

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 21 日現在

機関番号：82404

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26560319

研究課題名(和文) 三次元造形法による超多品種極少量生産に対応した補装具部品の革新的設計・生産技術

研究課題名(英文) Innovative design and fabrication method of assistive device components using a 3D printer for low-volume high-variety production

研究代表者

硯川 潤 (Suzurikawa, Jun)

国立障害者リハビリテーションセンター(研究所)・研究所 福祉機器開発部・研究室長

研究者番号：50571577

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、近年生産技術としての応用が期待されている3次元積層造形技術を福祉機器部品の製造に適用するための、基礎的な設計手法を提案することを目的とした。積層造形で製作された造形物には、積層方向に依存した異方的な強度特性が存在することが知られており、安全利用の妨げとなっている。そこで、引張・曲げ強度試験により強度特性を系統的に把握し、さらに、既存の表面改質処理が強度特性を部分的に改善する効果を有することを確認した。また、これらの実験的に得られた知見が、実際の義手部品の強度予測に適用可能であることを確認できた。

研究成果の概要(英文)：In this study, we attempted to apply three-dimensional additive manufacturing to production of assistive device components. The anisotropic strength characteristics of the components fabricated by additive manufacturing hamper safety design and use of the 3D-printed products. Then, we systematically investigated strength characteristics of 3D-printer fabricated components dependent on the lamination directions by tensile and flexural testing. The existing surface modification treatments were found to improve tensile and/or flexural strength. The findings experimentally obtained were consistent with the results of the flexural test where a component of an upper-limb prosthesis was tested.

研究分野：福祉工学

キーワード：3Dプリンタ 強度 福祉機器 パラメトリック設計 応力解析 引張試験

1. 研究開始当初の背景

車椅子や義肢など障害者のための補装具に用いられる部品は、品種点数に対して生産量が極めて少ない超多品種極少量生産品の代表的な事例であり、高い設計・生産コストの一因となっている。補装具部品は、対象者の身体・生活状況に応じた適合の方式により、表 1 に示した 4 種類に分類できる。この中でも、選択・調整適合型の部品は、モジュール化されたカタログ販売品であり、在庫抑制などを理由に品種点数が限定される傾向にある。品種の制限は、ロングテールニーズの多くを犠牲にした流通戦略であり、例えば絶対数が少ない小児用補装具などでは、選択・調整のレンジが不足し、適合が十分に達成されない状況に直結している。

表 1 身体への適合方式による補装具部品の分類。

タイプ	適合方式	具体例
完全適合	対象者に合わせて一品製作	義肢ソケット
選択適合	同種異形部品から最適なものを選択	車椅子キャスタ
調整適合	部品自体の調整機能を利用	義足ピラミッドアダプタ
非適合	適合不可	構造部材

このような少ロット製品の製造に適した生産技術として、近年、3次元積層造形法が注目されている。粉体金属や液体樹脂の積層・固化を繰り返すことで、CAD データからの直接造形が可能となり、在庫点数の制約を受けないオンデマンド生産が可能となる。しかし、試作品への応用は盛んに試みられている一方で、上述したような超多品種極少量生産品のための生産技術としての応用はほとんど検討されていない。

2. 研究の目的

以上のような背景から、本研究では 3次元積層造形法を用いて補装具を含む様々な福祉機器の部品を生産するための設計指針を構築することを目指し、以下の課題に取り組んだ。

3次元積層造形法で製作した造形物の強度特性の理解とその改善方法の提案

実際の福祉機器部品を対象とした上記手法の妥当性検証

設計工数を削減するためのパラメトリック設計の試行と実現可能性の確認

3. 研究の方法

3次元積層造形法による造形物を福祉機器に活用するためには、安全に安心して使用できる強度を保証する必要がある。本研究では、その足掛かりとして安価な普及型造形機に広く用いられている FDM (fused deposition modeling, 熱溶解積層法) 式の 3D プリンタで造形した部品の機械的強度特性について

検討した。FDM 式 3D プリンタは、熔融樹脂をノズルからフィラメント状に吐出し、造形ステージ上に造形物の断面を描き、それを高さ方向に積層することで所望の 3次元形状を得る方法を採用している。そのため、フィラメントがつながった断面方向と積層方向とで、機械的強度が異なることが知られている¹⁾。

本研究では、より一般的かつ精密な強度特性を調べるために、FDM 式 3D プリンタで製作した試験片を用いて、引張および曲げ (JIS K7171) 試験から造形条件に依存した特性の違いを評価した。試験には万能材料試験機 (INSTRON MODEL 55R1125) を用い、図 1 に示したような造形時の積層方向の違いで生じる特性差を調べた。造形に用いる材料は ABS 樹脂とした。

また、これらの機械的試験に加えて、有限要素法を用いた解析で応力集中部を設けた試験片の応力分布を評価し、実際の試験結果と比較した。さらに、造形後の表面改質処理として知られているアセトン浸漬処理およびアニール処理が、強度特性に及ぼす影響を調べた。

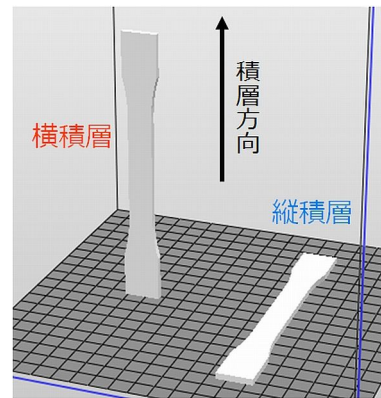


図 1 試験片の積層方向。

4. 研究成果

(1) FDM で製作した試験片の造形条件と強度特性の系統的理解

積層方向に依存した強度特性

図 2 に、縦・横積層の試験片を用いた引張り試験結果を示す。先行研究で得られている結果と同様に、横積層では層間の剥離が原因と考えられる脆性的な破断が見られた。曲げ試験でも同様に、積層方向に依存した特性差が見られた。

曲げ試験では、破断時のたわみが積層方向に依存して約 3 倍、最大荷重が約 1.5 倍異なることがわかり (図 3)、設計・造形時に、強度の異方性を考慮することの重要性が示された。

有限要素法による応力解析結果との比較

円形および菱形の穴を中心部に配置した試験片を対象に、実際の引張り試験結果と有限要素法で得られた応力分布とを比較した。その結果、応力集中係数がより大きい

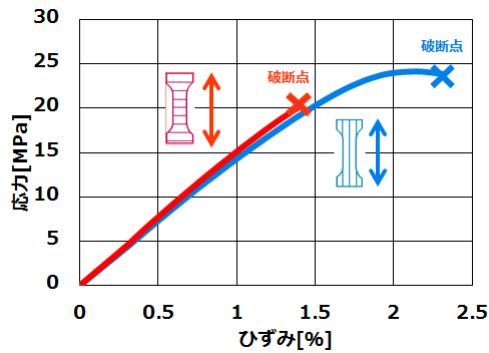


図 2 引張試験結果 .

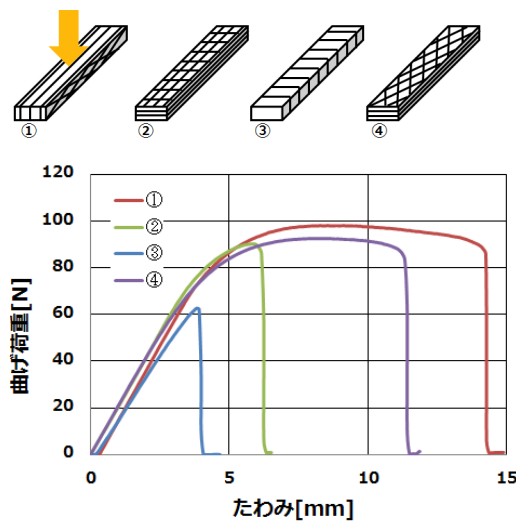


図 3 曲げ試験結果 .

菱形の穴部を有する試験片で強度の低下が観察され、応力解析の結果とよく一致した。一方で、例えば 5 mm 程度と、積層パス描画時に断面形状の輪郭線として形成されるシェル構造の影響を無視できないような薄い肉厚の造形物では、応力解析と実験結果の間に大きな誤差が生じることがわかった。

表面処理の強度特性への影響

造形物のアセトン浸漬・アニール処理が強度特性に与える影響を調べたところ、以下のような知見が得られた。

まず、アセトン浸漬処理では引っ張り強度（最大応力）に最大で 20% 程度の改善が見られた。しかし、フィラメントの内部構造によっては強度の低下が観察される場合もあり、一定の造形密度を有する造形物のみで効果を期待できることが示唆された。

アニール処理では、曲げ試験時の最大たわみ量に改善が見られることがわかった。ただし、改善が見られる試験片は、図 1 に示した縦積層のように長軸方向に積層面が存在しない場合に限られた。

以上の結果より、従来表面改質に用いられてきた処理方法により、強度特性を改善し得ることが示された。ただし、このような効果

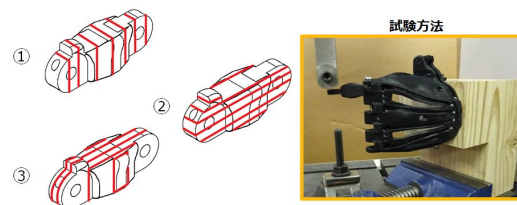


図 4 義手パーツの曲げ試験 . (左：積層方向；右：試験の様子)

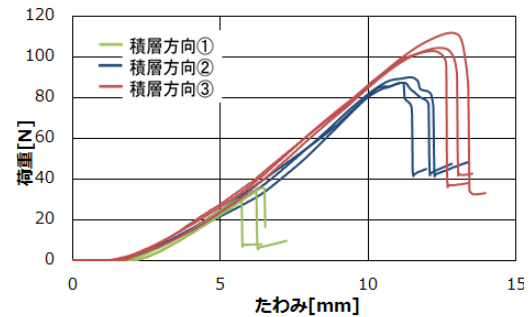


図 5 義手パーツの曲げ試験結果 .

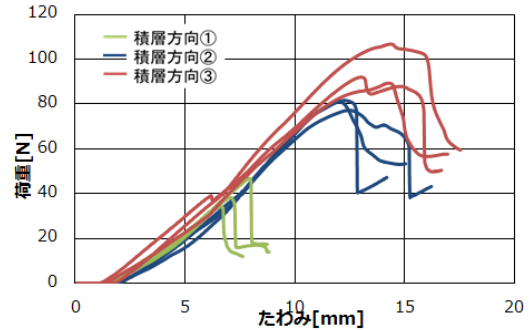


図 6 アセトン浸漬処理後の義手パーツの曲げ試験結果 .

は、積層方向や内部充填率などの造形条件に依存しており、設計時に十分注意して積層方向などを設定する必要がある。

(2) 義手パーツの強度試験と造形条件最適化

上記試験で得られた知見が、実際の部品形状に適用可能であることを確認するために、FDM で造形することを前提に設計・公開されている能動義手のパーツを、JIS T9218-92 に準じた試験法で評価した (図 4)。

その結果、図 5 に示したように積層方向に依存して、最大荷重でおよそ 3 倍、最大たわみ量でおよそ 2 倍程度の強度差が生じることがわかった。積層方向と強度特性の関係は、標準試験片を用いた実験結果とよく一致しており、層間の剥離が強度低下の原因となっていた。

また、図 6 に示したように、アセトン浸漬処理後のパーツ造形物は最大で 20% 程度、破断時のたわみ量が増加した。これは、実用時において破断に至るまでの変形量が増加

することで、安全性が向上する可能性を示唆している。一方で、処理後の造形物強度はばらつきが大きく、処理の再現性を向上させるためのさらなる工程の改良が必要である。

(3) 義肢装具材料との比較

義肢装具分野における FDM 造形物の位置づけを把握することを目的とし、その基本的な力学特性を一般的に使用されている義肢装具材料のプラスチックの特性と比較した。その結果、ナイロンストッキネットなどのラミネーションプラスチックと比較して、FDM で造形した ABS 試験片は、破断に至る応力は大きく変わらないものの、ひずみが小さく、脆性的なふるまいを見せる点で大きく異なる特性を有していた。例えば、ナイロンストッキネット(10枚積層)では、引張強度が 25 MPa であったのに対し、ABS の 3 次元積層試験片の強度は 34 MPa だった。一方で破断時のひずみは、前者が 20%以上、後者が 5%以下と、4 倍以上の開きがあった。従って、FDM による造形物は、例えば義足カバーのような荷重のかからない部材としての試用は許容範囲であるが、耐荷重性を必要とする部材への適用時には十分な強度設計が必要である。

(4) 部品構造の自動生成手法の構築

3D プリンタの臨床的応用を進めるためには、所望の造形データを簡易に得るための、専門知識を要さない設計手法の検討が重要である。そこで、造形物の設計パラメータを簡易に変更して造形データを得られる自動設計手法を提案・構築した。食事動作のリハビリテーションに用いられる福祉用具を対象に、パラメータ間の干渉などを確認する機能を実装し、専門的な知識が無くても臨床現場で容易に形状をカスタマイズできるシステムを構築できた。

<引用文献>

Fodran, E., Koch, M., & Menon, U. (1996, August). Mechanical and dimensional characteristics of fused deposition modeling build styles. In Solid Freeform Fabrication Proc (pp. 419-442).

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計7件)

硯川潤，“3Dプリンタと支援機器～個人利用から生産技術まで～”，障害者自立支援機器シーズ・ニーズマッチング交流会，東京，2015年3月6日。

中村隆，“3Dプリンタの義肢装具への応用可能性”，障害者自立支援機器シーズ・ニーズマッチング交流会，東京，2015年3月6日。

高嶋淳，“デジタル生産技術：DDMで広がる超ユニバーサルデザイン”，障害者自立

支援機器シーズ・ニーズマッチング交流会，東京，2015年3月6日。

庄司瞳，高嶋淳，相川孝訓，中村隆，手嶋吉法，井上剛伸，硯川潤，“補装具部材製作を目指した熱溶解積層法 3D プリンタによる造形物の力学特性評価.”，第 30 回リハビリ工学カンファレンス，那覇，2015 年 11 月 14 日。

高嶋淳，庄司瞳，相川孝訓，中村隆，手嶋吉法，井上剛伸，硯川潤，“3D プリンタ時代における福祉機器のパラメトリック設計の検討.”，第 16 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会，名古屋，2015 年 12 月 15 日。

高嶋淳，庄司瞳，相川孝訓，中村隆，手嶋吉法，井上剛伸，硯川潤，“福祉機器のための熱溶解積層法 3D プリンタによる造形物の評価手法の検討.”，第 30 回リハビリ工学カンファレンス，那覇，2015 年 11 月 14 日。

中村隆，庄司瞳，相川孝訓，高嶋淳，手嶋吉法，井上剛伸，硯川潤，“熱溶解積層法 3D プリンタによる造形物の力学的特性：義肢装具材料との比較.”，第 23 回日本義肢装具士協会学術大会，神戸，2016 年 7 月 16 日。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

硯川 潤 (SUZURIKAWA, Jun)

国立障害者リハビリテーションセンター(研究所)・研究所福祉機器開発部・研究室長

研究者番号：50571577

(2) 研究分担者

井上 剛伸 (INOUE, Takenobu)

国立障害者リハビリテーションセンター(研究所)・研究所福祉機器開発部・研究部長

研究者番号：40360680

中村 隆 (NAKAMURA, Takashi)

国立障害者リハビリテーションセンター(研究所)・研究所義肢装具技術研究部・主任義肢装具士

研究者番号：40415360

高嶋 淳 (TAKASHIMA, Atsushi)

国立障害者リハビリテーションセンター(研究所)・研究所福祉機器開発部・研究員

研究者番号：90711284