

熱可塑性炭素繊維複合材料を用いた義肢ソケットの開発

長谷部裕之* 森大介* 奥村航* 本近俊裕** 高木光朗**
佐野太一*** 藤本和希*** 仲井朝美† 大谷章夫††

使用者の体形に合わせて形状を修正可能な熱可塑性CFRP義肢ソケットの開発を行った。最初に12Kの炭素繊維をレーザーにより1.5K相当の炭素繊維に切断した。次に、炭素繊維をポリエチレン繊維でカバリングした後、編機で三次元形状のニットプリフォームを作製した。最終的に、ニットプリフォームを石膏型に被せ、180℃、40分加熱することで熱可塑性CFRP義肢ソケットを作製した。熱可塑性CFRP義肢ソケットの圧縮試験をした結果、従来の熱硬化性義肢ソケットの圧縮荷重より高くなった。また、熱可塑性CFRP義肢ソケットをヒートガンで加熱・変形させることで、ソケット形状を全体的または部分的に修正できることを検証した。
キーワード：熱可塑性CFRP、ニットプリフォーム、義肢ソケット

Development of an Artificial Limb Socket Using CFRTP

Hiroyuki HASEBE, Daisuke MORI, Wataru OKUMURA, Toshihiro MOTOCHIKA, Mitsuro TAKAGI, Taichi SANNO,
Kazuki FUJIMOTO, Asami NAKAI and Akio OTANI

We have developed Carbon Fiber Reinforced Thermo Plastics (CFRTP) artificial limb socket whose shape can be modified shape to fit the user's body shape. First, 12K carbon fiber was cut into about 1.5K carbon fiber using a laser. Next, after covering the carbon fiber with polyethylene fibers, a three-dimensional knit preform was produced using a knitting machine. Finally, the knit preform was covered with a plaster mold and heated at 180° C for 40 minutes to produce the CFRTP artificial limb socket. compression testing of the CFRTP artificial limb socket showed that its compression load was higher than that of conventional thermosetting socket. Furthermore, the ability to modify the shape of the CFRTP artificial limb socket entirely or partially, by heating with a heat gun and reshaping, was verified.

Keywords : CFRTP, knit-preform, artificial limb socket

1. 緒 言

近年、日本国内において糖尿病の合併症などにより、下肢切断する人が増加している。下肢切断に際して、代わりに使用されるのが義足である。その中でも義肢ソケットは、切断部の断端を収納し、使用者の動きを義足に伝えるための重要なパーツである¹⁾。また、体重の支持や断端の保護をしなければならないため、体形に応じた形状と、強靱で軽量な材料が求められている²⁾。このような背景から、近年、軽量で高強度、高剛性等の特徴を持つ炭素繊維を強化材とした炭素繊維複合材料(以下、CFRP)が注目されている。

従来の義肢ソケットは、組紐等の強化繊維を熱硬化性樹脂で固めた複合材料で作製されている。そのため、

使用者の体形の変化に伴い、断端と義肢ソケットの形状が合わなくなった場合、義肢ソケットの形状を修正することが困難で、再度成形し直す必要がある。

この課題は、熱を加えることで柔らかくなる熱可塑性樹脂と伸縮性のあるニットの間基材(以下、ニットプリフォーム)を用いることで改善できる可能性がある。

そこで、形状修正可能なCFRP製義肢ソケットを開発することを目的に、ニットプリフォームの作製技術と、それを用いた熱可塑性CFRP義肢ソケットの作製技術を検討した。また、得られた熱可塑性CFRP義肢ソケットが加熱により修正可能であることを検証したので、ここに報告する。

2. 実 験

2. 1 レーザスリット加工及び評価

炭素繊維のスリットは、カジレーネ[®]で作製したレ

*繊維生活部 **カジレーネ(株) ***(株)澤村義肢製作所

†岐阜大学 ††京都工芸繊維大学

ーザスリット加工装置を用いて行った。図1に示す様に走行する12Kの炭素繊維原糸に対し、1.5Kの太さになるようにレーザーの位置を調節し、炭素繊維を切断した。また、切断後の炭素繊維の断面を収束させるためサイジング剤を塗布した。

12K炭素繊維原糸及びレーザースリット後の炭素繊維の織度はJIS L 1013を参照に、20 cmに切断した繊維の重量から1000 m当たりの重量を算出し、4本の平均値を求めた。

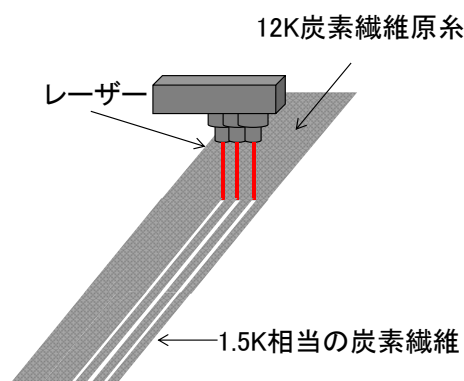


図1 レーザスリット加工装置の模式図

2.2 ニットプリフォームの作製及び評価

炭素繊維を熱可塑性樹脂繊維で被覆するカバリング加工を行った。熱可塑性樹脂繊維としてCFRP化の加工性を考え、ポリエチレン繊維(PE)を使用した。糸加工は、ダブルカバリング加工機(片岡機械工業(株)製)を用い、図2に示す様に1.5Kの炭素繊維に38 texのPE繊維2本をそれぞれS方向及びZ方向に200 T/mで巻き付けてカバリング糸を作製した。

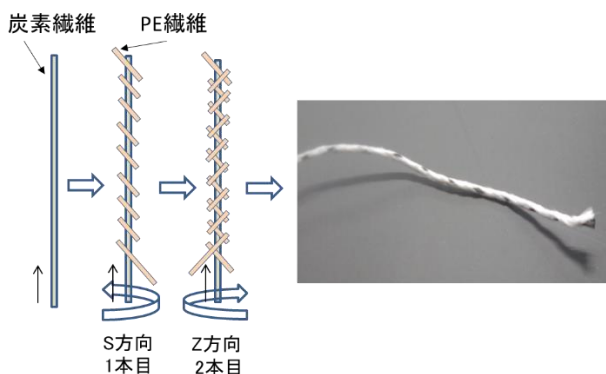


図2 カバリング糸の作製工程

試作したカバリング糸をホールガーメント編機(島精機(株)製)を用いて、平編み組織及びリブ編み組織のニットプリフォームを編成した。

ニットプリフォームの伸度はJIS L 1096 を参照に引張試験により評価した。万能試験機(株島津製作所・AG-100KNplus)を用いて、試料幅50 mm, つかみ間隔60 mm, 引張速度60 mm/minの条件でコース方向に引張荷重を加え、荷重2 N時の変位を測定した。試験は3回行い、その平均値を求めた。

2.3 熱可塑性CFRP義肢ソケットの成形及び評価

熱可塑性CFRP義肢ソケットの成形は、試作したニットプリフォームを石膏型に積層した後、加熱炉(ottobok製)内で約1気圧の圧力を加えながら180°C, 40分加熱することでCFRP成形した。

熱可塑性CFRP義肢ソケットの物性試験として、万能試験機(株島津製作所製)を用い、試験速度5 mm/minで圧縮荷重を加え、30 mm変位させた際の圧縮荷重を求めた。また、試験回数は1回とした。

2.4 熱可塑性CFRP義肢ソケットの修正及び評価

熱可塑性CFRP義肢ソケットの全体修正は、図3に示す様に、ヒートガンで熱可塑性CFRP義肢ソケット全体を加熱した後、修正用の石膏型に挿入して形状を変形させた。一方、部分的な修正は、ヒートガンで熱可塑性CFRP義肢ソケットを局所的に加熱し、柔らかくしてから力を加えることで形状を変形させた。

熱可塑性CFRP義肢ソケットの形状測定は、三次元デジタイザ(Stenbichler製)を用い、修正前と修正後の形状を測定した。得られた修正前後の形状データを重ね合わせ、形状の違いを評価した。



図3 熱可塑性CFRP義肢ソケットの加熱の様子

3 結果及び考察

3.1 炭素繊維のレーザスリット加工技術

炭素繊維を編み加工する場合、編み機の編み針の制約上、細い炭素繊維が必要となる³⁾⁻⁴⁾。そのため、太幅の炭素繊維を細幅の炭素繊維に加工する技術を検討した。

炭素繊維は非常に硬いため、回転刃のような刃物で切断すると刃先が摩耗し一定の切れ味を保つことが難しい⁵⁾。また、炭素繊維内の全てのフィラメントが繊維軸方向に並んでおらず、斜め方向のフィラメントが存在する。このフィラメントを切断する際、図4(a)の様に切り損じによる毛羽が生じる。そこで、レーザによるスリット加工を行い、得られた炭素繊維を図4(b)に示す。レーザ加工することで毛羽の発生を抑制することができた。これは、レーザが非接触であるため切れ味を維持したまま連続的にスリット加工できたことに加え、図5に示すように斜め方向のフィラメントも切断できたためと推測される。また、斜め方向の炭素繊維を切断することで非連続のフィラメントが生じるが、サイジング剤を塗布したことにより一体化されていると考えられる。

織度を測定した結果を表1に示す。12K炭素繊維原糸と比較して、スリット後の炭素繊維の織度は約8分の1になっていることから、1.5K相当の太さの炭素繊維を作製できた。



(a) 回転刃 (b) レーザ

図4 切断方法の違いによるスリット後の炭素繊維

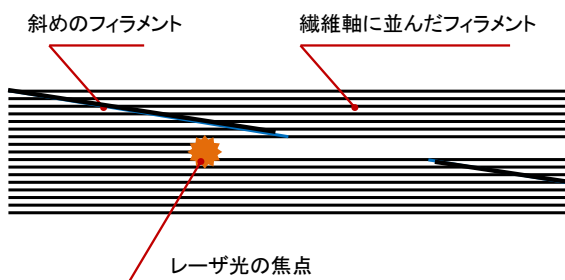


図5 レーザスリットの模式図

表1 織度測定結果

	織度 (tex)
12K 炭素繊維原糸	815
1.5K 相当の炭素繊維	108

3.2 ニットプリフォームの作製技術

カバリング糸を用いることで、平編み組織、リブ編み組織とも糸切れのないニットプリフォームの編成が可能であった。炭素繊維をPE繊維で被覆したことで、編針と炭素繊維の摩擦による糸切れが減少し、スムーズな編立が可能となったためと考えられる。

表2に2 N時の各編み組織の変位と伸度を示す。平編み組織に対し、リブ編み組織の方の伸度が大きくなった。これは、平編みが平面的な編み方に対し、リブ編みは立体的な編み組織であるためと考えられる。

伸縮性の高いニットプリフォームの方が複雑形状の成型型への追随性が良いと考えられるため、リブ編み組織を採用し、筒状に編成した。また、先端はソケット形状に合わせて細くした(図6左)。得られたニットプリフォームを石膏型に装着させた様子を図6右に示す。ニットプリフォームがソケットの形状に追随していることを確認できた。

表2 伸び率試験結果

	2 N時の変位 (mm)	伸度 (%)
平編み組織	12.1	20
リブ編み組織	69.9	116



図6 ニットプリフォームを石膏型に装着した時の様子

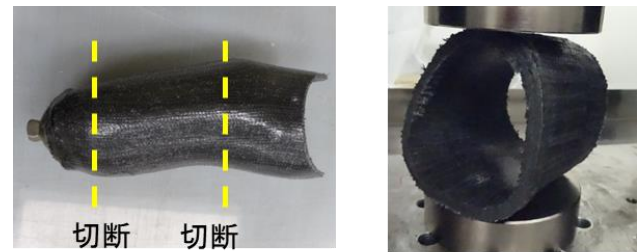
3.3 熱可塑性CFRP義肢ソケットの作製技術

図7に熱可塑性CFRP義肢ソケットの作製手順を示す。まず、(a)使用者の体形を基に作製した石膏型に、ニッ

トプリフォームを積層した。また、先端には義肢ソケットと継ぎ手を連結するための金属アンカーを設置した。(b)次に、その上からポリビニルアルコールフィルムで全体を覆った後、(c)フィルムの内部を減圧し、約1気圧でリブ編みニットプリフォームを加圧した状態で加熱した。被覆したPE繊維は、加熱により溶融し、熱可塑性CFRPのマトリックス樹脂にすることが可能であることが知られている⁶⁾⁷⁾ため、本手法においても、図8に示す様にPE繊維が溶融し、炭素繊維に含浸したものと考えられる。(d)冷却後、石膏型から脱型し、必要な形状にトリミングを行うことで、(e)熱可塑性CFRP義肢ソケットを作製することができた。

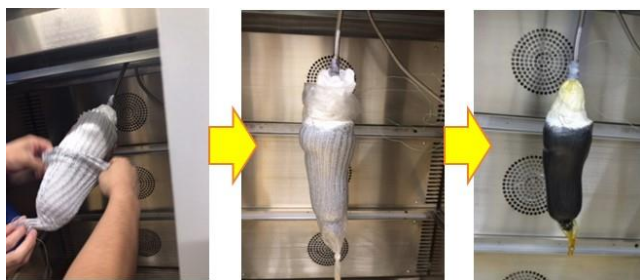
作製した熱可塑性CFRP義肢ソケットの強度評価として、図9に示す様に胴部分を切断した後、圧縮試験を行った。また、従来の方法で作製した熱硬化性義肢ソケットを比較に用いた。両ソケットを30 mm変位させた際の圧縮荷重を図10に示す。熱硬化性義肢ソケットに比べ、熱可塑性CFRP義肢ソケットの圧縮強度は約

40%向上している。また、荷重-変位曲線の直線部の傾きに相当する剛性を比較した結果、熱可塑性CFRP義肢ソケットは、従来の熱硬化性義肢ソケットより剛性が高い結果が得られた。一般的に、強化繊維は屈曲すると強度は低下する⁸⁾が、強化繊維に炭素繊維を用いることでリブ編の様な屈曲した状態でも従来の強化繊維を用いた熱硬化性義肢ソケットより高い圧縮強度と剛性が得られたと考えられる。



(a)切断の箇所 (b)圧縮試験の様子

図9 熱可塑性CFRP義肢ソケットの圧縮試験



(a)積層 (b)フィルムの被覆 (c)成形加工



(d)トリミング (e)CFRP義肢ソケット

図7 熱可塑性CFRP義肢ソケットの作製手順

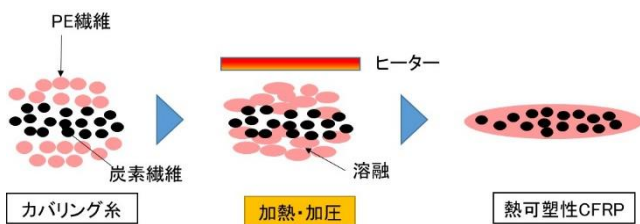


図8 熱可塑性CFRP成形の様子

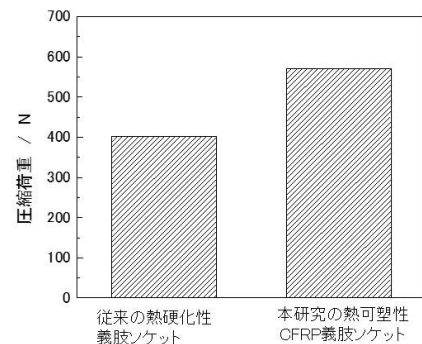


図10 圧縮試験の結果

3.4 熱可塑性CFRP義肢ソケットの修正技術

作製した熱可塑性CFRP義肢ソケットが加熱により修正可能であることを検証した。まず、全体的に断端が太くなったことを想定し、修正加工を行った。修正前と修正後の形状を図11に示す。修正前に対し、修正後の形状が全体的に膨張していることが確認できる。また、表面積を算出したところ、修正前に比べ修正後の表面積は約5.8%増加することが確認された。体重と身長から体表面積を求めるデュ・ボア式(身長^{0.725}×体重^{0.425}×0.007184)を用いて計算したところ、20歳の日本人男性の平均体重⁹⁾が約9 kg増加したときの表面積と同じ値なることが判明した。一方、部分的な修正加工において、修正前後の形状の違いの結果を図12に示す。

修正前後の形状の差を濃淡で表しており、内側に変形した部分が淡色で、外側に変形した部分が濃色で表されている。先端と断端挿入口のみ色が変化していることから、元の形状を維持したまま、部分的に修正が可能であった。

以上のことから、熱可塑性樹脂とニットプリフォームを用いて作製したCFRP義肢ソケットは、加熱することで修正加工できることを検証できた。

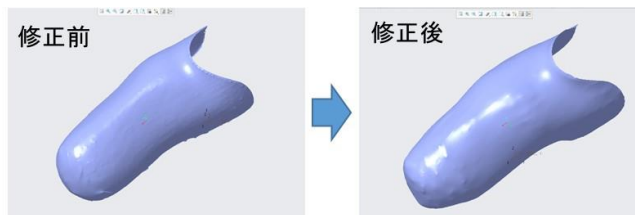


図11 熱可塑性CFRP義肢ソケットの形状変化

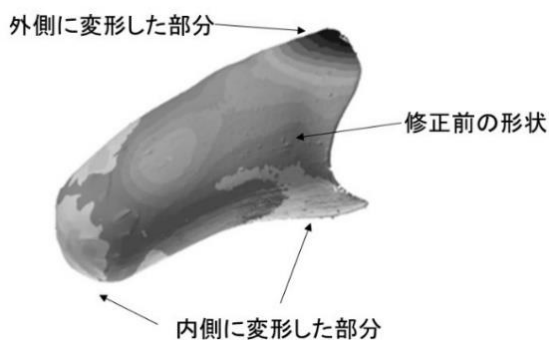


図12 熱可塑性CFRP義肢ソケットの変化箇所

4. 結 言

使用者の体形に合わせて形状を修正することが可能な熱可塑性CFRP義肢ソケットの成形技術について検討した。また、得られた熱可塑性CFRP義肢ソケットの修正技術について検討し、以下の結果が得られた。

- (1) レーザで炭素繊維12K原糸をスリット加工することにより1.5K相当の細幅炭素繊維を得ることができた。
- (2) 炭素繊維にPE繊維をカバリング加工した後、編成することで、伸縮性のあるニットプリフォームを作製できた。
- (3) 作製したニットプリフォームを石膏型に積層した後、加熱することで熱可塑性CFRP義肢ソケットを成形した。圧縮試験の結果、従来の熱硬化性義肢ソケッ

トの1.4倍の耐荷重が得られた。

- (4) 熱可塑性CFRP義肢ソケットをヒートガンで加熱し、表面積を5.8%拡げることができた。

謝 辞

本研究は、経産省の戦略的基盤技術高度化支援事業によって実施した内容の一部である。本研究の遂行にあたり、多大なるご協力を頂きました関係各位に感謝します。

参考文献

- 1) 日本整形外科学会(監修), 日本リハビリテーション医学会(監修). 義肢装具のチェックポイント第6版. 医学書院, 2003, p.122-134.
- 2) 井口信洋. 義肢装具の材料学入門—福祉材料学樹立を目指して—非金属材料-1-プラスチック. 金属, 1994, vol.64, no.8, p.52-60.
- 3) 濱田泰以, 前川善一郎, 横山敦士, 池川直人, 松尾達樹, 山根正睦. Commingled Yarnを用いた熱可塑性複合材料の成形. 成形加工, 1991, vol.3, no.2, p.157-164.
- 4) 長谷部裕之, 奥村航, 木水貢, 神谷淳. コミングル繊維を利用した立体形状CFRP製造技術の開発. 石川県工業試験場研究報告. 2015, no.64, p11-14.
- 5) Ozgur Demircan, Shinsuke Ashibe, Tatsuya Kosui, Asami Nakai. Tensile and bending properties of biaxial weft-knitted and cross-ply thermoplastic composites. Journal of Thermoplastic Composite Materials. 2014, vol.28, p.1233-1249.
- 6) 林浩司, 熱可塑性CFRPの立体成形技術の確立(第5報)—立体成形可能な熱可塑性炭素繊維複合材料用セミプレグ開発—. 岐阜県産業技術センター研究報告. 2015, no.9, p13-15.
- 7) 花崎伸作, 藤原順介, 野村昌孝, CFRP切削における工具摩耗機構. 日本機械学会論文集 C編, 1994, vol.60, no.569, p.297-302.
- 8) 茶谷悦治, 福田ゆか, 池谷達治. 編物基材とした炭素繊維強化熱可塑性プラスチックの調製. 愛知県産業科学技術総合研究センター研究報告. 2015, p90-93.
- 9) 総務省統計局. “第21章 保健衛生 21-2身長と体重の平均値”. 総務省統計局. <https://www.stat.go.jp/data/nihon/back15/21.html>, (参照 2019-10-15).