

縫合糸を有する炭素繊維ドライファブリックの力学的特性に関する研究

Study on mechanical properties of carbon fiber non-crimp fabric with stitch

(CTC) ○山本琢也、榊原辰雄、今奥亜希、(大阪大学) 座古勝、李興盛、  
(株)本田技術研究所 (正) 小林正俊

A finite element model for draping non-crimp fabric with stitch used for carbon fiber reinforced composites has been proposed anew. The material properties of the model have been specified by the experimental results of tension, bending and shear tests for a fabric with stitch. The procedure of identification of the mechanical properties of a fabric with stitch and a draping simulation for the fabric with stitch have been described. As the both results of the numerical simulation and the experiment of a draping test reached agreement on the mechanical behaviors of fabric, it has been made clear that the proposed procedure is useful for the determination of the mechanical properties.

Keywords: Composites, NCF, Finite element

1. 緒言

炭素繊維複合材のハイサイクル成形プロセスとして、Non-crimp fabric (NCF) (図 1) を使用<sup>1-3)</sup>した Resin transfer molding (RTM) が検討されている<sup>4)</sup>。RTM ではファブリックへの樹脂含浸前に金型による賦形過程が存在し、この過程において繊維束の偏りや縫合箇所での目開きなどの最終製品の力学特性に悪影響を及ぼす変形がファブリックに生じることが問題視されている<sup>5)</sup>。

現在、このような変形を最小限に抑えるための検討は、金型試作・修正を繰り返すことで行われているが、計算機を用いたシミュレーションを実施できれば、試作コストの削減や検討を深化させる点から有利となる。そこでこのような検討を有限要素 (FE) によるシミュレーションで実施するために、NCF の FE モデルを提案する。本報告においては提案モデルおよびその材料特性の決定手続きを紹介する。また NCF シートについて、試験から決定したモデルの材料特性を示した後、検証のため賦形試験についてモデルによる解析と試験結果を比較する。

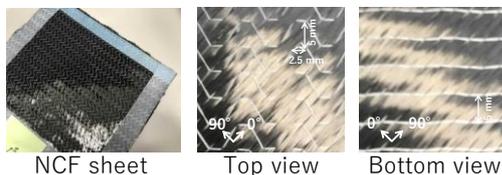


Figure 1 NCF sheet

2. 提案モデル

2-1. 形状

提案する NCF シートの有限要素形状を図 2 に

\*Takuya Yamamoto

Science & Engineering Analysis Department,  
ITOCHU Techno-Solutions Corporation  
North Gate Bldg., 3-1-3, Umeda, Kita-ku,  
Osaka-shi, Osaka 530-0001 Japan

示す。繊維束および縫合糸はソリッド要素およびトラス要素で構成されている。繊維束要素の繊維方向は 0 度および 90 度 (図 2) に向けられている。またこれらには縫合糸により縫われる箇所においてそれぞれの繊維方向に沿う隙間が存在する。

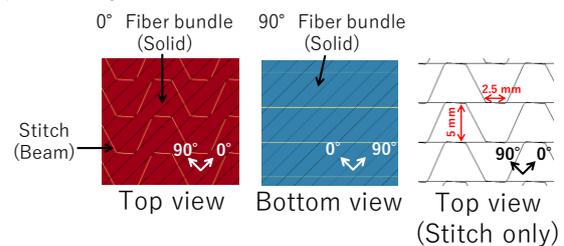


Figure 2 Geometry of finite elements

2-2. 材料特性

モデルの繊維束および縫合糸の要素に設定する物性値と摩擦について以下に示す。

繊維束要素の物性値には以下の異方性超弾性構成則<sup>6)</sup>を設定する：

$$W = C_1(\bar{I}_1 - 3) + C_2(\bar{I}_2 - 3) + F(\lambda) + \frac{1}{2}K[\ln(J)]^2$$

$$\frac{\partial F}{\partial \lambda} = \begin{cases} 0 & \lambda < 1 \\ \frac{C_3}{\lambda} [\exp(C_4(\lambda - 1)) - 1] & \lambda < \lambda^* \\ \frac{1}{\lambda}(C_5\lambda + C_6) & \lambda \geq \lambda^* \end{cases}$$

エネルギー関数  $W$  は等方性超弾性構成則 (Mooney-Rivlin 則) に繊維方向の引張エネルギー ( $F$ ) を加えたものである。ここで  $C_1 \sim C_6$ ,  $\lambda^*$  および  $K$  は材料定数である。なお、 $\bar{I}_1$  および  $\bar{I}_2$  はそれぞれ右 Cauchy-Green テンソルの偏差第 1 および 2 不変量、 $J$  および  $\lambda$  はそれぞれ体積比および繊維方向のストレッチである。

縫合糸要素の物性値には線形弾性体として縦弾性率  $E$  を設定する。

繊維束間および繊維束と縫合糸間の摩擦についてはそれぞれに摩擦係数  $\mu_{TP}$  および  $\mu_s$  を設定す

る。

以下に上記の定数および係数を決定する手続きを示す。始めに縫合糸の縦弾性率  $E$  を決定する。次にシートの引張試験で得られる応力-ひずみ曲線と、モデルによる引張解析の結果が一致するように引張に関連の定数である  $C_3, C_4, C_5, C_6$  および  $\lambda^*$  を決定する。次にシートの曲げ試験で得られるモーメント-角度曲線と、曲げ解析の結果が一致するように定数  $C_1, C_2$  を決定する。ここで定数  $K$  を  $100 \times (C_1 + C_2)$  程度とする ( $K$  は体積弾性率を表す。値により体積変化はほぼ無視される)。次にシートのせん断試験で得られるせん断応力-ひずみ曲線と、せん断解析の結果が一致するように摩擦係数  $\mu_{TP}$  および  $\mu_s$  を決定する。以上でシートの特性が全て決定される。

### 3. 材料試験より決定された材料特性

以下では図 1 の NCF シートについて行われた材料試験の結果から、前述の手続きにより決定された材料特性を示す。なおシートの引張とせん断試験および曲げ試験はそれぞれ試験機 KES-FBI-A および KES-FB2-A (両方ともカトーテック製) で行われた。またモデルによる各試験の計算には有限要素解析ソルバ LS-DYNA を用いた。

上述の手続きにより試験結果から決定した材料特性を表 1 に示す。ここで  $C_5$  は繊維の剛性 230000 MPa に体積占有率 55% を乗じた値とした ( $C_5$  は繊維束の最終的な引張剛性に対応するため)。また  $C_2$  および  $C_6$  は 0 と与えた。また縫合糸の剛性  $E$  は PET (ポリエチレンテレフタレート) のカタログ値とした。

図 3 に決定された材料特性を用いて計算された各試験の曲線を示す。また比較のため、試験による結果も示す。各曲線とも計算は試験を再現できている。

Table 1 Material properties for the NCF

Fiber bundle							
$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	$\lambda^*$	$K$
[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]		[MPa]
4.00E+01	0	3.92E+00	1.44E+02	1.28E+05	0	1.07E+00	3.00E+03

Stitch		Friction coefficient	
$E$		$\mu_{TP}$	$\mu_s$
[MPa]			
1.00E+04		0.5	0.5

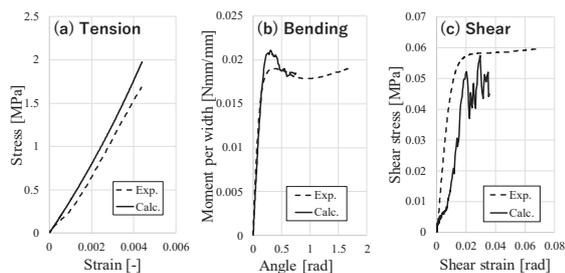


Figure 3 Mechanical properties of the NCF. ((a) tension, (b) bending and (c) shear)

### 4. 検証

モデルの検証のため賦形試験を行い、計算による結果と比較する。例として図 4 に示すような試験 (球形圧子による押し込み) を行った。シートの注目する箇所生じた変形を図 5 に示す。計算結果の同箇所と比較したところ、変形の形態に類似性が認められることより、本モデルには実賦形の予測に活用可能な再現性があると判断できた。

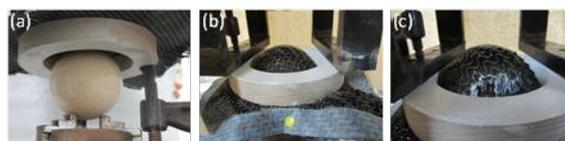


Figure 4 Snapshots of in the experiment

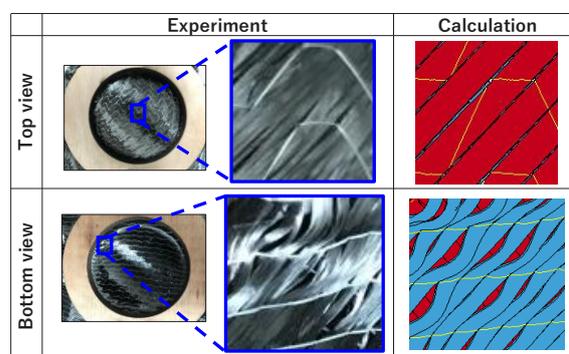


Figure 5 Deformation of the sheet in the experiment and numerical calculation

### 5. 結言

NCF シートの賦形解析に用いる有限要素モデルの形状および材料特性を提案した。例として実施した材料試験を元に材料特性を決定した上で、提案モデルを用いて賦形試験の再現を試みた。試験による変形の形態を再現できたことから、提案モデルは計算による賦形の検討を可能にするものと考えられる。

### 参考文献

- 1) S.V. Lomov: Non-Crimp Fabric Composites: Manufacturing, Properties and Applications, Woodhead Publishing Limited (2011)
- 2) S. V. Lomov, et al.: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 33 (2002) pp.1171-1183
- 3) Long Li, et al.: ICCM-20 (2015)
- 4) 和田原, 北野: SEN' I GAKKAISHI (繊維と工業) Vol.64, No.9 (2008) pp. 295-301
- 5) 山本, et al.: プラスチック成形加工学会 第 26 回 (平成 30 年度) 成形加工シンポジウム 18
- 6) Weiss et al.: Proc ASME Winter Annual Meeting, (1996) BED-33:347-348