

# 1 CFRTP の低コスト成形加工技術の開発 (第3報) CFRTP のプレス成形シミュレーション

松永 尚徳, 山下 弘之, 藤井 敏男, 松葉 朗\*, 河野 洋輔, 西田 裕紀

Development of low-cost molding process of CFRTP (3rd Report)  
Virtual forming simulation for CFRTP

MATSUNAGA Hisanori, YAMASHITA Hiroyuki, FUJII Toshio, MATSUBA Akira,  
KOUNO Yousuke and NISHIDA Hironori

Virtual forming simulation is expected to be an effective tool to predict deformation behavior such as wrinkling and fiber orientation changes during press forming process for carbon fiber reinforced thermoplastics(CFRTP), therefore an analysis of press molding was carried out for CF/PA6 sheet lamination using a commercial FEM software PAM-FORM. As a result, it was revealed that the wrinkle formation for different stacking sequences can be reproduced in the forming analysis based on some material properties estimated by static FEM analysis with microstructural model. Moreover, the accuracy of a stiffness analysis was improved by taking into account the fiber orientation changes obtained from the results of PAM-FORM.

キーワード：炭素繊維複合材料, 熱可塑性樹脂, プレス成形, 数値解析

## 1 緒 言

近年、環境問題及び、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いるがそれらの解決のためには車体・部品の軽量化が不可欠である。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、自動車の車体や部品として採用される事例が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。

このため、平成21年度から一方向(UD)積層板のプレス成形技術に取り組み、その第1報としてCFRPの解析技術の確立と、CFRTPの機械的特性に及ぼす成形条件の影響を調査し<sup>1)</sup>、得られた知見を基に第2報としてCFRTP製自動車用部品トランスバースメンバーの開発・試作を報告した<sup>2)</sup>。ここでは、積層構成によりしわの発生状況が異なり、その解明と事前予測が技術課題となった。そこで本研究は、プレス成形シミュレーションを適用し、プレス工程中の材料の変形挙動の再現を試みた。

また、UD材を積層したCFRPの構造解析において、異方性を考慮するためには解析モデルの各要素に繊維方向を設定する必要がある。しかし、成形による繊維方向の変化を事前に予測することが難しく、また、解析モデルに繊維方向を忠実に設定することが煩雑であるため、座標系を基準として一律に繊維方向を設定する手法が一般的となっている。本研究では、プレス成形シミュレーションの解析結果から繊維方向を算出して構造解析に反映するための連携システムを開発し、構造解析の精度向上を図った。

## 2 CFRTP のプレス成形シミュレーション

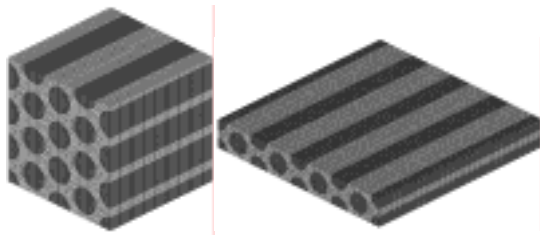
### 2.1 解析の仮定

ソルバーは、ESI Groupの樹脂・複合材成形解析ソフトウェアPAM-FORM for Compositesを使用し、次の仮定の下に計算を行った。①溶融CFRTPは、本来は粘弾性体の樹脂と弾性体の炭素繊維の複合材であるが、計算モデルの簡略化のため弾性体とみなす。②プレス工程中の温度変化は無視する。

### 2.2 溶融CFRTPの物性値の推定

プレス工程中の材料の変形挙動の解析には、母材となる熱可塑性樹脂が溶融した状態でのCFRTPの弾性率が必要となるが、溶融状態での弾性率を試験等で求めることは現実的には不可能である。一方、繊維強化複合材の粘弾性構成式のような複雑な特性を、基本的な試験から得られる物性を基に推定する均質化法が提案されている<sup>3)</sup>。そこで本研究では、この均質化法を参考にして、**図1**に示すようにCFRTPのミクロ構造をモデル化し、構造解析により溶融状態のCFRTPの弾性率を推定することとした。ここでは、炭素繊維の直径を7 $\mu$ m、炭素繊維体積含有率を50%としてモデル化した。構造解析のソルバーはMSCのMarcを用い、境界条件の影響が小さくなるモデル中央部分を抽出してCFRTPの物性値を算出した。

室温における母材PA6の弾性率を3.5GPa、ポアソン比を0.4と仮定し、解析から求められるCFRTPの物性値が実測値と同等になる炭素繊維の物性値を反復計算により推定した。その物性値を**表1**に示す。



(a)縦弾性率算出用 (b)せん断弾性率( $G_{12}$ )算出用

図1 物性値算出用モデル

表1 推定した炭素繊維の物性値

$E_{11}$	206,000MPa	$\nu_{12}$	0.25	$G_{12}$	66,000MPa
$E_{22}$	23,000MPa	$\nu_{23}$	0.25	$G_{23}$	7,000MPa
$E_{33}$	23,000MPa	$\nu_{31}$	0.02	$G_{31}$	66,000MPa

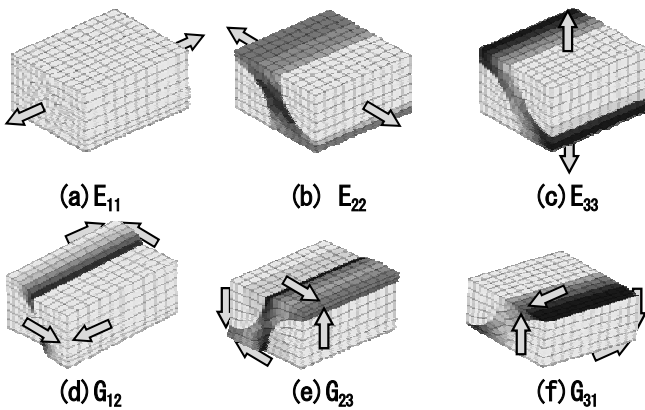


図2 物性値算出用モデルの解析結果

また、その時の変形の様子を図2に示す。ここで、図の濃淡はひずみ分布を示す。(a)に示す繊維方向の変形は均一な変形となるが、(b)~(f)に示す繊維方向以外の変形とせん断変形では、炭素繊維の変形は非常に小さく、母材に変形が集中していることがわかる。

さらに、推定した物性値の炭素繊維、溶融状態のPA6の組み合わせにより、溶融CFRTPの物性値を同様に推定できる。汎用グレードのPA6の動粘弾性測定によると、貯蔵弾性率は、図3に示すように溶融温度の225℃付近を境に1,000分の1程度に低下するため、溶融PA6の弾性率を1MPa、ポアソン比を0.49と仮定し、表2に示す溶融CFRTPの物性値を推定した。

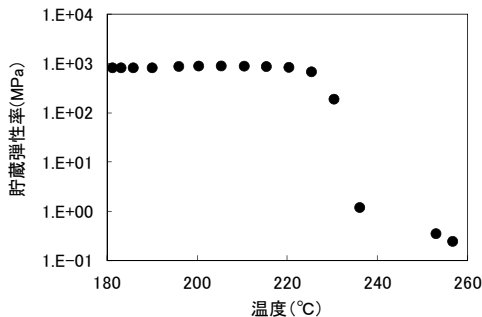


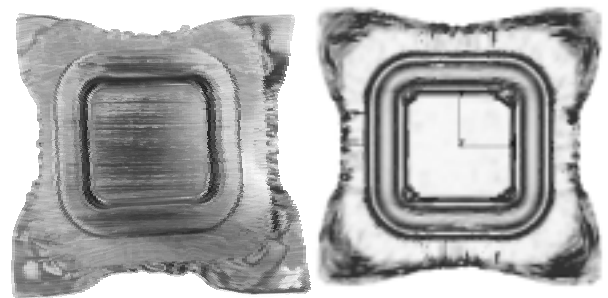
図3 PA6貯蔵弾性率の温度依存性

表2 推定した溶融CFRTPの物性値

$E_{11}$	102,285MPa	$\nu_{12}$	0.38	$G_{12}$	1.0MPa
$E_{22}$	6.7MPa	$\nu_{23}$	0.89	$G_{23}$	1.5MPa
$E_{33}$	6.7MPa	$\nu_{31}$	0.002	$G_{31}$	1.0MPa

## 2.3 PAM-FORM 解析パラメータの調整

表2の物性値を用いてPAM-FORMでプレス工程を解析し、実成形品と解析結果の外観をもとに比較検討を行った。せん断弾性率Gにより、プランクの輪郭形状やしわの発生状況が変化するため、実成形品と解析結果が概ね同形状になるようにGの値を調整した。その結果を図4に示す。解析結果は、隣接要素間での折れ曲がり角度を濃淡表示し、屈曲部としわ発生部を濃く表示している。また、求めたPAM-FORM用解析パラメータを表3に示す。



(a)実成形品 (b)解析結果

図4 実成形品と解析の比較

表3 溶融CFRTPのPAM-FORM用解析パラメータ

$E_1$	102,000MPa	G	10MPa
$E_2$	6.7MPa	$\nu$	0.3

## 2.4 トランスバースメンバーの解析

求めた解析パラメータを用いて、トランスバースメンバーの開発試作で課題となった積層構成によるしわ発生状況の違いを、プレス成形シミュレーションで再現可能かを検討した。解析モデルを図5、結果を図6に示す。解析結果では、屈曲部としわ発生部を濃淡で濃く表示し、実成形品の写真には、しわ発生部を白線で示す。各積層構成とも、しわ発生の位置が概ね合っており、完全ではないものの積層構成による違いを特徴的に再現できた。

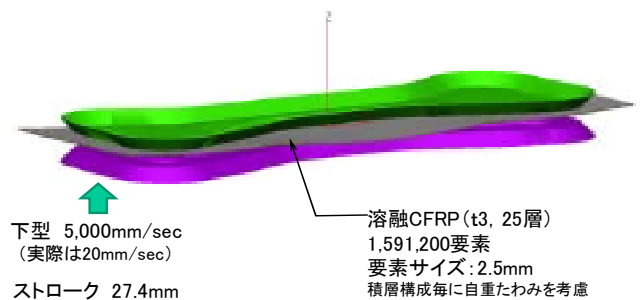


図5 トランスバースメンバー 解析モデル

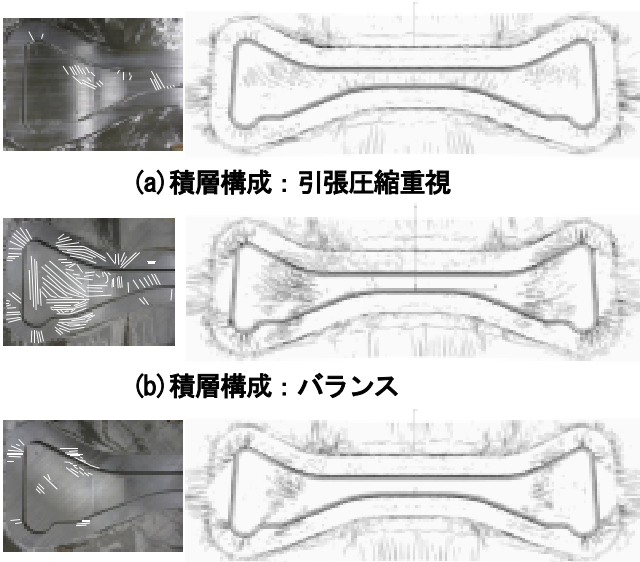


図6 実成形品（左）と解析結果（右）の比較

### 3 構造解析との連携

#### 3.1 繊維方向の抽出

PAM-FORM の解析結果のメッシュ形状から繊維方向を算出し、それを構造解析 Marc の解析モデルに反映させることで、構造解析の精度向上を図る。PAM-FORM の解析モデルを格子状の四角形一次要素のマップドメッシュで作成することで、要素を構成する 4 つの節点の位置情報から、図 7 に示すように繊維方向の算出が可能となる。

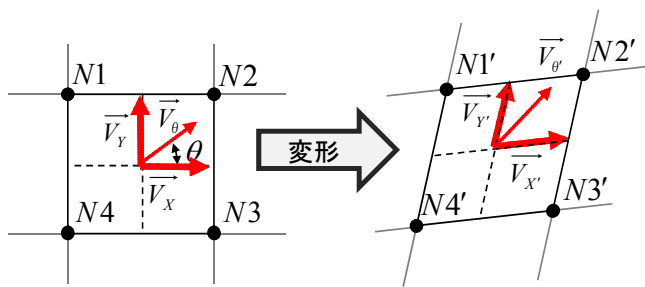


図 7 繊維方向の算出方法

まず、要素の重心位置を、4 つの節点の XYZ 各座標の平均を求めることで算出する。X 方向  $\vec{V}_x$  は重心から節点 2 と 3 の中間位置への単位ベクトルと定義し、Y 方向  $\vec{V}_y$  は重心から節点 1 と 2 の中間位置への単位ベクトルで定義する。X 軸と任意の角度  $\theta$  をなす繊維方向  $\vec{V}_\theta$  は、式 (1) により定義する。

$$\vec{V}_\theta = \cos \theta \cdot \vec{V}_x + \sin \theta \cdot \vec{V}_y \quad (1)$$

同様に変形後の繊維方向  $\vec{V}'_\theta$  は、変形後の節点座標を用いて式 (2) により定義し、これを Marc の対応する要

素に投影処理することで、PAM-FORM の計算結果を Marc に反映することが可能となる。

$$\vec{V}'_\theta = \cos \theta \cdot \vec{V}'_x + \sin \theta \cdot \vec{V}'_y \quad (2)$$

本研究では、PAM-FORM の各レイヤーの繊維方向を抽出して Marc の該当要素の繊維方向を算出するインターフェースプログラムを FORTRAN でプログラミングし、表計算ソフト EXCEL のマクロ機能により Marc のプリ・ポストプロセッサを制御して、Marc の積層構成と繊維方向を設定する連携システムを開発した。

#### 3.2 成形品との比較

実験用金型でプレス成形した実成形品 ( $0^\circ / 90^\circ$  のクロスプライ) と解析モデルの比較を図 8 に示す。(a) は実成形品の全体写真であり、(b) は左下コーナー部の拡大写真である。実成形品には、成形前のブランクに塗料で格子状のマーキングを施し、材料の変形挙動を視認できるようにした。なお、繊維の 0 度方向は横方向のマーキングに一致する。(b) に相当する部位の PAM-FORM の解析結果を (c) に示す。格子状のマップドメッシュが三次元形状に賦形され、実成形品のマーキングと形がよく一致している。(d) に Marc の解析モデルを示す。要素中央に表示された線は、連携システムにより設定された繊維 0 度方向を示す。PAM-FORM と Marc のメッシュ形状は異なるが、適切に繊維方向が設定されたことが確認できた。

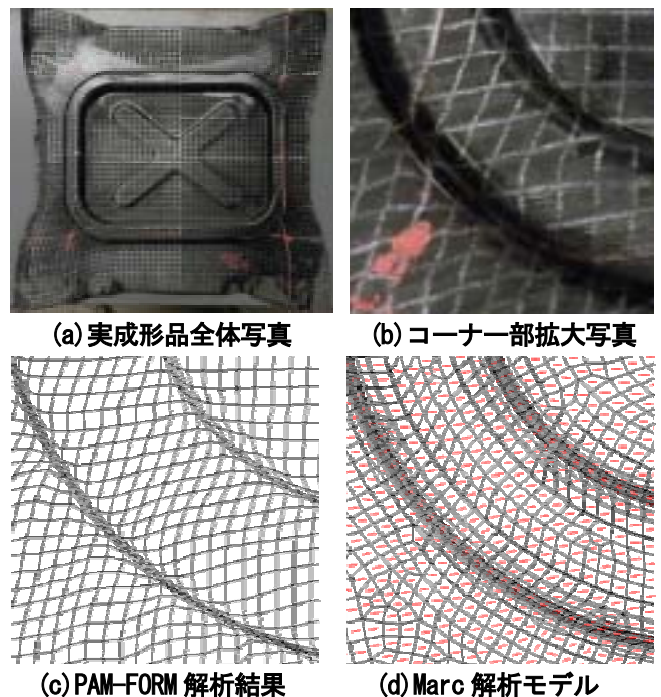


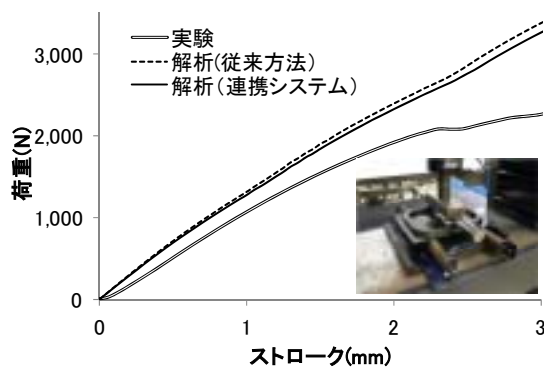
図 8 実成形品と解析モデルの比較

次に、実成形品の3点曲げ試験結果と、構造解析結果を比較検証した。試験結果と、繊維方向を反映しない従来方法の解析結果と、連携システムにより繊維方向を反映した解析結果の比較を図9に示す。実成形品への負荷方法が異なる2通りの試験を行った。破線は繊維の0度方向をX軸方向(図8(a)の横方向)に設定した従来方法による解析結果を示し、実線は連携システムによりPAM-FORMによる繊維方向を反映した解析結果を示す。

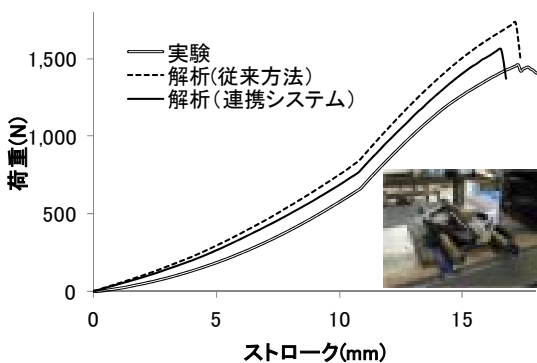
(a)に示すようにリブに対して直交方向に負荷する曲げモードでは、リブに主に曲げ変形が生じ、荷重点を中心に局部的に応力が分布する。荷重点付近では繊維に乱れが少ないため、従来方法に対して連携システムでは3%程度荷重が低下する結果となった。

(b)に示すように実成形品の対角に荷重するねじりモードでは、コーナー部を中心にねじり変形が生じ、コーナー周辺領域に応力が分布する。この部分は繊維の乱れが比較的大きい部位である。従来方法に対して連携システムでは7%程度荷重が低下する結果となった。

このように、負荷方法により機械的特性に対する繊維の乱れによる影響の大きさが異なる。これは、成形品の機械的特性において、応力負担の大きい部位に対しては、繊維配向の乱れを抑えることが望ましく、応力負担の小さい部位における繊維配向の乱れは影響が小さいことを意味する。



(a) 曲げモード



(b) ねじりモード

図9 3点曲げ試験

なお、いずれの実験に対しても解析の荷重が大きい結果となっている。これは、実成形品で発生したプレス成形によるそりが要因の一つである。初期領域では、成形品と治具との接触状況が不均一になり、実験のストローク荷重曲線の傾きが小さくなった。曲げモードのストローク0.5~1.0mm、ねじりモードのストローク5.0mm以降では、実験と解析(連携システム)のストローク荷重曲線の傾きは、よく一致している。

また、特に曲げモードの後半部分では、ストロークが増すにつれて実験と解析の乖離が大きくなっている。これは、荷重点直下の部分で初期破壊が発生し、剛性が低下しているためと思われる。CFRPの解析において、破壊やき裂の進展の考慮が今後の課題となる。

## 4 結 言

プレス成形シミュレーションによりCFRTPのプレス工程中の材料挙動を検討した。得られた結果を以下に総括する。

(1) 熔融CFRTPを弾性体とみなし、マイクロ構造をモデル化した構造解析により、プレス成形シミュレーションに必要な弾性率を推定した。それを基に、実成形品とプレス成形シミュレーションの輪郭形状やしわの発生状況の比較を行い、解析パラメータを調整・決定した。平成23年度に開発・試作したトランスバースメンバーにプレス成形シミュレーションを適用し、3種類の積層構成によるしわ発生状況の違いを再現した。

(2) 成形シミュレーション結果から繊維方向を算出し構造解析の解析モデルに反映する連携システムを開発した。特に応力負担の大きい部位に繊維配向の乱れが生じる場合に、解析精度を向上できることを確認した。

## 文 献

- 1) 松永他, 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, 西部工業技術センター研究報告, No. 54(2011), 1-4
- 2) 松永他, トランスバースメンバーの開発・試作, 西部工業技術センター研究報告, No. 55(2012), 5-8
- 3) 荒井他, 均質化法を用いたCFRP積層板の粘弾性構成式の評価, 計算数理工学論文集 Vol. 8, No. 10-081128