

CFRTP を活用した超軽量下肢装具の開発 (第5報)

— 再成形方法の確立 —

千原 健司、仙石 倫章、道家 康雄、萱岡 誠

Development of the ultralight lower extremity orthosis using Carbon Fiber Reinforced Thermoplastics(V)

Establishment of the re-molding method

Kenji Chihara ,Tomoaki Sengoku, Yasuo Doke and Makoto Kayaoka

軽量、高強度、高剛性の特長をもつ CFRTP (熱可塑性炭素繊維複合材料) は、再加熱により材料が軟化し再成形できることから、人体に合わせた調整を必要とし軽量化が望まれる装具に有効と考えられる。これまで本材料を活用した下肢装具は、CAE により設計したものを、ダイヤフラム成形機等により試作し、物性及び臨床試験により評価してきた。本年度は、本材料の特長の一つである再成形を実現する方法を探索し、再成形後の強度等を評価することにより、再成形方法を確立した。

1. はじめに

炭素繊維は軽くて強く、鉄の約 4 分の 1 の比重で、10 倍の比強度があると言われている。中でも近年、自動車等へ適用され始めた CFRTP は、再加熱により材料が軟化し再成形できることから、人体に合わせた調整を必要とし軽量化が望まれる装具に有効と考えられる。

これまで地域の産学官による開発体制と設備を整備¹⁾したため、CAE による形状設計、CFRTP の成形及び加工、試作の物性評価及び臨床評価を可能とした。そして、昨年度は既製品と同形状の下肢装具を試作し、これを物性試験及び臨床試験により評価し、CFRTP 製下肢装具の基本的な特性を把握した²⁾。

本年度は、本材料の特長の一つである再成形をする方法を確立するために、再加熱及び再成形手順を探索し、再成形後の材料強度及び内部観察により評価した。

2. 実験

2. 1 再加熱試験

既に成形された材料の再加熱は、医療現場での調整を可能とするため、義肢装具製作所でよく使用されているハンドヒーター (石崎電機製作所製、PJ-208A1) を使用した。なお、加熱量が足りない場合を想定して 2 台準備した (図 1)。

材料は、前報²⁾の試作で用いた材料と同じであり、炭素繊維が 3K 綾織クロス材、マトリックス樹脂が PA6 の CFRTP (Bond-Laminates 製 TEPEX dynalite202、厚さ 2mm) を使用した。成形に必要な材料温度は 240°C (カタログ値) である。

材料の加熱状況をサーモグラフィ (アピステ製、FSV-1100-H16) により確認し、成形に必要な材料温度に達する方法を探索した。

2. 2 再成形試験

手作業で再成形するために、V ブロック (鋳鉄) 及びロッド (ステンレス)、シリコンゴムシートを準備した (図 1)。ロッドの径は変形させたい材料面の曲率に

じて変更可能であるが、今回はφ50mm を用いた。

再成形は、2. 1 で十分に加熱されたことを確認した材料を手早く V ブロック上のロッドに載せ、シリコンゴムシートを上を被せて、体重をかけて 10 秒程度、押圧することにより行った。また、再成形の具合は外観により評価した。

2. 3 評価試験

2. 2 において成形した際、外観上は再成形できても、十分な強度がなければ下肢装具として使用することはできないため、同材料のクーボン試験片を用いて、平板に成形後、円弧状に再成形し、圧縮試験により評価した。

なお、具体的な手順は次のとおりとした。

- ① 試験片は、長さ 100mm×幅 20mm×厚み 2mm とし、各条件につき 10 ピース準備した (図 2 (a))。
- ② 2. 2 の器具を使用し試験片をφ50mm の円弧状に再成形した (図 2 (b))。条件は次の 4 水準とした。
 - (A) 試験片を直接、円弧状にダイヤフラム成形 (再成形しない比較対象)
 - (B) 平板にダイヤフラム成形した試験片を、更に円弧状に再成形 (ダイヤフラム成形機を使用)
 - (C) 平板にダイヤフラム成形した試験片を、更に円弧状に再成形 (ハンドヒーター+手で押圧)
 - (D) 平板にダイヤフラム成形した試験片を、更に円弧状に再成形 (ハンドヒーター+押圧無し)



図 1 再加熱、再成形に用いた器具

なお、ダイヤフラム成形方法は、前報¹⁾と同様とし、IR オープンで材料を加熱し、独 Ring Maschinenbau GmbH 製の成形機 MEMBRA6 で行った。

- ③ 成形した試験片の円弧状の中央部分を 30mm 幅で切り出した (図 2 (c))。
- ④ 切り出した試験片を疲労試験機 (Instron 製 8802 型) により破壊するまで圧縮し (図 2 (d))、この際に測定した最大荷重を曲げ特性試験 (JIS K7017) の換算式を用いて最大応力に変換し、破壊強度とした。

この他、各条件により成形した試験片をマイクロフォーカス X 線 CT (東芝 IT コントロールシステム製、TOSCANER-32300 μ FD) により内部観察した。

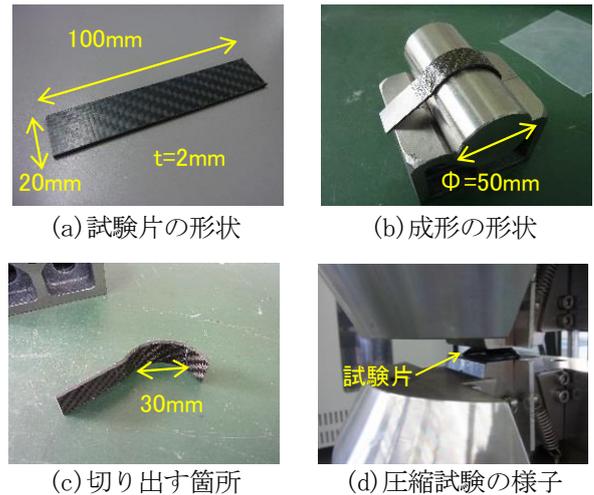


図 2 評価試験の説明図

3. 結果及び考察

3. 1 再加熱試験

ハンドヒーター 1 台を用いて材料を加熱する様子をサーモグラフィで連続画像測定した。材料が最大温度付近になったときの画像を図 3 (a)、(b) に示す。ヒーターの熱が直接あたっていない上面の温度は 160℃程であり、ヒーターの熱が直接あたっている下面の温度も 200℃程であった。上面と下面で温度差があり、なおかつ成形に必要な材料温度 240℃に達しなかった。ハンドヒーター 1 台では長時間加熱しても、これ以上の高温とならなかったため、本試験材料を再成形するための加熱としては不十分であることが分かった。

次に、ハンドヒーター 2 台を用いて、材料を挟むように加熱した結果、成形に必要な温度 240℃に達しており、再成形するための加熱として十分であることが分かった。材料が最大温度付近になったときの画像を図 4 に示す。なお、加熱時のノウハウとしては、ハンドヒーターを 2 台用いることのほか、熱風口先端と材料との距離を 6~7mm 程度に近づけることが必要である。また、実際の現場ではサーモグラフィがないため、目視で加熱状況を判断する必要がある。その点について、今回の試験におけるサーモグラフィ画像と目視による比較から、目視では表面の樹脂が溶けて材料全体の張りが緩んだ時が、サーモグラフィでは十分に加熱された状態であることが分かっており、再成形可能な状態と判断できる。

3. 2 再成形試験

既に下肢装具の形状に成形加工した試作において、下腿部に接する部分の端面を調整するために再成形する様子を図 5 に示す。再成形前は内側 (下腿部に接する方向) に向いていた端面を、外側の向きに修正できることを確認した。このような端面の調整は、現状のプラスチック製下肢装具でよく行われており、同様の調整方法が適用できることが分かった。

端面での再成形と対照的に、材料の中間部分をきれいに再成形することは困難であることも分かった。これは図 6 に示すように、再成形する予定のない端部の非加熱箇所が変形できないために、加熱して曲げる箇所の内径



(a) 上面の温度



(b) 下面の温度 (下面をカメラに向けた直後の画像)

図 3 ハンドヒーター 1 台による加熱



図 4 ハンドヒーター 2 台による加熱

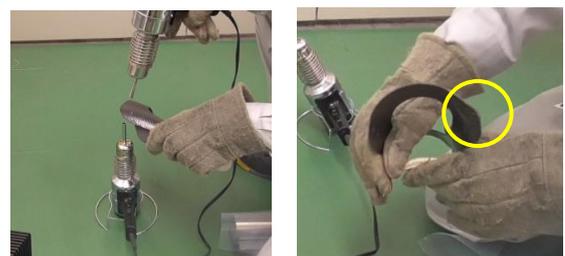


図 5 下肢装具における再成形の例

側の炭素繊維の織物が、行き場がなく重なってしまうことが原因と考えられる。

3.3 評価試験

各再成形条件における円弧状試験片の圧縮破壊試験の結果から計算した破壊時の最大応力（破壊強度）の結果を図7に示す。試験片は各10ピース独立に成形・加工して試験に供しており、図7には各条件の平均値と標準偏差の範囲を記載した。また、有意差の判定はEZR³⁾を用いてTukeyの多重比較を行った。以下に、考察する。

比較対象となる再成形していない試験片Aの破壊強度749.3MPaは、前報²⁾で実施している同材料の曲げ特性試験（JIS K7017）の曲げ強度809.9MPaと比較して若干小さくなるものの、本試験から得られる破壊強度は、概ね曲げ強度に近い値となることが分かった。

一度ダイヤモンド成形したものを、再度、ダイヤモンド成形した試験片Bの破壊強度は、Aと差のない結果となった。このことにより、ダイヤモンド成形機を用いて再成形すれば、再成形しないものと遜色のない強度を持つ再成形が可能であることが分かった。

一度ダイヤモンド成形したものを、ハンドヒーターで加熱し、手で強く押し当てて再成形した試験片Cは、A及びBと比較して約8%低い破壊強度となった。3.2の図5に示したように、装具の端部での再成形であれば、大きく荷重がかからない箇所であるため、実用には十分な強度を有することが分かった。なお、本手法は現場で再調整する際に最も実現性のある手法と考えられる。

一度ダイヤモンド成形したものを、ハンドヒーターで加熱し、強く押圧せず型に賦形した試験片Dは、Cと比較して更に約12%低い破壊強度となった。このことから手作業で再成形する際には、できる限り強く押圧することが望ましいことが分かった。

次に、各条件の試験片をマイクロフォーカスX線CTで内部観察した結果の一例を図8に示す。試験片A、Bには大きな空洞（ポイド）が見られないがC、Dとポイドが増加していることが分かる。これは再成形時の印加圧力がダイヤモンド成形機では0.5MPaであることにに対し、手作業ではこれと比較して強く印加することができないために、高温で軟化している材料内の空洞を潰すことができないままに材料が硬化したことが原因と考えられる。

次にマイクロフォーカスX線CTの欠陥検出機能を利用した。図9に試験片Dでの検出例と、各成形条件におけるポイド率（検出したポイドの総体積/検出範囲の体積）を示す。更に、図7の結果と図9内表の結果を用いて、ポイド率を横軸に、破壊強度を縦軸にプロットした分布図を図10に示す。ポイド率を説明変数、破壊強度を目的変数とした回帰直線の決定係数は0.9605となり、ポイド率は破壊強度に大きく影響していることが分かった。



図6 再成形が困難な例

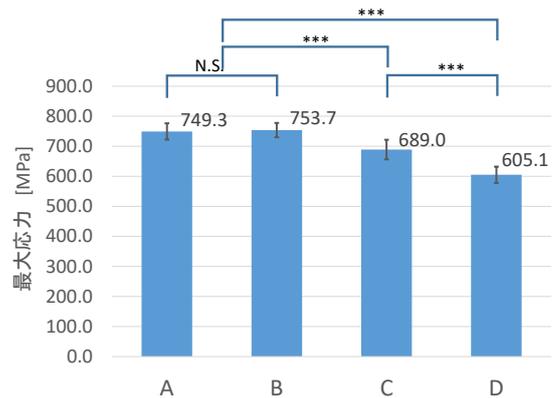


図7 再成形方法の違いによる強度比較

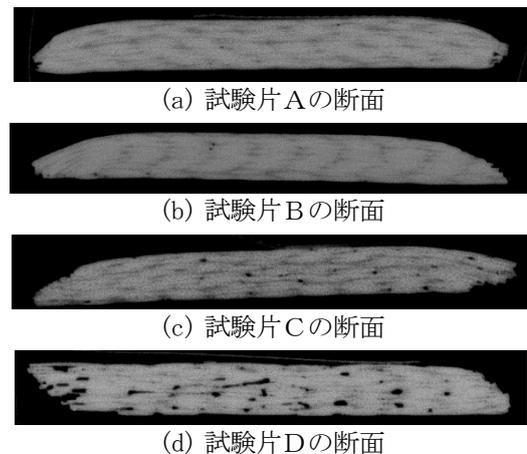


図8 X線CTによる内部観察

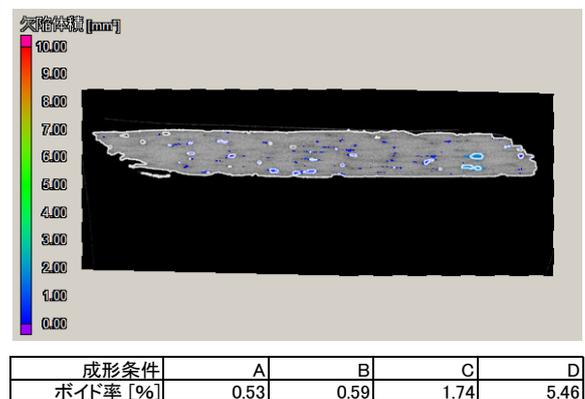


図9 欠陥検出例と各条件のポイド率

4. まとめ

本年度は、CFRTP の特長の一つである再成形をするための方法を確立するために、再加熱及び再成形手順を探索し、再成形後の材料強度及び内部観察により評価した結果、以下の結論を得た。

- 1) 汎用的なハンドヒーター2台を用いることにより、CFRTP 材料を再成形可能な温度まで加熱できる。
- 2) 1) により加熱した材料を、下肢装具部材の端部であれば再成形できる。
- 3) ダイヤフラム成形機を再度用いて、再成形することができ、この場合には強度低下は生じない。
- 4) 手作業で再成形することができ、この場合は強く押圧することにより、元の材料の9割強の強度を保てる。
- 5) 強度の低下は、材料内のボイド率が大きく影響している。

なお、既に実用化されている CFRTP 製膝装具⁴⁾があり取扱業者用に再調整の手順が1枚紙にまとめられて開示されている。この装具に使用されている材料の炭素繊維は短繊維でありマトリクス樹脂も異なるため、本報告による再成形方法とは手順が大きく異なる。

今後は、我々が扱っている材料についても取扱事業者が分かりやすいように、再成形の手順をまとめて開示していく予定である。

【謝 辞】

本研究開発は、平成26年度より株式会社今仙技術研究所ならびに岐阜大学医学部附属病院と共同で行ってお

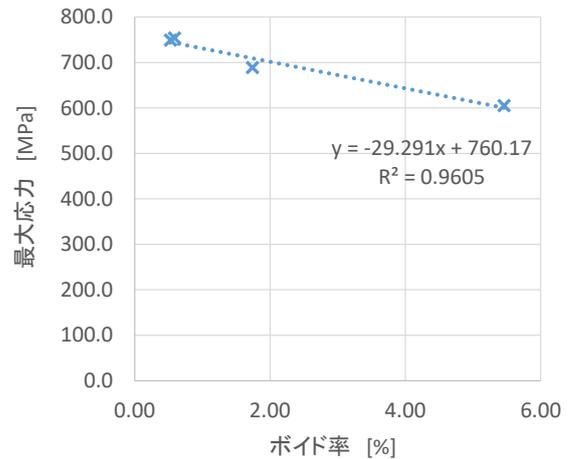


図10 ボイド率に対する破壊強度

り、株式会社名光ブレースの協力を受けながら実施しています。共同研究者ならびに関係者の皆様に感謝します。

【参考文献】

- 1) 千原,道家,仙石,萱岡,田中,岐阜県工業技術研究所研究報告 No.3, pp33-38, 2015
- 2) 千原,仙石,道家,萱岡,岐阜県工業技術研究所研究報告 No.4, pp41-44, 2016
- 3) 統計解析ソフトウェア,自治医科大学附属さいたま医療センター,Ver1.33,2016
- 4) CB ブレース「カーボニー」,株式会社佐喜眞義肢