

リサイクル可能なフットウェアのための 3D プリント設計と組立方法の検討

Proposals of design and assembly methods for recyclable 3D-printed footwear

増田 恒夫¹, 浅野 義弘¹, 宮田 知起², 奥野 雅大³, 益山 詠夢¹, 田中 浩也¹
Tsuneo Masuda¹, Yoshihiro Asano¹, Tomoki Miyata², Masahiro Okuno³, Emu Masuyama¹, Hiroya Tanaka¹

¹慶應義塾大学, ²株式会社 ORPHE, ³ラピセラ株式会社

¹Keio University, ²ORPHE Inc., ³Rapithela Corporation

【要約】

これまでのフットウェアプロダクトは、さまざまな素材で多種類のパーツ群を縫製、及び接着剤を使用して組立てられ、マテリアルリサイクルを顧慮した環境配慮設計がなされていなかった。今回制作した3D プリントフットウェアは、われわれが「プロダクトの再錬成」と呼ぶ、部品の構成を全体的に再検討する工程を通じて単一の材料化(モノマテリアル)を実現し、組立に超音波溶着を使用することにより、使われなくなったときにも粉碎してマテリアルリサイクルができるプロダクトとした。本研究では、その一連の工夫と過程を紹介し、実際にリサイクルして再プリントする実験の結果も報告する。これにより今後、3D プリンタと環境配慮型設計が高次に結びつくことによって、資源循環型社会を実現する一助となる可能性を議論する。

キーワード: 3D, FGF, リサイクル, フットウェア, 超音波溶着, モノマテリアル

【Abstract】

Until now, footwear products have been assembled by sewing and gluing many different parts made of various materials, and have not been designed in an environmentally friendly way that takes material recycling into consideration. The 3D printed footwear we created this time is made of a single material (monomaterial) through a process we call "product refinement," in which the entire composition of the parts is reexamined, and by using ultrasonic welding for assembly, the product can be crushed and recycled when it is no longer used. The product can be crushed and recycled when it is no longer used. In this study, we will introduce the series of innovations and processes, and also report the results of the actual recycling and reprinting experiments. In this way, we discuss the possibility that the 3D printer and eco-friendly design will be linked in a higher order in the future, thereby helping to realize a resource-recycling society.

Keywords: 3D, FGF, recycle, footwear, ultrasonic welding, mono material

1. 序論

3D プリント技術の向上により、世界中のシューズメーカーによって3D プリントシューズ⁽¹⁾ は開発・販売されているが、製造方法は光硬化型(SLA 方式・DLS 方式)、あるいは粉末造形(SLS 方式)、組立方法は従来の接着・縫製プロセスが採用されており、マテリアルリサイクルは難しい。

筆者達は、2020 年に発表した VCAM⁽²⁾ と題したコンセプト映像で 1 部品・単一材料の環境配慮型設計採用のフットウェアを制作したが、フィット性が低く、長期の歩行に適していなかった。本研究では、モノ・データ・マテリアルの循環モデル実験を行いながら、より価値の高いプロダクトと資源循環型社会の実現性についての可能性を考察する。尚、熱可塑性樹脂ペレットを押し出して造形するペレット式3D プリンタのことを本論文では、最近の海外での呼び名に揃えて、FGF(fused granular fabrication)と呼ぶ。

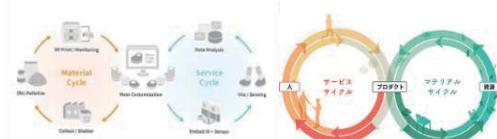


図 1. VCAM の循環モデル

2. コンセプト

本フットウェアの目的は、歩容センサモジュール(ORPHE CORE, ORPHE 社製)を内蔵し、日常と非日常(災害等)のシーンで歩行、かつ有用なデータを取得・解析することである。通常歩行時の快適性に加えて、非日常(災害等)時にも使用できるように、靴底の厚みや、しゃがんで紐を結ばなくてもすぐに履け、かつ長距離歩いても脱げないフィット性、マテリアルリサイクル等の環境配慮設計、個別化対応設計が要求されている。それらの要求を満足させるべく、フットウェア機能を分解し、再度機能別に組み立てる「プロダクト再錬成」を通じて、通常 50 から 100 点⁽³⁾ で構成される部品を 6 点に削減し、モノマテリアルと接着剤・縫製を使用しない組立手順を構築し、3D スキャナーで足部データ取得し個人に合わせた設計を進め、ユーザー好みの色で製造する3D プリンタを使用し、フェイズフリー フットウェアを制作する。

尚、本フットウェアは「データウォーク@かまくら」⁽⁴⁾ の 10 名の参加者を対象に設計・制作されたものである。

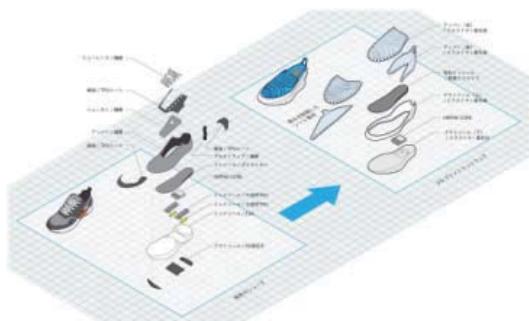


図 2. プロダクト再錬成による部品削減

3. 計測・設計工程

① 3D スキャンによる足部計測

3D スキャン装置は Raspberry pi 3b+:32set, USB Camera:124set, Projector:4set, Hub 3set で構成され, Metashape⁽⁵⁾ を使用して 124 枚の静止画像から足部の 3D モデルを制作し.stl ファイル出力した.

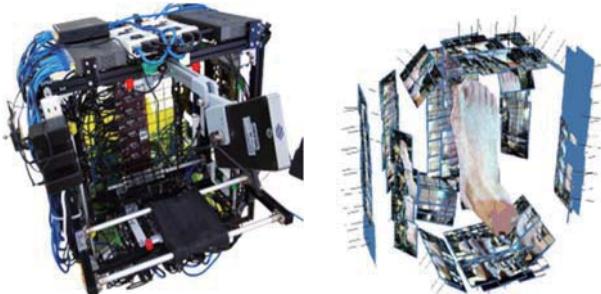


図 3. 3D スキャン装置とスキャンデータ

② フットウェアを部品分解

足部 stl ファイルから,3D モデラー (Rhinoceros) を使用してデジタル木型制作し, 靴設計の専門家の知見をとりいれて最適なセンサ位置, アッパー形状, アウトソール形状を制作後に各部品に分解し,stl ファイルで出力した. インソールについては, 4DFF2020 で発表⁽⁶⁾, その後に上市されたラビセラ社製 eLabo インソール 101 を使用した.



図 4. フットウェア 3D モデルと部品分解

4. 製作工程

① 材料

複数のエラストマにて評価試験を実施し、屈曲疲労性と耐磨耗性に優れた XPA-9040X1⁽⁶⁾ を採用した.

② 3D プリント

熱可塑性樹脂ペレットを押し出して造形する FGF

式 3D プリント GEM5500D⁽⁷⁾ を使用した.(ノズル径 1 mm, スライスピッチ 0.5mm, スライサー Cura4.6.1)

江口⁽⁸⁾らは、同じメーカー製 FGF 式大型 3D プリントでエラストマペレットを平面上に 3D プリント、接着し、バルーン形状の造形物を制作している.

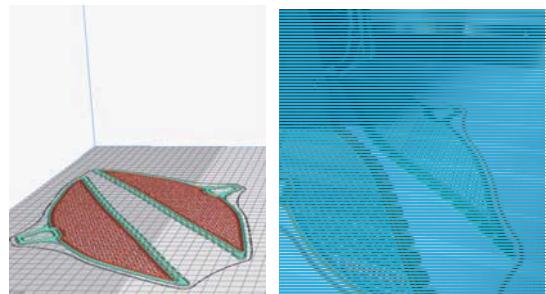


図 5. スライスデータと 3D プリント

③ 超音波溶着機⁽⁹⁾

超音波溶着の一般的な接合部の形状は、エネルギーダイレクトと呼ばれる突起部が溶融して溶着する。しかし、エラストマのように柔らかい材料の溶着には適していない。図 6. と 7. は、2mm の異なる色の板材 (XPA-9040X1) を 2ヶ所超音波溶着し、引張試験を行った結果である。溶着断面を比較すると、スポット型ホーンを使用した溶着断面は、樹脂にホーン先端部が食い込んだ後に溶融樹脂が周囲まで広がり広範囲に溶着していることがわかる。試験結果より、本プロジェクトではスポット型⁽¹⁰⁾ ホーンを使用する。



図 6. スポット型ホーンとフラット型ホーンと溶着断面

ホーン Type	最大引張荷重(N)
スポット	306.4
フラット	161.86

図 7. ホーン別の溶着部破断試験比較(単位 N)

④ 溶着部引張強度試験

予備試験として $150 \times 25 \times 2\text{mm}$ 板形状の方向を変えて 3 種類プリントし、引張強度試験を実施した。【積層方向に平行】と【直線クロス】は 400% 以上伸びても破壊しないが、【積層方向に垂直】は最大引張荷重 318N (120% 伸長時) で破断した。

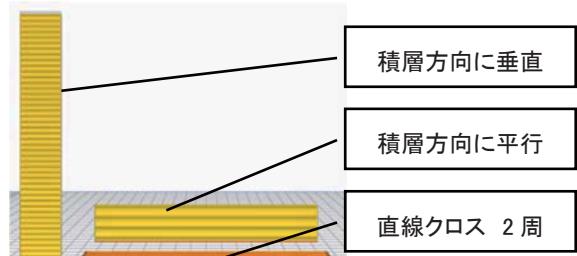


図 8. プリント方向を示す、引張試験は長手方向

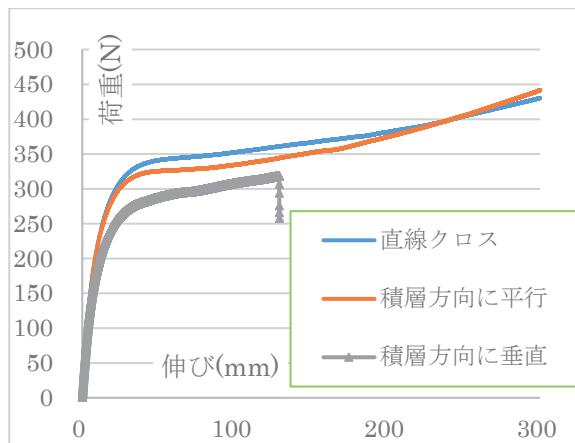


図 9. 引張強度試験(サンプル数 5)

溶着部破断強度試験はスポット型ホーン 2ヶ所、出力 25W で実施、溶着部破断強度試験の最大引張荷重 346.2N(64%伸長時)が、【積層方向に垂直】の最大引張荷重 318N より大きい結果が得られた。超音波溶着機による XPA-9040X1 の溶着は使用可能である。

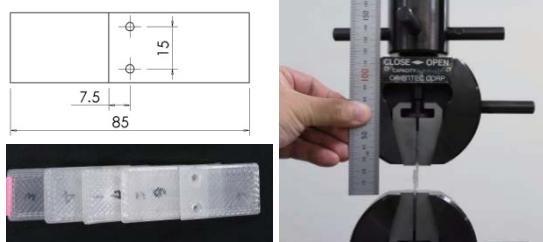
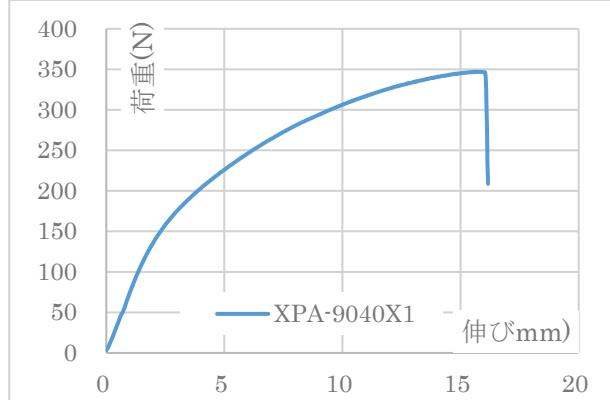
図 10. 試験片と引張試験器⁽¹¹⁾

図 11. 溶着部破断強度試験

溶着位置を明確化と溶融した樹脂の高さ方向へのはみ出しを減少させることを目的として、溶着部にスリットを設ける実験を行った。はみ出しが減少し、仕上げ加工も不要となった。



図 12. スリットの効果(溶着前と溶着後)

⑤ カラー化

XPA-9040X1 ペレットは透明、カラー化のために PP のマスターバッジを最大 5% (重量) 加えてカラー化した。マスターバッジの重量はレイヤー毎の樹脂量

をスライサーで算出しきめた。手作業で 3D プリンタのホッパー部に投入したが、色の応答性は鈍いため、改良が必要である。



図 13. ペレットとカラー化したプリント品

⑥ 仕上げ工程

ショットブラスト処理を加えることで、サンダルのような安っぽさが消え、高級感を出すことができた。

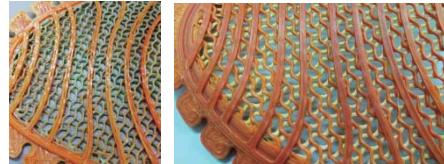


図 14. ショットブラスト前とショットブラスト後比較



図 15. 完成したフットウェア

5. リサイクルペレットの製造

不要になった試作品、実際に 3ヶ月使用したフットウェアを洗浄・分解・破碎して 5.8kg の樹脂ペレットを製造した。異なる色の破碎品を連続して押し出す際に色が多少混ざるが、リサイクルペレットの外観上は問題無い。洗浄工程でどこまで汚れと臭いを除去するかが、リサイクルペレットを使用する制作品の品質に影響することが課題となる。

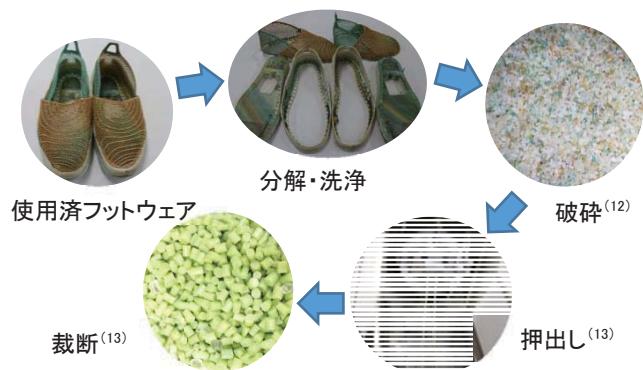


図 16. リサイクルペレット製造フロー

6. リサイクルペレットの品質評価

Helen⁽¹⁴⁾ が PET ボトル破碎、FGF 式 3D プリンタで試験片制作、引張強度試験により、リサイクルペレットの品質評価している。

品質評価試験項目として引張強度試験に加え MFR 測定、超音波溶着部破断試験を実施した。使用したフットウェアは、実使用期間が 3ヶ月と短かったためか、大きな強度の劣化は見られなかった。

材料	MFR	測定温度
XPA-9040X1	22.073	190°C
XPA-9040X1+青顔料	13.999	170°C
+PP 青黄 リペレット	11.806	170°C
+PP 青黄使用後リペレット	11.346	170°C

図 17. MFR(g/10min)の変化

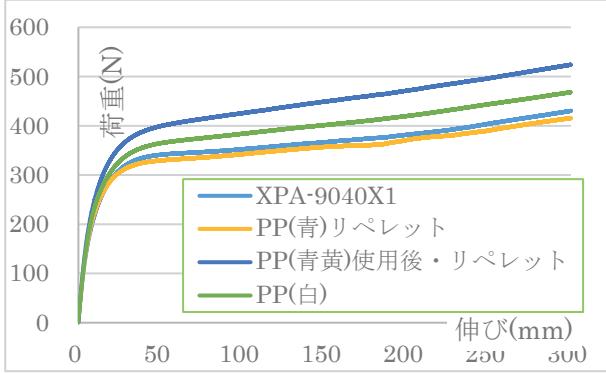


図 18. 引張強度試験比較

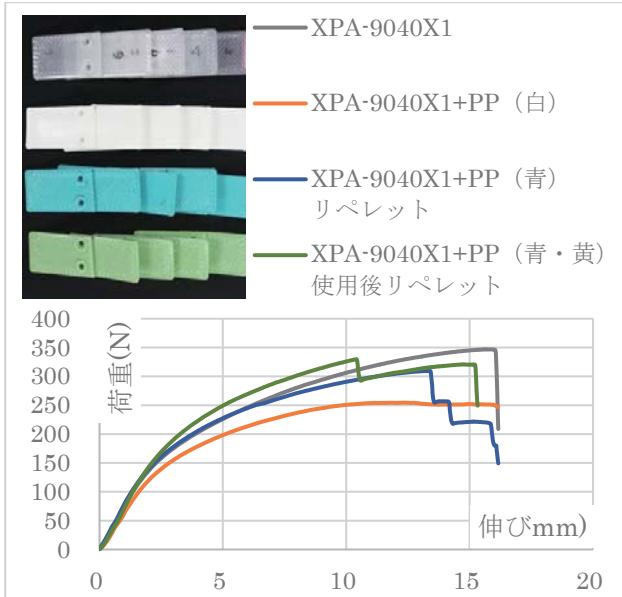


図 19. 超音波溶着部破断試験(25W)

9. リサイクルマテリアルを使用した制作品

リサイクルマテリアルを使用する制作品は、使用目的に合わせて新規材料の混合比率を決定し、その配合を記録する。センサーデータを活用し、より最適化を進めた同種のフットウェアを制作する場合は、新規材料のみで制作することが望ましいが、再生材のみで異種のフットウェアを制作する選択肢も考慮する必要がある。

10. 結論

フットウェアプロダクト再錬成を通じ、使用目的を決定し、身体計測から材料リペレットまでの工程を 1 サイクル回すことで、予想以上の効果と新たな課題を得ることができた。超音波溶着機は、3D プリンタの適用範囲を広げ、環境配慮設計を進めるための有用な機材である。

また、リサイクルペレットの品質評価方法として MFR 測定・引張強度・超音波溶着部破断試験を実施したが、データ不足で試験方法として適しているかの判断はで

きなかった。今後は事例を増やし、使用期間の長期化、サイクルを回し、促進耐候性試験を取り入れながら試験を続けていく必要がある。

課題は洗浄工程、今回はブラシで手洗いしたが、洗浄効果は低かった。大型の洗濯・乾燥機を用意し、自動化作業にすべきである。

本プロジェクトを通じて、3D プリンタと環境配慮型設計を結びつけ、1 サイクル回す実験より、その有効性は確認できたが、より高次な連携資源循環型社会を実現するには再制作品の適用範囲が圧倒的に不足している。リサイクル材料の最終使用品を想定し、新規材料の配合比率を決め、材料の履歴管理を進めながら再制作品を増やしていくため、さらなる実験が必要となる。

11. 謝辞

本研究は、JST-COI「感性とデジタル製造を直結し、生活者の創造性を拡張するアブ地球社会創造拠点(JPMJCE1314)」の支援を受けたものである。

参考文献

1. ADIDAS 4d-shoes
<https://www.adidas.com/us/4d-shoes>
2. 2020 慶應義塾大学 COI アブ地球社会創造拠点 Value—generating Circular Additive Manufacturing 「スマート都市のための 3D プリンティング」
3. 西脇 剛史(アシックス)、2009、「線維と工業」65 号、No.5「スポーツシューズの要求機能と使用素材」
4. ～歩いて「私」と「まち」を知り、データで紡ぐみんなの鎌倉～
<https://www.city.kamakura.kanagawa.jp/smartercity/event.html>
5. Agisoft 社製 photogrammetry
6. 上田雄一(JSR、ラピセラ)、4DFF2020、3D デジタル装具の社会実装に向けて
7. 赤川佳史(宇部興産)、2010、「プラスチックエージ」56 号 7P、エラストマー、その最新技術と応用展開 ポリアミドエラストマー(UBESTA XPA)
8. エス.ラボ社製 FGF 式 3D プリンタ GEM5500D
9. Soya Eguchi ,Morphing Design for Socially interactive Autonomous Car by Multi Material 3D-Printing, CHI 2019 Posters, Glasgow, UK
10. 精電舎製超音波溶着機 Sonopet 446D/G(39MHz)
11. 金子誠司、「初歩から学ぶプラスチック接合技術」,89P,2005,工業調査会
12. ホーライ社製 破碎機 V-360
13. 田辺プラスチック機械社製 V40-NS II 型リペレット装置
14. Helen A. Little, MDPI materials, 2020, Towards Distributed Recycling with Additive manufacturing of PET Flake Feedstocks