

# 熱溶解積層法を用いた CFRP とポリプロピレンからなる機能的 接合体の創製

群馬県立群馬産業技術センター 生産システム係  
係長 須田 高史  
(平成 28 年度 一般研究開発助成 AF-2016028)

キーワード：熱溶解積層法，CFRP，異種材料接合

## 1. 研究の目的と背景

積層造形法は 3D プリンタとして注目されている。これは付加加工の一種であり、大別すると、光造形法、粉末焼結積層造形法、熱溶解積層法、インクジェット法等に分類される<sup>1)</sup>。なかでも熱溶解積層法（FFF：Fused Filament Fabrication）は装置が安価であることから、普及が予想される。

熱溶解積層法はフィラメントと称する熱可塑性樹脂の線材を用いて立体を得る。フィラメントを熔融しながら一層ずつ積層させていくため、成形可能な形状に関する制約が少ない。また、熱可塑性樹脂をフィラメントに調製することができれば、樹脂が有する様々な性質を活用できる。近年、熱溶解積層法において二種類の樹脂を使用可能な 3D プリンタが上梓されており、二種類の樹脂を接合体として出力することも可能になっている。形状の自由度が高く、樹脂の性質を活用できるといった特長を考慮すると、二種類の樹脂を適材適所で用いることにより、有用な接合体を提案できるものと考えられる。

熱可塑性樹脂は種類により様々な特性を有している。なかでもポリプロピレンはヒンジ特性と称する繰り返しの折り曲げが可能であるといった特長を有している。また熱可塑性樹脂は他の材料と複合材料を構成することによって特性を改良することができる。特に炭素繊維を複合させた炭素繊維強化プラスチック（CFRP）は強度と剛性が大きいことから注目されている。これら二種類の樹脂を適材適所で用いることにより、従来よりも有用な構造体を提案できるものと考えられる。

本研究では、二種類の樹脂を使用可能な 3D プリンタを用いた新規接合体の創製を提案する。具体的には、CFRP と難接着性プラスチックであるポリプロピレンからなる接合体を製作する。強度や剛性に優れる CFRP とヒンジ特性に優れるポリプロピレンを使用することにより、昆虫や甲殻類の脚に見られるような外骨格と関節を有する構造体を構成する（図 1）。ポリプロピレンは難接着性プラスチックであり、接着剤を用いた接合は困難であるが、熱溶解積層法を用いて溶着させることにより一体構造となった接合体を実現する。

CFRP とポリプロピレンとの界面には凹凸を設け、積層時における熱溶着によって機械的に接合する方法を検討し、界面部分に有効な凹凸部の寸法を提案する（図 2）。

製作に用いる二種類の樹脂として、上記のように剛性が求められる構造部分に CFRP を用い、ヒンジ特性が求められる関節部分にポリプロピレンを接合することを検討する。接合体の試作を成功させるためには材料選定が重要であり、幅広い材料を選べるようにするために本研究ではフィラメント製造機を導入し、市販の射出成形用ペレットを用いてフィラメントの自作も検討する。

本研究の特色を以下に述べる。まず、CFRP とポリプロピレンの組合せによって構成された一体構造の接合体は、これまでに先行事例はほとんど見られない。CFRP の積層造形は一部で取り組まれている。しかしながら積層造形を用いて構造体の主要部に CFRP を使用しつつ、関節部分にポリプロピレンを使用した事例はこれまでにほとんど見られない。CFRP が有する剛性の高さを利用することにより、外力に対する変形量を低減することが期待できるとともに、関節部分にポリプロピレンを使用することにより、ヒンジ特性を活用することができる。

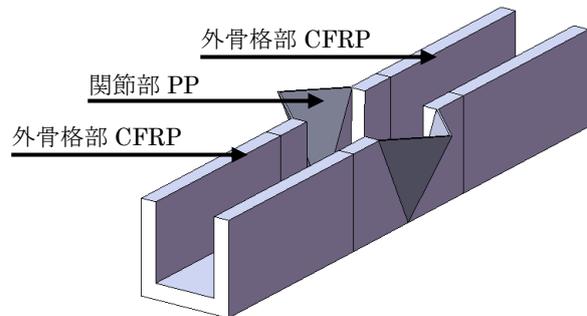


図 1 本研究で提案する構造体

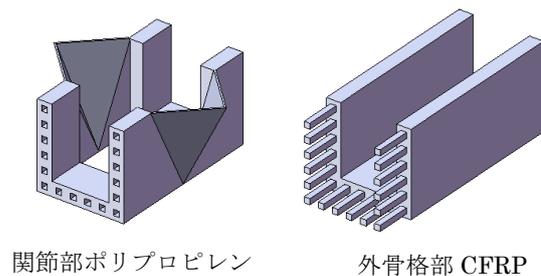


図 2 接合部の詳細

次に、接合方法に積層造形を用いることが特徴である。ポリプロピレンは難接着性のプラスチックであり、接着剤を用いた接合は困難である。積層造形を用いることにより熱溶着による接合方法になるため、CFRP との接合が可能になる。また積層造形を用いることによって一体構造で製作できることから、接合の手間を省くことができ、また接合部の信頼性も向上することが期待できる。積層造形を利用した接合体の先行事例として、武藤工業株式会社による Bi-matrix 複合体がある<sup>2)</sup>。これは、熱溶解積層法を用いて二種類の樹脂を井桁状に積層しながら機械的に接合した板材を作製しようとするものである。本研究では最終的にはロボットの腕や脚にも適用が期待できる梁構造部品を提案する。

加えて、市販の射出成形用ペレットを用いた積層造形用のフィラメントの自作を検討する。3Dプリンタメーカーから供給されるフィラメントでは材料の詳細が分からない面もあることから、フィラメント製造機を導入して市販の射出成形用ペレットから独自のフィラメント作製も試みる。これにより、将来的に幅広い材料選定が可能になることが期待できる。

なお、本研究の構成は以下のとおりである。はじめに、CFRP とポリプロピレンとの界面部分における凹凸部寸法の検討をおこなう。次に、関節部におけるヒンジ部寸法の検討を行う。また、接合部の強度確認を行い、最後にフィラメント自作の検討を行う。

## 2. 実験方法

### 2・1 界面部分における凹凸部寸法の最適化

本接合体における CFRP とポリプロピレンとの界面部分の設計を行った。界面部分は、上記の図2で示した正方形断面を基本とする凹凸形状を設けることとし、界面部分の寸法をパラメータとして有限要素法による構造解析を行って凹凸部における応力を算出し、寸法を導出した。

はじめに、凹凸部の寸法を決定するための設計変数を検討した。正方形断面の幅（板幅方向の長さ）、厚さ（板厚方向の長さ）および奥行（長手方向の長さ）の三項目を設計変数とした。水準については本研究で用いる3Dプリンタのノズル径の倍数になるように調整した。実験計画法を用いて解析結果の応力が低くなる組合せを求めることとし、表1のように水準を設定して表2のようにL<sub>9</sub>直交表に割り付けた。全体の板幅や板厚もノズル径の倍数となるようにそれぞれ4mmおよび24mmとした。

次に、これらの表に基づいて界面部分を抽出したモデルを三次元CADで作成した。作成したモデルの例を図3に示す。表2に基づいて九種類の寸法のモデルを作成した。

引き続き、作製したモデルを用いて有限要素法による構造解析を行った。解析ソフトはANSYS18.2を用いた。表2に示した九種類のモデルに対して、共通の境界条件として、片側端面を固定し、反対側の端面に引張荷重50Nを作用させた（図4）。

表1 因子と水準

因子	水準1	水準2	水準3
A 幅	0.8	1.6	2.4
B 厚さ	0.8	1.6	2.4
C 奥行	5.0	7.5	10.0
D			

※単位は mm, 因子Dは誤差列とする

表2 直交表

実験番号	A 幅	B 厚さ	C 奥行	D
1	0.8	0.8	5	
2	0.8	1.6	7.5	
3	0.8	2.4	10	
4	1.6	0.8	7.5	
5	1.6	1.6	10	
6	1.6	2.4	5	
7	2.4	0.8	10	
8	2.4	1.6	5	
9	2.4	2.4	7.5	

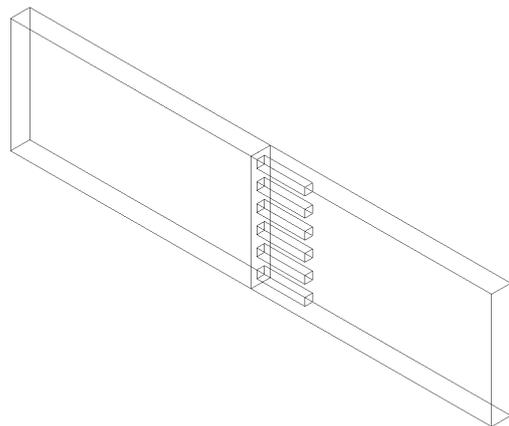


図3 解析モデル

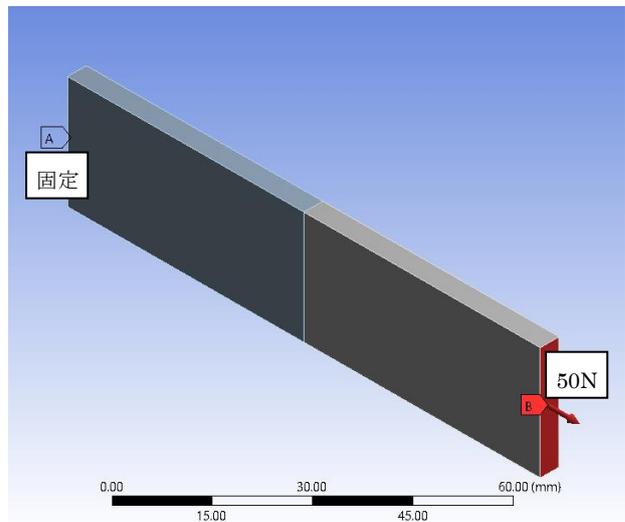


図4 構造解析の境界条件

## 2・2 関節部におけるヒンジ部寸法の検討

関節部におけるヒンジ部寸法の検討を行った。本接合体においては、図2に示すように関節部を薄肉とし、屈曲を可能とするための襷を設けることによってヒンジを構成することを検討する。ヒンジ部分の肉厚をパラメータとして有限要素法による構造解析と3Dプリンタによる試作を行い、適正な肉厚を導出した。

はじめに、関節部の肉厚を決定するための水準を検討した。屈曲を可能とするためには、できる限り薄く作ることが望ましい。しかしながら、本研究では3Dプリンタによる試作を想定していることから造形可能な肉厚はノズルの直径や積層条件の良否に左右される。本研究では3Dプリンタのノズル径と同じ0.4mmと2倍の0.8mmを設定し、比較を行った。

次に、関節部分を抽出し、関節部の肉厚を検討するためのモデルを三次元CADで作成した。作成したモデルの例を図5に示す。

引き続き、作製したモデルを用いて有限要素法による構造解析を行った。解析ソフトはANSYS18.2を用いた。上で述べた二種類のモデルに対して、共通の境界条件として、片側の接合面相当部を固定し(図6)、反対側の接合面相当部に100Nmmのモーメントを作用させた(図7)。

また、薄肉部品における積層造形の可能性を確認するために、上で述べた二種類のモデルを3Dプリンタにより試作した。3Dプリンタとしてニンジャボット製 NJB-300Wを使用した。供試材料は(株)北陸エンジニアプラスチック製ポリプロピレンフィラメント HEP-3DFを用いた。

## 2・3 接合部の強度確認

接合部の検討に用いたモデル形状を3Dプリンタにて積層造形し、試験片を作製して引張試験を行い、接合部の強度を確認した。本研究では熱溶着を行うため、積層条件が強度に及ぼす影響は大きいものと推察される。そこで積層条件が成形品の強度に及ぼす影響について検討を行い、積層条件を変えた試験片の比較を行った。

はじめに、比較する積層条件について検討した。本研究では熱溶解方式の3Dプリンタによる熱溶着を行うことからノズル温度の影響が最も大きいと考えて、ノズル温度を変化させることとした。水準については、低温としてCFRP側ノズルを260℃、ポリプロピレン側ノズルを190℃に設定し、高温としてCFRP側ノズルを270℃、ポリプロピレン側ノズルを200℃に設定した。

次に、2・1節で導出した最良条件の寸法を反映させた三次元CADモデルを作成し、3Dプリンタにて上記二条件による積層造形を行った。供試材料として、CFRPはフィラメント工房(キョーラク株)製PP/カーボンファイバーフィラメントを、ポリプロピレンは(株)北陸エンジニアプラスチック製ポリプロピレンフィラメント HEP-3DFを用いた。試験片は各条件で三個を引張試験に使用した。作製した試験片の一例を図8に示す。

引張試験条件を以下に述べる。引張試験機は(株)東京衡

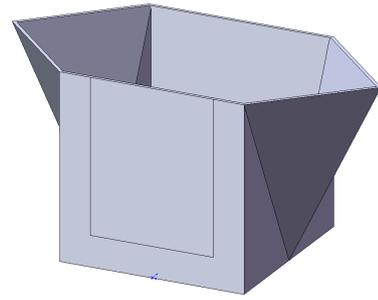


図5 関節部検討用 CAD モデル

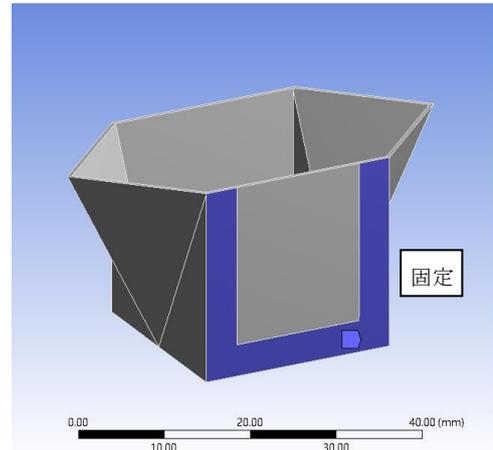


図6 関節部検討用境界条件(1)

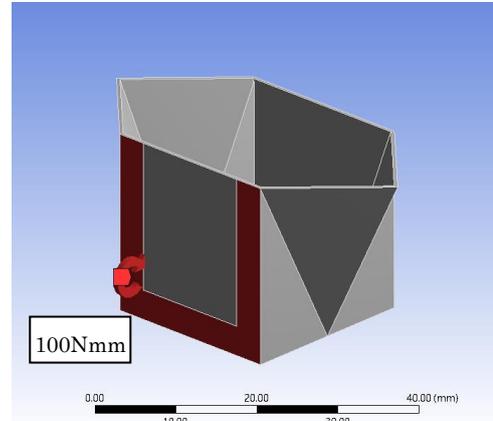


図7 関節部検討用境界条件(2)



図8 引張試験片

機試験機製 LSC-1/30-2 を使用し、試験速度は 5 mm/min とした。

#### 2・4 フィラメント自作の検討

既に述べたように、3Dプリンタメーカーから供給されるフィラメントでは材料の詳細が分からない面もあることから、フィラメント製造機を導入して市販の射出成形用ペレットから独自のフィラメント作製を試みた。

供試材料は射出成形用の CFRP 製ペレット (TORAYCA TLP8148 および TLP8169 (東レ(株) 製) を用いた。母材はポリプロピレンであり、炭素繊維の配合率は TLP8148 が 20%、TLP8169 は 30%となっている。

フィラメント製造機 (Noztek 製 Noztek Touch Standard Dual PID) を用いて CFRP 製のフィラメントを作製した(図 9)。フィラメント作製時に設定する加工条件に関しては、スクリュー回転数とシリンダー温度の二つの因子を選定し、それぞれ二水準設定した(表 3)。

作製後にフィラメントの外観を目視で観察した後、引張試験機 ((株)東京衡機試験機製 LSC-1/30-2) を用いて引張試験を行い、最大荷重を比較した。なお、引張試験速度は 5mm/min とし、試験体は各条件で三本とした。

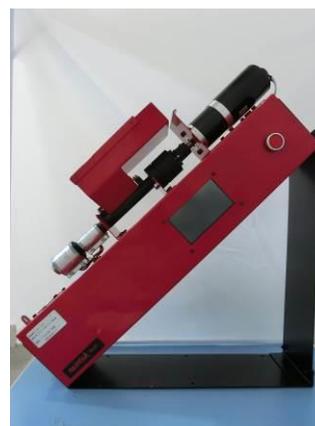


図 9 フィラメント製造機

表 3 フィラメント加工条件

実験番号	A モータ回転数 rpm	B ヒータ温度 °C
1	30	190
2	30	210
3	50	190
4	50	210

### 3. 実験結果と考察

#### 3・1 界面部分における凹凸部寸法の検討

構造解析結果の一例を図 10 に示す。解析の結果から、剛性の低いポリプロピレンの方が収縮するような変形を示すことが示唆された。

要因効果図を図 11 に示す。図において、横軸は因子と水準を示し、縦軸は相当応力の大きさを示している。図より、因子を割り付けずに誤差列とした因子 D における変化よりも因子 B および C における変化の方が大きく、因子 B の厚さと因子 C の奥行が応力に及ぼす影響が大きいことが示唆された。

図 11 より、相当応力を低くすることが期待できる水準の組合せとして、(幅, 厚さ, 奥行) が (1.6, 1.6, 10.0) または (2.4, 1.6, 10.0) のいずれかが示唆された。(1.6, 1.6, 10.0) (以下, 組合せ 1) の条件は表 2 の実験番号 5 番に存在する組合せのため、この条件と (2.4, 1.6, 10.0) (以下, 組合せ 2) の条件で解析結果を比較したところ、図 12 に示す結果となり、組合せ 1 の応力が低かったため、組合せ 1 を最良条件として決定した。

#### 3・2 関節部におけるヒンジ部寸法の検討

肉厚が 0.4mm および 0.8mm の変形量の解析結果を図 13 に示す。図より、肉厚が 0.4mm のモデルについては今回の解析条件でも十分に変形して屈曲することが示唆され、0.8mm のモデルの方が今回の解析条件では変形量が少ないことが示唆された。

二種類のモデルを 3D プリンタにより試作した結果を図 14 に示す。図より両方の肉厚ともに良好に造形でき、薄肉部品の積層造形が本研究で用いた機材でも可能であることが確認できた。

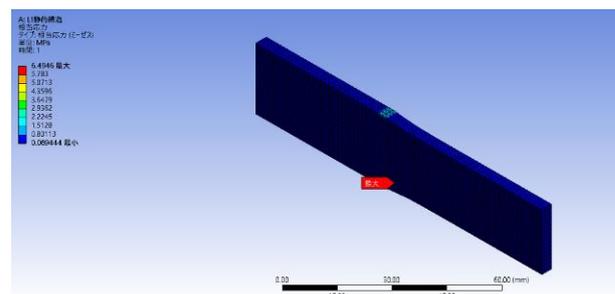


図 10 構造解析結果

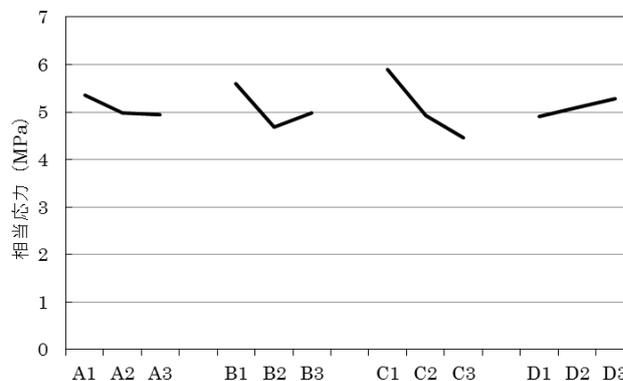


図 11 要因効果図

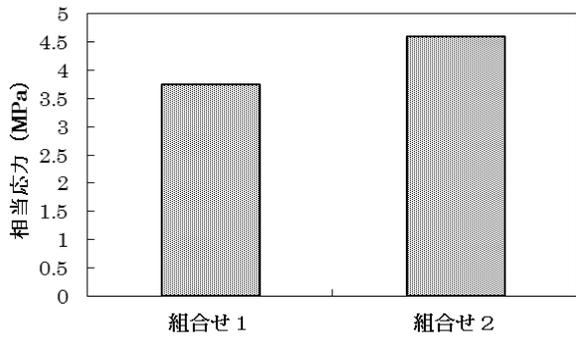
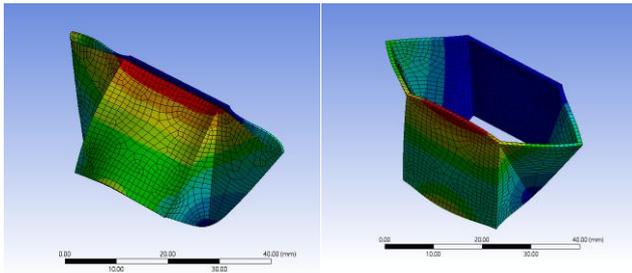


図 1 2 組合せの比較



(a)肉厚 0.4mm

(b)肉厚 0.8mm

図 1 3 ヒンジ部モデルの解析結果



(a)肉厚 0.4mm

(b)肉厚 0.8mm

図 1 4 ヒンジ部モデルの試作結果

これらの結果より、小さな負荷でも十分に変形でき、かつ良好に造形できる 0.4mm を関節部の肉厚として採用することとした。

### 3・3 接合部の強度確認

引張試験後の試験片の一例を図 1 5 に示す。図より、接合部で異種材料が抜けることなく CFRP の部分で破断した。この傾向は今回試験した 6 本すべてで認められた。

また、ノズル温度が低温及び高温で造形した試験片の引張試験結果を図 1 6 に示す。図より、今回の検討範囲では、積層条件による差は認められなかった。

### 3・4 フィラメント自作の検討

試作したフィラメント外観の一例を図 1 7 に示す。外観の状態を詳細に見ると、市販のフィラメントには見られない縮れが局所的に発生しており、滑らかな円形断面の線材にならなかった。最大荷重値を比較したものを図 1 8 に示

す。図より、今回のサンプルではスクリー回転数、シリンダー温度ともに最大荷重に及ぼす明確な傾向が見られなかった。これは、外観に見られた縮れが引張試験に影響を及ぼし、同じ加工条件であっても最大荷重が安定しなかったものと考えられる。炭素繊維の比率が 20% と 30% の両方とも似たような傾向になり、品質が安定しないことから、自作フィラメントを用いた試作はできなかった。

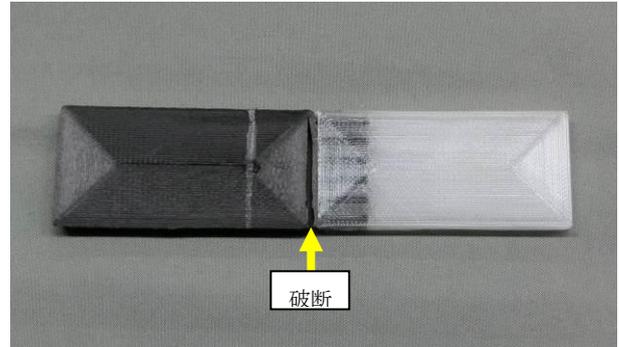


図 1 5 破断後の引張試験片

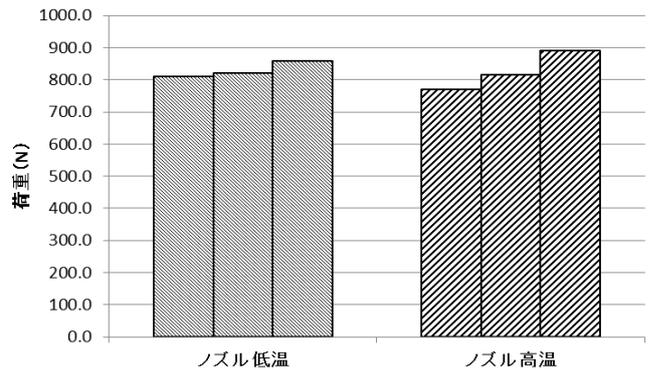


図 1 6 引張試験結果



図 1 7 試作したフィラメントの外観

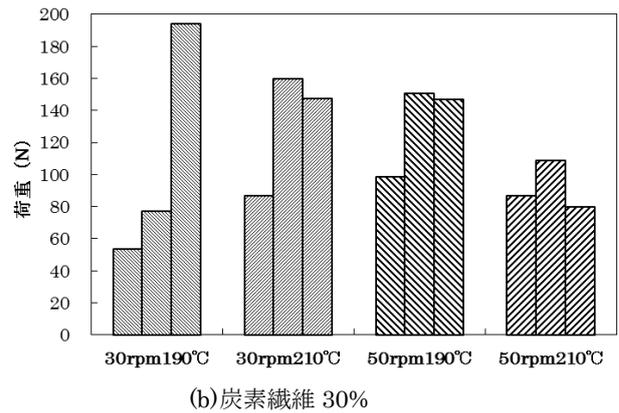
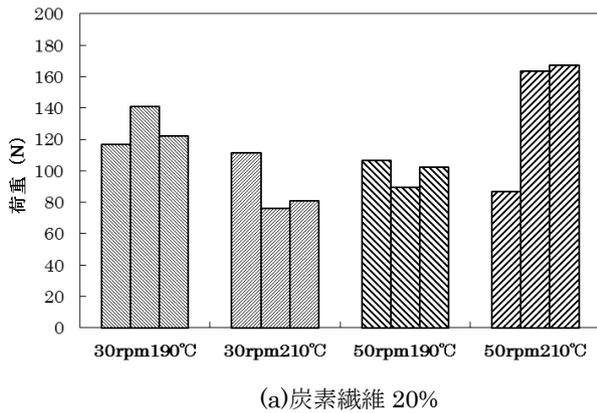


図18 フィラメントの引張試験結果

#### 4. 結言

本研究では、二種類の樹脂を使用可能な3Dプリンタを用いた新規接合体の創製を提案した。具体的には、CFRPとポリプロピレンからなる接合体を製作した。はじめに、CFRPとポリプロピレンとの界面部分における凹凸部寸法の検討を行った。次に、関節部におけるヒンジ部寸法を検討した。また、接合体の強度確認を行い、最後にフィラメントの自作を検討した。

これらより、以下のことが明らかとなった。

- 1) 3Dプリンタを用いた二色成形において、界面部に凹凸を設ける形状を提案し、構造解析と実験計画法の結果から相当応力を低減できる寸法を見出した。
- 2) 接合体の関節部としてポリプロピレンを用い、構造解析と試作の結果から薄肉関節部品の実現性を確認した。
- 3) 接合体の引張試験の結果から、接合部で異種材料が抜けることなくCFRPの部分で破断した。
- 4) 射出成形用ペレットからのフィラメントの試作に関しては、縮れが発生して安定した加工ができなかった。

また、以上の検討結果に基づき、二種類の樹脂を用いた二色成形が可能である3Dプリンタによる積層造形を行ったところ、外骨格と関節を有し、屈曲が可能である構造体を試作することができた(図19)。

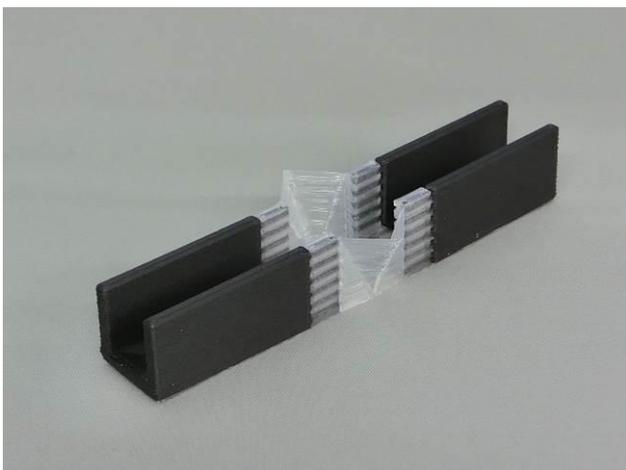
今後の展開としては、今回提案した接合体よりも大きな可動域を実現するための関節部設計の更なる検討や、フィラメントを自作するための加工条件の更なる探究および自作フィラメントを用いた積層造形の検討が考えられる。

#### 謝辞

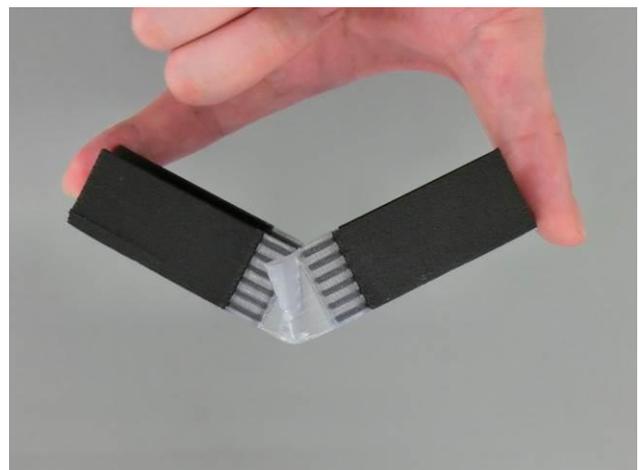
本研究は、公益財団法人天田財団一般研究開発助成により行われたことを付記するとともに、同財団に感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) 新野俊樹：精密工学会誌, 76-12 (2010), 1340.
- 2) <https://www.mutoh.co.jp/3d/mr-5000.html> (最終閲覧日 2019. 2. 4)



(a) 伸展状態 (斜視図)



(b) 屈曲状態 (側面図)

図19 構造体の試作結果