

2020 年度 学士論文

3D プリントサンダルを通じた オープンデザインの実践

慶應義塾大学 環境情報学部

田中浩也研究室

森 瑞貴

論文要旨

近年、3D プリンタを用いたシューズづくりが活発である。これまで靴産業において3D プリンティング技術は主に試作品づくりや実用化を目的としていないコンセプトシューズの開発などに用いられることが多かった。他方、研究目的のものに加えて、3D プリントシューズを最終製品として販売している企業も多く、その存在が広まりつつある。しかし、多くの3D プリントシューズは値段が高かったり、個数を限定して生産されていたりと、簡単に入手できないのが現状である。そのため、3D プリントシューズを身近な存在として捉えるのにはまだ早い。

本研究では、生活の中で実用される前提の3D プリントシューズを、個人の環境で製作できるように家庭用3D プリンタ1台で製造が可能なものに設計し、そのデータをオープンソース化することでより多くの人にその存在を広めることを目的とする。また、3D プリントシューズづくりを通して、新しいものづくりのかたちや豊かさなど、オープンデザインの思想を参加者と共有する。

キーワード：

オープンデザイン、3D プリンティング、3D プリントシューズ、3D プリントサンダル、靴づくり、デジタルファブリケーション

Abstract

Additive manufacturing (AM), also known as 3D printing, has been used for prototyping in the footwear industry, a process where footwear professionals test their shoes before making their final product. In recent years, however, 3D printing technology has improved and become more cost-efficient for the production of end-use products. Yet most 3D printed shoes are either prototypes or rare limited editions, thus making them remain an uncommon product for most people.

This research aims to spread 3D printed shoes as something less unusual and more practical for daily use, through open-source designs and user participation in its actual shoe making process. Data such as 3D models, blueprints, design logs, and instructions on how to assemble are uploaded online to the public, allowing anyone with internet access get involved in this open design project. In addition, this project's collaborative multidisciplinary approach engages designers and engineers worldwide, to open up new possibilities and potentials for design in various fields.

Keywords:

Open design, 3D printing, 3D printed shoes, 3D printed sandals, shoemaking, digital fabrication

目次

論文要旨

Abstract

1. はじめに

- 1-1. 研究背景
- 1-2. オープンソース
- 1-3. オープンデザイン

2. 関連事例

3. 本研究に至るまで

- 3-1. 4D Printed Footwear の提案
- 3-2. Foldable Shoes
- 3-3. 新たな課題
- 3-4. ほぼ全てが 3D プリンタでつくれるサンダル

4. 製作物 **xCloud Sandals**

- 4-1. 概要
- 4-2. 使用した素材・機材・スライサーソフトについて
 - 4-2-1. 使用素材 -TPU-
 - 4-2-2. 使用機材 -TPU の出力ができる FFF 方式 3D プリンタ-
 - 4-2-3. 使用したスライサーソフト
- 4-3. スライサーソフトを駆使した設計
 - 4-3-1. インフィルによるクッション性の再現
 - 4-3-2. インフィルを用いたテキスタイルの作成
 - 4-3-3. 密実なものの設計
- 4-4. 製作過程
 - 4-4-1. Version 1.0
 - 4-4-2. Version 2.0
 - 4-4-3. Version 3.0
 - 4-4-4. Version 3.5

5. オープンデザインの実践

- 5-1. 公開の準備
 - 5-1-1. データのファイル形式

- 5-1-2. 用意したデータ
- 5-2. Fabble への投稿
- 5-3. 公開後の反応
- 5-4. ユーザーテスト
 - 5-4-1. 他のユーザーによる製作物
 - 5-4-2. アンケート結果・分析
 - 5-4-3. 考察・展望
- 5-5. 派生プロジェクト「テクストラクチャによる多様な踏み心地の探究」
 - 5-5-1. 概要
 - 5-5-2. テクストラクチャ
 - 5-5-3. 製作
 - 5-5-4. 「踏み心地」の実験評価と結果
 - 5-5-5. 展望

6. おわりに

謝辞

研究関連リンク

活動記録

参考文献

画像引用

1. はじめに

1-1. 研究背景

2010年以降、3Dプリンタは広く普及した。熱溶解積層（以下 FFF）方式をはじめとする、デスクトップ 3D プリンタが低価格化したことで 3D プリンタは広く普及し、企業や研究施設だけでなく個人で使用する者が増えた。その技術は様々な分野に応用され、3D プリンタメーカー独自の技術開発により、造形技術の向上や素材の多様化が進んでいる。特にフットウェアの分野では 3D プリンティング技術の導入が活発に行われている。

これまで靴産業における 3D プリンティング技術は、主にプロトタイピングや実用化を目的としていないコンセプトシューズの開発などに用いられることが多かった。従来の製造方法で必要だった型を使わないため、製造コストが削減でき、試作 1 つにかかる手間と時間も短縮し、効率よく製造ができるというメリットがある。3D プリンティングはプロトタイピングにおいては活躍していた一方、造形速度が遅く一度に製造できる製品の数が限られていたり、製品化できるほど精度が良くなかったりなど、量産には向かなかつたため、最終製品には用いられないことが多かった。

しかし、ここ数年靴産業では、プロトタイプではなくプロダクトを製造するために 3D プリンタを使用し、3D プリントシューズを最終製品として販売する企業が増えた [Fig.1-1]。高速かつ高精度で造形できる 3D プリンタや、新しい 3D プリンタ用のマテリアルなどが開発され、3D プリントシューズの量産は実現した。さらに、3D プリンタでしか造形できない形状と新しいマテリアルを組み合わせることによって、従来の製法ではつくれなかったハイパフォーマンスの靴が作れるようになった。このように、3D プリンティングは靴との相性が良く、3D プリンティング技術の進化に伴って、最終製品としての 3D プリントシューズをリリースすることが実現した。



[Fig.1-1] adidas がリリースした 3D プリントシューズ『Futurecraft 4D』(2015)

3D プリントシューズは、商品として販売され認知され始めている一方、高価なものや数量限定で生産されたものが多く、「身近な存在」として捉える段階にはまだ到達しておらず、どこか遠い存在であるのが現状である。

本研究では、日常生活で実際に履ける 3D プリントシューズを、個人の環境での製作に対応できるように家庭用 3D プリンタ 1 台で製作が完結する 3D プリントシューズを設計し、そのデータやつくり方をオープンソース化することで、より多くの人にその存在を広める。また、このプロジェクトを通して、新しいものづくりのかたちや豊かさなど、オープンデザインの思想を、参加者と共有する。

1-2. オープンソース

オープンソースとは、一般に公開され、誰もがその中身を自由に利用、複製、修正、再配布できるソースコードのことを指し、オープンソースとして公開されたものはインターネットなどを通じて簡単に入手することができる。オープンソースは特にソフトウェアの分野が活発であり、世に広く知れ渡っている例として「GitHub (ギットハブ)」や「VOCALOID (ボーカロイド、ボカロ)」が挙げられる。

GitHub は、ソフトウェア開発のプラットフォームである。GitHub 上でエンジニアそれぞれがプログラムを公開し、それを他の人が利用したり改良したりする。また、改良されたソースコードを GitHub に公開することで再び誰かが「利用、改良、配布」し、循環が生まれる。GitHub には 1 億以上ものプロジェクト (リポジトリ) と 4000 万人以上 (2019 年時点) の登録ユーザーが存在し、ソフトウェア開発においてオープンソースの文化を根付かせ、大きなコミュニティを形成した。

VOCALOID は、ヤマハ株式会社が開発した音声合成技術、及び、その応用ソフトウェアである。メロディーと歌詞を入力することで、本物の歌手の歌声を収録したデータをもとに歌声を合成できる。VOCALOID により、実際に人間の歌声を録音せずにパソコンだけで人間らしい歌声を制作することが可能であり、これを伴奏に合わせることで、楽曲制作が可能。VOCALOID で制作された楽曲は、制作者がニコニコ動画や YouTube などの動画投稿サイトにアップロードすることで楽曲のリリースが発表され、「ボカロ曲」という新たな音楽ジャンルが確立し、それに携わる者たちの新たな文化が生まれた。



[Fig.1-2] VOCALOID

今まではソースコードや設計図などのソースに価値を見出し、ソースそのものを販売して利益を得ることが主であった。しかし、取り上げた2つの例のように、そのソースをあえてオープンにすることで様々な人がそれらを利用し、そこに新たなコミュニティが生まれる。

1-3. オープンデザイン

ものづくりの分野でもオープンソース化の文化は深く浸透している。例えば、ものづくりユニット KULUSKA (クルスカ) による「旅するオープンデザイン」では、本革とレーザーカッターなどで作れるスリッパ[Fig.1-3]のデータを公開したことで、それらが世界中の FabLab でつくられるようになった。国内でもスリッパづくりを体験できるワークショップを開催し、スリッパづくりの体験を通して参加者にオープンデザインの思想を広めた。



[Fig.1-3] KULUSKA 「旅するオープンデザイン」

現代では、多種多様なものが量産され、必要となれば多くの選択肢から好きなものを選び、お金を出して購入すれば手に入るという非常に便利な時代になった。技術の発展と引き換えに、自分たちでつくる必要がなくなったのである。オープンデザインは完成されたものに価値を見出すのではなく、現代で奪われた多くの「自分でものをつくる」体験に価値を見出す。他の人と一緒につくったり知恵を共有し合ったりすることで、1つのアイデアが

色や形を変え新しいものに生まれ変わっていく。こうしてオープンデザインは、体験を通して一人一人の頭の中にあるアイデアを形にすることをサポートする。デザインそのものが磨かれる他、つくり手の間には共通の「言語」が生まれる。共通の「言語」を持った人たちはつながり、やがて新たなものづくりの場を築く。オープンデザインはお金だけではないという価値観や、参加と共創によって生まれる新しいものづくりの楽しさや人と人の輪を広げる役割がある。

2. 関連事例

本章では、世に出ている様々な3Dプリントシューズについて調査し、それぞれの特徴、製造方法（出力方式）、使用されている素材、価格、レアリティなどを比較する。

A. adidas

A-1. Futurecraft 4D (2015) [2]



[Fig.2-1-1] Futurecraft 4D



[Fig.2-1-2] 使用されたラティス構造



[Fig.2-1-3] 造形されている様子

Futurecraft 4D は、adidas がリリースした3Dプリントシューズであり、アスリーターのパフォーマンスの向上を目的としている。アメリカの3DプリンタメーカーCarbonと提携し、Carbonが開発した酸素透過性光学液体樹脂「EPU 40 [3]」という、弾性・耐衝撃性・伸縮性に優れたポリウレタンエラストマー素材を使用している。ラティス構造を用いることで、クッション性、安定性、耐久性に優れたミッドソールを開発した。また、Carbonが開発した技術「Digital Light Synthesis™（以下DLS™） [4]」を使用しており、従来の光造形（以下SLA）方式による3Dプリンティングの25~100倍の高速化と高精度化を実現した高速3Dプリント技術「Carbon CLIP™（Continuous Liquid Interface Production™）」をベースとしている。adidasはDLS™を使用することで、製造コストの軽減やユーザーに合わせたカスタマイズ性に特化した3Dプリントシューズの量産を目指している。現在はAlphaEdge 4D [Fig.2-1-4]やUltra 4Dなど様々なデザインやシリーズに展開されており、店頭や通販で購入することができる。



[Fig.2-1-4] adidas AlphaEdge 4D



[Fig.2-1-5] 履いている様子

A-2. adidas x Parley UltraBOOST Uncaged (2016) [5]



[Fig.2-1-6] UltraBOOST Uncaged



[Fig.2-1-7] Parley Ocean Plastic®



[Fig.2-1-8] 3D プリントミッドソール

Adidas x Parley UltraBOOST Uncaged は、adidas と Parley が World Oceans Day（世界海洋デー）2016 にてリリースした、有害な海洋廃棄物から生成された 3D プリントシューズである。アッパーには違法操業船などから海中に投棄された有害海洋廃棄物から生成されたリサイクル縫製糸[6]が使用されている。3D プリントされるミッドソールは Futurecraft 4D の技術をベースとして造形されており、素材にはアッパーと同じ繊維と海中や浜辺に廃棄されたプラスチックゴミなどを混合して生成したリサイクルポリエステルを使用している。発表当初は世界 50 組限定で先行リリースしたが、現在は adidas x Parley でシューズ以外にも含む、海洋廃棄物から生成されたリサイクル素材を使用したプロダクトのブランドに展開した。

A-3. FUTURECRAFT.LOOP (2019) [7]



[Fig.2-1-9] 1 足目



[Fig.2-1-10] 循環のイメージ

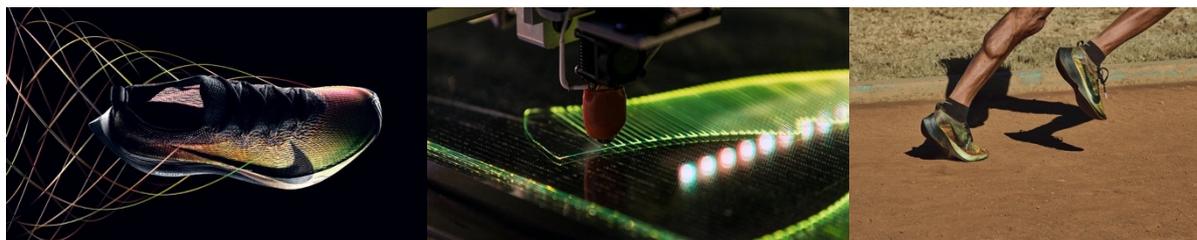


[Fig.2-1-11] 2 足目

adidas の FUTURECRAFT.LOOP は、アッパーとソールともに TPU を用いた、完全廃棄物フリーのランニングシューズである。1 足目[Fig.2-1-9]の靴が寿命を迎えたら細かく裁断してペレット状にし、それを溶かして再び原料として使用できる状態にすることで新しい靴[Fig.2-1-11]をつくることができる。

B. Nike

Nike Zoom Vaporfly Elite Flyprint (2018) [8]



[Fig.2-2-1] Nike Zoom Vaporfly Elite Flyprint

[Fig.2-2-2] 造形されている様子

[Fig.2-2-3] 履いている様子

Nike の Zoom Vaporfly Elite Flyprint は、軽量で柔軟性のある TPU（詳しくは 4-2-1 を参照）フィラメントからつくられたアッパーを使用したランニングシューズである。アッパーの編み込みのテキスタイルには Nike が開発した 3D プリント技術「Nike Flyprint（以下 Flyprint）」を使用しており、これはコイル状の TPU フィラメントを巻き戻し、溶かして層状に配置する Solid Deposit Modeling（SDM）[Fig.2-2-2]によって製造された。理想的な形状を得るにはアスリートのデータを取る必要があるが、プロトタイピングのプロセスが従来の 16 倍速くできるため、効率よく改良を重ねることができる。実際、[Fig.2-2-1]と [Fig.2-2-3]のモデルはケニアの陸上競技選手である Eliud Kipchoge（エリウド・キプチョゲ）選手が直接開発に携わり、スキャンされた足のデータやフィードバックをもとに最適なアッパーの形状を実現している。また、Flyprint によるテキスタイルは、同社の他の材料と熱結合することが可能であるため、接着剤やステッチを必要とせず、その分軽量化できる。Eliud Kipchoge 選手が着用したのもも重さが 169g で、前回着用したものと比較して 6%（11g）の軽量化に成功している。また、ロンドン・マラソンでも同シューズを履いて優勝している。リリース当初はマラソンレースのタイムによる購入資格が設けられ、その中でもタイムの早い順で優先順位が決められ、まさにトップアスリートに向けた 3D プリントシューズであることがわかる。

C. New Balance

C-1. Zante Generate [9], MS066 (2016) [10]



[Fig.2-3-1] Data-Driven Midsoles

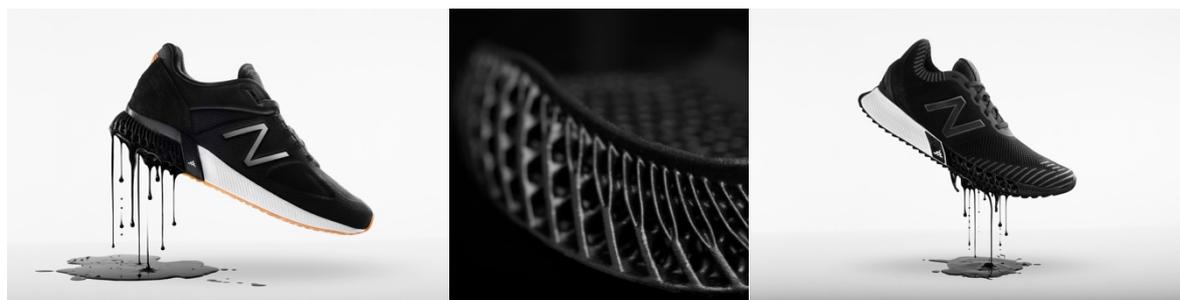
[Fig.2-3-2] Zante Generate

[Fig.2-3-3] MS066

Zante Generate [Fig.2-3-2]や MS066 [Fig.2-3-3]は New Balance が 2016 年にリリースした 3D プリントシューズである。アメリカの 3D プリントメーカーの 3D Systems が提

供する DuraForm TPU エラストマー[11]を材料に、粉末焼結積層造形（以下 SLS）方式で造形されている。3D プリントされたミッドソールの構造は、ユーザーにフィットしたクッション性と安定性を実現するために、アスリートの足圧データに基づいて独自のアルゴリズムを用いて設計された。Zante Generate は限定 44 足が販売され、MS066 も数量限定で発売された。

C-2. TripleCell (2019) [12]



[Fig.2-3-4] 990 Sports

[Fig.2-3-5]

[Fig.2-3-6] FuelCell Echo Triple

TripleCell による構造

New Balance はアメリカの 3D プリントメーカー Formlabs と協力し、3D プリンティング技術で作成された新しいテクノロジープラットフォーム「TripleCell」を発表した。TripleCell は、Rebound Resin [13]と呼ばれる新しい独自開発されたフォトポリマー樹脂を使用する。Rebound Resin は Formlabs の SLA 方式向けの素材よりも高い反発性、引裂抵抗、伸張性を示し、弾力性のある格子構造[Fig.2-3-5]を持つ 3D プリントミッドソールに用いられることで高い耐久性、伸張性、長寿命を実現し、従来の製造方法で生産されるソールよりも 10%軽量化されている。第 1 弾として TripleCell を踵部に適用した「990 Sports [Fig.2-3-4]」、第 2 弾として足の前足部に適用した「FuelCell Echo Triple [Fig.2-3-6]」がリリースされた。

D. Under Armour

D-1. UA ArchiTech (2016) [14]



[Fig.2-4-1] UA ArchiTech



[Fig.2-4-2] UA ArchiTech



[Fig.2-4-3] されている様子

Under Armour がリリースした UA ArchiTech は、軽量かつクッション性と安定性に優れた 3D プリントシューズである。ミッドソールに用いたラティス構造は、耐久性、柔軟

性、重量バランスが最適化されるよう独自のアルゴリズムに基づいて設計されたものである。SLS方式で粉末状のTPU樹脂を素材に用いている[Fig.2-4-3]。Under Armourの20周年を記念して96足限定生産された。

D-2. UA ArchiTech Futurist (2017) [15]



[Fig.2-4-4] UA ArchiTech Futurist

[Fig.2-4-5] 履いている様子

同社がリリースしたUA ArchiTech Futuristは、前述したUA ArchiTechの第二世代にあたる3Dプリントシューズである。第一世代のUA ArchiTechが有する機能に加えて、ファスナーのあるアッパーと組み合わせることで足にフィットさせ、どのようなトレーニングにも対応できる安定性とサポート機能を実現。2000足限定で生産・販売され、即日完売した。

E. Reebok

Liquid Speed (2016) [16]



[Fig.2-5-1] Liquid Speed

[Fig.2-5-2] 液体材料が吐出されている様子

[Fig.2-5-3] 履いている様子

Liquid Speedは、Reebokがリリースした3Dプリントシューズである。エクストルーダーを備えたロボットアームタイプの3Dプリンタを用いて、靴の側面にも固定される特殊な形をしたアウトソールを製造した。材料にはドイツの総合化学メーカーBASFが開発した高反発ウレタン系液体材料[17]を用いており、一般的なゴム製のアウトソールよりも大幅にパフォーマンスを向上させることに成功した。また、製造に型を必要としないため、作業工程数と時間を減らし、製造コストを削減することにも成功した。発表当初は工場を借りていた関係で300足のみの生産だったが、新しい工場ができたことによって3Dプリントシューズの改良と量産が期待されている。

F. Peak Sports

Future Fusion PEAK3D (2019) [18]



[Fig.2-6-1] Future Fusion PEAK3D

Future Fusion PEAK3D は、中国のスポーツ用品メーカーPeak Sports がリリースした 3D プリントシューズである。同シューズは、アッパーとソールが 3D プリントされたものであり、アッパーは FFF 方式、ソールは SLS 方式で造形されている。SLS 方式 3D プリンターで空洞を持つ構造を生成し、重さも約 250g と、軽量化することに成功した。600 足のみ限定生産され、即完売した。また、同社は過去に 3D プリントされたバスケットボールシューズ[Fig.2-6-2]やバレーボールシューズ[Fig.2-6-3]もリリースしているため、今後もスポーツ用の 3D プリントシューズが開発されることが期待されている。



[Fig.2-6-2] Peak Sports による
バスケットボール用 3D プリントシューズ



[Fig.2-6-3] Peak Sports による
バレーボール用 3D プリントシューズ

G. Magarimono

MAGARIMONO ORIGINALS (2020) [19]



[Fig.2-7-1] 4 種のデザイン



[Fig.2-7-2] 履いている様子

MAGARIMONO ORIGINALS は、日本のフットウェアブランド Magarimono による、アッパーとソールが 3D プリントされた 3D プリントシューズである。アッパーは FFF 方式、ソールは SLS 方式で造形されており、どちらも TPU を素材として使用している。メッシュ状のアッパーは高い通気性を持ち、4 種類のソールに使用されている特殊な形状はいずれも雲の形をイメージして生成されている。完全受注制で販売・提供されている。

H. FitMyFoot [20]

FitMyFoot Sandals



[Fig.2-8-1] FitMyFoot Sandals



[Fig.2-8-2] FitMyFoot Insoles

カナダの FitMyFoot (旧 Wiivv Wearables) が提供するサンダル[Fig.2-8-1]は、ユーザーの足の形状に合わせた完全オーダーメイド 3D プリント品である。同社開発のスマホアプリを用いて自宅などで足の採寸を行い、そのデータに基づいて 3D Systems が提供する SLS 方式のプリンタによる DuraForm TPU エラストマー[11]を用いて製造される。また、サンダルのストラップの長さや高さも足の甲に合わせてぴったり調整することができる。サンダルの他にユーザーの足に完全フィットするインソールも製造しており、脛骨の痛み、股関節痛、腰痛などを解消し、快適さを提供している。

I. Prevolve (2017) [21]



[Fig.2-9] Prevolve によるスリッポン型の 3D プリントシューズ

アメリカの Prevolve は、ユーザーの足を 3D スキャンし、ユーザーの足にぴったりフィットする、スリッポン型 3D プリントシューズを提供。FFF 方式の 3D プリンタと TPU を用いて一体成形される。ジャイロイド構造によるクッション性のあるソールの厚みはユーザーの要望に合わせて調整することができ、単一素材であるためリサイクルも可能である。スリッポン型の 3D プリントシューズの他に、スパイクシューズ、ユーザーの足形に合わせた 3D プリント木型、3D モデルのデータなども提供している。

このように、アスリートのパフォーマンスの向上やユーザーの健康の改善、環境を意識したものなど、様々な目的で3D プリンティング技術がシューズに応用されている。以下の表は、関連事例 A～I 計 13 個の 3D プリントシューズの値段、3D プリントされた部位、造形方式、使用素材、素材の形状について表にまとめたものである。

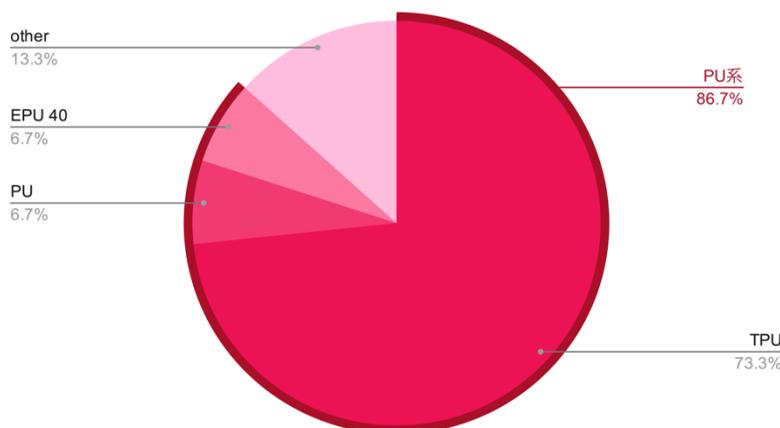
		3Dプリントシューズ	値段 (USD) *	3Dプリントされた部位	造形方式	使用素材	素材の形状
A	adidas	1 Futurecraft 4D	約 \$300	ミッドソール	Vat Photopolymerization (Carbon DLS [3])	EPU 40 [4]	液体
		2 adidas x Parley UltraBOOST Uncaged (adidas x Parley)	約 \$300	ミッドソール	Vat Photopolymerization (Carbon DLS [3])	リサイクルポリエステル (OCEAN PLASTIC®, [6])	-
		3 FUTURECRAFT.LOOP	約 \$333	ミッドソール	Vat Photopolymerization (Carbon DLS [3])	TPU	-
B	Nike	Nike Zoom Vaporfly Elite Flyprint	約 \$600	アッパー	ME (SDM) [8]	TPU	コイル
C	New Balance	1 Zante Generate, MS066	約 \$400, 約 \$350	ミッドソール	PBF (SLS)	TPU (DuraForm TPU Elastomer [11])	粉末
		2 TripleCell 990 Sports, FuelCell Echo Triple	約 \$185, 約 \$175	ミッドソール	Vat Photopolymerization (SLA)	Rebound Resin [13]	液体
D	Under Armour	1 UA ArchiTech	約 \$300	ミッドソール	PBF (SLS)	TPU	粉末
		2 UA ArchiTech Furturist	約 \$300	ミッドソール	PBF (SLS)	TPU	粉末
E	Reebok	Liquid Speed	約 \$189.50	アウトソール	ME	PU [17]	液体
F	Peak Sports	Future Fusion PEAK3D	約 \$190	アッパー	ME (FFF)	TPU	コイル
				ソール	PBF (SLS)	TPU	粉末
G	Magarimono	MAGARIMONO ORIGINALS (Magarimono)	約 \$1,100	アッパー	ME (FFF)	TPU	コイル
				ソール	PBF (SLS)	TPU	粉末
H	Wiivv	FitMyFoot Sandals	約 \$99	ソール	PBF (SLS)	TPU (DuraForm TPU Elastomer [11])	粉末
I	Prevolve	BIOSTRIDE	約 \$495	アッパー	ME (FFF)	TPU	コイル
				ソール	ME (FFF)	TPU	コイル

* = 価格に変動があります

[Fig.2-10-1] 関連事例 A～I の一覧表

使用素材

目的や用途が異なる 3D プリントシューズでも、ポリウレタン（以下 PU）系の素材が多く使われており、中でも熱可塑性ポリウレタン（Thermoplastic Polyurethane、以下 TPU）が最も多く使われている。PU は、柔軟性、弾性、耐摩耗性、耐衝撃性に優れた素材であり、硬度が豊富な素材である。TPU は PU の一種であり、PU の多くが熱硬化性であるのに対して、TPU は熱で溶かして成形することが可能なことから、射出成形などの量産に向いている。このような特徴を有するため、3D プリントシューズによく使用されている。



[Fig.2-10-2] 3D プリントシューズの使用素材

価格帯と素材の組み合わせ

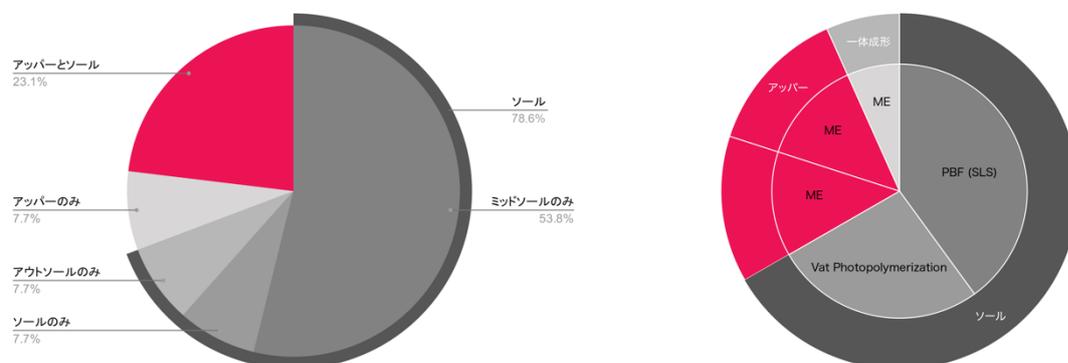
3D プリント製のものに加えて、布や他のプラスチックなどと組み合わせたものを「複合素材」、素材の種類に関わらず一つの材料からできたものを「単一素材」とし、関連事例 A~I をこの 2 つに分類した。さらに価格帯別に分けて以下の図[Fig.2-10-5]のようにまとめた。図からわかるように、複合素材のものが多く、単一素材のものは少ない。また、3D プリントシューズの価格も\$201 (USD) 以上のものが多く、高価なものが多いことがわかる。



[Fig.2-10-5] 関連事例 A~I の価格帯と素材の組み合わせ

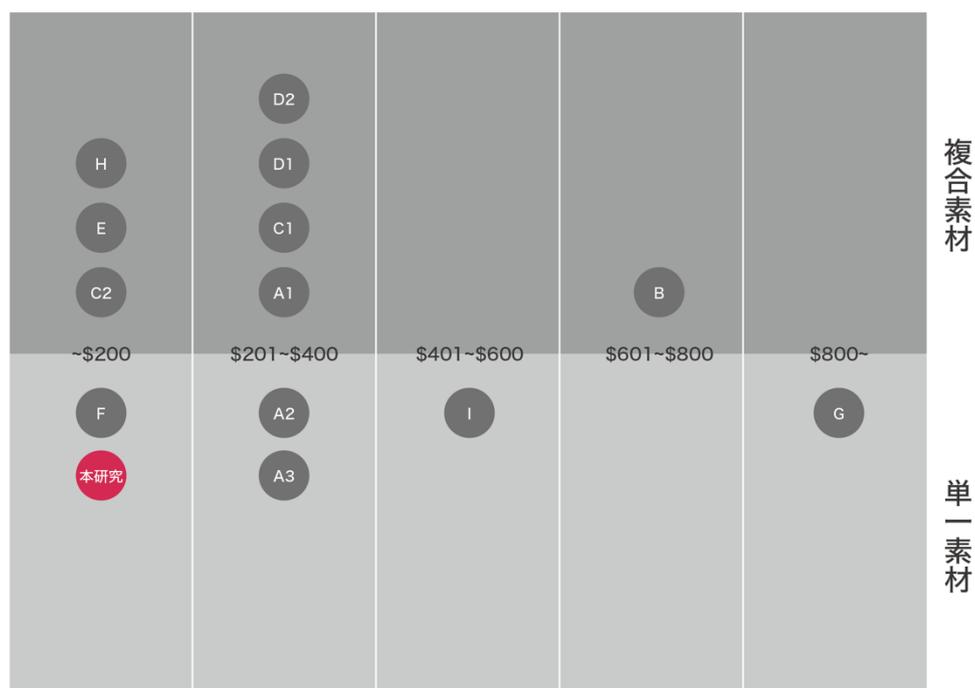
本研究で製作する 3D プリントシューズ

本研究で製作する 3D プリントシューズは、ソールやアッパーを含めた、全ての部位を 3D プリントすることを目指す。さらに、パーツは全て ME (FFF) 方式の 3D プリンタを用いて製造できるように設計する。



[Fig.2-10-6] 本研究で製作する 3D プリントシューズの 3D プリントされる部位 (左) と、部位ごとの造形方式 (右)

素材は単一素材での製造を目指す。オープンソース化するため購入価格自体は
\$0 だが、製作する際にかかるコストがなるべく低価格になるようにする。



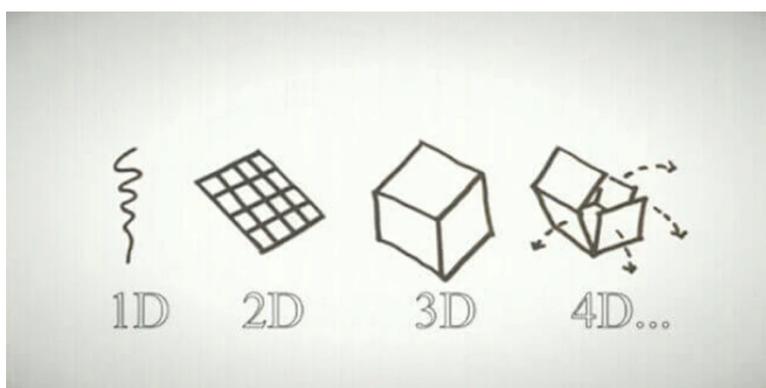
[Fig.2-10-7] 本研究が目指す価格帯と素材の組み合わせ

以上より、本研究で製作する 3D プリントシューズは、「全てのパーツが ME (FFF) 方式の 3D プリンタで製作可能であること」、「単一素材であること」、「低価格であること」の 3 点を目指す。

3. 本研究に至るまで

3-1. 4D Printed Footwear の提案

4D プリンティングとは、Massachusetts Institute of Technology (MIT)、Self-Assembly Lab の Skylar Tibbits (スカイラー・ティビッツ) 氏によって提唱された概念であり、3D プリンティング技術に時間要素を加えたものを指し、時間の経過に伴って形状や機能が変化するが特徴である。3D プリントされたものは造形後に変化しないのに対し、4D プリンティングは、素材そのものにプログラムを組み込み、トリガーとなる条件（熱、振動、空気、磁力、光など）が満たされた時に変化し、周囲の環境の変化に合わせた設計が可能である[22]。一方、靴は、様々な要因（使用目的、環境、ユーザーの身体など）によって求められるものが変わり続ける。周囲の環境に合わせて変形する 4D プリンティングと、周囲の環境が変わり続ける靴の相性が良いと考え、4D プリンティング技術を応用した靴の製作を試みた。



[Fig.3-1] Skylar Tibbits により説明された 4D プリンティングの図 (2013)

3-2. Foldable Shoes

筆者は、学部 3 年時に日常生活で実際に使用できる 3D プリントシューズとして、Foldable Shoes を提案し、製作した。Foldable Shoes は、筆者自身や身の周りに多くいる「旅行や出張などの長期滞在で家を空けることが多い人」に向けた、折りたたむことで持ち運びが可能なシューズである。多くの靴は重くかさばるため、旅行や出張などの遠出には最低限の数しか持っていないことが多い。Foldable Shoes は小さくコンパクトにすることで省スペースに収められ、一度に持ち運べる靴の数を増やす。持ち運びが便利になるだけでなく、旅先での靴の選択肢が増えることで家から離れていても快適に過ごせるようにすることが目的である。



[Fig.3-2] Foldable Shoes が開いている様子



[Fig.3-3] Foldable Shoes が閉じている様子

Foldable Shoes は、ユニチカ株式会社が開発した熱で柔らかくなる感温性フィラメント [Fig.3-4] を用いたインソールを使用している。使用した感温性フィラメントは、造形後に約 40°C であたためると軟化し、変形できる。また、冷却することによって形が固定され、再び熱を与えることで再度変形が可能になる。この性質を利用し、あたためることによって開閉が可能な 3D プリントシューズを製作した。また、折りたたまれた状態で常温に戻すとその形状を保つことができるため、折りたたまれた靴をゴムなどで留める必要もない。



[Fig.3-4] 感温性フィラメント

感温性フィラメント製のインソールを、海や川などで履くマリンシューズ [Fig.3-5] のような薄く柔らかいアウトソールを持つ靴に貼り付けることで、靴全体を折りたたむことが可能である。



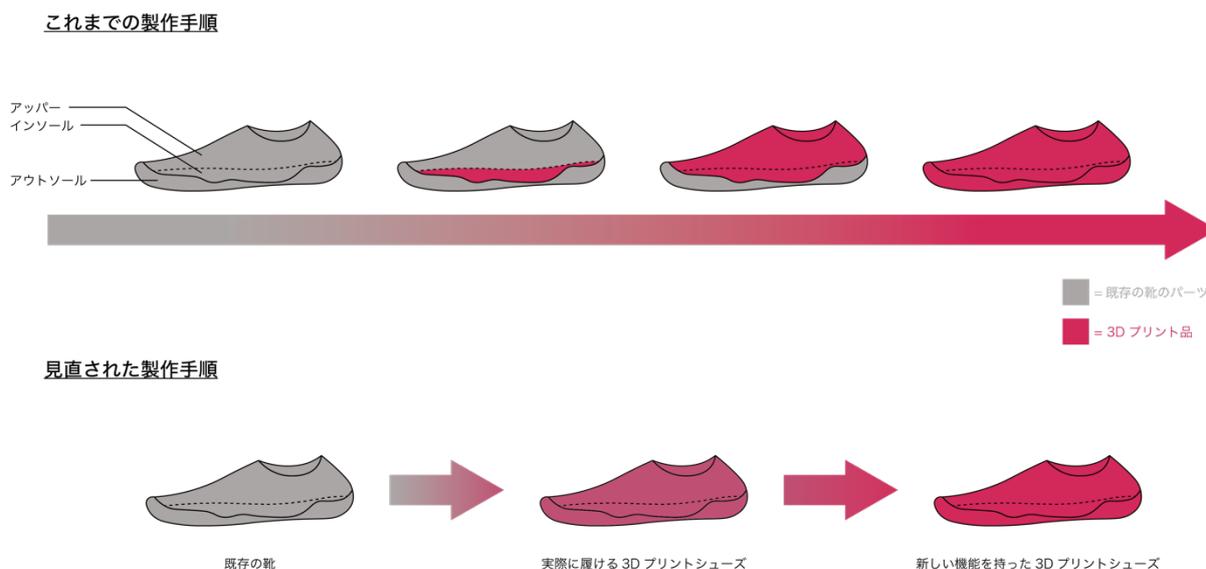
[Fig.3-5] 実際に使用したマリンシューズ

また、ユーザーの足にフィットするように、アッパーには柔軟性に優れた TPU 素材と幾何学構造を用いて伸縮性を実装した。

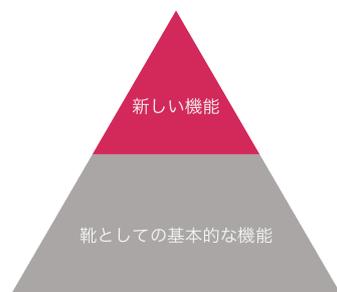
3-3. 新たな課題

4D プリンティング技術を靴に応用し、靴に「折りたたむ」や「自律的に開く」など、新しい機能を靴に加えることができた一方、「長時間履けない」や「耐久性に欠ける」などの新たな課題が出た。日常生活の中で実際に使用できる靴をつくるのが目的だということ踏まえると、履けないというのは本末転倒である。

そこで、製作のプロセスに注目した。Foldable Shoes は部位ごとに設計し、3D プリンタで作成し、既存の靴を部分的に作り替えている。徐々に 3D プリント部分の割合を増やしていくことで最終的に完全な 3D プリントされたものになる想定だった。しかし、この方法では靴としての基本的な機能と、新しい機能のバランスを保ちながら製作を進めるのは困難である。そのため、製作の手順を変え、3D プリンタで長時間履いても問題ない靴を製作し、靴としての基本的な機能が担保された上で新しい機能をつける、というアプローチをとることにした。また、スニーカーやドレスシューズなど、パーツが多く構造が複雑な靴をつくるには専門的な知識が不可欠であるため、専門知識のない素人でも比較的簡単につくることができるサンダルやスリッパなどの簡易的な形の靴をつくることにした。



[Fig.3-6] これまでの製作手順と見直された製作手順



[Fig.3-7] 「靴としての基本的な機能」と「新しい機能」の関係図

3-4. ほぼ全てが 3D プリンタでつくれるサンダル

ソールやベルトなど、アジャスター以外ほぼ全てのパーツが 3D プリントされたサンダルを製作した。2020 年 10 月に東京ビッグサイトで行われた Maker Faire Tokyo 2020 でこのサンダルを 1 足履きながら 2 日間展示をした。改良の余地はあったものの、3D プリンタで 2 日間の展示に耐え得るサンダルをつくることに成功した。

Twitter に展示の告知としてツイートした写真の反響が想像以上に大きく、「つくり方を知りたい」と声をかけられた。ツイートを見て興味を持ってくれたり、展示会場まで足を運んでサンダルを見に来てくれたりした人もいた。実際に履いているという事実にも説得力があったのか、SNS でもリアルでも「つくってみたい」という声が多かった。つくり方を公開し、違う人が製作することによって自分のデザインがどのように生まれ変わるのかに興味を持ち、多くの「つくりたい」に応えるために、サンダルの設計を公開する方向で製作を進めた。



[Fig.3-8] 製作したサンダルを Maker Faire Tokyo 2020 で履きながら展示している様子



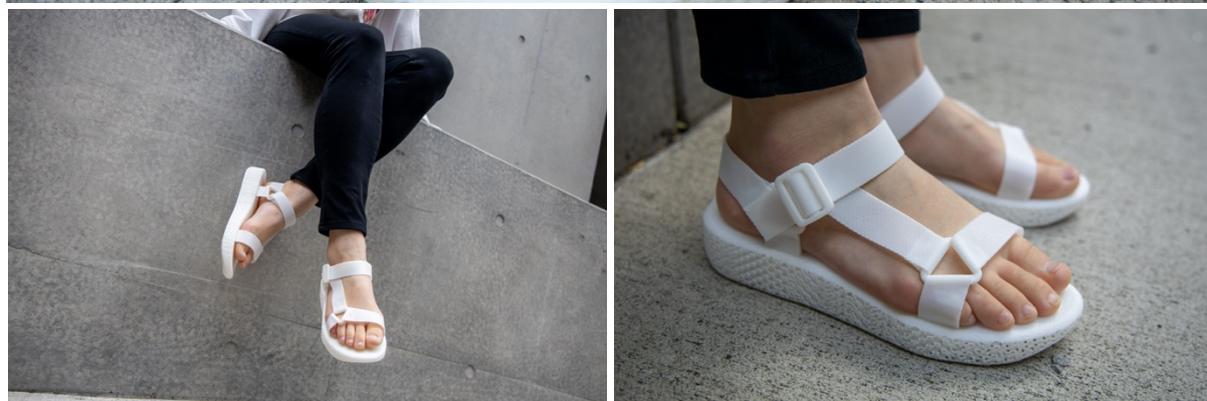
インプレッション	42,072
ユーザーがこのツイートを見た回数	
エンゲージメント総数	10,619
ユーザーがこのツイートに反応した回数	
メディアのエンゲージメント数	6,374
全メディア (ビデオ、Vine、GIF、画像) のクリック数	
詳細のクリック数	3,335
ユーザーがこのツイートを詳細表示した回数	
プロフィールのクリック数	517
名前、@ユーザー名、またはプロフィール画像をクリックした回数	
いいね	289
ユーザーがこのツイートをいいねした回数	
リツイート	55
ユーザーがこのツイートをリツイートした回数	
リンクのクリック数	43
このツイート内のリンクまたはカードをクリックした回数	
返信	6
このツイートへの返信数	

[Fig.3-9] 実際のツイートとその反応 (2021/01/27 現在)

4. 製作 xCloud Sandals

4-1. 概要

雲をイメージした、ふわふわ・ふかふかな踏み心地をソールの内部構造のパターンと密度で再現し、そのパラメータを変えることでその踏み心地を変えることができる。ソールに加えて、ベルトなど他のパーツに用いられている色や形なども自由に変化させ、サンダルの見た目と履き心地も自分好みに変えることができ、その組み合わせは無限にある。こういった特徴から、「xCloud Sandals」と名付けた。



xCloud Sandals (White)



xCloud Sandals (Black)



4-2. 使用した素材・機材・スライサーソフトについて

なるべく多くの人がつくれるように有料ソフトウェア、高額な素材や機材などは避け、それぞれが低価格で手に入りやすく、性能も十分なものを選んで使用した。

4-2-1. 使用素材 -TPU-

今回は、熱可塑性ポリウレタン、または、熱可塑性ポリウレタンエラストマー（Thermoplastic Polyurethane、以下 TPU）と呼ばれる、ゴムのような弾力性のある柔らかい樹脂を使用した。TPU は、柔軟性、弾性、機械的強度、耐摩耗性、耐油性、耐薬品性に優れ、衝撃も吸収しやすいため破損しにくく、環境に優しいリサイクル可能な素材である。スマートフォンやタブレットのケース、ホース・チューブ、スポーツ用品、医療・衛生用品などに使われており、靴のソール[Fig.4-2-1]などにもよく使用される材料である [23]。



[Fig.4-2-1] TPU 製のソール (PEAK3D, Peak Sports, 2019)

3D プリンタ用の TPU フィラメントは、メーカーによって柔らかさや剛性などの物性が異なり、同じメーカーでもフィラメントの色によって出力の安定性に差が出る。これは樹脂に混入された染料の種類や量と関係があり、純度が高いもの（染料が少ないもの）ほど、3D プリンタでの出力が安定する。尚、染料が入っていないオリジナルの TPU の色はメーカーによって様々であり、一概に特定の色が出しやすい/出しにくいとは言えない [24]。

これまでの 3D プリンタの素材には硬いものが多かったのもあり、TPU のような柔らかい素材が登場し、FFF 方式の 3D プリンタに対応したことで、3D プリンティングの応用可能性が大きく広がった。しかし、TPU などの柔らかい樹脂は、3D プリンタで出力しにくい素材として認識されることが多い。実際、糸が引いたり、表面が凸凹したり、吐出量にムラがあったりなど、出力が安定しないことが多く初心者にとっては少々扱いづらい素材でもある。

今回使用した TPU は、SainSmart (サインスマート) の TPU フィラメントである。フレキシブルな樹脂は比較的値段が高い中、SainSmart の TPU フィラメントは他のものと比べて低価格で手に入れやすく、比較的簡単に造形することができる。



[Fig.4-2-2] SainSmart の TPU フィラメント (白色)

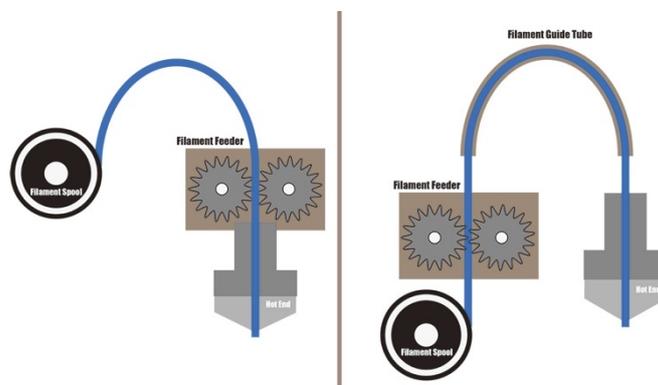
4-2-2. 使用機材 -TPU の出力ができる FFF 方式 3D プリンター-

現在、家庭用 3D プリンターは FFF 方式のものが主流である。造形範囲が大きければ大きいほど値段が高くなり、3D プリンターのファームウェアや出力の精度によっても値段が変わってくるが、近年では 2 万円程度で一台購入することができる。本研究では FFF 方式のデスクトップ型 3D プリンターで製作が完結するように設計されており、個人の環境での製作ができるようになっている。

「FFF 方式の 3D プリンターが TPU などの柔らかい素材に対応した」と前述したが、3D プリンターの種類によって柔らかい素材が出しにくいものがある。その原因の一つに、3D プリンターのエクストルーダーが「ダイレクト式 (direct extrusion)」か「ボーデン式 (bowden extrusion)」か、という違いが挙げられる [Fig.4-2-3]。

ダイレクト式のもの、3D プリンターのエクストルーダーがプリントヘッドに直接取り付けられており、エクストルーダーとノズルの距離が近い。ノズルに直接力がかかりやすいため、吐出が安定しやすくリトラクションも速い。柔らかい素材も屈曲せずに押し込むことができるため、使用できるフィラメントの種類が豊富だ。一方、エクストルーダーがプリントヘッドに乗る分、重量が増え、その負荷による X-Y 方向の造形精度の低下、X-Y 駆動系の故障の原因、造形範囲が小さくなるなどの短所がある。ボーデン式のもの、エクストルーダーがプリンターのフレームに取り付けられており、フィラメントは長い PTFE*チューブを通してプリントヘッドに送り込まれる。プリントヘッドが軽量であるため、より正確で高速な精度の高い造形ができる傾向にあり、可動域も広がるため、造形面積が比較的大きい。一方、長い距離のチューブを介してフィラメントを送るため、距離が長くなるほど応答が遅れが出たり、リトラクションが遅かったりする。また、柔らかい素材がチューブ内で屈曲して送り出しにくく、滑りが悪い素材もスムーズに吐出できないなどのデメリットもある [25]。ダイレクト式とボーデン式のメリットとデメリットを踏まえると、今回のように

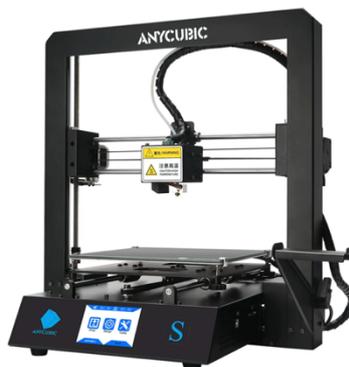
TPU などの柔らかいフィラメントを出力するには、一般的にはダイレクト式が適していると言える。



[Fig.4-2-3] ダイレクト式 (左) とボウデン式 (右) の違い

*PTFE (Polytetrafluorethylene、ポリテトラフルオロエチレン、商品名テフロン) = 耐熱性と耐薬品性に優れる

筆者が使用した FFF 方式のデスクトップ型 3D プリンタは 2 台あり、一つ目は Anycubic Mega S [Fig.4-2-4] という機種である。Anycubic Mega S は比較的低価格で購入できる FFF 方式のデスクトップ型 3D プリンタであり、TPU などの柔らかい素材も安定して出力することができる。造形範囲は、縦 210*横 210*高さ 205mm でやや大きく、製作したサンダルの M サイズ (25cm 程度) や出力の向きを斜めにすることでベルトも最大 25cm (ただしこの時ベルトの幅は 5cm) のものが出力できる。



[Fig.4-2-4] Anycubic Mega S

筆者が使用した 2 台目の 3D プリンタは Anycubic Mega X [Fig.4-2-5] という機種である。Mega X は Mega S と同様、FFF 方式のデスクトップ型 3D プリンタであり、TPU などの柔らかい素材も安定して出力することができる。造形範囲は縦 300*横 300*高さ 305mm で大きいため Mega S と比べて価格は少し高くなるが、サイズが大きいものの出力やサイズが小さいものの量産に適している。



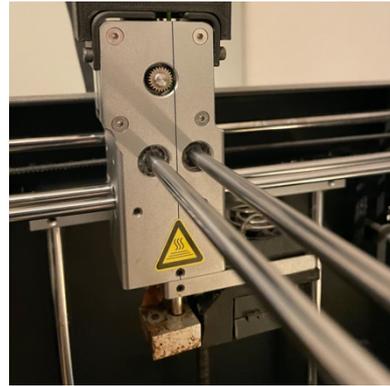
[Fig.4-2-5] Anycubic Mega X

写真からわかるように、筆者が使用した2台の3Dプリンタは、エクストルーダーとプリントヘッドが分離して設置されている、ボーデン式である。ボーデン式でも柔らかいフィラメントを安定して出力できる3Dプリンタもある。その条件として考えられるのが、エクストルーダーに強力なギア（AnycubicはTitanエクストルーダー）を使用している他、フィラメントを送り出すチューブの内径の大きさが関係しているのではないかと考察した。Anycubic Mega SやMega Xに使用されているPTFEチューブの内径の大きさは2.0mmで、直径1.75mmのフィラメントを通した時との隙間が狭く、フィラメントがチューブ内で屈曲することがない。柔らかい素材の場合、ボーデン式の3Dプリンタではチューブとフィラメントの間に隙間ができることによってフィラメントが屈曲しやすくなり、送り出しが困難になるため、チューブの内径によって、ボーデン式の3Dプリンタで柔らかいフィラメントを出したり単にフィラメントの送り出しをスムーズにしたりするために、内径が狭くフィラメントとの隙間がほぼないPTFEチューブ[Fig.4-2-6]も販売されており、これに取り換えることで改善された例もある[26]。



[Fig.4-2-6] ボーデン式用の PTFE チューブ

逆に、柔らかいフィラメントが出しやすいとされるダイレクト式で実際に出せない機種もある。HICTOPの3DP-24 [Fig.4-2-7]という機種は、ダイレクト式でPLA樹脂（Polylactic Acid、ポリ乳酸）やABS樹脂（Acrylonitrile Butadiene Styrene、アクリロニトリルブタジエンスチレン）に加えて木質樹脂（PLAなどの樹脂に木粉を混ぜたもの）やナイロン（nylon）など多様なフィラメントに対応している一方、TPUなどの柔らかい素材に対応しておらず、出しにくい。これは、エクストルーダーとノズルの距離が長く、そこで柔らかいフィラメントが屈曲してしまい、押し出しがされなくなるからだ。



[Fig.4-2-7] HICTOP の 3DP-24 (左) と、そのエクストルーダーとノズルの距離が長い様子 (右)

3D プリンタのエクストルーダーがダイレクト式かボーデン式かの違いで柔らかい素材に対応しているものとしていないものがある。しかし、前述したように、一概にはどちらが出せる/出せないと断言できないため、自分が使用している 3D プリンタの機構や特徴を把握し、対応している素材を事前に確認する必要がある。

4-2-3. 使用したスライサーソフト

3D モデルを 3D プリンタで出力可能なデータに変換するスライサーソフトは、3D プリンタを使用する上では不可欠である。無償でダウンロードできるものから有料ライセンスが必要なもの、パラメータが豊富で設定の自由度が高いものからそうでないものまで、種類は様々である。今回は、無償でダウンロードできるスライサーソフト Ultimaker Cura 4.8 (4.8 は 2020 年 11 月にリリース、以下 Cura) を使用した。Cura は Windows、MacOS、Linux に対応しており、4.8 より前にリリースされた過去のバージョンもダウンロードすることができる。同ソフトでは、数回のクリックでプリントの準備をすることもできれば、豊富なパラメータを調整し細かいカスタム設定をすることも可能である。

4-3. スライサーソフトを駆使した設計

なるべく多くの人がつくれるように、高度な 3D モデリングスキルや知識を必要としない方法や、スライサーソフトの機能を活かした方法でサンダルを製作した。

4-3-1. インフィルによるクッション性の再現

インフィル (infill) とは、3D プリントする造形物をスライサーソフトに通した際に設定する内部構造のことを指す。内部構造の形をインフィルパターン (infill pattern) と呼び、その充填率を調整することで物体の重量や剛性などを調整することができる。柔らかい

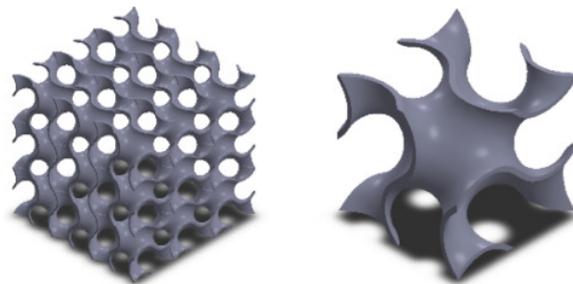
素材ではインフィルの構造とその密度によってクッション性を制御することができる。今回のサンダルづくりでもこの性質を利用し、ソールにクッション性を持たせた。

Curaには13種類のインフィルパターンがあり、他のスライサーソフトに比べても種類が豊富である。筆者はCuraに入っている全13種類のインフィルパターンをそれぞれ同じ設定（温度、速度、密度など）で同じ3cm³の立方体に出力し、それぞれから得られるクッション性の比較をした。全13種類を比較した結果、ジャイロイド（gyroid）構造が今回の製作に最もふさわしいと判断し、このインフィルパターンをソールに採用した（[Fig.4-3-1]の下段の右端の構造体）。



[Fig.4-3-1] Ultimaker Curaによる13種類のインフィルパターン

ジャイロイド構造[27][Fig.4-3-2]は、どの方向から加わる力が均一であり、複雑な形状をした構造体であるため普通に3Dモデリングしようとするのが難しい。さらに、モデリングをして構造体の3Dモデルを作成できたとしても、3Dプリンタで綺麗に造形できるか否かはまた別の問題である。



[Fig.4-3-2] ジャイロイド構造

一方、Curaのインフィルパターンをジャイロイドに設定することでジャイロイドを簡単に生成することができ、Curaの設定でtop/bottom layer（上面と底面の層）とshell（外壁）を0に設定することで、ジャイロイドのみの物体が作られる。これはCuraやジャイロイドに限らず他のスライサーソフトやインフィルパターンでもできる（ただし、スライサーソフトに入っているインフィルパターンの種類はスライサーによって様々であり、必ずしもジャイロイドが入っているとは限らない）。この方法を知っていると、造形したいものの形をモデリングするスキルがあれば十分で、ジャイロイドのような複雑な構造体をモデリ

ングするスキルや知識はなくても生成できる。例えば、上記の 13 の立方体もこの方法で生成したが、この場合、用意する 3D モデルは 3 cm³の立方体 1 つのみで、インフィルパターンを変えて出力するだけで結果的に 13 の異なる構造体がつくれる。

ソールへの応用



[Fig.4-3-3] 3D プリントソールを様々な角度から見た様子
(左：真上、右上段：真横、右下段左側：後ろ、右下段左側：前)

サンダルのソールにもこの方法を応用した。以下は、Cura で実際に設定したパラメータの一例である。また、プリント時間・造形物の重量・使用されるフィラメントの量は、スライス結果の値であり、その他のパラメータや使用機材などによって変動する。

<p>Quality</p> <p>Layer Height: 0.2mm</p>	<p>Speed</p> <p>Print Speed: 35mm/s</p>
<p>Infill</p> <p>Infill Density: 12%</p> <p>Infill Pattern: Gyroid</p>	<p>Material</p> <p>Printing Temperature: 200°C</p> <p>Build Plate Temperature: 60°C</p>
<p>Shell</p> <p>Wall Thickness: 0mm</p> <p>Top Layers: 6</p> <p>Bottom Layers: 4</p>	<p>Support</p> <p>Generate Support: 0</p> <p>Support Placement: Touching Buildplate</p> <p>Support Overhang Angle: 60°</p>
<p>15 hrs 3 mins</p>	
<p>124g · 42.28m</p>	

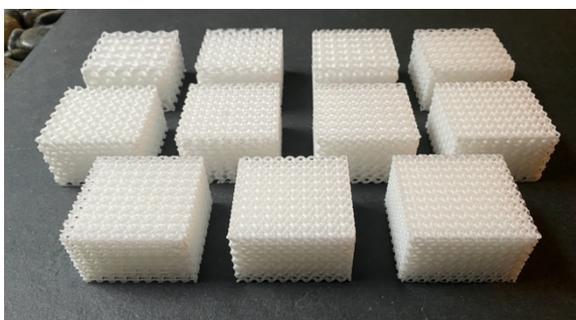
[Fig.4-3-4] スライス設定 (アイコンは Cura に表示されているもの)

積層ピッチ (layer height) は 0.2mm に設定し、プリント速度 (speed) は 35mm/s に設定した。ノズルの温度は 200°C、ヒートベッドの温度は 60°C に設定した。尚、プリン

ト速度と温度の設定は使用素材や機種によって最適値が異なるため、この値はあくまでも参考である。

前述した方法だと top/bottom layer が 0 だが、ソールの場合、表面がジャイロイドむき出しになるとサンダルを裸足で履いた時に樹脂の細かい破片が刺さる可能性があり、また、底面もむき出しだとサポート材がつく場所の造形が汚くなったりサポート材を取り除くのが困難になったりするため、top と bottom layer はともに何層か重ねた。表面の仕上がりが綺麗で且つ踏み心地が良いソールをつくるために、「top layer とインフィルの密度の最適な組み合わせ」を模索した。具体的には、密度が 10~20% の 3 cm³ の立方体 (計 11 個) [Fig.4-3-5] を出力して踏んで踏み心地を比較し、top layer の厚みが同じで密度が異なるソール [Fig.4-3-6] を出力して上面の仕上がりや踏み心地を比較したりした。その結果、「踏み心地の良い密度」は 10~15% で、「top layer とインフィルの密度の最適な組み合わせ」は top layer が 1.2mm (積層ピッチが 0.2mm の場合 6 層) でインフィルの密度が 12% の組み合わせだと判断した。ただし、ここで言う「踏み心地が良い密度」というのはあくまでも筆者の個人的な意見であり、「踏み心地が良い密度」には個人差がある。

インフィルの密度を低くすればするほど柔らかくなり、top layer も薄ければ薄いほどジャイロイド構造によるクッション性を感じることができると、柔らかいソールが欲しい時は 10%、硬めのソールが欲しい時は 15%、というように気分によって密度を変えて柔らかさを調整することができる。



[Fig.4-3-5] 密度が 10~20% の 3 cm³ の立方体 (計 11 個)

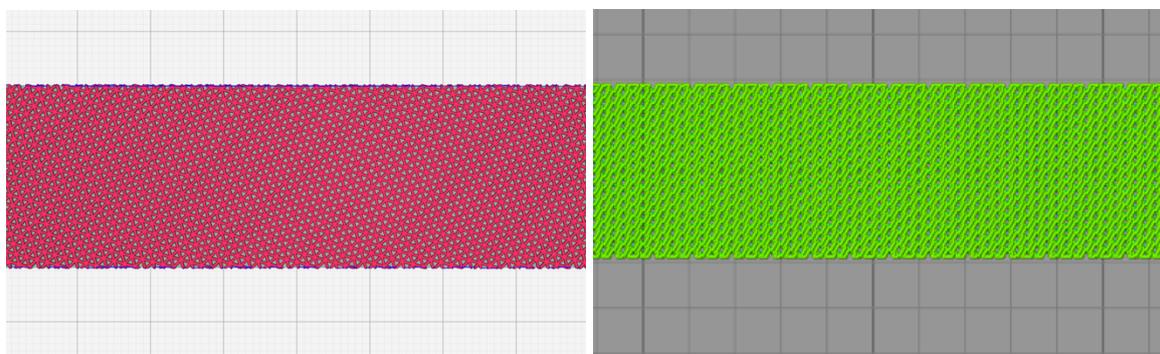


[Fig.4-3-6] top layer の厚みが同じで密度が異なるソール (上から 12%、15%、20%)

最後に shell (Cura の表記だと Wall Thickness) の設定について説明する。筆者が製作する xCloud Sandals の shell は必ず 0 でインフィルパターンがむき出しになっているが、shell の有無は任意である。Shell を無くすことソールそのものが柔らかくなり、ソールを踏んだ時に shell だけが剥がれたり横に広がってできたシワが目立ったりするのを防ぐというメリットがある。

4-3-2. インフィルを用いたテキスタイルの作成

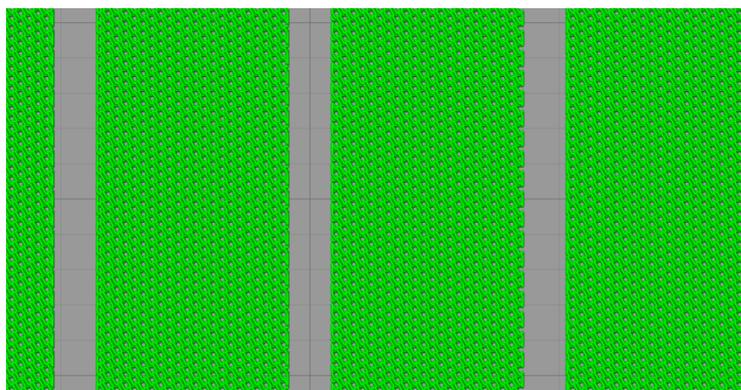
ベルトもソールとほぼ同じ方法でつくり、ここではテキスタイルの作成に成功した。用意した 3D モデルは幅 5cm、厚み 0.8mm、長さ 20cm の長方形のみで、top/bottom layer と shell は全て 0 に設定して内部構造がむき出しになるようにし、インフィルの密度は 85~95%程度で高めに設定した。密度は低ければ低いほど柔らかくベルトもしなやかになるが、引っ張られた時にちぎれやすくなるので注意が必要。また、ベルトは縦や横に引っ張られる機会が多いため、ちぎれにくくするために、Cura のインフィルパターンとして入っているトライアングル (triangle) 構造[Fig.4-3-7]や、有料スライサーソフト Simplify3D のハニカム (honeycomb) 構造[Fig.4-3-8]など、斜めに線が入っている構造を使用するのが好ましい。



[Fig.4-3-7] Ultimaker Cura の Triangle Infill (95%)

[Fig.4-3-8] Simplify3D の Full Honeycomb Infill (95%)

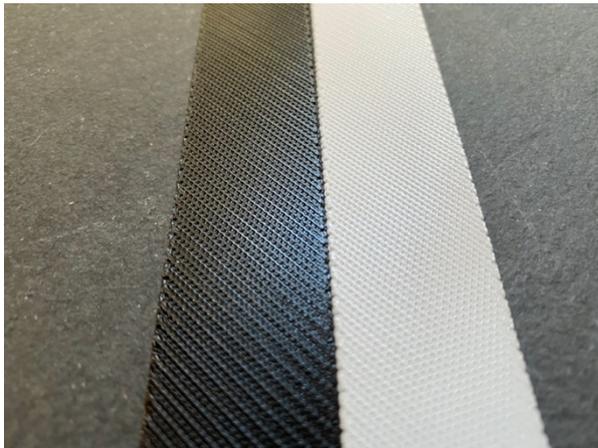
また、ベルトの側面が毛羽立ちしており、3D モデルをどこに配置するかによってその大きさが変わってくる[Fig.4-3-9]。ベルトの側面の毛羽立ちが大きいと見栄えがよくないため、出力前に 3D モデルの毛立ちを確認したり、微妙な再配置をしたりなど、配慮する必要がある。また、shell をつけることによって解決される一方、shell をつけることによってベルトが硬くなり直角ができるため、角が足に擦れて痛みを伴うことがある。



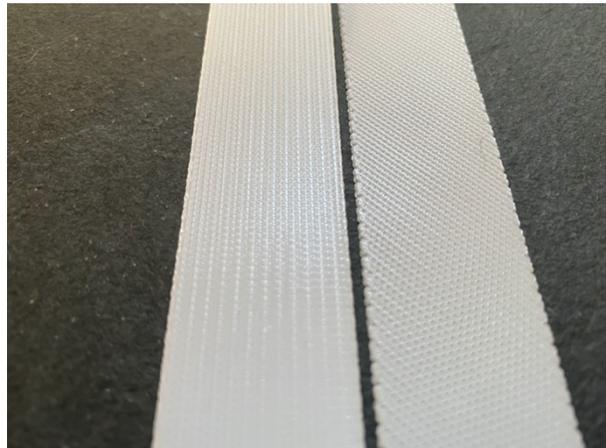
[Fig.4-3-9] モデルの配置によって毛立ちが変わる様子

インフィルの密度や shell の有無の他にも、厚みによってベルトの性質が変わる。薄ければ薄いほど柔らかくしなやかなものができるが脆くなり、厚みがあればあるほど硬く頑丈なものになる。使用する機材やマテリアル、スピードや温度などの設定によってベルトの

質感も異なり、艶のあるゴムベルトや既製品の布に似た質感のベルトをつくることが可能である。



[Fig.4-3-10] 白と黒のベルト



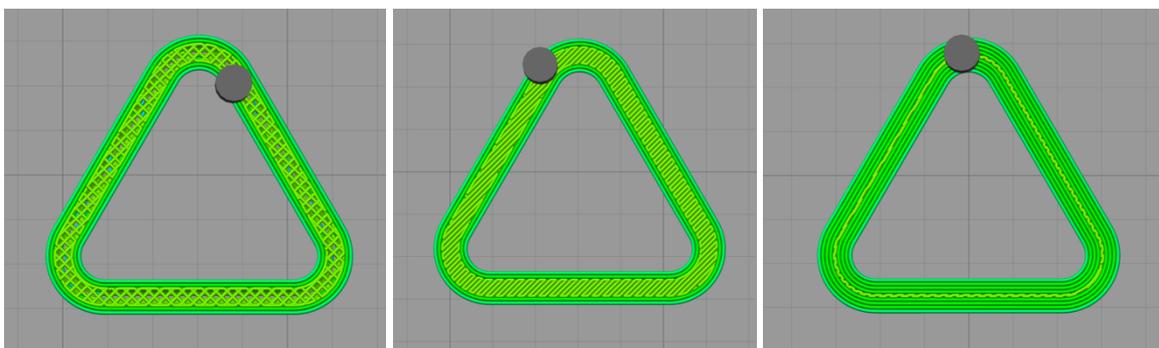
[Fig.4-3-11] 異なるテキスタイル

4-3-3. 密実なものの設計

インフィルによって3Dプリント品の多くは内部の密度が低く隙間が多い。しかし、スライサーの設定次第で詰まったものをつくることもできる。

ソールとベルトをつなげるパーツとして、三角カンと呼ばれる三角形のパーツとベルトの長さを調整するアジャスターを設計した。それぞれの役割からどちらも頑丈である必要があり、中に隙間があるものを用いるよりぎっしり詰まったものの方が良いと判断した。

造形物の shell は枚数が多ければ多いほど外力に強い性質を利用し、なるべく隙間がないように、三角カンとアジャスターは shell のみで形成した。インフィルの密度を100%にすることもできるが、三角カンとアジャスターの場合、造形物自体が小さいためインフィルを設定してしまうとかえって仕上がりが悪くなったり、インフィルパターンにもよるが隙間ができてしまったりする可能性がある。Shell のみに設定し、輪を重ねることで引っ張りに強いものを製作した。



[Fig.4-3-12] Shell 2枚・Grid Infill 100% (左)、Shell 2枚・Rectilinear Infill 100% (中央)、Shell 10枚・Infill 0% (右) 尚、その他のスライス設定は同じであり、いずれも7層目の写真である。

4-4. 製作過程

4-4-1. Version 1.0

2日間これを履きながら展示を行い、耐久性については特に問題がなかった。長時間履けた一方、三角カンやベルトの接合部の段差で靴ずれが起きるため、快適さに欠ける。



[Fig.4-4-1] xCloud Sandals (Version 1.0)

ソール

素材はTPUで、縁だけフィレットをかけ、丸みをつけ、ソールは非常に簡易的な形状。Top layerは2mmで、ミッドソールにあたるジャイロイドのクッション部は約2cm。滑り止めに厚み2mmのアウトソールを底面に接着したが、滑り止めとしての機能は弱い。



[Fig.4-4-2] xCloud Sandals (Version 1.0) の裏 (アウトソール)

ベルト

素材は TPU で、厚みは約 2mm。厚く硬いため、接合部の段差で靴ずれが起きた。

三角カン

素材は硬い PLA でできているため、足に当たって靴ずれが起きた。

アジャスター

既製品で代用。

4-4-2. Version 2.0

ソールは歩きやすいように足裏の曲面に合わせた形状に改善した。また、Version 1.0 では問題となっていた靴ずれを解消するためにベルトと三角カンの再設計を行った。結果として、三角カンによる靴ずれは解消できたが、ベルトの接合部の段差による靴ずれは概ね解消できたものの、少し残った。アジャスターは Version 1.0 と同様に既製品で代用したが、それ以外のパーツは 3D プリント品で、素材を TPU に統一することができた。



[Fig.4-4-3] xCloud Sandals (Version 2.0)

ソール

足裏の曲面に沿わせた形にしてつま先の部分を上げた（これをトゥスプリングという）ことで、歩きやすくした。

ベルト

厚みは 1mm にし、Version 1.0 よりも薄く柔らかくした。接合部の段差を小さくすることで接合部の段差によって起こる靴ずれは全部ではないが概ね解消することができた。

三角カン

厚みを足すことで耐久性を持たせた。また、痛みを軽減させるために角や縁を丸くし、素材は PLA ではなく TPU を用いた。このアップデートで三角カンによる靴ずれは解消された。

アジャスター

Version 1.0 と同様、既製品で代用。

4-4-3. Version 3.0

全てのパーツが TPU で 3D プリントされたもの。Version 2.0 ではまだ安定しなかったソールやベルトの出力設定も安定し、個体差を抑えることができた。



[Fig.4-4-4] xCloud Sandals (Version 3.0)

ソール

形状自体は Version 2.0 と同じ。パラメータを全体的に揃えて出力を安定させた。

筆者好みの設定はインフィルの密度 12%（柔らかめ）または 15%（硬め）、top layer 1.2mm 程度、bottom layer 1mm 未満である。

ベルト

ベルトは 0.8mm とさらに薄く柔らかくした。積層ピッチを 0.16mm にし、0.8mm で 5 層できるように設定した。Version 1.0 と 2.0 と同様にレイヤーの厚みが 0.2mm だと 4 層しかできず、一番上のレイヤーが縦か横になってしまい見栄えが良くないため、積層ピッチを小さくすることで全体の厚みを変えずに層数を増やした。ベルトの接合部の段差による靴ずれは Version 2.0 と比べて解消できたものの、まだ完全には解消できていない。

三角カン

Version 2.0 と同様。

アジャスター

既製品をもとに設計し、TPU で出力した。既製品のプラスチック製のアジャスターはベルトを強く固定するための細かい凹凸が裏にあるが、FFF 方式の 3D プリンタで綺麗に出力するのは厳しいと判断し、3D プリンタで出力しやすい形に設計した。結果として、凹凸がなくても素材同士の摩擦でサンダルに必要な固定力は得られた。

4-4-4. Version 3.5

単一素材のリサイクル可能な 3D プリントサンダル。データ自体は Version 3.0 と同じものだが、Version 1.0~3.0 で使用していた接着剤は一切使用せず、はんだごてで溶接した。これまではベルトの接合部の段差による靴ずれがあったが、溶接して段差をなくしたことで完全に解消された。また、後ろのストラップを二重に重ねて接着していたものも 1 枚になり、柔らかくなった。



[Fig.4-4-5] xCloud Sandals (Version 3.5)



[Fig.4-4-6] xCloud Sandals (Version 3.5)の接合部

5. オープンデザインの実践

5-1. 公開の準備

5-1-1. データのファイル形式

サンダルを製作するのに必要な部品の 3D モデルを STL と STEP という中間ファイル形式と、3D プリンタを直接制御する G-code 形式にして Google Drive にアップロードして公開した。

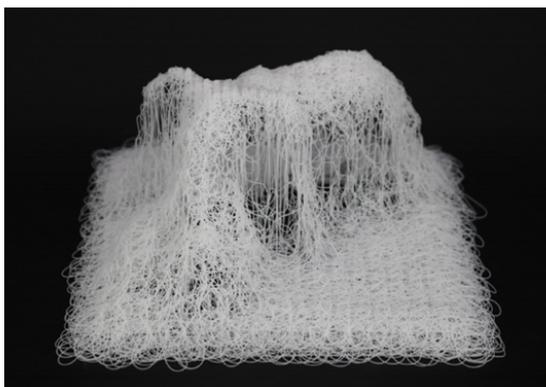
中間ファイル形式とは、異なる CAD 間でデータの交換ができるように開発されたファイル形式である。保存されるのは設計した造形物そのものの情報のみで作業環境は移植することができないが、相手のソフトウェア環境を気にすることなくデータを配布することが可能である。

STL (Standard Triangle Language) は、3D Systems によって開発された 3 次元形状のデータを保存する、中間ファイル形式のことである。STL は 3D プリントをする上での標準形式となっており、ほぼ全ての CAD ソフトウェアでの読み込みや書き出しが可能であるため、今回の 3D データの公開と配布に適切だった。

STEP または STP (Standard for the Exchange of Product Model Data) は、STL と同様の中間ファイル形式である。ISO (国際標準化機構) によって開発された 3D CAD データのファイル形式であり、国際標準として普及が進んでいるため、ほぼ全ての CAD ソフトウェアが対応している。配布データの汎用性を高めるために、STEP ファイル形式での公開も行った。

STL や STEP の他にも、Wavefront が開発した OBJ (面データに加え、テクスチャの情報も保持できるファイル形式) や、PLY (polygon file format) などがある。

G-code は、CNC (コンピュータ数値制御、Computerized Numerical Control の略) や FFF 型 3D プリンタを動かすためのプレーンテキストによる言語である。STL などの 3D データをスライサーソフトに読み込み、そこで 3D プリンタの温度や速度などの設定をした後、3D プリンタで出力可能な G-code に変換して 3D プリンタで造形することが多い。G-code を直接書いて 3D プリンタを制御して造形されたもの [Fig.5-1-1][Fig.5-1-2] もある。



[Fig.5-1-1] 『BOA』 名倉泰生,
慶應義塾大学田中浩也研究室 (2018)



[Fig.5-1-2] 『Peelable FAB』 若杉亮介, 森瑞貴,
慶應義塾大学田中浩也研究室 (2018)

多くの FFF 型 3D プリンタは G-code で動くため、今回は G-code のデータも用意し、公開した。G-code を共有することによって、スライサーソフトでの出力設定を省き、3D データを直接 3D プリンタで造形することができる。一方、造形物が大きいと物理的に出力できない 3D プリンタが出てくることがある。その場合、造形サイズや 3D プリンタの機種を指定した上で共有したり、造形のパスを考慮してデータを作成したり、配慮をした方が親切である。今回は、特定のスライサーを用いて生成されたものや、多くの 3D プリンタの造形範囲内に収まる小さい部品などの 3D データを G-code で共有した。尚、使用した 3D プリンタの機種は 4 章に記載している。

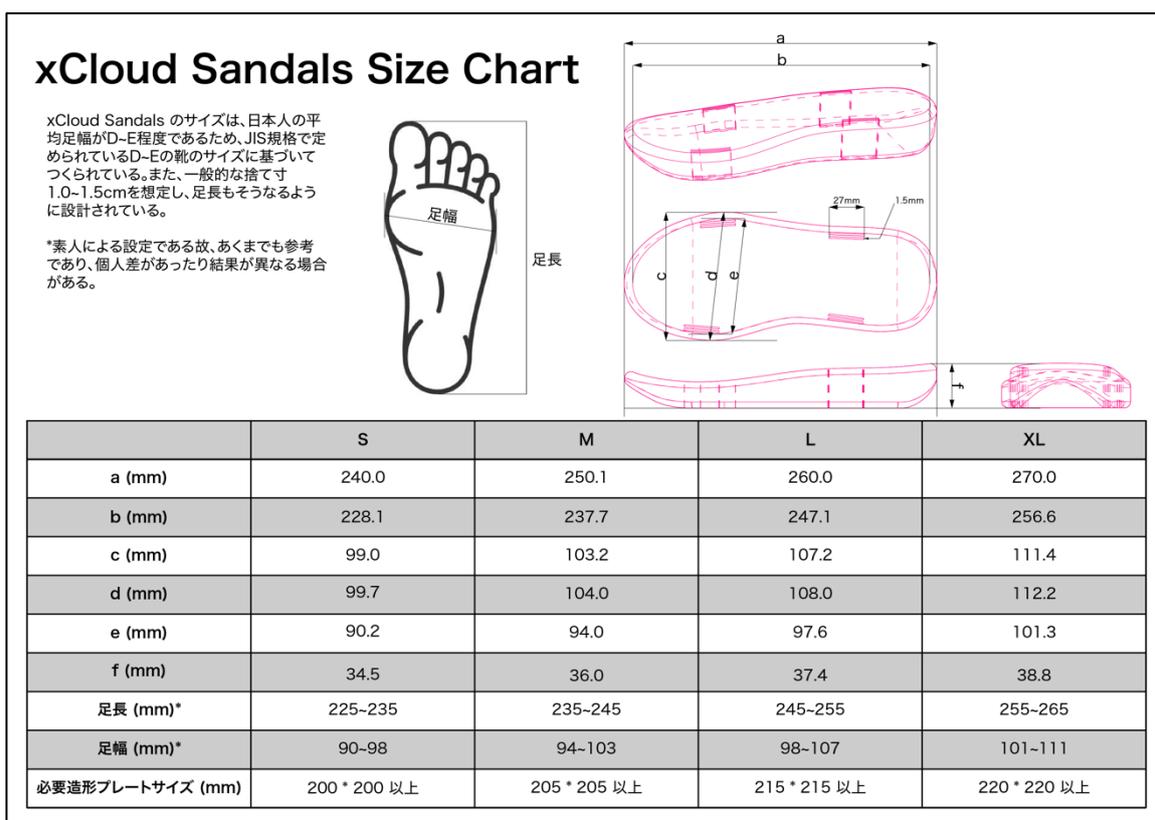
5-1-2. 用意したデータ

用意したデータは以下の通り。

部位	内容
ソール	スリットあり：S、M、L、XL（左右）（STL、STEP）
	スリットなし：S、M、L、XL（左右）（STL、STEP）
ベルト	長さ 20cm の STL、STEP
	長さ 25cm の STL、STEP
	長さ 20cm 1 本分出力できる G-code（造形ベッドが 210*210mm 以上の 3D プリンタ対応）
	長さ 20cm 6 本分出力できる G-code（造形ベッドが 210*210mm 以上の 3D プリンタ対応）
	長さ 25cm 1 本分出力できる G-code（造形ベッドが 210*210mm 以上の 3D プリンタ対応）
	長さ 28cm 9 本分出力できる G-code（造形ベッドが 300*300mm 以上の 3D プリンタ対応）
三角カン	STL、STEP
	1 個出力できる G-code
	6 個（両足に必要な分）出力できる G-code
アジャスター	STL、STEP
	1 個出力できる G-code
	2 個（両足に必要な分）出力できる G-code

ソール

ソールはS、M、L、XLの4サイズを展開し、それぞれの細かい寸法や造形に必要な3Dプリンタのベッドサイズを指定し、[Fig.5-3]のような表にまとめた。ユーザーがそれぞれの好みに合わせて柔らかさを変えてつくってほしいという狙いから、3Dプリンタを直接制御するG-codeはあえて用意せず、STLとSTEPでのデータのみを用意し、各自でスライサーを用いてInfillの密度を設定するような仕組みにした。また、ベルトのサイズや形、アッパーのデザインなども自由に変えられるように、ソールにベルトを通すスリットがないものも用意した。スリットがあるものとないものをそれぞれ4サイズ、左右用意した。



[Fig.5-3] xCloud Sandals サイズ表

ソールのサイズについて

日本人の平均足幅がD~E程度であるため、xCloud Sandalsの4サイズもJIS（日本産業規格）で定められているD~Eの靴サイズに基づいてつくられている[28]。足長は一般的な捨て寸（つま先と靴の間の隙間）1.0~1.5cmになるように設計した。最初につくったものをMサイズと設定し、これを基準にS、M、X、XL、計4サイズに展開した。普段の靴サイズをもとにxCloud Sandalsのサイズを選択すると、同じ靴サイズでも男女で寸法が若干異なり誤差が生じるため、足長と足幅の実寸をもとにサイズを設定している。

ベルト

ベルトは、STLとSTEPに加えて、G-codeも公開している。G-codeは、以前に筆者が有料スライサーソフト Simplify3D のハニカム構造でベルトを製作したものである。3Dプリンタの造形範囲によって出力可能なベルトの長さが異なるため、G-codeデータには使用3Dプリンタのベッドサイズを指定して公開している。

その他

ベルトと同様に、三角カンとアジャスターはSTLとSTEPに加えて、G-codeも公開した。それぞれサイズが小さく広い造形範囲を必要としないため、3Dプリンタのサイズは特に指定しなかった。また、1足のサンダルに必要な個数分出力できるG-codeも用意した。

5-2. Fable への投稿

4章で記述したような「つくりやすさ」を重視した設計と製作をした、公開用のデータを揃えた後、Fable（ファブル）でつくり方をまとめ、Twitterで告知を行った。Fableは「FAB」プロジェクトのためのドキュメンテーションサービスであり、製作のメモ書きや、製作物を再現するための情報（レシピ）などを掲載することが可能である。Fableは、個人のポートフォリオや課題、グループワークなどに使われることが多く、公開したプロジェクトの内容は世界中に発信され、共有される。



[Fig.5-2] Fable に投稿したプロジェクト（左）と、それを宣伝したツイート（右）

Fable には、5-1-2 で記述したデータをダウンロードできるリンク、製作に必要な道具や素材、製作手順を載せた。また、つくる人の参考になるように、使用した機材や素材

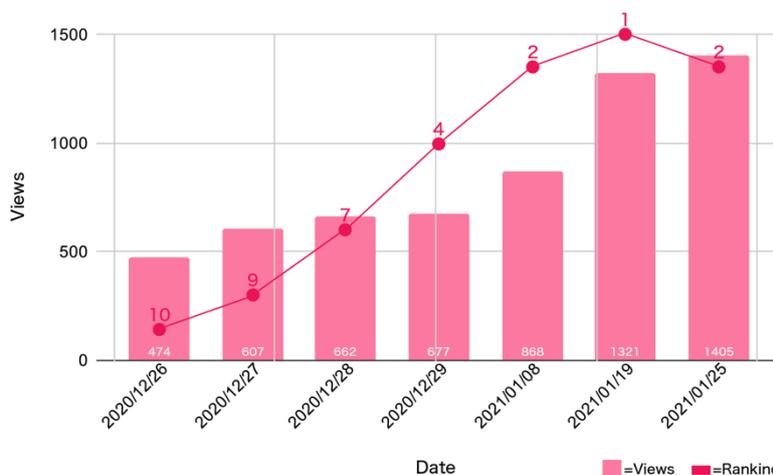
に関するリンクを貼り、最初に配布したデータについての説明や選び方、足の採寸の仕方などを記載した。

5-3. 公開後の反応

2020年12月24日に公開し、約1ヶ月間で閲覧数1462回を達成（2021年1月29日現在）。過去1ヶ月でアクセスが多かったプロジェクトがランクインする「Popular Projects」のランキングでも、公開から約2日で10位、2週間後には2位、2021年1月19日に1位にランクインした。



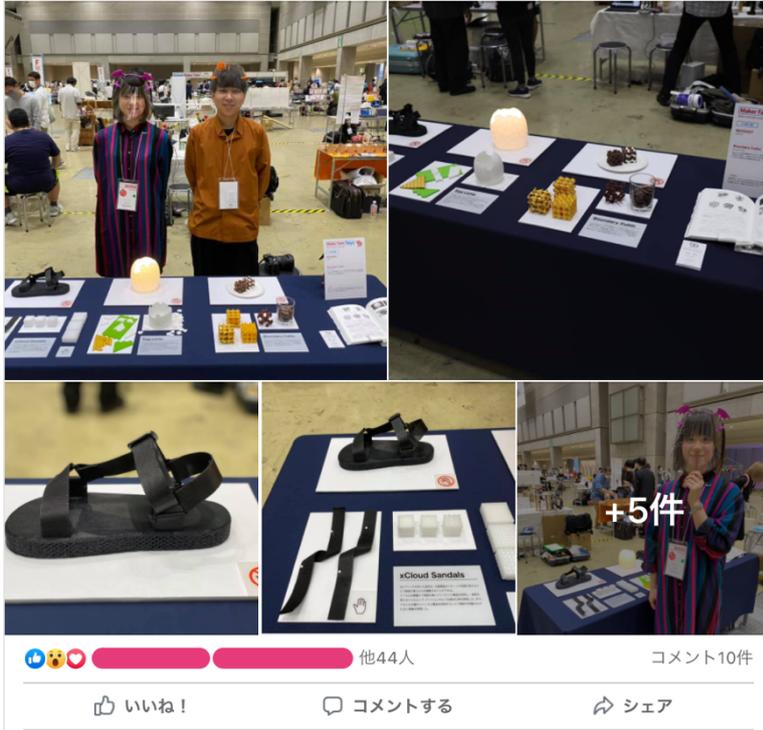
[Fig.5-3-1] 2021/1/19にランキング1位に入った様子



[Fig.5-3-2] 閲覧数とランキングの変動をまとめたグラフ（2020/12/26～2021/1/25）

Fable 以外でも、Twitter や Facebook などの SNS での投稿で 3D プリンティングに詳しくない人にも 3D プリントシューズの存在を広めることができ、3D プリントシューズは「自分でつくって実際に履けるもの」であることを拡散することができた。

3Dプリンタでつくったサンダルを履きながらmaker faire Tokyo 2020 で展示しました
 ソール、ベルト、三角カン、全部3Dプリントです(バックルだけ既製品)
 みんなベルトに感動してくれました
 明日もいるので暇な人は来てください



3Dプリンタでサンダル作った！
 ちょっとグレードアップした！
 真っ白！❤️



午後11:04 · 2020年11月13日 · Twitter for iPhone

ツイートアクティビティを表示

19 件のリツイート 5 件の引用ツイート 236 件のいいね

3Dプリンタでつくったサンダル、かっこよく撮ってもらったー！！！！
 寒かった、

つくりかたfabbleに載せたので見てみてください
fabble.cc/mippu/xcloudsa...



午後9:34 · 2021年1月14日 · Twitter for iPhone

ツイートアクティビティを表示

18 件のリツイート 2 件の引用ツイート 141 件のいいね

[Fig.5-3-3] Facebook の投稿や Twitter でツイートしたものの一部

5-4. ユーザーテスト

オープンデザインの体験として、自宅にTPUが出力できるFFF方式の3Dプリンタを所持している人7人にデータを配布し、Fabbleに投稿したレシピをもとにサンダルの製作をしてもらい、製作後にアンケートでそれぞれの体験について調査した。

5-4-1. 他のユーザーによる製作物



(順不同)

1.



出力サイズ	S (普通の靴のサイズ 23.0~23.5cm)
使用素材	TPU (Pxmalion)
使用機材	Ender-5 (造形範囲: 220*220*250mm)
製作時間	出力約 3 日、組み立て約 1 時間

2.



出力サイズ	S (普段の靴のサイズ 23.0cm)
使用素材	TPU (Pxmalion)
使用機材	Creality Ender-5 (造形範囲：220*220*300mm)
製作時間	35～40 時間

3.



出力 サイズ	M (普段の靴のサイズ 25.0~25.5cm)
使用 素材	TPU (SainSmart)
使用 機材	Ender-3、 M3D Crane Quad (造形範囲： 220*220*250mm)
製作 時間	出力約 26 時間、 組み立て約 6 時間



4.



出力サイズ	M (普段の靴のサイズ 24.5cm)
使用素材	TPU (SainSmart)
使用機材	Ender-5 (造形範囲：220*220*250mm)
製作時間	出力約 12 時間 (細々としたパーツ約 6 時間)、 組み立て約 3 時間

5.



出力サイズ	L (普段の靴のサイズ 27.5cm)
使用素材	TPU (透明 : Pxmalion、黒 : Pxmalion、Ankun)
使用機材	Anet A8 PLUS (造形範囲 : 350*350*500mm)
製作時間	出力 38 時間、組み立て 3 時間

6.



出力サイズ	S (普通の靴のサイズ 22.5cm)
使用素材	TPU (SainSmart)
使用機材	Anycubic Mega S (造形範囲：210*210*205mm)
製作時間	出力約 30 時間、組み立て約 30 分

7.



出力サイズ	XL (普段の靴のサイズ 26.0cm)
使用素材	TPU (SainSmart)
使用機材	Anycubic Mega X (造形範囲：300*300*305mm)
製作時間	出力約 50 時間、組み立て約 1 時間

5-4-2. アンケート結果・分析

被験者 7 人に以下について調査した。

	調査内容
1	使用機材と使用素材
2	普段履いている靴のサイズと出力サイズの関係
3	製作の着眼点
4	色やデザインなどに関して工夫した点
5	難しいと感じたところ
6	失敗のしやすさ
7	改善してほしい点・あればもっとよかったもの
8	レシピのわかりやすさ
9	よかった点
10	つくったものを履いて歩いてみた感想
11	新しく学んだこと
12	自分の創作活動・研究活動への影響
13	感想・コメントなど

1. 使用機材と使用素材

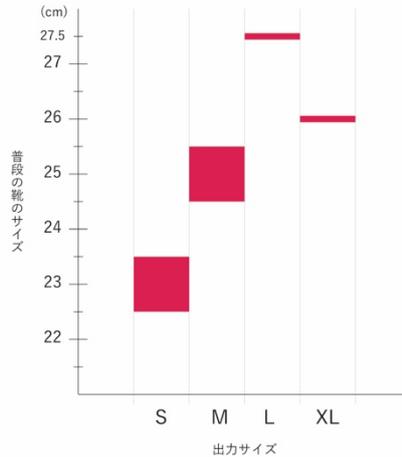
使用した 3D プリンタの機種と、サンダルの製作に使用した素材を全て回答してもらい、以下のような結果になった。

使用機材		使用素材	
機種	人数 (人)	メーカー (素材)	人数 (人)
Ender-5	3	SainSmart (TPU)	4
Anet A8 PLUS	1	Pxmalion (TPU)	3
Anycubic Mega S	1	Ankun (TPU)	1
Anycubic Mega X	1	Pxmalion (PLA)	1
Ender-3	1		
M3D Crane Quad	1		

使用機材は Ender-5 が最も多く、計 6 種類の 3D プリンタが今回の製作に対応できた。使用素材は SainSmart の TPU が最も多く、次に Pxmalion の TPU が多かった。中には PLA と組み合わせて製作する人もいた。

2. 普段履いている靴のサイズと出力サイズの関係

普段履いている靴と、xCloud Sandals の出力サイズの関係进行分析するために、普段履いている靴のサイズと出力したサイズを調査し、以下のような表にまとめた。



[Fig.5-4] 普段履いている靴のサイズと xCloud Sandals のサイズの関係を示す表

xCloud Sandals の各サイズは、今回の製作では、狙っていた層を概ねカバーすることができた。しかし、今回の調査では母数が小さいため断言できないため、今後は母数を増やして再度調査したい。

3. 製作の着眼点

ソール、ベルト、三角カン・アジャスターを製作する際に、どのような点に着目したのかを調査した。設定した値や加えた工夫点とその意図をアンケートで回答してもらい、それぞれの回答を4つの指標「機能性」、「意匠性」、「装着感」、「生産性」に分類した。4つの指標はそれぞれ、以下のことを指す。[29]

- 機能性：強度、機能の工夫、それぞれのパーツの機能に関すること
- 意匠性：色やデザインなど見た目に関すること
- 装着性：フィット感や履き心地に関すること
- 生産性：製作速度、工程数など、製作に関すること

3-1. ソール

まずは、ソールについて調査した。ソールの「設定密度とその理由」と「その他工夫点」を回答してもらい、以下のような結果になった。

設定密度 (%)	理由	分類
10	出力時間を早めるため	生産性
10	出力時間を早めるため	生産性
10	柔らかい踏み心地を体感してみたかったため	装着性
10	柔らかめの踏み心地をつくるため ソールの側面のジャイロイド構造を見やすくした（「色やデザインなどに関して工夫した点」より）	装着性 意匠性
12	低反発なサンダルはなかなか無いので、試してみたいと思ったから。	装着性

15	バランスが良さそうだったから。	機能性
16	しっかりとクッション性は感じるけど柔らかすぎず硬すぎない丁度良いクッション性だったから。	装着性

その他工夫点		分類
厚底が好きなので、かかとの高さを1cm上げた		意匠性

「柔らかい踏み心地を体感する」、「柔らかめの踏み心地をつくるため」など、「装着性」に注目して低めに設定する人が多かった。その次に多いのが「意匠性」と「生産性」に着目した設定で、密度を低くジャイロイドを大きくすることで内部構造が見えやすくしたり自分好みの高さに変更したりすることで見た目を工夫する人や、出力時間がなるべく短くなるようにする人が多かった。

3-2. ベルト

次に、ベルトの製作の着眼点について調査するために、「使用したデータ」、「つくり方」、「設定したインフィルパターン・密度とその理由」、「その他工夫点」をアンケートで回答してもらい、ソールと同様、それぞれの回答を4つの指標「機能性」、「意匠性」、「装着感」、「生産性」に分類した。

インフィルパターン	設定密度 (%)	理由	分類
ハニカム	90	中間ぐらいを目指した	機能性
ハニカム	90	時間と耐久度のバランスを取りました	生産性 機能性
ハニカム	90	既存のデータを使用しました。	-
ハニカム	90	配布された g-code を使用した	-
ハニカム	90	説明書どおり、指定された設定でやった。	-
ハニカム	90	既製品で代用した	-
ハニカム	90	標準データを使用	-

その他工夫点		分類
ベルトに任意の色付けをしたかったため、層ごとに使用するフィラメントを変えた。 (透明無色、透明青、透明ピンクの層を混在させ、半透明紫のベルトを作った)		意匠性

ほとんどが配布データ（ハニカム構造・90%）を使用し、結果として全員がハニカム構造の90%を用いたという結果になった。今回は、自分でスライス設定する際に「機能性」を重視する傾向にあった。また、配布した G-code に色を指定する指令を書き加える工夫もあったのが興味深い。

4. 色やデザインなどに関して工夫した点

今後、新しい色や構造を展開することを考えていたが、それが本当に必要かどうかの参考のために、ユーザーがどのような思考を経て、色やデザインを決めているのかを調査した。

色やデザインなどに関して工夫した点
色は、自分が持っている色の中から相性の良さそうな色合いを試しました。
tpuを2色切り替えて出力してみたんですけど色的にキシリツールすぎて不採用にしました、
ストリート系のおしゃれな形状を見て、ポップな色のものを作りたいと思った。市販のフィラメントの色のまま出力してしまうと派手になりすぎてしまうので、層ごとに使用する材料を切り替えることで任意の色を作り、綺麗に見えるように工夫した。
真っ黒のサンダルは持っていたのでバックルと三角カンの色を変えた。
普通に真っ白で作ってしまいました。(特に工夫は無かったです)
手持ちの真っ黒なサンダルと比較してみたかったですべて黒にした。
踏み心地のためにインフィルを少なくしたが、もう1つの狙いとして密度が低いことでソールの側面のジャイロイド構造を見やすくした

手持ちのサンダルと比較して色を決定したり、既にあるフィラメントでやりくりをしたりすることでデザインを工夫したのが見られた。

5. 難しいと感じたところ

レシピの改善や全体のプロセスの改善のために、難しいと感じたところを調査し、どの過程に当たるか分類し、以下のような結果となった。

難しいと感じたところ	過程
自分のプリンターだとスリットがリトラクトで潰れてしまうので、そこを通すのが難しかった。	ベルト
ソールの範囲が広い分、全面を吸着させるためのレベリングが大変でした。	キャリブレーション
靴の組み立てに時間がかかった。接着剤の扱いが難しかったために時間がかかったが慣れれば早く作れると思う。	組み立て 接着
アロンアルファが白くなってしまうのが大変でした。黒の素材はとても目立つので皮膚が触れないようになるべく気をつけていました、、、	接着
個人的なお話でしたがプリンタを買って初めてのフレキシブル素材でしたのでキャリブレーションが大変でした。	キャリブレーション
あとベルトなどをつけるときに、どれくらいの締め付け感にすればいいかわからなかったです。ここで締め付けすぎると歩くとき痛いかな、緩すぎても疲れるかな、とかなり微調整を加えました。	ベルト
出力が上手くいかず、やり直しが多かった。出力に時間がかかるので、見張ってなきゃいけないのも含めて大変だった。	出力
ベルトを制作する際の三角カンの位置や角度決めに若干戸惑った。	ベルト
靴の組み立て	組み立て

今回の調査でユーザーが難しいと感じた点はほぼ共通しており、「ベルト締め付け具合、三角カンの位置」など、ベルトに関することと、接着に関する事が多かった。ま

た、ソールもベルトも広範囲での出力であるため、そのキャリブレーションが大変だったという声も複数あった。

6. 失敗のしやすさ

データそのものの改良のために、それぞれが失敗した回数について調査し、以下のような結果となった。

ソール		ベルト		三角カン・アジャスター	
失敗した回数(回)	人数(人)	失敗した回数(回)	人数(人)	失敗した回数(回)	人数(人)
0	3	0	4	0	7
1	1	1	1	1	0
2	1	2	0	2	0
3	1	3	1	3	0
不明	1	不明	1	不明	0
平均* 1.5回		平均* 1.0回		平均 0回	

*ただし、平均は、「不明」を除く

ソールは大きく出力時間も長いため、失敗しやすいことがわかった。また、「インフィルの硬さが、フィラメントの出具合に左右されてしまった」という声もあった（回数の回答はなかった）。また、ベルトは、「ベッドサイズが異なるものを無理やり印刷しようとしたら失敗した」、「ベッドに綺麗にくっつけられなかった」などという声があった。

7. 改善してほしい点・あればもっとよかったもの

今後の改善のために、「改善してほしい点」と、「あればもっとよかったもの」を回答してもらい、それぞれがどのようなものかを分類した。

改善してほしい点	分類
ベルトが地面と接するのが耐久度的に不安かと思いました。	設計
データの編集をすることを考えると、(ライノユーザーにとってはですが)stl よりも.3dm データがあると嬉しいです。	データ
バックルからベルトが抜けてしまったので、ベルトの片面に滑り止めの凹凸を加えたいと思った。	設計
足の甲を止めるベルトの位置をスライダーとかで動かせるといいなと思った。私は後ろの方がやや余った。	設計
歩くとベルトの硬さによっては少し痛いと感じたので、柔らかめが良さそうだなと思いました。	設計
インソール形状も含めてサンダルをパラメトリックモデル化すれば、スマホで足の写真を撮って自分の足に(合った/矯正)形状を生成するみたいなことも不可能ではなさそう。	設計
靴の組み立てに関しては、この工程では何をつくるのか、また工程に必要な材料が都度説明してもらえると更にわかりやすいと思う	レシピ

あればもっとよかったもの	分類
ソールの 3dm データ	データ

スリットなしのデータを使った例が見てみたいです。	サンプル
「1cm 残す」などの指示が、写真でも視覚的に示されているとよりわかりやすくなると思った。	レシピ
作ってる時の動画はがあると嬉しいです。みっぶさんがどうやってベルトをフィッティングしてるのかやバックルの使い方は動画をみたいなと思っていました。	レシピ
ベルトの接着方法	レシピ
どういうパーツを改変すると、どう変わるのか、いくつか提示してもらえると更にわかりやすい。	レシピ
靴の組み立てに関しては、この工程では何をつくるのか、また工程に必要な材料が都度説明してもらえると更にわかりやすいと思う	レシピ

各工程のより細かい指示や必要材料の記述、写真や製作動画などでの視覚的な指示するなど、レシピの改善策が最も多く挙がった。アジャスターやベルトなど、設計に関する改善策も多く挙がったため、設計の見直しをする必要があると考えた。他にもデザインサンプルやモデリング可能なデータの公開などが挙げられた。ユーザーテストが行われた後にSTEP データを公開したため、ユーザーテスト期間はモデリング可能なデータがなかったと考えられる。

8. レシピのわかりやすさ

レシピのわかりやすさについて調査した。「わかりやすい」が5、「わかりにくい」が1、というように、わかりやすさを5段階評価で回答してもらった。

評価	人数 (人)
5-わかりやすい	3
4-ややわかりやすい	1
3-普通/どちらでもない	3
2-ややわかりにくい	0
1-わかりにくい	0

5や4と答えた人が多く、1や2と答える人はいなかったものの、「普通」または「どちらでもない」を意味する3と答える人もほぼ同数だったため、レシピをよりわかりやすくするための改善や工夫が必要だと考えた。

9. よかった点

今後も持続していくべき要素を抽出するために、「よかった点」について調査し、それぞれがどのようなものか分類した。

よかった点	分類
思っていたよりふわふわで楽しかったです！初めての感覚でした。	装着感
スリットの位置がよくて履き心地が良い。また、組み立て時に調整がきくためぴったりフィットしたサンダルが作れた。靴擦れしなさそう。	装着感

思ったより丈夫で、撮影の日ずっと履いて歩き回っていたけれども痛くもないし壊れなかった。	装着感 耐久性
しっかりサンダルだったので初めて履いた時感動しました。	装着感
自分に合った長さでベルトを作れるのはかなり強みだと思った。	カスタマイズ性
3D プリンタの家庭用の用途では大抵、家の便利グッズなどの範疇におさまりがちだが、今回の靴制作は家庭での 3D プリンタの用途が広がったように感じた。 工程もシンプルなので、アレンジがしやすい。	将来性 カスタマイズ性

主に「ふかふか・ふわふわ」な踏み心地がよかった点として挙げられた。また、「自分に合ったものをつくれる」、「アレンジがしやすい」、など、カスタマイズ性も強みだと挙げられていた。

10. つくったものを履いて歩いてみた感想

それぞれが自分でつくったサンダルを履いて歩いてみた感想について調査し、回答は以下の通りである。

つくったものを履いて歩いてみた感想
とても履き心地がよかったです。クッション性のコントロールも楽しかった。
一歩毎の沈み込みが楽しかったです。マットレスに高反発低反発あるように、インフィル率によって姿勢とか土踏まず育成とか健康面にも影響しそうだなと思いました。
今までにないふかふか感で不思議な気持ちだった。ヒールで一日中歩いて急に脱いだ感じ(?)でも疲れなからずと歩けるなと思いました。 柔らかすぎると潰れてしまったり表面が裂けてしまいそうなので次はもう少し固めのも作りたいです。 あとはフィラメントを変えるだけで簡単に色がカスタマイズできるのが楽しかったです。フィラメントの色がなかったのでチャレンジできませんでしたが、かかとのベルトだけ色を変えるなどもしてみたいです。
ソールが足の曲がり具合に合わせて曲がればもっと歩きやすそうだなと思いました。
アスファルトの上なのに柔らかいスポンジの上を歩いているような感覚に感動した。
既存の靴に比べて、踏み心地の良さがハッキリわかる

ここからも、履き心地とカスタマイズ性が強みだということが読み取れる。また、再びつくってみたい、という前向きな意見もあった。

11. 新しく学んだこと

オープンデザインの価値として、ものづくりの経験を通して新たな学びがあるということを挙げている。この体験を通して、新たに学んだことがあればそれはどのようなものかを調査した。

新しく学んだことがあれば教えてください (任意)
ソールのジャイロイドを、どれぐらいの密度にすると、どれぐらいの反発性になるかが学びになりました。
tpu で既製品のようなベルトを出せるのが本当に驚きでした、他分野で応用が効きそう。
柔らかいシート材を生成する際のスライス設定を学んだ。(ベルトの柔らかさに感動しました!!)

<p>去年のデジファブの授業で靴を作った身としては実際に生活で使えるレベルの靴を作るには接合部などこれくらい丁寧に作らなくてはいけないのだなと改めて実感しました。</p> <p>スライス設定の点では、ベルト部分の柔らかさと強度にかなり感動し、勉強になりました。見た目も既製品そのもので驚きました。</p>
<p>スライス設定、フィラメントが出ない時の対応、途中で止まってしまった際に途中から再出力するためのgcodeの編集</p>
<p>サンダルのおおまかな構造</p>

今回の靴づくりを通して、靴のことに加えて、ベルトの生成やスライス設定について学びを得た人が多かった。

12. 自分の創作活動・研究活動への影響

オープンデザインの価値として、他分野でも体験したことが活かせる、個々の創作活動や研究活動にも役立てることができる、など、他の活動のサポートをする、というのを挙げている。自分の創作活動や研究活動などに役に立つかどうかを調査し、「思う」が5、「思わない」が1、というように、5段階で評価してもらった。

評価	人数 (人)
5-思う	3
4-少し思う	3
3-普通/どちらでもない	1
2-あまり思わない	0
1-思わない	0

「思う」・「少し思う」と答えた人が半数以上で、少なからず今回体験したことは多くのユーザーにとって実りのあるものだったと捉えた。

13. 感想・コメントなど

感想・コメントなど (任意)
<p>FDM だけで、実用レベルにクオリティの高いサンダルを作り、作り方も含めてデータとして全世界に広めたのはとてもすごいと思いました。</p>
<p>ふわふわな靴が初めての体験で新鮮でした。ベルトの gcode をいじって模様を作ったりバックルのデザインを変えたり、カスタマイズ要素が多くあるのが楽しいです。</p> <p>足のサイズ表を見て測定箇所の多さに驚きました。普段〇〇cm という基準で靴を選んでいますが、幅や厚みが基準と一致するわけではないので、自分の足のサイズに合わせてデータを変更できるのは良いなと思いました。楽しかったです！</p>
<p>必要最低限のパーツで、履き心地の良い靴を制作できて感動した。STL を公開しているので、各々のニーズに合わせて作り変えられる点も良い。</p>
<p>私も 3D プリンタで靴を制作する研究をしているので、シート材の作り方などとても勉強になりました。また色を変えて是非作りたいと思いました。来年の夏に自分で作ったサンダルで出かけるのが目標です。</p>

5-4-3. 考察・展望

本研究では、オープンデザインを通して、3D プリントシューズを広めることと、オープンデザインの思想を参加者と共有することが目的だった。今回のオープンデザインの実践では、3D プリンティングに詳しくない人にも 3D プリントシューズは「つくって履けるもの」だということを広めることができ、ユーザーテストでは靴づくりを通してオープンデザインの思想や提供する価値を共有することができた。これを踏まえて、目的は概ね達成できたのではないかと考える。

また、ユーザーテストを通して、xCloud Sandals の強みは「良い踏み心地」と、アレンジがしやすい「カスタマイズ性」だとわかった。これらの強みを活かすためにも、ソール・ベルト・アジャスターの設計の見直し、新しい色やデザインのサンプルの展開、組み立ての工程ごとの細かい説明や必要な材料の明記、写真や製作動画など視覚的な指示の追加、などを今後の改善策として考えている。このような改善をすることによって、よりつくりやすく、質の良いもの、再びつくりたくなるような 3D プリントサンダルを目指し、今後もさらにこのオープンデザインプロジェクトを活性化させたい。

5-5. 派生プロジェクト

「テクストラクチャによる多様な踏み心地の探究」

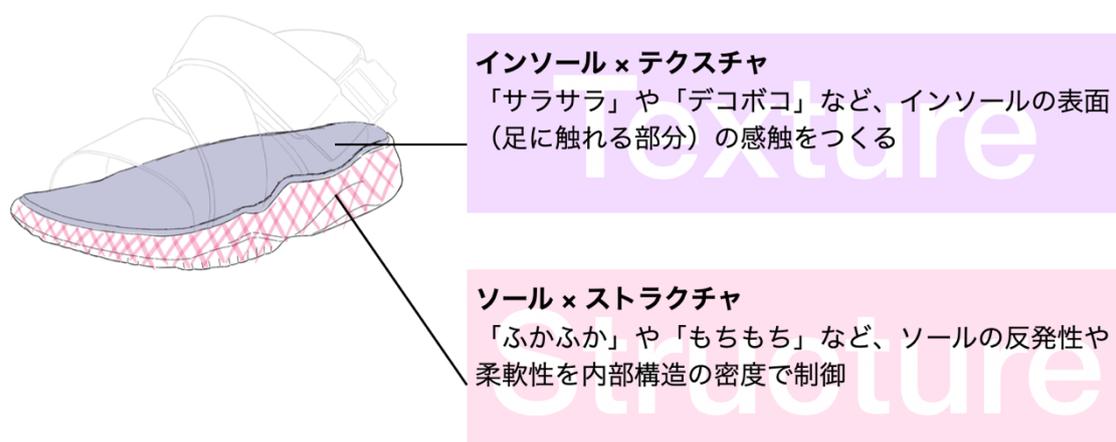
筆者に加え、同研究室のメンバー齋藤敬介さんと大平麻以さんによる、「テクストラクチャによる多様な踏み心地の探究」の研究を紹介する。このプロジェクトは2020年度慶應SFCエキセントリック・リサーチ奨励制度採択プロジェクトであり、本研究から派生したものである。

5-5-1. 概要

これまでデザインされた靴によって、人間の様々な「地面を踏む経験」は阻害、単一化されてきた。そこで、「地面を踏む経験」をつくり出し、ユーザーが自分の好きな踏み心地を選んで生活する、新しいライフスタイルを提案する。また、家庭用3Dプリンタのみで製作することで、個人の環境で製作できるようにし、その実現を目指す。今回は、靴を「表面のテクスチャ」と「柔軟性を制御するストラクチャ」の二層で考えて実際に履けるものを3Dプリンタのみで製作し、ユーザーテストを通してどのような踏み心地が実現されたかを調査した。

5-5-2. テクストラクチャ

テクスチャは、「ボコボコ」や「サラサラ」などの表面の質感や手触りなどを指し、ストラクチャは、「ふかふか」や「もちもち」などの柔軟性や反発性を制御する。この2つを組み合わせたものを「テクストラクチャ (texstructure)」と呼ぶ。靴の「踏み心地」は、テクスチャとストラクチャの二層で構成されていると仮定し、両者をパラメトリックに変化させて組み合わせることで、様々な「踏み心地」をつくり出した。



[Fig.5-5-1] テクストラクチャの図

5-5-3. 製作

テクスチャ×インソール

足の裏が靴に直接触れるインソールに実際に存在するテクスチャを参考にし、畳、砂利、芝生、砂浜の4種類を製作した。

①畳



②砂利



③芝生



④砂浜



①畳

上に向かってアーチを描き、アーチの境目に溝をつくることによって、畳の形状を再現した。

②砂利

砂利道のような大小様々な丸い粒を敷き詰めた。

③芝生

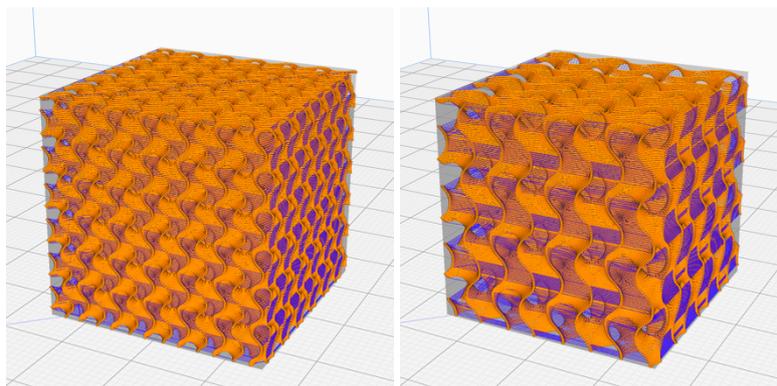
芝生の形状の特徴を地面から上に向かって伸びる無数の細くて柔らかい線と捉え、空中で樹脂を吐出することでできる不規則な曲線を利用して芝生を再現した。

④砂浜

砂浜はその時の天候によって状態が変化するが、便宜的にランダムな高低差のある形状と仮定して製作した。

ストラクチャ×ソール

ストラクチャの制御は、サンダルのソールのインフィルの密度に変化をつけることで柔らかさを調節することができる（詳しくは4-3-1参照）。今回は、柔らかいもの（インフィル12%）と硬いもの（インフィル20%）の2種類を用意した。



[Fig.5-5-2] Cura Gyroid Infill 12% (左) と Infill 20% (右)



[Fig.5-5-3] Cura Gyroid Infill 12% (左) と Infill 20% (右)

インソールとソールはそれぞれ製作後もつけ外し可能にし、8種類のテクストラクチャを体験できるようにした。

①畳



②砂利



③芝生



④砂浜



5-5-4. 「踏み心地」の実験評価と結果

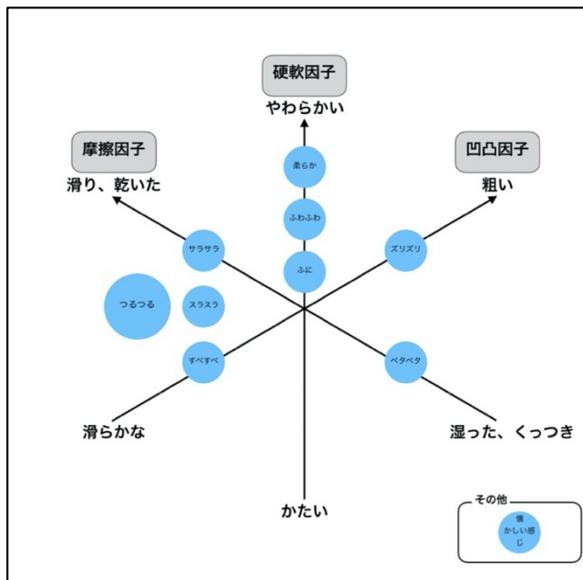
テクストラクチャによって、どのような踏み心地をもたらすことができるのか検証するため、サンダルとして履ける形になったものをユーザーに実際に履いてもらい、「踏み心地」を評価してもらった。具体的には、被験者（7名）に、踏み心地の異なる8種類のサンダルを履いた上で、その場で歩いてもらい、「オノマトペで表現すると何になるか」、「何の踏み心地に似ているか」を自由記述式で回答してもらった。

結果

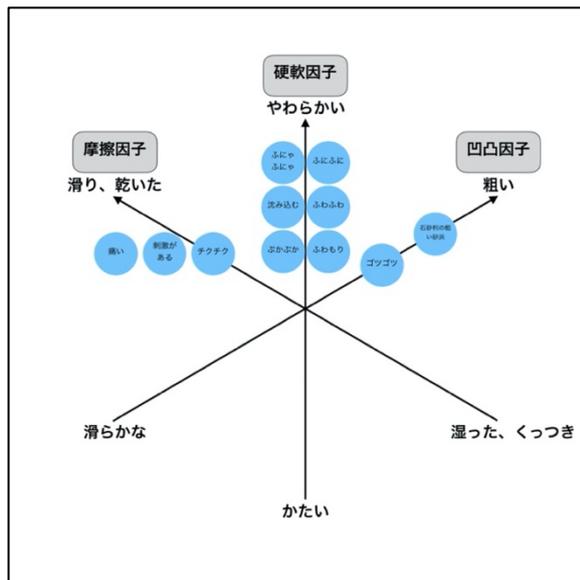
8種類のテクストラクチャーに対する回答結果をもとに、それぞれ触感因子分析を行った。

① 畳

①-1 畳インソール×硬いソール



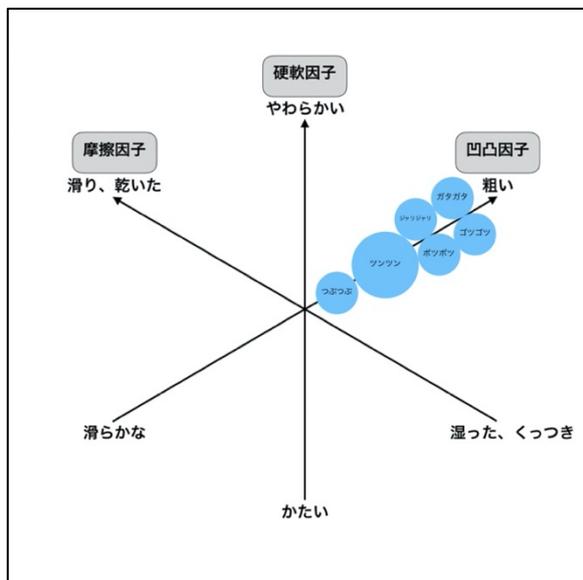
①-2 畳インソール×柔らかいソール



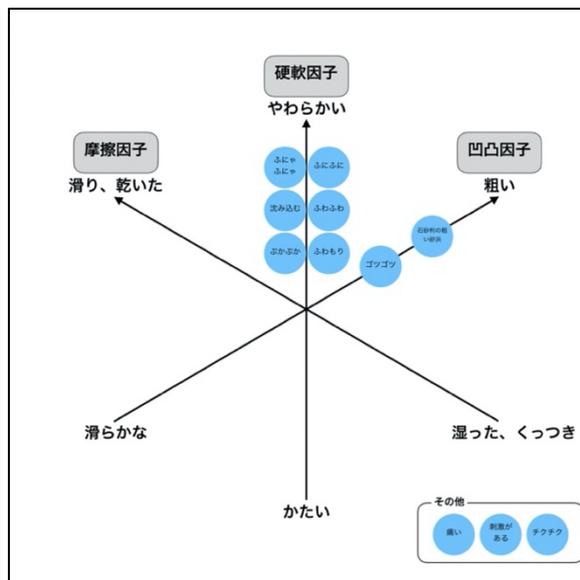
硬いストラクチャとの組み合わせでは多数が畳を連想し、柔らかいストラクチャとの組み合わせでも多数が砂浜などに敷かれた莫塵（ごぎ）を連想したため、再現度が高かったと言える。

② 砂利

②-1 砂利インソール×硬いソール



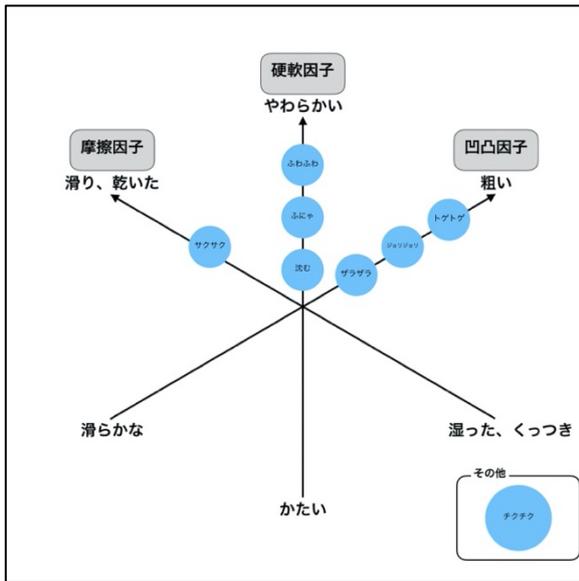
②-2 砂利インソール×柔らかいソール



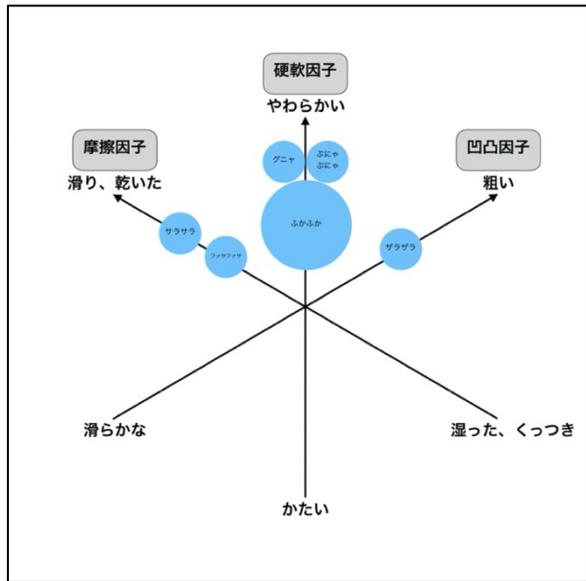
硬いストラクチャと組み合わせることによって「足つぼ」や「河原の小石」のような、足への圧迫感と刺激が強い印象があった。一方、柔らかいストラクチャとの組み合わせでは「給水マット」や「小石の上」のような、軽い刺激の踏み心地になった。

③芝生

③-1 芝生インソール×硬いソール



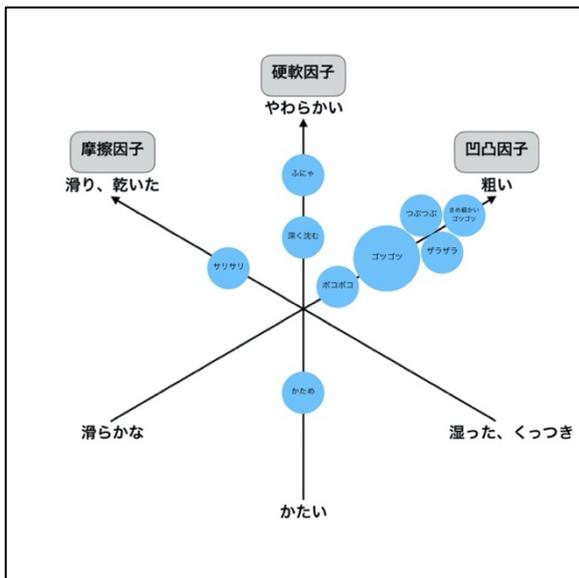
③-2 芝生インソール×柔らかいソール



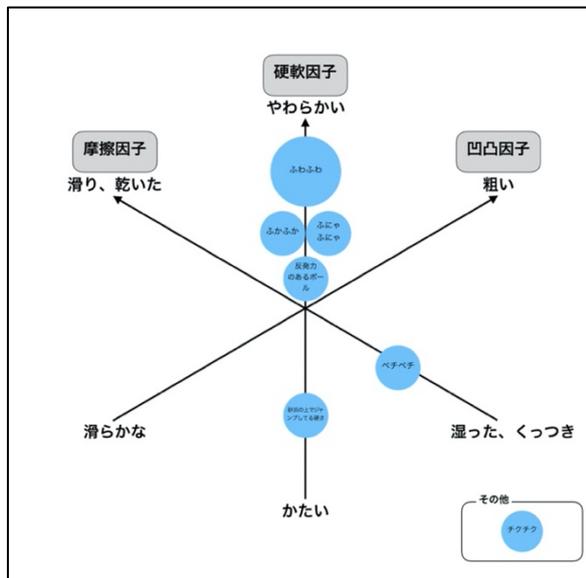
硬いストラクチャとの組み合わせでは「マジックテープ」や「泥拭きマット」、柔らかいストラクチャとの組み合わせでは「人工芝」を連想する人が多かった。

④砂浜

④-1 砂浜インソール×硬いソール



④-2 砂浜インソール×柔らかいソール



砂浜は踏むと足の周りが包まれるような感触があるが、今回製作したような固定された形状でも柔らかいストラクチャと組み合わせることで「ビーチ」を連想する人がいた。他にも「粗めのボディタオル」や「スポンジ」、硬いストラクチャとの組み合わせでは「木の板」、「コンクリート」、「足拭きマット」などが挙げられ、連想されるものは様々だった。

5-5-5. 展望

前章では、インフィルの密度を低くすればするほど柔らかく、高くすればするほど硬くでき、柔らかさやクッション性を制御することが可能だと述べた。これに加えて、同じ柔らかさ/硬さでもテクスチャを変えるだけで踏んだときの感じ方が変わることがわかった。

実験中に被験者から「この踏み心地は何にも例えられない」と言われることが多く、既存のものには例えられない、これまでの踏み心地にはなかったものをつくる方向でテクストラクチャを模索し続ければ、「3D プリンタでしかつくりえない新しい踏み心地」をつくり出すことが可能である。

6. おわりに

約2年間「人の生活に寄り添った3Dプリントシューズ」について研究してわかったのが、「人の生活に寄り添った3Dプリントシューズ」というのは、「新しい機能を持った3Dプリントシューズ」ではなく、「自分でつくれる3Dプリントサンダル」だったということである。人の数だけ生活スタイルがあり、こちらが新しいものを提案したとしてもその人に完全に「フィット」する可能性は低い。しかし、自分が自分のためにつくったものは、当然他人に提案されたものより生活に馴染み、結果として自分の生活に寄り添ったプロダクトとなる。こういった、カスタマイズ性の高い、「自分のためのものづくり」ができる3Dプリントサンダルが、真の意味での「人の生活に寄り添った3Dプリントシューズ」なのではないかと考えた。

1章の最後では、「技術の発展と引き換えに、『自分でものをつくる体験』が多く奪われた」と言及した。しかし、今回のプロジェクトでは、技術の発展があったからこそ、新しい「自分でものをつくる体験」が生まれた。世の中には自分でものをつくるのが好きな「メーカー」や「クリエイター」がたくさんおり、中には新しいものづくりがしくて家庭用3Dプリンタを購入した人もいる。一方で、その人たちの中に、「何かつくりたいけど何をつくればいいのかわからない」という悩みを抱える人は少なくない。今回のような「家庭用3Dプリンタで誰もがつくれる3Dプリントサンダル」がより拡散され、浸透していけば、「自分で自分のものをつくる」文化が再び根付くのではないだろうか。かつて自分の衣服や履物を自分でつくり、自分で修理し、時には誰かとつくったり誰かに贈ったりもする、というのが当たり前だった時代のように、自分のサンダルは自分でつくり、修理し、時には手づくりの贈り物として誰かに贈る、ということが可能である。また、5章で紹介した派生プロジェクトのような、本研究を基盤とした新しい研究課題や、家だけでなく病院やオフィスなどで使うもの、他分野とのコラボレーションや新しい素材と組み合わせさせたものなど、様々な「生まれ変わり」が期待できる。

最初は、3章でも述べた通り、「『靴』はパーツが多く構造も複雑であるため、専門知識のない素人が実用的なものをつくるには難しい」という理由で「靴」ではなく「サンダル」を製作するようになった背景があった。しかし、研究を進めていくうちに、「3Dプリントシューズ」ではなく、シンプルな形をした「サンダル」だったからこそ、カスタマイズ性が高く、「みんなが持っている3Dプリンタで、みんながつくれる実用的なもの」として普及することができたのだと気づいた。

オープンデザインの活性化には、参加者の自主的な参加が不可欠であり、それをいかに促すかがオープンデザインプロジェクトの主催者の役割である。今後の活動として、新しいデザインの展開、ワークショップの開催、製作動画の公開などを検討している。これか

ら先、他の人たちの手によって多種多様に生まれ変わり、それぞれのライフスタイルに溶け込むことができるように、オープンソースの3Dプリントサンダルをブラッシュアップしていきたい。また、自分自身も新たなコラボレーション通じて、3Dプリントサンダルの新たな可能性を開拓することを試みる。

謝辞

はじめに、本研究をご指導いただいた田中浩也教授に心から感謝いたします。いつも的確なアドバイスと、本研究含めて様々な研究活動をするチャンスを下さり、熱心に指導していただきました。研究室で過ごした日々は毎日刺激的なもので、私の視野を広げ、人生に大きく影響を与えました。田中研なしでは大学生活を語るできません。本当にありがとうございました。

卒プロを進めるにあたって、佐倉玲さん、櫻井智子さん、河合萌さん、松本夕祈さんには様々なアドバイスをいただきました。切磋琢磨し合える仲間と共に仕上げた卒プロは、一生の思い出です。特に、佐倉玲さんと櫻井智さんは、FabNowの頃から約3年間苦楽を共にしてきました。ヒィヒィ言いながら苦しんでいた時期もひっくるめて、2人と過ごした時間はとても楽しく、かけがえのないものです。心が折れそうになった時も、2人がいたから乗り越えられて、何度も救われました。自慢で尊敬すべき同期です。

昨年度一緒に4Dプリントシューズの研究を進めてくださった久保木仁美さんにはたくさんのアドバイスをいただき、プロジェクトを通して大きく成長することができました。たわいもない会話含めて、研究室で過ごした時間はとても楽しく、勉強にもなりました。

今年度3Dプリントシューズプロジェクトと一緒に進めてくれた齋藤敬介さん、大平麻以さんには、私の至らない部分を補っていただき、2人のおかげで研究がより深いものになりました。齋藤敬介さんにはたくさん救われ、一緒に研究できたことを嬉しく思います。大平麻以さんとは、ORFで知り合い、最後にSFCで一緒に研究ができて幸せでした。SFCに入ってきてくれてありがとう。

大日方伸さんにはよく、新しい視点や、プロジェクトが広がるようなアドバイスをいただきました。詰まったときはいつも快く相談に乗って下さり、プロジェクトを良い方向に導いていただきました。

若杉亮介さんには、たくさんアドバイスをいただき、たくさん相談に乗って下さり、いろんなことを優しく丁寧に教えていただきました。1年生の冬に若杉さんの卒論発表を見て、こんな研究ができるようになりたい、と憧れ、田中研に入り、今に至ります。約2年間同じ研究室で一緒に研究できたこと、大変嬉しく思います。

ユーザーテストにご協力いただいた、木下里奈さん、齋藤敬介さん、矢崎友佳子さん、知念司泰さん、松木南々花さん、大平麻以さん、若杉亮介さん、皆様がいなければ、こ

のオープンデザインの実践は成立しませんでした。また、アンケートで「楽しかった」、「またつくりたい」などのあたたかい言葉には何度も救われ、励みになり、これからも頑張ろうと思えました。ありがとうございました。

田中研の皆さんにはたくさんの刺激をもらい、支えられました。学年問わず真剣に研究に向き合う姿勢は、自分が頑張る原動力にもなりました。皆さんと共に研究ができて幸せでした。ここで過ごした3年間は、私の財産です。

研究活動を応援してくださった友人、お世話になった全ての方々に感謝いたします。

最後に、私の4年間の大学生活をサポートし、応援してくれた家族に、心から感謝いたします。

2021年1月29日

森 瑞貴

研究関連リンク集

4D Printing & Meta Materials Conference 2020 発表

発表動画: <https://www.youtube.com/watch?v=I629Js4k52s>

公式チャンネルより: https://www.youtube.com/watch?v=1Nzs0NPy_X0

xCloud Sandals

Google Drive: https://drive.google.com/drive/folders/1L0m1Ad0-NUIjP2uvG6PVfnR-__LrHxL2?usp=sharing

Fabble: <https://fabble.cc/mippu/xcloudsandals>

4D Printed Shoes (Movie)

日本語: <https://youtu.be/I9EDthMIG9s>

English: <https://youtu.be/2d9avReM6gk>

活動記録

2020.10 Maker Faire Tokyo 2020, <https://makezine.jp/event/mft2020/>

2020.06 2020 年度教育奨励基金「学習・研究奨励金」採択

2020.05 4D Printing & Meta Materials Conference 2020 発表, <https://www.4dpmconference.com/>

2020.01 2020 年度慶應 SFC エキセントリック・リサーチ奨励制度採択,
<https://yurui.sfc.keio.ac.jp/eccentric2021/>

2019.11 「たわやかな物質」展

2019.11 SFC Open Research Forum 2019, <https://orf.sfc.keio.ac.jp/2019/>

2019.08 Maker Faire Tokyo 2019, <https://makezine.jp/event/mft2019/>

2019.06 2019 年度教育奨励基金「学習・研究奨励金」採択

2019.03 FabGene 「まつろわぬ物質」展, <https://matsurowanubusshitsu.myportfolio.com/>

2018.11 SFC Open Research Forum 2018 "Lamp Seed", <https://orf.sfc.keio.ac.jp/2018/>

2018.11 Maker Faire Taipei 2018, <https://taipei.makerfaire.com/en/>

参考文献

- [1] 「みんなでつくる」が世界を変える：KULUSKA、FabLab Kamakura と考える「オープンデザインの可能性」 #WXD , 2015, <https://wired.jp/2015/05/24/open-design-wxd/>, 2021/01/25 参照
- [2] ADIDAS UNVEILS INDUSTRY'S FIRST APPLICATION OF DIGITAL LIGHT SYNTHESIS WITH FUTURECRAFT 4D, adidas, <https://news.adidas.com/4d/adidas-unveils-industry-s-first-application-of-digital-light-synthesis-with-futurecraft-4d/s/20b2ff0a-4c7d-47a2-9beb-3373f6a5dad7>, 2021/01/20 参照
- [3] EPU 40, Carbon, Inc., <https://www.carbon3d.com/materials/epu-40/>, 2021/01/21 参照
- [4] Digital Light Synthesis™, Carbon, Inc., <https://www.carbon3d.com/3d-printer-models-carbon/our-technology/>, 2021/01/21 参照
- [5] adidas and Parley Celebrate World Oceans Day by Releasing Iconic Shoe, adidas & Parley, 2016
- [6] OCEAN PLASTIC®, Parley, <https://www.parley.tv/updates/parley-ocean-plastic>, 2021/01/21 参照
- [7] FUTURECRAFT.LOOP PHASE 2: HOW WE'RE FINDING AWAY, adidas, <https://news.adidas.com/running/futurecraft.loop-phase-2--how-we-re-finding-away/s/43c42bf2-73ca-4ccb-930b-5ac5b6637a76>, 2021/01/22 参照
- [8] Nike Flyprint is the First Performance 3D Printed Textile Upper, <https://news.nike.com/news/nike-flyprint-3d-printed-textile>, 2021/01/21 参照
- [9] ニューバランスが3D プリントランニングシューズ「ZANTE GENERATE」を米国にて44足限定発売, New Balance, <https://company.newbalance.jp/press/2016/p-38402>, 2021/01/24 参照
- [10] New Balance は有名ショップとコラボした新しい3D プリントスニーカーMS066 をリリース, <https://idarts.co.jp/3dp/new-balance-concepts-3d-print-ms066/>,
- [11] DuraForm TPU Elastomer (SLS), 3D Systems, <https://ja.3dsystems.com/materials/duraform-flex-tpu>, 2021/01/22 参照
- [12] Leading the Future of Performance Products With Customized Manufacturing, Formlabs, <https://formlabs.com/customer-stories/newbalance/>, 2021/01/24 参照
- [13] Rebound Resin: A Production-Ready Elastic 3D Printing Material, Formlabs, <https://formlabs.com/materials/rebound/>, 2021/01/24 参照
- [14] Under Armour's 3D-printed shoes bring computer designer to heel, <https://newatlas.com/under-armour-3d-printed-shoes/42193/>, 2021/01/23 参照
- [15] Under Armour reveals new ArchiTech Futurist with 3D-printed midsole, <https://runningmagazine.ca/sections/gear/shoes/under-armour-architech-futurist/>, 2021/01/21 参照
- [16] REEBOK INTRODUCES NEW LIQUID FACTORY, Reebok, <https://news.reebok.com/global/latest-news/reebok-introduces-new-liquid-factory/s/8a87d7f7-8a93-49d2-9ddd-efee2d588b76>, 2021/01/22 参照
- [17] 3D drawing disrupts shoe production with more efficiency, BASF SE, <https://www.basf.com/us/en/media/featured-articles/Technology/Reebok-Liquid-Speed.html>, 2021/01/22 参照
- [18] Future Fusion PEAK3D are fully 3D printed sneakers, <https://www.3dnatives.com/en/3d-printed-sneakers-peak-3d-240720195/>, 2021/01/21 参照
- [19] ほぼ全てが3Dプリンターで出力された靴。履く者を“変容”へと誘う業界のMAGARIMONO(曲者), <https://lovetechnology.com/interview/magarimono20200805/>, 2021/01/24 参照
- [20] Mass Customization Measured By The Foot at Wiiiv, 3D Systems, <https://www.3dsystems.com/customer-stories/mass-customization-measured-foot>, 2021/01/24 参照
- [21] Prevolve, <https://www.pre-volve.com/>, 2021/01/24 参照
- [22] Skylar Tibbits, The emergence of “4D printing” | TED Talk (2013), https://www.ted.com/talks/skylar_tibbits_the_emergence_of_4d_printing, 2021/01/20 参照
- [23] TPU の特徴, DIC Covestro Polymer, Ltd., <http://www.dic-covestro.com/tpu/feature.html>, 2021/01/25 参照

- [24] 一般社団法人コンピュータ教育振興協会, 3D プリンター活用技術検定公式ガイドブック, 日経 BP 社, 2016 年, P.112-113
- [25] Direct vs. Bowden Extruder: Does it Make a Difference?, <https://all3dp.com/2/direct-vs-bowden-extruder-technology-shootout/>, 2021/01/24 参照
- [26] Who says you can't print flexible filaments with a bowden? Here is my iPhone 8 Plus case, using mostly stock extruder.,
https://www.reddit.com/r/CR10/comments/8pevb7/who_says_you_cant_print_flexible_filaments_with_a/, 2021/01/24 参照
- [27] Diab W. Abueidda, Mohamed Elhebeary, Cheng-Shen (Andrew) Shiang, Siyuan Pang, Rashid K. Abu Al-Rub, Iwona M. Jasiuk, Mechanical properties of 3D printed polymeric Gyroid cellular structures: Experimental and finite element study (March, 2019)
- [28] 足のサイズ測り方 | アシックス-ASICS, <https://www.asics.com/jp/ja-jp/mk/shoe-size-guide>, 2021/01/25 参照
- [29] COVID-19 における 3D プリントフェイスシールド製造に関する調査報告, 慶應義塾大学 SFC 研究所・ソーシャルファブ리케이션ラボラトリ, <https://coi.sfc.keio.ac.jp/faceshield.html>, 2021/01/28 参照

画像引用

- [Fig.1-1] Adidas launched the production of Futurecraft 4D - 3D-printed Sneakers, <https://rosmould.ru.messefrankfurt.com/moscow/en/rosmould/press/exhibition-news/press-folder/adidas-futurecraft-4d.html>, 2021/01/20 参照
- [Fig.1-2] VOCALOID, <https://www.vocaloid.com/articles/vocaloid>, 2021/01/20 参照
- [Fig.1-3] MiY - 旅するオープンデザイン - KULUSKA さんと作るスリッパワークショップ, https://fabcafe.com/jp/events/tokyo/miy_kuluska02/, 2021/01/20 参照
- [Fig.2-1-1] Carbon Lattice Innovation — The adidas Story, Carbon, Inc., <https://www.carbon3d.com/resources/whitepaper/the-adidas-story/>, 2021/01/22 参照
- [Fig.2-1-2] [Fig.2-1-1]同様
- [Fig.2-1-3] [Fig.2-1-1]同様
- [Fig.2-1-4] ADIDAS UNVEILS EVOLVED ALPHAEDGE 4D, FEATURING TRIPLE WHITE AND PARLEY FOR THE OCEANS COLLABORATION, <https://news.adidas.com/4d/adidas-unveils-evolved-alphaedge-4d-featuring-triple-white-and-parley-for-the-oceans-collaboration/s/27a5256c-a51c-48ed-9379-d7c7bc419419>, 2021/01/21 参照
- [Fig.2-1-5] [Fig.2-1-4]同様
- [Fig.2-1-6] 参考文献[6]
- [Fig.2-1-7] [Fig.2-1-6]同様
- [Fig.2-1-8] adidas Converts Ocean Plastic Into 3D-printed Shoes, <https://design-milk.com/adidas-converts-ocean-plastic-3d-printed-shoes/>, 2021/01/21 参照
- [Fig.2-1-9] Adidas Futurecraft Loop: This Running Shoe Is Made From 100% Recyclable Materials, <https://www.coolthings.com/adidas-futurecraft-loop-100-percent-recyclable-running-shoe/>, 2021/01/21 参照
- [Fig.2-1-10] adidas FUTURECRAFT.LOOP PHASE 2, <https://eukicks.com/2019/11/14/adidas-futurecraft-loop-phase-2/>, 2021/01/21 参照
- [Fig.2-1-11] [Fig.2-1-10]同様
- [Fig.2-2-1] Nike はマラソンランナー用に最適化された最新の 3D プリントシューズを発表, <https://idarts.co.jp/3dp/nike-flyprint-action-3d-printed-shoe/>, 2021/01/21 参照
- [Fig.2-2-2] [Fig.2-2-1]同様
- [Fig.2-2-3] [Fig.2-2-1]同様
- [Fig.2-3-1] Data-Customized Midsoles, <https://www.arch2o.com/data-customized-midsoles-new-balance/>, 2021/01/23 参照
- [Fig.2-3-2] ニューバランスが 3D プリントランニングシューズ「ZANTE GENERATE」を米国にて 44 足限定発売, New Balance, <https://company.newbalance.jp/press/2016/p-38402>, 2021/01/23 参照
- [Fig.2-3-3] New Balance は有名ショップとコラボした新しい 3D プリントスニーカー MS066 をリリース, <https://idarts.co.jp/3dp/new-balance-concepts-3d-print-ms066/>, 2021/01/22 参照
- [Fig.2-3-4] Fromlabs の革新的な 3D プリント技術を用いて量産された New Balance の 3D プリントスニーカー, <https://idarts.co.jp/3dp/new-balance-formlabs-3d-printing-platform-shoes/>, 2021/01/23 参照
- [Fig.2-3-5] [Fig.2-3-4]同様
- [Fig.2-3-6] ニューバランス、3D プリントを活用した「トリプルセル」第 2 弾シューズ発売, <https://www.fashionsnap.com/article/2019-09-26/nb-3d-triplecell-2/>, 2021/01/23 参照
- [Fig.2-4-1] Under Armour's 3D-printed shoes bring computer designer to heel, <https://newatlas.com/under-armour-3d-printed-shoes/42193/>, 2021/01/23 参照
- [Fig.2-4-2] [Fig.2-4-1]同様

[Fig.2-4-3] We Beat Up Under Armour’s New 3D-Printed Shoe and It Survived, <https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=4BMVsf8evg>, 2021/01/21 参照

[Fig.2-4-4] Under Armour reveals new ArchiTech Futurist with 3D-printed midsole, <https://runningmagazine.ca/sections/gear/shoes/under-armour-architech-futurist/>, 2021/01/21 参照

[Fig.2-4-5] under armour architech futurist 10, <https://weartesters.com/test-shoot-under-armour-architech-futurist/under-armour-architech-futurist-10/>, 2021/01/21 参照

[Fig.2-5-1] REEBOK INTRODUCES NEW LIQUID FACTORY, <https://3dprintingindustry.com/news/reeboks-3d-printed-shoe-line-dashes-into-production-137497/>, 2021/01/21 参照

[Fig.2-5-2] Reebok unveils new additive manufacturing ‘Liquid Factory’, <https://www.themanufacturer.com/articles/reebok-unveils-new-additive-manufacturing-liquid-factory/>, 2021/01/21 参照

[Fig.2-5-3] “Liquid Speed’: Reebok Aims to Bring High-Tech Shoe Manufacture Back to US, <https://sputniknews.com/science/201610241046647086-reebok-brings-shoe-manufacture-to-US/>, 2021/01/21 参照

[Fig.2-6-1] Future Fusion PEAK3D are fully 3D printed sneakers, <https://www.3dnatives.com/en/3d-printed-sneakers-peak-3d-240720195/>, 2021/01/21 参照

[Fig.2-6-2] PEAK Sport Products Introduces 3D Printed Basketball Shoes, <https://3dprint.com/185983/peak-3d-printed-basketball-shoes/>, 2021/01/22 参照

[Fig.2-6-3] Peak が世界初の 3D プリントのバレーボールシューズの発売を発表, <https://jp.prnasia.com/story/27367-3.shtml>, 2021/01/22 参照

[Fig.2-7-1] MAGARIMONO ORIGINALS 常設展示のお知らせ, <https://magarimono-originals-popupshop-vol2.peatix.com/>, 2021/01/21 参照

[Fig.2-7-2] プロセスの再構築でクリエイティブは加速する「MAGARIMONO」が挑む新しいものづくり（前編）, <https://ftn.zozo.com/n/nac4215bc0858>, 2021/01/21 参照

[Fig.2-8-1] FitMyFoot, <https://fitmyfoot.com/?ref=wft>, 2021/01/23 参照

[Fig.2-8-2] [Fig.2-8-2]同様

[Fig.2-9] Up and running: Young entrepreneur with bad knees learns 3D printing to launch custom shoe company, <https://www.geekwire.com/2017/running-young-entrepreneur-bad-knees-learned-3d-printing-launch-custom-shoe-company/>, 2021/01/23 参照

[Fig.3-1] What is 4D Printing? -All You Need to Know, <https://all3dp.com/1/4d-printing/>, 2021/01/20 参照

[Fig.3-4] 造形後に形状を自由に変更できる不思議なプラスチック『3D プリンター用“感温性”フィラメント』の開発について, http://www.unitika.co.jp/news/fiber/post_42.html, 2021/01/20 参照

[Fig.3-5] SIXSPACE マリンシューズ, https://www.amazon.co.jp/gp/product/B073TY53DY/ref=ppx_yo_dt_b_asin_title_o02_s00?ie=UTF8&psc=1, 2021/01/20 参照

[Fig.4-2-1] PEAK Men 3D Printed Shoes Fashion Casual Sneakers Black Trend Sports Shoes PEAK 3D FUTURE FUSION Outdoor Shoes Limited Sale, <https://www.aliexpress.com/i/4000081309988.html>, 2021/01/25 参照

[Fig.4-2-2] SainSmart TPU フィラメント 白色 1.75mm 0.8kg/1.76lb, https://jp.sainsmart.com/collections/filament/products/white-flexible-tpu-filament-1-75mm-0-8kg-1-76lb?_pos=9&_sid=6d781654e&_ss=r, 2021/01/20 参照

[Fig.4-2-3] 特定非営利法人 ゴーフォワードジャパン 3D プリント入門, P.8, <https://go-forward-japan.org/textbook/3DprintBasics.pdf>, 2021/01/21 参照

[Fig.4-2-4] Anycubic Mega S, <https://www.anycubic.com/collections/sales/products/anycubic-i3-mega-s>, 2021/01/20 参照

[Fig.4-2-5] Anycubic Mega X, https://www.anycubic.com/products/mega-x?_pos=1&_sid=0a43b4740&_ss=r, 2021/01/20 参照

[Fig.4-2-6] Capricorn Bowden PTFE Tubing XS Series 1 Meter for 1.75mm Filament (Genuine Capricorn Premium Tubing), <https://www.amazon.com/Capricorn-Bowden-Tubing-1-75mm-filament/dp/B079P92HN9>, 2021/01/24 参照

[Fig.4-2-7] (左) Amazon HICTOP 3D プリンター 3DP-24, https://www.amazon.co.jp/dp/B075DV6N46/ref=cm_sw_r_li_dp_CeBbGbH4S7WN0, 2021/01/20 参照

[Fig.4-3-2] 参考文献[27]

[Fig.5-1-1] 田中浩也研究室 2019 年度プロジェクトブック, P.7, https://fab.sfc.keio.ac.jp/tnklab_ProjectBook_2019.pdf, 2021/01/20 参照