

## 超軽量カーボン製関節装具の開発

泉川達哉、金城洋、佐喜眞保<sup>1</sup>

㈱佐喜眞義肢の「CBブレース」は膝の中央部に補強用部材を設けた単純な構造の関節装具であるが、その装着感や支持力が従来型装具に比較し優れているものである。本研究ではCBブレースの優れた特徴を定量的に明らかにするためコンピュータによる機構解析を行った。また福祉機器等で活用されている炭素繊維強化樹脂(CFRP)によるCBブレースの試作を行い、従来のアルミ製装具に比べ大幅な軽量化を実現した。

### 1 はじめに

㈱佐喜眞義肢では、「創意工夫で医療福祉に貢献」という理念の下、昭和55年から関節装具を製作しており、平成10年には独自の発想で図1に示す「CBブレース」の開発を行った。これは膝の中央部に補強用部材を設けた単純な構造の関節装具であるが、その装着感や支持力が従来型装具に比較し優れているものである。

CBブレースは、その発想が優れてはいるが、㈱佐喜眞義肢が既存の大手装具メーカーに対抗し市場に参入するためには、現在のように口コミで顧客を増やすだけでなく、定量的な方法でCBブレースの優れた特徴を分かり易く示すことが必要である。また関節装具は使用者が長時間身に付けることで大きな効果が期待できるが、現行のCBブレースの重量(180g)では、特に高齢者の場合、長く装着することが難しいという課題もある。

本研究では、これらの課題に対し①関節装具機能の定量的評価に関する研究、②カーボン成形に関する研究という2つのサブテーマを設定した。

一般的に関節装具は、使用者の歩行状態や歩行速度、酸素消費量等の変化を計測する臨床的なアプローチによって評価されているが、「関節装具機能の定量的評価に関する研究」では、CBブレースの基本的な構造が他社製品と大きく異なっていることから、関節装具そのものが持つ要素機能(矯正力や弾性等)に焦点を絞り、CBブレースの優位性を明らかにすることにした。また「カーボン成形に関する研究」では、従来アルミニウムで作られていた部分について約4割の軽量化を目指し、炭素繊維強化樹脂(CFRP)によるCBブレースの試作を行った。

### 2 関節装具機能の定量的評価に関する研究

#### 2-1 解析方法

CBブレースには、患者の症状に合わせて数種類の製品が用意されているが、ここでは最も適用事例の多い「変形性関節症」用の製品について機構解析を行った。解析に使用したのは非線形構造解析ソフト「LS-DYNA」であり、患者の静止時及び歩行時に発生する関節装具の応力や矯正力を求めた。

CBブレースによる変形性関節症の矯正例を図2に示す。変形性関節症は俗にO脚と呼ばれる症状で、主に加齢による筋力の低下、体重の増加で膝に負担のかかることが原因となっており、このような症状に悩む患者は全国で1千万人以上いると言われている。

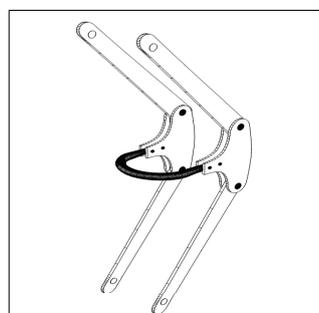


図1 CBブレース



(矯正前)

(矯正後)

図2 変形性関節症の矯正例

1 株式会社佐喜眞義肢

## 2-2 解析モデル

機構解析で使用した解析モデルを図3に示す。

「カフモデル」は、以前より膝装具として使用されている一般的な形状をモデル化したものである。カフモデルの両側のアームは、太ももとふくらはぎ付近に設けたアルミ合金のカフ（支持部材）で連結されている。上下のアームを繋ぐヒンジは一箇所のみで単軸関節となっており、4つのアームの先端と膝関節の外側面に脚との接触を近似した「バネ要素」を設けている。

「CBモデル」は、上下のカフを取り除き、その代わりに膝の中央部に左右のアームを連結するセンターブリッジを設けてある。またセンターブリッジの上下にヒンジがあり多軸関節となっている。脚と関節装具との接触についてはバネ要素で近似し、バネ定数や減衰係数は「カフモデル」と同様とした。

両モデルともビーム要素で構成されており、装具部分は塑性変形しない理想的なバネの性質を持つ「完全弾性体」、脚部は全く変形しない「剛体」として定義している。また膝関節部には、ジョイントの性質を持つ「ボールジョイント要素」を使用した。

## 2-3 解析条件

### ① 静止時（立脚）

装具を装着した直立静止状態で装具に発生する応力及び脚に作用する矯正力などを求める。装着時の釣り合い状態を再現するため、正常な膝の状態から0脚になるように準静的に装具を変形させている。この解析条件では、関節装具の膝変形に対する適用範囲を推測することができる。

### ② 歩行時

実際の歩行動作に近い強制変位を脚に与え、歩行時の動きを再現し、その際に発生する矯正力などを求める。解析に用いた強制変位を図4に示す。これは29歳・健常男子（身長176cm、体重83.5kg）の歩行データ<sup>1)</sup>を0脚になるように若干修正したものである。図の縦軸は、上肢の場合脚の付け根、下肢の場合は膝を中心とした各方向への回転角である。歩行動作は脚が地に付いた状態である「立脚期」と地面から離れた状態の「遊脚期」に分けられ、最初の立脚期に入るまでの0.5秒間は、解析モデルの初期形状から0脚状態へ変形させるための準備時間とした。この強制変位を与えた脚の動きは図5のようになる。尚、以下に示す計算結果では一歩行分（0.5～1.651秒）を表示しているが、解析においては計算誤差を見積もるため、歩行動作を二歩行分としている。

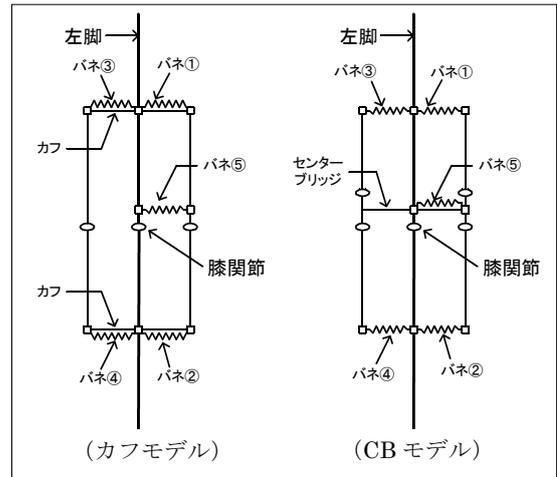


図3 解析モデル

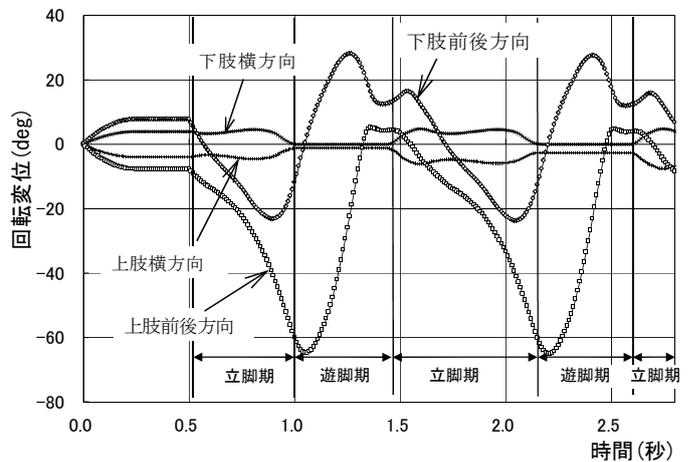


図4 強制変位

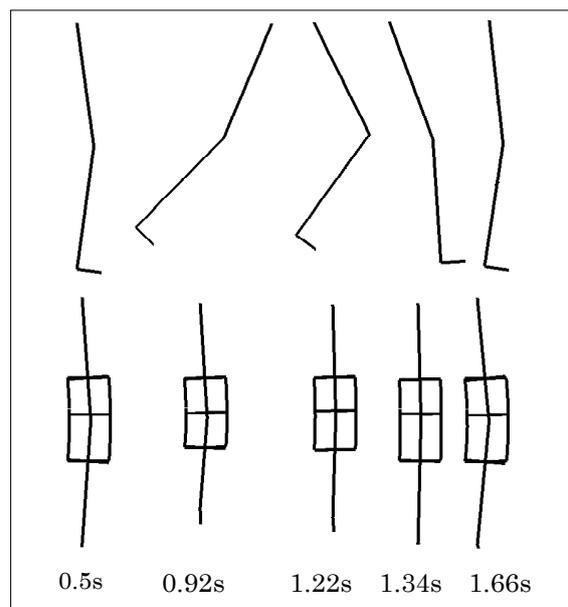


図5 強制変位による動作  
（上：右側面図、下：正面図）

2-4 解析評価パラメータ

①アームの応力

使用時の関節装具は、初期形状から膝の変形度合いに応じた形に変形しており、その形状から初期状態に戻ろうとする力が矯正力として患者に作用している。従って患者の症状に対する関節装具の適用範囲は、それぞれの関節装具が持つ弾性変形領域の大きさによって決まると言える。ここでは装具としての使用可能領域の目安としてアームの応力を求めた。今回は、解析で使用している材質（A2017）の耐力である28kgf/mm<sup>2</sup>を装具としての使用限界とした。

②バネ要素に作用する力

装具と脚の接触部を近似したバネ要素に着目し、各バネ要素について膝の左右、前後、上下方向に作用する力を求めた。変形性関節症に関節装具を適用した場合、患者は装具によって強制的に膝の左右方向の変位を矯正されているため、脚と装具の接触を近似した各バネ要素に作用する左右方向の力の反力が矯正力の目安になると考えた。また、前後及び上下方向にかかる力は、矯正力としては働かず、歩行時の抵抗として作用するため、その力が小さいほど装着感の良い装具であると考えた。

2-5 解析結果及び考察

①静止時（立脚）

図6は静止時における装具の変形状態を解析した結果である。カフモデルでは上下のカフがアームのスムーズな変形を押しさえ込み、その結果全体として歪な変形となっているのに対し、CBモデルでは4本のそれぞれのアームが脚の形に沿って緩やかな弧を描くように変形している。これによりCBモデルの場合、カフモデルに比べ局所的な応力値が小さくなっている。最大応力の発生位置は、CBモデルでは内側下肢アームのジョイント部分、カフモデルでは外側上肢アームのジョイント部分となっている。

図7に静止時の最大応力および矯正力を示す。横軸は膝の横方向へ与えている強制変位、縦軸は最大応力と矯正力（バネ⑤に作用する力）である。図から膝の横方向の変位に対して、CBモデルはカフモデルより変形の許容範囲が約40%広く、CBモデルの最大許容変形時の矯正力はカフモデルに比べ約70%大きいことが分かる。すなわち、CBモデルはカフモデルと比較すると、変形に対する適用範囲が広く、矯正力が大きいという結果になった。

②歩行時

図8に歩行時におけるアームの最大応力を示した。大きさの違いはあるものの、両モデルとも同様の挙動を示している。大きさの違いは、静止時の解析結果に見られた差と同程度であることから、歩行時にもカフモデルが歪な変形状態にあることが示唆される。

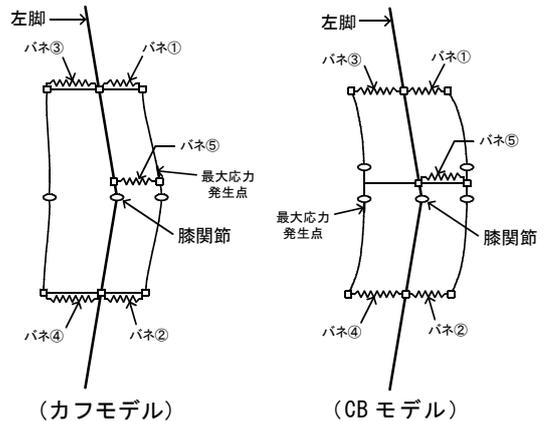


図6 変形の様子

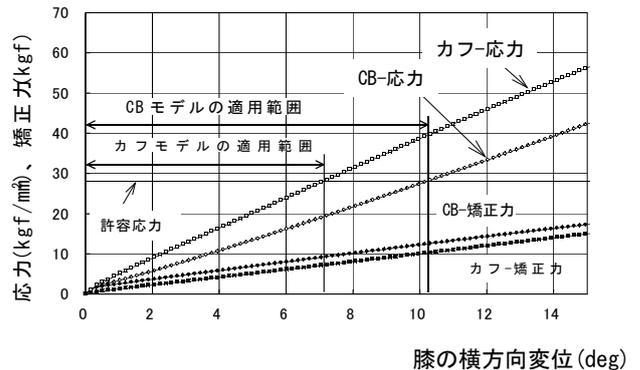


図7 静止時の最大応力と矯正力

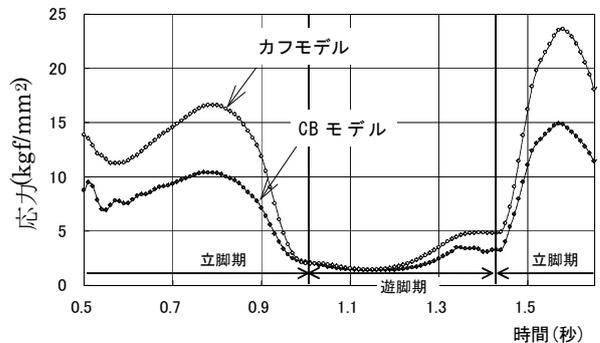


図8 歩行時の最大応力

図9,10に両モデルについて、各バネ要素に作用する膝の横方向（矯正力の働く方向）の力を示す。CBモデルの場合、中央パッド（バネ⑤）以外の4つのパッドに働く力は、ほぼ同程度となっているのに対し、カフモデルの場合、脚の内側に当たる2つのパッド（バネ③、④）の力が若干大きくなっている。また、静止時の解析結果と同様にCBモデルの方が中央パッド（バネ⑤）の力が大きくなっている。

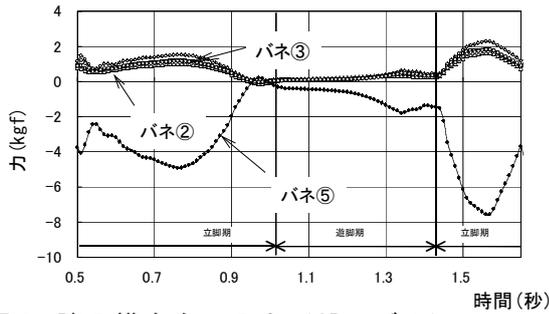


図9 膝の横方向への力（CBモデル）

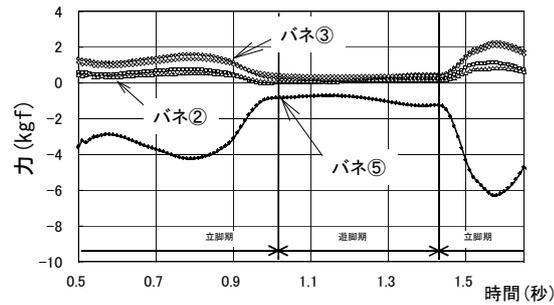


図10 膝の横方向への力（カフモデル）

図11, 12に、各バネ要素に作用する前後方向の力を示す。CBモデルと比較しカフモデルの場合が明らかに大きい。特に下肢側の2つのバネ要素（バネ③、バネ④）の力が大きい時間帯があり、変動も激しい。これらバネ③、④に発生する力はそれぞれ逆方向になっていることから、カフモデルでは装具が脚を中心に回転する傾向の強いことが分かる。

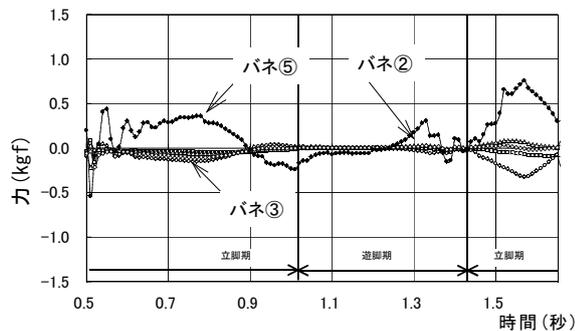


図11 前後方向への力（CBモデル）

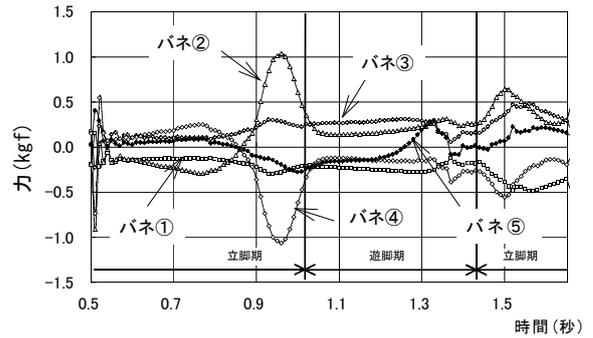


図12 前後方向への力（カフモデル）

図13, 14は、各バネ要素に作用する上下方向の力を示したものである。複雑に推移しているが、傾向としては両モデルとも殆ど同じである。CBモデルの力が若干大きくなっているが、これはCBモデルのアーチを描いて変形した結果、上下方向の変形量がやや大きくなったためだと考えている。

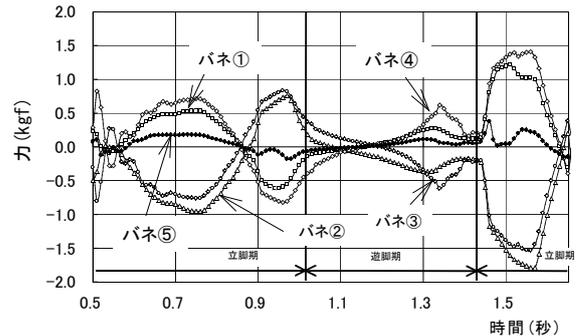


図13 上下方向への力（CBモデル）

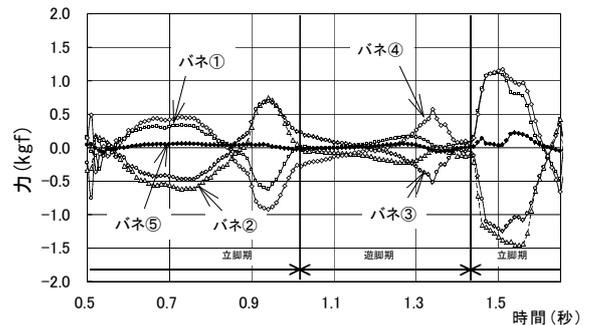


図14 上下方向への力（カフモデル）

### 3 カーボン成形に関する研究

#### 3-1 プレス成形

##### 3-1-1 成形方法

関節装具のアームの成形方法として採用したプレス成形の手順を図15に示す。これはカーボン繊維に予め樹脂を含浸させ半硬化状態にしたプリプレグ材を、所定の大きさにカット後積層し、金型内部で加圧・加熱する方法である。大量生産には不向きだが、加圧するため高い成形精度の得られることが特徴である。

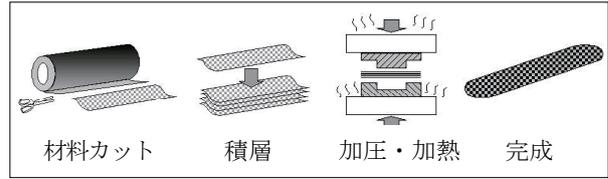


図15 プレス成形の手順

##### 3-1-2 成形条件の最適化

関節装具のアームには、膝変形を矯正するのに必要な剛性に加え、変形が大きくなった場合でも脆性破壊しないことが求められる。ここでは種々の条件で試験片を製作し、曲げ試験を行うことで成形条件の最適化を図った。

プリプレグ材にはカーボン繊維の種類や配向方法によって様々なものがあるが、ここでは作業性を考慮し、カーボン繊維が予めクロス状に編まれた表1に示す3種類の材料を用いて試験片を製作した。

表1 使用したプリプレグ材

	繊維引張強度	フィラメント数	繊維量
①	360kgf/mm <sup>2</sup>	1,000 本/束	92g/m <sup>2</sup>
②	〃	3,000 本/束	195g/m <sup>2</sup>
③	〃	1,000 本/束	119g/m <sup>2</sup>

試験片は長さ140mm、幅20mmの矩形で4つの角はR10、板厚は1.0と2.0mmの2種類である。成形時の付加熱量については、大きすぎると金型内に固まったまま離型が困難となり、小さすぎると逆に柔らかすぎて離型時に変形してしまう。ここでは試行錯誤的に条件を定めた結果、付加熱量を150℃×3分とし、その後、乾燥炉に入れ130℃×2時間の追硬化を行っている。プレス圧力に関しては、1~15tonの範囲で成形し変化を見たが、特に大きな違いは確認できなかった。

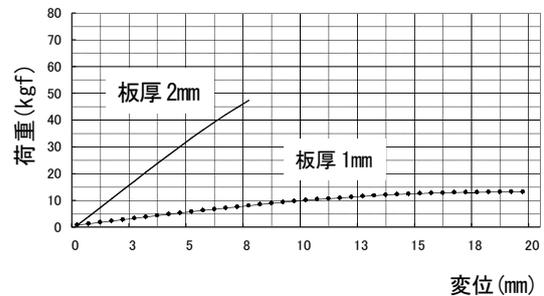


図16 曲げ試験結果 (材料①)

曲げ試験はJIS K7074に定められた3点曲げで行い、使用した圧子の先端径は10mm、支点間距離は80mm、試験速度は10mm/minである。それぞれの成形パターンについて5回以上の試験を行い、変位5mm毎の荷重と最大荷重を記録し、その平均値を求めた。CFRPの機械的性質は、カーボン繊維量と樹脂量の兼ね合いで決まり、一般的にカーボン繊維が多いと高剛性、低弾性となる。

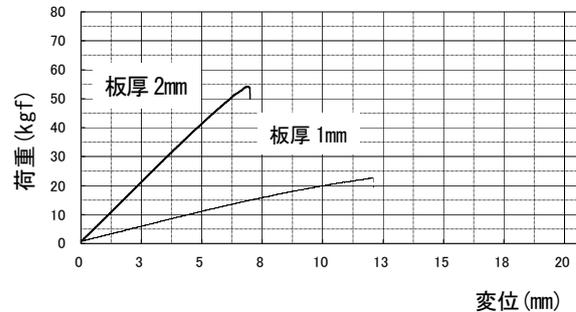


図17 曲げ試験結果 (材料②)

曲げ試験の結果を図16~18に示す。繊維量が一番少ない材料①が高い弾性を示した。材料①はデータのバラツキも少なく安定した特性を示したが、シートが薄いため積層枚数が多く(2mmで19枚)なることが難点である。一方、材料②は繊維量が最も多く厚いシートであるため積層枚数の少ない(2mmで10枚)ことがメリットである。しかしフィラメント数が多

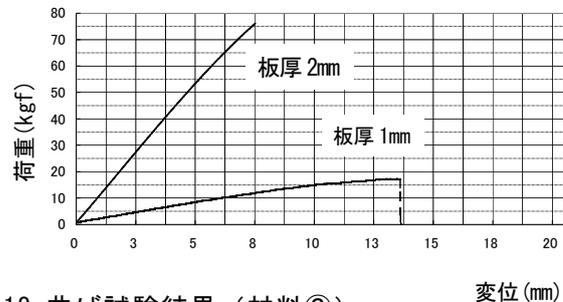


図18 曲げ試験結果 (材料③)

いためか、データのバラツキは最も大きかった。材料③は、前述の2つの材料の中間的な特性を示すものであった。これらのうち作業性を重視するなら、材料②を選定するのだが、ここでは関節装具部材として使用するため安全性を優先し、高い弾性を示す材料①を使用することにした。

### 3-1-3 アーム形状

アーム形状を設計するには、カーボンシートの材質と積層方法によって決まる成形品の見かけの弾性係数と、関節装具に求められる矯正力を見積もる必要がある。ここでは材料①の曲げ試験結果から板厚の異なる2つのデータを用いて、見かけの弾性係を求めた。また、関節装具の矯正力は、アームと身体との接触面積が小さいため、せいぜい1kgf程度が限界だと見積もった。これらの値を用いて有限要素法によりアームの変形量を予測した結果、カーボン製アームの変形は、アルミ製の約7.5倍も大きく(14.5mm)なることが分かった。そのためカーボン製アームの初期変位量は、アルミ製に比べ、下部右用で16mm、下部左用で17mm、上部左右用で13mm大きくした。これらのアーム形状は、実際に患者に試着してもらい装着感についてヒアリングした後、最終決定した。

### 3-1-4 成形用金型

アーム成形用金型の概略を図19に示す。成形品をスムーズに離型することができるようにアームの水平部2カ所に押出ピンを備えている。金型の凸部と凹部のクリアランスは片側0.15mm、凸部側面のテーパ角は3°としている。金型を組み合わせた場合のキャビティ深さは1.2mmとした。実際に成形を行う際は、1.2mm強に積層したプリプレグシートを用いた。

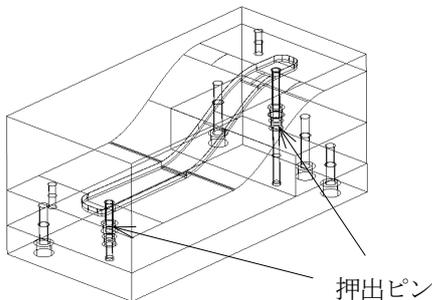


図19 アーム成形用金型

### 3-1-5 成形結果及び考察

離型剤と押出ピンの効果で型離れが良く、エポキシ樹脂がキャビティからはみ出した場合でも簡単に

成形品を取り出すことができた。また繰り返し成形しても成形品の表面性状に粗さが見られなかった。

成形したアーム(上部左右)を用いて行った片持ち曲げ試験の結果から、設計時に見積もった見かけの弾性係数の値がほぼ正確であったことが分かった。関節装具のアーム剛性については、使用者それぞれに対して最適値の異なることが予想されるが、使用するシートの種類と積層方法の組み合わせ毎に見かけの弾性係数を求めておけば、アームの板厚や形状を変更することで剛性の調整を容易に行えることが示された。

## 3-2 射出成形

### 3-2-1 設計形状

図20にCBバーおよびフタの概略を示す。CBバーの材料として選定したトレカペレット(3001T-30)は、ナイロン66をベース樹脂とし強化繊維としてカーボンファイバーが30%入ったものである。CBバーの断面形状は、次に示す梁のたわみの式(1)を用いて決定した。

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = -M / EI \dots \dots (1)$$

ここで、v: たわみ、M: 曲げモーメント、E: 弾性係数、I: 断面二次モーメントである。

式(1)を2回積分すると、距離xの位置における梁のたわみ量を求めることができる。ここでは現行CBバーは硬すぎるとの判断から、カーボン製CBバーのたわみ量が現行の約1.4倍となるように断面形状を求めた。現行CBバーの断面は直径6mm円形であるが、カーボン製CBバーの断面は短径6mm、長径8mmの楕円形状に近い形状となった。また射出成形では厚肉部の成形が難しいため全体的に薄肉化を図り、強度の必要な部分にはリブを設けるなどの工夫を行った。CBバーとフタの組立にはコストや作業性を考慮した結果、突起を用いた嵌め合い構造を採用している。

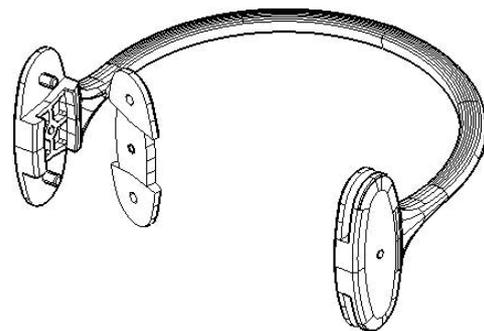


図20 CBバーとフタ

### 3-2-2 樹脂流動解析

CBバーの形状がある程度できた段階で樹脂流動解析を行い成形時に樹脂を流し込むゲート位置に関する検討を行った。解析に使用したのは、東レエンジニアリング社製の3D-TIMONである。図21に示す2種類のゲート位置について解析を行いその結果を比較した。ケース①では矢印で示した一カ所、ケース②では三角印の2カ所から同時に樹脂を注入している。

図22は成形品中の繊維配向を予測したものである。ケース①では、ゲート位置において繊維量が減少することが示された。ケース②では2つのゲートから流れてくる樹脂がぶつかる箇所において、繊維が十分に混ざり合わない可能性が示された。

図23は成形後の反り変形量を予測した結果である。ゲート位置によって変形の方法は異なるものの、その大きさは同程度であることが示された。

今回は比較的繊維の配向が均等であり、充填圧力に余裕のあるケース②を採用することにした。

### 3-2-3 成形結果及び考察

成形品の表面は強化繊維入り樹脂に特有のつやの少ないものであった。また試作ロットによっては表面が白っぽくなる現象もみられた。これはペレットが吸湿した場合に生じるということであるが、現段階では吸湿の原因は特定できていない。また金型温度を変えても主要寸法の成形精度に大きな違いは確認できなかった。

成形品の剛性については、装着した際、膝の側面に位置する部分に引張および圧縮荷重を作用させ破壊強度を確認した。引張強度、圧縮強度とも10kgf前後であったが、これは関節装具の使用状況を想定した場合、十分な強度であると考えている。また破断面は、ほぼ円形となっており人体を傷つける可能性は低いと考えられた。

## 4 おわりに

### ①定量的評価に関する研究

コンピュータによる機構解析を用いて、変形性関節症（O脚）の患者に関節装具を適用した際の発生応力等を調べた結果、CBブレースは身体の変形に対する追従性に優れており、患者の症状に対する適用範囲が上下カフ付き装具の約1.4倍であることが示唆された。また歩行状態での解析では、CBブレースの場合、装着者の進行方向に作用する力が比較的小さくなることも示された。この力は歩行時に関節装具がずれ落ちる要因になることから、CBブレースの装着

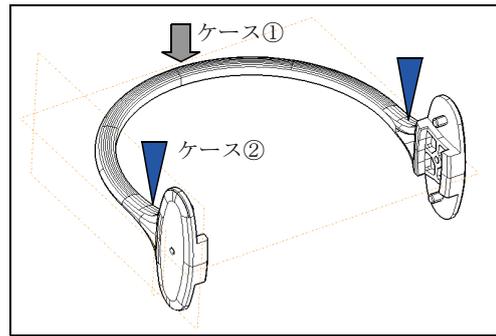


図21 ゲート位置

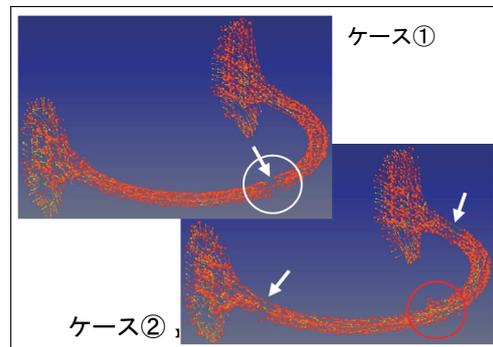


図22 繊維方向

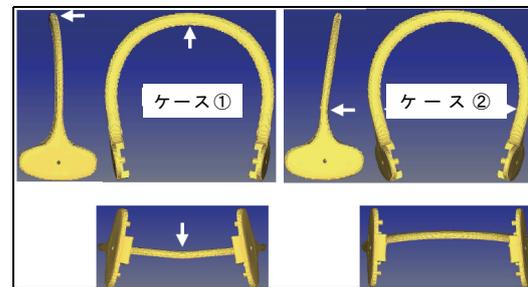


図23 反り変形

感の良さが定量的に示されたものであると考えている。

### ②カーボン成形に関する研究

試作したカーボン製関節装具を図24に示す。

カーボンのプリプレグ材を用いて試作したアームは、従来のアルミ製に比べ約40%軽量で、弾性変形量が約2.5倍となった。CBバーとそのカバーについては、射出成形法を採用し、剛性の維持や成形性を考慮した形状設計、繊維配向やそり変形を考慮した金型設計を行った。また作業性、コスト、剛性などの観点からカバーの組み付け方法を決定した。カーボン製CBバーは従来品の27%軽量化となった。布部品やビス等を含めた関節装具全体での重量は33%減となった。

### 謝辞

本研究は平成 18 年度沖縄産学官共同研究推進事業において行われたものであり、管理法人である南西地域産業活性化センターの方々に感謝致します。

### 参考文献

1) 江原義弘「歩き始めと歩行の分析」医歯薬出版株式会社(2002.10)



図 2 4 カarbon製関節装具の試作品

編 集 沖縄県工業技術センター

発 行 沖縄県工業技術センター

〒904-2234 沖縄県うるま市字州崎 12 番 2

T E L (098)929-0111

F A X (098)929-0115

U R L <https://www.pref.okinawa.lg.jp/site/shoko/kogyo/>

著作物の一部および全部を転載・翻訳される場合は、当センターにご連絡ください。