメータ  $a_{66}$  の調整により, 図 1 の各角度の相当応力-相当塑性ひずみ線図を, 図 2 に示すように 1 本のマスター曲線で表現することができ, 異方性非線形の材料特性を考慮した解析が可能となる。

\* (現) 広島県立総合技術研究所 東部工業技術センター

本研究では、このような繊維強化複合材料の降伏条件を商用解析ソルバーで使用できるよう、隠田ら<sup>2)</sup>と同様に Hill (1948) の降伏条件へ変換し、解析を行った。

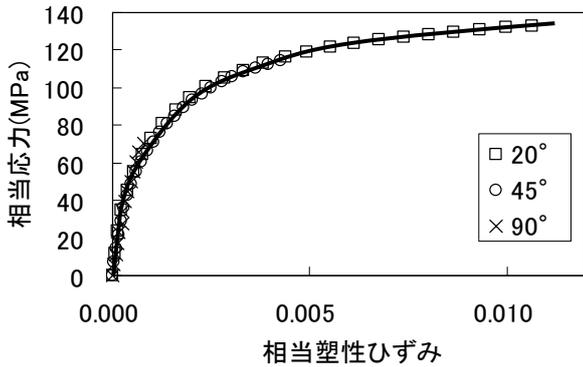


図2 相当応力-相当塑性ひずみのマスター曲線

## 2.2 異方性非線形を考慮した構造解析

異方性非線形を考慮した構造解析の効果を確認するため、実験用金型にてプレス成形でCFRTPの成形品を作製し曲げ試験を行った。その一例を写真1に示す。圧子の変位と荷重を測定し、解析値と比較した結果を図3に示す。

変位が5mm以上の範囲では、異方性非線形を考慮した解析により、実験値により近くなることが確認できた。微小変形においては異方性線形の材料モデルによる解析でも誤差は小さいが、大きな変形を伴う場合に精度良く解析を行うには異方性非線形の材料モデルが必要となる。



写真1 曲げ試験の様子

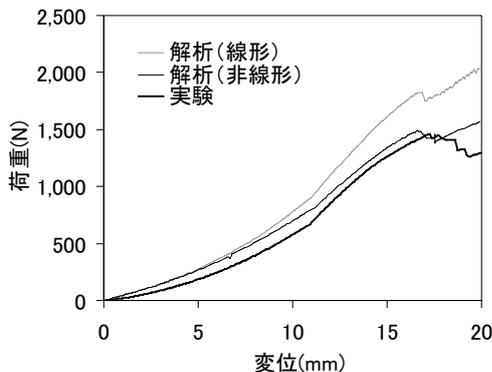


図3 実験値と解析値の比較

## 2.3 プレス成形中の材料挙動の解析

成形品に発生する繊維配向の乱れとしわの発生を予測するため、成形時の金型内での材料挙動をMSC.Marcにより計算し、実験用金型による実製品において比較検討を行った。予備成形板にプリントした格子模様と、解析における要素の変形の様子がよく一致しており、しわが発生する箇所も概ね特徴を捉えている。写真2と図4に実成形品の写真と解析結果の一例を示す。

今後、構造解析に繊維配向の乱れを反映させる仕組みを構築することで、構造解析の精度をさらに向上させることが期待できる。

なお、解析にはCFRTPの成形温度での物性値が必要であるが、その測定は困難である。ここでは、複数種類の試作品での実験により物性値の推測・合わせ込みを行っている。

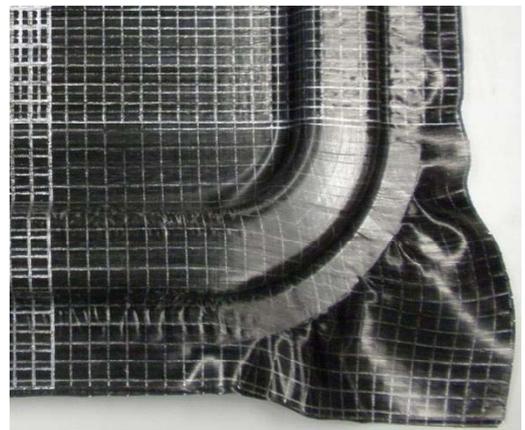


写真2 実成形品 (積層: [0/90]2s)

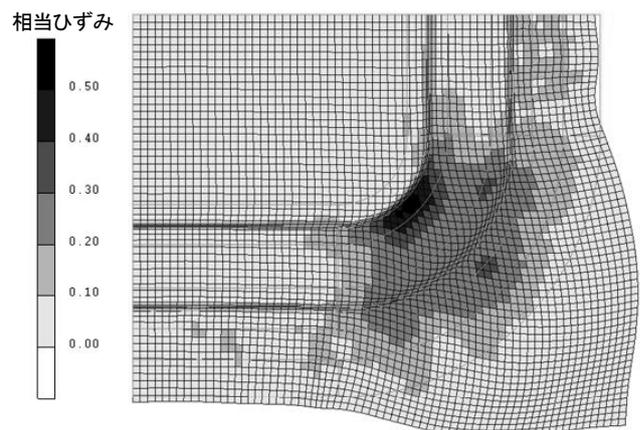


図4 解析結果 (積層: [0/90]2s)

### 3 機械的特性に与える成形条件の影響

#### 3.1 成形方法および成形条件

プレス成形で使用した CFRTP 板(予備成形板)は、CF/PA6 を素材とした TENCATE 社 UD プリプレグ Thermo-LiteTM 1160N を用い、以下の手順で作成した。

まず、180mm 四方に切り出した UD プリプレグを 50℃ で 8 時間乾燥後、 $[0^\circ / 90^\circ]_{25}$  に積層する。次に、積層したプリプレグをアルミ板で挟み、250℃、10 分加熱後、0.5MPa で 5 分プレスした。その後、アルミ板ごと取出し、さらに冷却プレスにより 3MPa で室温まで冷却し 180mm 四方、厚さ 1mm の予備成形板とした。

実験では、50℃で 8 時間乾燥させた予備成形板をアルミ製の把持具でつかみ、赤外加熱装置で 250℃に加熱した後、表 1 に示す成形条件(プレス時の成形圧力・温度と保持時間)でプレス成形を行った。

PA6 の融点以上で成形するホットプレス(H)では、成形時の金型温度を 250℃に設定し、加圧保持時間を 120 秒とした。その後 30 分かけて 180℃まで冷却し、脱型した。一方、PA6 の融点以下で成形するコールドプレス(C1, C2, C3)では、金型温度を 120℃又は 180℃とし成形圧力を 8MPa 又は 16MPa とし、プレス後、加圧状態のまま 30 秒保持した。

今回作製した立体成形品は図 5 に示すハット形断面の L 字状部品であり、図中に示す寸法に切り出した後、曲げ試験に供した。

表 1 成形条件

	成形圧力	金型温調機設定温度(℃)		保持時間
	(MPa)	成形時	脱型時	
C1	8	120	-	30
C2		180		
C3	16			
H	8	250	180	120

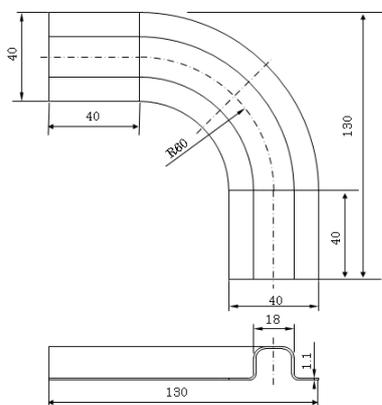


図 5 試験片寸法(単位:mm)

#### 3.2 実験結果と考察

##### 3.2.1 炭素繊維体積含有率(Vf)と空洞率(Vv)の測定

炭素繊維強化プラスチックの繊維含有率及び空洞率試験方法(JIS K 7075)に準じ、コーナー部分の Vf と Vv の測定を行った。結果を表 2 に示す。

表 2 繊維体積含有率と空洞率測定結果

	Vf	Vv
	(%)	(%)
C1	47.4	8.5
C2	50.4	2.7
C3	50.8	3.1
H	51.7	2.7

Vf はいずれの成形条件でも約 50%となったのに対し、Vv は成形条件により違いが生じた。成形温度の異なる C1, C2 で、温度の高い C2(180℃)で Vv が低く良好な結果となった。成形温度を 180℃に固定し成形圧力を変えた C2, C3 の比較では、Vv に大きな違いは見られなかった。さらに温度を高めた H(250℃)では C2, C3 との大きな違いは見られなかった。このことから、空洞率を小さくするには、8MPa, 180℃以上で成形することが必要と考えられる。

##### 3.2.2 成形品外周部分表面粗さの測定

成形条件により表面の平滑性に違いがあったため、表面粗さを測定した。非接触三次元測定装置(三鷹光器製 NH-3)により写真 3 に示す領域の表面起伏を測定し、凹凸の最大差を Hmax とし表面粗さの指標とした。測定結果を表 3 に示す。

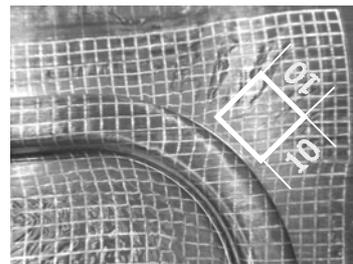


写真 3 表面粗さ測定領域

表 3 表面粗さの差

	Hmax(μm)
C1	324
C2	97
C3	53
H	46

表 3 より、コールドプレス(C2, C3)では、成形圧力が 8MPa より 16MPa と高い方が Hmax の値が小さくなっており、表面の平滑性が高くなることからわかる。ホットプレス(H)では 8MPa の成形圧力でも Hmax が小さく、金型温度が樹脂の融点以上となり樹脂が流動するため、低い圧力でも平面の平滑性が高いと考えられる。

### 3.2.3 断面観察

成形品のコーナー部を切断し、断面観察を行った。その例として、C1, Hの両条件における断面観察結果を写真4に比較して示す。

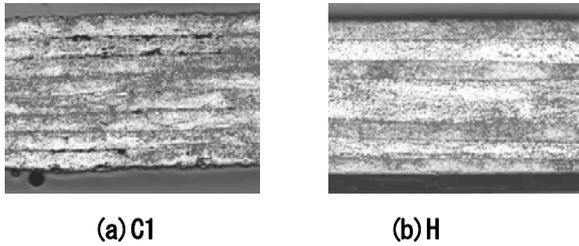


写真4 実体顕微鏡による断面観察

C1は板厚中央付近に小さなポイドが複数観察されるが、Hにはほとんどポイドが生じていない。これは表2で示したVv値の結果とよく一致している。

### 3.2.4 曲げ試験

写真5に示すように試験片を固定する専用治具を用いて曲げ試験を行った。試験速度は1mm/minとし、荷重と変位を測定した。

曲げ試験結果の例として、比較的荷重の小さい300N以下の弾性領域に注目し、荷重-変位曲線を図6に示す。

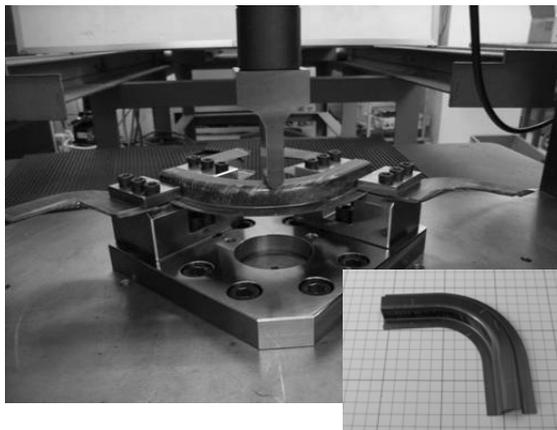


写真5 曲げ試験の様子と試験片

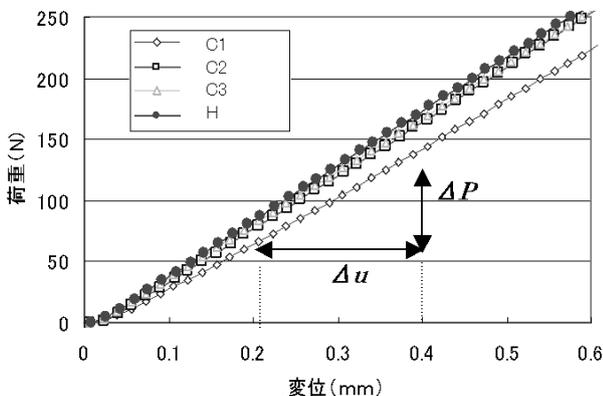


図6 荷重-変位曲線

ここで、クロスヘッド変位0.2~0.4mm間の荷重-変位曲線の勾配を立体成形品の剛性 $\Delta P/\Delta u$ とし各成形条件の違いによる $\Delta P/\Delta u$ を比較したものを図7に示す。

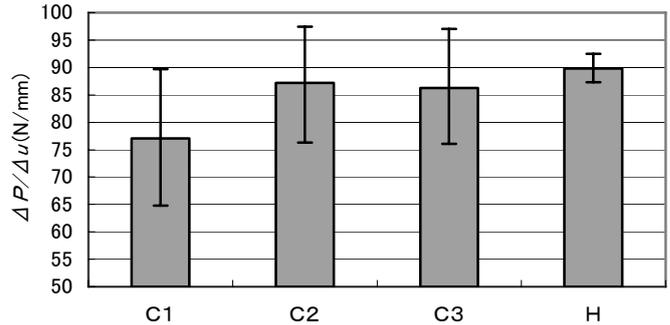


図7 各試験片間における $\Delta P/\Delta u$ の比較

これより、C1の剛性が低いことがわかる。この要因として、空洞率の影響が考えられる。また、コールドプレスで金型温度や成形圧力を高くすることにより、剛性が高くなることがわかった。また、ホットプレスと比べ、コールドプレスはばらつきが大きいことがわかった。

## 4 結 言

本研究により次のことを明らかにした。

- (1) CFRPの構造解析において、異方性非線形としての特性はHill(1948)の降伏条件を適用することで計算でき、解析精度の向上が可能となる。
- (2) CFRTIPのプレス成形について、成形シミュレーションにより解析し実成形品と比較した結果、各部位の変形の挙動がよく一致した。今後、構造解析との連携により、さらなる解析精度の向上が期待できる。
- (3) CFRTIPプレス成形条件において、金型温度と成形圧力を高くすることで空洞率と表面粗さが小さくなり、成形品の剛性が高くなる。また、ホットプレスにおいてはコールドプレスより剛性のばらつきが小さくなる。

## 文 献

- 1) 西田他, 熱可塑性炭素繊維強化複合材料を用いた立体成形品の機械的特性に与える成形圧力と温度の影響, 複合材料シンポジウム2010 予稿集
- 2) 隠田他, 一方向CFRPおよびGFRPのねじり挙動, 日本複合材料学会誌, 33, 2(2007), 48-54