研究論文

CAE 技術を用いた高性能テニスラケットの開発

片山　聡*　相田　収平**　三村　和弘**　岡田　英樹**
米山　亘***　吉川　英之***　宇野　寿一***

Development of high-performance tennis racket by using CAE technology

KATAYAMA Satoshi*, AIDA Shuhei**, MIMURA Kazuhiro**, OKADA Hideki**
YONEYAMA Wataru***, YOSHIKAWA Hidenori*** and UNO Toshikazu***

抄　録

テニスラケットフレームに対する構造シミュレーション精度向上のため，均質化法によるマルチスケールシミュレーションおよび平板の 3 点曲げ試験を実施し，材料物性値を同定した。その結果，本研究で用いた CFRP シートについては，ミクロモデルの繊維配列を格子状とした場合に試験値とよく一致することを確認できた。また，同定した物性値を用いた円管の 3 点曲げ試験では，支点間距離による変形モードの違いをよく再現できた。

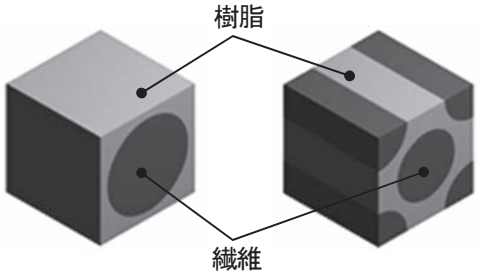
1. 緒　言

炭素繊維強化プラスチック（CFRP）は繊維方向と繊維直交方向で材料物性値が異なるため，構造シミュレーションにおいては各々の方向に対する材料物性値（縦弾性率，せん断弾性率，ポアソン比）を入力する必要がある [1)2)]。CFRP の材料物性値を求める方法としては，材料力学的手法やその修正式が提案されているが [3)]，近年ではマルチスケールシミュレーションを利用した同定手法も研究されており [4)5)]，当研究所においても平成 26 年度に実施した実用研究にてその有効性を確認した [6)]。

当研究所では今年度，ヨネックス（株）との共同研究において，CFRP 製テニスラケットフレームに対する構造シミュレーション技術を確立した。本稿では研究で得られた知見のうち，計算精度向上に寄与した部分，マルチスケールシミュレーションにおけるミクロモデルの重要性と得られた等価物性値の妥当性検証結果について報告する。

2. マルチスケールシミュレーションの概要

CFRP を対象とした均質化法によるマルチスケールシミュレーションでは，繊維周りのミクロモデルを作成し，それを 1 要素に置き換えた場合の等価物性値を取得する。本研究では，UD 材（単一方向性材）積層シートを対象に，図 1 に示す 2 つのミクロモデルを作成し，直交異方性モデルの等価物性値を計算した。計算においては繊維縦弾性率をメーカ公



(1) 直線配列モデル　　(2) 格子配列モデル

図 1　CFRP（UD 材）のミクロモデル

*　中越技術支援センター
**　研究開発センター
***　ヨネックス（株）新潟生産本部

表値，繊維体積含有率を JIS K 7075:1991「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」による実測値より固定値とし，樹脂縦弾性率を変化させて数種類の等価物性値を得た。マルチスケールシミュレーションソフトウェアはサイバネット(株)製 Multiscale.Sim 18.0（ソルバー : ANSYS Mechanical Enterprise 18.0，GUI : ANSYS Workbench 18.0）を用いた。

均質化法によって得られた等価物性値のうち縦弾性率について，従来式による計算値と比較した結果を表 1 に示す。従来式は，繊維方向には複合則を，繊維直交方向には植村らの式 [7]を適用した。繊維方向の縦弾性率は繊維配列によらず，ほぼ一定の値を示し，複合則による計算値ともよく一致した。繊維直交方向の縦弾性率は繊維配列によって大きな違いが現れ, 直線配列モデルのほうが大きな値を示した。また，植村らの式による計算値に対しては直線配列モデルのほうが近い値となった。図 2 に繊維直交方向の縦弾性率に対する樹脂縦弾性率，繊維配列の影響を示す。樹脂縦弾性率の影響は線形的に現れ，影響度は直線配列モデルのほうがやや大きくなった。

表 1　均質化法と従来式による計算値の差

（比較物性値：縦弾性率）

方向	直線配列モデル	格子配列モデル
繊維方向	-0.1%	-0.1%
繊維直交方向	8.0%	-35.9%

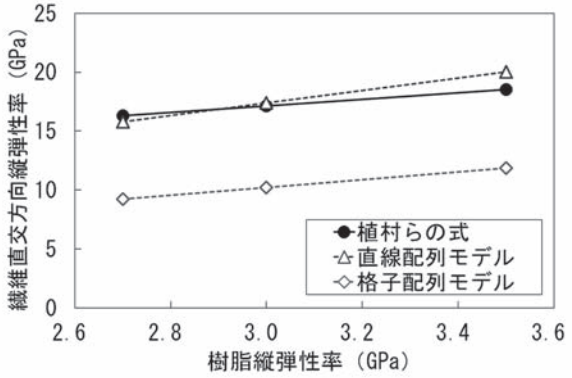


図 2　繊維直交方向の縦弾性率に対する樹脂縦弾性率，繊維配列モデルの影響

なお，本研究では繊維縦弾性率，繊維体積含有率，樹脂材種，目付などが異なる 9 種類の UD 材積層シートについて等価物性値を求めたが，そのすべてにおいて表 1 と同様の傾向が見られた。

3.　等価物性値の妥当性検証結果

3.1　平板の 3 点曲げ試験

JIS K 7042:1998「炭素繊維強化プラスチックの曲げ試験方法」を参考に，UD 材積層シートより作製した平板試験体の 3 点曲げ試験，3 点曲げシミュレーションを実施した。試験機には（株）島津製作所製万能材料試験機 AG-100KNG-M1 を, 3 点曲げシミュレーションには ANSYS Mechanical Enterprise 18.0（GUI : ANSYS Workbench 18.0）を用いた。試験概要を図 3 に示す。平板試験体は長辺方向を繊維基準方向（0° 方向）とし，同一方向（0°，15°，30°，45°，90°）に積層して作成した。試験速度は 1mm/s とし，曲げ荷重は 3mm 変形時の値を評価した。シミュレーションにおける試験体は，厚さ方向の中立面を用いたシェル要素として作成した。試験ジグとなるパンチおよび支点はそれぞれ剛体（材料特性値は鋼系材料を適用）として定義し，曲げ荷重は試験体とパンチの接触反力履歴より抽出した。

3 点曲げ試験, 3 点曲げシミュレーションで得られた繊維角度と曲げ荷重の関係を図 4 に示す。図中のシミュレーション結果は，均質化法で求めた等価物性値のうち試験値と最も一致したものを記載した。直線配列モデル，格子配列モデルとも全体的には試験結果の傾向を再現できているが，直線配列モデル

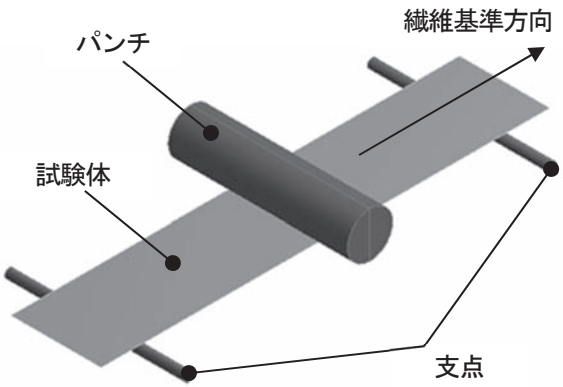
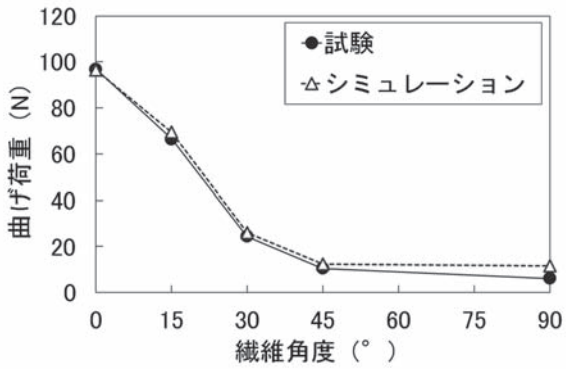


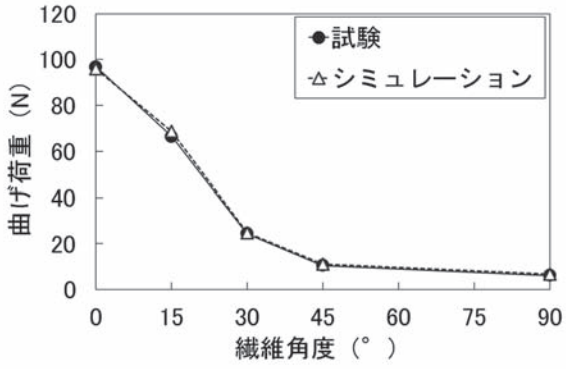
図 3　平板の 3 点曲げ試験概要

では繊維角度が大きくなるにつれて，試験結果よりも高い値を示すことがわかる。一方，格子配列モデルはすべての角度において試験結果をよく再現できている。曲げ荷重の大小関係は表 1 に示した繊維直交方向の縦弾性率の差と同傾向にあり，本研究で対象とした CFRP シートでは直線配列モデルや従来式よりも，格子配列モデルにて等価物性値を求めることが適しているといえる。

図 5 は直線配列モデルにおいて，繊維角度 90° の試験値とよく一致する等価物性値を用いて行った 3 点曲げシミュレーション結果であるが，全体的な一致度は図 4(1)よりも悪いことがわかる。ただし，この場合でも繊維角度 0° の値は大きく変化しておらず，仮に 0°，90° の試験値だけを用いてミクロモデルの検証を行ったとすると，図 4(2)と図 5 の差はなく，誤った結論を導き出してしまう。そのため，ミクロモデルの検証には 0°，90° 以外の試験値も比較対象として用いる必要がある。一般的に UD 材の重ね合わせでは 0°，45°，90° が用いられることが多いため [8]，この 3 方向にて検証を行うことが適切であると考えられる。



(1) 直線配列モデル



(2) 格子配列モデル

図 4　平板の 3 点曲げシミュレーション結果

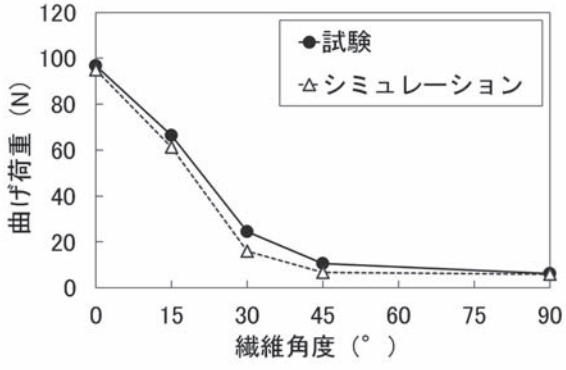


図 5　平板の 3 点曲げシミュレーション結果
（90° 基準，直線配列モデル）

3.2　円管の 3 点曲げ試験

3.1 にて同定した等価物性値（図 4(2)）の妥当性を検証するため，UD 材積層シートより作製した円管試験体による 3 点曲げ試験，3 点曲げシミュレーションを実施した。試験概要を図 6 に示す。円管試験体の繊維基準方向（0° 方向）は円管軸方向とし，±30°，±45° にて積層した 2 種類の試験体を用意した。支点間距離 L は 120mm，200mm の 2 条件とした。試験条件およびシミュレーション条件は平板の 3 点曲げ試験，同シミュレーションと同一とし，ストロークと曲げ荷重の関係を調べた。交互に積層

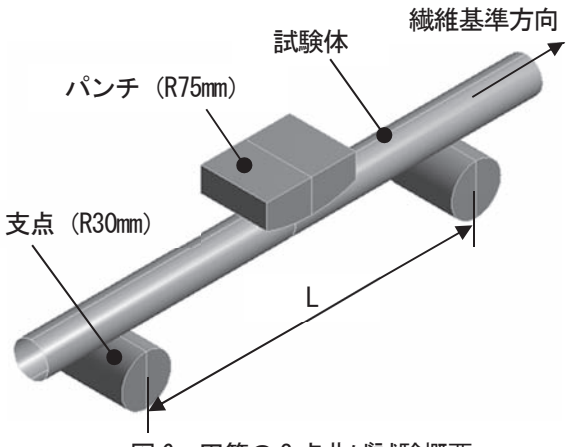


図 6　円管の 3 点曲げ試験概要

される UD 材の情報（厚さ，繊維角度）は ANSYS の積層断面機能より入力した。

図 7 に試験結果を示す。支点間距離 L により繊維角度と曲げ荷重の関係が変化し，L=200mm では±30°が，L=120mm では±45°が他方よりも高い値を示した。この現象は試験を実施した 9 種類の UD 材積層シートすべてで確認された。

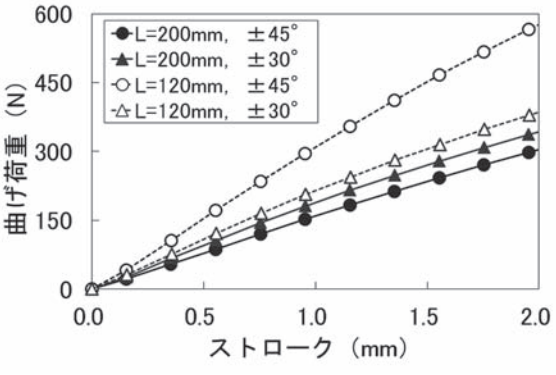
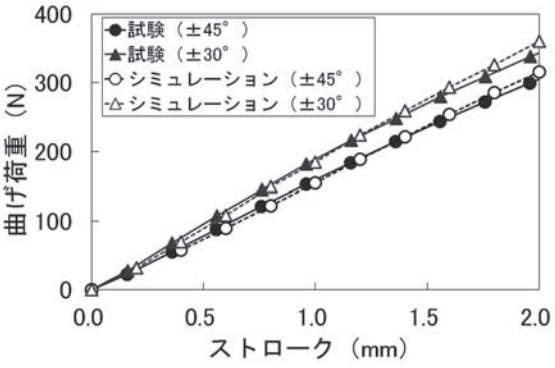
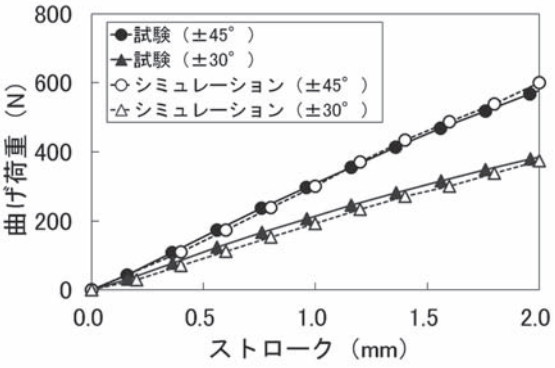


図 7　円管の 3 点曲げ試験結果



(1) 試験間距離 L=200㎜



(2) 試験間距離 L=120㎜

図 8　円管の 3 点曲げシミュレーション結果

シミュレーション結果を図 8 に示す。それぞれの支点間距離において，繊維角度による曲げ荷重の変化をよく再現していることがわかる。また，曲げ荷重値はほぼ一致しており，図 4(2)で使用した等価物性値にて非常に高精度なシミュレーションが実施できることを示している。

シミュレーション結果より試験体の変形モードを確認すると，L=200mm では軸方向の曲げたわみ変形が，L=120mm では円管断面のへん平変形が主となっていた。各モードにおける最大主応力方向も異なっており，それらの方向と繊維方向が近い場合に剛性が向上する結果となった。これは複雑な変形モードを有するテニスラケットの開発において，繊維角度による局所的な剛性向上が期待できることを示すものと考えられる。

また，本研究では CFRP 織物材，GFRP（ガラス繊維強化プラスチック）織物材についても均質化法による等価物性値の計算，円管試験体による 3 点曲げ試験による精度検証を実施した。織物材のミクロモデルおよび計算手順を図 9 に示す。ミクロモデルは Multiscale.Sim（Design Modeler で稼働）の平織材モデリング機能を用いて作成した。CFRP 織物材，

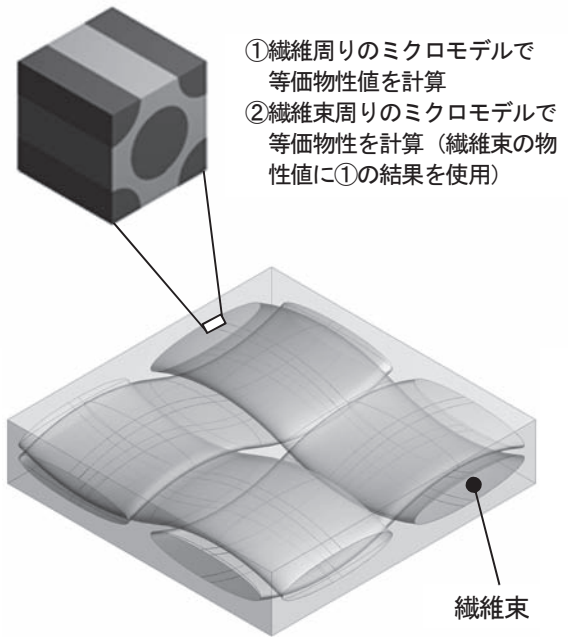
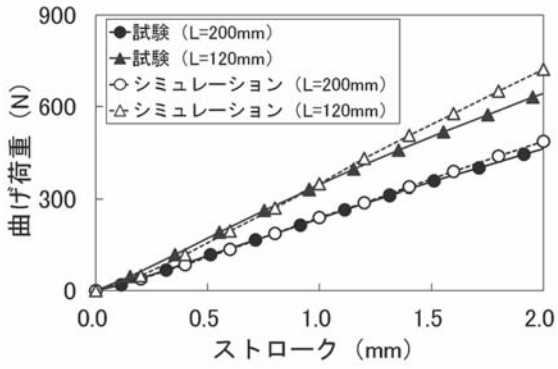
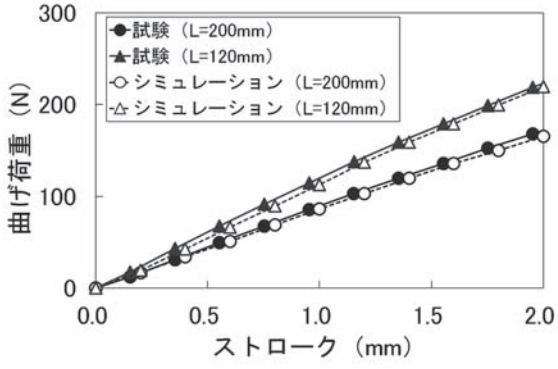


図 9　織物材のミクロモデルおよび計算手順

GFRP 織物材の 3 点曲げシミュレーション結果を図 10 に示す。CFRP，GFRP とも試験結果とよく一致する値が得られ，織物材においても適切なミクロモデルを作成することで妥当な等価物性値を得られることを確認できた。



(1) CFRP 織物材



(2) GFRP 織物材

図 10　円管の 3 点曲げシミュレーション結果

4.　今後の課題

さらなる高精度化のためには，CFRP シート内における繊維配列のバラツキや繊維のゆらぎなど，実際のシートの状態を再現するミクロモデルについて検証を重ねる必要がある。また，CFRP の材料モデルについては，均質化法に用いる繊維特性値を異方性材料とした例 [9]や弾塑性を考慮した例 [10]も報告されており，対象とする変形挙動によってはこれらについても検証する必要がある。

5.　結　　言

(1) CFRP（UD 材）に対する均質化法を実施し，ミクロモデルにおける繊維配列と従来式の関係を調べた。繊維方向の縦弾性率は繊維配列によらず複合則とよく一致し，繊維直交方向の縦弾性率は直線配列モデルにて植村らの式と近い値となった。また，直線配列モデルは格子配列モデルよりも高い値を示した。

(2) 平板の 3 点曲げシミュレーションを実施し，本研究で用いた CFRP シートではミクロモデルを格子配列とした場合に試験結果と一致することを確認した。

(3) 平板の 3 点曲げ試験で求めた等価物性値を用いて円管の 3 点曲げシミュレーションを実施し，支点間距離による曲げ変形モードの変化を高精度に再現できることを確認した。

(4) 織物材の均質化法，円管の 3 点曲げ試験結果を実施し，得られた等価物性値にて変形挙動を精度良く再現できることを確認した。

参考文献

1) 福田博，“複合材料力学入門　第 1 章　複合材料力学のための弾性学，材料力学の基礎”，日本複合材料学会誌，22，1，1996，pp.19-25.

2) 石川隆司，“複合材料力学入門　第 2 章　複合材料の弾性・非弾性挙動”，日本複合材料学会誌，22，2，1996，pp.76-81.

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（第 1 報）FRP の構造解析用物性値の検証”，北海道立工業試験場報告，No.298，1999，pp.77-83.

4) 高野直樹，“均質化法による新しい数値シミュレーション”，日本複合材料学会誌，27，1，2001，pp.4-11.

5) 吉岡健一，熊谷裕太，樋口諒，Dongyeon Lee，岡部朋永，“一方向強化 CFRP 複合材の斜め方向引張試験における破断延性に関するマルチスケールモデリング”，材料システム，第 34 巻，2016，pp.7-13.

6) 片山聡，田村信，櫻井貴文，“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”，工業技術研究報告書，No.45，2015，pp.17-24.
7）植村益次，山田直樹，“炭素繊維強化プラスチック材の弾性係数”, 材料, 第24巻, 第257号, 1975, pp.156-163.
8）藤本俊二，中村仁，藤田雅彦，友近宏，平岡芳信，“CFRP 板の曲げ特性（第 1 報）”，愛媛県産業技術研究所研究報告，No.52，2014，pp.1-6.
9）足立廣正，長谷川照夫，“一方向強化 CFRP 材における繊維直角方向のヤング率の評価”，日本レオロジー学会誌，Vol.30，2002，pp.103-107.
10）松原成志朗，荒川裕介，加藤準治，寺田賢二郎，京谷孝史，上野雄太，宮永直弘，平山紀夫，山本晃司“弾塑性・クリープ・損傷複合モデルによる繊維強化プラスチックの分離型マルチスケール解析”，日本計算工学会論文（Transactions of JSCES），Paper No.20140004，2014