2020 年度 学士論文

3D プリンティングを通じた
イヌ用義足のプロダクト再錬成

慶應義塾大学 環境情報学部

田中浩也研究室

櫻井智子

0. 論文要旨

本研究は、イヌ用義足の作り手（義肢装具士）と使い手（イヌ・飼い主）の双方が抱える問題に対して、デジタルデザインの導入および 3D プリンティングを用いた「プロダクト再錬成」の実践を通じて解決を目指した。

現在日本には動物専門の義肢装具士が 1 人しかおらず、年間約 3,000 件を超える依頼に応えている。型起こしや採寸などすべての工程を手作業で行っており、大きな負担がかかっている中で休みなく義足を作り続けているのが現状だ。そこで本研究は現在手作業で行われている工程を見直し、デジタルプロセスへ移行することでこの負担を軽減しようと試みた。

一方、義足の使い手（イヌ・飼い主）は、義足を構成する各部品間のわずかな段差からイヌがかじってしまうことに悩んでいる。これに伴って義足の劣化のペースが早まってしまい、頻繁に修理・交換に出さなければならない。そこで本研究は単一素材を使ってすべての部品を一体で 3D プリントすることによって素材間の段差を減らし、イヌがかじる領域の削減を目指した。この際、義足に必要とされる機能すべてを 1 つの部品の中で再現できるよう、特殊な形状や内部構造などを模索しデザインする。またそこにとどまらず、義足の構成、部品間の役割の変更、製作工程の最適化などを総合的に検討し、義足の製作に関わる全項目の大きな見直しを通じた再設計を行う。このデザイン手法を「プロダクト再錬成」と名付け、その実践を試みた。

キーワード

1. プロダクト再錬成
2. 3D プリンティング
3. イヌ用義足
4. スーパーフィット
5. マテリアルデザイン
6. 構造体

目次

0. 論文要旨 1

1. はじめに 4
    1.1. 研究動機 4
    1.2. 研究背景 5
        1.2.1. 義肢装具士の現状 6
        1.2.2. イヌおよび飼い主の現状 7
    1.3. 研究目的 9
        1.3.1. デジタルデザイン 9
        1.3.2. プロダクト再錬成 10

2. 先行事例 14

3. 製作 16
    3.1. 機材・材料 16
    3.2. 3D データの取得 17
        3.2.1. 脚型の型取り 17
        3.2.2. 脚型の修正と CT スキャン 17
    3.3. 機能の再現 19
        3.3.1. 体重の分散 19
        3.3.2. 着脱 24
        3.3.3. 衝撃の緩和 25
        3.3.4. 滑り止め 33
        3.3.5. 患部の保護 34
    3.4. 一体出力 36

4. 検証 38

4.1. 概要 38
4.2. フィッティングを通じたアップデート 39
4.2.1. 第 1 回 訪問 40
4.2.2. 第 2 回 訪問 42
4.2.3. 第 3 回 訪問 45
4.2.4. 第 4 回 訪問 48
4.2.5. 第 5 回 訪問 51
4.2.6. 第 5 回 訪問後 日常使用 53

5. 評価 56
5.1. 義肢装具士における変化 56
5.2. イヌおよび飼い主における変化 58

6. 考察 60
6.1. 結論 60
6.2. プロダクト再錬成を通じたファインディング 61
6.3. 展望 68

7. 謝辞 70

8. 参考文献・引用文献 72

1. はじめに

1.1. 研究動機

デジタルデータを活用した 3D プリンティングの登場により、従来の工法では実装困難とされていた様々なプロダクトの製作が可能となった。時代を遡れば 3D プリンティングは Rapid Prototyping と呼ばれており、製造業などにおける試作品の製作手段として使われることが多く、時間やコストを削減できる新しい試作方法として注目されていた。そして技術開発の進化に伴って使用できる造形材料や造形方法、機種が増え、試作にとどまらず製品の実用化に直接用いられることが増えたのである[1]。

3D プリンティングの特徴の 1 つとして挙げられるのが「スーパーフィット」だ。スーパーフィットとは、3D スキャンなどを通じて取得したデジタルデータを用いて個人の身体やあらゆるモノにぴったりとフィットする 3D プリント物を製作する分野を指す[2]。3D データ化されたあらゆるモノに対して CAD ソフトウェアを活用しその形状に沿ったデータを作成することができるため、個人やモノに特化した造形物の製作が可能である。このスーパーフィットの特性を活かしたモノづくりには以下のような事例が挙げられる。

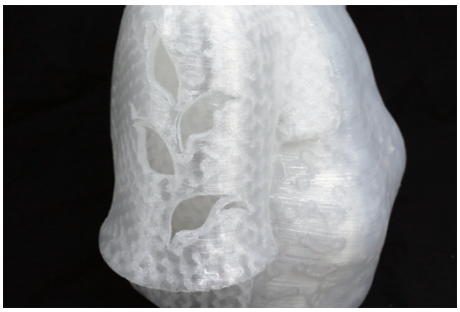


Fig. 1 3D プリント肩パッド [3]

3D プリント肩パッド

Super Fit Lab が製作した肩離断者用の 3D プリント肩パッド。3D スキャンした身体の形状をもとに、柔らかく・軽い素材でできた肩パッドが 3D プリンタで製作された[3]。

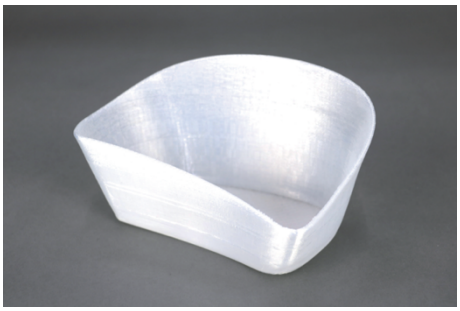


Fig. 2 3D プリントガーグルベースン [4]

3D プリントガーグルベースン

FabNurse プロジェクトで製作されたガーグルベースン（看護の現場で患者がベッド上や車椅子でうがいや嘔吐をする際に使われる、液体の受け皿）。顔に当たっても痛くないよう、3D スキャンによって個人の顔にフィットしたデータを作成し、柔らかい素材を使って 3D プリントされている[4]。

Fig. 3 3D プリント義足 [5]

3D プリント義足

JSR 株式会社、全日本空輸株式会社、株式会社 SHC デザインが共同開発する 3D プリント義足。3D スキャンした脚の患部データをもとに新しい義足を製作することによって、フィット感の高さと履き心地の良さを実現することができる[5]。

上記のように 3D プリンティングを通じたスーパーフィットの活用事例は、ヒト用のプロダクトを中心としたものが多い。他方、イヌやネコなど、ヒト以外の動物が利用するための 3D プリント物はヒト用と比べると少ないのが現状である。筆者は、ヒト以外の動物用のプロダクトの中でもイヌ用義足の製作に注目した。イヌ用義足を 3D プリントする試みはすでに多少行われている一方で、それぞれの義足は問題点を抱えており、どれも改善の余地が見られる。これらの事例については第 2 章で後述するが、現在作られている 3D プリントイヌ用義足が抱える問題点を克服すべく、製作を決意した。

1.2. 研究背景

上記の研究動機をきっかけとして、3D プリンタを使ってイヌ用義足の製作を行う “Fab Vet” と呼ばれるプロジェクトを始動した。Fab (デジタル・ファブリケーション) と、Vet (獣医) を掛け合わせた造語であり、イヌ用義足を扱う獣医学でデジタル・ファブリケーションの技術を活用することで、新たな義足の可能性を提案する意味が込められている。本プロジェクトは同研究室所属の佐倉玲さん（以後「佐倉」と呼ぶ）と共に立ち上げ、共同研究という形式で進めた。

Fig. 4 左から田中浩也教授、原田恭治准教授、島田旭緒さん、佐倉玲さん、筆者

製作にあたっては現場ドリブンなアプローチを採用したため、まずは現在手作りで製作されているイヌ用義足の現場調査を行い、作業工程や作業時間、義足の形状、使用素材、問題点の有無などをリサーチすることから始めた。この際、義肢装具士（義肢や装具を製作する人）である東洋装具医療器具製作所の島田旭緒さん（以後「島田さん」と呼ぶ）と、日本獣医生命科学大学の原田恭治准教授（以後「原田先生」と呼ぶ）のご協

Fig. 5 イヌのヴィスくん

力をいただき、実際に島田さんが義足を製作している工房を見学させていただいたり、原田先生と島田さんがどのように連携を取りながら義足を作っているのかをインタビューさせていただいたりした。

また、島田さんが作っているイヌ用義足のユーザーサイドの現場調査も行い、義足の使い心地や生活様式、困っていること、ニーズなどをヒアリングした。ヒアリングにあたっては島田さんのクライアントであるイヌのヴィスくんと飼い主の長谷川圭子さん（以後「長谷川さん」と呼ぶ）のご協力をいただき、フィッティングの際の訪問や散歩への同行を含めて実際に義足が使われている現場に立ち会わせていただいた。

1.2.1. 義肢装具士の現状

現在、イヌ用義足を製作する義肢装具士は日本に 1 人しかおらず、東洋装具医療器具製作所の島田さんが年間約 3,000 件を超える全国からの依頼に応えている[6]。島田さんは日本で唯一の動物専門の義肢装具士として活躍しており、採寸や型取り、裁縫といったすべての製作工程を手作業で行っているのだ。なお「動物専門の義肢装具士」は、「ヒト用義足を製作する国家資格を持っており、動物専門に義肢装具を作っている人」を指す。

島田さんが義足製作に要する作業は以下の 9 つの工程に分けられ、1 本の義足を作るためには連続で約 6 時間かかるそうだ。

Fig. 6 手作りの義足の製作工程

Fig. 7 島田さんが手作りで義足を製作する様子 [7]

しかし、義足を必要とするイヌの患部を計測するためには直接現地に出向く必要があり、仮に義足がフィットせずに再調節が必要な場合も作り直して全国を飛び回らなければならない。また島田さんは同時に複数件の依頼を抱えており、患者（イヌおよび飼い主）との直接的なやり取りを行う時間や移動時間なども追加でかかるため、実際には徹夜をしながら 2 ~ 3 日間かけて 1 本の義足を作り上げている。

こうした手作業に伴う生産効率の低さや人手不足の結果、日本で唯一の動物専門の義肢装具士は年間を通じて休みなく義足を作り続けており、大きな負担がかかってしまっているのが現状に見られる問題である。

1.2.2. イヌおよび飼い主の現状

前述の通り、本研究ではイヌのヴィスくんと飼い主の長谷川さんにご協力いただいた。以下の記述はヴィスくんと長谷川さんへの訪問およびインタビューに基づくものである。

ヴィスくんは現在 10 歳のオスのラブラドール・レトリバーであり、1 歳 2 ヶ月のときに遭った交通事故で右前脚を離断している。そのため外出時には島田さんが製作した義足を着用しており、家ではギプスを使った生活を送っている。

Fig. 8
義足を履いて外出するヴィスくん

Fig. 9
義足

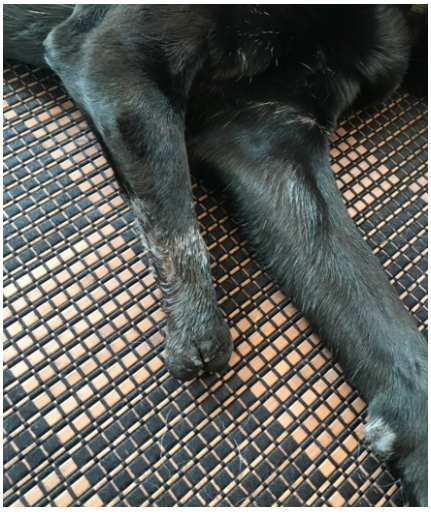


Fig. 10
ヴィスくんの患部

現在使っている義足の使用感や生活についてインタビューを行ったところ、使い手であるイヌや飼い主も問題を抱えていることが明らかになった。義足の使用について一番困っていることに、ヴィスくんが義足をかじってしまうことによる義足の劣化の早さが挙げられた。長谷川さんは「かじるときは修理が必要になるくらい豪快にかじってしまう」とおっしゃっており、その都度、島田さんが修理・交換を行っているそうだ。

Fig. 11 劣化が進んだ箇所

ヴィスくんが義足をかじってしまうことの主な原因に、義足の部品数の多さが挙げられる。島田さんが製作する義足は Fig. 12 に見られるように 10 種類の部品から構成されており、これらの部品は 5 つの異なる機能を持つ。例えば「スペーサー」や「スポンジ」は衝撃の緩和という機能を、「サポート」や「フレーム」は体重の分散という機能を、それぞれ担っている。

Fig. 12 義肢装具士による手作りの義足の部品構成・素材・機能

しかし、これら 10 種類の部品の接着の際にそれぞれの部品間に段差が生じるため、イヌがその段差からかじってしまい義足がごく短期間で劣化してしまうことが多い。ヴィスくんの場合は部品そのものの摩耗も加担して 2 ~ 3 ヶ月に一本のペースで義足の修理が必要となっているが、イヌが義足をかじってしまうことの問題は、義足本体へのダメージだけにとどまらない。劣化が早いとそれだけ修理や作り直しを頻繁に行わなければならないが、前述の通り義肢装具士は 1 人しかいないため、義足が再び使える状態になって飼い主のもとに戻ってくるまでに数週間はかかってしまうのが現状だ。この間イヌは義足の無い生活、または、劣化で強度が落ちた義足を履く生活を送らなければならないのである。

1.3. 研究目的

上記の背景を踏まえ本研究では、作り手の義肢装具士と使い手のイヌ・飼い主の両者が抱える問題を解決するために、デジタルデザインおよび 3D プリンティングを用いたプロダクト再錬成を通じてイヌ用義足の製作を試みる。

1.3.1. デジタルデザイン

まず義肢装具士の負担が大きい問題に対して、現在手作業で行われている以下の工程をなるべく多くデジタル化し、義足本体を 3D プリンタで製作することを目指す。

Fig. 13 手作りの義足の製作工程

デジタルプロセスへ移行することで今まで手作業で行っていた型起こしや採寸もデジタルツール上で扱うことができ、細かい数値の調整などを簡単に行うことができる。仮に義足がフィットせずに作り直さなければならない場合でもすぐに数値や形状を変更することができるだけでなく、3D プリンタに出力を任せている間に義肢装具士本人は違う作業に集中することができる。並行して異なる作業を行うことは今までの工法ではできなかったことであり、複数のクライアントを同時に受け持つ島田さんの負担を大幅に軽減すると同時に、作業効率の向上をもたらすことも期待される。

どの作業をどのようにデジタル化するかは義足そのものの工法に依存する部分が多いため、単に現在の手作業の工程をすべてデジタル化すればよいというわけではない。従って、デジタル化すべき箇所、または、手作業の工程を残すべき箇所の選定は、後述する義足の「プロダクト再錬成」とともにミドルグラウンドを模索しながら決定していく。

1.3.2. プロダクト再錬成

一方、義足の劣化が早いという問題に対しては、現在使われている 10 種類の部品数を減らし、なるべく少ない部品数で構成された義足を 3D プリンタでまとめて一体出力することを目指す。部品数が少なければ少ないほど部品間の段差が減り、イヌがかじることができる箇所もその分減らすことが可能となるからである。

Fig. 14 義肢装具士による手作りの義足の部品構成・素材・機能

3D プリンティングを通じて一体出力される義足には、当然のことながら現在使われている 10 個の部品が担う 5 つの機能が同様に求められる。「患部の保護」「着脱」「体重の分散」「衝撃の緩和」「滑り止め」、どれか 1 つでも欠けてしまっては義足として正常に機能せず、イヌが歩くことができなくなってしまうからだ。つまり 3D プリントに使用する単一素材を使ってすべての機能を再現する必要があり、これを実現するために特殊な内部構造や形状などのモデリングを通じて義足の再設計を試みることになる。このような「部位によって異なる機能を持ち合わせたプロダクトの製作」と似たデザイン手法に、「Parts Consolidation（部品の統合）」と呼ばれるものがある。Parts Consolidation とは、従来の製造方法では複数の部品に分けて製造された後に統合されていた

プロダクトを、3D プリンティングを通じて一括で製造する成形技術を指す[8]。しかし本研究が行うアプローチは、Parts Consolidation で行われる「既存の部品を 3D プリンタで一体出力すること」にとどまらず、プロダクトの構成や形状、部品間の役割の変更、ユーザーのニーズに合わせた製作工程の最適化など、プロダクトに関わるすべての項目を検討することで「全体」を大きく見直し再設計する営みである。新たに提案するこのデザイン手法を、「プロダクト再錬成」と名付けた。

本研究ではイヌ用義足の部品間の段差をなくす目的でこのデザイン手法を実践するが、一般的な製造工程におけるプロダクト再錬成には以下のような価値があると考えられる。

コスト削減・軽量化・小型化

形状・内部構造のリデザインやトポロジー最適化（構造物の最適な形状・形態を求めること）を通じて、質量を減らしたり従来のプロダクトに必要とされていた接続部品などをカットしたりすることができる。使用する素材量の減少は材料のコスト削減につながり、プロダクトの軽量化および小型化が可能となる。

リサイクルが可能となる

摩耗や経年劣化の末にモノを捨てる際、素材が複数使われているプロダクトだと分解できない、またはしづらいといった原因からリサイクルに回すことができない。しかし素材数が減れば減るほど部品間の接着が不要となり、分解の手間を介すことなくそのままリサイクルすることが可能となる。

工場の省人化

部品の一体出力を行うことにより、従来の工法に必要とされていた組立などの製造工程を省略することができる。工場の省人化は人件費のコスト削減にもつながる。

サプライチェーンのリスクの軽減

サプライチェーンのリスクは、世界中から部品や素材を集めるリスクを指す。プロダクト再錬成における使用素材は 1 つであるため複数の素材を集める必要がなくなる。

可動部の精密化

一体出力した部品内で動きを制御することができるため、既存のプロダクトの部品間に生まれる歪みを排除し、精密または微細な挙動を発現することが可能となる。また組み立てが不要なので、従来の工法では組み立て困難な極小スケールの精密挙動の制御に応用することもできる[9]。

上記のメリットを活用したプロダクト再錬成の先行事例として、増田氏による「3D プリントシューズ」の製作例が挙げられる。既存のシューズには 8 種類の材料からなる 17 個の部品が使われ

ていたが、形状の再設計を通じて従来のシューズの機能を保ったまま、部品点数を 5 個に、材料の種類を 4 つに減らすことができた事例である。

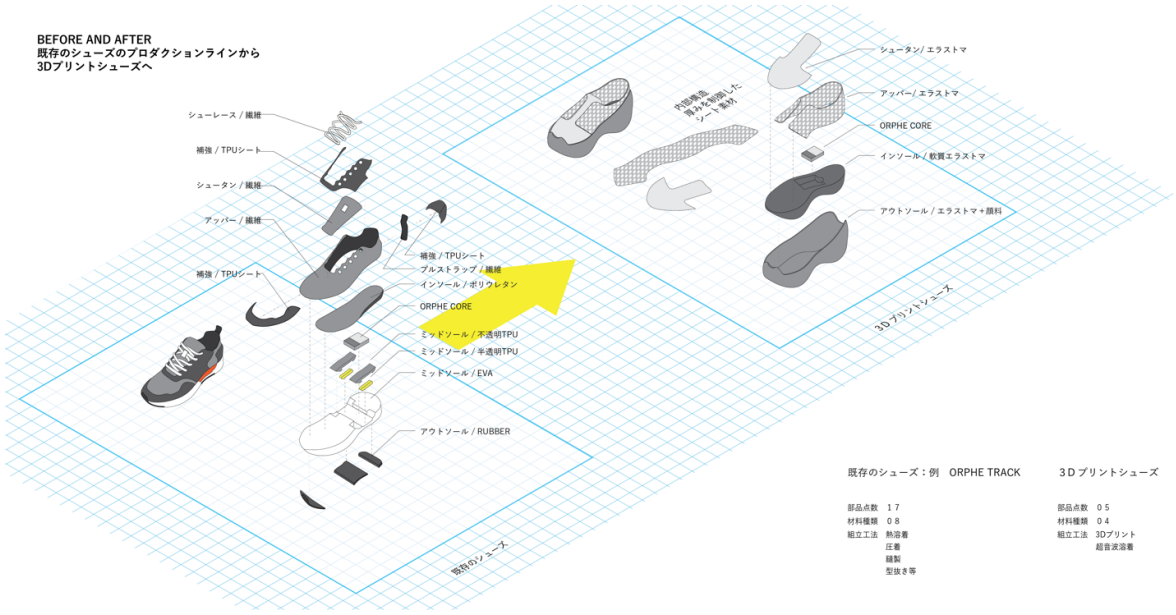


Fig. 15　既存のシューズを 3D プリントした事例

また、益山氏による「3D プリント家具」の製作例も挙げられる。5 種類の材料からなる 14 個の部品が使われていた「イームズチェア」を、形状と内部構造の再設計を通じて部品点数も材料の種類も 1 つに抑えた 3D プリント家具を製作した事例である。

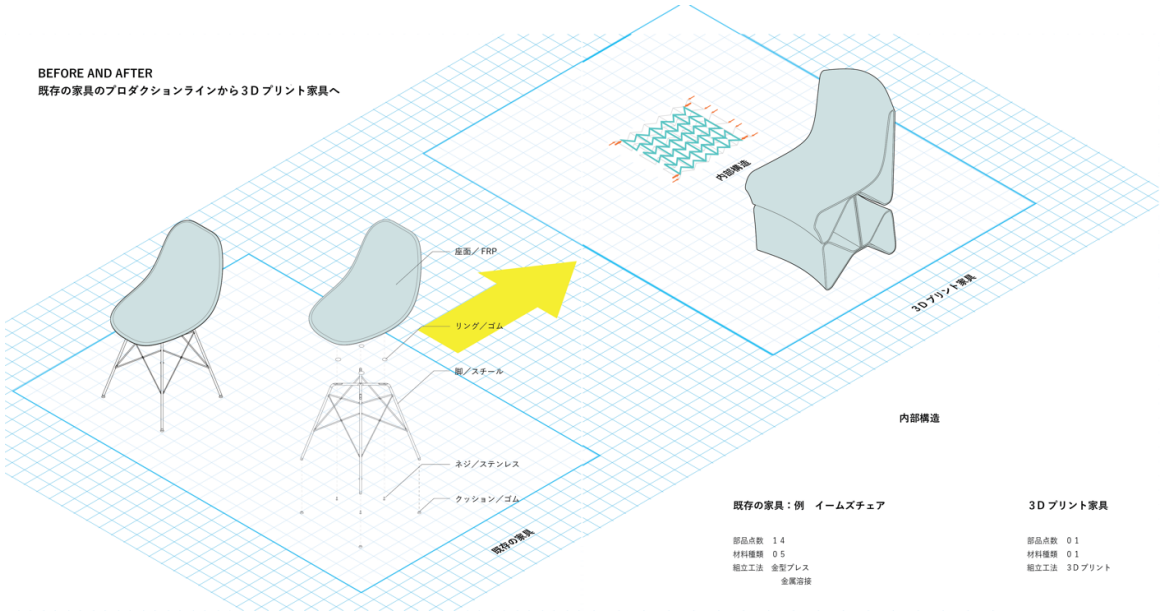


Fig. 16　既存の家具を 3D プリントした事例

上記の他にも、Nature Architects 社によって製作された、単一素材を使って複数の機能が埋め込まれた 3D プリントヘッドホンが挙げられる[10]。異なる機能が求められる部位ごとに特殊な構造や形状を設計することによって、単一素材で従来と同等の役割を果たすプロダクトの製作が可能となっている事例だ。

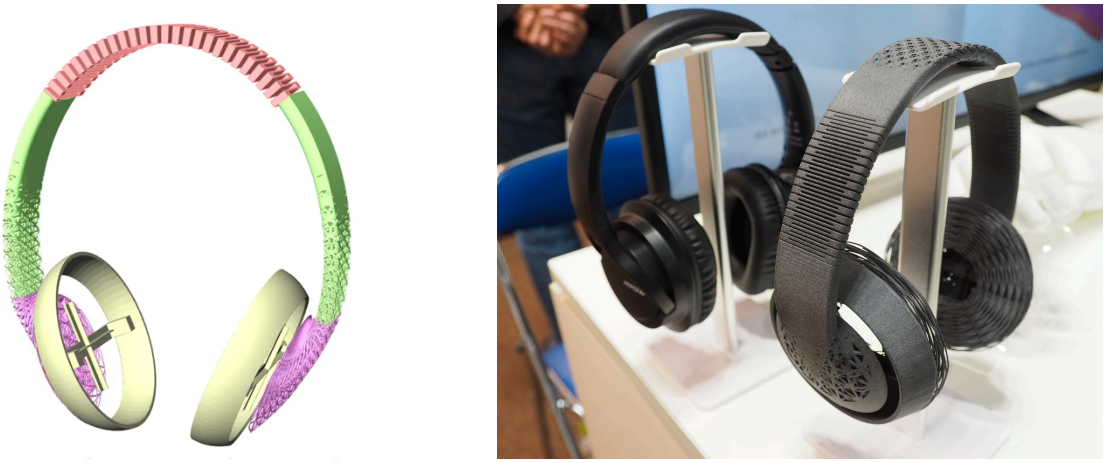


Fig. 17 既存のヘッドホンを 3D プリントした事例 [10]

本研究はプロダクト再錬成を通じて、「部位によって異なる機能を持ち合わせた 1 本の義足」の製作、つまり、手作りの義足が持つ機能を保ったまま全部品を、単一素材を使って一体で 3D プリントすることを目指す。この際、すべての部品を一体出力する、つまり素材数も部品数も 1 つに抑える、という結果が理想的ではあるものの、使用素材の特性によっては目的とする機能に適さず、異なる素材を使わざるを得ないといったケースも十分に起こり得るだろう。そのため本研究では、まずは義足に使われる部品をそれぞれ分けて検討し、「単一素材で従来の機能を再現することができるか」という妥当性の見極めと、「その場合どのようなリデザインが必要となるか」という再設計の試行を念頭に研究を進めていくことが重要となる。義肢装具士としての知見を持つ島田さんと一緒にこの試行錯誤をすべての部品で行った上で、最終的にどの部品を一体出力できるか、または、できないかを総合的に判断する。

もし 3D プリンティングを通じたプロダクト再錬成を通じて、より少ない部品数で義足を一体出力することができれば義足そのものの劣化を抑えることができ、一本一本をより長く使ってもらうことが期待される。

2. 先行事例

3D プリンタを使ってイヌの義足を製作する取り組みは他国にも見られる。本章では 4 つの先行事例を取り上げ、それぞれで製作された義足を以下の 5 項目において評価した。

1. フィット感：イヌの患部に対しての義足のフィット性
2. 時間・労力：製作に要する時間や労力（少なければ少ないほど評価が高い）
3. 部品数：義足に使用されている部品の点数（少なければ少ないほど評価が高い）
4. 骨格の再現性（屈曲・可動）：イヌが元から持つ骨格の再現性の高さ
5. 安全性：角ばった部品の有無（義足が他のイヌに当たって危なくないか、など）

事例 1：Universidad del Valle de México（メキシコ）

Fig. 18 3D プリント義足 [11]

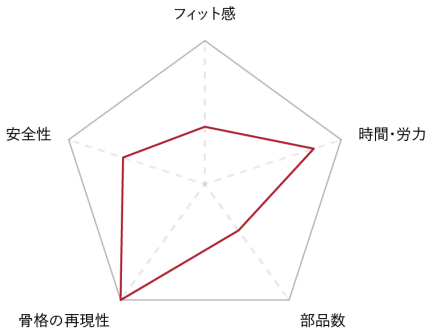


Fig. 19 評価を示したレーダーチャート

事例 2：Model Solutions（アメリカ）

Fig. 20 3D プリント義足 [12]

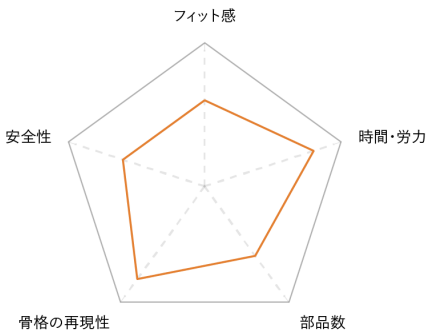


Fig. 21 評価を示したレーダーチャート

事例 3：3D Systems（アメリカ）

Fig. 22 3D プリント義足 [13]

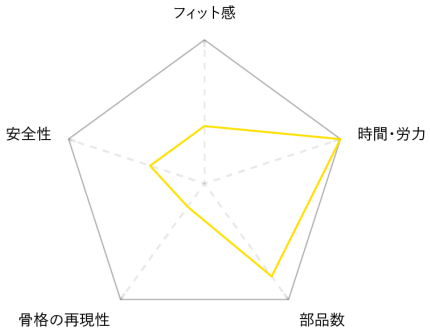


Fig. 23 評価を示したレーダーチャート

事例 4：CBM x Irish Retriever Rescue（IRR）（イギリス）

Fig. 24 3D プリント義足 [14]

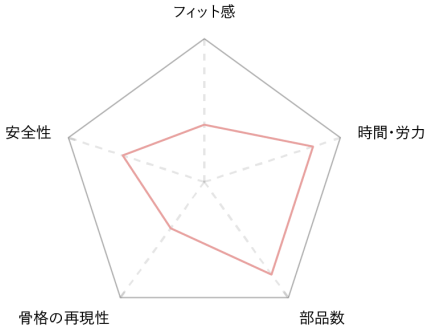


Fig. 25 評価を示したレーダーチャート

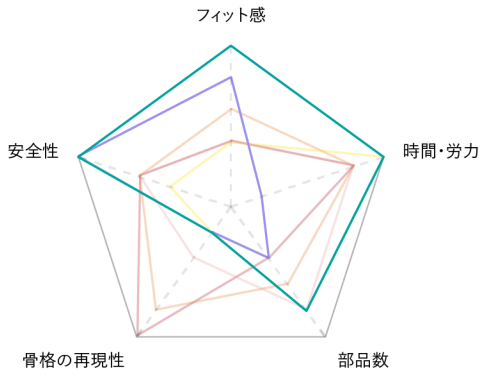


Fig. 26 評価を比較したレーダーチャート

上記の事例に加えて現在ヴィスくんが使用している義足の評価も行い、本研究で製作する義足との違いを総合的に検討し明確化した。その結果、義肢装具士の負担軽減および部品点数の削減という研究目的をベースとして、島田さんが作っている義足の良さを継承するという方向性で「フィット感」「時間・労力」「部品数」「安全性」の 4 項目に優れた義足の製作を目指し、他の義足との差別化を図ることにした。

―― は島田さんが製作している義足の評価であり、

―― は本研究が目標とする項目とその達成度を示すものである。

3. 製作

本研究はデジタルプロセスへの移行を通じて義肢装具士の負担を軽減し、3D プリンティングを用いたプロダクト再錬成を通じて劣化のペースを抑えたイヌ用義足の製作を試みる。

3.1. 機材・材料

本研究における製作では、株式会社フュージョンテクノロジーの FFF 方式（熱溶解積層方式）の 3D プリンタである L-DEVO® TP シリーズメディカルモデル（以後「L-DEVO」と略す）を使用した。300mm (W) x 300mm (D) x 400mm (H) の造形が可能な機種であり、推定していた義足の大きさでも十分な造形範囲を確保することができる。加えて L-DEVO は、安定した出力がしづらい傾向にある熱可塑性エラストマーでも安定して使うことができるように開発されているため、本プロジェクトに最適な 3D プリンタだと判断した。

また、フィラメント（3D プリント用の材料）は JSR 株式会社の熱可塑性エラストマーである FABRIAL™R（以後「FABRIAL-R」と呼ぶ）を使用した。FABRIAL-R はやわらかさとしなやかさを特徴としているフィラメントであり、皮膚刺激性テスト（ISO 10993-10 準拠）による安全性確認済の材料をベースとしている[15]。医療分野も含めた様々な産業での利用実績がある材料であるため、イヌが安全に使うことができる義足の素材として採用した。

Fig. 27 L-DEVO

Fig. 28 FABRIAL-R [15]

3.2. 3D データの取得

3.2.1. 脚型の型取り

Fig. 29
Sense [16]

デジタルデザインを通じて義肢装具士の負担を軽減する試みに基づいて、まずは義足を必要とするイヌの患部を 3D データ化するところから始める。従来の工法であれば島田さんが手作業で脚の石膏型を作るが、この負担をなくすために 3D スキャナを使って直接脚の 3D データを取得しようと試みた。3D Systems 社の非接触式ハンディタイプの 3D スキャナである Sense を用いたが、レーザー光切断方式の 3D スキャナであるためヴィスくんの黒い毛がレーザー光を吸収してしまって正確に 3D スキャンすることができなかった。当時の研究リソースでは Sense の他にヴィスくんの脚を直接 3D スキャンすることができる機材がなかったため、脚を 3D スキャンするのではなく、島田さんが製作した石膏型を 3D スキャンすることで患部の 3D データを取得する方向に切り替えた。

ヴィスくんは前述の通り右前脚を離断しているので、石膏型を作る際は右前脚の患部を固定し外形を型取ることから始める。石膏型を作ることができる人は国家資格を持った人に限られており、島田さんが 30 分ほどかけて手作業で脚型を作る。

Fig. 30 患部の型取りを行う様子

3.2.2. 脚型の修正と CT スキャン

Fig. 31 修正された石膏型

出来上がった石膏型には凹凸や表面の粗さが残っているため、これを修正するために再び島田さんが表面の隙間を埋め、Fig.31 のように滑らかになるまで削る。この工程が完了すると脚型を 3D スキャンするための準備が整うので、再び Sense を用いて石膏型の 3D スキャンを試みた。しかし角度や距離、ライティング、背景などの条件をどれだけ変えて 3D スキャンしても実物の寸法と異なる 3D モデルしか作成できず、精度が高い正確なデータを取得することができなかった。この脚型の 3D データは、ぴ

ったりと履くことができる義足を製作する上で基盤となる重要な情報であり、精度が低いデータでは意味がない。このような経緯から非接触式ハンディタイプの 3D スキャナの使用を断念し、X 線 CT スキャナの使用を試みることにした。物体の表面しかスキャンすることができない Sense に対して、X 線 CT スキャナは X 線で透視した断面画像を 3D データ化することができ、高精度である[17]。研究室にある株式会社アールエフの NAOMi-CT 3D-M という X 線 CT スキャナを用いたが、脚型の長さ（約 278mm）が、X 線 CT スキャナの搭載可能サイズ（250mm）を超えてしまった。研究室にはこのサイズを上回る X 線 CT スキャナがなかったため、本研究にご協力いただいている日本獣医生命科学大学の原田先生に依頼し、キヤノンメディカルシステムズ株式会社の Aquilion PRIME TSX-303A という全身用 X 線 CT 装置[19]を用いて石膏型を CT スキャンしていただいた。

Fig. 32 NAOMi-CT 3D-M [18]

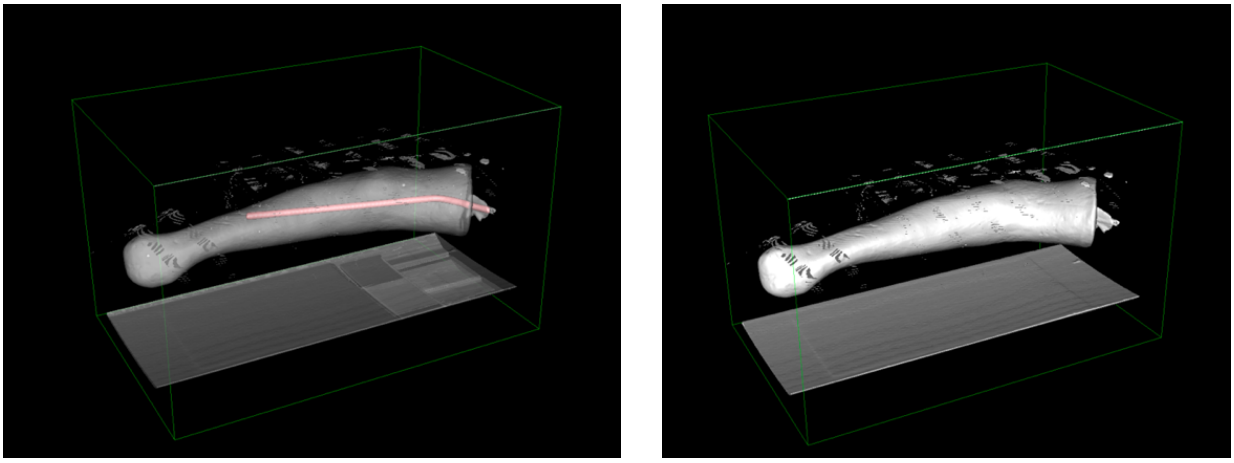


Fig. 33 CT スキャンされた脚型の 3D データ

以上の試行錯誤を経て CT スキャンされた石膏型を、スキャンデータのビューアである Horos を使って STL ファイルに書き出した。STL ファイルは CAD ソフトウェアでの取り扱い可能な 3D データ形式なので、ここまででデジタルデザインを行うための準備が完了する。

3.3. 機能の再現

ヴィスくんの脚型の 3D データを取得することができ、次に、義足の各部品の機能の再現を試みた。本研究では、形状や内部構造のリデザインを通じて手作りの義足が持つ機能を、単一素材を 3D プリントして再現することを目指す。しかし実際に試作・製作・検証を行わないと、単一素材（FABRIAL-R）のみで、目的とするすべての機能を再現することができるのか分からない。場合によっては異なる素材を使わなければならないといったことも十分に起こり得るのである。そのためまずはそれぞれの部品をひとつずつ分けて検討し、「FABRIAL-R を使って従来の機能を再現することができるか」、「その場合どのようなリデザインが必要となるか」を模索しながら製作を進めた。

3.3.1. 体重の分散

3.3.1.1 フレーム

Fig. 34 「フレーム」

最初に、体重分散の機能を持つ「フレーム」について検討した。この部品はポリエチレン樹脂でできており、イヌが歩く・走る・ジャンプする・踏ん張るといった動作を行う際に生まれる負荷を受けても壊れないくらいの強度を持っている。新たに FABRIAL-R で作る「フレーム」も同等の機能を持つ必要がある。このことを念頭に、まずは元の形状と同じ「フレーム」の試作品をモデリングし、3D プリントする造形物の充填率を指す「インフィル」を 100％に設定して L-DEVO を使って 3D プリントした。ここで注意すべき点として、転倒防止が挙げられる。「フレーム」にはある程度の高さがあるため、出力している最中にバランスを崩して倒れてしまうことが多い。そのため出力の途中で小さな重りを内部に置き、「フレーム」そのものを固定することによって転倒を防いだ。この重りは出力が終わった後に取り外す。

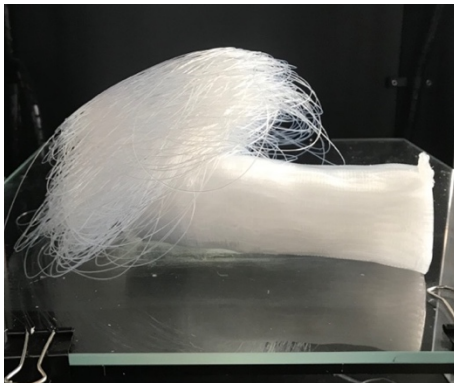


Fig. 35 転倒防止対策を行う前

Fig. 36 転倒防止対策を行った後

FABRIAL-R はやわらかさとしなやかさを特徴としているため、インフィルの密度を 100%にしても強度が足りないかと懸念していたが、適度な厚さを持たせれば体重分散が十分に可能な強度を持つ「フレーム」を作ることができると分かった。強度の検証は義肢装具士としての知見を持つ島田さんに行っていただき、実際に試作品を触ったり負荷をかけたりすることで強度の確認が行われた。

上記の試作を通じて、FABRIAL-R を使って従来の機能を再現できることが分かったので、次に「フレーム」の最適な形状を考えた。試作品では元の形を変えずに作ったが、改良の余地を考慮し新たな「フレーム」の形状の可能性を検討した。ヴィスくんの患部の 3D データは前段階ですでに取得しているので、それをもとに「フレーム」の形状をモデリングしていく。

まずは Rhinoceros という CAD ソフトウェアとそのプラグインである Grasshopper を使って患部の 3D データにぴったりと沿うような形を作成した。

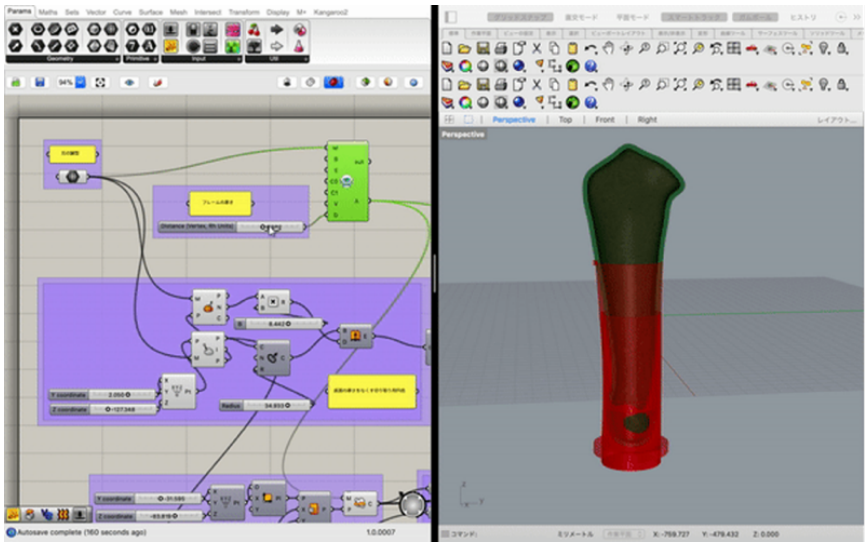


Fig. 37 「フレーム」のデータ作成画面

そしてモデリングを進めていく中で、義肢装具士の知見がないとどれくらいの大きさや幅、形状にすれば良いか判断が付かない箇所が複数あることに気がつき、島田さんのアドバイスを求めた。この際、上記のデジタルデザインツール（Rhinoceros と Grasshopper）を使ったことがない島田さんに利用していただくには UI（ユーザーインターフェース）の操作性が低く、加えて、Rhinoceros と Grasshopper を島田さんのパソコンにインストールしていただくことは実現性が低かった。そこで特殊な CAD ソフトウェアを持っていなくても容易に義足の形状の変更ができるよう、ウェブからのアクセスを通じて操作が可能なツールが必要となり、共同研究者の佐倉が実装に取り組んだ。佐倉は、Rhinoceros と Grasshopper が抱えていた問題である「操作性の低さ」と「インストールが必要となる環境」の 2 点を解消するために、Nodi というオンラインベースのデザインツール[20]を使って、島田さんが簡単に 3D データを編集することができるツールを開発した[21]。

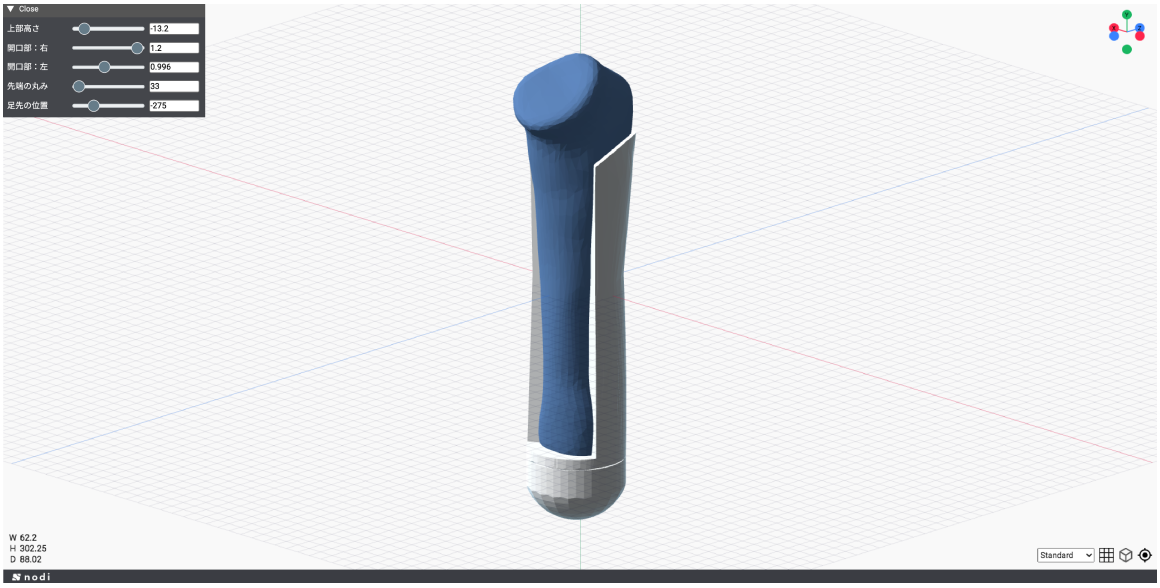


Fig. 38 Nodi のプレビュー画面 [22]

ウェブ上のツールであるため、2 点目の問題である「インストールが必要となる環境」は解消され、1 点目の「操作性の低さ」に対しては形状に影響するパラメータの抽出と分別を通じて解決を試みた。詳しく説明したい。ここでいう「パラメータ」とは、「フレーム」の形状の決定に関わるすべての変数のことを指す。佐倉は、島田さんとの対話を通じてこれらのパラメータを特定し抽出した後、そのうち「義肢装具士の知見が必要ないもの」と「義肢装具士の知見が必要なもの」に分別した。

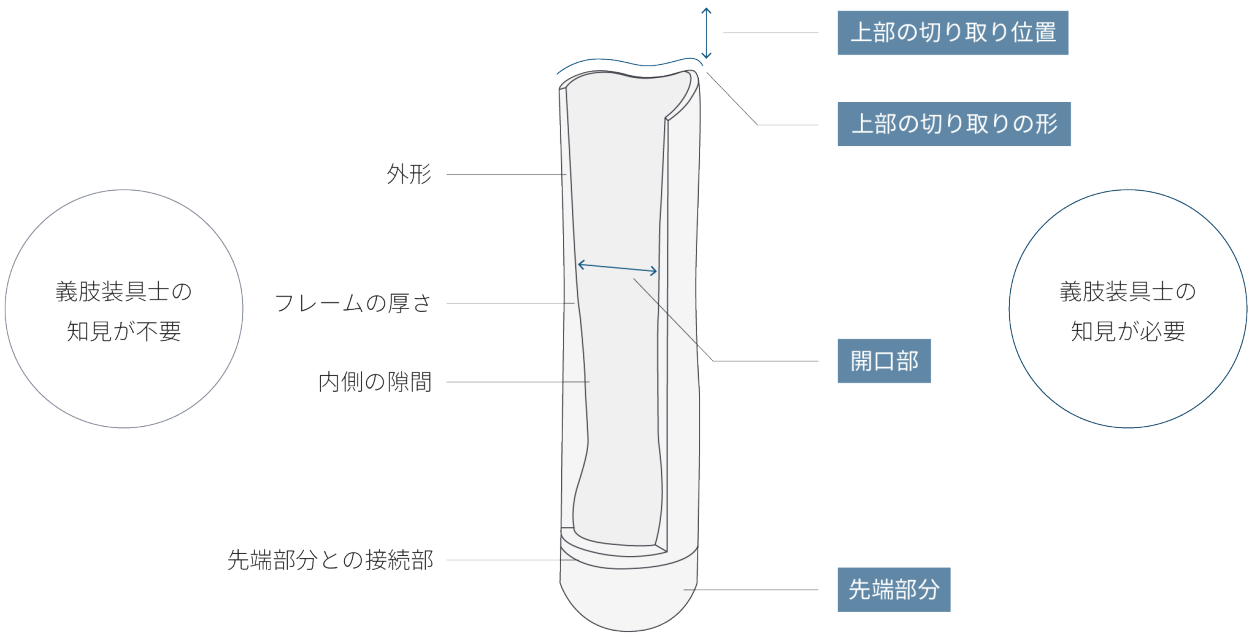


Fig. 39 「フレーム」の形状に影響を及ぼすパラメータ [21]

前者のパラメータには「外形」「フレームの厚さ」「内側の隙間」「先端部分との接続部」が挙げられ、これらは特定の値がすでに決まっている、または、イヌの患部の形状に依存するため専門的な知見を必要としないといった理由により島田さんのアドバイスを必要としない。なお「先端部分」に関しては後述するためここでの詳説は控える。一方、後者には「上部の切り取り位置」「上部の切り取りの形」「開口部」「先端部分の形状」が挙げられる。これらは島田さんの知見がないと決めることができないパラメータであり、実際に島田さんにこのデザインツールを操作しパラメータの値を入力していただく。またこのツールでは、値を入力すると同時にプレビューで見える 3D データの形状が変化するため、モデリングなどの知識が事前になくても直感的に値を調節することが可能である。

このような経緯から、「操作性が高く」「特殊な CAD ソフトウェアのインストールを必要としない」デザインツールが実装された。そしてすべてのパラメータの値が確定すると「フレーム」の形状が決定し、FABRIAL-R を使って従来の部品と同様の体重分散が可能な「フレーム」のデータが完成する。

3.3.1.2 サポート

Fig. 40 「サポート」

続いて、「フレーム」と同様の体重分散の機能を持つ「サポート」について検討した。脚の後ろ部分を覆う「フレーム」に対して、「サポート」は脚の前部分を覆っているため体重を十分に分散すると同時に、着脱部材の一部として機能する必要もある。手作りの義足では縦に切り込みが入った合成ゴムが使われており、ヴィスくんが義足を履くときはこの切り込みを開き、Fig. 40 に見られるように前部分を重ねて巻くことで脚を包んでいる。この際、脚への締め付けが弱いと義足が安定して固定されず、逆に締め付けが強いと脚を圧迫してしまう。つまりこの部品には、(1)脚の固定に適度な伸縮性、(2)着脱が可能な構造、(3)体重分散が可能な強度、の 3 点すべての特性を兼ね備えていることが求められる。

プロダクト再錬成のデザイン手法に基づき、FABRIAL-R を用いて上記の機能を再現することを試みた。この際、従来のように前部分を開けて脚を包み込む形式にするのではなく、部品そのものを伸ばして義足の内部にスペースを空け、脚を上から入れることで履くことができるような設計を構想した。そのため上記の 3 点の機能のうち、(1)脚の固定に適度な伸縮性と、(2)体重分散が可能な強度の 2 つに焦点を絞って以下のような試作品を製作した。

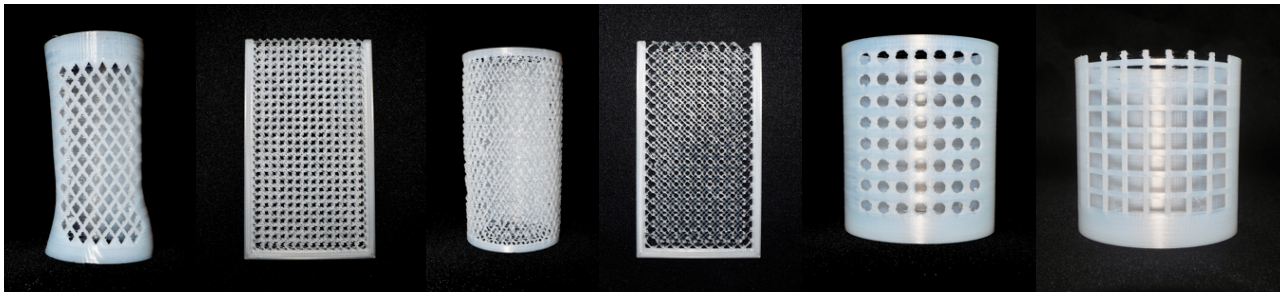


Fig. 41 「サポート」の試作品

しかし以上の試作を通じて分かったことは、伸縮性と強度がトレードオフの関係にある、つまり、十分な伸縮性を持つ構造だと強度が落ち、逆に十分な強度を持つ構造だと伸縮性が下がってしまう、ということだった。そのため当初の試みだった「部品そのものを伸ばして義足の内部にスペースを空け、脚を上から入れることで履くことができるような構造」の追求は断念し、FABRIAL-Rを使った別の構造または形状を再検討した。

しばらく良いアイディアが出ず煮詰まっていたため、ヴィスくんのフィッティングのために長谷川さんのご自宅を訪問した際に義肢装具士の島田さんにアドバイスを求めた。そしてアイディア出しを行って試行錯誤していたところ、その様子を見ていた飼い主の長谷川さんから「いっそ前部分もフレームにして脚を前後から挟んで固定するのはどうか」とのご提案をいただいた。この構造は、既に作った脚の後ろ部分を覆う「フレーム」に加えて、前部分も覆う「フレーム」を作ることで脚全体をサポートし、上から合成ゴムで固定する、というものである。この構造であれば、伸縮性は従来と同様に合成ゴムが担い、着脱は挟む形式で行い、そして強度はすでに「フレーム」で実現できることが分かっているので、求められていた 3 つの機能をすべて満たすことができる。また、「サポート」の機能を再現するためにもう 1 つの「フレーム」を作るのであれば、「カシメ」を作る必要がなくなるとの助言を島田さんからいただいた。Fig. 42 に見られるようにもともと「カシメ」は「サポート」と「フレーム」をつなぐために使われている部品であるため、3D プリントした 2 つの「フレーム」を合成ゴムで固定するのであれば「カシメ」は不必要になるのである。

Fig. 42 部品構成

以上の経緯から、「フレーム」を脚の前部分を覆う「前フレーム」と、脚の後ろ部分を覆う「後ろフレーム」に分け、義足を履く際にはこの 2 つの部品で脚の前後を挟むという構造に再設計した。

強度を持たせるために特殊な内部構造をデザインする必要はないと前述の「フレーム」の製作を通じて分かっているため、形状を決定すれば「前フレーム」が完成する。これにあたっては同じく Nodi を島田さんに操作していただき、必要なパラメータに数値を入力していただいた。そしてすべてのパラメータの値が決定すると、FABRIAL-R を使って従来の部品と同様の体重分散が可能な「前フレーム」のデータが完成する。

3.3.2. 着脱

続いて、着脱の機能を担う「着脱部材」について検討した。プロダクト再錬成のデザイン手法に基づけば FABRIAL-R を使って同等の機能を再現することが妥当であるが、前述の通り「サポート」「フレーム」「カシメ」を「前フレーム」と「後ろフレーム」に再設計する方針になったため、ここでは FABRIAL-R を無理には使わないことにした。

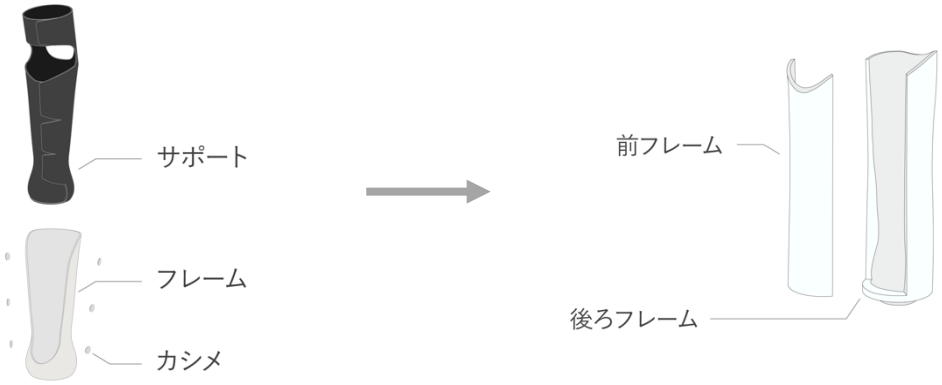


Fig. 43 再設計された部品

Fig. 44 義足に使用した合成ゴム（左）とメンファスナー（右）

そして島田さんの助言により、2 つの「フレーム」は合成ゴムとメンファスナーを使って固定することになった。これらは手作りの義足でも使われている素材であり、合成ゴムは伸縮性が高いためイヌの脚への締め付けを適度に調節できることが分かっている。またメンファスナーとの接着も強力であるため、歩くだけでなく走るといった動作の際にもしっかりと義足が固定される。Fig. 45 に見られるようにメンファスナーを「前フレーム」と「後ろフレーム」に接着し、ヴィスくんの脚を義足の内部に入れた後で上から合成ゴムで固定する形式となった。

Fig. 45 着脱部の構成

3.3.3. 衝撃の緩和

3.3.3.1 スポンジ

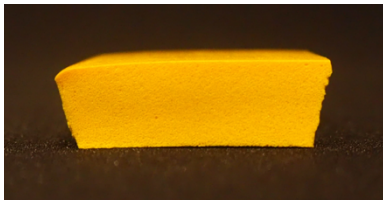


Fig. 46
手作りの義足に使われる
NR/SBR 系発泡体

続いて、衝撃を和らげる機能を担う「スポンジ」について検討した。「スポンジ」は特定のやわらかさを持つ NR/SBR 系発泡体でできており、歩く際に地面から受ける衝撃を緩和することでイヌの脚にかかる負担をなるべく軽減するために使用されている。プロダクト再錬成を通じて FABRIAL-R を用いて上記の機能を再現するためには、インフィルの密度を変えるという手段が考えられる。密度が大きければ大きいほど物体は硬くなり、小さければ小さいほど内部の隙間が増えてやわらかくなる。インフィルの密度を変える一般的な方法としてスライサーの設定値を変えることが挙げられるが、本研究では、同じ部品内で異なる機能を持ち合わせた義足の一体出力を見据えているため、スライサーの設定に依存することなく独自のインフィルパターン（内部構造）をデザインする方法を選んだ。また、前述の通り FABRIAL-R はやわらかさとしなやかさを特徴としている素材であるため、やわらかさの制御を行うにあたって、素材が元から持つやわらかさを活用することができる。

内部構造の密度を変えることで「スポンジ」のやわらかさを再現する試みにあたり、まずは手作りの義足に使われている「スポンジ」が持つやわらかさを定量化した。物体のやわらかさはヤング率と呼ばれる値によって定量化することができ、ヤング率が大きければ大きいほど物体は硬く、小さければ小さいほどやわらかいことを意味する。押し込み試験式のヤング率計測器 YAWASA を使って「スポンジ」のヤング率を計ったところ、手作りの義足に使われている「スポンジ」は 757.41[kPa]のヤング率を持つことが分かった。

次に、この「スポンジ」と同値のヤング率を持つ構造体を FABRIAL-R で 3D プリントすることを目的として、Rhinoceros という CAD ソフトウェアとそのプラグインである Grasshopper を使って 3D プリント可能な構造体を模索した。

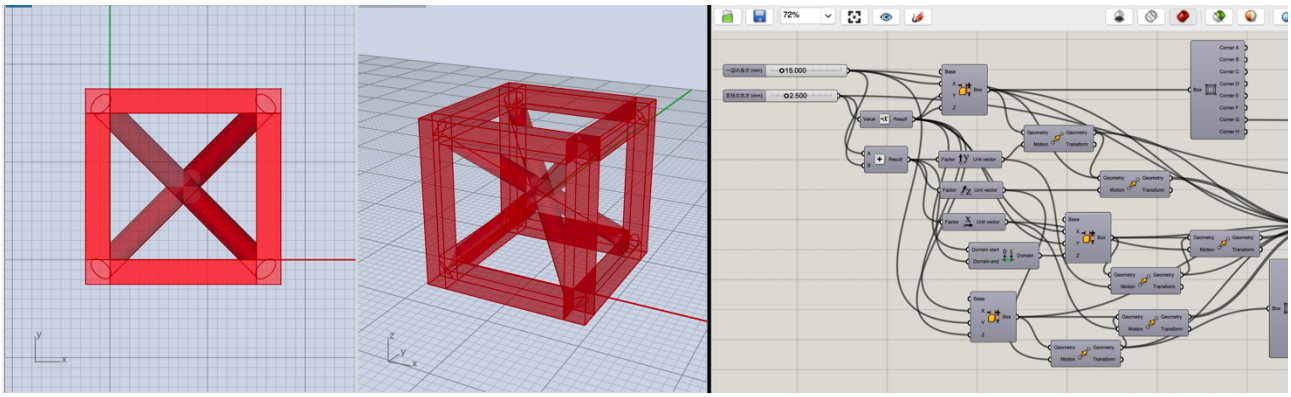


Fig. 47 構造体のデータ作成画面

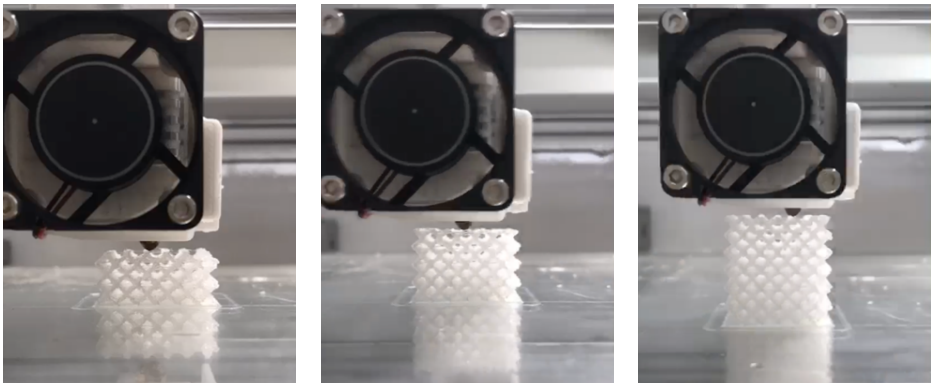


Fig. 48 L-DEVO を使って構造体を 3D プリントする様子

本研究に使用している L-DEVO は FFF 方式の 3D プリンタであるため、この方式でもサポート材が無い状態での出力が可能であることが必須である。試作を通じてこの条件を確認した結果、以下のラティス構造をベースとした 4 種類の単一構造体が選定された。

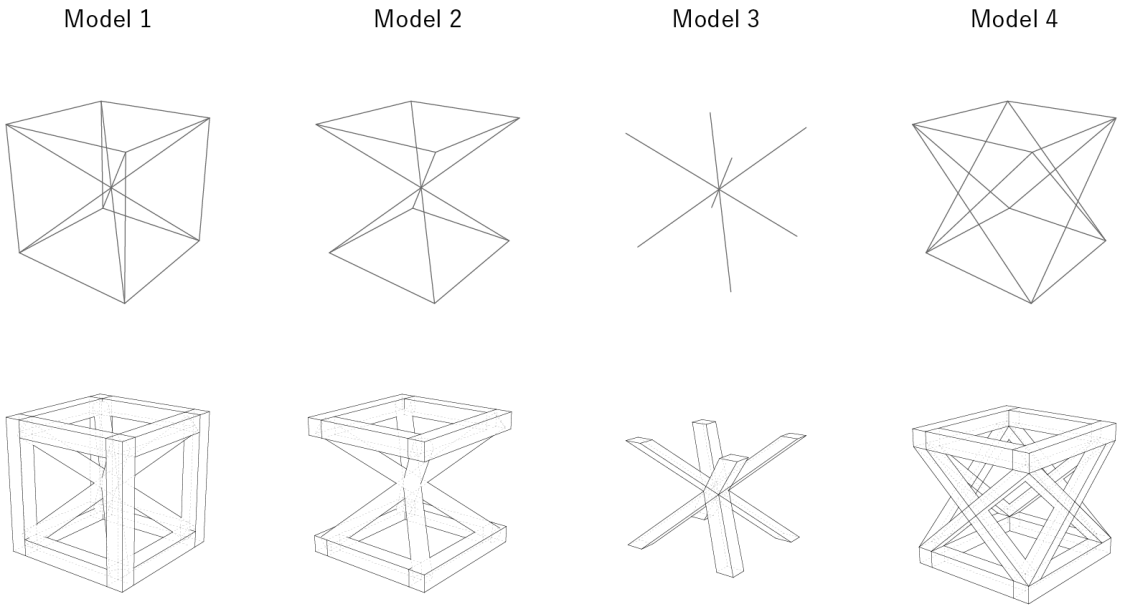


Fig. 49 3D プリント可能な単一構造体

さらにこれらの単一構造体の

1. 一辺の長さ
2. 支柱の太さ

の 2 つのパラメータを抽出し、Fig.51 のように数値を変え、xyz 方向にそれぞれ複数配列することで立方体を生成した。

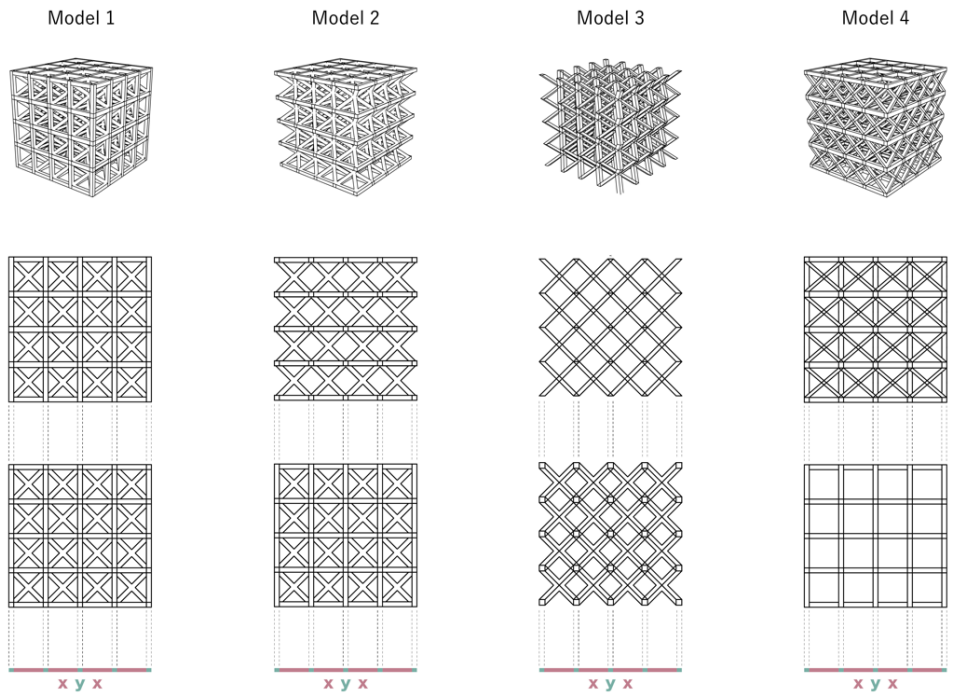


Fig. 50 4 種類の単一構造体をベースとした立方体のデータ

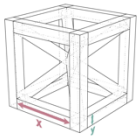
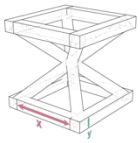
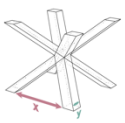
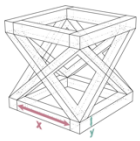
単一格子	Model	一辺の長さ（x）	支柱の太さ（y）
	1A	3.0 mm	0.6 mm
	1B	5.0 mm	1.0 mm
	1C	4.0 mm	0.8 mm
	1D	6.0 mm	1.5 mm
	1E	2.0 mm	0.6 mm
	2A	6.0 mm	1.0 mm
	2B	4.0 mm	1.0 mm
	2C	3.0 mm	0.8 mm
	2D	2.0 mm	0.6 mm
	2E	5.0 mm	1.2 mm
	3A	5.0 mm	1.2 mm
	3B	6.0 mm	1.5 mm
	3C	4.0 mm	1.0 mm
	3D	7.0 mm	2.0 mm
	3E	3.0 mm	1.0 mm
	3F	2.0 mm	0.8 mm
	4A	6.0 mm	1.2 mm
	4B	5.0 mm	1.0 mm
	4C	4.0 mm	1.0 mm
	4D	3.0 mm	0.8 mm
	4E	3.0 mm	1.0 mm
	4F	2.0 mm	0.8 mm

Fig. 51 22 個の構造体を製作した際に設定したパラメータの値

上記の手法で作った 22 個の構造体を L-DEVO で出力し、ヤング率計測器 YAWASA を用いてすべての構造体のヤング率を計測した。

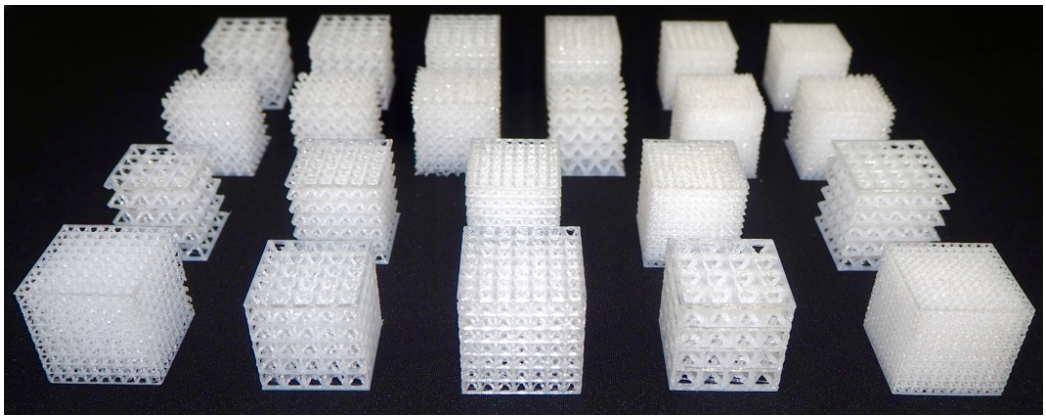


Fig. 52 3D プリントされた 22 個の構造体

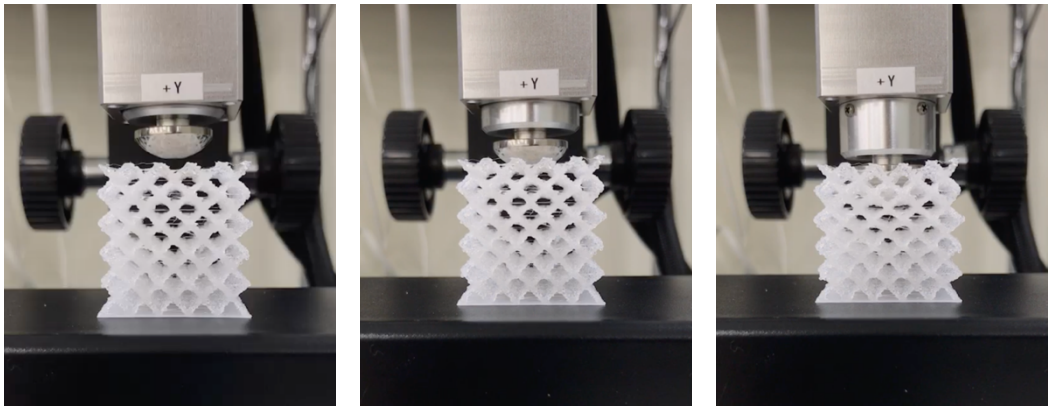


Fig. 53 YAWASA を使ってヤング率を算出する様子

1A	368.05	2A	110.92	3A	150.90	4A	189.02
1B	435.03	2B	395.36	3B	253.01	4B	198.22
1C	609.60	2C	450.01	3C	262.34	4C	331.06
1D	1535.22	2D	499.25	3D	469.37	4D	443.63
1E	1611.76	2E	533.18	3E	591.39	4E	543.70
				3F	882.16	4F	876.53

単位：kPa

Fig. 54 各構造体のヤング率

その結果、591.39[kPa]の 3E、609.60[kPa] の 1C、876.53[kPa] の 4F、882.16[kPa]の 3F が、手作りの義足に使われている「スポンジ」のヤング率である 757.41[kPa]を前後するヤング率を持つ構造体であることが分かった。これらの構造体の選定においては、「スポンジ」を覆う後述の「滑り止め/カバー」が構造体の動きを制限することを考慮し、757.41[kPa]よりやわらかい構造体の採用を検討した。候補となり得る上記の 4 つの構造体を机に並べ、義肢装具士の島田さんにそれぞれの構造体を上から押し込んでもらうことで直接感触を試していただいた。その結果、609.60[kPa]のヤング率を持つ構造体１C の使用が最適であるという結論にたどり着いた。

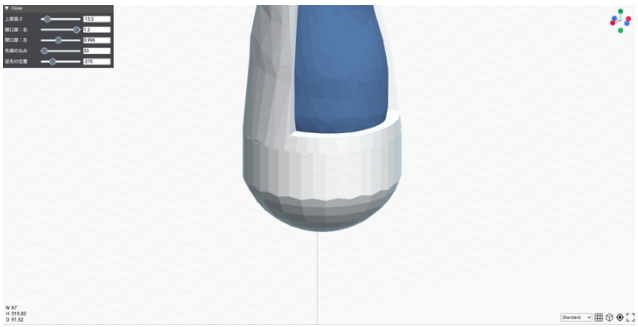


Fig. 55 Nodi のプレビュー画面 [22]

上記の試作を通じて、FABRIAL-R を使って「スポンジ」のやわらかさを再現できることが分かったので、次に形状について検討した。形状の決定には「フレーム」の製作の際に実装したデザインツール（Nodi をベースとしたもの）を島田さんに操作していただいてデータを作成した。

そして Metasequoia という CAD ソフトウェアを使い、内部構造をこの形状にブーリアン演算で埋め込むことで、以下のように 609.60[kPa]のヤング率を持つ「スポンジ」を製作することができた。

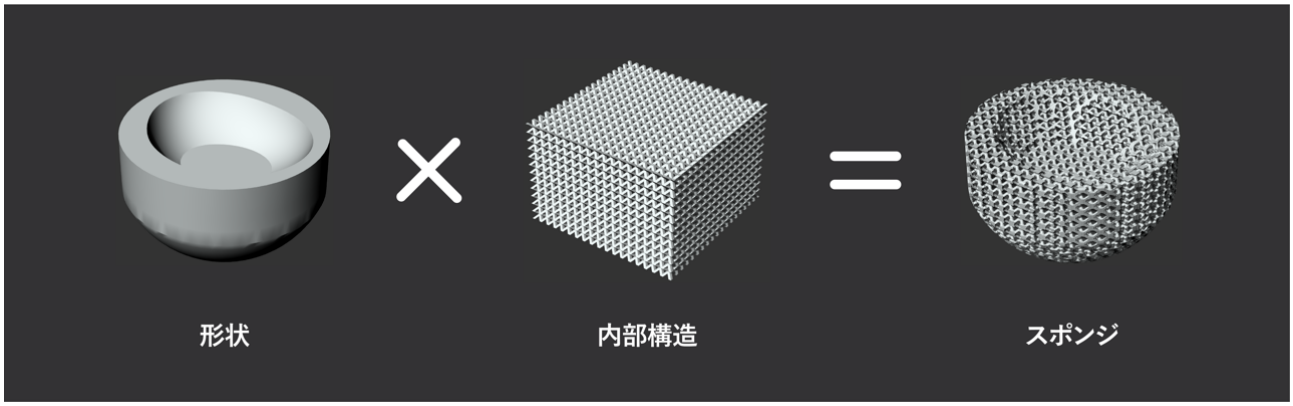


Fig. 56 「スポンジ」の形状と内部構造

以上の工程を経て、FABRIAL-R を使って従来の部品と同様の衝撃緩和が可能な「スポンジ」のデータが完成する。

3.3.3.2 やわらかメトリック

上記の「スポンジ」のように、特定のやわらかさと同値のやわらかさを持つ 3D プリント物の模索を行う研究の一環として、あらゆる自然物や人工物のやわらかさとも対応づけた「やわらかメトリック」の作成を試みた。

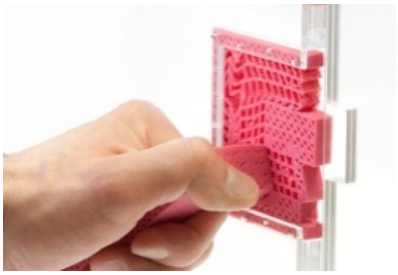


Fig. 57
Metamaterial Mechanism [23]

Fig. 58 Elastic Textures for Additive Fabrication [24]

近年 3D プリンティングの分野においてやわらかい素材とその構造を活用した研究が行われている。例えば、Hasso Plattner Institute によって提案された、3D プリント物の細かい構造を部位ごとで変えることによって任意の箇所の屈曲を制御する Metamaterial Mechanisms[23] や、New York University と Visual Computing Lab の共同研究グループによって発表された、3D プリント物に力を加えた際に弾力性を制御する Elastic Textures が挙げられる[24]。

一方でやわらかさの定量化の分野では、京都工業繊維大学繊維学系の佐久間研究室が、ヤング率計測器 YAWASA を用いて様々な物質のやわらかさを計測し図式化した研究を発表している[25]。

上記のように 3D プリント物の構造を利用した機能性の制御の研究、そしてやわらかさを定量化する研究は行われているものの、既存物と 3D プリント物のやわらかさを対応づける試みは行われていない。本研究はそこで、(1)既存物のやわらかさの計測、(2)特定のやわらかさを持つ 3D プリント物の模索、(3)3D プリント物のやわらかさの計測の 3 点に焦点を当てながら、既存物のやわらかさを、3D プリンタを使ってより正確に再現しやすくするメトリックを作成した。このようなメトリックを活用することで、例えば「スポンジのようなやわらかさ」の靴のインソールを 3D プリントすることや、「はんぺんのようなやわらかさ」の枕を 3D プリントするといったような、3D プリンタを用いたデザインにおいて特定のやわらかさを指定・再現しやすくなることが期待される。

まず 3D プリント物に対応づける既存物を用意し、それぞれのヤング率を測定した。既存物は、卵、パン、絹豆腐、木綿豆腐、はんぺん、カステラ、牛肉、スーパーゲル、スポンジ、黄色スポンジ、黒セルスポンジ、バナナ、ブルースタイロ、発泡スチロール、ゴム、木材、計 16 種類の素材を選択した。以下がこれらの既存物のやわらかさを示したメトリックである。

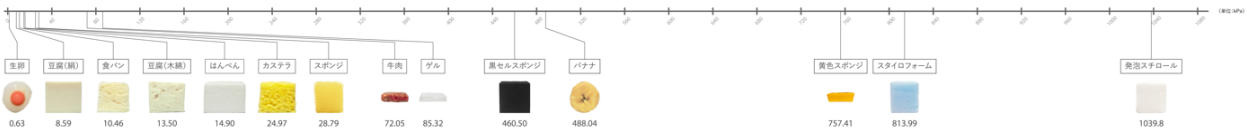


Fig. 59 既存物のやわらかさを示したメトリック

次に「スポンジ」を再現する際に製作した 22 個の 3D プリント物をメトリック上にプロットし、既存物のやわらかさと対応づけた。

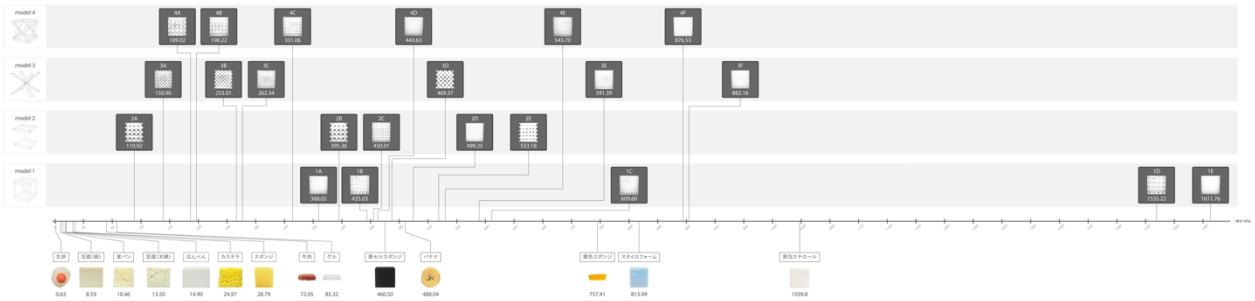


Fig. 60 3D プリント可能な構造体を既存物と対応づけた「やわらかメトリック」

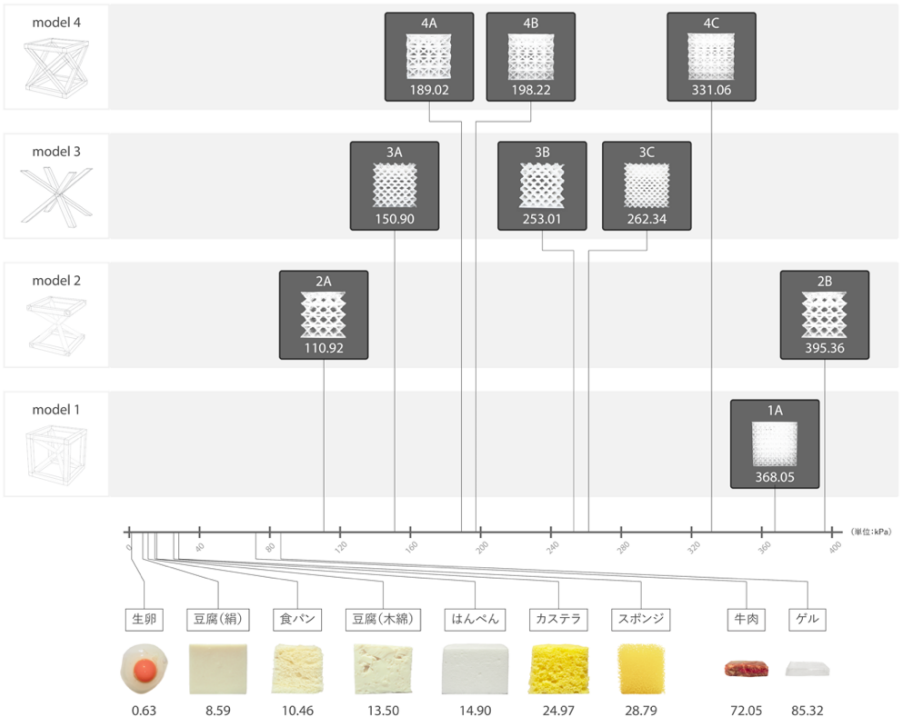


Fig. 61 0 – 400 [kPa] の範囲を示した「やわらかメトリック」

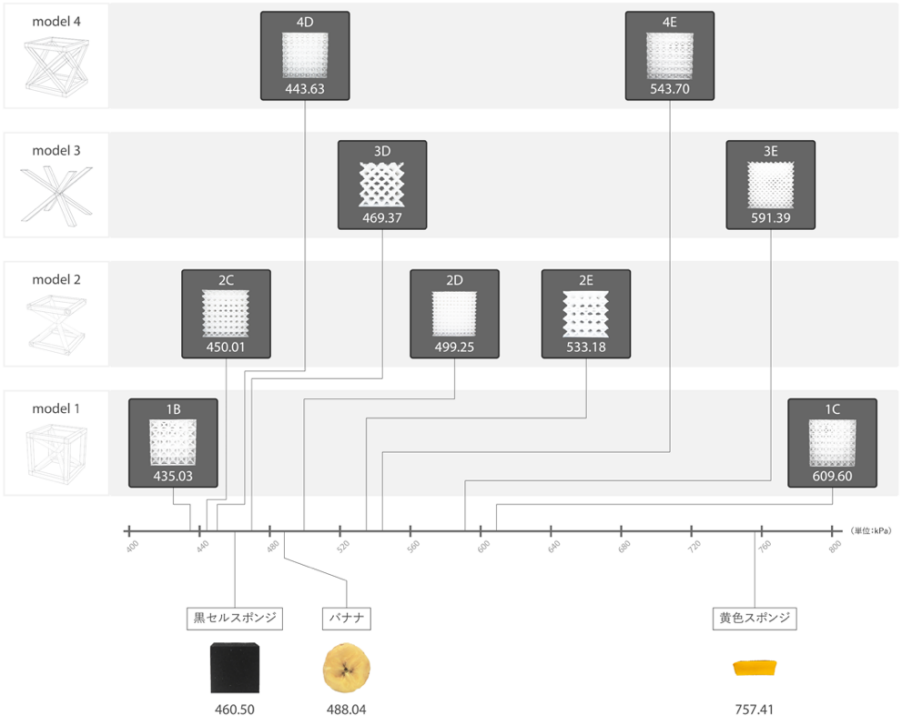


Fig. 62 400 – 800 [kPa] の範囲を示した「やわらかメトリック」

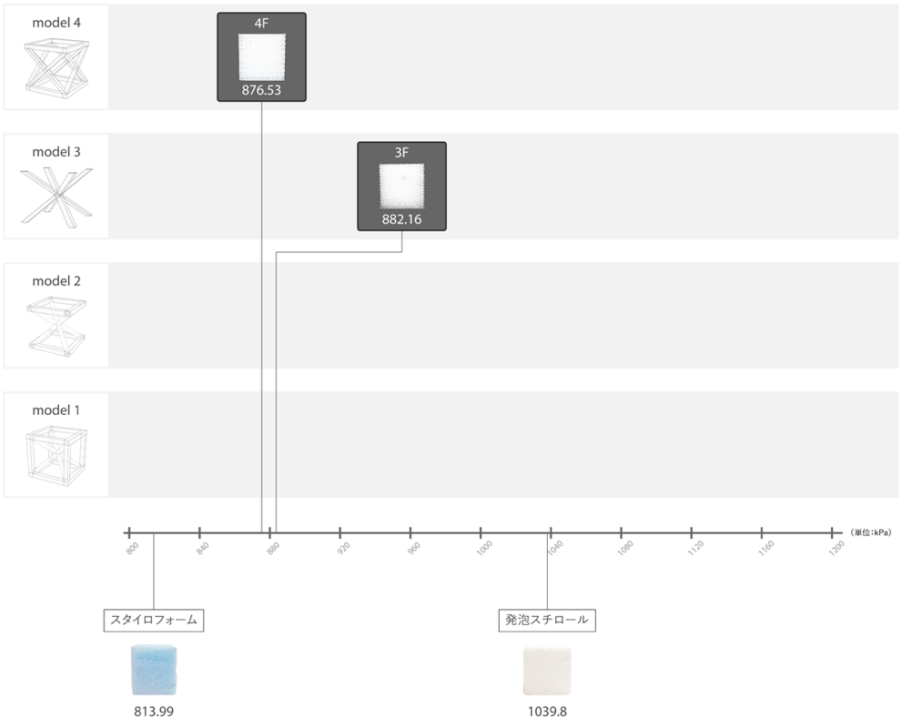


Fig. 63 800 – 1200 [kPa] の範囲を示した「やわらかメトリック」

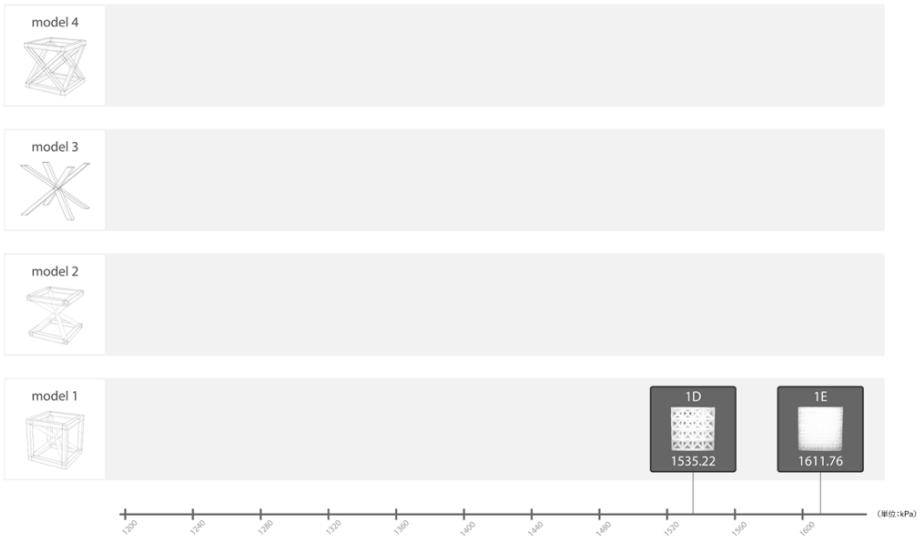


Fig. 64 1200 – 1600 [kPa] の範囲を示した「やわらかメトリック」

このような「やわらかメトリック」を用意することによって、3D プリントする際に様々な既存物のやわらかさを指定し、実装することができる。さらにメトリック内で任意のやわらかさ指定ができるため、既存物の幅を超えた様々な触感が作り出されることも期待される。例えば今までは「スポンジのようなやわらかさ」といった表現でしか特定・実装できなかったところが、「黒セルスポンジ以上、バナナ以下のやわらかさ」といったように領域内での指定が可能となり、「既存物の再現」にとどまらないやわらかさを創出することができる。

3.3.4. 滑り止め

Fig. 65
手作りの義足に使われる
「滑り止め」

衝撃緩和のために手作りの義足に使われている「スポンジ」のやわらかさを、FABRIAL-R を使って再現することができ、続いて、これに隣接している「滑り止め」について検討した。この「滑り止め」は硬い合成ゴムでできており、Fig. 65 に見られるような凹凸形状が滑り止めとしての機能を果たしている。手作りの義足ではこの合成ゴムが「スポンジ」の底面に接着しているが、3D プリントする義足では、「スポンジ」を製作している時点で底面だけを覆うのは不十分であることが分かっていた。これは、「スポンジ」を構成している細かい内部構造がむき出しのままだと地面と擦れて壊れてしまったり、隙間にゴミや小さい石が入りやすくなってしまったり、ヴィスくんが噛んでしまったりする可能性を島田さんにあらかじめ指摘されていたからである。

つまりこの部品には、従来の機能である滑り止めに加えて、「スポンジ」を保護する機能も求められることになった。そこで、「スポンジ」の底面だけではなく、側面も覆うようなカバーの製作を検討した。上記の 2 つの機能を、FABRIAL-R を使って実現しようと試作したものが Fig. 66 である。底面に波線を複数本追加することで、従来の凹凸形状を模している。しかしこの試作を通じて、「スポンジ」の側面を全面的に覆うようなデザインにしてしまうと内部構造の動きを制限しすぎてしまい、特定のやわらかさを保てなくなることが分かった。そこで、内部構造の動きを十分に確保しつつも同時に外部からの保護もできるよう、縦にスリットを入れることにした。スリットの間隔と厚さについて島田さんとの相談を通じてデータを作成し、スリットの間隔は 4mm に、厚さは 1mm になった。

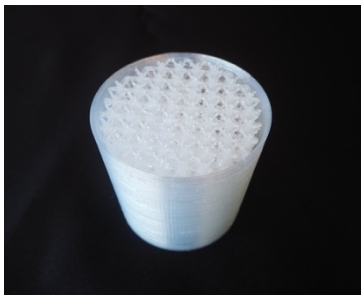


Fig. 66
「滑り止め」の試作品

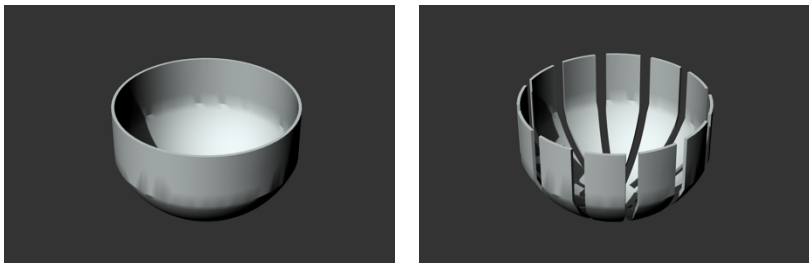


Fig. 67 側面を全面的に覆っていた元の形状（左）と、スリットを入れた「滑り止め/カバー」（右）

以上の工程を経て、FABRIAL-R を使って従来の部品と同様の滑り止め機能を持ち、加えて、「スポンジ」の保護が可能な「滑り止め/カバー」のデータが完成した。

3.3.5. 患部の保護

続いて、手作りの義足に使われている「患部保護材①」「患部保護材②」「患部保護材③」について検討した。これらの部品はいずれも患部を直接保護する役割を担っており、ポリエチレン樹脂でできている「フレーム」や合成ゴムでできている「サポート」よりもやわらかい触感が求められている。プロダクト再錬成を通じて FABRIAL-R を用いてこのやわらかさを再現しようと、既述の「スポンジ」と同様に内部構造の工夫を通じて試作を行った。しかし一番やわらかい構造体を使っても理想とするやわらかさ（刺激に弱く敏感な患部に直接接触しても問題ないと島田さんが判断するやわらかさ）に到達することができず、FABRIAL-R の使用を断念した。

そこで島田さんのアドバイスのもと、FABRIAL-R を使って「患部保護材」を 3D プリントするのではなく、よりやわらかい別素材を使って「シリコンライナー」という部品を製作する方向に切り替えた。「シリコンライナー」はヒト用義足でも使われることが多い部品であり、義足と患部の間に履くことによって衝撃や刺激に弱い患部を直接守る役割を果たす。本研究では 3D プリンティングの特性であるスーパーフィットを活かしてヴィスくんの脚にぴったりとフィットする「シリコン

ライナー」を作ることができるため、シリコーンライナー用のオス型とメス型を 3D プリントし、その型にシリコーンゴムを流し固めることによって製作を試みた。

素材には信越化学工業株式会社のシリコーンゴム KE-1308 と、同社の硬化剤 1300L-3 を使用し、型には FABRIAL-R を使った。シリコーンゴムと硬化剤はヴィスくんの患部に直接当たる素材なので、イヌの皮膚でも炎症が起こらないことを事前に確認して使用した。

ヴィスくんの脚の患部はすでに 3D データ化されているため、そのデータをベースに型を CAD ソフトウェア上で作成する。シリコンライナーの幅や内側に必要な隙間、底の厚みなどは島田さんと相談しながら決定し、L-DEVO で型を出力した。

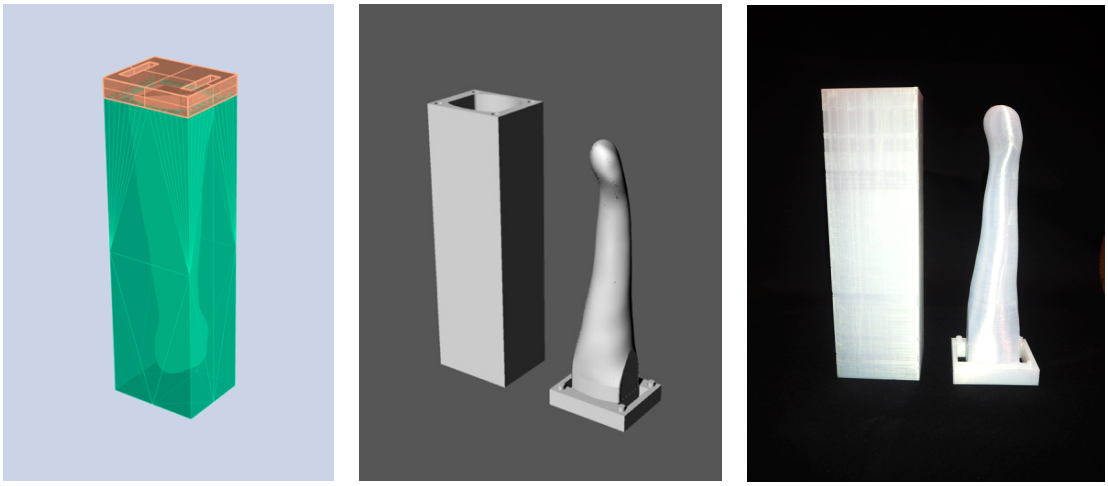


Fig. 68 シリコンライナー用の型を製作する過程

型の 3D プリントが完了すると材料を流し込む準備ができるので、シリコーンゴムと硬化剤を混ぜたものを型に流し込み、気泡ができないように脱泡機を用いて真空状態を保った上で固めた。硬化にはおよそ 1 日かかるのでその後型から取り外し、ヴィスくんの脚にぴったりとフィットするシリコンライナーが完成する。

Fig. 69
シリコーンゴムを固める様子

Fig. 70
完成したシリコンライナー

3.4. 一体出力

本研究は、手作りの義足が持つ機能を保ったままなるべく多くの部品を、単一素材（FABRIAL-R）を使って一体で 3D プリントすることを目指してきた。これを実現するためにそれぞれの部品をひとつずつ分けて検討し、「FABRIAL-R を使って従来の機能を再現することができるか」、「その場合どのようなリデザインが必要となるか」を起点に、すべての部品で試行錯誤を行った。最終的にどの部品を一体出力できるか、または、できないかを総合的に判断する前に、一度ここでどの機能を持つどの部品が、どのように再設計されたのか、全体の整理をしておく。

Fig. 71　手作りの義足と、再設計した義足の部品・素材・機能比較

Fig.71 に見られるように、「前フレーム」「後ろフレーム」「スポンジ」「滑り止め/カバー」は、内部構造や形状を工夫することですべて FABRIAL-R（図中の「熱可塑性エラストマー」にあたる）での製作を行うことができている。一方で、「シリコンライナー」は FABRIAL-R で製作可能なやわらかさ以上のやわらかさと弾力を必要としたため、代わりにシリコーンゴムを用いた。また、「着脱部材①」と「着脱部材②」は、必要となる強度と伸縮性を FABRIAL-R では両立できず、代わりにメンファスナーと合成ゴムを使った。

以上を踏まえると 3D プリンタで一体出力することができる部品は「前フレーム」「後ろフレーム」「スポンジ」「滑り止め/カバー」であるように見えるが、「前フレーム」だけは義足の装着

後に脚の前部分を挟むようにして上から固定するので、一体出力が可能なのは「後ろフレーム」「スポンジ」「滑り止め/カバー」の 3 部品となる。

体重分散を担う「後ろフレーム」、衝撃緩和を担う「スポンジ」、滑り止めと保護の機能を担う「滑り止め/カバー」の 3 つの STL データをまとめて書き出すことで、一体化された部品のデータが完成する。3D プリンタには L-DEVO を用い、素材には FABRIAL-R を使った。出力の際、「後ろフレーム」を単体で出力した時と同様に、転倒を防ぐ目的で中に小さな重りを入れることで義足そのものを固定した。

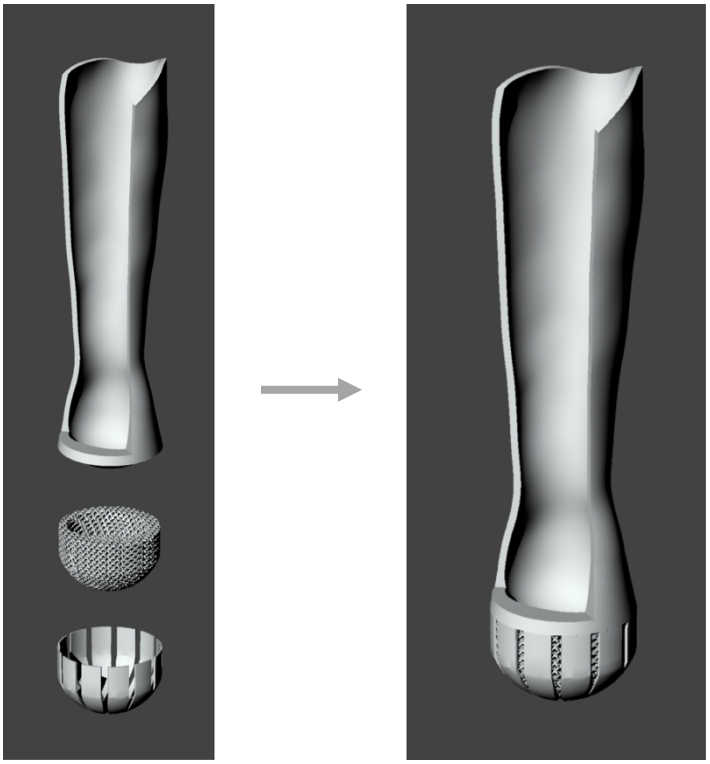


Fig. 72 「後ろフレーム」「スポンジ」
「滑り止め/カバー」を一体にまとめたデータ

Fig. 73 3D プリンタで一体出力した部品

4. 検証

4.1. 概要

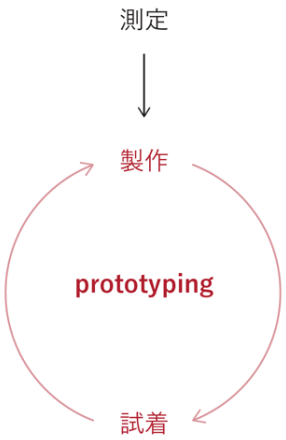


Fig. 74 製作サイクル

「後ろフレーム」「スポンジ」「滑り止め/カバー」は一体で 3D プリントし、「前フレーム」は単体で 3D プリントした。そして FABRIAL-R の使用が困難だった「シリコンライナー」は成型を通じて製作し、「着脱部材①」と「着脱部材②」にはメンファスナーと合成ゴムを使用した。名称の違いによる誤解を招かないよう、以後、「前フレーム」「後ろフレーム」「スポンジ」「滑り止め/カバー」「着脱部材①」「着脱部材②」をまとめて「義足」と呼び、「シリコンライナー」は変わらず「シリコンライナー」と呼ぶ。

3D プリントされた義足とシリコンライナーが完成し、次にヴィスくんによる試着を経て履き心地やフィット感を検証する。データ上ではぴったりに製作したものでも実際にフィッティングしてみると多少のズレが生じてしまうので、再調節が必要な箇所を見極めるための重要なステップとなる。本研究では、フィッティングで得られたフィードバックをもとに義足をアップデートし、再びフィッティングを行うことで段階的な改良を繰り返すサイクルをたどる。これは肩離断者用の 3D プリント肩パッドの製作事例に見られるプロセスを参考にしたものである [3]。実際にユーザーにプロダクトを使ってもらうことで初めて引き出される潜在的ニーズを、次の製作に反映するという一連の工程を何度も繰り返すことによって、時間をかけて漸進的にユーザーが「本当に必要としている」プロダクトに近づけていくデザインプロセスだ。

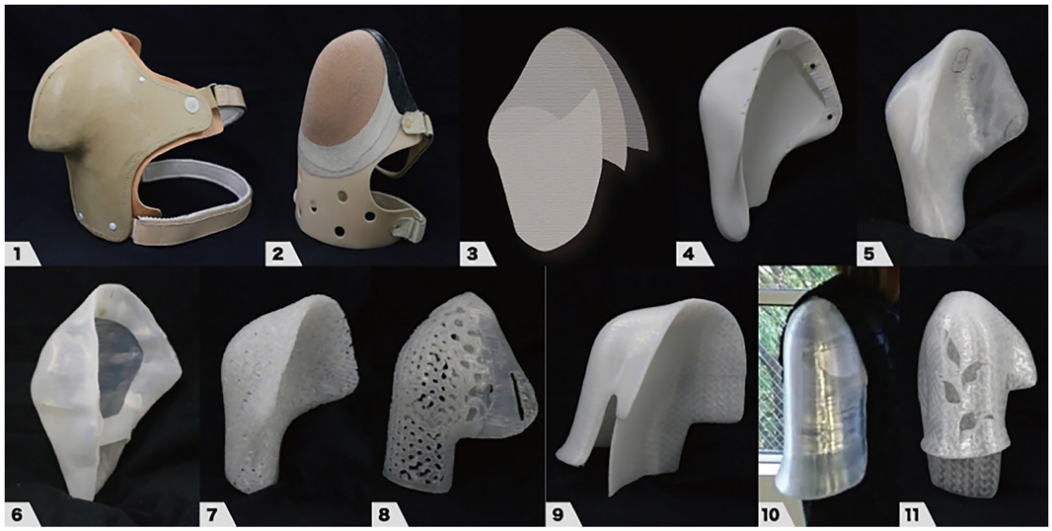


Fig. 75 肩離断者用の 3D プリント肩パッドの製作において、漸進的に改良が行われるプロセスを示した図 [3]

本研究ではユーザーフィードバックをもとに義足のアップデートを行うことと並行して、3D プリントする部品を段階的に増やすことも行った。前章で、プロダクト再錬成を通じて部品の一体出力ができた一方、最初から一体出力した義足を使ってしまうと検証が困難になり、かつヴィスくんの安全も確保しづらくなる。検証が困難という点において、例えばフィッティングで義足が壊れてしまった場合、それは「後ろフレーム」が脆かったからなのか、「スポンジ」がやわらかすぎたのか、または「滑り止め/カバー」の保護が弱かったからなのか、一体の部品なので原因や箇所が特定しづらい。しかし段階的に 3D プリントする部品を増やせば、各回で各部品の検証を確実に行うことができるので、どの部品に改良の余地があるか、どの部品がどのような影響を与えているかなどの検証がしやすくなるのである。ヴィスくんの安全性という点においては、最初から一体出力した義足を使用してしまうと各部品の有効性や使用感を確認しないままヴィスくんがフィッティングをすることになり、部品が割れる、壊れるといったことなどが原因でヴィスくんが怪我をしてしまう危険性が伴う。

3D プリントする部品を段階的に増やすことで、1 つ 1 つの部品の検証を確実に行うことができ、より正確な検証と安全なフィッティングが可能となる。なお、3D プリントが行われない部品には、手作りの義足に使われる部品を代わりに使用した。

以上を踏まえ、本研究で行った義足とシリコンライナーのアップデートは、フィッティングを通じて得られたフィードバックや歩行の結果に基づいた変更、および、3D プリントする部品を段階的に増やすデザイン手法に基づいた変更、の両者を取り入れたものにした。

4.2. フィッティングを通じたアップデート

フィッティングは飼い主の長谷川さん宅を訪問し、義肢装具士の島田さんの立会いのもと以下の日程で行われた。

	訪問日	**内容**
第 1 回	2019/07/01	シリコンライナーの試着
第 2 回	2019/07/28	シリコンライナーおよび義足の試着
第 3 回	2020/07/28	シリコンライナーおよび義足の試着
第 4 回	2020/09/20	シリコンライナーおよび義足の試着
第 5 回	2021/01/06	シリコンライナーおよび義足の試着

フィードバックを得るために訪問で行った具体的な検証として(1)着脱の検証と、(2)近所の散歩を通じた歩行の検証の 2 点が挙げられる。フィッティングの際に肝心となる履き心地やフィット感

といった項目に対してはユーザーであるイヌのヴィスくんから直接感想を聞くことができないものの、義足の履き心地が悪いと痛がってしまってそもそも歩かないのだそうだ。ヴィスくんが痛がらずに歩くか歩かないかという評価指標に加え、飼い主の長谷川さんと義肢装具士の島田さんによる観察を通じたフィードバックも得た。毎日ヴィスくんと共に生活している長谷川さん特有の視点から、ヴィスくんの行動や表情から汲み取られた定性的な意見をくださった。また島田さんは、手作りの義足との比較や、歩行中の脚の動き、歩行後のヴィスくんの脚に見られる赤みなど、専門知識に基づいた見解をくださった。

なお以下の訪問記録には、段階的に増やした 3D プリント部品が従来のどの部品と対応しているかを表で示した。表中の ● はシリコーンゴムを使用したこと、● は FABRIAL-R を使用したこと、● は手作りの義足に使われる部品を使用したことをそれぞれ意味する。

4.2.1. 第 1 回 訪問

【訪問日】2019/07/01
【製作物】シリコンライナー（型から外す際に割れてしまったが、本来は一体で作られる）

部品名	素材名	
患部保護材 ①	ストレッチ素材	●
患部保護材 ②	オレフィン系熱可塑性樹脂	●
患部保護材 ③	パイル素材	●
フレーム	ポリエチレン樹脂	●
カシメ	鉄	●
スペーサー	EVA樹脂	●
スポンジ	NR/SBR系発泡体	●
滑り止め	合成ゴム	●
サポート	合成ゴム	●
着脱部材	メンファスナー	●

Fig. 76 従来の部品に対応づけた表と製作物

Fig. 77 フィッティングの様子

着脱の検証		
試着物	**結果・フィードバック**	**改善策**
シリコンライナー	フィット感がきつく、裂けてしまう	メス型の脚型データを 2mm 大きくしシリコンライナーの内側に余裕を持たせる
	硬化する最中の型が安定せず、シリコンライナーの厚さが不均一	硬化の際に型が動かないよう、メス型の四隅にくぼみを作り、そのくぼみにぴったりとはまる円柱をオス型に加える
	型からシリコンライナーを外す時点で、厚みが薄い部分を境に上下に割れてしまう（上記と同様の理由）	上記の改善に加えて、硬化の際にオス型に薄い布を貼り、割れないように強度を上げる

全体を通じた感想	
島田さん	シリコンライナーは裂けてしまったが、材質はちょうどよく理想的。患部を保護するために必要なやわらかさと弾力があって、あとは裂けずにうまく作れれば使えるものになる。今はヴィスくんの患部に対してゲルと固定用の布を使っているが、このシリコンライナーがあれば不要になるはず。

4.2.2. 第 2 回 訪問

【訪問日】2019/07/28
【製作物】シリコンライナー、義足

部品名	素材名	
患部保護材 ①	ストレッチ素材	
患部保護材 ②	オレフィン系熱可塑性樹脂	
患部保護材 ③	パイル素材	
フレーム	ポリエチレン樹脂	
カシメ	鉄	
スペーサー	EVA樹脂	
スポンジ	NR/SBR系発泡体	
滑り止め	合成ゴム	
サポート	合成ゴム	
着脱部材	メンファスナー	

Fig. 78 従来の部品に対応づけた表と製作物

Fig. 79 フィッティングの様子

Fig.80 歩行の様子

着脱の検証		
試着物	**結果・フィードバック**	**改善策**
シリコンライナー	シリコンライナーの大きさはちょうどよく、締め付けもぴったり	
	布の縫い目から少し裂けてしまう	着脱には影響が出ないほどの裂け目であり、テープでの補強で十分との助言を受けた
	硬化する際に出てくる気泡がうまく逃げない	気泡を逃すための空間を型に追加する
	型の固定のために取り付けた円柱を外すのが大変	円柱の長さが 2/3 になるように短くする
義足	脚の先端部分がややきつい	脚の先端部分のデータを膨らまし、内側にゆとりを持たせる

歩行の検証	
観察対象	**結果**
履いた直後の様子	嫌がったり痛がったりすることはなかった
歩行の様子	脚先のスペースに少し余裕がなかったものの、階段の上り下り、外での歩行、家の中での歩行、立ち止まりなど、日常的な動作を問題なく行った
	地面にしっかりと義足の先端を付けながら歩いた
脚の赤み	歩行後、義足を外した脚に赤みは見られなかった

全体を通じた感想	
島田さん	今回はシリコンライナーが裂けず、大きさもちょうど良かった。材料が粘性を持っているからか表面がややペタペタしているのも良く、フレームへの密着度が上がって義足がより固定される。
長谷川さん	いつもの義足のように使えていて、歩く様子も変わらない。3D プリンタでこんな物が作れるのがすごい。

4.2.3. 第 3 回 訪問

【訪問日】2020/07/28
【製作物】シリコンライナー、義足

部品名	素材名	
患部保護材 ①	ストレッチ素材	●
患部保護材 ②	オレフィン系熱可塑性樹脂	●
患部保護材 ③	パイル素材	●
フレーム	ポリエチレン樹脂	●
カシメ	鉄	●
スペーサー	EVA樹脂	●
スポンジ	NR/SBR系発泡体	●
滑り止め	合成ゴム	●
サポート	合成ゴム	●
着脱部材	メンファスナー	●

Fig. 81 従来の部品に対応づけた表と製作物

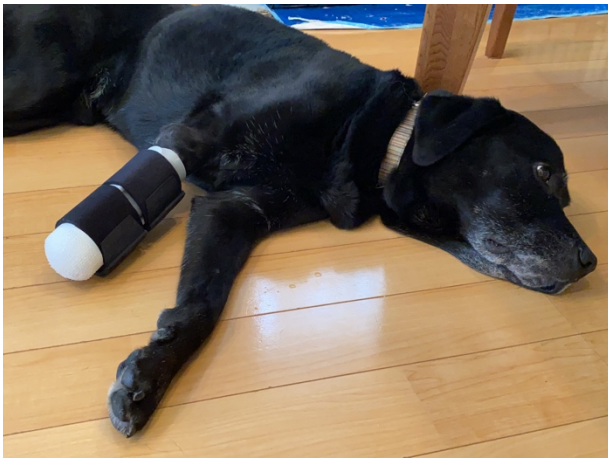


Fig. 82 フィッティングの様子

Fig. 83 歩行の様子

着脱の検証		
試着物	**結果・フィードバック**	**改善策**
シリコンライナー	型からの取り外しが以前より簡単	
	硬化中の気泡をうまく逃すことができる	
	長さが足りず、脚が十分に保護されない	先端のみのシリコンライナーを作り、残りはゲルシートを貼る（3D プリンタの大きさの制約上、これ以上長い型は作れないため）
義足	全体のフィット感はぴったり	
	長さが足りず、体重分散が十分にできない	肘頭を基準にデータを長いものに作り変える
	10 分程度の散歩で「スポンジ」がボロボロと削れる	スリット入りの「滑り止め/カバー」を追加する

歩行の検証	
観察対象	**結果**
履いた直後の様子	嫌がったり痛がったりすることはなかった
	義足が理想よりも短かったものの、底は地面に付いた
歩行の様子	義足が短いからか、または慣れていないためか、積極的な使用は見られず、義足を使いこなすというよりは残りの 3 本の脚を駆使したような歩き方だった
脚の赤み	歩行後、義足を外した脚に赤みは見られなかった

全体を通じた感想	
島田さん	ぎこちなく歩いているのはおそらく義足が短いから。計測するときに基準とする位置を肘頭にするべき。また、今回は着脱部材をなんとなく一周巻いたが、次回からは前面だけで大丈夫そう。
長谷川さん	新しい義足に慣れていないだけだと思う。いつも島田さんに作っていただいている義足でも慣れるのに時間がかかっている。

4.2.4. 第 4 回 訪問

【訪問日】2020/09/20
【製作物】シリコンライナー、義足

部品名	素材名	
患部保護材 ①	ストレッチ素材	●
患部保護材 ②	オレフィン系熱可塑性樹脂	●
患部保護材 ③	パイル素材	●
フレーム	ポリエチレン樹脂	●
カシメ	鉄	●
スペーサー	EVA樹脂	●
スポンジ	NR/SBR系発泡体	●
滑り止め	合成ゴム	●
サポート	合成ゴム	●
着脱部材	メンファスナー	○

Fig. 84 従来の部品に対応づけた表と製作物

Fig. 85 フィッティングの様子

Fig. 86 歩行の様子

着脱の検証		
試着物	**結果・フィードバック**	**改善策**
シリコンライナー	脚全体が覆われ、体重分散も十分にできる	
	地面に着くときは横に広がるが、義足の中だとあまり広がらない	先端に厚みを加え、広がりづらい義足の中でも脚を保護する
義足	長さはちょうどよく、体重分散も十分にできる	
	10 分程度の散歩で「スポンジ」が削られることなく構造が保たれる	
	少しだけきついように見られる	内側を少しだけ広げる
	「滑り止め/カバー」の底の部分の摩耗が目立つ	スリットに接する円を「滑り止め/カバー」の底に追加する
	イヌにとっては重いのではないか（義足の重さ：約 349g）	まっすぐな外形を保つために追加したデータを削る

歩行の検証	
観察対象	**結果**
履いた直後の様子	嫌がったり痛がったりすることはなかった
歩行の様子	義足の長さがちょうどよく、前回の歩行に見られた「短さによるぎこちなさ」は見られなかったが、使い慣れていないためか積極的な使用は見られなかった
	義足を使いこなすというよりは残りの 3 本の脚を駆使したような歩き方だった
脚の赤み	歩行後、義足を外した脚に赤みは見られなかった

全体を通じた感想	
島田さん	長さは改善されたから、あとは慣れの問題か重さの問題だと思う。もしかしたらシリコンライナーが十分に義足の中で広がっていないから脚の先端が痛いのかもしれない。
長谷川さん	新しい義足に慣れていないだけだと思う。いつも島田さんに作っていただいている義足でも慣れるのに時間がかかっている。

4.2.5. 第 5 回 訪問

【訪問日】2021/01/06
【製作物】シリコンライナー、義足

部品名	素材名	
患部保護材 ①	ストレッチ素材	●
患部保護材 ②	オレフィン系熱可塑性樹脂	●
患部保護材 ③	パイル素材	●
フレーム	ポリエチレン樹脂	●
カシメ	鉄	●
スペーサー	EVA樹脂	●
スポンジ	NR/SBR系発泡体	●
滑り止め	合成ゴム	●
サポート	合成ゴム	●
着脱部材	メンファスナー	○

Fig. 87 従来の部品に対応づけた表と製作物

Fig. 88 フィッティングの様子

Fig. 89 歩行の様子

着脱の検証	
試着物	**結果・フィードバック**
シリコンライナー	先端に追加した厚みは、歩行に大きな影響を与えないと思われる
義足	全体のフィット感はぴったり
	「滑り止め/カバー」の底に円を追加したため、底が摩耗しない
	およそ 65%に軽量化したため、脚への負担を軽減できたのではないか（前回の義足の重さ：349g → 今回の義足の重さ：227g）

歩行の検証	
観察対象	**結果**
履いた直後の様子	嫌がったり痛がったりすることはなかった
歩行の様子	使い慣れていないためか積極的な使用は見られなかった
	義足を使いこなすというよりは残りの 3 本の脚を駆使したような歩き方だった
脚の赤み	歩行後、義足を外した脚に赤みは見られなかった

全体を通じた感想	
島田さん	脚長差（義足を履いている右前脚と履いていない左前脚の長さの差）が 5mm あって、ちょうど良い。しばらく使ってもらったらどうか。
長谷川さん	新しい義足に慣れていないだけだと思う。いつも島田さんに作っていただいている義足でも慣れるのに時間がかかっている。

4.2.6. 第 5 回 訪問後 日常使用

第 5 回の訪問の際には脚に赤みは見られなかったものの、最後までヴィスくんが義足を使いこなす様子は見られなかった。前述のように、島田さんと長谷川さんによると修理や交換などで新しい義足を履くときには慣れるまでに 2 ~ 3 ヶ月ほどの期間を要するそうだ。そのため履いてすぐにスタスタ歩くことはなく、残りの 3 本の脚を駆使したぎこちない歩き方をするのはごく自然であるとおっしゃっていた。

義足の評価はヴィスくんが義足に慣れるまでは行うことができない。そこで、より長期的な使用を行っていただけるよう義足とシリコンライナーを長谷川さんに預け、可能な範囲内で普段のお散歩に使っていただくことになった。

以下は長谷川さんからいただいたフィードバックである。なお、義足が汚れないよう市販のカバー（黒い薄い布）が上からかぶさっている。

【日付】2021/01/16（義足を使っていただいてから 10 日後）

「午後の短い散歩で使っているが、まだ使いこなしている様子は見られない。もっと歩く距離・時間を増やしてみる。」

【日付】2021/01/17（義足を使っていただいてから 11 日後）

「自然な歩き方になってきた。脚の接触部分に赤みは相変わらず見られないので痛んでいないと思う。朝の 1 時間半の散歩でも使えるように、徐々に距離・時間を増やしてみる。」

Fig. 90 歩行の様子（長谷川さんによる撮影）

【日付】2021/01/18（義足を使っていただいてから 12 日後）

「駅の動物病院までの往復散歩で 1 時間歩くことができた。脚の接触部分に赤みは相変わらず見られないので痛んでいないと思う。一応予備で今まで使っていた義足も持っていったが、最後まで不要だった。」

Fig. 91 歩行の様子（長谷川さんによる撮影）

5. 評価

5.1. 義肢装具士における変化

本研究では、手作業で行われていた作業工程をデジタルプロセスへ移行し、製作そのものを 3D プリンティングに置き換えることで義肢装具士の負担を軽減することを目指した。その結果すべての工程の負担を減らすことはできなかったものの、型紙作成や裁断、裁縫といった作業をカットしたり、寸法の再調節や義足の再製作の手間を軽減したりすることができた。すべての工程の負担を減らすことができなかったのは、試行錯誤を重ねた結果、CAD ソフトウェアや 3D プリンタなどを使う方がかえって労力を要する非効率な作業があることが分かったからである。例えば、最後の工程である着脱部材の作成においては、着脱部材を 3D プリントできないか模索したが従来の義足の素材を使う方が効率的であり、かつ、部品の機能も向上した。また脚型の型取りや修正など、国家資格を持った島田さんにしかできない手作業の工程もある。解決策として脚型の型取りを行うのではなく、ハンディタイプの 3D スキャナで脚型の 3D データを直接取得することも試みたが、データの精度の低さにより断念することになった。以上を踏まえ、無理にすべてデジタル化するのではなく以下のようにデジタル化できるところをデジタル化し、必要に応じて手作業の工程と組み合わせるハイブリッド型の製作プロセスを提案した。

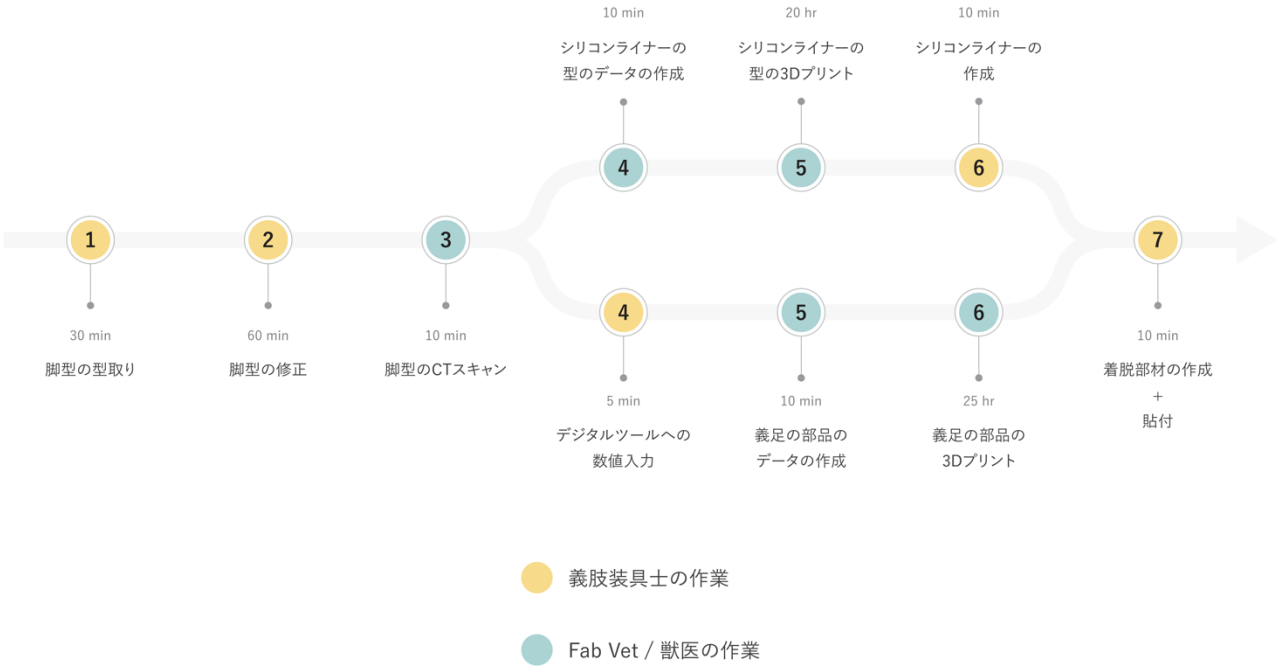


Fig. 92 3D プリンティングを用いた義足の製作工程

この製作プロセスではもともと 9 つあった作業工程を 5 つに減らすことができ、義肢装具士の実働時間も 6 時間から 2 時間に減らすことができた。3D プリントの完了を待つまでの時間（およそ 25 時間）は手作業を要する他の工程に取り掛かることができたり、計測やフィッティングにおける訪問のための移動に充てることができたりと、「義足を作りながら他の作業を行う」という、従来の工法では生まれなかった隙間時間を活用することが可能となった。作業効率を向上することでマルチタスクでの進行を可能にし、同時に複数の依頼を抱える島田さんの労力をなるべく軽減する手法となった。

また、仮に義足がフィットしなかった場合でも、従来のように作り直す労力を大幅に抑えることができる。本研究で開発されたデザインツールは、モデリングなどの知識の有無に関わらず誰でも簡単に操作が行えるように設計されているため、フィットしなかった箇所に対して島田さんがツール上で数値を変えるだけで新たな義足のデータが出来上がる。義足を作り直す際は、一部の部品だけ作り直せばいいケースもあれば、場合によってはすべてを作り直すケースもある。本研究が提案したデザインプロセスを採用することによって、いずれの場合でも義肢装具士に過度な負担をかけることなく、新たな義足を製作することがより簡単となった。

以下は島田さんからいただいたフィードバックである。

「作業が非常に楽になった。メンファスナーを貼って、合成ゴムを巻くだけ。2 ~ 3 日間徹夜で作っている状態に比べて断然楽。」

「今まで手作業で作ってきた義足が 3D プリンタで作れるのはすごい。いずれ 3D プリンタで義足を作る時代が来ると前から思っていたので、このようになるのかと実感した。ぜひ続けたい。手作りでは作ることができないような斬新な形状も作ることができる。」

「前聞いた話によると、昔はシリコンを使った義足は存在しなかったが、脚全体を覆うシリコンライナーが開発されたことで義足を作るのがだいぶ楽になったらしい。もし今回の義足が実用化されたら、このシリコンの技術革新と同じようなものになるのではないかと感じた。」

「技術革新が進んで作業をデジタル化すると、簡単すぎるから人が育たない、みたいなことが言われるが、僕は関係ないと思う。むしろ技術革新を取り入れたデザインプロセスの方がいい。従来の技術ややり方は勉強して知ればいいので、今の技術を学んで活用して、早く習熟するべき。手間がかからないのもいい。」

一方で、本研究で提案したデジタルデザインにはいくつかの問題点も残る。最初の製作工程にあたる「脚型の型取り+計測」においては、今まで通り手作業で石膏型を作らなければならない。前述の通り 3D スキャナの使用を検討したが、精度の低さによりヴィスくんの脚を直接 3D スキャン

しても正確な計測が行えず、国家資格を持っている島田さんが石膏型を作ることになってしまっている。また、シリコンライナーの製作においては、型に離型剤を塗っていてもなかなかシリコーンゴムが剥がれず取り外しに労力を要するという問題がある。型の素材として使用した FABRIAL-R とシリコーンゴムの相性が悪く、また、3D プリントする際にできる積層痕にシリコーンゴムが食い込んでしまったことが原因である。以上の問題に対しては解決する段階まで及ぶことができなかった。

以下は島田さんからいただいたフィードバックである。

「今の技術の問題点として、3D スキャンの精度がまだまだ低いというのがある。あと、シリコンライナーを外すのが面倒臭い。離型剤を使っていてもなかなか剥がれず、少しちぎれてしまう。素材の特性上くっついてしまい、積層痕に食い込んで剥がれない。」

5.2. イヌおよび飼い主における変化

使い手であるイヌおよび飼い主が抱える問題に対しては、プロダクト再錬成を通じて内部構造や形状をリデザインすることによって、より少ない部品数で現在の義足と同じ機能を持つ新たな義足の製作を試みた。部品数が少なければ少ないほど接着の際の段差が減り、イヌがかじってしまう領域を減らすことで義足の劣化を抑制することができるからである。その結果、部品数を 10 個から 5 個に、素材数を 10 個から 4 個に減らすことができた。

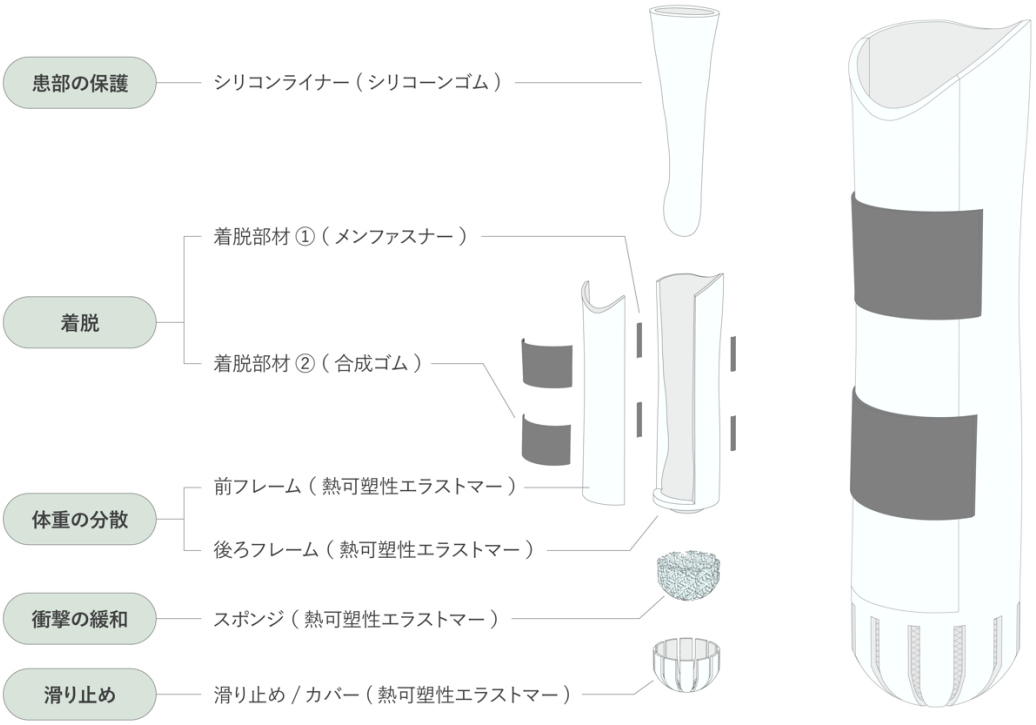


Fig. 93 3D プリンティングを用いて製作した義足の部品構成・素材・機能

しかし、この部品数の減少が義足の劣化ペースにどれほどの影響を与えるのかという点を検証することはできなかった。そもそも劣化のペースを観察するためにはヴィスくんが新しい義足に慣れて日常的に使いこなしていることが前提条件となるが、新しい義足に慣れるまでには前述の通りいつも 2 ~ 3 ヶ月ほどかかっている。義足の劣化具合を含めた総合評価は、この期間を経ないと行うことができない。短期的な検証として行った着脱と歩行においてはヴィスくんが義足をかじる様子は見られなかったので、義足を日常的に使い始めてから数ヶ月のスパンでも同様にかじることがないかなど、長期的な検証の余地がある。

義足の使用感という軸ではヴィスくんから感想を直接得ることができないものの、フィット感が悪いとイヌは痛がってしまってそもそも歩かないという評価指標がある。すべての訪問においてヴィスくんが痛がる様子は見られず、歩行の検証後も脚に赤みは見られなかったのでフィット感は良かったと言える。また、最後の訪問後に使い続けていただいた結果、2 週間ほどで地面にしっかりと義足をつけながら自然な姿勢で歩くことができていた。3D プリンティングの特性であるスーパーフィットを活かし、ぴったりと履くことができるシリコンライナーとそれにぴったりと沿う形状の義足をデザインすることによって高いフィット感を実現することができたのではないだろうか。また島田さんによると、脚に直接触れる部分が布よりもシリコーンゴムの方がイヌにとって履き心地が良いとされているそうだ。手作りの義足では、「患部保護材」としてパイル素材が使われていたが、本研究で製作した義足にはシリコーンゴムが直接肌に触れる素材となっているため、痛がらずに歩くことができたのはこの素材の変化も影響したと考えられる。

6. 考察

6.1. 結論

本研究の目的は、作り手である義肢装具士の負担軽減と、使い手であるイヌ・飼い主の義足の劣化抑制の 2 点だった。

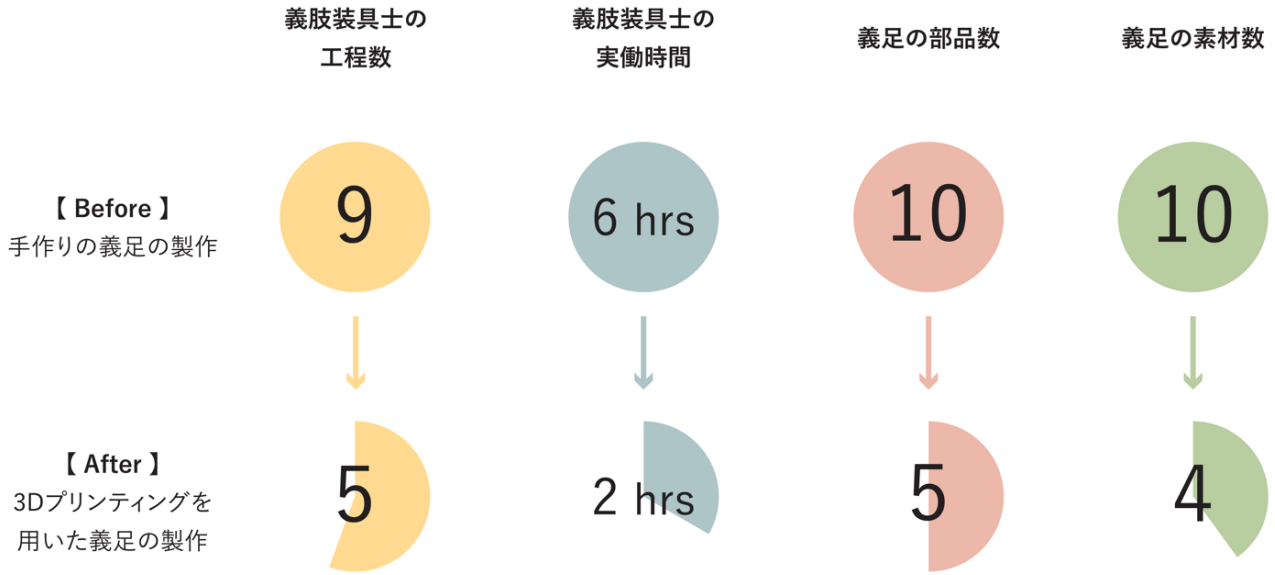


Fig. 94 手作りの製作と、3D プリンティングを取り入れた製作の比較

義肢装具士側の問題の焦点となった「負担」が指す内容に、「工程数」と「実働時間」が挙げられる。本研究では 3D プリンティングとデジタルデザインを用いた新たなデザインプロセスを提案し、もともと 9 つあった工程数を 5 つに減らすことができた。さらに、義肢装具士の実働時間を 6 時間から 2 時間程度まで抑えることができたため、3D プリンタに製作を任せている間に、島田さんは手作業を要する他の工程に取り掛かることが可能となった。

一方でイヌ・飼い主側で問題となっていた義足の劣化については、部品点数を少なくすることでイヌがかじることができる部品間の段差を少なくしようと試みた。特殊な内部構造をデザインすることによって 1 つの部品の中でも異なる機能を持ち合わせた義足を作ることができ、部品数は 10 個から 5 個に、素材数は 10 個から 4 個に減らすことができた。

またこのような義足の再設計を通じた素材数の減少に伴って、「体重分散の機能性向上」というメリットが生まれた。体重分散は「フレーム」が担っていた機能だが、手作りの義足では脚の後ろ部分のみが「フレーム」に覆われ、前部分はメンファスナーと合成ゴムで構成されていた。「フレーム」に使われるポリエチレン樹脂と比べてメンファスナーと合成ゴムは強度が落ちてしまう。本

研究では脚の後ろ部分だけでなく前部分も「フレーム」で覆うように再設計したため、脚全体をより頑丈にサポートできる構造となった。「前フレーム」に使用した熱可塑性エラストマーはポリエチレン樹脂と同様にメンファスナーと合成ゴムよりも強度があり、より効果的な体重分散が可能となった。

上記の成果も出た一方で、課題もまだ残っている。Fig. 95 は、研究当初目指していた義足の良さと製作プロセスの良さを総評したチャートであり、「フィット感」「時間・労力」「部品数」「安全性」の 4 項目において優れた義足の製作を試みていたことが示されている。

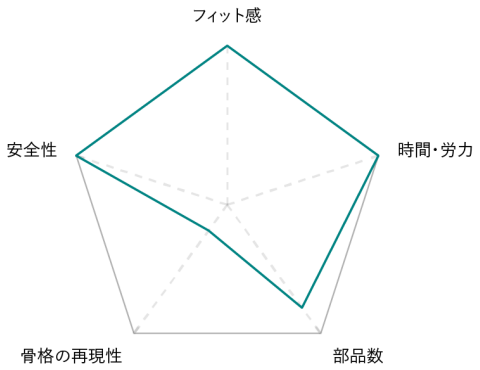


Fig. 95
評価を示したレーダーチャート
（研究当初の目標）

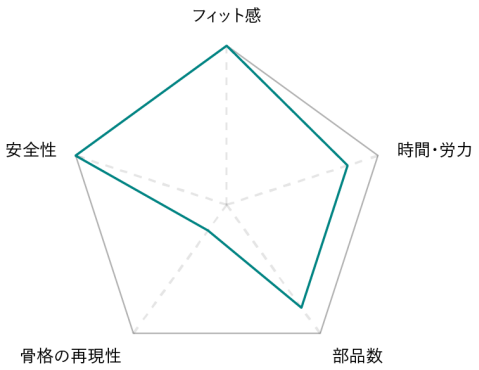


Fig. 96
評価を示したレーダーチャート
（研究後の結果）

製作やフィッティングを経た上でこれらの項目を見直すと、「フィット感」「部品数」「安全性」の 3 つの項目目標は達成することができたものの、「時間・労力」においては石膏型の製作やシリコンライナーの取り外しといった手作業の負担が残ってしまっているため、Fig. 96 に見られるような結果となった。

6.2. プロダクト再錬成を通じたファインディング

本論文の冒頭でも述べた通り「プロダクト再錬成」とは、もともと複数の異なる部品で作られていた義足を再設計することによって 3D データで一体化し、なるべく少ない素材数を使って従来と同等の機能を残すデザイン手法である。Parts Consolidation で行われる「既存の部品を 3D プリンタで一体出力すること」にとどまらず、プロダクトの構成や形状、部品間の役割の変更、ユーザーのニーズに合わせた製作工程の最適化など、プロダクトに関わるすべての項目を検討することで「全体」を大きく見直し再設計する営みを指す。一般的な製造現場においてプロダクト再錬成を採用する価値は多岐に渡り、例えば、素材数の減少によるコスト削減やリサイクル可能性の向上、素

材量の減少による軽量化・小型化、組立などの製造プロセスの省略による工場の省人化、サプライチェーンのリスクの軽減などが挙げられる。本研究は上記に挙げた様々なメリットが起点となったのではなく、イヌがかじる部品間の段差を解消することで義足の劣化を抑制するという極めてピンポイントな現場のニーズドリブンでプロダクト再錬成の実践を試みた。しかし、いざ単一素材（FABRIAL-R）で様々な機能を再現しようと製作を行ってみると素材そのものの特性の限界などに悩まされ、別素材の使用を検討する局面に度々立った。そういった経緯から、すべてを単一素材で作るのではなく必要に応じて違う素材を活用しながら Fig.97、98 に見られるような再設計を行った。

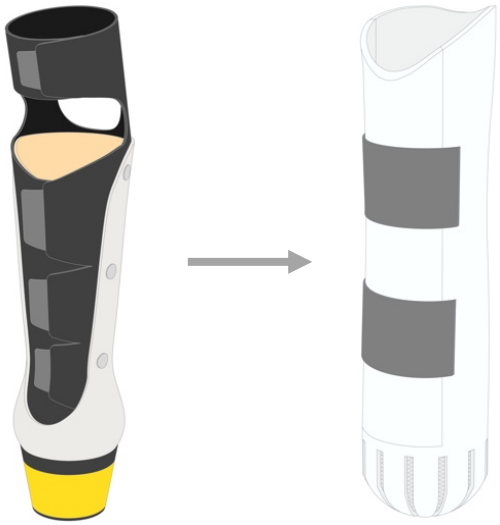


Fig. 97　義足の変化

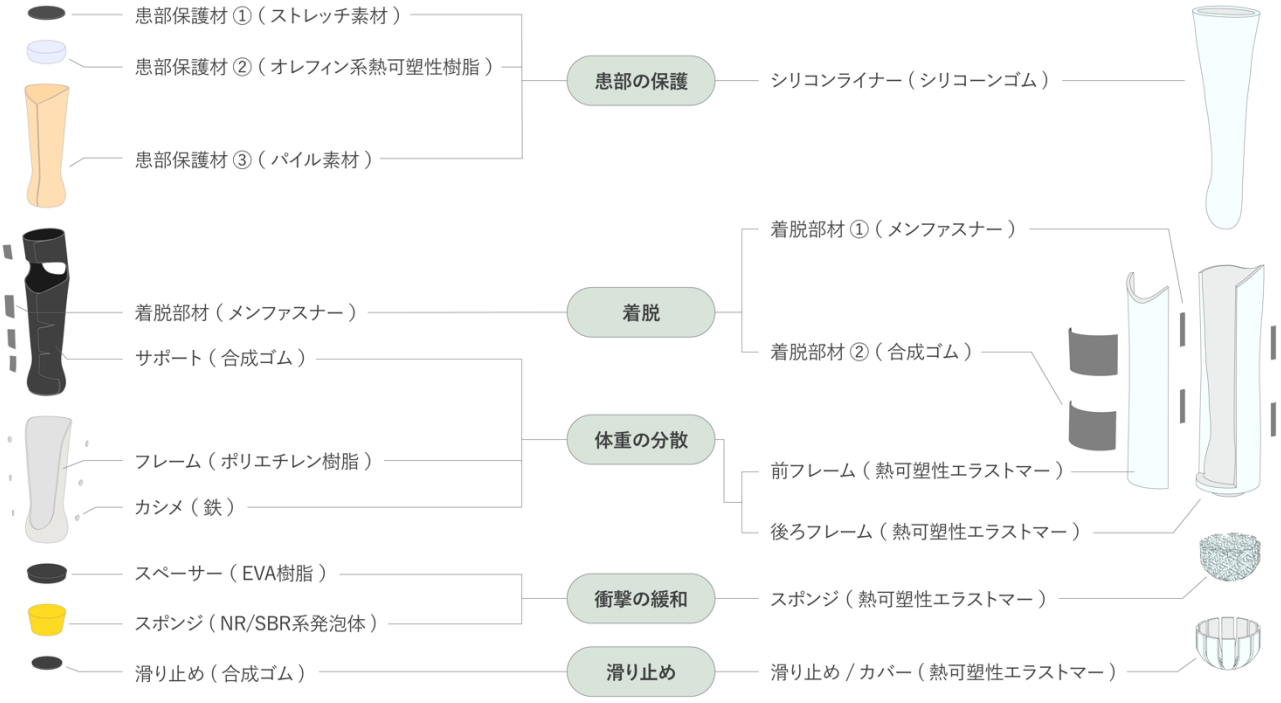


Fig. 98　手作りの義足と、再設計した義足の部品・素材・機能比較

本論文では、各部品の機能を再現するために行った試行錯誤を記述してきた。ここで、イヌ用義足に限らず、他のプロダクトでプロダクト再錬成を実践する際も参考になるよう、本研究におけるプロダクト再錬成の営みを通じて習得した 3 つのファインディングについて以下にまとめる。

1 つ目に、「**トレードオフの関係を考慮し、妥協点を見つける**」という点が挙げられる。ここで言う「トレードオフ」には、機能や重量、出力時間など、その部品の製作に関わるすべての事項を含む。「サポート」と「フレーム」を例に説明したい。

まず「サポート」には、(1)脚の固定に適度な伸縮性、(2)着脱が可能な構造、(3)体重分散が可能な強度、の 3 つの特性が求められていた。そこで、部品そのものを伸ばして脚を上から入れるような設計を構想し、伸縮性と強度の 2 つの特性に焦点を絞った試作を行うこととなった。しかし試作を通じて、伸縮性と強度がトレードオフの関係にある、つまり、十分な伸縮性を持つ構造だと強度が落ち、逆に十分な強度を持つ構造だと伸縮性が下がってしまうということが分かったのである。伸縮性は「脚の適度な固定」という機能を、強度は「体重分散」という機能を実現し、どちらの機能も「サポート」にとって必要不可欠だった。そのため当初の試みの追求は断念し、別素材を使用する方向性に切り替えた。これが、「機能」と「機能」がトレードオフの関係にあった例である。

続いて「フレーム」においては、「機能」と「重量」がトレードオフの関係にあった。「フレーム」に求められる機能は「体重分散」だったため、当初はヴィスくんの脚型がカーブしている部分に沿った形状にするのではなく、カーブが窪んでいる部分に厚みを加えてならすことで強度の向上を目指した。しかしそうすると義足が重くなってしまうことがフィッティングを通じて判明した。製作段階では気が付かなかったことだが、ヴィスくんの歩行の検証を経て積極的な使用が見られなかった原因を考えている時に島田さんから指摘を受けたのである。ヴィスくんが普段使っている手作りの義足は 231g であり、この時のフィッティングに使用した義足は 349g だった。約 1.5 倍もの重量だったのである。ここで、カーブに加えた厚みを削ぎ落として体重分散の機能性を下げるか、それとも、体重分散を優先して重い義足のままにするか、島田さんと相談し落としどころを探った結果、前者を選択した。カーブの部分を埋めずに脚型に沿った形状にリデザインしたところ、義足は 227g になった。3D プリントした前回の義足よりも軽くなっただけでなく、手作りの義足より 4g 軽い義足を製作することができたのである。またフィッティングを通じて、体重分散も十分にできることが分かった。当然、厚みがあった方がより効果的な体重分散が可能だったものの、ヴィスくんが歩いたり走ったりするために必要な強度を保つことができていた。加えて「フレーム」の出力時間も 32 時間 23 分から、25 時間 24 分に減った。出力時間の軽減は当初の目的にはなかったが、義足の軽量化に伴って得られた副次的効果である。

以上の例に見られるように、プロダクト再錬成においては「トレードオフの関係を考慮し、妥協点を見つける」ことが重要となる。他のデザイン手法と違って単一素材という制約の中で製作を行うため、主に「機能」を中心とするトレードオフの影響を受けやすい。このことを認知し、その部品にとって何が最も大切か、何を優先するのか（重くなってもいいから機能性の高さを優先する、機能は多少下がってもいいから軽さを優先するなど）、また、もしその部品の影響を受ける部品（隣接する部品や、連動する部品など）があるのなら、それらの部品の優先順位を妨げはしないか、といったように全体を考慮しながら総合的に妥当性を見極めるべきである。「妥協点」というとネガティブな印象を受けるかもしれないが、対立する二項に直面した際にそれぞれの条件を理解した上でどこまで双方が歩み寄るかを決める重要な判断となるのだ。

2 つ目に、「**段階的に変更を加え、都度検証を行う**」という点が挙げられる。前述の通り、プロダクト再錬成を行う際は既存のプロダクトに使われるそれぞれの部品の機能に応じた再設計の検討を行う。試作やテストを通じてどの部品が 3D プリントできるか、またはできないかが分かり、3D プリント可能な部品を一体でまとめて出力するというプロセスをたどる。ここで重要となるのは、検証の際に最初から一体出力で 3D プリントしたプロダクトを使わないということだ。試作の段階で一体出力が可能であると判明していても、3D プリントする部品は徐々に増やし、増やした部品の検証が完了したら次の部品に移る、といった具合で進めるべきである。これには 3 つの理由が挙げられる。

1 つ目の理由は、より確実な検証結果を得ることができるからである。第 4 章でも記述があるように、例えば検証の際にそのプロダクトがうまく使われなかった場合、原因が「部品 A」にあるのか「部品 B」にあるのか「部品 C」にあるのか、最初から一体出力されていると特定がしづらい。もちろん特定が容易な場合もあるが、筆者の経験では、いくつかの要因が互いに影響しあっているケース、または個別で複数存在しているケースがほとんどであった。そこで、段階的に 3D プリントする部品を増やせばその都度各部品の検証を確実に行うことができるため、『前々回「部品 A」を検証し、前回「部品 A と B」を検証したから「部品 C」が原因であるに違いない』といったように差分で問題の原因特定を行いやすいのである。

2 つ目の理由は、一体で出力すると機能が変化する部品の存在を考慮する必要があるからだ。「スポンジ」と「滑り止め」を例に説明したい。「スポンジ」に求められている機能は「衝撃緩和」であり、このためには特定のやわらかさが必要だった。しかしこの「スポンジ」には「滑り止め」が付くため、単体で「スポンジ」を製作・検証する時よりも実際には動きが制限されてしまいやわらかさが下がってしまう。このことを認知する前に最初から一体で出力していたら、「スポンジ」は想定していたやわらかさよりも硬く感じ、ヴィスくんの脚に負担がかかっていたであろう。また、逆に「スポンジ」が「滑り止め」の機能を変えることもあった。従来の「滑り止め」は「スポンジ」の底面のみに接着していた部品であり、滑り止め以外の機能を持っていなかった。しかし、「スポンジ」のやわらかさを再現するために細かな構造体を使用することになったため、この構造体が地面に擦れる際に壊れないよう、カバーとしての機能を持つことも求められたのである。本研究の場合は、「滑り止め」による「スポンジ」のやわらかさの低下や、「スポンジ」による「滑り止め」の機能の追加を試作の段階で想定していたため、あらかじめよりやわらかい構造体を採用し、「スポンジ」の底面だけでなく側面も覆うようなデザインに変更した。これらは検証を経ずに、自分たちの想像や島田さんから事前に受けたアドバイスによって認知したことである。しかしそういったインプットなく、最初から一体出力したものを検証していたらどうなっていただろうか。「スポンジ」は硬すぎてヴィスくんの脚を痛めていたかもしれないし、「滑り止め」に側面がないせいで「スポンジ」が散歩中に壊れていたかもしれない。本研究のように部品同士が機能を変更し合うケースに当てはまらないプロダクトもあるが、隣接する部品、または連動する部品を扱うのであれば考慮する必要がある。

3 つ目の理由は、ユーザーの安全を確保するためである。製作が完了した次の段階として、本当にその部品が機能するのか、欠陥はないかといった検証段階に移る。製作サイドでいくら徹底された検証を行ったとしても、実際にそのプロダクトを使うエンドユーザーが試用しないと意味がない。自分たちの想定外の挙動を示したり、想定外での環境で使用したりと、ユーザーの検証には未知のリスクが常に伴うのである。どのようなデザイン手法でも通用する理由であるが、プロダクト再錬成においては特に重要となる要点である。最初から一体出力したプロダクトを検証に使用してしまうと各部品の有効性や使用感を確認していない状態から始めるため、部品が割れる、壊れるといったことなどが原因でユーザーが怪我をしてしまう危険性が伴うのだ。部品を段階的に増やすことでより安全な検証が可能となる。

以上を踏まえ、プロダクト再錬成においては「段階的に変更を加え、都度検証を行う」ことが重要である。なお 3D プリントが行われない部品には、代わりに既存のプロダクトに使われている部品を一時的に使用すれば良い。

参考までに、本研究では以下のように 3D プリント部品を段階的に増やしていくことで義足の改良を行った。

部品名	素材名	1	2	3	4	5
患部保護材 ①	ストレッチ素材	●	◎	◎	◎	◎
患部保護材 ②	オレフィン系熱可塑性樹脂	●	◎	◎	◎	◎
患部保護材 ③	パイル素材	●	◎	◎	◎	◎
フレーム	ポリエチレン樹脂		●	◎	◎	◎
カシメ	鉄			●	●	●
スペーサー	EVA樹脂			●	●	●
スポンジ	NR/SBR系発泡体			●	●	●
滑り止め	合成ゴム				●	◎
サポート	合成ゴム				●	◎
着脱部材	メンファスナー					

● シリコーンゴムを使用

● FABRIAL-R を使用

● 手作りの義足に使われる部品を使用

※ ◎はひとつ前からの改良を示す

Fig. 99 段階的に 3D プリント部品を増やしたプロセス

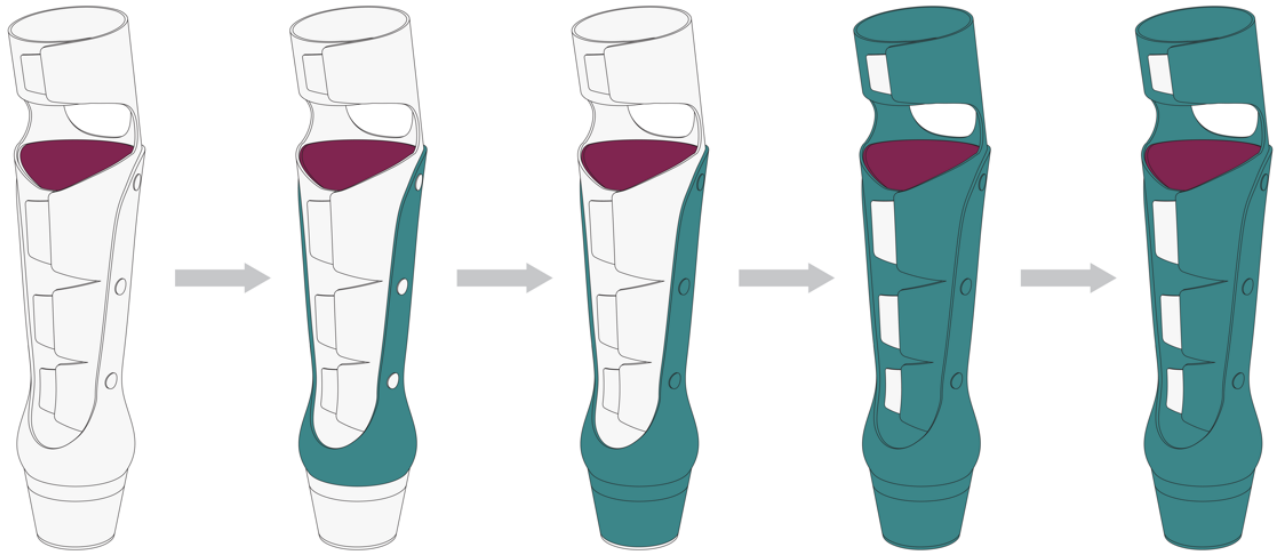


Fig. 100 3D プリントした領域を元の義足上にマッピングし、その経緯を示した図

3 つ目に、「**素材や機材の制約に柔軟に合わせる**」という点が挙げられる。まず「素材の制約」について説明したい。プロダクト再錬成においては単一素材での一体出力を目指すため、素材そのものの特性の限界に直面する場合がある。本研究ではイヌ用義足の製作にあたり、イヌが安全に使うことができる素材として FABRIAL-R を採用した。FABRIAL-R は前述の通り熱可塑性エラストマーでありやわらかさとしなやかさを特徴としているが、「患部保護材」を製作する際にこの素材の制約にぶつかったのである。「患部保護材」は刺激に弱く敏感な患部に直接接触するため、やわらかさと弾力が求められていた。そこで「スポンジ」と同様に内部構造の工夫を通じて試作を行ったが、一番やわらかい構造体でも、理想とするやわらかさに到達することができなかった。そもそも FABRIAL-R 自体が元から持つ触感が硬すぎることが分かり、この経緯から FABRIAL-R の使用を断念しゲルのような触感を持つ「シリコンライナー」の製作に切り替えたのである。

続いて「機材の制約」について説明したい。本研究においては FABRIAL-R の使用を先に決めていたため、3D プリンタは FABRIAL-R ほどのやわらかいフィラメントでも安定した出力が可能な機種に限られており、L-DEVO を使うことにした。しかし L-DEVO は FFF 方式の 3D プリンタであるため、出力の際のサポート材の有無を考慮しなければならない。「スポンジ」の製作を例に挙げる。「スポンジ」に求められる衝撃緩和の機能には特定のやわらかさが必要だったため、独自のインフィルパターンを製作することで内部構造によるやわらかさの制御を試みた。この際、ラティス構造をベースとした構造体を複数試作したが、構造体の選定の軸となったのはサポート材の有無だった。サポート材について詳しく説明したい。FFF 方式では下から一層ずつフィラメントを積み上げて出力していくため、積層方向から 30 ~ 45 度以上の角度の差があるとサポート材と呼ばれる支えを必要とするのである。このサポート材がないとフィラメントは重力に従って落ちてしまう。通常サポート材は 3D プリントが完了した後に取り外すが、本研究では部品の一体出力を見据えてい

たため、義足の内部に埋め込まれる「スポンジ」にサポート材が付いてしまうと後から取り外しができないことが分かっていた。以上の理由から、「スポンジ」に使用する内部構造は、サポート材を必要としない構造体で構成されていることが必須だった。そして試作を通じて以下の 2 種類の構造体はサポート材を必要とすることが分かったため、候補からあらかじめ外したのである。

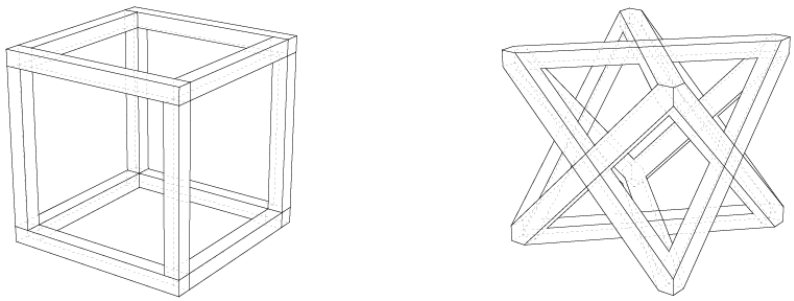


Fig. 101 サポート材を必要とした 2 種類の構造体

Fig. 102
Nature Architects のヘッドホン [10]

このように、使用する素材や機材に応じて製作条件が変化する。例えば第 1 章で先行事例として紹介した Nature Architects のヘッドホン[10]は粉末床溶融結合方式の 3D プリンタを使って作られているため、当然のことながら、同じデータを FFF 方式の 3D プリンタを使って出力してもうまくいかないのである。

デザインにおける制約は、クリエイティブな創造のための起爆剤だと考える。限られた製作環境やリソースの中でどのようにデザインすることができるか、新たな手段を探るためのリミットを設けてくれるからだ。もしプロダクト再錬成を実践する際に上記のような素材・機材の制約がなく、どこから着手すればいいか悩んでいる場合は、試しにまずこのリミットを自分で決めてしまえば良い。そしてそのリミットの中でトライアンドエラーを繰り返し、仮にその制約を打破できないと分かった時には、無理に単一素材に固執せず、勇気を持って潔く使用を断念すれば良いのである。別素材を検討したり、全体の再設計を行ったりしているうちに再び良いアイディアが生まれることもあるため、「素材や機材の制約に柔軟に合わせる」ことが重要となるのだ。

以上、「トレードオフの関係を考慮し、妥協点を見つける」「段階的に変更を加え、都度検証を行う」「素材や機材の制約に柔軟に合わせる」の 3 点が、本研究におけるプロダクト再錬成を通じて習得したファインディングである。

6.3. 展望

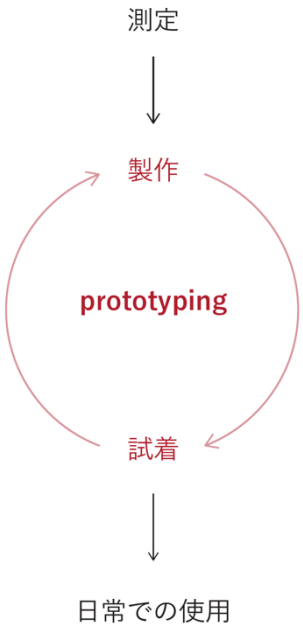


Fig. 103　製作サイクル

プロダクト再錬成を通じて義足の部品数および素材数を減らすことができた一方で、イヌ・飼い主の日常的な使用における変化を検証するまでに至らなかった。着脱および歩行の際の観察ではヴィスくんが義足をかじる様子は見られず、2 週間ほど使い続けていただいた後も、特筆すべき劣化は確認できなった。ヴィスくんが義足を使い慣れるまでの 2 ~ 3 ヶ月を経た後、長期的に使用した際も同様にかじることがないのか、義足の交換までの期間が延びるかなど、部品数の減少による効果について検証を行う余地がある。

また、デジタルデザインを取り入れた作業工程にも改善の余地がある。例えば脚型の 3D データを取得するためにヴィスくんの脚を直接 3D スキャンすることができれば島田さんが石膏型を作る作業は不要となり、実働時間をさらに 90 分ほど減らすことができる。本研究ですでに実働時間を 1/3 まで抑えることができているが、技術の進歩に伴ってより負担を軽減することができると良い。

本研究のようにユーザーのニーズを重視し、ユーザードリブンで製作が行われるプロセスを User Centered Design と呼ぶ [26]。このデザイン手法において主体となるユーザーは本研究の場合イヌのヴィスくんであるが、ヴィスくんの気持ちを直接聞くことができない。そこで日常的な使用における観察の他に、定量的な検証を行うことで義足の機能を評価することも考えられる。例えば、フォースプレート（圧反力板）という圧力センサーの上を歩かせて各肢への負重能力を評価するフォースプレート検査[27]や、モーションキャプチャを通じた動作解析[28]といった手法が挙げられる。

Fig. 104
フォースプレート検査 [27]

Fig. 105
モーションキャプチャを通じた動作解析 [28]

こういった検証を行うことで、前章で述べた効率的な体重分散についても定量化や可視化が可能となる。

また、本研究で製作した義足がイヌの QOL（Quality of Life / 人生や生活の質）の向上といった副次的効果をもたらすのかについても研究の余地がある。仮定の話になるが、かじる段差が少なくなったことでストレスを軽減することができたり、よりフィット感が高い義足を使うことによって歩行に変化がもたらされ各肢にかかる負担を軽減することができたりと、研究目的の枠を超えた領域での効果やメリットが生じる可能性もあるのではないだろうか。加えて、上記のような研究を進めることができれば、義足そのもののさらなる改良を行うこともできる。例えばフォースプレート検査を用いて各肢への負荷を測定した結果、「スポンジ」がより硬い方が脚への負担が少ないといったような、本研究では得ることができなかった新たな情報を獲得したとする。その場合はそれに基づいて新たな義足データを作成し、再び検証と製作の循環を繰り返していくことによってイヌにより快適に使ってもらうことができる義足の製作が可能になると考えられる。

一方、「義肢装具士の負担軽減」と「義足の劣化抑制」という本研究の目的を起点とするのではなく、「3D プリントイヌ用義足」という観点から全く別の義足を製作する手段も考えられる。上記の 2 つの研究目的は、現場でのヒアリングを通じて判明したニーズに対するアプローチだった。しかし根本的に異なるアプローチを取ったらどうだろうか。例えば義足を「失った身体の一部を補填するためのツール」と捉えるのではなく、「身体拡張を行うためのツール」として捉えることも可能である。ヒト用の義手や装具のデザイン開発を行う竹腰氏は、ボディの一部（手や脚など）を失った後の身体性について、「更新」「復元」「拡張」という 3 つの発展の方向性を提示している[29]。「更新」は幻肢痛（事故などで手や脚を失っても、まだ手や脚があるように感じる「幻肢」が痛むこと[30]）の消失を指し、「復元」は手の存在を再現することを指し、「拡張」は 3 本目の腕の追加といった身体拡張の可能性を指している。この 3 つのアプローチのうち本研究で行ったことに最も近い方向性は「復元」だが、別の可能性として「拡張」もあり得るのだ。「3D プリントイヌ用義足」のフィールドに当てはめると、失った脚を補填するだけでなくイヌの身体機能を超える義足の開発が考えられる。例えば竹腰氏が例示したようにイヌの 5 本目の脚を製作したら、フォークやスプーンを使って食事をしたり、ドアノブに「脚」を伸ばしてドアを開閉したり、自分でシャンプーやトリミングができたりと、イヌの通常動作の範疇を超える動きが実現できると考える。またこのような「新機能の実装」の他にも「既存の動作の向上」というアプローチも可能である。例えば今まで跳ぶことができなかった高さまでジャンプすることができたり、今までより速く走ることができたり、階段の上り下りがよりスムーズにできたりするのではないだろうか。上記の例は全て仮定の話だが、想像力次第でどこまでも可能性は広がる。当然のことながら、3D プリンタや素材の制約など現実的な側面を考慮する必要はあるが、本研究で行った製作とは根本的に異なるアプローチを模索することもオプションの 1 つにあると考える。

7. 謝辞

2018 年春学期から 3 年に渡ってご指導くださった田中浩也教授に心より感謝申し上げます。私が 3D プリンタの存在を知ったのは、高校 3 年生の体験授業で初めて田中教授の講義を受けた時でした。立体物が印刷される映像が流れた時の衝撃は今でも忘れられません。以来、大学では田中教授のもとで 3D プリンタを使った研究がしたいと思い続け、あの日から 5 年以上が経った現在、田中教授のご指導のもとで研究し卒業論文を執筆できたことがとても嬉しく、誇らしいです。

本研究にあたって多大なご協力をいただいた東洋装具医療器具製作所の島田旭緒さん、日本獣医生命科学大学の原田恭治准教授、長谷川圭子さん、ヴィスくんにも感謝申し上げます。この方々がいらっしゃらなければそもそも本プロジェクトは始動していませんでした。お忙しい中、学生の話に耳を傾けてくださり、この研究が実現可能となるよう多大なご協力を賜りました。ありがとうございました。

大野一生さん、常盤拓司さん、青木まゆみさん、淺野義弘さん、株式会社フュージョンテクノロジーの井上勤さんにも感謝申し上げます。コロナ禍での Home Lab を可能にしてくださったり、研究においてご指導いただいたりと、大変お世話になりました。おかげさまでとても充実した研究を続けることができました。

また、株式会社慶應イノベーション・イニシアティブ代表取締役社長／グリー株式会社取締役の山岸広太郎さんには助成金の多大なるご支援をいただきました。ありがとうございました。

そして私を支えてくださった家族、友人、関係者の皆様に心からの感謝を申し上げます。経済面で支えてくれた父、進捗を常に心配し自由に研究ができる環境を作って相談に乗ってくれた母、隣の部屋で毎晩 3D プリンタの騒音に耐えてくれた兄、そして、イヌのためになる何かをしたいという原動力を与えてくれた愛犬モップに感謝申し上げます。コロナ禍で情勢が厳しくなっても、ここまで自由に活動することができたのはひとえに家族のおかげです。私のわがままでたくさん迷惑をかけてしまっていたのに、どんな状況でも私を後押しして応援してくれる温かい家族に恵まれました。感謝してもしきれません。

研究室のメンバーにも感謝申し上げます。手取り足取り指導してくださった先輩方、いつも明るくサポートしてくれた後輩たち、そして同期の佐倉玲さん、森瑞貴さん、河井萌さん、松本夕祈さん、ありがとうございました。特に佐倉さんは同じプロジェクトメンバーとして 2 年半一緒に研究活動を行い、研究に対する不安や課題を一緒に乗り越えてくれた大切な仲間です。何度も佐倉さんに救われ、1 人だけではここまでできていなかったと痛感していました。本当にありがとうございました。

多くの方々に支えていただいたおかげで充実した大学生活を送り、好きな研究に打ち込むことができたと実感しています。最後のフィッティングの後にヴィスくんが 3D プリント義足を自然に使いこなしている動画を見て、自分が高校生の時からずっと実現したかった光景に心底感動しました。そんな夢を実現できた研究室生活は、間違いなく大学時代のハイライトの 1 つです。もうゼー

タで残留することも、合宿でみんなとわいわいすることも、FabNow で睡眠不足になりながら必死に製作することもないと思うととても寂しいですが、研究室で培った経験と知識を糧にこれからも頑張っていきます。

ここまでお世話になったすべての方に重ねてお礼申し上げます。ありがとうございました。

8. 参考文献・引用文献

[1] 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. 東京, 日経 BP 社, 2016, 175p.
[2] 慶應義塾大学 SFC 研究所 ソーシャル・ファブリケーション・ラボ 竹田和平センター. “Super Fit Lab”. https://superfitlab.org/, (参照 2021-01-22).
[3] 淺野義弘, 増田恒夫, 田中浩也. 共創型ものづくりにおけるパラメトリックモデリングの導入. ヒューマンインターフェース学会誌. 2020, vol. 22, no. 1.
[4] 若杉亮介. 3D プリンタを用いた、マルチステークホルダー型プロダクト製作の実践 -看護用ケア用品の製作を通じて-. 慶應義塾大学 総合政策学部, 2018, 56p.
[5] JSR 株式会社. “JSR、ANA と SHC デザインが 3D プリント義足を共同開発”. 2016-08-26. https://www.jsr.co.jp/news/2016/20160829.html, (参照 2021-01-22).
[6] PEDGE. “四肢が不自由になったペットに元気を取り戻す「動物用義肢装具」”. ipet Insurance. 2019-03-15. https://pedge.jp/interview/toyosogu/, (参照 2020-12-28).
[7] 金山隆之介. 東京）足の不自由な犬に贈る　動物向け義肢装具の先駆者. 朝日新聞. 2018-11-21, 朝日新聞デジタル, https://www.asahi.com/articles/ASLCC55T3LCCUTIL008.html, (参照 2020-12-28).
[8] Aboma W. Gebisa, Hirpa G. Lemu. "Design for manufacturing to design for Additive Manufacturing: Analysis of implications for design optimality and product sustainability". 2017, p. 726.
[9] Nature Architects. “WHAT WE DO”. https://nature-architects.com/what/, (参照 2021-01-22).
[10] Nature Architects. “PROJECTS & RESEARCH”. https://nature-architects.com/projects/, (参照 2021-01-22).
[11] Clare Scott. “3D Printed Leg Allows Completely Natural Movement for Injured Whippet”. 3DR Holdings. 2016-01-28. https://3dprint.com/117248/romina-whippet-3d-prosthetic/, (参照 2021-01-15).
[12] Paige Beach. “Model Solution enables development of canine prosthetics”. Design World. 2017-12-19. https://www.designworldonline.com/model-solution-enables-development-canine-prosthetics/, (参照 2021-01-15).
[13] 3D Systems. “Meet Derby the Dog”. https://www.3dsystems.com/customer-stories/meet-derby-dog, (参照 2021-01-15).
[14] Benjamin Alport. “3D Printed Bespoke Canine Prosthesis”. CBM. https://www.cbmwales.co.uk/3d-printed-bespoke-canine-prosthesis/, (参照 2021-01-15).
[15] JSR 株式会社. “JSR、3D プリンター用フィラメント「FABRIAL (ファブリアル) R シリーズ」を発表”. 2015-07-15. https://www.jsr.co.jp/news/2015/20150715.html, (参照 2021-01-13).
[16] 3D Systems. “Sense Scanner”. https://support.3dsystems.com/s/article/Sense-Scanner?language=en_US, (参照 2021-01-13).

[17] キヤノンメディカルシステムズ株式会社. “CT とは、どういう仕組み？”. Canon. https://jp.medical.canon/general/CT_construction, (参照 2021-01-13).
[18] アールエフ. “NAOMi-CT 仕様”. http://rfsystemlab.com/product/industry/ct/ct_spec.html, (参照 2021-01-13).
[19] キヤノンメディカルシステムズ株式会社. “CT の歴史は新たな時代へ　CT（Computed Tomography）”. Canon. https://jp.medical.canon/products/computed-tomography/, (参照 2021-01-13).
[20] Nodi. “Nodi: An Online Node-based Geometry Design Tool and Platform”. https://nodi3d.com/, (参照 2021-01-20).
[21] 佐倉玲. パラメトリックシンセシスを通じたイヌ用義足のカスタマイゼーションサービスの実装. 慶應義塾大学 環境情報学部, 2021, 49p.
[22] Nodi. https://nodi3d.com/viewer/6esqb8XU0rTNpJen36E5, (参照 2021-01-20).
[23] Alexandra Ion, Johannes Frohnhofen, Ludwig Wall, Robert Kovacs, Mirela Alistar, Jack Lindsay, Pedro Lopes, Hsiang-Ting Chen, Patrick Baudisch. Metamaterial Mechanisms. 2016.
[24] Julian Panetta, Qingnan Zhou, Denis Zorin Luigi Malomo, Nico Pietroni, Paolo Cignoni. Elastic Textures for Additive Fabrication. 2015.
[25] 京都工業繊維大学繊維学系（佐久間研究室）やわらかさデザイン研究室. “コンセプト：素材の「やわらかさ」を活かすテクノロジーを追求”. http://www.cis.kit.jp/~sakuma/theme.html, (参照 2021-01-18).
[26] Donald A. Norman, Stephen W. Draper. “User Centered System Design: New Perspectives on Human-computer Interaction”. CRC Press, 1986, p. 61.
[27] 犬猫専門動物病院 ドッグ＆キャットホスピタル　ガルファー. “フォースプレート検査”. https://galfar.jp/consultation/forceplate/, (参照 2021-01-22).
[28] University of Bath. “Digitize your dog into a computer game”. 2020-06-16. https://www.bath.ac.uk/announcements/digitise-your-dog-into-a-computer-game/, (参照 2021-01-22).
[29] Haptic Design. “倉澤奈津子・竹腰美夏（NPO 法人 Mission ARM Japan）「ほしいをつくる。つくるをつなぐ」をビジョンにものづくりから福祉の未来を考える”. JST ACCEL Embodied Media Project. 2017-07-19. http://hapticdesign.org/designer/file014_kurasawa_takekoshi, (参照 2021-01-25).
[30] 国立研究開発法人 日本医療研究開発機構. “一失われた手の痛みをなぜ感じるのか？一念じると動く義手で幻肢痛のコントロールに成功”. 2016-10-27. https://www.amed.go.jp/news/release_20161027.html#:~:text=%E4%BA%8B%E6%95%85%E3%81%AA%E3%81%A9%E3%81%A7%E6%89%8B%E3%82%84,%E7%94%9F%E3%81%98%E3%82%8B%E3%81%A8%E3%81%95%E3%82%8C%E3%81%A6%E3%81%84%E3%81%BE%E3%81%99%E3%80%82, (参照 2021-01-25).