

## 熱可塑性炭素繊維強化プラスチック (CFRTP) の装具への応用についての検討 ～プリプレグパッチを用いた CFRTP 積層材の曲げ強度について～

### A study on the use of CFRTP for orthosis : Bending strength of test pieces by patch-like CFRTP

早川 康之\*      太田 佳樹\*\*      村原 伸\*  
山岸 暢\*\*\*    可児 浩\*\*\*    瀬野 修一郎\*\*\*

Yasuyuki Hayakawa, Shin Murahara, Yoshiki Ohta  
Tohru Yamagishi, Hiroshi Kani, Shuichiro Seno

#### 概要

低下した身体機能を補う装具は、強度があり軽量で、かつ経時的な身体状況の変化に合わせて調整可能である必要がある。しかし、強固な固定や矯正が必要な場合、現在でも断面が 4×16 mm から 5×18 mm 程度のジュラルミンの棒材を足形状に塑性加工した装具が主流となっており、重く外観が悪い。一方、炭素繊維強化熱可塑性プラスチック (CFRTP) は装具材料の条件に合うが、加熱成形時に層間剝離を起こし、大きく機械的性質が低下する。この問題を解決するために、CFRTP プリプレグを 40 mm 幅のパッチ状にし、積層することにより、曲げ加工時の内側と外側のひずみを軽減する方法を検討した。今回は積層した成形品の曲げ弾性係数、最大曲げ応力について計測した。その結果、曲げ弾性係数、最大曲げ応力とも、繊維をせん断していない通常の成形と変わらないことが確認できた。

#### 1. 背景

低下した身体機能を補う装具は、強度があり軽量で、かつ経時的な身体状況の変化に合わせた修正が可能であることが要求される。特に片麻痺などで関節のコントロールが難しく、痙攣などを生じる症例では、関節の必要な運動可動域の確保と、変形の予防、矯正のための大きな矯正力が要求されることが多い。このような場合、ポリプロピレンなどの熱可塑性プラスチックの板 (3 mm～5 mm 厚) を、対象部位形状に賦形して使用する軽量なプラスチック製装具では、矯正力が十分に得られないため、現在でも断面が 4×16 mm から 5×18 mm 程度のジュラルミンの棒材などを対象部位形状に塑性加工した金属製装具 (図 1) が主流となっている。しかし、金属製装具は、十分な矯正力を確保できるものの、重く外観が悪い。軽量化を図るためには Fiber Reinforced Plastics (FRP) の使用も考えられるが、成形後の身体状況、特に適合後にも進んでいく、関節の変形などに合わせて、装具形状を調整すること

が困難であるため、実用化されていない。一方、軽量でかつ成形後の形状変化も可能でかつ強度を有する材料として、Fiber Reinforced



図 1 金属製下肢装具

\* 北海道科学大学保健医療学部義肢装具学科・北海道科学大学寒地先端材料研究所  
\*\* 北海道科学大学工学部機械工学科    \*\*\* 北海道立総合研究機構工業試験場

Thermo-Plastics (FRTP), 特にカーボンを用いた Carbon FRTP (CFRTP) が実用化され, 装具材料としての可能性が検討されている. しかし, 問題として, 身体形状への賦形時に, 積層した繊維間の層間剥離を防ぐために, オートクレーブなど大掛かりな装置が必要であることが挙げられ, 一般の義肢装具製作施設での製造は現実的ではない.

層間剥離は賦形時の曲げ加工内側と外側の繊維の引っ張り, 圧縮ひずみが大きな原因である. 我々は, この問題を解決するため, 加熱後の成形における, 曲げ加工の内側と外側の繊維長について着目した. CFRTP をパッチ状の繊維に切断し, これを積層成形することにより, 曲げ加工時の内側と外側の繊維長の差を, パッチの継ぎ目部分で調整する方法について検討している. 今回は, 金属支柱の代用とする際に必要となる曲げ弾性率, 最大曲げ応力について, 積層枚数, パッチ長を変更して計測した.

## 2. 方法

### 2-1 試験片について

使用した CFRTP は, 3K 平織りのカーボクロス繊維 1 層にアクリル樹脂を含浸させた 0.4 mm 厚 (PMA-3KP1: 一村産業株式会社) で, 試験片長軸方向に 40 mm の幅で敷き詰めた. 炭素繊維の繊維方向は平織りカーボクロスの繊維方向が以下に示す試験片長軸と平行になるようにした (図 2). また, 下層と上層は, 10 mm 幅でずらし, 同じ場所に 2 層続けてプリプレグパッチの切れ目が来ることのないように配置した (図 3).

積層枚数は, 7 層 (40 mm-7), 8 層 (40 mm-8), 9 層 (40 mm-9) である. また, 30 mm 幅 8 層 (30 mm-8) の積層 CFRTP も合わせて作製した. 30 mm-8 のプリプレグパッチのずらし幅は, 40 mm と同様に 10 mm とした.

CFRTP の成形には, 各条件で積層したプリプレグを, 内寸 180×150 mm, 2 mm 厚の金属枠 (ステンレス製) の中に入れ, ホットプレス (Mini Test Press MP-WCH: 東洋精機製作所) を用いて 200°C 1 MPa で 1

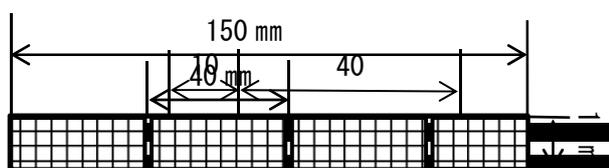


図 2 試験片寸法および平織カーボクロス繊維方向

分間予熱したのち, 200°C 9 MPa で 9 分加熱加圧した. その後, 室温で冷却した. 冷却の際, 変形を防ぐために, ホットプレスから取り出したのち, 常温の金属板の間に挟み込み, 10 kg の重りを載せた状態で十分な冷却を行った.

曲げ試験に使用する試験片は 150×15 mm とし, 切断時に長軸方向がプリプレグパッチの基準幅 40 mm になるようにした (図 2). 切削加工には水冷しながらカットできる複合材料切断機 (コンポジッター MC-453: マルトー) を用い, 熱履歴を加えないよう配慮した.

### 2-2 試験方法

曲げ試験は, JIS7017 に則り, FRP の 3 点曲げによる曲げ試験方法にて行い, 5 サンプルの平均を計測した. 計測項目は, 曲げ弾性率, 最大曲げ応力である. 試験条件は以下のとおりである.

#### 計測条件

室温	: 23°C
湿度	: 50%
支点間距離	: 80 mm
試験速度	: 5 mm/min
試験装置	: オートグラフ AG-100kNXplus (島津製作所)

## 3. 結果

表 1, 図 4, 5 に計測結果を示す. 統計処理は, Kruskal-Wallis 検定の後, Steel-Dwass による多重比較を行った. なお, 比較対象とした Nomal はメーカーから購入した, 継ぎ目のない積層方法での 10 層 2.0 mm 厚の試験片の同条件による結果の引用であり<sup>(1)</sup>, 今回の統計対象とはしていない.

曲げ弾性率, 最大曲げ応力とも, 40 mm-8, 40 mm-9 は, メーカー製造の Normal とほぼ同様の結果となった. また, 40 mm-8, 40 mm-9 に統計的な有意差は認められなかった. 一方で, 40 mm-7 では, 曲げ弾性率, 最大曲げ応力とも 40 mm-8, 40 mm-9 の積層より有意に低くなった.

また, 30 mm-8 も, 曲げ弾性率, 最大曲げ応力とも 40 mm-8, 40 mm-9 の積層より有意に低くなったが, 40 mm-7 より高い値を示した.

曲げ試験での試験片の変化では, 最大曲げ応力付近で, 試験機のクロスヘッド加圧部分近くの裏面で, 表層プリプレグの剥離が起こり (図 6-a), 曲げ応力

表1 曲げ弾性率, 最大曲げ応力結果

試験項目	単位	40mm-7	40mm-8	40mm-9	30 mm-8	Normal
曲げ弾性率	GPa	28.7±4.1	47.2±0.8	46.1±1.1	41.7±1.4	50.2
最大曲げ応力	MPa	156±59	463±40	434±50	336±18	402

Mean±SD

※Normal は文献 (1) を引用

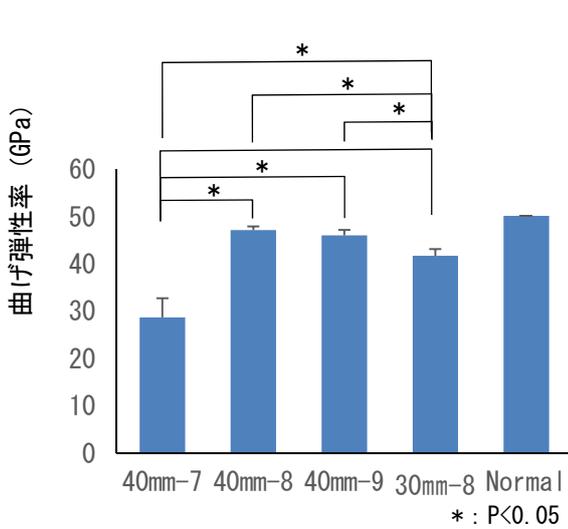


図4 曲げ弾性率

※Normal は文献 (1) を引用  
統計処理対象としていない

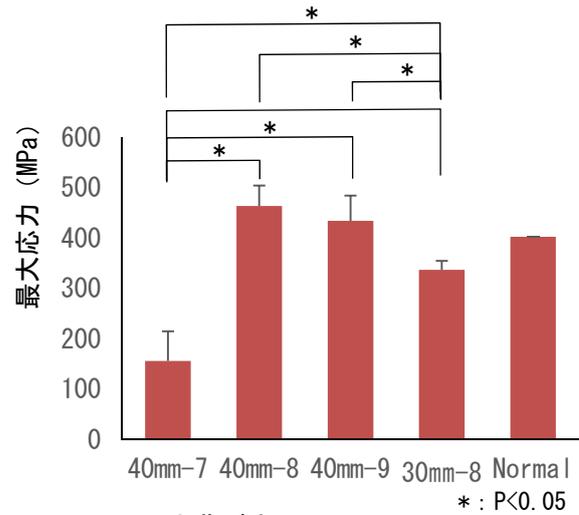
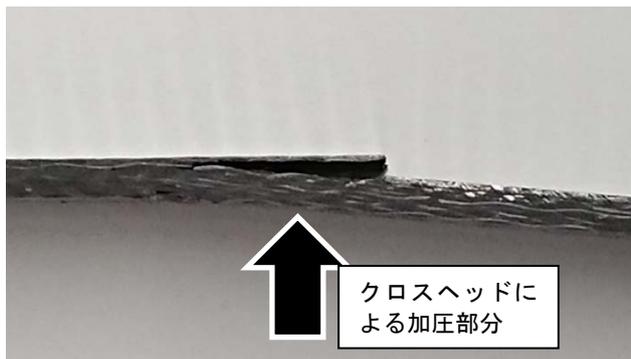


図5 最大曲げ応力

※Normal は文献 (1) を引用  
統計処理対象としていない



a) 試験片の剥離



b) 試験片の破断状況

図6 試験片試験後の状況

が大きく低下した。その後、さらに曲げ方向に力を加えたところ、加圧部分付近で破断した(図6-b)。

#### 4. 考察

片麻痺などで身体機能の低下をきたした障害者に対して、歩行を補助する目的で用いられる装具では、力の多くは曲げ応力として加わることが考えら

れる。また、身体の変形に対して矯正を加える際には、装具支柱にベルトを回して牽引するため、さらに強い曲げ応力が加わる(図7)。今回、曲げ弾性率、最大曲げ応力とも、2 mm厚の40 mm-8、40 mm-9では有意な差はみられなかった。また、メーカーが製造した10枚積層材のNormalとも、そんな結果となっている。一方で、70 mm-8では有意に低値

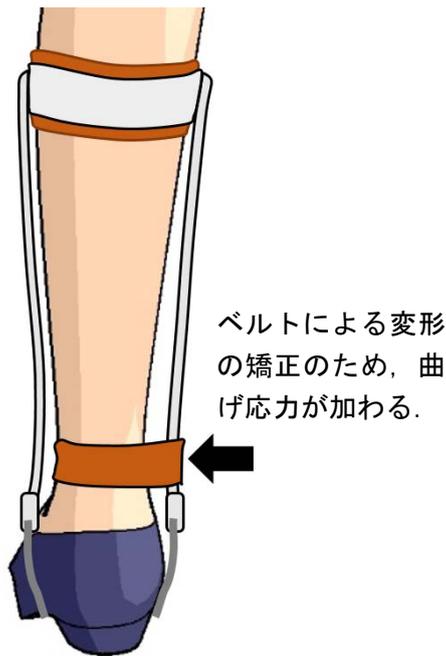


図7 ベルトによる変形の矯正

を示したことから、2 mm厚の試験片では、8枚以上の積層で十分な材料強度を有することが考えられる。今回の計測結果からは、十分な加圧ができる積層枚数が担保できれば、枚数に関係なくほぼ同程度の曲げ弾性率および曲げ強度を有することが示唆された。また、既製品ともそん色のない結果となったことから、プリプレグパッチを用いた積層でも、切れ目のない繊維を積層したCFRTPに近い曲げ弾性率、曲げ強度を有する装具支柱を作ることができる可能性があることが分かった。

一方、破壊に至る経過では、曲げ応力を加えた反対側のパッチ継ぎ目部分からの剥離が認められたのち、破断している(図6-a, b)。剥離したパッチ部分は残り、この部分は鋭利になっており、この状態で使用すると、けがの原因になる可能性がある。したがって、皮膚に接する部分に使用する際には、何らかの対策が必要であることが分かった。

また、パッチ長の影響に関しては、40 mm-8と30 mm-8で曲げ弾性率、最大曲げ応力とも、有意な差が認められた。今回は2種類の長さで確認したが、強度を保つためのパッチ長があることが分かった。今後、加工性との兼ね合いも考え、最適なパッチ長を検討する必要がある。

## 5. まとめ

CFRTPを用いた、軽量でかつ成形後の形状変化も可能でかつ強度を有する装具材料開発のため、プリ

プレグをパッチ状にして配置した積層材の曲げ試験を行った。その結果、適度な長さのパッチを用いれば、切れ目のないCFRTPとそん色のない、曲げ弾性率、最大曲げ応力を持つことが確認できた。また、一定の積層枚数以上での成形を行えば、同じ厚みでは、曲げ弾性率、最大曲げ応力とも大きな差がないことも示唆された。一方で、積層枚数が少なかったり、パッチ長が短すぎる試験片では、十分な曲げ弾性率、最大曲げ応力が得られないことも確認できた。

試験片の破壊過程では、曲げ応力を加えた反対側のパッチ継ぎ目部分からの剥離が確認された。この部分は、鋭利であり怪我のリスクになるなど、装具使用時の問題点も確認できた。今後、剥離についての対策が必要である。

また今回の実験では、CFRTPの積層材から試験片を作製し、賦形を行わない状態での曲げ試験を行った。実際の使用では、身体形状に適合させるため、この材料を再度加熱して賦形する。したがって、今後、賦形後のCFRTP積層材の強度確認が必要である。また、大掛かりな設備が必要なCFRTP成形工程の導入は、多くの義肢装具製作施設では困難である。利用者への普及を図るためには、義肢装具製作施設に類似した環境内での作業のしやすさ、賦形のしやすさの評価とともに、どのように成形を行えば、強度的な損失の少ないCFRTP装具を製作できるのか、検討する必要がある。

## 参考文献

- (1) 瀬野修一郎ほか：熱可塑性炭素繊維強化プラスチックの機械的特性に影響を及ぼす各種因子の評価、北海道立総合研究機構股業試験場報告、316巻、26-32、2017。