報　文

徳島県立工業技術センター研究報告 vol.31 2022

木質資源と高機能素材を活用した家具の設計

Furniture Design Utilizing Wood Resources and Highly Functional Materials

室内　聡子[*1]，宮崎　勝弘[*2]
MUROUCHI Satoko, SASAKI Chizuru and MIYAZAKI Katsuhiro

抄　録

針葉樹木材と高機能素材である炭素繊維強化プラスチック（CFRP）からなるスツールの設計，試作を行った．材料強度試験から構造計算を行う従来の設計手法に CAE による形状のトポロジー最適化および応力解析を取り入れた設計による試作をした．また，3D プリンタ成形型による CFRP 成形の工程削減や，接合部においてジェネレーティブデザインと呼ばれる CAE 手法を用いて設計の改良を試みた．

１　はじめに

国内の森林資源が成熟化するなかで，この再生可能な自然資源の有効活用が重要な課題となっている．特に森林備蓄量が多いとされるスギやヒノキなどの針葉樹木材は広葉樹木材にくらべ柔らかく，家具への利用は困難とされてきた．そこで，軽くて強い CFRP を活用することにより県産針葉樹木材の強度を補い，トポロジー最適化による構造を取り入れた家具を開発し製品化へ繋げることを目的とした．

２　方法と結果

２・１　設計手法

（１）材料強度試験

設計に必要となる弾性率などを測定するため，材料強度試験を行った．

① 引張りせん断接着強さ試験

ハンドレイアップ手法により CFRP を成形するために必要なエポキシ樹脂を選定するため，JIS K 6850 接着剤－剛性被着材の引張りせん断接着強さ試験方法に基づき試験を行った．結果を表 1 に示す．表面処理は#600 研磨紙で研磨し，中性洗剤で洗浄した後アセトンで脱脂した．試験片サイズは 100mm×25mm，接着面積は 12.5mm×25mm．機器は島津オートグラフ AG-10kNXplus を使用した．

② CFRP の引張試験

CAE で用いる弾性率を求めるため，平織りカーボンケブラークロスおよび①のエポキシ B による CFRP 試験片をハンドレイアップで作成し JIS K 7164 プラスチック−引張特性の試験方法を参照し引張試験を行った．積層方向は 0°，45°で交互に 5 層積層した．CFRP との比較のため，平織りガラス繊維とエポキシ B を使用した GFRP 試験片を同様に作成した．引張試験の結果を表 2 に示す．試験片サイズは厚み 2mm，25mm×250mm．機器はインストロンモデル 5985 型を使用した．

表１　引張せん断接着強さ試験結果（MPa）

被着材	エポキシA	エポキシB
スギ×CFRP	7.4	7.0
ヒノキ×CFRP	5.3	10.1
ブナ×CFRP	2.9	6.2

表２　試験結果

n=3	引張応力最大荷重（MPa）	弾性率（GPa）
GFRP	191	17.00
CFRP	497	39.07

③ 杉の三点曲げ試験

県産材の弾性率および曲げ強度を計測するため，JIS Z 2101 木材の試験方法に基づき三点曲げ試験を行い，弾性率から曲げ強度を計算した．結果の平均値を表 3 に示す．試験片サイズは 20mm×20mm×320mm，支点間距離は 280mm，サンプル数は節有り板，節無し板各 12 個，機器は島津オートグラフ AG-10kNXplus を使用した（図 1）．

*1 生活科学担当，*2（株）宮崎椅子製作所

図１　三点曲げ試験

表３　杉の弾性率および曲げ強度（平均）

n=12	弾性率（MPa）	曲げ強度（MPa）
節有り板	6,762.3	64
節無し板	6,505.5	57

（２）脚部の設計

JIS S 1203 脚部の背もたれの強度試験 試験区分 4 では，後方 2 本の脚をストッパに当て後方に移動しないよう固定し，座面前縁に水平方向 760N の荷重を 10 回与える．よって脚 1 本にかかる荷重を 760N の 1/2，安全率 3 倍とし 1,140N で設計した．椅子の脚は欠損を防ぐため無節板を使用することとし，円形断面とした．(1)での結果から座面との接合部を固定点とした片持ち梁として，最大引っ張り応力 σmax=Mx/Z（M：曲げモーメント，Z：断面係数）から得られる(a)式により直径 d を求めた [1]．それぞれの距離における必要な脚の直径を表 4 に示す．

$$d = \sqrt[3]{\frac{32Wx}{\sigma\pi}} \qquad \text{(a)}$$

d：直径(mm)
W：荷重(N)
x：支点からの距離(mm)
σ：曲げ強度(MPa)

表４　椅子の脚の直径

固定点 から 作用点の距離（mm）	脚の直径（mm）
400	43.3
300	39.4
200	34.4
100	27.3

（３）複合則による合成梁の変位量計算

座面の CFRP と木材の複合材について，複合則から得られるヤング率を用いて荷重がかかった時の変位量を近似的に計算した．材料①および材料②を重ね合わせた複合はりの長手方向のヤング率は，それぞれの材料に同一のひずみを与え，求めた荷重の合力からの得られる平均応力の係数部であることから，ヤング率を次の(b)式で求めた [2]．

$$E_L = \frac{t_1E_1 + t_2E_2}{t_1 + t_2} \qquad \text{(b)}$$

E_L：全体のヤング率
E_1：材料①のヤング率，t_1：材料①の 1/2 厚み
E_2：材料②のヤング率，t_2：材料②の 1/2 厚み

CFRP の厚みを 2mm，杉板材の厚みを 38mm としたとき，複合材のヤング率は 8,377.7MPa となった．

次に座面の幅 460mm，奥行きを 360mm とし，中心荷重を JIS S 1203 座面の静的強度試験 試験区分 4 の 1,600N とした両端単純支持はりでのたわみ計算を行うと，変位量は 0.2mm となった．変位量は次の(c)式で求めた．

$$w_{max} = \frac{Pl^3}{48EI} \qquad \text{(c)}$$

W_{max}：最大変位量
P：荷重
l：はりの長さ
E：弾性率
I：断面二次モーメント

（４）組合せはり（composite beam）による応力計算

座面を図 2 のような厚み 38mm の杉節有り材と厚み 2mm の CFRP 複合材について，幅 360mm の組合

せはりとして応力計算を行った.

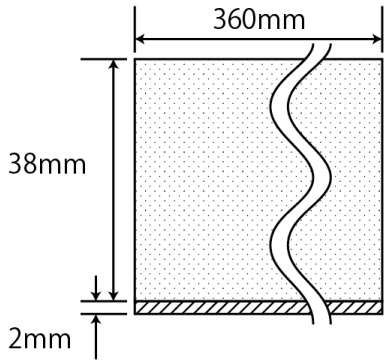

図２　杉節有り材と CFRP の複合材

n 個の層から成る組合せはりの各材料中の応力は次の(d)式から求める [3].

$$\sigma_i = \frac{E_i M}{\sum_{i=1}^{n} E_i I_i} y \qquad \text{(d)}$$

σ：応力
E：弾性率
M：曲げモーメント
I：中立軸に関する断面二次モーメント
y：中立軸からの距離

460mm の長さの梁に 1,600N の中央集中荷重がかかると想定したところ，杉節有り材の応力 σ w＝0.58MPa，CFRP の応力 σ C＝11.04MPa となり，杉材の曲げ強度および CFRP の引っ張り応力での最大荷重内となることが分かった．また，この値から重複積分法により求められる両端単純支持はり（中央集中荷重）のたわみは約 0.16mm であった.

（５）CAE によるトポロジー最適化

トポロジー最適化とは，形状を立体的にメッシュ化し，各節点にかかる負荷が低い箇所を削除することで形状の体積や重量を最小化させることを目的として用いられる位相設計による解析手法である．CAD ソフトウェア（オートデスク Fusion360）を使い座面のトポロジー最適化を行った.

脚部を拘束し，JIS S 1203 座面の静的強度試験 試験区分 4 から定められた座面当て板が座面と接触する部分に 1,600N の荷重をかけ, 座面上部領域を保持し，質量比 40%を目標として解析を行った（図 3）.

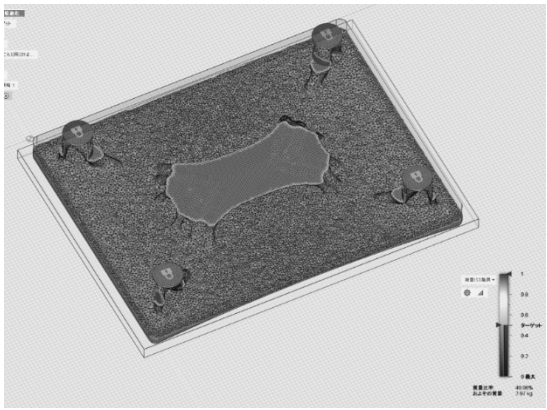

図３　トポロジー最適化を行った座面裏側

（６）CAD による設計

試作のための設計を行った．脚部は (2)で計算した値を用いた．座面はスギ材と CFRP の複合材として (3)，(4)での変位量計算にて算出した厚みを用いた．座面の裏面は軽量化を図るため，(5)でのトポロジー最適化形状を参考とし，設計した（図 4）．座面と脚部は丸ホゾで接合した．座り心地を良くするため座面は R2,000mm の凹面とし, スツールの脚が「ハ」の字状となるよう 4°の傾斜をつけた．設計したモデルを図 5 に示す.

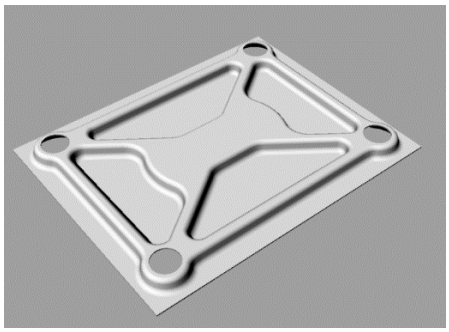

図４　座面裏側

図５　設計したモデルの 3DCG

（7）変位シミュレーション

設計の強度確認のため解析を行った．脚の地面接地箇所を拘束し，JIS S 1203 座面の静的強度試験 試験区分 4 から定められた座面当て板が座面と接触する部分に 1,600N の荷重をかけ，CFRP は簡易的に等方向性素材として扱い変位シミュレーションを行ったところ，最大変位は 0.1mm となった（図 6）．

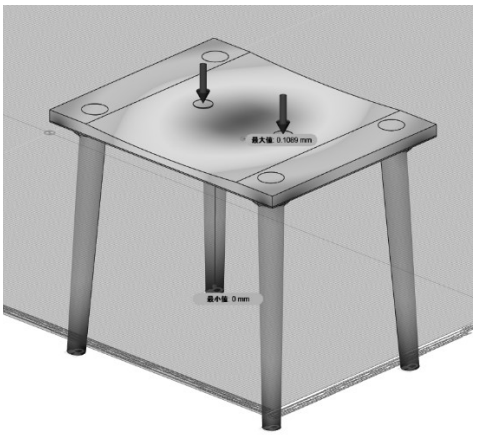

図６　変位シミュレーション

（8）試作

節有り板材から座面を，無節板から脚材を NC で切削加工した（図 7）．カーボン繊維を成形する押し型は合板を積層し NC 切削加工機（FANUC ロボドリルα-T14iFa）による切削加工の後，低粘度のエポキシ樹脂を含浸させ硬化した後に研磨し，#1200 のサーフェーサーで仕上げ離型剤を塗布し乾燥させた．次に，エポキシ樹脂で含浸させたカーボンクロス 5 枚を 0°3 枚，45°2 枚を交互に切削加工した座面スギ材に積層し，押し型でハンドプレスにより圧力をかけ成形を行った．

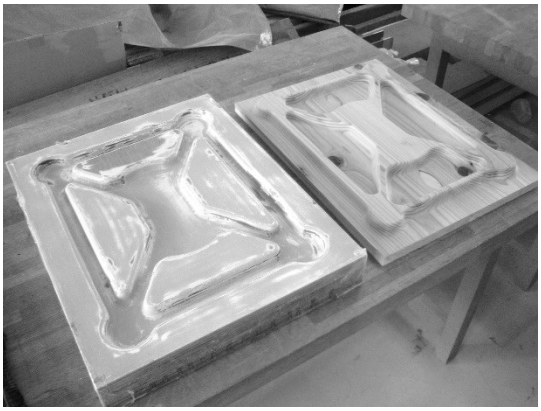

図７　押し型（左）と座面（右）

図８　ハンドプレスから取り外したところ

エポキシ樹脂硬化後，杉材と CFRP が一体となった座面を押し型から取り外し（図 8），不要な箇所を切除した．座面に脚円柱部を納めるφ40mm の穴を開け，接着剤で脚と座面を接合し，座面側脚部先端に楔を座面上側から打ち込む丸ホゾ技法で固定した．完成した試作スツールを図 9，図 10 に示す．実重量は 2.7kg となった．

図９　試作スツール

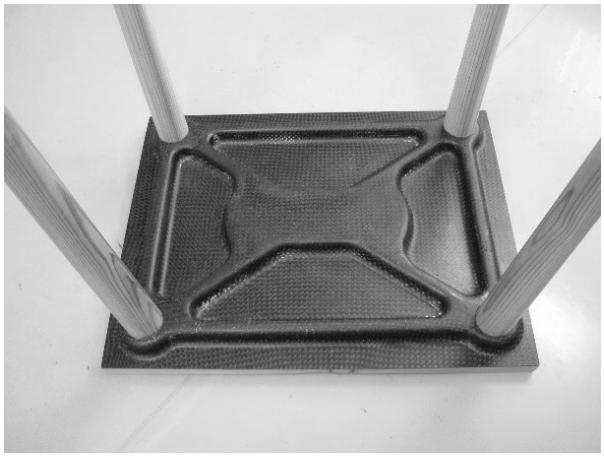

図10　試作スツールの座面裏側

２・２　設計の改良

オートクレーブにより加圧および加熱成形したCFRP は，カーボン繊維の体積含有率が他の成形方法に比べ，最も高くなるなどの理由からハンドレイアップと生産性がほぼ同じであっても力学的特性が最も高くなり，航空宇宙用品として実用されている．そこで，軽量化・高強度化をねらいオートクレーブ成形 CFRP を使った設計の改良を試みた．

（１）　オートクレーブ成形 CFRP

① 3D プリンタによる耐熱樹脂成形型の検証

CFRP の立体形状を成形するにはその受けとなる成形型が必要となる．成形型の素材はアルミやパールボードと呼ばれる無機系合成樹脂木材など耐熱性のある材料が使用されており，目的の形状に合わせ切削加工する必要があるが，複雑な形状となると同時 5 軸切削加工機が必要となり，加工にも時間を要する．そこで，特殊な工作機械を用いず，さらに加工工程の削減を図るため，容易にモデルが作成可能な 3D プリンタで耐熱樹脂により成形型を作成し，CFRP のオートクレーブ成形を検証した．検証用の CFRP 部品は凹形トレイ状の立体形状とし，耐熱性アクリレート系紫外線硬化性樹脂を使い光造形 3D プリンタ（Formlabs Form2）で出力した．出力後の耐熱樹脂成形型は，性能として 238℃における荷重熱たわみを 0.45MPa とするため，後処理として恒温槽にて 80℃で 120 分，次に 160℃で 180 分加熱した．さらに表面処理として研磨，耐熱塗料塗布後に 180℃で 30 分加熱処理を行った（図 11）．

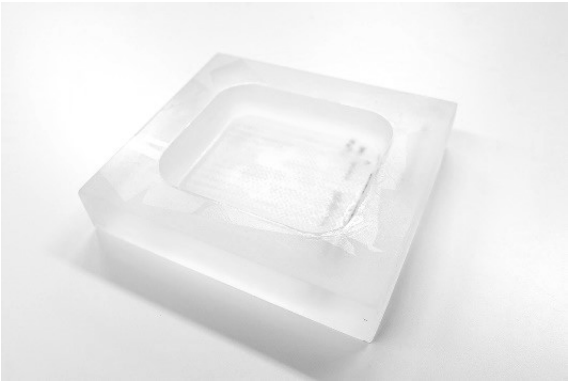

図11　耐熱樹脂成形型

CFRP でトレー状の立体形状を作成するため，CAD にて展開図を作成し，カッティングプロッタにてプリプレグをカットした．次に，離型剤を塗布した耐熱樹脂成形型にそのプリプレグを押し当て積層した．UD 材（一方向強化材）を 0°，90°で交互に 3 層積層したものを綾織りの表面装飾用のプリプレグ 2 枚で挟み計 5 層構成とした．オートクレーブ（型式 DL-2010，羽生田鉄工所社製）は 3℃/min で昇温後，加圧開始温度を 60℃とし，0.4MPa で加圧し，145℃で 90 分保持させ図 12 の構成にて成形した．成形品を図 13 に示す．結果，3D プリンタの耐熱樹脂で作成した成形型を用い CFRP オートクレーブ成形が可能であることが確認できた．

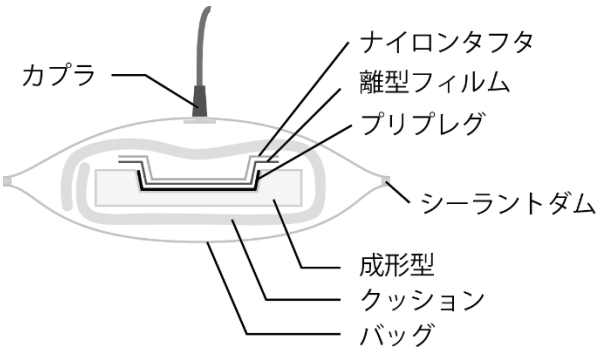

図12　オートクレーブ成型用バッグの構成

図13　成形型と CFRP

② オートクレーブ成形 CFRP 引張試験

CAE を用いた設計に必要な弾性率を測定するため，オートクレーブ成形 CFRP について，強度試験を実施した．プリプレグ UD 材（厚み 0.24mm）を 0°，45°，90°，135°の順に積層したものを 1 セットとし，2 セット分を重ね合わせオートクレーブで成形した．成形品を長さ 250mm，幅 15mm の短冊状の試験片に加工し，インストロン 5985 型を用い，速度 2mm/min，室温で引張試験を実施した．弾性率は 53.1GPa，最大引張応力は 773MPa であった．

（２）CAE による設計

① ジェネレーティブデザイン

ジェネレーティブデザインとは，材質，荷重，拘束箇所，製造方法等の仕様を入力することで最適な複数の 3D モデル案について AI などを用いて自動で

生成する CAE 手法である．CFRP を用いて接合部を設計するため，CAD ソフトウェア（オートデスク Fusion360）を使用し，ジェネレーティブデザインを実施した． まずは計算を簡略化させるため，座面の 1/4 モデルを作成した．図 14 は座面裏から見た構図となっている．基本の筐体となる CFRP 部位のオブジェクトを保持ジオメトリと呼ばれるモデルを残す領域として設定し，次にモデルを生成しない箇所を干渉ジオメトリとして設定した．JIS S 1203 脚部の背もたれの強度試験 試験区分 4 から安全率 3 倍とし 1,140N の荷重を前方および側方にそれぞれ設定した. 材質を ABS 樹脂として生成されたモデルを図 15 に示す.

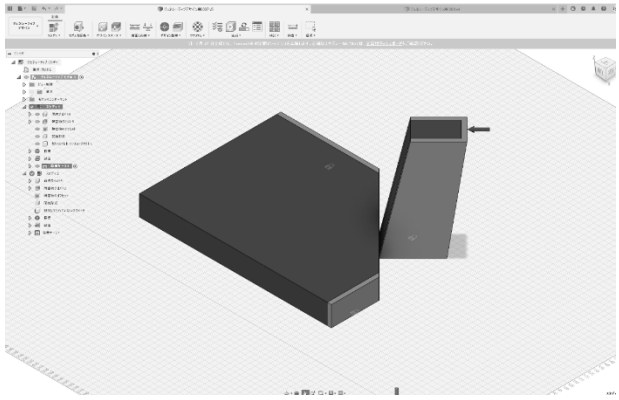

図14　ジェネレーティブデザインの設定画面

図15　生成されたモデル

② スツールの設計

製品廃棄時に分離可能なものとするため，CFRP 部品と木部をネジ止め，一部を接着剤により結合した．木材接合部の脚を補強するように，ジェネレーティブデザインで生成された接合部モデルを参考として，スツールを設計した（図 16）．JIS S 1203 脚部の背もたれの強度試験 試験区分 4 から安全率 3 倍とした 1,140N の荷重で静的応力シミュレーションを行った（図 17）.

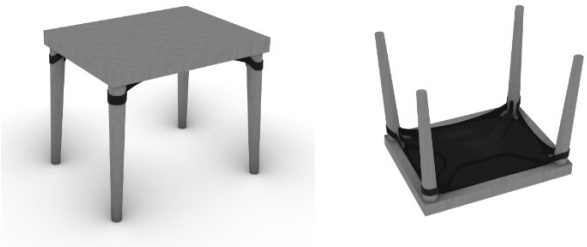

図16　改良試作品の 3DCG

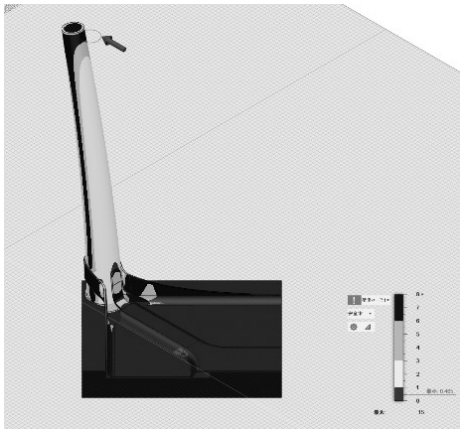

図17　静的応力シミュレーション

（3）接合部モデルの試作

改良試作品の CFRP 部品は入り組んだ複雑な形状となっているため，造形形状の自由度が高い 3D プリンタで耐熱樹脂成形型を作成した（図 18）．離型剤を塗布した成形型にその形状に合うようカットしたプリプレグを積層し，離型フィルム，ナイロン織布，最後にフッ素ゴムを押さえとして重ねたものをクッションとバッグフィルムで覆い真空引きした．オートクレーブを用い昇温速度 3℃/min，60℃にて 0.4MPa で加圧開始, 145℃まで昇温後 90 分保持し成形した.

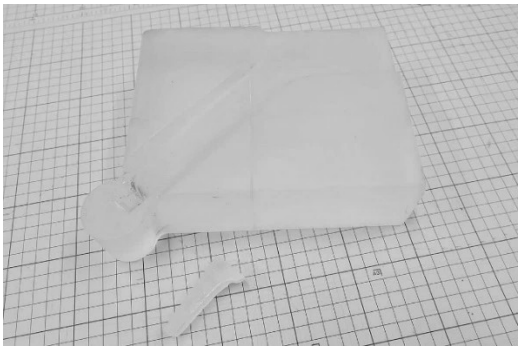

図18　3D プリンタによる耐熱樹脂成形型

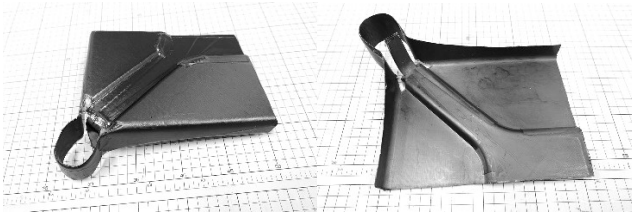

図19　成形した CFRP 部品

図 19 に成形した CFRP 部品を示す．図 20 に切削加工したスギ材と CFRP 部品をネジおよびエポキシ樹脂で接合した強度試験用のスツールの 1/4 モデルを示す.

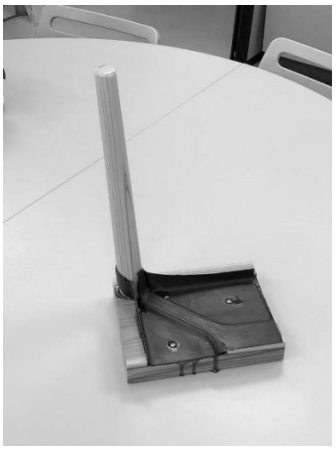

図20　1/4 モデル

（4）強度試験

図 21 に 1/4 モデルについて強度試験を行う様子を示す. 試験機は島津オートグラフ AG-10kNXplus, 速度 10mm/min とした. 座面から荷重を加えた位置までの距離から計算したところ, 578N での破壊となった. 想定していた荷重より低い数値ではあったが，座面側木部の木目に沿った割裂による破壊であったため, 今後改良が必要である.

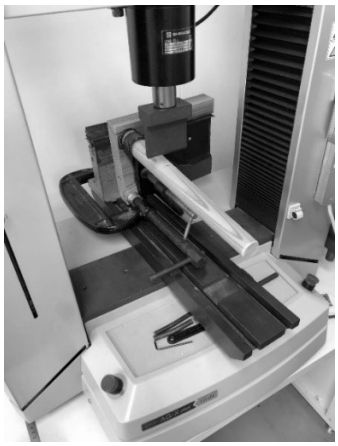

図21　1/4 モデルの強度試験

3　まとめ

徳島県産杉と高機能素材である CFRP を利用して, 材料強度試験や，近年 CAE において新たな設計手法として注目されるトポロジー最適化やジェネレーティブデザイン，強度解析などから複合材の設計を行い既存にないスツールを試作し，改良を試みた. JIS S 1203 脚部の背もたれの強度試験 試験区分 4 を満たす性能は得られたが，成形の仕上がりや強度について改善の余地が見られた．また，CFRP オートクレーブ成形では, 3D プリンタによる容易な成形型の作成について検証した．複雑な CFRP 形状を作成するときに活用できる知見が得られた.

今後も新たな素材やこれらの手法を活用した様々なデザインの確立を図り，試作の多様化を進め徳島県産杉製品のイメージアップや知名度向上を目指したい.

謝辞

この研究は徳島県ダイバーシティ研究環境実現イニシアティブ共同研究事業により実施しました．遂行するにあたり御協力及びご助言をいただきました徳島大学佐々木千鶴先生，また，関係各位の皆様に感謝いたします.

参考文献

１）柴田俊忍・駒井謙治郎・大谷隆一・井上達雄. 材料力学の基礎．培風館，1991，p.62.

２）亀山正樹. “FRP の構造解析の基礎”. 第 3 回（一社）日本複合材料学会第 3 回 FRP 講習会資料, 2018, p.96.

３） 日本機械学会. 材料力学. 丸善出版, 2007, p.105-108.