研究論文

マルチスケールシミュレーションによる CFRP 製品の機械特性評価に関する研究

片山　聡*　田村　信*　櫻井　貴文*

Study on the mechanical properties evaluation of CFRP products by Multi-Scale Simulation

KATAYAMA Satoshi*, TAMURA Makoto* and SAKURAI Takafumi*

抄　録

CFRP 製品の設計技術力強化を目的に，マルチスケールシミュレーションによる CFRP 製品の機械的特性評価手法の有効性や問題点について検討した。基本形状を用いた UD 材（単一方向性材料）の強度シミュレーションを実施し，繊維弾性率や繊維体積含有率などの特性値だけでなく，ミクロモデルにおける繊維配列も計算結果に影響を与えることを示した。

1.　緒　　言

炭素繊維複合材料（以下 CFRP と略す）は「軽くて強い」特徴から，次世代の先端材料として注目されている。これまで航空・宇宙分野やスポーツ分野が市場を形成してきたが，近年では環境や安全性に対する関心の高まりから風力発電用ブレード，圧力容器，土木建築など一般産業用途において需要が増加してきている [1)]。将来的には自動車分野における量産部品への適用も期待されている [2)]。

当研究所では平成 20～25 年度に CFRP に関する調査研究，CFRP 研究会を実施し，CFRP の素材特性や成形技術に関する情報を県内企業へ提供してきた。その一方で CFRP の持つ異方特性を活用した設計技術については研究実績がなく，県内企業の製品開発に対し，十分な支援を行えなかった。

そこで本研究では CFRP 製品の設計技術力強化を目的に，マルチスケールシミュレーションによる CFRP 製品の機械的特性評価手法の有効性や問題点について検討した。

2.　マルチスケールシミュレーション

CFRP 製品のマルチスケールシミュレーションの流れを図 1 に示す。まず，CFRP のミクロモデルに対する数値材料試験をシミュレーション上で行い，ミクロモデル全体としての等価物性値（密度，弾性率など）を算出する（均質化解析）。その後，等価物性値を適用した強度シミュレーション（マクロ構造解析）を行い，必要に応じてマクロ構造解析結果から抽出した任意

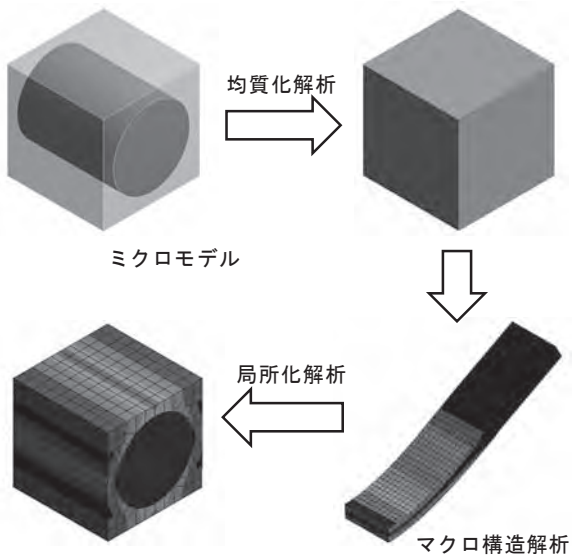


図 1　マルチスケールシミュレーションの流れ

*　研究開発センター

の要素をミクロモデルに置き換えて応力解析（局所化解析）を実施する。このように，マルチスケールシミュレーションでは，等価物性値を用いることでマクロ構造解析前後にて要素の簡略化，詳細化を切り替えるところに特徴がある。

本研究では，マルチスケールシミュレーションソフトウェアとしてサイバネット（株）製 Multiscale.Sim 6.0 を，マクロ構造解析ソフトウェアとして ANSYS 社製有限要素法解析ソフトウェア ANSYS Workbench 16.1 を用いた。

3. UD 材を用いた均質化解析

CFRP に使用される繊維弾性率および体積含有率により等価物性値がどのように変化するかを確認するため，UD 材（単一方向性材料）を用いた均質化解析を実施した。使用した CFRP の物性値を表 1 に示す。また，図 2 に示すように UD 材の断面では必ずしも等間隔に繊維（白色部）が並んでいるとは限らないことから，代表的な繊維配列パターンとして図 3 に示す立方体基準の直線配列モデル，格子配列モデルを作成し，等価物性値への影響を調べた。

均質化解析結果を図 4，5 に示す。繊維方向の縦弾性率は繊維配列の影響を受けず，各繊維弾性率において理論値[3]に近い値を示した。一方で，繊維直交方向の縦弾性率は繊維配列による違いが現れ，直線配列のほうが大きな値を示した。また，その違いは繊維体積含有率が大きいほど顕著となった。

表 1　CFRP の物性値

項目		値
弾性率 (GPa)	繊維	200,300,400
	樹脂	3.50
ポアソン比	繊維	0.20
	樹脂	0.35
繊維体積含有率(%)		50,55,60

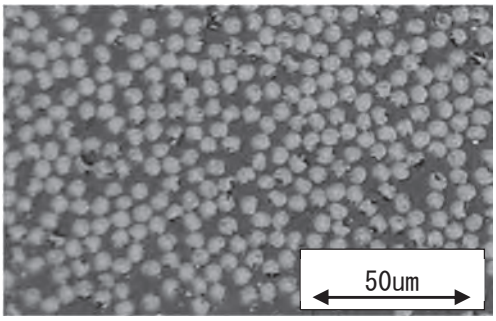
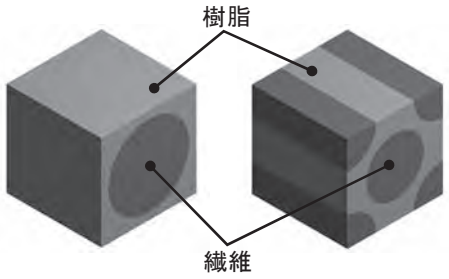
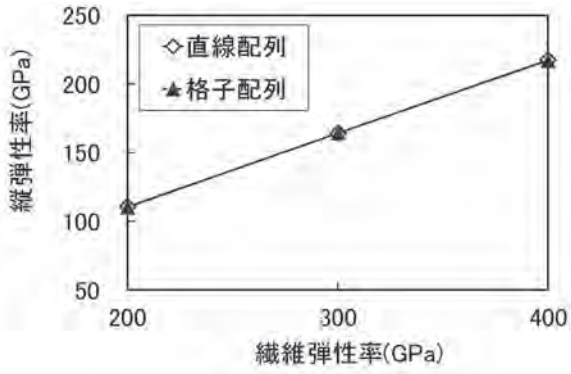


図 2　UD 材の断面

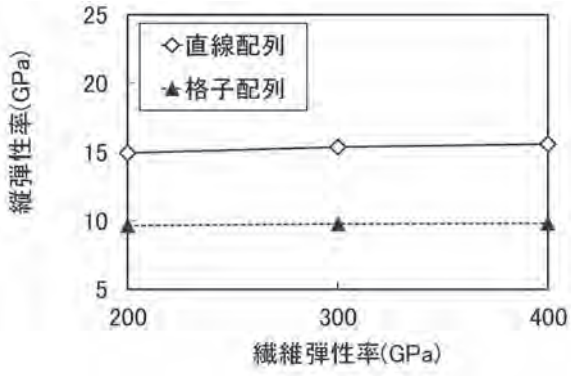


(1) 直線配列　　(2) 格子配列

図 3　繊維配列モデル

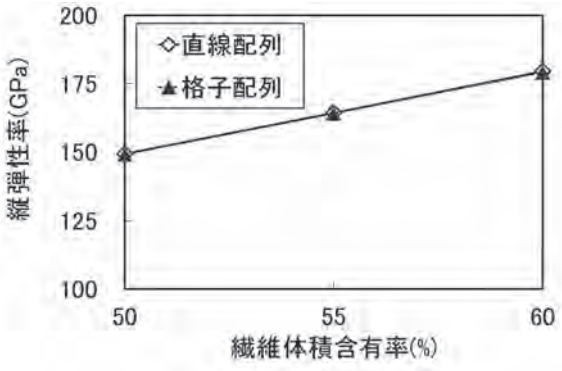


(1) 繊維方向

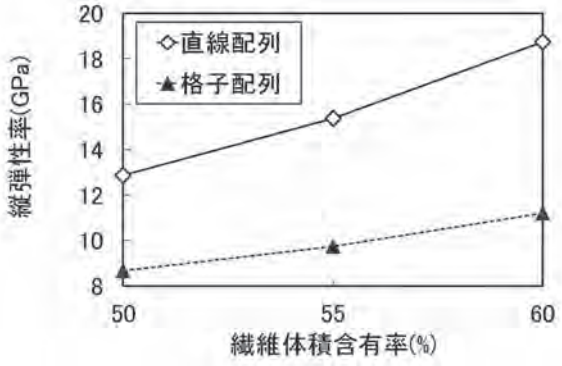


(2) 繊維直交方向

図 4　繊維弾性率と縦弾性係数の関係
（繊維体積含有率 55%）



(1) 繊維方向



(2) 繊維直交方向

図 5　繊維体積含有率と縦弾性係数の関係
（繊維弾性率 300GPa）

4.　マクロ構造解析

4.1　平板の引張試験シミュレーション

等価物性値を用いて平板の引張試験シミュレーションを実施した。試験片は幅 12.5mm×厚さ 1mm×長さ 80mm の一様形状とし，片側端部を完全固定，反対側端部を 1mm 強制変位させた際の固定部反力を求めた（図 6)。要素は 8 節点 4 辺形要素(高次シェル要素)として作成し，繊維方向は ANSYS Workbench の積層機能により定義し，試験方向を角度基準方向（繊維 0° 方向）とした。繊維角度は図 6 において反時計回りに 0° ～90° となる。

図 7 にシミュレーション結果を示す。繊維弾性率（Ef）の影響は繊維角度 0° では顕著であるが，繊維角度 30° からはほぼ見られなくなった。繊維配列の影響はほぼ見られないが，わずかながら直線配列のほうが大きな値を示した。

4.2　平板の曲げ試験シミュレーション

曲げ試験シミュレーションでは JIS K 7017 に準拠した 3 点曲げ試験モデルを作成し（図 8)，試験片を 1mm 曲げた際の圧子反力を計測した。試験片寸法は引張試験と同一とした。

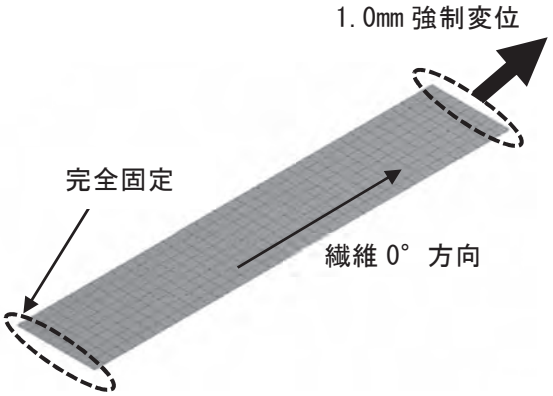
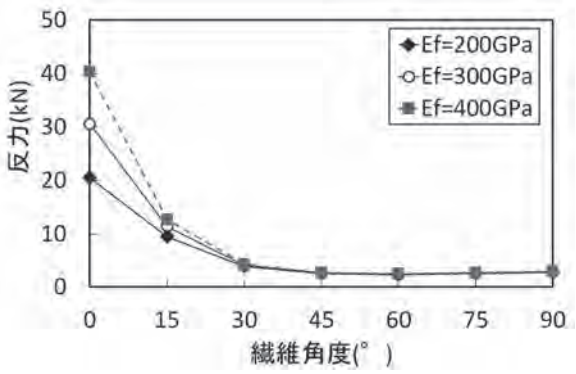
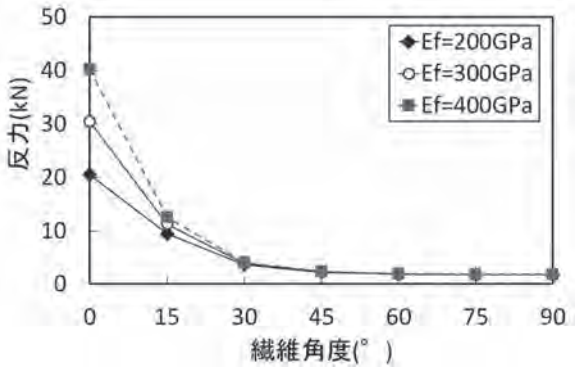


図 6　引張試験シミュレーションの概要



(1) 直線配列



(2) 格子配列

図 7　引張試験シミュレーション結果
（繊維体積含有率 55%）

シミュレーション結果を図 9 に示す。引張試験シミュレーション同様，繊維弾性率の影響は繊維角度 0° では顕著であるが，角度が大きくなるとともに小さくなった。繊維配列の影響はほぼ見られないが，わずかながら直線配列のほうが大きな値を示した。

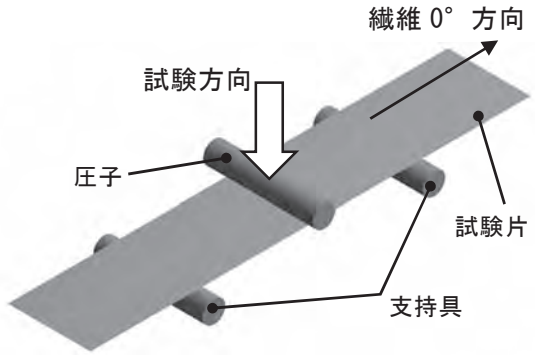
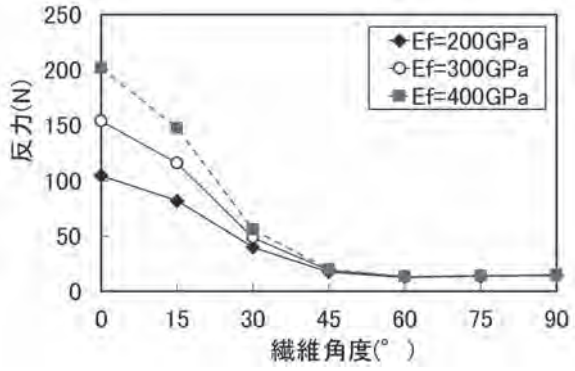
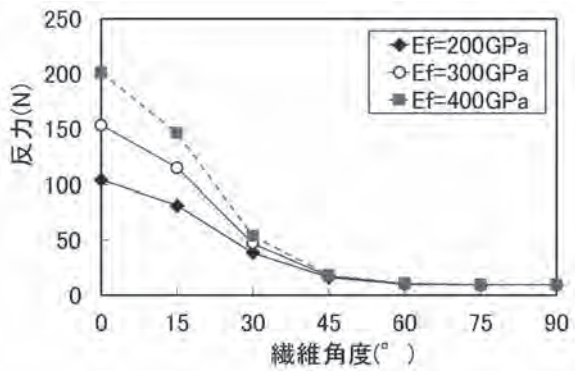


図 8　曲げ試験シミュレーションの概要



(1) 直線配列



(2) 格子配列

図 9　曲げ試験シミュレーション結果
（繊維体積含有率 55%）

4.3　円管の曲げ試験シミュレーション

図 10 に示す 3 点曲げモデルを作成し，円管の曲げ試験シミュレーションを実施した。円管寸法は外径 16mm×厚さ 1mm×長さ 300mm とした。試験ジグ寸法は圧子先端半径 75mm，支持具半径 30mm，支持具支点間距離 200mm とした。試験方法，評価方法は平板の曲げシミュレーション方法に準じた。

角度基準方向（繊維 0° 方向）は円管軸と平行とし，局所座標系処理を行うため，ANSYS Workbench の積層機能に加え，「要素の向き」コマンドを使用して定義した。これにより各要素上に局所座標系が作成され，積層機能にて入力した繊維角度が正しく反映される（図 11）。

シミュレーション結果を図 12 に示す。全体の傾向としては平板の引張シミュレーション結果（図 7）に近く，繊維角度が大きくなるほど

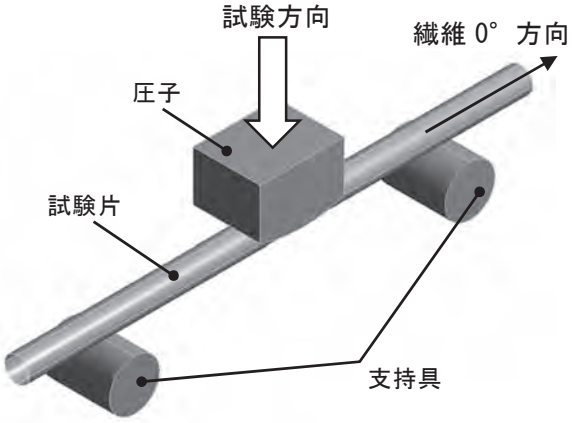


図 10　曲げ試験シミュレーションの概要

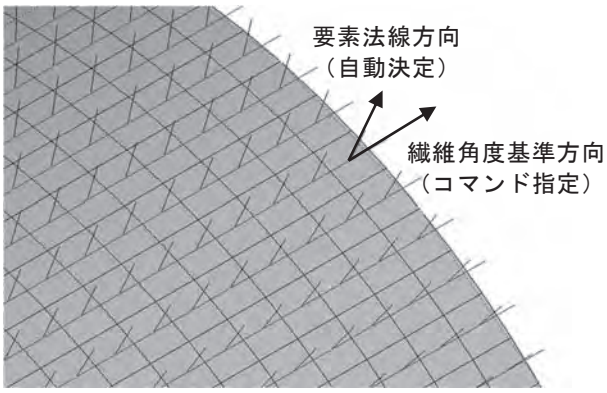
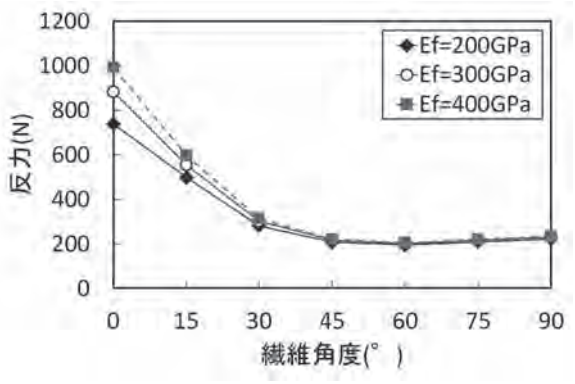
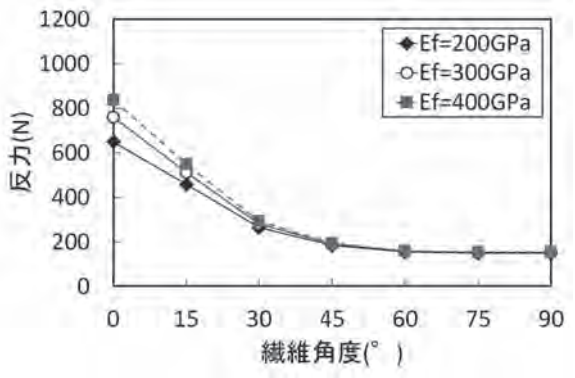


図 11　要素上に作成される局所座標系

繊維弾性率の影響が見られなくなった。ただし，平板よりも繊維配列の影響が大きく現れている。また，繊維弾性率による反力の変化率は平板よりも小さくなっている。



(1) 直線配列



(2) 格子配列

図 12　曲げ試験シミュレーション結果
（繊維体積含有率 55%）

4.4　円管の扁平試験シミュレーション

図 13 に示す計算モデルを用いて，円管の扁平試験シミュレーションを実施した。円管寸法は外径 16mm×厚さ 1mm×長さ 10mm とし，試験片を 1mm 変形させた際の圧子反力を計測した。

シミュレーション結果を図 14 に示す。全体の傾向としては平板の曲げシミュレーション結果（図 9）を左右反転させた形状となっている。同じ円管を対象にしたシミュレーションであるが，図 12 とは異なり，繊維配列の影響はわずかであった。

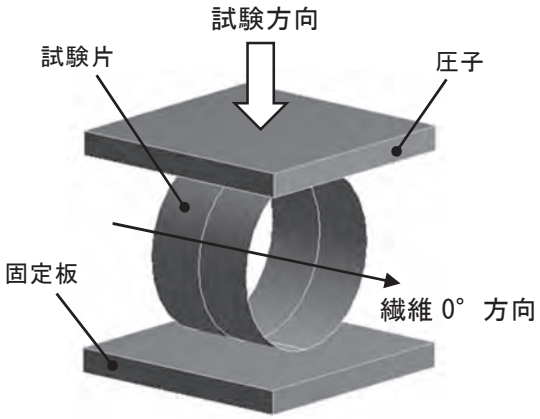
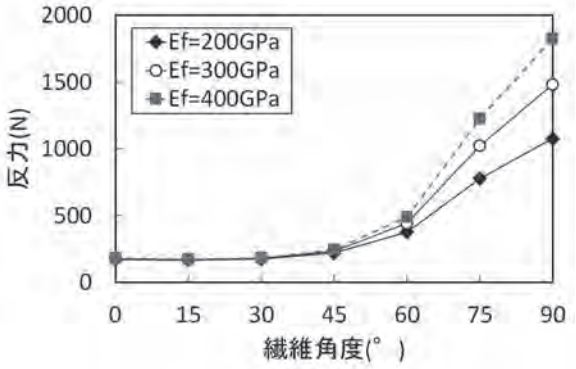
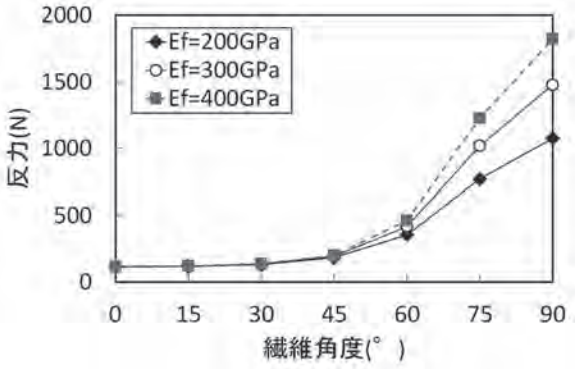


図 13　扁平試験シミュレーションの概要



(1) 直線配列



(2) 格子配列

図 14　扁平試験シミュレーション結果
（繊維体積含有率 55%）

4.5　円管のねじり試験シミュレーション

図 15 に示す計算モデルを用いて，円管のねじり試験シミュレーションを実施した。円管寸法は外径 16mm×厚さ 1mm×長さ 300mm とした。

ねじり角度は 5° とし，ねじり部の変位拘束は(1)軸方向自由，(2)軸方向固定の 2 条件とした。評価項目は完全固定部の円周方向反力とした。

計算結果を図 16，17 に示す。ねじり部の変位拘束条件を軸方向自由とした場合には繊維方向 45° で，軸方向固定とした場合には繊維角度 30° にて反力の最大値を示した。繊維配列の影響は強く現れ，直線配列のほうが大きな値を示した。また，繊維弾性率の影響は軸方向固定条件のほうが大きくなった。

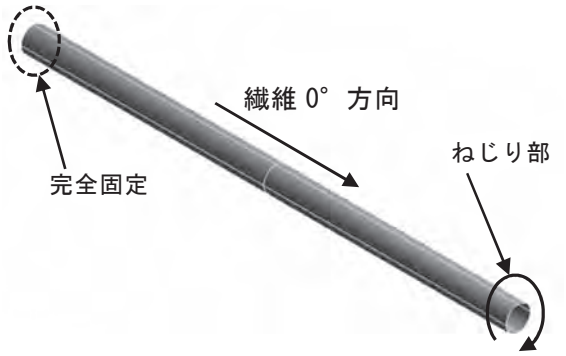
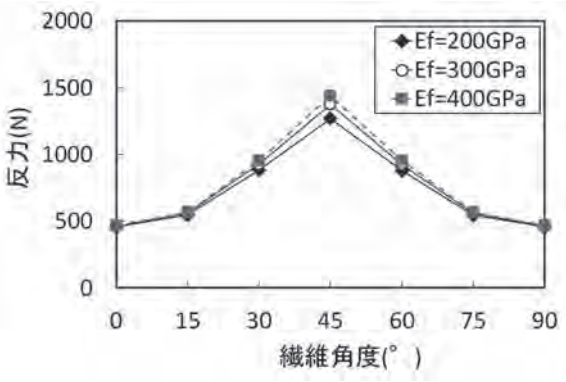


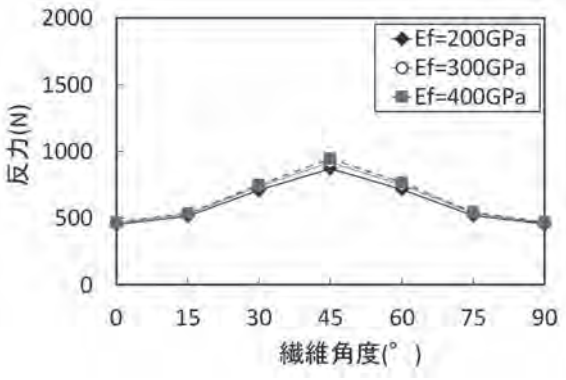
図 15　ねじり試験シミュレーションの概要

4.6　考察

UD 材の等価物性値を用いたマクロ構造解析では，円管の曲げ試験シミュレーションとねじり試験シミュレーションにて繊維配列による影響が大きく現れた。この 2 つのシミュレーションにおいて，試験片は試験方向への単純な変形ではなく，曲げ試験シミュレーションでは曲げと扁平の複合変形（図 18），ねじり試験シミュレーションではねじり角度との差によるせん断変形を生じる。そのため，他のシミュレーションよりも繊維直交方向の縦弾性率，せん断弾性

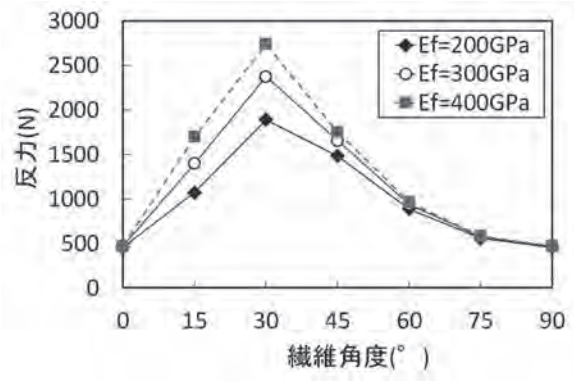


(1) 直線配列

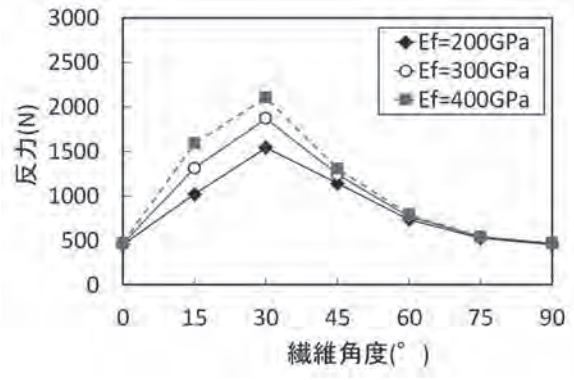


(2) 格子配列

図 16　ねじり試験シミュレーション結果
（繊維体積含有率 55%：軸方向自由）



(1) 直線配列



(2) 格子配列

図 17　ねじり試験シミュレーション結果
（繊維体積含有率 55%：軸方向固定）

率の影響を受けることになり，繊維配列による違いが大きくなったと考えられる。

実際の CFRP 製品の変形挙動はさらに複雑であることから，計算精度を低下させないためにも繊維配列については可能な限り正確にモデル化する必要があるといえる。特に，物性値を過剛性とする繊維配列モデルの採用には注意が必要である。

また，CFRP の強度試験より物性値を得ようとする場合には，繊維配列の影響を得られるよう，複数の試験を組み合わせる必要があるといえる。

5. 試験結果からの物性値同定結果

UD 材を用いた繊維角度 0°，45° の円管を作成し，曲げ試験，扁平試験と同試験シミュレーションを実施した。なお，試験に用いた UD 材は樹脂物性値が非公開となっており，シミュレーション実施においては，まず繊維角度 0° の曲げ試験結果より物性値を同定することとした。

繊維角度 0° の曲げ試験および同シミュレーション結果を図 19 に示す。実際の試験において，試験片にはストローク 0.3mm で割れが発生したが，そこまでの線形領域にて樹脂特性を同定した。繊維配列には，格子配列を用いた。

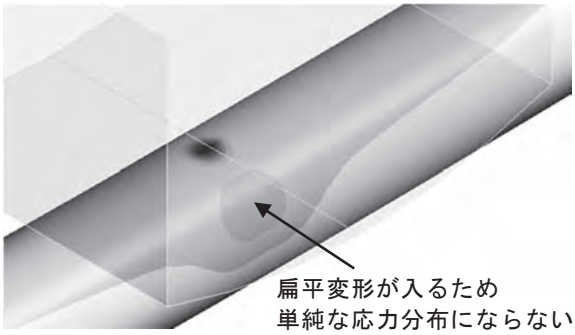


図 18　円管の曲げシミュレーション結果
（繊維 0° 方向：相当応力分布）

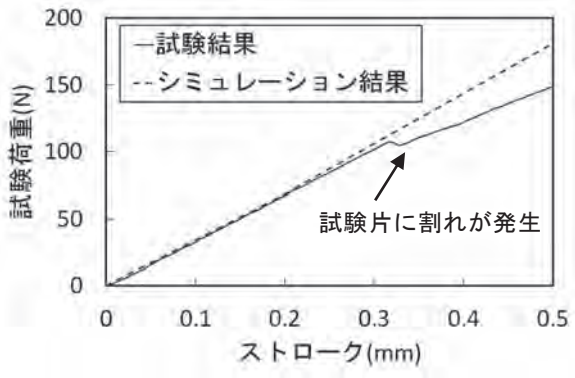


図 19　曲げ試験結果（繊維 0° 方向）

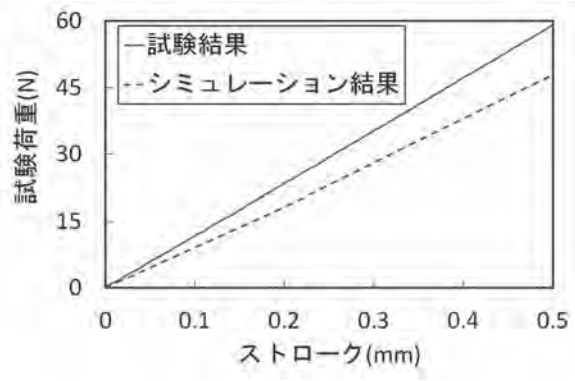


図 20　曲げ試験結果（繊維 45° 方向）

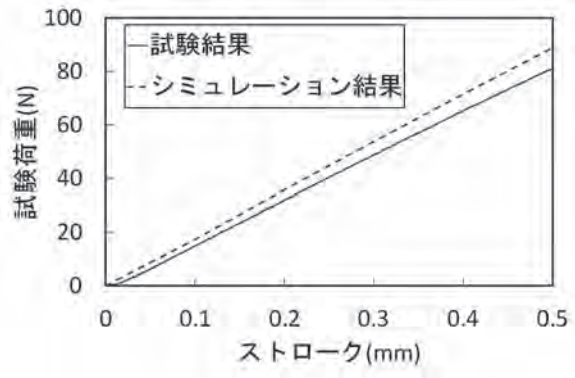


図 21　扁平試験結果（繊維 0° 方向）

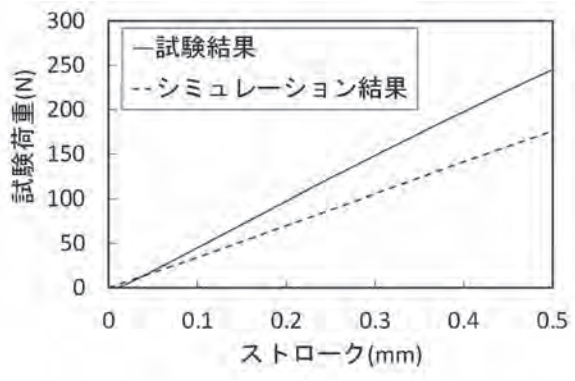


図 22　扁平試験結果（繊維 45° 方向）

同定した樹脂特性を用いたシミュレーション結果を各々の試験結果と合わせて図 20～22 に示す。繊維角度 0°の結果は比較的よく一致したが，繊維角度 45°の結果はシミュレーションのほうが低い値を示した。これには CFRP の成形時における角度や寸法のバラツキ，試験におけるジグと試験片の平行度などが影響したものと考えられる。また，繊維配列も完全な格子配列であるとは限らず，その影響も少なからず現れていると考えられる。

6. 今後の課題

本研究で実施したマクロ構造解析は線形範囲に限定されている。CFRP 製品の設計において安全性を確保するためには破壊や層間剥離のモデル化は重要となるため，これらの点については今後も研究を進めたい。

なお，本研究で用いた ANSYS Workbench には円筒座標系による変位出力，全体座標系と一致しない繊維配列モデルにおける直交異方性特性値の出力，多層ソリッドシェル要素作成時の法線処理など，ソフトウェア上の不具合がいくつか存在した。今後の改善を期待したい。

7. 結　　言

（1）UD 材を用いた均質化解析を実施し，繊維配列により繊維直交方向の等価物性値が変化することを確認した。

（2）マクロ構造解析により，等価物性値や繊維配列が与える影響を調査した。その結果，試験方向以外の変形成分が生じる条件下では，繊維配列の影響が大きくなることを見出した。

（3）UD 材による曲げ試験，扁平試験と同試験シミュレーションを実施し，比較的よく一致した解を得た。

参考文献

1）前田 豊，“炭素繊維の最先端技術”，シーエムシー出版，2007，pp.159-253.

2）井塚 淑夫，“炭素繊維 複合化時代への挑戦”，繊維社，2012，pp.117-128.

3）山岸暢，吉田光則，鈴木耕裕，"FEM による異方性複合材料構造体の構造解析"，北海道立工業試験場報告，No.298，1999，pp.77-83.