修士論文 2021年度

Vibratory-Vibrant-Weaving

~3Dプリンタへの音響振動付与による表面テクスチャリング手法の開拓~

慶應義塾大学大学院 政策・メディア研究科

荒井 将来

修士論文 2021年度

Vibratory-Vibrant-Weaving

~3Dプリンタへの音響振動付与による表面テクスチャリング手法の開拓~

論文要旨

FFF方式3Dプリンタに生じる造形エラーは、外観品質などを損なうがゆえに一般には忌み嫌われるが、これを逆手にとり表現として昇華させる先行事例が増えてきている。本研究は、振動によって生じる造形エラーを逆手にとり、3Dプリンタの造形中にスピーカーによる音響振動を意図的に与えることで造形物にテクスチャを付与する手法であるVibratory-Vibrant-Weaving(VVW)を提案する。

周波数、周期といった音に関するパラメータに加えて、積層ピッチやツールパス、マテリアルといった様々なパラメータを変えたテクスチャ生成実験を行い、音に関するパラメータだけでなく、積層ピッチをはじめとする3Dプリンタに関するパラメータやマテリアルなど、様々な要因がテクスチャに影響を与えることが明らかとなった。

また、壺・シート材・化粧箱といった習作の制作を通じて様々な表面テクスチャパターンや表現を開拓し、織りパターンをメインにテクスチャの分類を行った。

先行事例と比較して提案手法の特筆すべき点は『形状(G-Code)とテクスチャが切り分けられていること』であると仮定し、より複雑な形状での造形実験を行った。結果として、テクスチャを付与すること自体は可能であるが、形状(ツールパス)によっては立方体の造形サンプルとテクスチャが異なる場合があることや、造形エラーを増幅してしまうなどの課題が明らかとなった。

こうした課題とテクスチャの分類結果をもとに、意匠・機能・形状の3要素から制作物を決定し、現時点における提案手法のポテンシャルを活かした制作物として多面体の花瓶を制作した。

キーワード

1. 3Dプリンタ,　2. 振動,　3. テクスチャ,　4. 造形エラー,　5. 織り

Master's Thesis Academic Year 2021

Vibratory-Vibrant-Weaving

~Pioneering surface texturing methods by applying direct acoustic vibration to 3D printing process~

Abstract

Although 3D printing failures caused by FFF 3D printers are generally disliked because they spoil the appearance quality, there are an increasing number of cases where these errors are reversed and turned into new expressions. In this study, we propose Vibratory-Vibrant-Weaving (VVW), which is a method to add texture to objects by intentionally giving acoustic vibrations with a speaker during 3D printing, taking advantage of the 3D printing failures caused by vibration.

In addition to sound parameters such as frequency and period, we conducted texture generation experiments using various parameters such as layer height, tool path, and material. We found that not only sound parameters but also parameters related to the 3D printer such as layer height and material affect the texture. It became clear that not only sound-related parameters but also various other factors such as layer height, 3D printer parameters, and materials affect the texture.

We also developed various surface texture patterns and expressions through the production of studies such as vases, sheets, and cosmetic boxes, and classified textures mainly based on weaving patterns.

We hypothesized that the most notable feature of the proposed method is the separation of shape (G-Code) and texture. Based on this hypothesis, we conducted an experiment to add texture to complex shapes.

As a result, it became clear that it was possible to add texture. However, depending on the shape (tool path), the texture may differ from that of the cubic modeling sample. In addition, we found some issues such as the amplification of 3D printing failures.

Based on these results and the classification of textures, we decided to design the final product based on the three elements of design, function, and shape. Finally, we created a polyhedral vase that shows the full potential of the proposed method.

Keywords

1. 3D printer, 2. Vibration, 3. Texture, 4. 3D printing failure, 5. Weaving

目次

第１章. 序論 7

1.1 本論文の構成 7

1.2 FFF方式3Dプリンタにおける造形エラー 7

1.2.1 概要と典型的な造形エラー 7

1.2.2 積層痕 8

1.2.3 Over-Extrusion 9

1.2.4 Under-Extrusion 9

1.2.5 Ringing, Ghosting 10

1.2.6 DefeXtiles ~エラーを表現として昇華させる事例~ 10

1.2.7 本研究のきっかけとなる造形エラー 11

1.3 テクスチャ 11

1.3.1 テクスチャの役割 11

1.3.2 CMFデザイン 11

1.3.3 なぜFFF方式なのか 12

第２章. 先行事例と研究目的 13

2.1 先行事例 13

2.2 研究に向けて~Solid Vibrationsの分析~ 16

2.3 研究目的 17

第３章. 方法と実装 18

3.1 実験方法の概要 18

3.2 使用機材 18

3.2.1 3Dプリンタ 18

3.2.2 シンセサイザー 19

3.2.3 パワーアンプ 19

3.2.4 振動スピーカー 19

3.3 実験装置 20

3.3.1 振動スピーカーの設置方法 20

3.3.2 振動スピーカーの発熱問題 21

3.3.3 発熱問題を改善した実験装置 21

第４章. 実験 22

4.1 実験用モデルの定義 22

4.2 周波数とテクスチャの関係 23

4.2.1 概要 23

4.2.2 条件 23

4.2.3 結果 24

4.2.4 考察 25

4.3 積層ピッチとテクスチャの関係 26

4.3.1 概要 26

4.3.2 条件 26

4.3.3 結果/考察 26

4.4 マテリアルとテクスチャの関係 28

4.4.1 概要 28

4.4.2 条件 28

4.4.3 結果 29

4.4.4 考察 29

4.4.5 シルクPLAとの出会い 29

4.5 周期とテクスチャの関係 30

4.5.1 概要 30

4.5.2 条件 30

4.5.3 結果 31

4.5.4 考察 34

4.6 インフィルパターン・周期とテクスチャの関係 35

4.6.1 概要 35
4.6.2 条件 35
4.6.3 結果/考察 36
4.7 テクスチャの光学的異方性 38
第５章. 制作 40
5.1 壺 40
5.1.1 概要 40
5.1.2 PLA(透明色) 40
5.1.3 PLA(銅20%混錬) 41
5.1.4 PLA(木質) 42
5.1.5 TPU 43
5.1.6 ABS 43
5.1.7 PETG 44
5.1.8 シルクPLA 45
5.1.9 結果 46
5.2 シート材 46
5.3 化粧箱 47
5.4 より複雑な形状への適用 49
5.4.1 The right Prudhoe lion 50
5.4.2 Low Poly Stanford Bunny 51
5.5 最終制作 53
5.5.1 最終制作に向けて 53
5.5.2 最終制作物 54
第６章. 考察 58
6.1 テクスチャを変化させる要因 58
6.2 テクスチャの分類 59
6.2.1 テクスチャの分類結果 59

6.2.2 テクスチャの機能について 60

6.2.3 テクスチャのスケール・分解能について 61

6.3 Vibratory-Vibrant-Weavingの由来 61

第７章. 結論 62

7.1 本研究のまとめ 62

7.2 今後の課題と展望 63

7.3 おわりに 63

【謝辞】 65

【参考文献・出典】 66

第１章　序論

1.1 本論文の構成

第1章(序論)ではFFF方式3Dプリンタにおける造形エラーと物体表面のテクスチャについて語り、造形エラーを取り巻く状況とテクスチャの役割や重要性を確認する。第2章(先行事例と研究目的)では造形エラーの利用や特殊なG-Codeによりテクスチャを付与する方法を先行事例として紹介し、リサーチクエスチョンに繋げていく。第3章(方法と実装)では、実験方法の概要や実験装置に関する説明を行い、第4章(実験)では様々なアプローチから行った実験と、その結果を記述する。第5章(制作)では、予備実験で制作した造形物や最終制作を紹介し、第6章(考察)では実験や制作などを通じて得られたテクスチャの整理や考察を展開し、本論文タイトルの由来を述べる。第7章(結論)で本研究をまとめ、課題や今後の展望について述べる。

1.2 FFF方式3Dプリンタにおける造形エラー

1.2.1 概要と典型的な造形エラー

FFF(Fused Filament Fabrication)方式3Dプリンタでは、図1に示すように様々な造形エラーが生じる。こうした造形エラーの原因は、3Dプリンタのノズル詰まりといったハードウェアに起因するもの、3Dプリンタのスライサーソフトウェアで設定される送り速度・樹脂の押出量といったパラメータに起因するもの、使用するマテリアル(フィラメント)の物性に起因するものなど多岐にわたり、エラーの種類・程度に応じて造形物の外観品質や機械的強度を損なうため、一般的に忌み嫌われるものである。しかしながら、造形エラーは偶発的に造形物の外観や振る舞いに働きかける現象で、ときに芸術性を感じる見た目となることがある。

図1 FFF方式3Dプリンタにおける典型的な造形エラーの例[1)]

最も典型的なエラーの1つに“もじゃもじゃ”(英語ではspaghettiなどと呼ばれる)がある。もじゃもじゃは、本来積層されるはずの樹脂が空中に対して吐出され続けることで起き、SNS等で多数の例を見つけることができる。国内では、2021年に株式会社メルタがTwitter上でユーザーからもじゃもじゃを募る『3Dプリンタもじゃもじゃコンテスト』を主催し、2週間で120件の応募を集めABEMA Prime(インターネットTV)で取り上げられるといった盛り上がりを見せるなど、造形エラーであるにも関わらず、どこか人を惹きつけるものがあることが伺える。図2に、実際に3Dプリンタもじゃもじゃコンテストで 「美しさ部門賞」の受賞作品を示す。画像右はミロのヴィーナスで、“もじゃもじゃ”エラーが無い状態である。対して画像左は“もじゃもじゃ”エラー有りで、腰から上がもじゃもじゃに覆われているかのような形状となっている。

図2 3Dプリンタもじゃもじゃコンテストで「美しさ部門賞」を受賞した作品[2)]

1.2.2 積層痕

厳密にはエラーではないが、FFF方式では1層ずつ材料を積み上げる都合上、“積層痕”と呼ばれる線状痕が造形物表面に現れる。3Dプリントにより生み出された造形物は、3Dプリンティング(Additive Manufacturing)よりも昔から存在する切削加工(Subtractive Manufacturing)から生み出された滑らかな表面をもつ製品と比較され、積層痕の存在から「低品質」といったイメージを持たれたり、塗装の障害になるといった理由などによって積層痕も実質的にはエラーと同様の扱いを受けているように思える。積層ピッチをより細かくすることで積層痕を目立たなくし、造形物のディテールを向上させることは可能であるが、積層ピッチの細かさに比例して造形に要する時間は増大してしまう。積層痕は研磨や有機溶剤による表面処理などの後処理で消すことも出来るが、後処理には造形物の形状や大きさ、マテリアルに応じて手間がかかる。

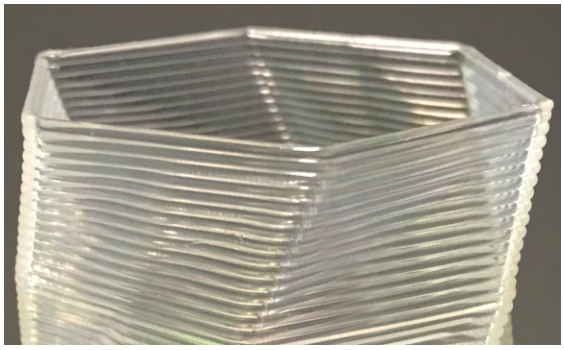


図3 積層痕の例 (筆者撮影)

1.2.3 Over-Extrusion

Over-Extrusionは、造形中にノズルから押し出される樹脂量が過剰となることで生じるエラーである。図4に、立方体の造形物側面にOver-Extrusionが発生した例を示す。シェル(造形物外周)の造形中にノズルから過剰量の樹脂が吐出されることで立方体壁面に樹脂が溢れ、図4における左画像の立方体側面にはそれぞれ水滴のような粒と荒れた肌のような表面が観察できる。また、図4右画像は立方体上面にOver-Extrusionが生じた例である。上面の造形中に過剰に樹脂が押し出されると、ノズルと押し出された樹脂が衝突し、ノズルが過剰な樹脂を引きずることでツールパスに沿った模様が生成される。

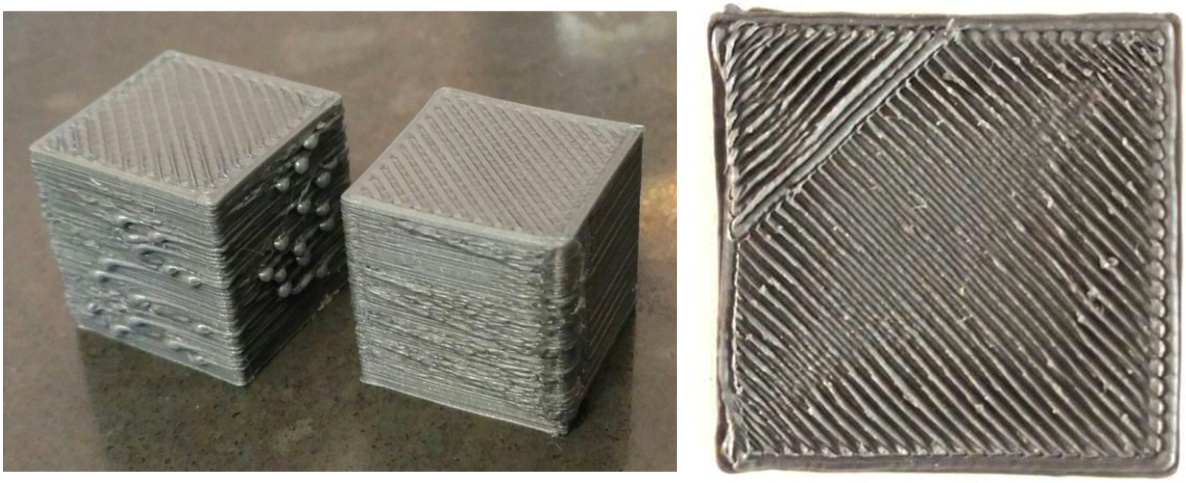


図4 Over-Extrusionが生じた造形物 (左画像：立方体側面[3], 右画像：立方体上面[4])

1.2.4 Under-Extrusion

Under-ExtrusionはOver-Extrusionとは反対に、造形中にノズルから押し出される樹脂量が不足することで生じるエラーである。3Dプリンタのスライサーソフトウェアまたはファームウェアにおける押出乗数(Extrusion Multiplier)が小さすぎたり、ノズルの詰まりやフィラメントの押出不良といった原因で生じる。Under-Extrusionは図5に代表されるような、特徴的な斜め縞模様を生じることがある。

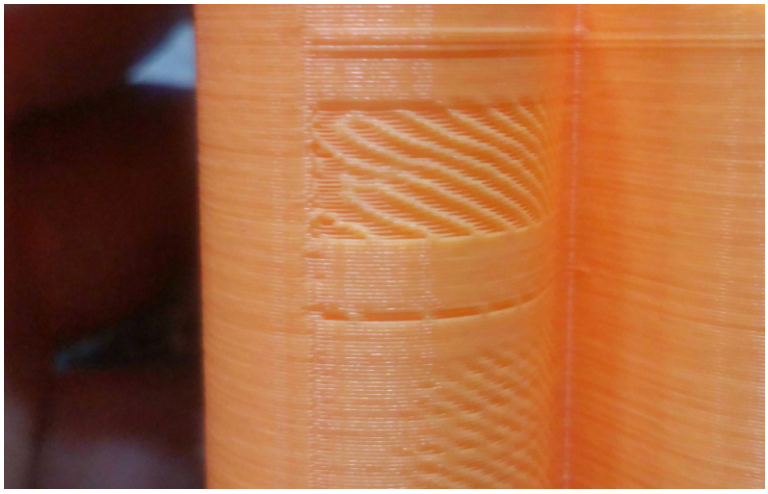


図5 Under-Extrusionにより斜め縞模様が表れた造形物[5]

1.2.5 Ringing, Ghosting

Ringing(Ghostingとも呼ばれる)は、造形物に波紋のような周期性をもった模様が浮かび上がるエラーである。図6にRingingの一例を示す。造形物に刻まれたYの字の横に、Yの字の"ゴースト"のような模様が薄く浮かび上がっている。リンギングは、3Dプリンタの送り速度が速すぎることや急激な加減速による慣性によって振動し、この振動により座標の目標値からわずかに離れた場所に樹脂が押し出されることで生じる。

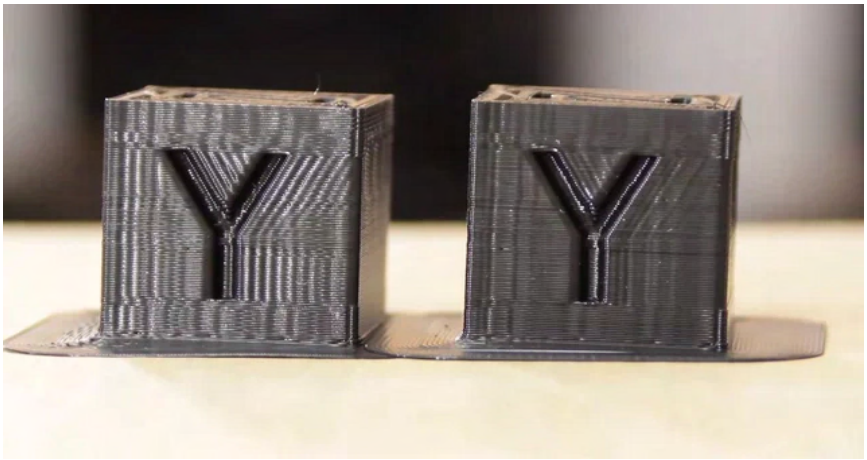


図6 Ringing(Ghosting)の例[6)]

1.2.6 DefeXtiles ~ エラーを表現として昇華させる事例 ~

造形時に生じるエラーや積層痕は一般的には忌み嫌われるものであるが、ここまで紹介したようにエラーの中には造形物にユニークな外観・テクスチャや機械的特性・振る舞いを付与するものも存在し、こうしたエラーのもつ特徴を逆手にとり、表現として昇華させる試みも行われている。例えばDefeXtiles(2020)[7)]は、ノズルの送り速度と樹脂の押出量を調整することでUnder-Extrusionを制御し、レース生地のような造形、表現に昇華させている。

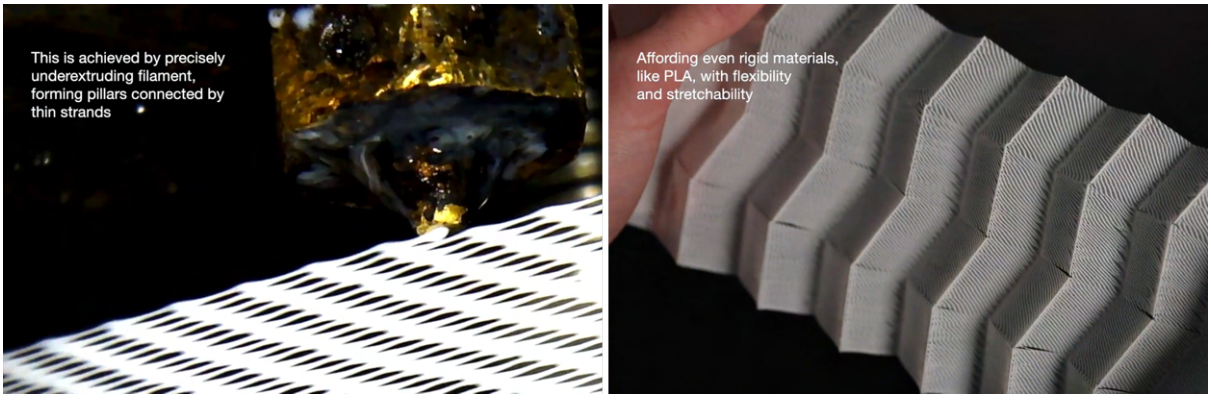


図7 DefeXtiles (2020)[7)]

1.2.7 本研究のきっかけとなる造形エラー

筆者は日頃3Dプリンタを使うなかで様々なエラーに遭遇し、時折現れるエラーの美しさ・面白さに惹かれてきた。あるとき所有する3Dプリンタで造形中、XY軸を駆動するためのステッピングモータが脱調と呼ばれる不具合により振動したことで、ある種のリンギング(エラー)が生じ、爬虫類の皮膚のようなテクスチャに出会った。ここから筆者はリンギングやステッピングモータの脱調といったエラーに注目し、「意図的に振動を与えることで造形物にテクスチャを付与することが出来るのではないか」と問いを立てたことが本研究のきっかけである。

図8 脱調により、特徴的なテクスチャが付与された造形物 (筆者撮影)

1.3 テクスチャ

1.3.1 テクスチャの役割

物体の表面テクスチャ(質感)の役割は、製品設計においては機能品質(機能価値)と感性品質(感性価値)に大別されている。機能品質は耐熱性や強度といった物理的・機械的特性や、物体表面のテクスチャ(凹凸)による滑り止め効果や撥水性など、いわゆる機能面における品質(価値)である。感性品質は人間が五感で感じる印象の良し悪しで決まる品質(価値)で、見た目の高級感、触り心地の良さなどが該当する。このように物体の表面テクスチャは機能性と意匠性を兼ね備えているものの、青木弘行・松岡由幸・寺内文雄(2017)[8)]らによって指摘されているように、プラスチックの発展過程は機能品質の向上に主眼が置かれ、感性品質の向上はなおざりにされてきた。

1.3.2 CMFデザイン

機能品質のみならず感性品質にも作用する物体の表面は専門のデザイン分野として確立されており、CMFデザインとして知られている。CMFデザインとは、物体表面は色・素材・仕上げの三要素から成るという概念で、CMFはそれぞれColor, Material, Finishの頭文字に由来し、国内では物体表面のデザインを専門に行うCMFデザイナーの玉井美由紀氏が有名である。CMFデザインでは色やマテリアルの検討は勿論、様々な機械加工技術、表面加飾技術を駆使して物体の表面をデザインしていく。図9に、株式会社FEEL GOOD CREATIONによるCMFデザインの例を示す。このように物体表面のデザインは重要であり、表面テクスチャ表現を開拓する意義は十分あると思われる。

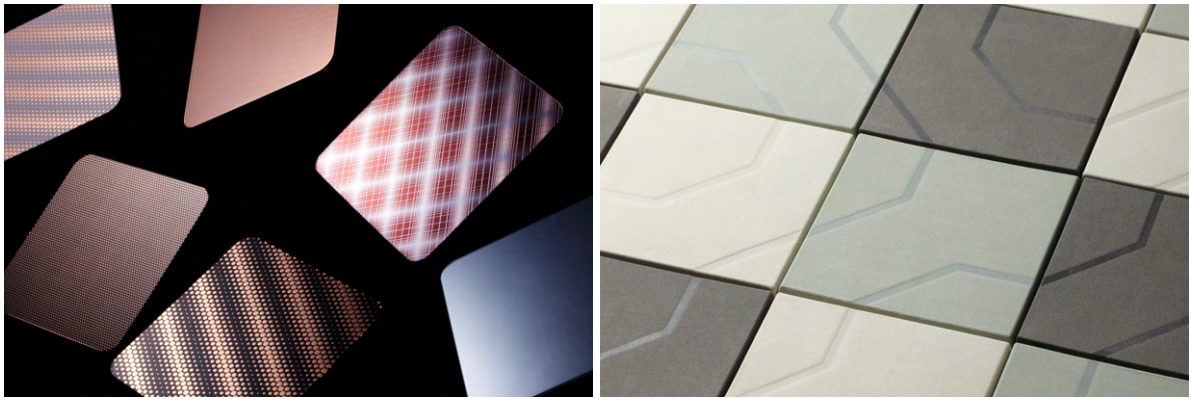


図9 株式会社FEEL GOOD CREATIONによるCMFデザインの例

画像左： 株式会社真工社によるプラスチックめっき[9], 画像右：東海興業株式会社によるソフト触感樹脂によるデザインと新用途イメージ[10]

1.3.3 なぜFFF方式なのか

ここまで物体表面やテクスチャの重要性を説いたが、なぜFFF方式でなければならないのだろうか。応用可能性をもつ造形エラーの存在もあるが、まずはCMFでいう所のC(カラー)とM(マテリアル)の豊富さにある。より高精細な造形が可能という意味では、光造形方式をはじめとする他方式の3Dプリンタの方が優れているものの、FFF方式は他方式と比較して最も普及しており、歴史も長い。その分サードパーティー製の3Dプリンタ用フィラメントも充実しており、マテリアルだけでもPLA, ABS, TPU, PETG, ナイロンをはじめ非常に沢山の種類のマテリアルが存在し、同様にカラーバリエーションも非常に富んでいる。また、PLAに木粉、金属を混錬したタイプや、いわゆるシルクPLAなど、独特の光沢感を持つタイプ、逆にマットな質感をもつものなど、FFF方式はマテリアル・色のバリエーションが非常に幅広い。

FFF方式は構造が比較的単純で、エクストルーダ・ノズル・制御ボードといった3Dプリンタを構成する部品類が互換品からアップグレード品まで実に様々なメーカーから発売されており、AmazonやAliExpressといったECサイトで揃わない部品は無いだろう。ユーザー数の多さとコミュニティが活発であることも相まって、修理やメンテナンスに留まらず、3Dプリンタのハードウェア・ファームウェアの改造に関する情報も非常に豊富である。

3Dプリンティング全般に言えることでもあるが、特にFFF方式は、メーカーサイド・ユーザーサイドの両側から積極的なアプローチを続け、造形精度、造形速度といったエンジニアリング方面の成長はもちろん、新たな表現の拡張といったデザイン・アート方面に至るまで、あらゆる面で日進月歩の成長を遂げてきているように感じる。これは、裏を返せば伸びしろがあり、まだまだフロンティアであり、開拓のしがいがあると筆者は考えている。

第１章のまとめ

ここまでで、FFF方式3Dプリンタにおける造形エラーについて語り、造形エラーが表現として昇華可能であることを示した。また、物体表面テクスチャの役割や重要性を確認し、テクスチャ表現を開拓していく意義を示した。第2章では、造形エラーの利用や特殊なG-Codeによりテクスチャを付与する方法を先行事例として紹介し、それぞれの事例の特徴や課題を整理し、リサーチクエスチョンと研究目的に繋げていく。

第２章　先行事例と研究目的

2.1 先行事例

3Dプリンタで造形物にテクスチャを付与する手法は、以下の3種類に大別される。

1. 予め3Dモデルにテクスチャを付与しておく方法
2. 特殊なG-Codeによりテクスチャを付与する方法
3. ハードウェアのハックによりテクスチャを付与する方法

Idea Maker

造形物にテクスチャを付与する方法として最も基本的なのは、3Dモデリングの段階でテクスチャを付与しておくことである。Fusion360, Rhinocerosといった3DCADソフトウェアによって幾何学模様のテクスチャを付与することや、BlenderやZBrushといったスカルプティングが得意な3Dモデリングソフトウェアを用いることで、人間の肌やシボといった非常に細かいニュアンスのテクスチャを付与することが可能である。最近ではスライサーソフトウェアであるIdea Makerにおいて、画像から3Dモデルにテクスチャを転写出来る機能が追加され、より簡単に造形物表面にテクスチャを付与出来るようになりつつあると同時に、表面テクスチャリングへの期待度の高さを感じている。

しかしながら、どんなテクスチャでもFFF方式3Dプリンタで造形出来るとは限らない。図11に示すような解像度の幾何学模様であれば十分造形可能であるが、3Dプリンタのノズル径・積層ピッチによる分解能の制約が存在することや、一般的なスライスソフトウェアでは正常なスライス(G-Codeの出力)が困難な場合もあるといったソフトウェア的な制約もある。また、細かいテクスチャはその分3Dモデルのポリゴン数が増え、取り扱いが困難になっていくといった問題もある。

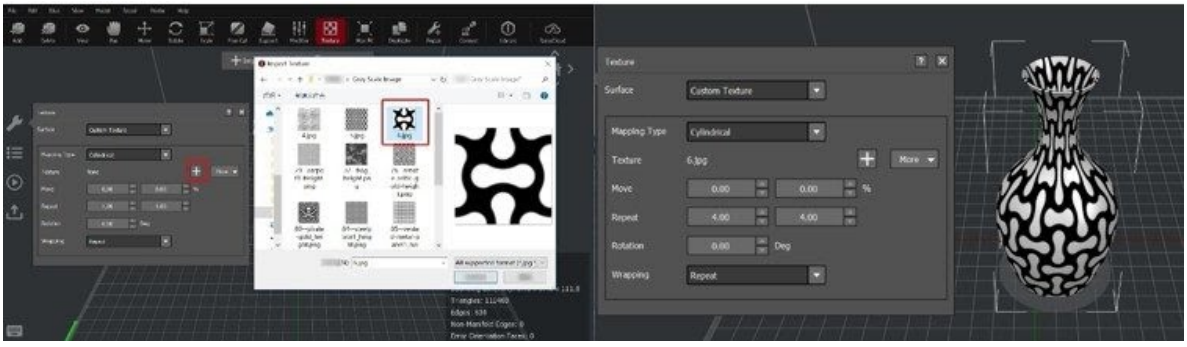


図10 Idea Makerで画像のテクスチャを3Dモデルに付与する様子[11)]

図11 Idea Makerによってテクスチャが付与された造形物[11)]

Road単位の造形に着目した熱溶解積層方式3Dプリンタでの質感表現

Idea Makerの事例など、3Dモデルをスライサーソフトウェアでスライスして G-Codeを生成する方法では、どんな3Dモデルでも忠実に再現できるとは限らない。一方、造形エラーに見られるようなFFF方式3Dプリンタ固有の現象や特徴を活かしたり、G-Codeの直接編集やプログラムによって生成される特殊なG-Codeによりテクスチャを付与する方法・事例が増えてきている。

高橋治輝, 宮下芳明(2018)[12]は、樹脂の押出量とノズルの高さを調整することでノズルから吐出される樹脂の動きや振る舞いを変え、通常の造形で見られる積層痕とは異なる表面テクスチャを得ている。また、同じく高橋, 宮下(2017)による「ブリッジ構造と樹脂の引き伸ばしを用いた高密度な毛構造の造形手法[13]」では、特殊なG-Codeを用いることで0.08mm~0.15mm程度の髪の毛のような構造を得ている。

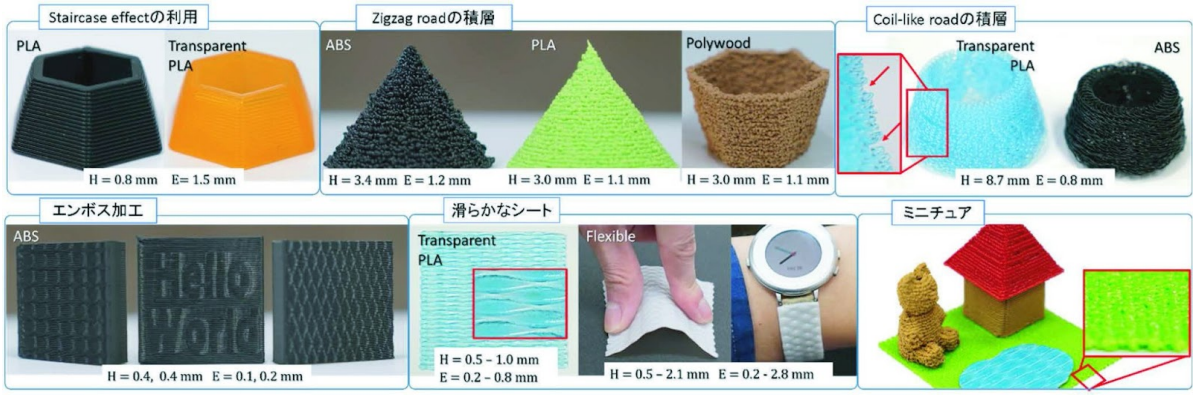


図12 樹脂の押出量とノズルの高さを調整することで得られるテクスチャの例[12]

Velocity Painting

MarkWheadonによるVelocity Painting(2017)[14]では、3Dプリンタの送り速度を急激に変えることで樹脂の押出幅が変化する現象を利用している。専用ツール上で画像を3Dモデルに投影すると、画像の明度差が速度差に変換され、画像の明度に応じて送り速度が異なるG-Codeが出力される。こちらはオープンソースソフトウェアで、スライサーソフトウェアのプラグインとして利用できる。

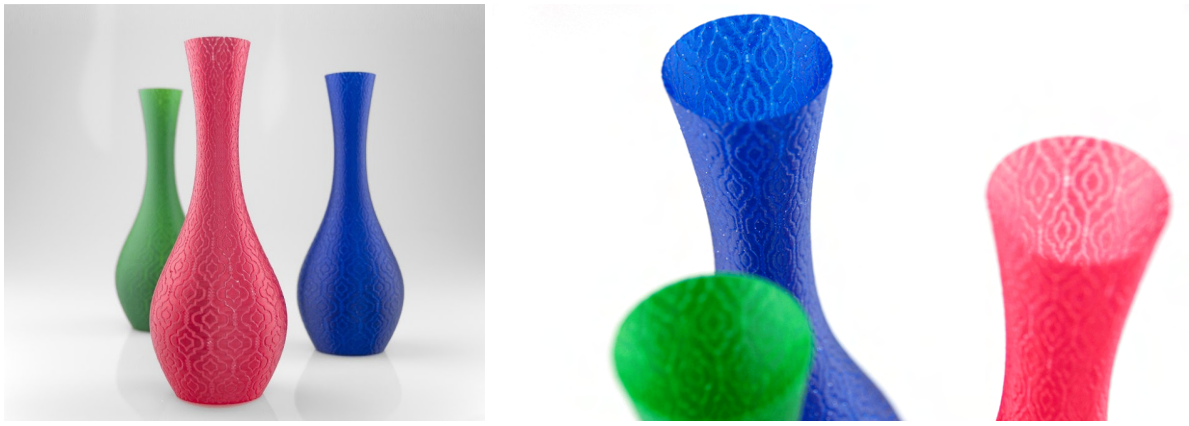


図13 Velocity Paintingによりテクスチャが付与された造形物[14]

Tilde

FFF方式3Dプリンタ固有の現象や特徴を活かし、プロダクトに応用した例もある。新工芸舎のプロダクトシリーズであるTildeは、”編み重ね”と名付けられた「樹脂を編むように重ねていく」特殊技法を用いて制作されており、ボールペン・花瓶・ライトなどの製品をFFF方式3Dプリンタで制作・販売している。Tildeは樹脂の押出量やツールパスといったG-Codeを制御することで、通常の積層痕とは異なる、編み物やトウモロコシの粒を連想する独特なテクスチャを付与している。

図14 Tilde[15)16)]

FullControl GCODE Designer, Slice-Up

最近ではG-Codeを高度に編集・生成可能なツールが登場してきており、Andy GleadallによるFullControl GCODE Designer(2020)[17)]や、webブラウザ上で動作するSlice-Up[18)]などが存在する。Slice-Upでは、DXF形式でインポートした曲線または円柱などの回転体形状をベースにパラメトリックあるいは定義した関数に沿って曲線を編集していき、スライサーソフトを介さずに3Dプリンタで造形可能なG-Codeを直接出力することができる。FullControl GCODE Designer, Slice-UpといったG-Codeを高度に編集可能なツールを用いることで、図15に示す「樹脂を橋のようにかける」表現など、3Dモデルをベースにスライサーソフトウェアで”スライス”する手法では不可能な表現が可能である。しかしながら、こうしたツールを使いこなすには数学や幾何学の知識、ある程度の習熟が必要である。また、現状では円柱といった回転体形状や、空間充填・平面充填形状をベースとした造形物への適用に留まっており、より複雑な形状への適用が困難といった課題が存在する。

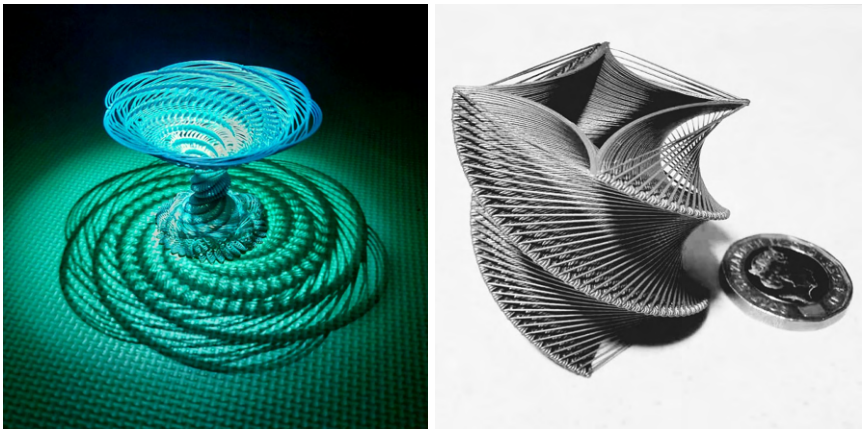


図15 FullControl GCODE Designerによる造形物の例[19)]

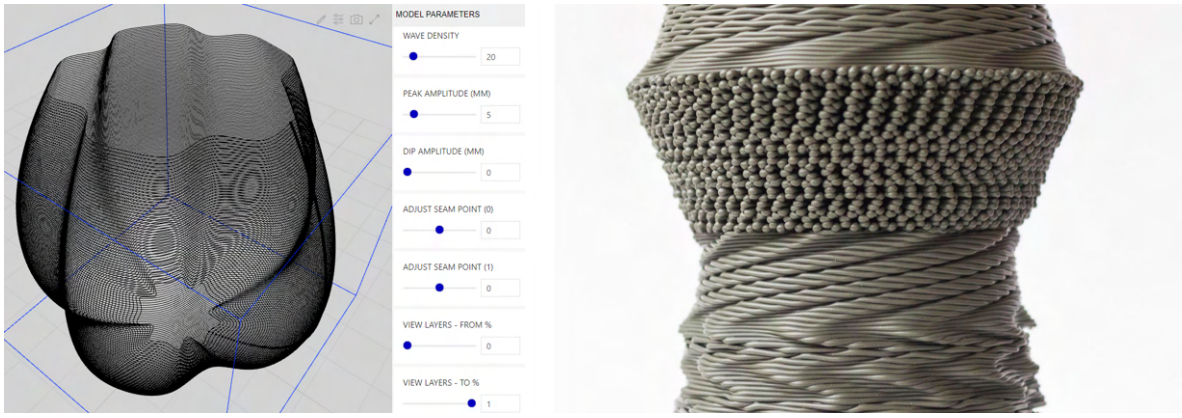


図16 Slice-Upにおけるモデリングの様子と造形物の例[18)20)]

Solid Vibrations

今まで紹介してきた方法は3DモデルやG-Code(ソフトウェア)からのアプローチであるが、3Dプリンタ(ハードウェア)を物理的にハックすることでテクスチャを付与する方法もある。Olivier van Herpt, Ricky van BroekhovenによるSolid Vibrations(2015)[21)]では、セラミックをマテリアルとするデルタ型3Dプリンタのプラットフォーム下部にスピーカーを設置しておき、低周波音を流しながら造形することで、スピーカーによる音響振動で3Dプリンタノズルと造形物を衝突させ、テクスチャを付与している。これは造形エラーの一種であるRingingを逆手に取った事例と言え、Herpt氏は自身の造形物にモアレ模様(一種の造形エラー)が生成された経験から「振動を与えながら造形することで音をオブジェクトとして固体化できるのではないか」という仮説を立て、Solid Vibrationsに至っている。

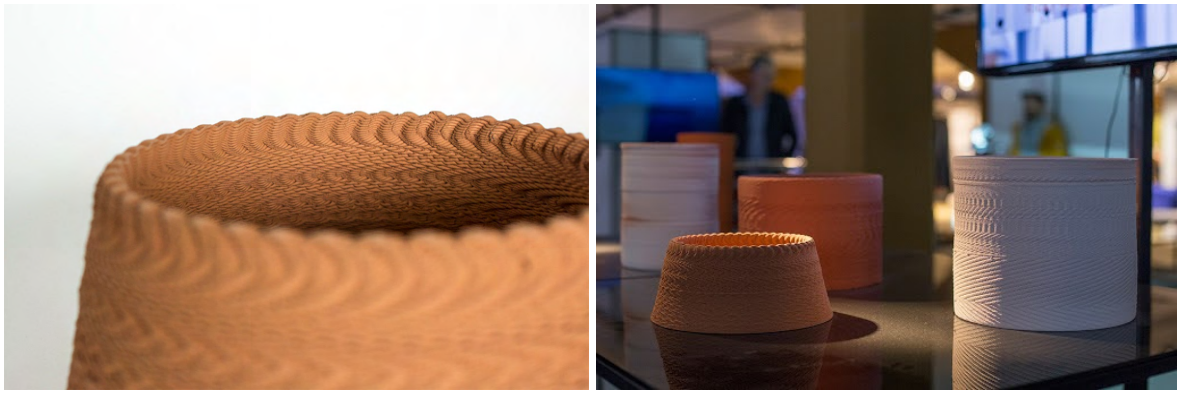


図17 Solid Vibrationにおける、振動によりテクスチャが付与された造形物(セラミック製)[21)]

2.2 研究に向けて ~Solid Vibrationsの分析~

第1章で語ったが、筆者はリンギングやステッピングモータの脱調といった振動由来のエラーに注目し、「意図的に振動を与えることで造形物にテクスチャを付与することが出来るのではないか」という仮説に至った。その後、趣味でシンセサイザー(楽器)を所有していたことや、スピーカーシステムの自作を行っていたことから、予め3Dプリンタのプラットフォーム上部に振動スピーカーを貼り付けておき、楽器のシンセサイザーで生成した音を振動スピーカーに流すという実験を行った。結果として振動スピーカーの音響振動によるテクスチャが得られたが、この実験の後に事例調査を行った際、偶然にも先行事例のSolid Vibrationsと同様の方法であることが明らかとなった。

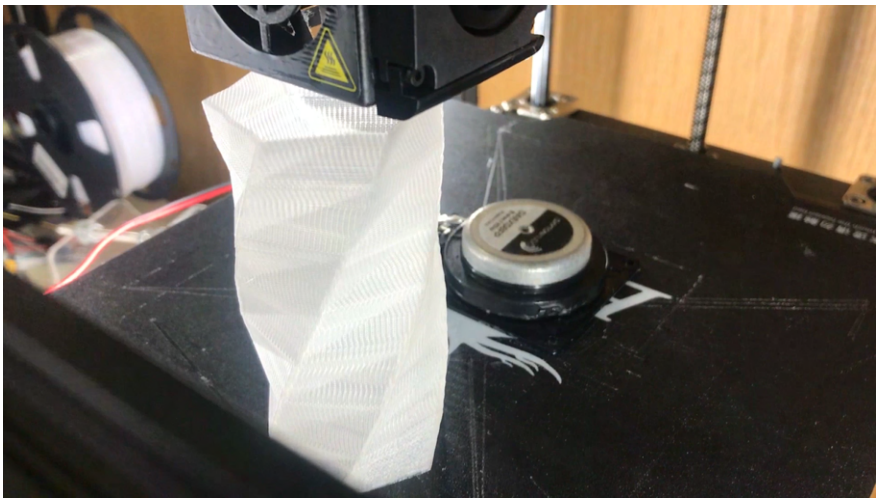


図18 仮説をもとに行った実験の様子 (筆者撮影)

そこでSolid Vibrationsについて深堀りしていったところ、幾つかの課題が浮き彫りになった。第一に、Solid Vibrationsでは素材がセラミック(土)であり、FFF方式3Dプリンタで扱われる樹脂ではどのようなテクスチャ表現が得られるかは未知である。第二に、Solid Vibrationsでは音とテクスチャにどのような関係があるのか明らかにされておらず、様々な音のパターンを試行する余地があるのではないかと感じた。こうした経緯から、第4章以降の実験や制作に繋がっていく。

また、他の先行事例と比較してSolid Vibrationsの特筆すべき点は、3DモデルやG-Codeといったデータとテクスチャが切り分けられていることである。通常、3DプリントはG-Codeに沿って進行するため、3Dモデルのスライスによって G-Codeを出力しても、Slice-Upのようなツールで直接G-Codeを出力したとしても、G-Codeとテクスチャは切り離すことができない。また、先に述べたようなハードウェア・ソフトウェア上の制約により、必ずしもどんな形状にもテクスチャを付与出来るわけではない。

一方、Solid Vibrationsではテクスチャを付与する役割を担うのはスピーカーであり、音響振動である。したがって音(振動)のON/OFFに応じてテクスチャの有無を切り替えることが可能である。これは、どんな形状であってもテクスチャを付与できる可能性を示唆している。

2.3 研究目的

本研究は、『FFF方式3Dプリンタに音響振動を与えながら造形することでテクスチャを付与する』という手法を通じて、FFF方式の3Dプリンティングにおける新たな表面テクスチャ表現や応用可能性を開拓することを目的とし、振動(音)を3Dプリンティングと掛け合わせることで生まれる未知なるテクスチャ(X-Texture)の開拓を目指す。

第２章のまとめ

ここまでで、造形エラーの利用やツールから生成された特殊なG-Codeによりテクスチャを付与する事例と、その特徴を紹介してきた。また、仮説をもとに行った実験を踏まえてSolid Vibrationsの課題や特徴を整理し、リサーチクエスチョンと研究目的を固めた。次章では、本研究におけるテクスチャ付与方法や実験装置の実装について詳しく述べる。

第３章　方法と実装

3.1 実験方法の概要

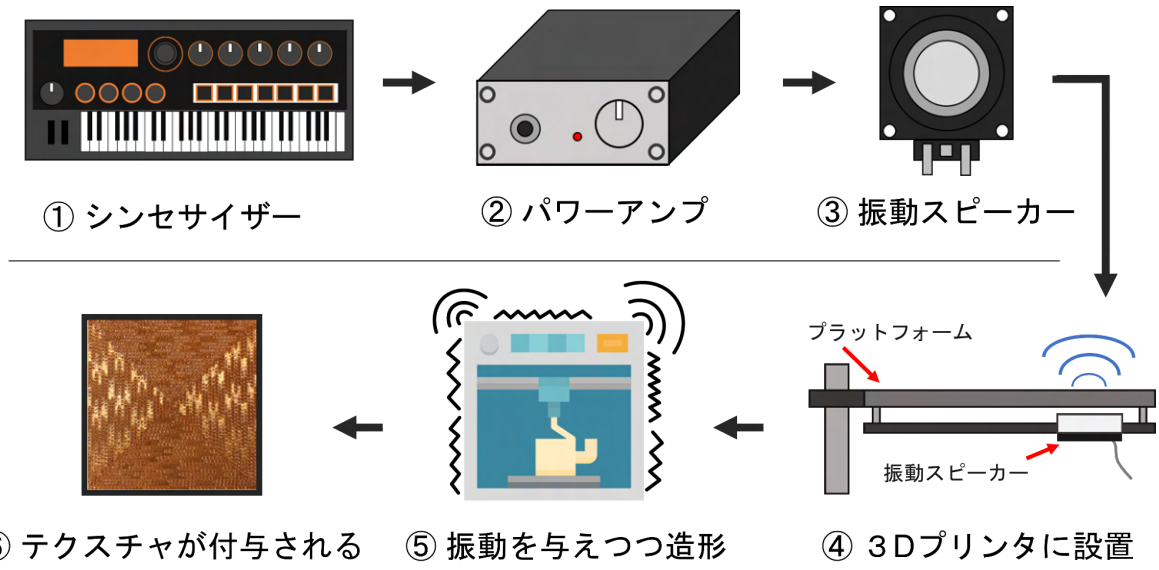


図19 実験方法の概略図

全体的な流れとしては、まず楽器のシンセサイザーで音源を生成し、シンセサイザーの音をパワーアンプで増幅してから振動スピーカーで鳴らす。振動スピーカーは予め3Dプリンタのプラットフォームに設置しておくことで、プラットフォームが振動版として機能し、スピーカーの発音に伴ってプラットフォームが振動するようになっている。

3Dプリンタで造形中に音を流すことで、プラットフォームの振動が造形物やノズルに伝わり、ノズルおよびノズルから吐出される樹脂と造形物が振動に応じて衝突し、テクスチャが付与される。プラットフォームにスピーカーを設置する点などは先行事例のSolid Vibrationsと同様だが、一般的なコーン型スピーカーではなく振動スピーカーを用いている点や、使用する3Dプリンタの方式が異なる。

3.2 使用機材

3.2.1 3Dプリンタ

図20 Creality Ender-5[22)]

本研究で使用するFFF方式3Dプリンタは、Creality社のCreality Ender-5である。最大造形可能サイズはW220mm×D220mm×H300mmであり、プラットフォームが昇降する。購入時(2019年5月2日)の価格は約40,000円であり、後述する実験装置以外は特別改造を施していない。

3.2.2 シンセサイザー

音源生成には、Roland社のアナログ/デジタルクロスオーバー・シンセサイザーであるJD-Xiを用いている。本体サイズW575mm×D245mm×H85mm、本体重量2.2kgと比較的小型軽量のシンセサイザーで、本研究ではアナログシンセサイザーの機能・音源を使用している。

図21 Roland JD-Xi[23)]

3.2.3 パワーアンプ

シンセサイザーの音を増幅するパワーアンプには、TOPPING社のTP21を使用した。W113mm × D171mm × H45mmと比較的小型のデジタルアンプで、定格出力はインピーダンス4Ωで25W、8Ωで13Wとなっている。

図22 TOPPING TP21[24)]

3.2.4 振動スピーカー

音を鳴らし、プラットフォームを振動させるためのスピーカーにはDayton Audio社のDAEX58FPを使用した。振動スピーカーは一般的なコーン型スピーカーと異なり、スピーカー本体には振動版が無く、スピーカーを貼り付けた物体が振動版として機能(振動)する。振動スピーカーはエキサイターとも呼ばれ、重低音の再生に特化している。コーン型のウーファーと比較すると、サイズや重量を抑えつつ重低音の音圧を稼ぐことが出来るといった利点がある。定格入力は8Ωで25Wとなっている。

図23 Dayton Audio DAEX58FP[25)]

3.3 実験装置

3.3.1 振動スピーカーの設置方法

図24に振動スピーカー周りの分解図を示す。振動スピーカーは3Dプリンタ(Creality Ender-5)のプラットフォームプレート下部に設置し、振動スピーカーと3Dプリンタで造形したマウントでプラットフォームプレートを挟み込み、ボルトナットで固定する。また、振動スピーカーを長時間稼働させると生じる発熱対策として振動スピーカー背面(マグネット)にヒートシンクを取り付けている。5.3項の化粧箱以外は本実験装置で造形した。

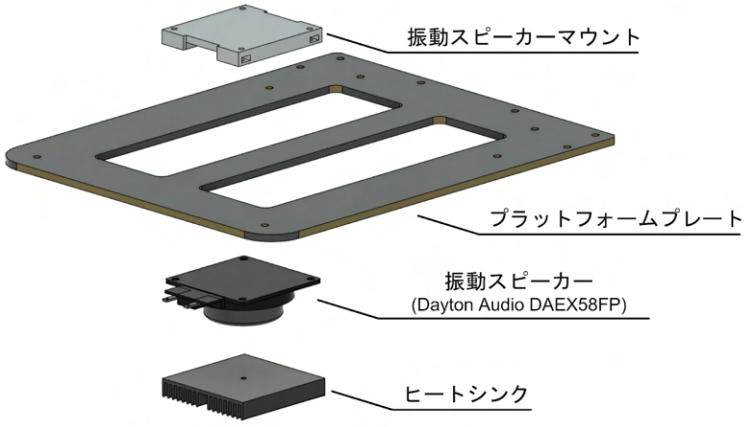


図24 振動スピーカー周りの分解図

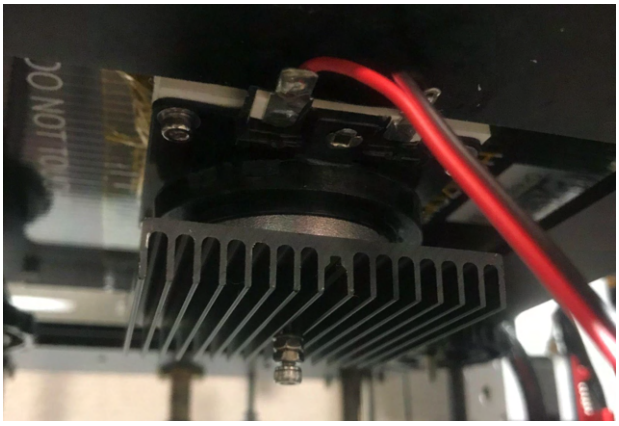


図25 実際に振動スピーカー(DAEX58FP)を設置した様子

3.3.2 振動スピーカーの発熱問題

使用した振動スピーカー(DAEX58FP)は長時間稼働させると発熱し、特に低音域の音を鳴らし続けると徐々に温度が上昇していき、パワーアンプの出力次第では1時間程度経過すると素手で触れなくなる程の熱をもつ。これは実験で使用する音源が低音域であること、スピーカーの出力定格25W間際で運用していることが影響していると思われる。スピーカーが激しく発熱したまま稼働させ続けると振動の具合が変化するだけでなく、マグネットを固定している部品が劣化していき、最終的にはスピーカー本体からマグネットが剥離し、故障に至ることが分かった。

そのためスピーカー背面のマグネットにヒートシンクをボルトナットで留め、発熱対策を施すことで素手で触れなくなるほどの発熱には至らなくなった。一方、ヒートシンク無しの状態よりは寿命こそ延びたが、同様のメカニズムによるスピーカーの故障自体は避けられなかったため、より故障し難く堅牢で安定した振動を得られる振動スピーカーを選定し直し、実験装置を改善した。

3.3.3 発熱問題を改善した実験装置

初めに使用した振動スピーカー(DAEX58FP)の発熱、故障といった問題を受け、同じDayton Audioの振動スピーカーであるTT25-8[26)]を採用した。初めに使用したDAEX58FPの耐入力が25Wであるのに対してTT25-8の耐入力は15Wと落ちるが、スピーカー全体がヒートシンクを兼ねたケースで覆われており、機械的な可動部が見えず堅牢であることや、DAEX58FPでは激しく発熱するような長時間の稼働においても殆ど発熱が見られなかったため採用した。こちらも以前の実験装置と同様に、専用の振動スピーカーマウントを設計して3Dプリントし、マウントと振動スピーカーでプラットフォームプレートを挟み込み、ボルトナットで固定した。本実験装置は、5.3項の化粧箱の制作に用いている。

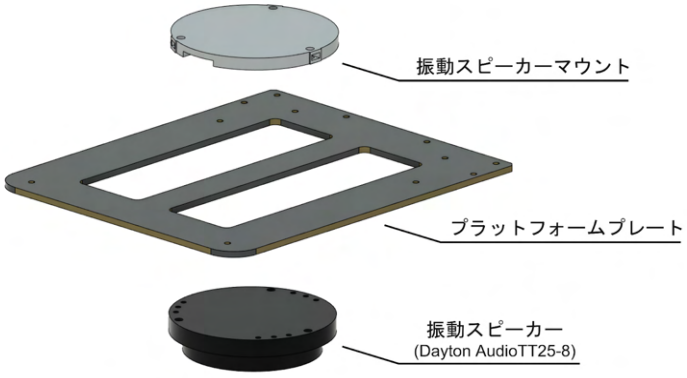


図26 振動スピーカー周りの分解図

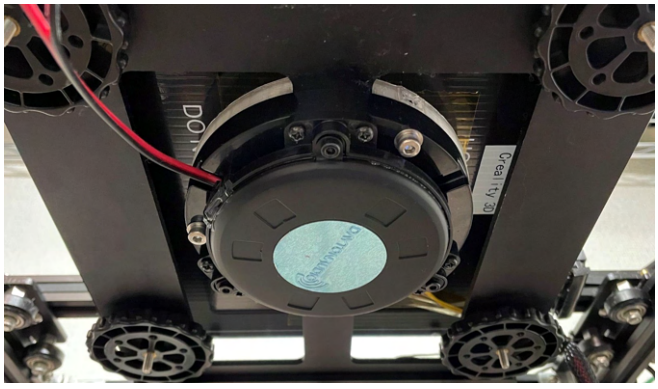


図27 実際に振動スピーカー(TT25-8)を設置した様子

第４章　実験

4.1 実験用モデルの定義

実験は、主に音・スライス設定・マテリアルに関するパラメータを網羅的に変えていき、様々な条件におけるテクスチャを観察することを想定した。そのため実験サンプルは出来る限り短時間で造形出来ることが望ましく、立方体をベース形状とした。

予備実験から、同じ条件下であっても立方体側面と上面では異なるテクスチャが現れることを確認していることから、立方体側面に現れるテクスチャを観察するモデルと、立方体上面に現れるテクスチャを観察するモデルの二種類に分けた。

本研究ではスライサーソフトウェア『Simplify3D』を用いて3DモデルからG-Codeを出力する。立方体側面のテクスチャ確認モデルはVaseモードで造形し、図29 に示すようにVaseモードではモデルの外周のみを螺旋状に描くツールパスとなり、立方体側面のみが造形されるためインフィル(内部充填)は無い。

立方体上面のテクスチャ確認モデルはインフィル有り(充填率100%)で、上面と底面のソリッドレイヤーは図30に示すようなRectilinerのインフィルパターンで造形される。

また、造形サンプルごとに実験条件やパラメータ情報を記した2次元コードを貼り付けることで、スマートフォン等で読み取り参照できるよう工夫した。

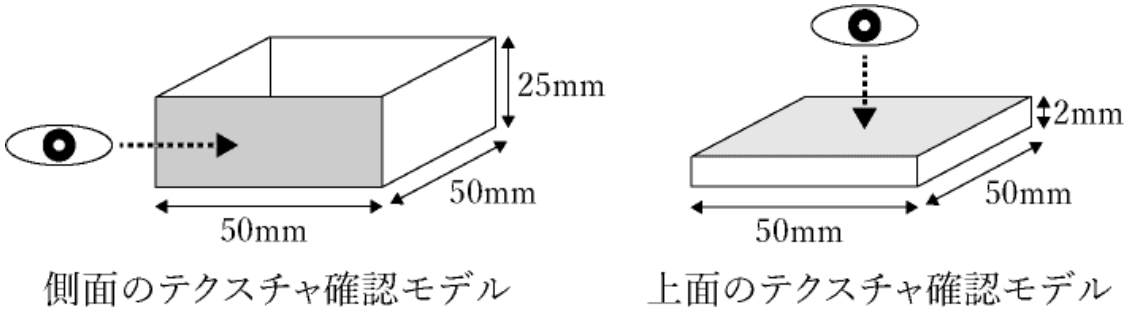


図28 物体側面と上面のテクスチャ確認モデル

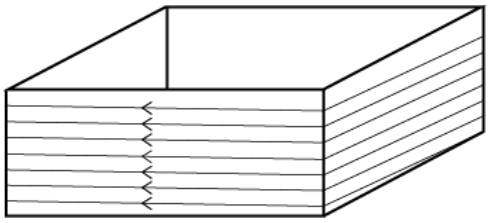


図29 Vaseモードのツールパス

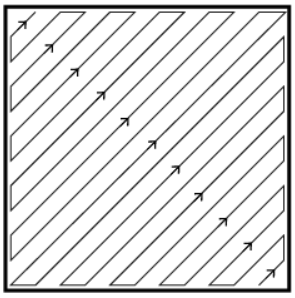


図30 Rectilinearのツールパス

図31 実際の「側面のテクスチャ確認モデル」例

図32 実際の「上面のテクスチャ確認モデル」例

4.2 周波数とテクスチャの関係

4.2.1 概要

周波数の変化がテクスチャにどのような影響を与えるか確認するために、シンセサイザーで生成した音の周波数を1オクターブずつ5段階で変化させ、それぞれの周波数に対して側面のテクスチャ確認モデル(W50mm×D50mm×H25mmの立方体)を造形し、テクスチャを観察した。

4.2.2 条件

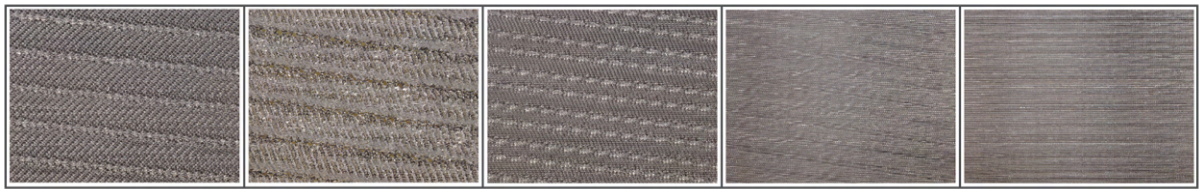
表1に代表的なパラメータを示す。波形はJD-Xiのプリセット音であるtribassとし、エフェクトが音やテクスチャに影響を与える可能性を考慮してdelayやreverbといったエフェクトは切っている。周波数はシンセサイザーの音階におけるD1(約36.7Hz), D2(約73.4Hz), D3(約146.3Hz), D4(約293.7Hz), D5(約587.3Hz)の5種類で、D1から周波数をオクターブ単位で上げている。JD-XiのMaster Volumeおよびパワーアンプの出力は最大とし、JD-XiのKeyHoldボタンをONにすることで連続的に音を流しながら造形した。

表1 代表的なパラメータ

ノズル径	0.4mm
積層ピッチ	0.2mm
送り速度	40mm/s

波形	tribass(JD-Xiのプリセット音)
周波数(音階)	約36.7Hz (D1) ~ 約587.3Hz(D5)まで,5段階
マテリアル	PLA(透明, Pxmalion)

4.2.3 結果



D1(約 36.7Hz)　D2(約 73.4Hz)　D3(約 146.3Hz)　D4(約 293.7Hz)　D5(約 587.3Hz)

図33 実験結果(周波数とテクスチャの関係)

図33に実験結果を示す。KEYENCE社のワンショット3D形状測定機VR-3200(以降3D形状測定機とする)で造形物側面を撮影し、周波数(オクターブ)毎に並べた。D1(約36.7Hz)~D3(約146.3Hz)においては斜め縞模様が強く確認できるが、周波数が高くなるにつれてテクスチャが薄まっていき、D5(約587.3Hz)では振動を与えずに造形した場合と殆ど同様のテクスチャで、縞模様が横向きになっている。このことから、周波数によってテクスチャは変化し、特に目視で確認できるテクスチャが付与されるのは300Hz程度より低い周波数(音階)であることが分かった。

また、図34にD1(約36.7Hz)におけるテクスチャの拡大図(12倍レンズ)を、図35にD1(約36.7Hz)におけるテクスチャの拡大図(80倍レンズ)を示す。特に80倍レンズで撮影した図34を見ると、ミリメートル単位のスケールでトウモロコシの粒のような粒形が集合することでテクスチャが構成されていることが分かる。

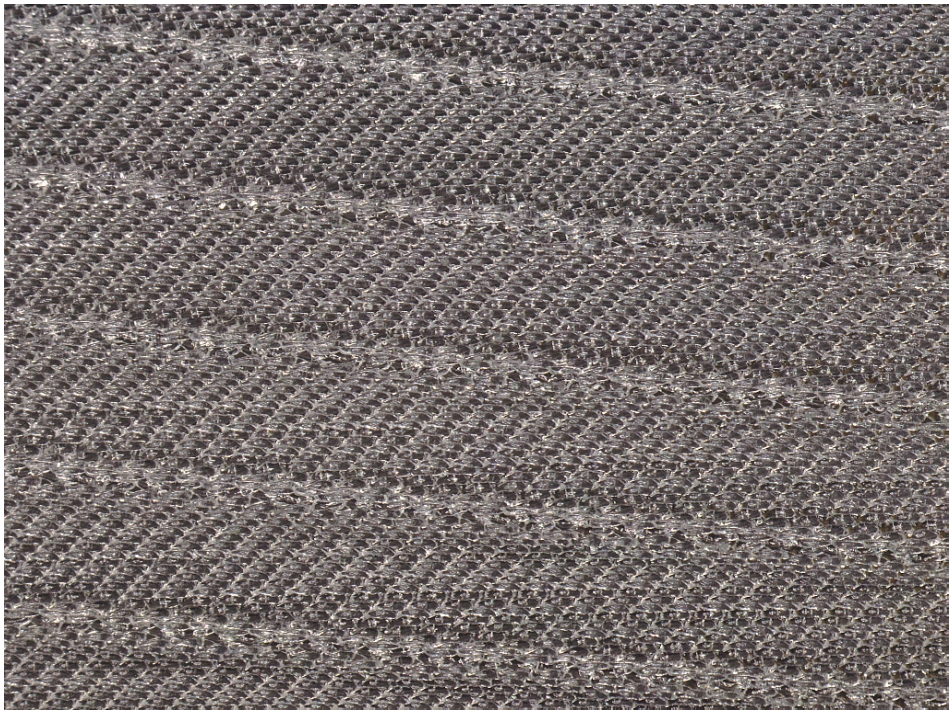


図34 12倍レンズで撮影したD1(約36.7Hz)のテクスチャ

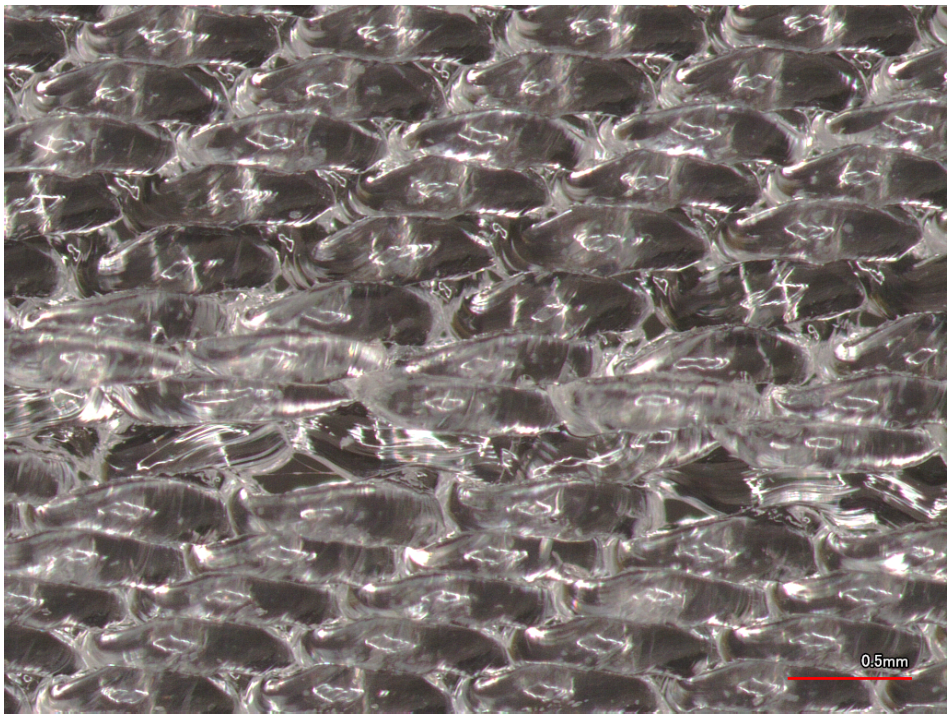


図35 80倍レンズで撮影したD1(約36.7Hz)のテクスチャ, 画像右下にスケール有り

4.2.4 考察

周波数が高くなるほどテクスチャが薄まる原因としては、振動スピーカーを設置しているプラットフォームには固有振動数が存在することや、振動スピーカーは低音域の再生に特化したスピーカーであり、低音域と比較すると高音域では音圧が低下する(スピーカーの周波数特性)といった要因から、3Dプリンタのプラットフォームが物理的に振動しないことが原因の1つであると考えている。

4.3 積層ピッチとテクスチャの関係

4.3.1 概要

積層ピッチは3Dプリンタの設定のなかでも最も基本的なパラメータの1つであり、積層痕といった外観や、造形時間に大きな影響を与えるため重要である。同じ振動(音)に対して積層ピッチがテクスチャにどのような影響を与えるかを確認するため、振動を与えながら5種類の積層ピッチで側面のテクスチャ確認モデル(W50mm × D50mm × H25mmの立方体)を造形し、テクスチャを観察した。

4.3.2 条件

代表的なパラメータを表2に示す。積層ピッチの変化幅を広くとるためにノズル径は1.0mmを採用し、積層ピッチは0.1mm, 0.2mm, 0.4mm, 0.8mm, 1.0mmの5種類とした。周波数(音階)を約36.7Hz(D1)に固定した以外は4.2項と同じ条件である。

表2 代表的なパラメータ

ノズル径	1.0mm
積層ピッチ	0.1mm, 0.2mm, 0.4mm, 0.8mm, 1.0mm
送り速度	40mm/s
波形	tribass(JD-Xiのプリセット音)
周波数(音階)	約36.7Hz(D1)
マテリアル	PLA(透明, Pxmalion)

4.3.3 結果/考察

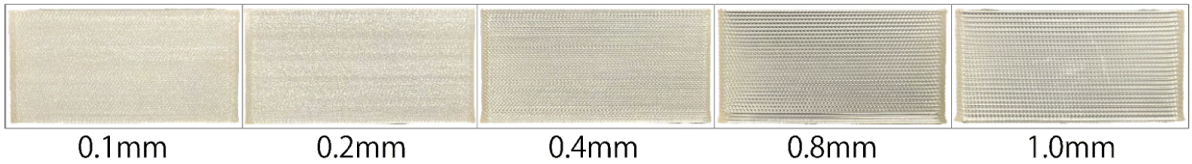


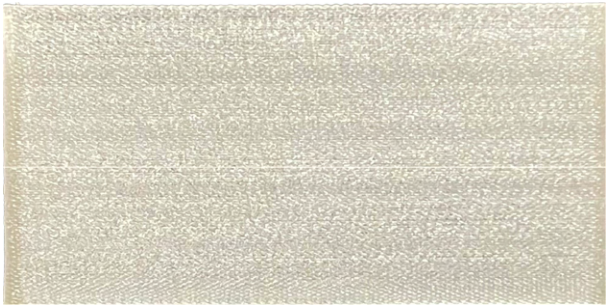
図36 実験結果(積層ピッチの変化に対する立方体側面のテクスチャ)

図36に、立方体側面を撮影し左から積層ピッチが小さい順に並べた実験結果を示す。また、図37に拡大した画像を示す。積層ピッチが0.8mm, 1.0mmでは四角に近い粒状の集合が観察でき、積層ピッチが0.4mmより細かくなるにつれて徐々に粒形状が細かく複雑になる。

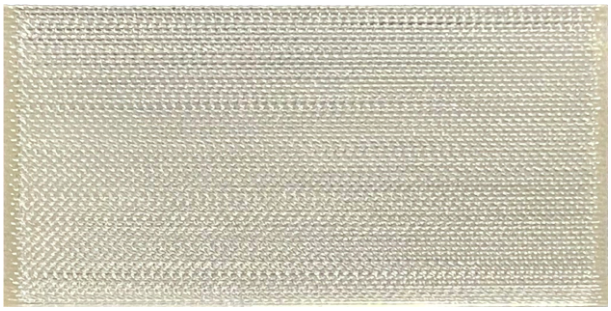
積層ピッチが細かくなるにつれて色調が透明から白色へ変化していき、すりガラスのような効果が強まっていく。このように、積層ピッチはテクスチャに影響を与え、透明色のマテリアルでは積層ピッチを細かくするほどすりガラス効果が強く得られることが分かった。

シンセサイザーおよびパワーアンプの出力(ボリューム)は殆ど最大まで上げているため、すりガラス効果を十分に得るか、効果の程度を切り替えたい場合は積層ピッチを0.2mm程度まで細かくするのが良いと思われる。

積層ピッチ0.1mm

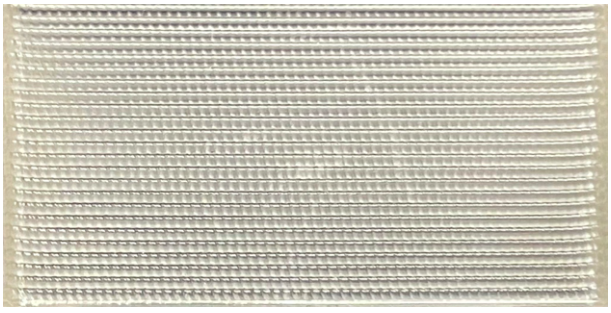


積層ピッチ0.2mm



積層ピッチ0.4mm

積層ピッチ0.8mm



積層ピッチ1.0mm

図37 積層ピッチの変化に対する立方体側面のテクスチャ(拡大版)

4.4 マテリアルとテクスチャの関係

4.4.1 概要

3Dプリンタで使用するマテリアル(フィラメント)がテクスチャにどのような影響を与えるかを確認するために、側面のテクスチャ確認モデル(W50mm×D50mm×H25mmの立方体)を4種類の異なるマテリアルで造形し、テクスチャを観察した。

4.4.2 条件

代表的なパラメータを表3に示す。マテリアルはPLA(透明色, Pxmalion), PLA(銅20%混錬, Wellhan), PLA(木質, Pxmalion), TPU(白, Pxmalion)の4種類を使用した。ノズル径や積層ピッチなど、3Dプリンタに関する条件は基本的に4.2項の実験と同じであるが、音に関してはSlicerエフェクトをかけている点が4.2項と異なる。Slicerエフェクトとは、連続した音を刻む(スライスする)ことで音に周期性を持たせるエフェクトである。こうしたエフェクト効果の効き具合はJD-Xi(シンセサイザー)のコントロールノブで調整し、基準となる位置(回転角度)からノブをどの程度回転させるかによって決まる。

本研究では、ノブの位置を時計の時針の向きとして表現する。例えばエフェクトの効きが最小(ゼロ)の状態はノブの位置が”7時の方向”であり、ノブを時計回りに回転させる毎にエフェクトの効き具合が増していき、”5時の方向”で最大となる。本実験(4.4項)では、Slicerエフェクトに割り当てたノブを”9時方向”に合わせており、比較的エフェクトの効きが浅く、得られる音の周期は長いものとなる。Slicerエフェクトはシンセサイザー上で設定されるテンポに応じて効き具合が変化するため、テンポも併記しておく。

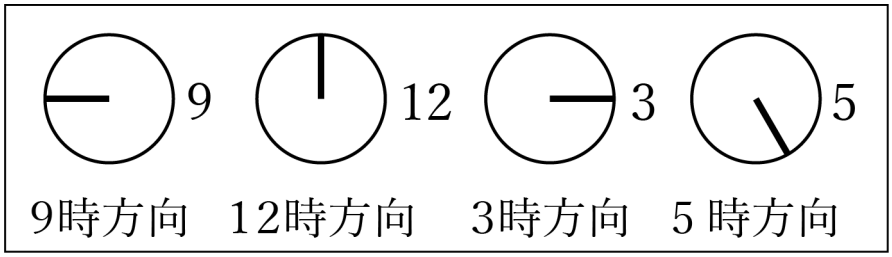


図38 コントロールノブ位置の時針表記

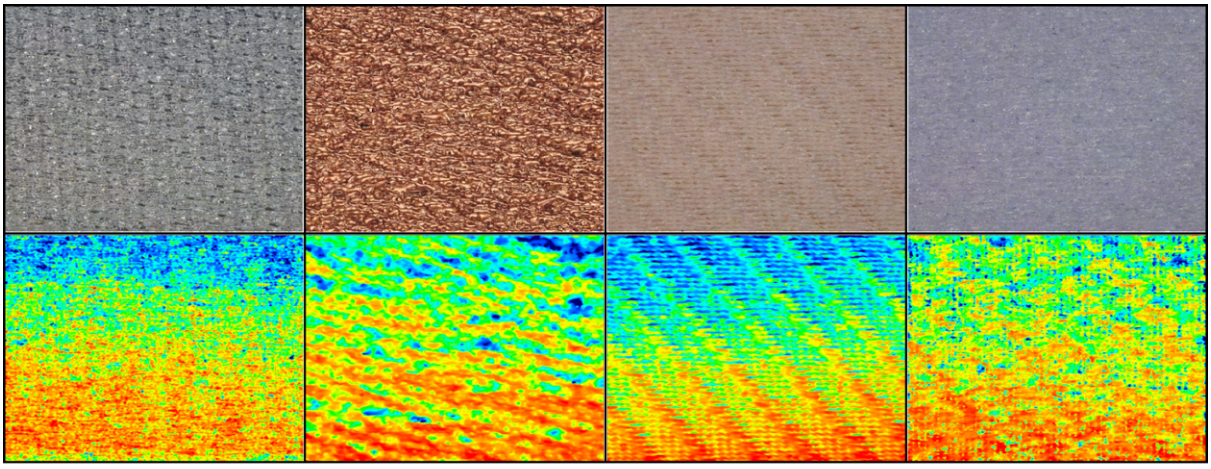
表3 代表的なパラメータ

ノズル径	0.4mm
積層ピッチ	0.2mm
送り速度	40mm/s
波形	tribass(JD-Xiのプリセット音)
エフェクト	Slicer, 9時方向
テンポ	60BPM
周波数(音階)	約36.7Hz(D1)
マテリアル	PLA(透明, Pxmalion) PLA(銅20%混錬, Wellhan) PLA(木質, Pxmalion) TPU(白, Pxmalion)

4.4.3 結果

図39に、3D形状測定機で撮影した造形物側面の計測表面と高さデータを示す。高さデータはヒートマップで表され、基準面より低いほど青く、高いほど赤く表示されている。高さデータを参照すると、マテリアル毎に明確に異なるテクスチャが付与されていることが分かる。最も分かりやすいのはPLA(木質)で、計測表面および高さデータにおいて斜め縞模様が容易に確認できる。

計測表面では確認が困難であるが、TPU(白)およびPLA(銅)の高さデータを参照すると、薄っすらと斜め縞模様が確認できる。一方、PLA(透明)は他のマテリアルと比べて高さデータの参照からはパターンを連想することが困難だが、計測表面を見ると縦方向の縞模様と、縞模様の線に沿ってトウモロコシのような粒形状が充填されたパターンを感じ取ることが出来た。



PLA(透明)　PLA(銅)　PLA(木質)　TPU(白)

図39 マテリアル毎の計測表面と高さデータ(上画像：計測表面, 下画像：高さデータ)

4.4.4 考察

マテリアルによってテクスチャが異なる理由としては、MFR(Melt Flow Rate)に代表される樹脂の流動特性や溶融粘度がマテリアル毎に異なり、振動に対する物理的応答性が変化するためではないかと考えている。したがって、厳密にはノズル温度など、樹脂の流動性・溶融粘度に影響を与えるパラメータもテクスチャの変化に影響を与えると思われる。

本実験を皮切りに、マテリアルによってテクスチャの視認性や効果が異なることも明らかとなり、マテリアルは、単に同じ音に対するテクスチャ(表面の凹凸)を変えるだけでなく、その物体表面の感性にも働きかけるということを強く意識するきっかけとなった。ここから予備実験や壺の制作を通じて様々なマテリアルを試し、テクスチャを観察していくことで、表現としての応用可能性に長けたマテリアル・色の再検討に繋がった。

4.4.5 シルクPLAとの出会い

5章で後述する壺の造形などを通じて様々なマテリアルを試す過程でシルクPLAと出会い、これが転機となった。シルクPLAとは、名前の通りシルク生地のような光沢感を持つマテリアルで、PLA樹脂に特殊なフィラー(添加剤)を混合することで光沢を得ている。シルクPLAで3Dプリントされた造形物は光沢により積層痕が目立ちにくく、塗装をせずとも光沢のある美しい造形が得られることに加え

て、PLA樹脂と同様の3Dプリント設定で造形が可能であるため、3Dプリンタユーザー間で人気の高いマテリアル(フィラメント)の1つである。

図40に、シルクPLAで造形した振動無しのサンプルと、振動有りのサンプル(2種類の振動周期)を示す。周期以外の条件は4.4項と同じで、側面のテクスチャ確認モデルを撮影したものである。

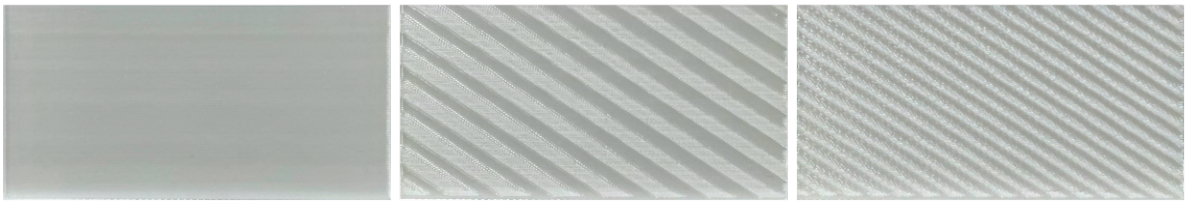


図40 シルクPLAの造形サンプル

また、3D形状測定機を用いて撮影した造形サンプル(振動周期A, B)を図41に示す。シルクPLAは、振動によりテクスチャ(凹凸)が付与された箇所と、周期の関係により振動の影響が小さい箇所で色調の変化が明確に出るため、テクスチャの観察が比較的容易である。また、振動により得られるテクスチャは生地や織りを感じさせる効果が得られ、期待が持てたことからシルクPLAをメインに実験を進めていくことにした。

シルクPLAの中にもメーカー毎に様々なカラーバリエーションが存在するため、シルクPLAのなかで数種類の色を試行した結果、白色のシルクPLAでは反射が強く、比較的テクスチャが”薄く”感じられるといった理由から、次の実験からはSUNLU社のSilk Copperというカラーを用いることにした。

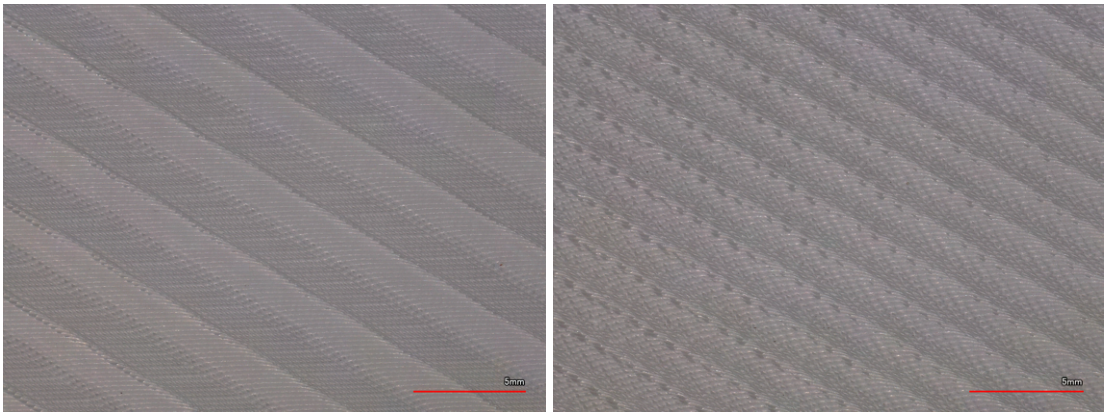


図41 3D形状測定機で撮影した造形サンプル(画像左：振動周期A, 画像右：振動周期B)

4.5 周期とテクスチャの関係

4.5.1 概要

音の周期がテクスチャにどのような影響を与えるかを確認するために、Slicerエフェクトを用いて4段階で振動周期を変化させ、側面のテクスチャ確認モデル(W50mm × D50mm × H25mmの立方体)および上面のテクスチャ確認モデル(W50mm × D50mm × H2mmの立方体)を造形し、テクスチャを観察した。

4.5.2 条件

表4に代表的なパラメータを示す。予備実験やここまでの実験によりテクスチャの視認性を考慮したことや、得られるテクスチャ表現や効果に対する期待度の高さから、本実験からはシルクPLA(Silk PLA)をマテリアルとして使用した。

表4 代表的なパラメータ

ノズル径	0.8mm
積層ピッチ	0.2mm
送り速度	20mm/s
波形	tribass(JD-Xiのプリセット音)
エフェクト	Slicer, 9時-12時-3時-5時
テンポ	60BPM
周波数(音階)	約36.7Hz(D1)
マテリアル	PLA(Silk Copper,SUNLU)

4.5.3 結果

実験結果を図42に示す。上段画像は造形物側面のテクスチャ確認モデル、下段画像は上面のテクスチャ確認モデルであり、画像の左から右にかけて徐々に振動周期が早い(Slicerエフェクトの効きが強い)場合のテクスチャとなっている。図42の画像はテクスチャの凹凸感を際立たせるために比較的暗い光学的条件下で撮影している。また、3D形状測定機で撮影した「側面のテクスチャ確認モデル」と「上面のテクスチャ確認モデル」を、それぞれ図43と図44に示す。

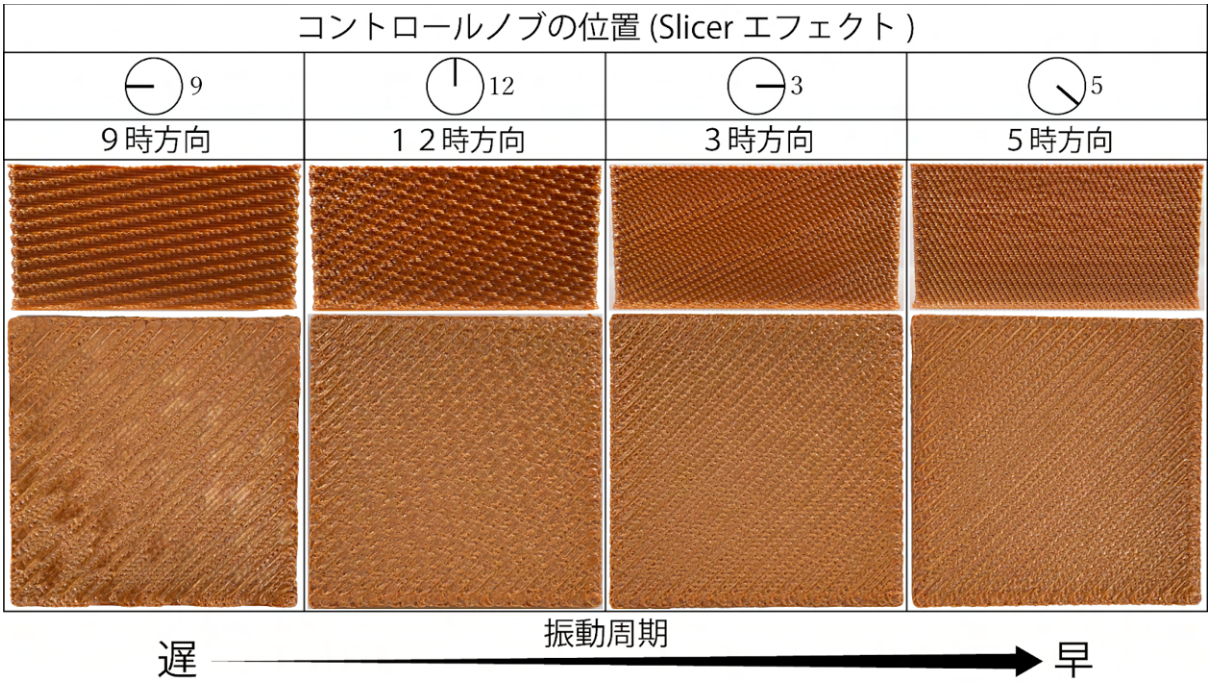
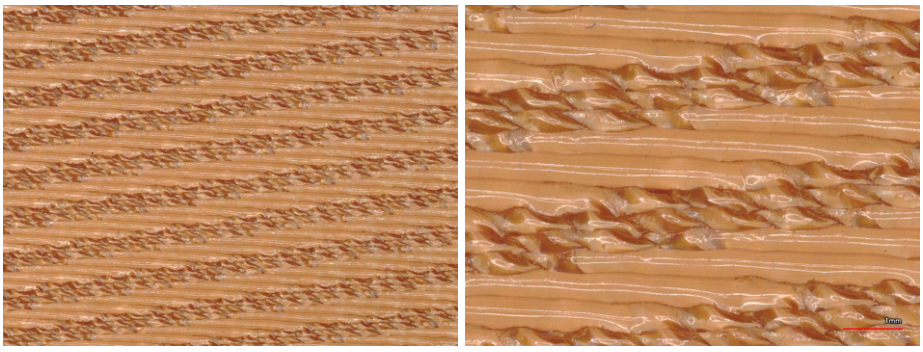
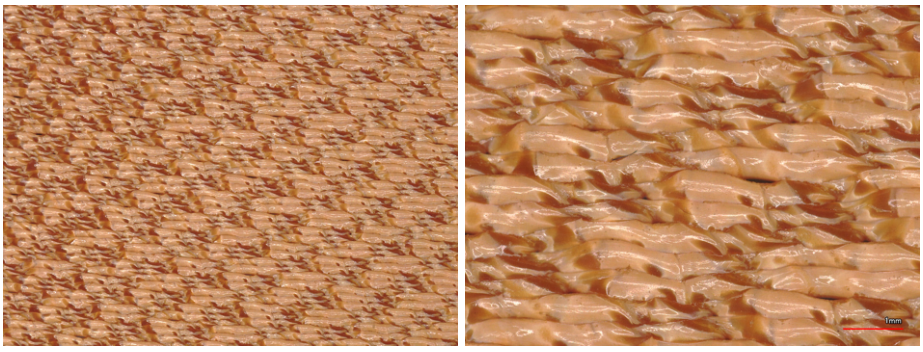


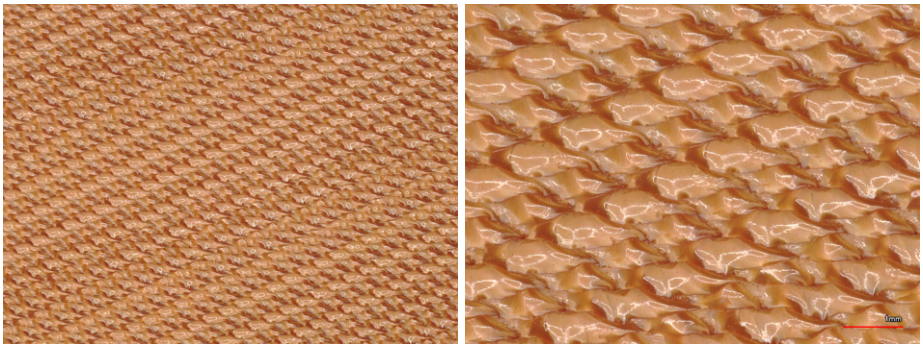
図42 振動周期とテクスチャの関係



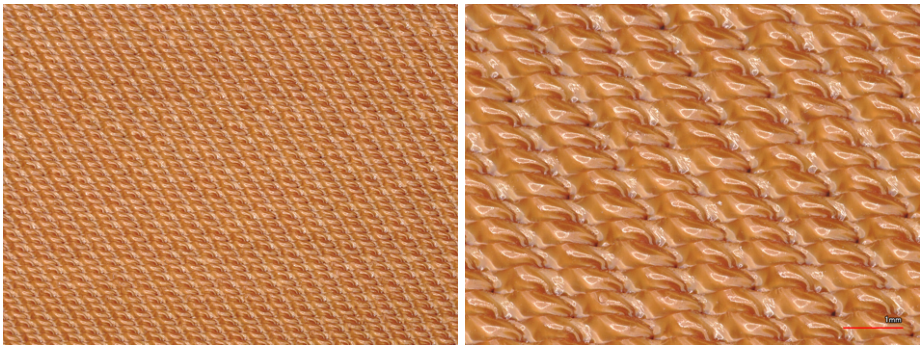
コントロールノブの位置：**9時方向**(画像左：12倍レンズ, 画像右：40倍レンズ)



コントロールノブの位置：**12時方向**(画像左：12倍レンズ, 画像右：40倍レンズ)

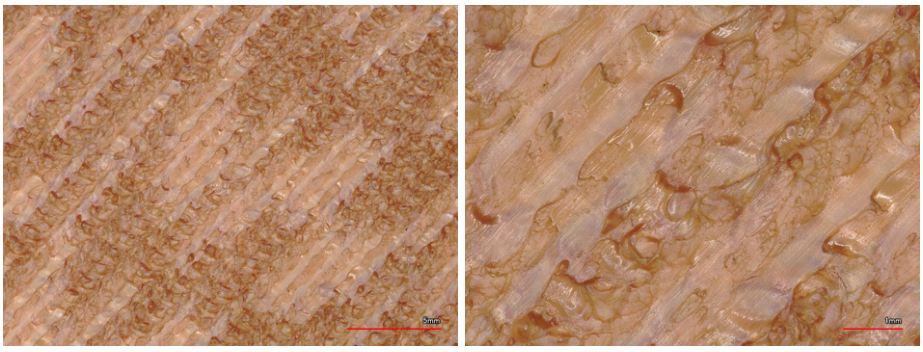


コントロールノブの位置：**3時方向**(画像左：12倍レンズ, 画像右：40倍レンズ)

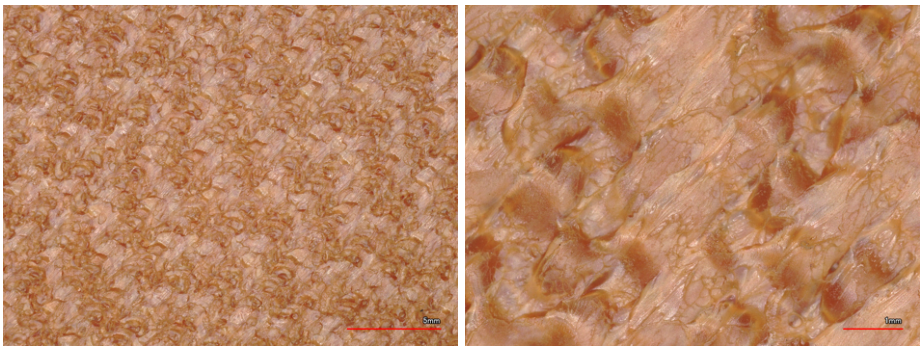


コントロールノブの位置：**5時方向**(画像左：12倍レンズ, 画像右：40倍レンズ)

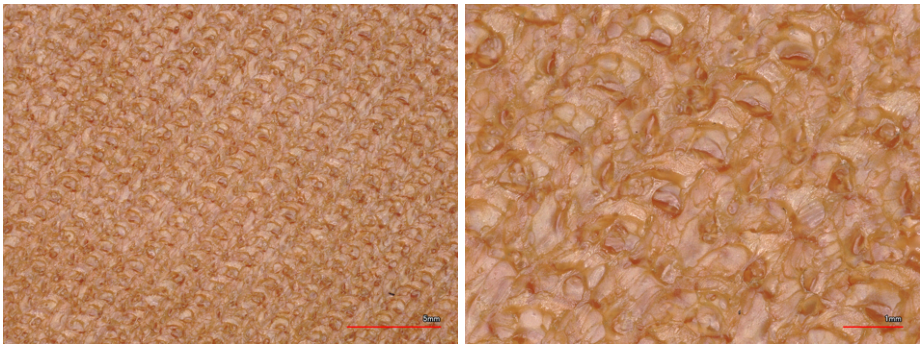
図43 3D形状測定機で撮影した側面のテクスチャ確認モデル



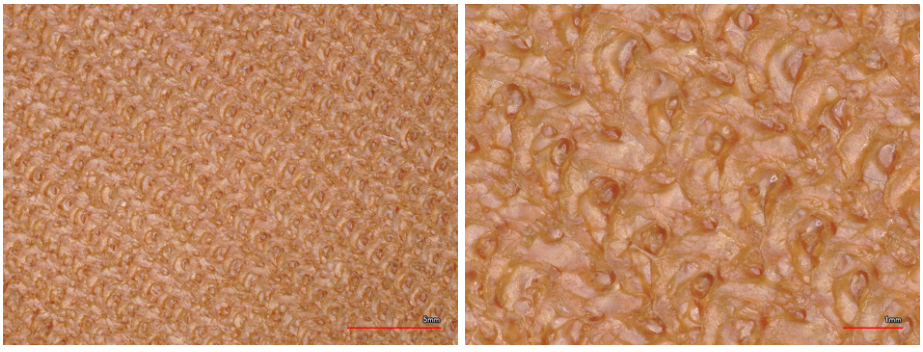
コントロールノブの位置：**9時方向**(画像左：12倍レンズ, 画像右：40倍レンズ)



コントロールノブの位置：**12時方向**(画像左：12倍レンズ, 画像右：40倍レンズ)



コントロールノブの位置：**3時方向**(画像左：12倍レンズ, 画像右：40倍レンズ)



コントロールノブの位置：**5時方向**(画像左：12倍レンズ, 画像右：40倍レンズ)

図44 3D形状測定機で撮影した上面のテクスチャ確認モデル

4.5.4 考察

側面のテクスチャについて

まず、側面のテクスチャ(図42上段)について述べる。コントロールノブの位置が9時方向(振動周期が最も遅い)におけるテクスチャは、ハッキリとした斜め縞模様が観察できる。図43における40倍レンズで観察した画像を見ると、遅い振動周期によって、樹脂の形状が複雑に変形している部分と、殆ど変形していない部分に分かれているのが分かる。このように、周期に応じて樹脂が変形する箇所と変形しない箇所でコントラストが生まれ、Vaseモードのツールパスに応じて螺旋状に樹脂が積みあがることで、斜め縞模様が生まれると思われる。

振動周期が早くなると、振動による樹脂の変形がON/OFFのように切り分けられなくなり、徐々に曖昧になっていく。これがコントロールノブ位置が12時・3時の状態である。しかしながら、コントロールノブ位置が5時方向程度の振動周期までいくと、かえって周期性を感じ取りやすい斜め縞模様のテクスチャになっている。

本実験により、振動周期がある程度よりも遅い、または早い場合に斜め縞模様のテクスチャが生成されることが分かったが、その中間領域では樹脂の形状が複雑に変化していることから、この領域に焦点を当ててテクスチャの探索を行う余地があると思われる。今回は周期を単純に変化させているが、周期を複雑に変える(リズムパターンを変える)ことで未知のテクスチャが得られるのではないかとの示唆が得られた。

また、3D形状測定機で撮影した側面を観察すると、生成されるテクスチャは複雑なタイル形状を持つ一種の平面充填(タイリング)のようにも見える。入力(音やリズム)と出力(生成されるテクスチャ)の関係、つまり1回の振動における”タイル形状”を定義できれば、テクスチャの予測に繋がると思われる。

上面のテクスチャについて

次に、上面のテクスチャ確認モデル(図42下段)について述べる。上面のテクスチャは、振動周期が早まるにつれ、振動無しで造形した際のテクスチャに近づき、ツールパスによる痕跡が目立つようになる。特にSlicerエフェクトのコントロールノブが5時方向における上面のテクスチャは、インフィルパターン(Rectiliner)による斜め縞の線が明確である。

筆者が注目したのは、Slicerエフェクトのコントロールノブが9時方向のテクスチャである。3時方向と5時方向における上面のテクスチャはエラーに近く、魅力的なテクスチャには感じられなかったものの、最も振動周期の遅い9時方向では”ㄗ霞”のような和を感じる模様が現れている。こうした模様が現れるメカニズムとしては、特に周期が遅い場合、振動によって樹脂が変形する箇所と変形しない区間の距離が長くなることに加えて、インフィルパターンに応じてツールパスが描く直線一本当たりの距離が異なり、一定の振動周期(リズム)であっても樹脂が変形するタイミングにズレが生じることで起こると思われる。

造形物側面に積層痕が現れるように、FFF方式3Dプリンタでは通常、立方体上面といった平面にツールパスに沿った痕が現れる。更に、樹脂の押出量が多すぎればノズルが樹脂を引きずることでエラー(Over-Extrusion)となり、反対に樹脂の押出量が少なすぎれば樹脂の押出幅が狭く、隙間が空いてしまうエラー(Under-Extrusion)となる。このように、FFF方式3Dプリンタでは滑らかな平面を得ることは難しい。一方、CuraやPrusaSlicerといったスライサーソフトウェアに実装されている”Ironing”機能を用いることでツールパスの痕を見えにくくし、より滑らかな表面を得ることは可能である。

Ironingは、まさにアイロンがけをするように、既に造形された平面(最上面)に対して加熱したノズルを当てながら移動することで表面の樹脂を慣らし、滑らかにすることができる。また、ノズルから

わずかに樹脂を押し出しながら移動することで、隙間を埋める効果もある。Ironingは表面を滑らかにして外観を改善することができるが、最上面の造形後に再び同様のパスを移動するため造形時間が長くなることや、一度固まった樹脂を再び溶かすため、エッジが潰れてしまうといったデメリットがある。また、Ironingによる効果が得られるのは平面のみである。

図45 Ironingの例 (画像左：Ironing無し, 画像右：Ironing有り)[27)]

Ironingは平面を滑らかにし、ツールパス(インフィルパターン)の痕を消す方向で外観を改善する。反対に、筆者は平面に周期的な振動を与えることでツールパスの痕を活かしたテクスチャが得られる、表現の拡張が可能ではないかと考え、平面(立方体上面)のテクスチャがより魅力的となるような条件の模索や、「振動周期を変化させる実験(本実験)をインフィルパターンを変えて行う」という方針に至り、平面の表現拡張という意味では後述するシート材の制作にも繋がっている。

4.6 インフィルパターン・周期とテクスチャの関係

4.6.1 概要

インフィルパターンを変化させたうえで4.5項の実験と同様に周期を変化させることで、インフィルパターン(ツールパス)がテクスチャにどのような影響を与えるかを確認した。Slicerエフェクトを用いて4段階で振動周期を変化させ、側面のテクスチャ確認モデル(W50mm × D50mm × H25mmの立方体)および上面のテクスチャ確認モデル(W50mm × D50mm × H2mmの立方体)にテクスチャを付与し、テクスチャを確認した。

4.6.2 条件

表5に代表的なパラメータを示す。本実験は2種類の同心円状(Concentric)パターン、1種類の三角形(Triangular)パターンに対してそれぞれ4段階の振動周期を割り当てており、インフィル率は100%である。また、インフィルパターンと積層ピッチを除いては4.5項と同様の条件で実施している。

表5 代表的な実験パラメータ

ノズル径	0.8mm
積層ピッチ	0.4mm

送り速度	20mm/s
波形	tribass(JD-Xiのプリセット音)
周波数	約36.7Hz (D1)
マテリアル	PLA(Silk Copper,SUNLU)
インフィルパターン	Concentric(立方体), Concentric(円形), Triangular

4.6.3 結果/考察

図46、図47、 図48に実験結果を示す。各実験サンプルは、左から右にかけて徐々に振動周期が速く(Slicerエフェクトの効きが強く)なっており、Slicerエフェクトのノブ位置(振動周期)とテクスチャをセットにしている。図46と図47のテクスチャは厳密には異なるツールパスであるが、同心円を描く点では同じであるためか、同じ振動周期に対して似たようなテクスチャとなっている。

Concentricのインフィルパターン(図46, 図47)では、振動周期が最も遅い(コントロールノブの位置：9時方向)テクスチャに4.5項の実験結果と同様の霞模様が現れ、振動周期の変化に応じてテクスチャが変化することが分かる。

図48のテクスチャ(インフィルパターン：Triangular)はツールパス(インフィルパターン)の影響が大きく、Concentricのインフィルパターンと比較すると振動周期に対するテクスチャの変化が乏しい結果となった。

本実験により、意図的に振動を与えることで造形物最上面(平面)に現れる痕跡や造形エラーを上書きし、Ironingやツールパス(インフィルパターン)によるものとは異なるテクスチャ表現が得られることが分かった。

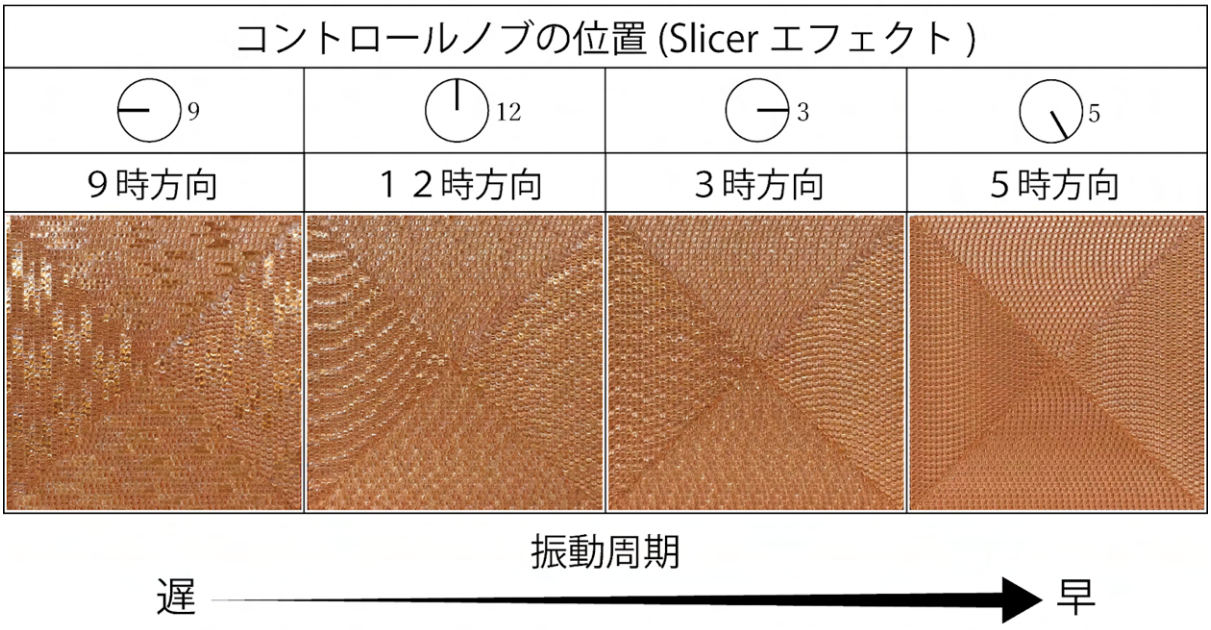


図46 Concentric(同心円)のインフィルパターンと周期の関係(立方体)

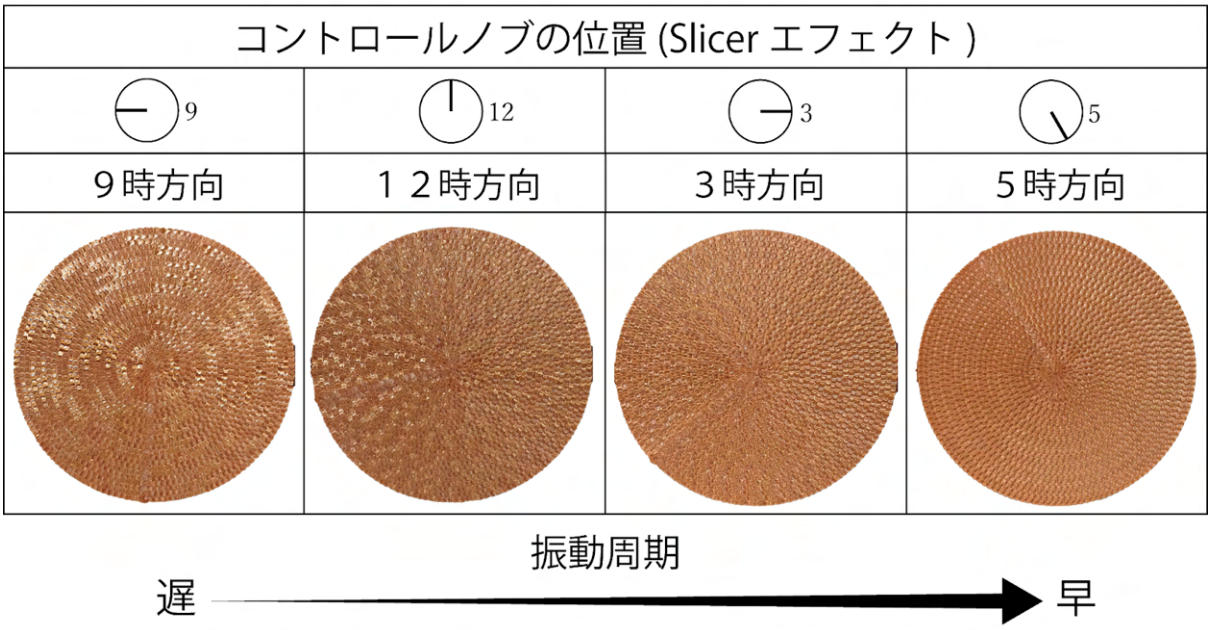


図47 Concentric(同心円)のインフィルパターンと周期の関係(円形)

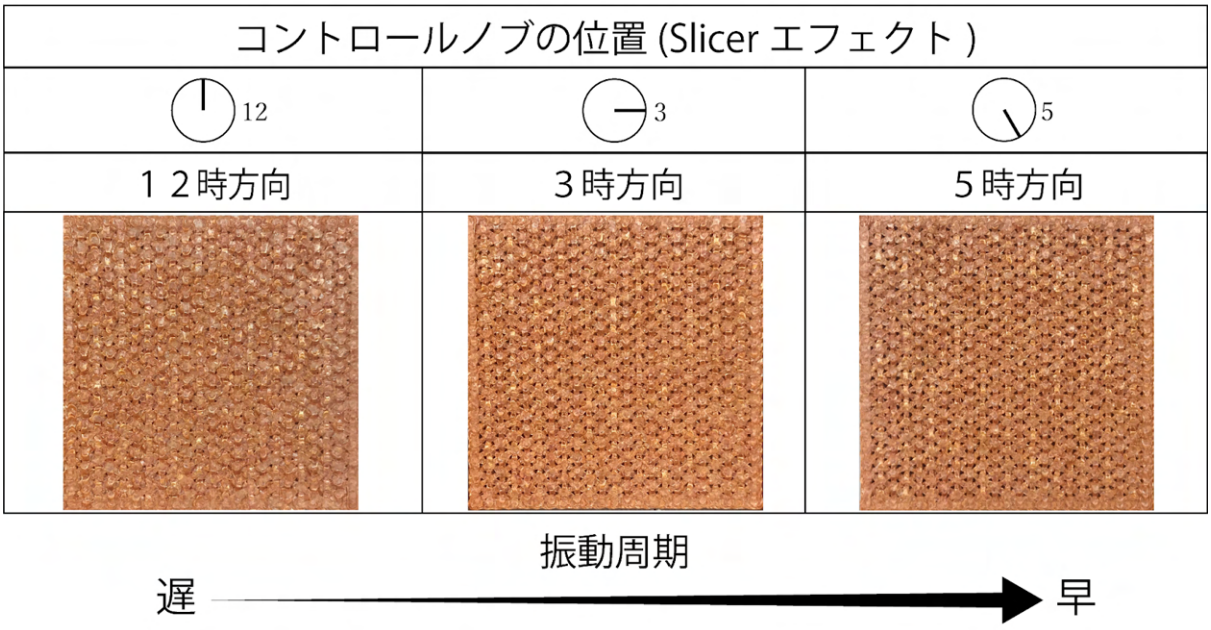


図48 Triangularのインフィルパターンと周期の関係(立方体)

4.7 テクスチャの光学的異方性

ここまでの実験を通じて、シルクPLAのように光沢のあるマテリアルの場合、光の当たる向き・強さといった光学的な条件によってテクスチャの見え方が大きく変化することが分かった。これを踏まえ、同じ造形物に対して照明の当て方を変えたときテクスチャの見た目がどのように変化するかを観察した。

立方体上面のテクスチャ

図49、図50に造形物の左右に照明を配置し「① 左側のみ点灯, ② 左右両方点灯, ③ 右側のみ点灯」それぞれ3パターンで照明を当てた際のテクスチャを撮影した結果を示す。

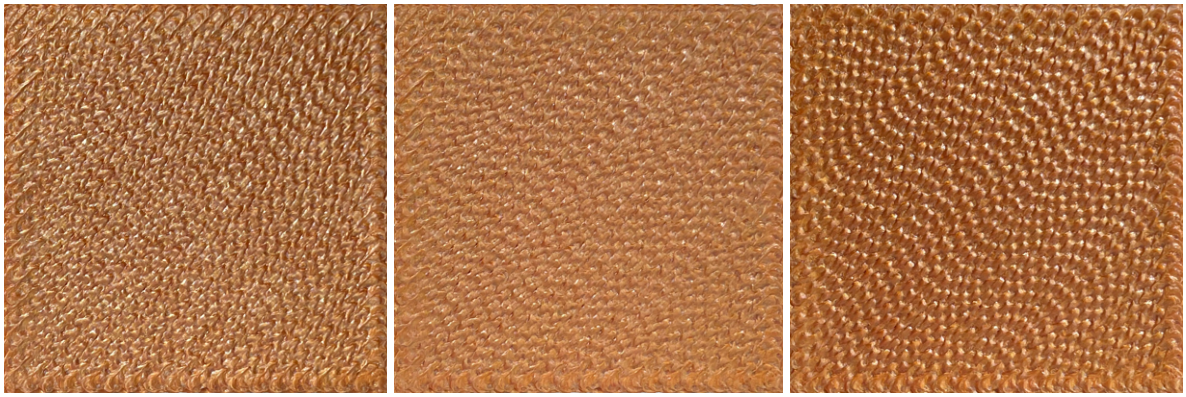


図49 異なる位置から光を当てた場合のテクスチャ表面A

[左画像]：左側のみ点灯, [中央画像]：左右両方点灯, [右画像]：右側のみ点灯

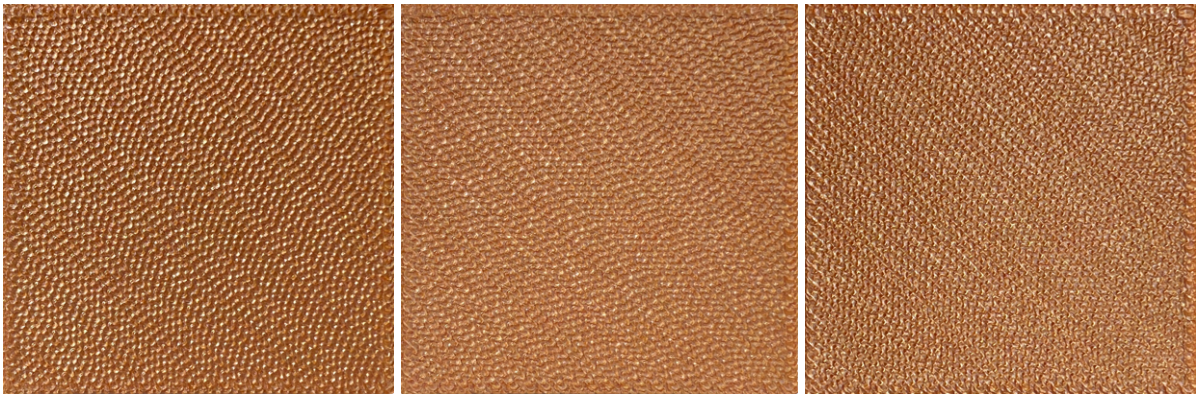


図50 異なる位置から光を当てた場合のテクスチャ表面B

[左画像]：左側のみ点灯, [中央画像]：左右両方点灯, [右画像]：右側のみ点灯

図51、図52は、4.5項の実験における造形物(コントロールノブの位置：3時方向)に対して、左右からそれぞれ照明を当てた際の外観変化を示したものである。

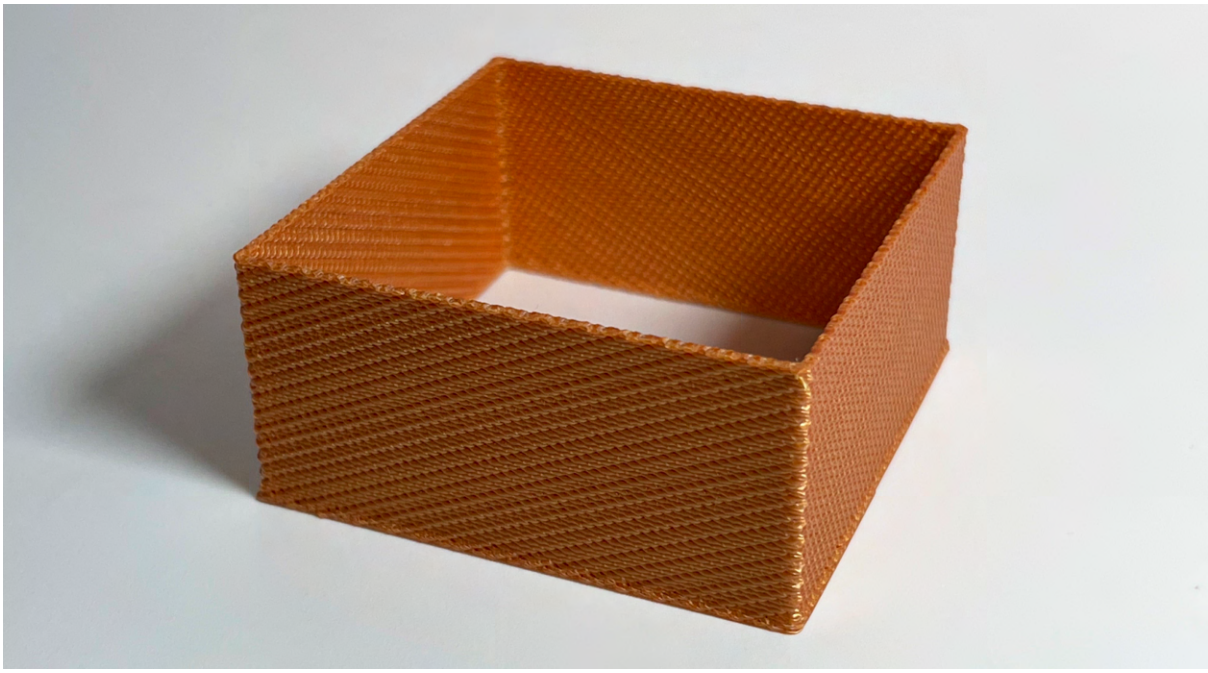


図51 右側から照明を当てた場合の外観

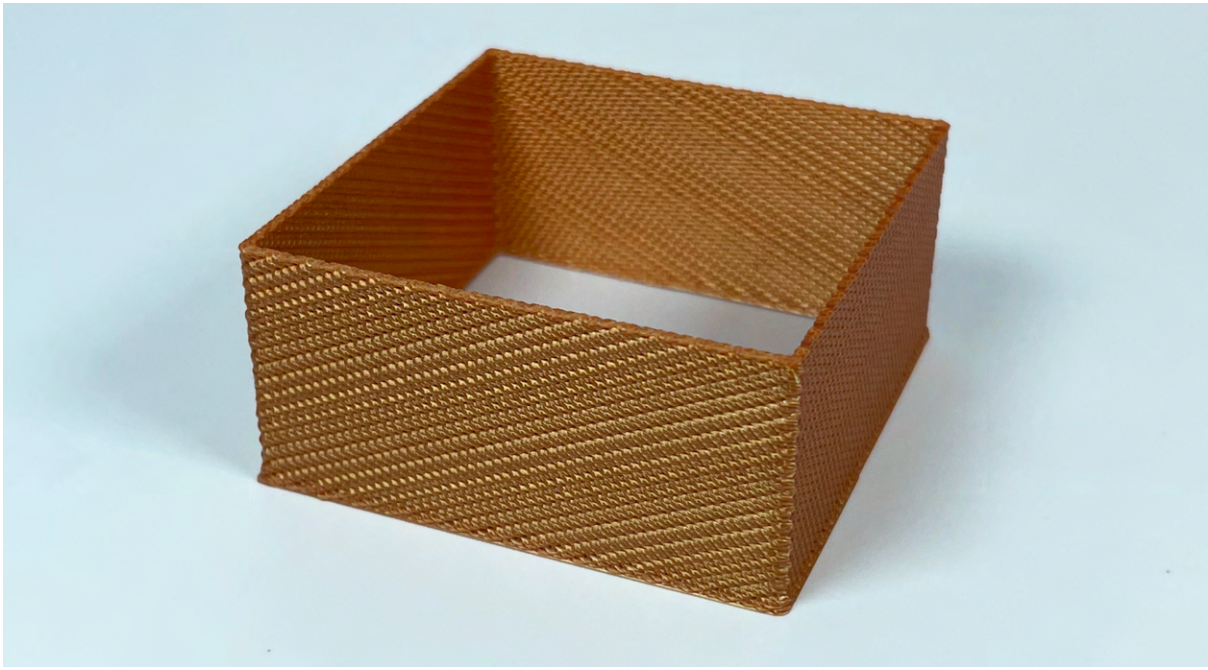


図52 左側から照明を当てた場合の外観

右側から照明を当て、立方体正面に影が差すと、光沢は失われ、テクスチャの凹凸(斜め縞模様)が浮かび上がる。一方、左側から照明を当てると光沢が生まれ、煌びやかな外観となる。このようにシルクPLAで造形したテクスチャは、光を当てる方向・強さといった照明条件に応じて外観が大きく変化する。

第５章　制作

5.1 壺

5.1.1 概要

　ここでは、予備実験として造形した手のひらサイズの壺(およそW60mm × D60mm × H65mm)を挙げる。殆どは研究の最初期に造形したもので、特に実験のルールを厳密に定めずマテリアルや振動周期、ノズル径といった条件を思うままに変えていった。

5.1.2 PLA(透明色)

図53 場所に応じて異なるテクスチャをもつ壺

図54 画像左：振動無し, 画像右：振動によってすりガラス効果をもたせた壺

5.1.3 PLA(銅20%混錬)

図55 PLA(銅20%混錬)による壺

画像左：振動無し, 画像中央：振動パターンA, 画像右：振動パターンB

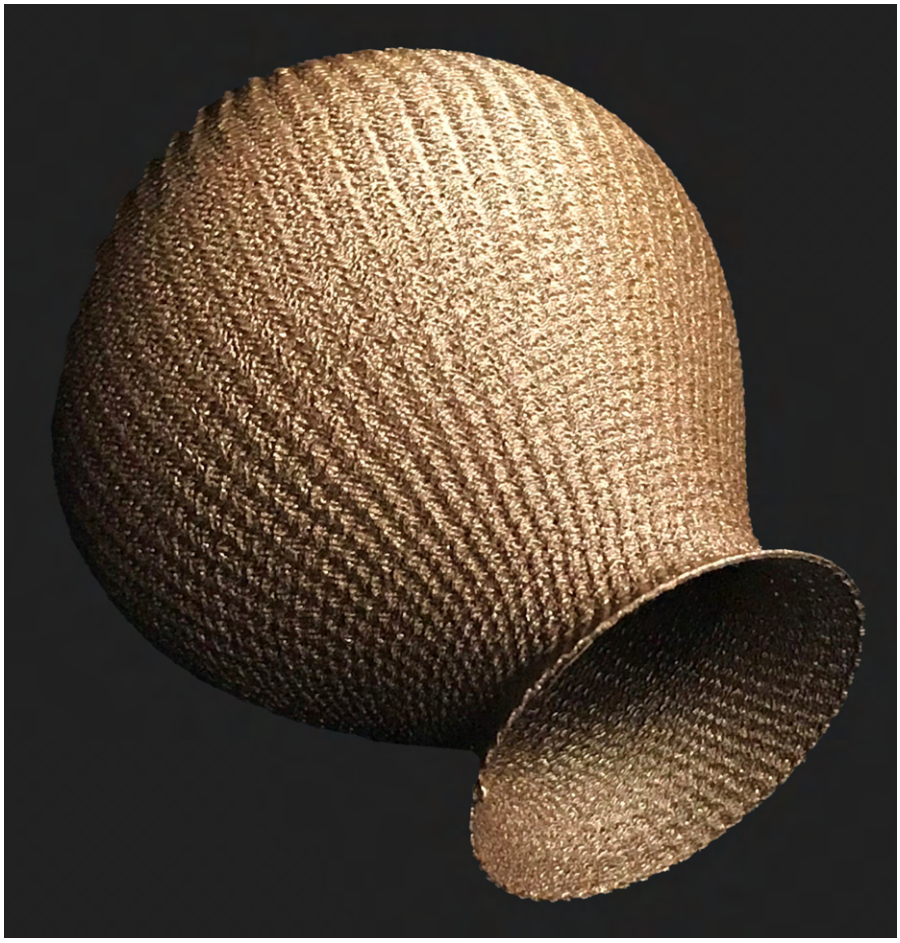


図56 振動パターンBの壺(別角度から撮影)

5.1.4 PLA(木質)

図57 PLA(木質)による壺A

図58 PLA(木質)による壺B

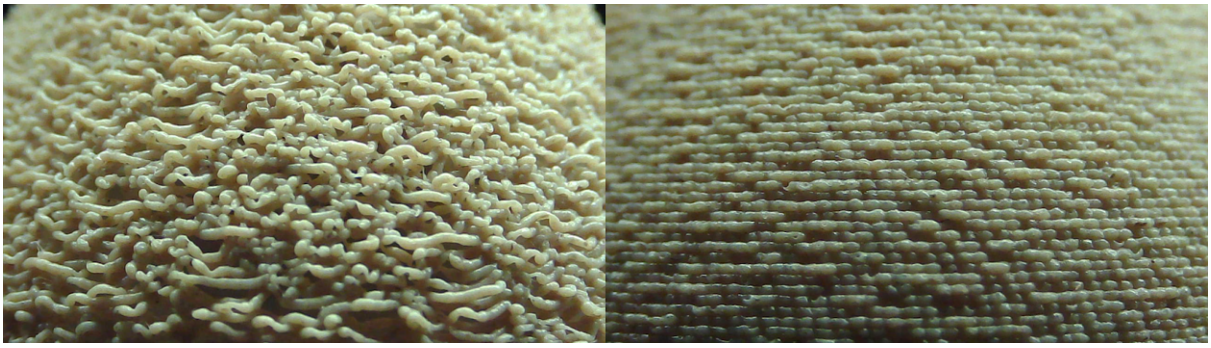


図59 PLA(木質)による壺のテクスチャ

5.1.5 TPU

図60 TPUで造形した壺(左画像：振動無し, 右画像：振動有り)

5.1.6 ABS

図61 ABSで造形した壺(左画像：振動無し, 右画像：振動有り)

5.1.7 PETG

図62 PETGで造形した壺(左画像：振動無し, 右画像：振動有り)

PETG(透明黄)では、透明色のABSによるすりガラス効果とは多少異なり、周期が短い振動を与えることで半透明から蛍光色に変わり、振動の強弱により半透明と蛍光色を調整可能であるという示唆が得られた。一方、振動が強すぎる場合は”表現”のレベルを超えてしまい、ホコリのような糸状の樹脂が造形物周囲に纏わりついたり、クラック(割れ)といったエラーを引き起こしてしまった。

図63 振動の強さを変えることでテクスチャを変化させた造形サンプル(PETG)

5.1.8 シルクPLA

図64 シルクPLAによる壺の造形サンプル

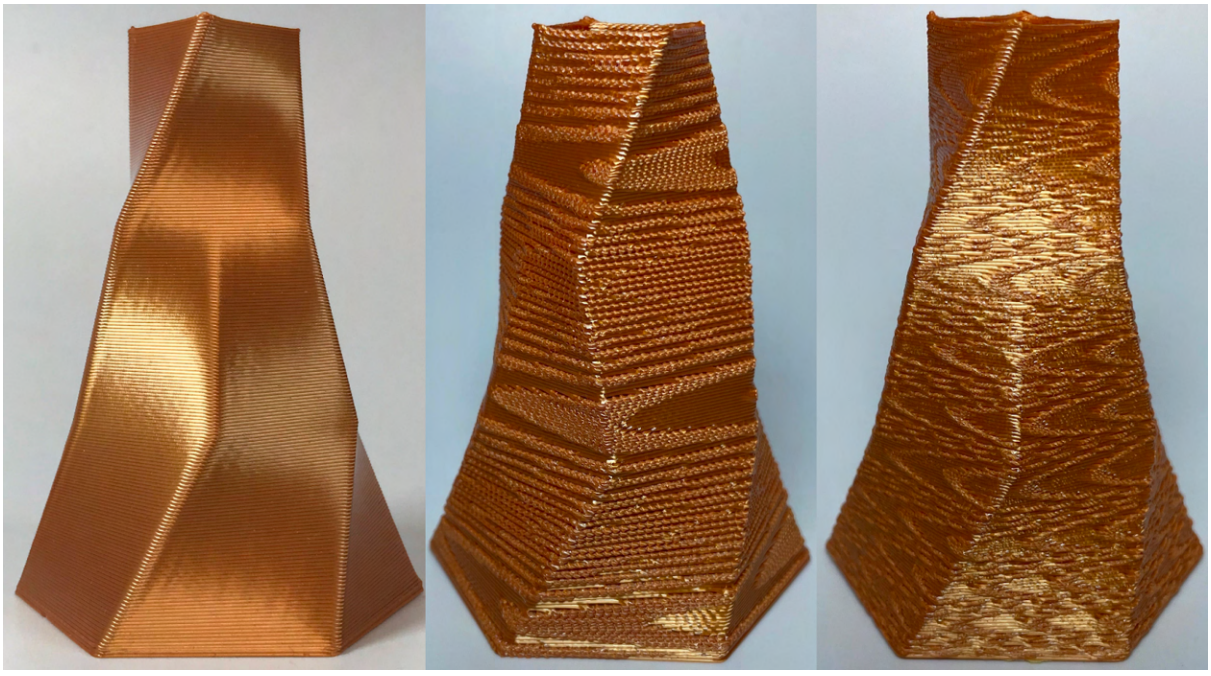


図65 振動周期を変えることでモアレ模様のパターンを変えた例

画像左：振動無し, 画像中央：振動周期(遅), 画像右：振動周期(早)

5.1.9 結果

同じモデル(壺)を様々なマテリアルで造形したことで、同じ振動でもマテリアル毎に異なるテクスチャが得られ、特に透明色のマテリアルに振動を与えることによって、すりガラスのような効果を得られることが分かった。また、PLA(銅20%混錬)をみると、振動無しで造形するとUnder-Extrusionなどにより途中で樹脂の吐出が途切れることでエラーが目立ってしまうが、振動を与えて造形物をテクスチャで覆うことにより、エラーの上書きあるいは目立たなくする効果があることが分かった。一方、PETG(5.1.7項)のように振動を与えることでむしろ造形エラーを誘発する場合もある。

5.2 シート材

こちらは4.5項の実験を基に、シルクPLAを用いて0.4mm程度(積層ピッチ0.2mm)のシート材を造形したものである。1層目から振動を与えると造形が荒れるだけでなく樹脂がプラットフォームから剥がれてしまうため、2層目のみ振動を与えている。振動周期を非常に遅く(コントロールノブの位置：9時方向)することで霞模様のテクスチャが付与されている。

この制作では図67に示すようなブックカバーといった応用を考え、造形したシート材を60℃程度まで温めることで手で変形可能な程度まで柔らかくし、温かいうちに本に合わせて折ることでブックカバーとして成形した。

ブックカバーに応用したシート材は振動周期を早めて造形したもので、図66のシート材と比較すると目の粗い紙ヤスリのような”ザラザラ感”が増し、素肌に思い切り擦り付けるとケガをし兼ねない程度のため、実際はブックカバーとしての応用には難がある。

このザラザラ感に気づいてから、あるとき生わさびをおろすために”わさびおろし”として使用したところ、意外にも綺麗におろすことが出来、この体験をきっかけにシート材(立方体上面)に付与されるテクスチャには研磨の機能があるという点に気づいた。

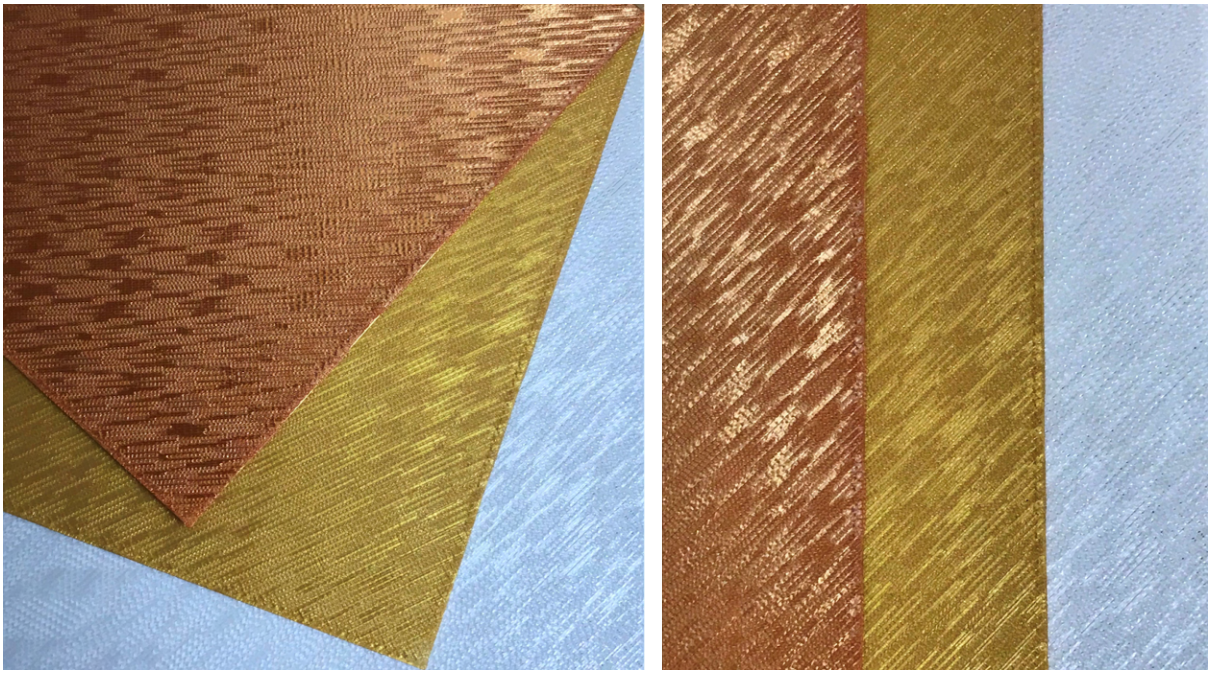


図66 シルクPLAで造形したシート材

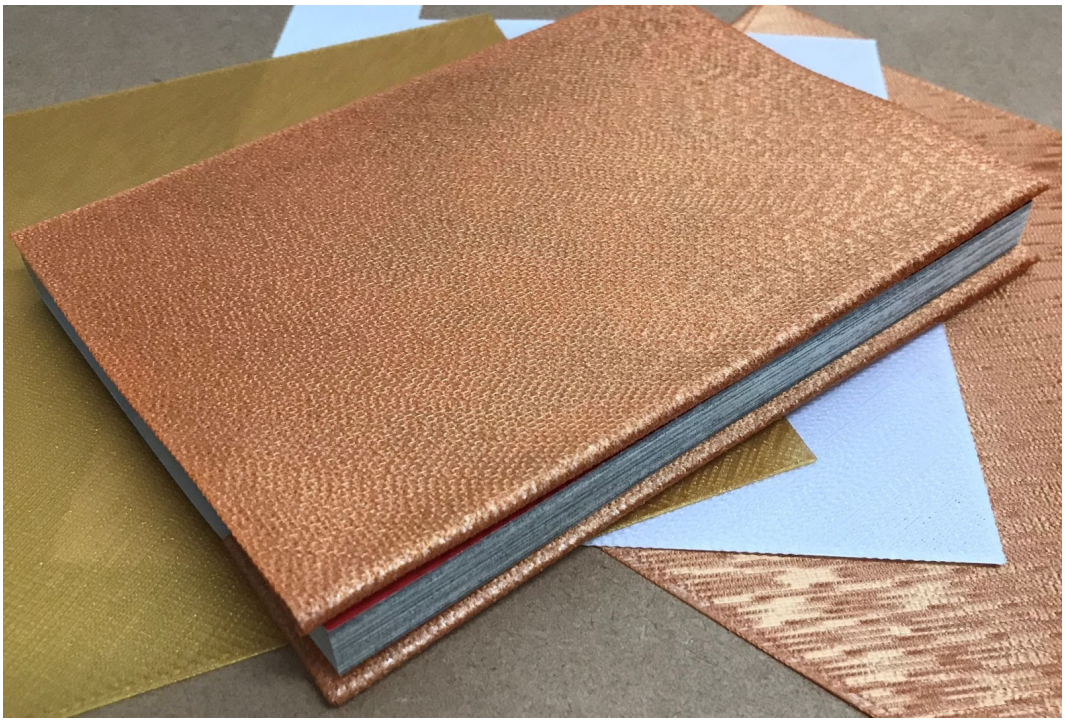


図67 ブックカバーへの応用

5.3 化粧箱

こちらは、3.3.3項(発熱問題を改善した実験装置)のテストとして造形した化粧箱である。シルクPLA・PLA(透明色)・PETGといったマテリアルを用いて、4.5項の実験におけるパラメータを基に造形した。

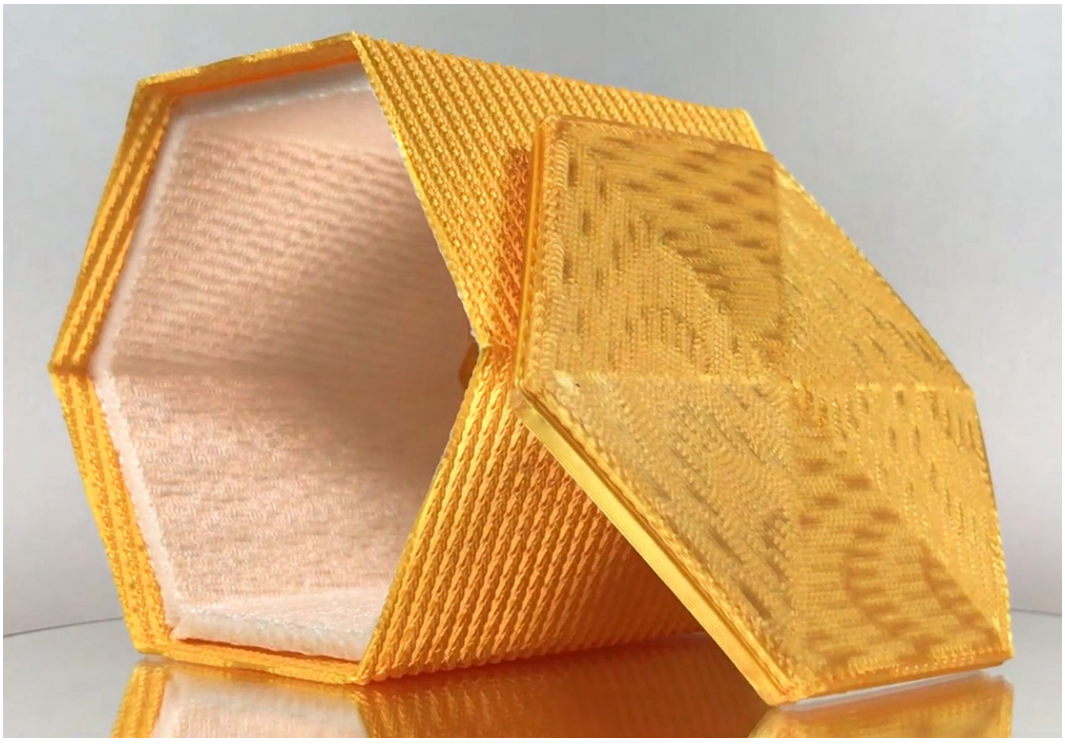


図68 シルクPLAで造形した化粧箱

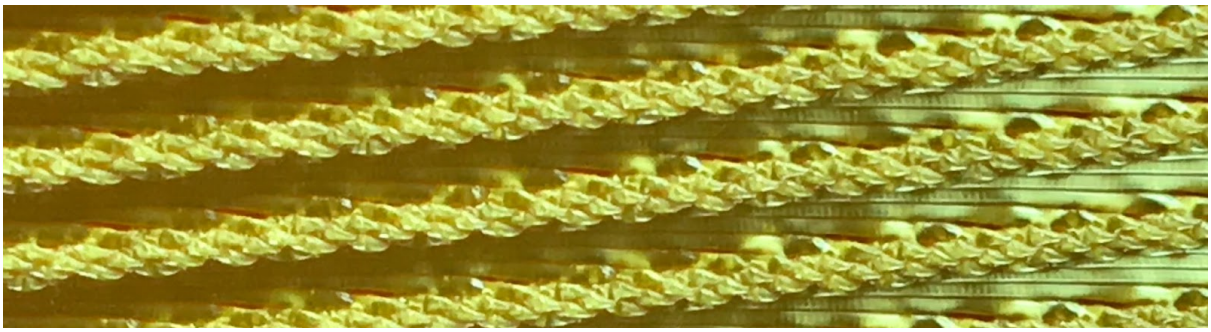


図69 化粧箱の側面(図68の造形物側面の拡大)

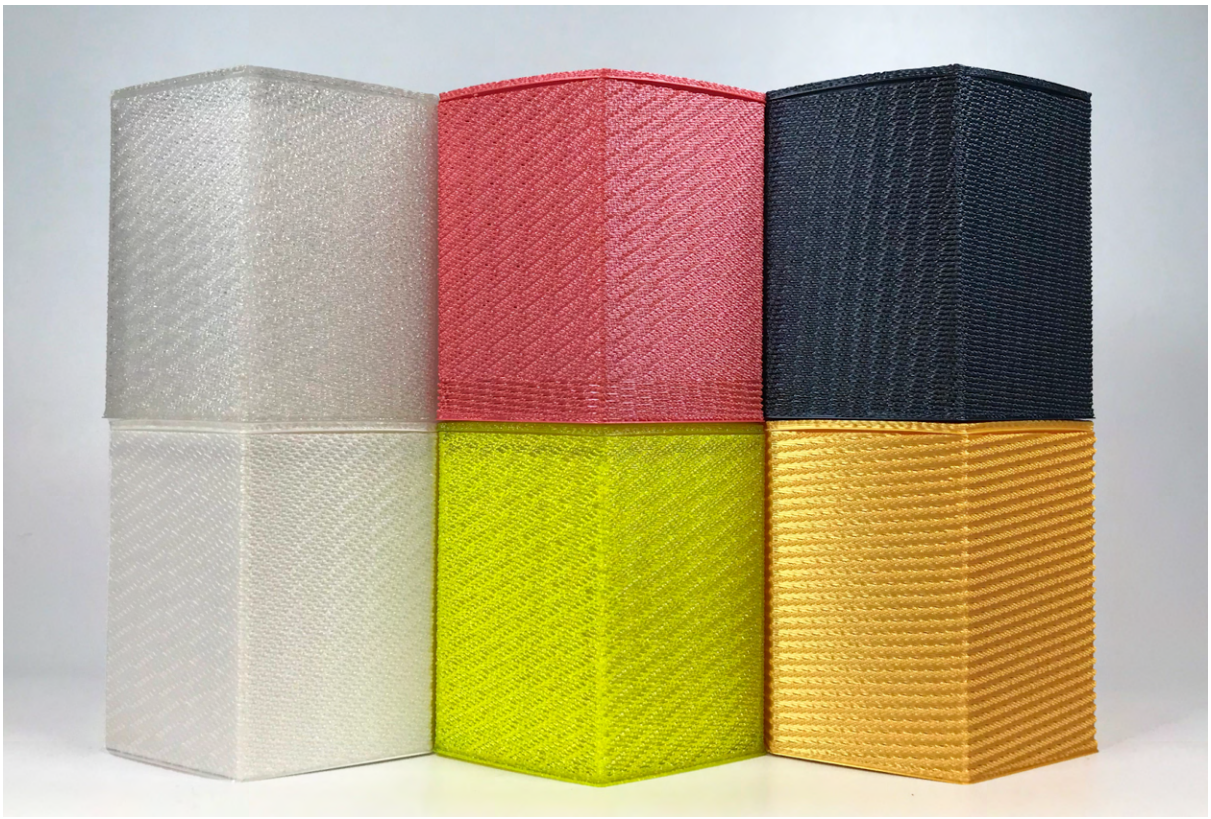


図70 様々なマテリアルやカラーで試作を行った

5.4 より複雑な形状への適用

先行事例と比較すると、本研究の提案手法は「形状データ(G-Code)とテクスチャが切り分けられる」点が特徴であると仮定している。そこで、予め立方体の造形テストから生成したテクスチャ(予想されるテクスチャ)が、より複雑な形状に対しても同様に現れるのかを確認するために幾つかの制作を行った。パラメータは4.5項を基にマテリアルと周期を変更しており、Vaseモードではなくインフィル(内部充填)有りで造形している。ここでは代表例として2種類のモデルによる例を挙げる。

マテリアルはシルクPLA(Longsell, ダークシャンパンゴールド)を用いており、図71に振動無しで「側面のテクスチャ確認モデル」を造形した場合のテクスチャを、図72には振動有りで造形した場合のテクスチャ(予想されるテクスチャ)を示す。

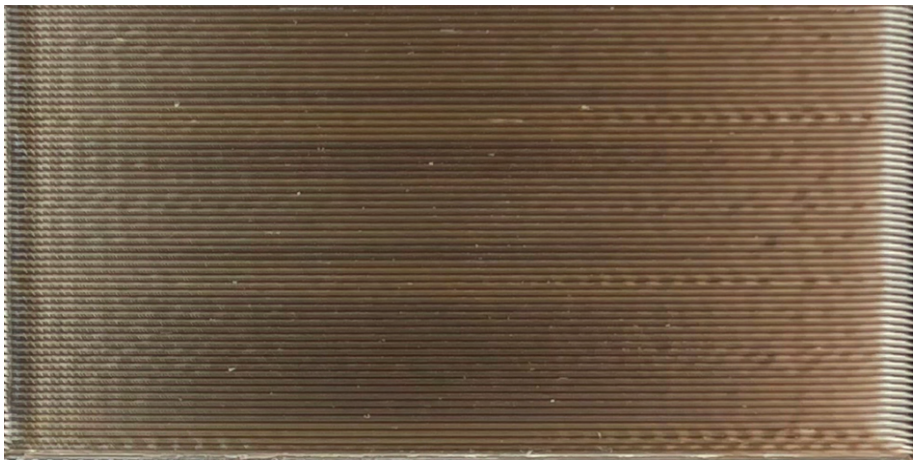


図71 振動無しのテクスチャ

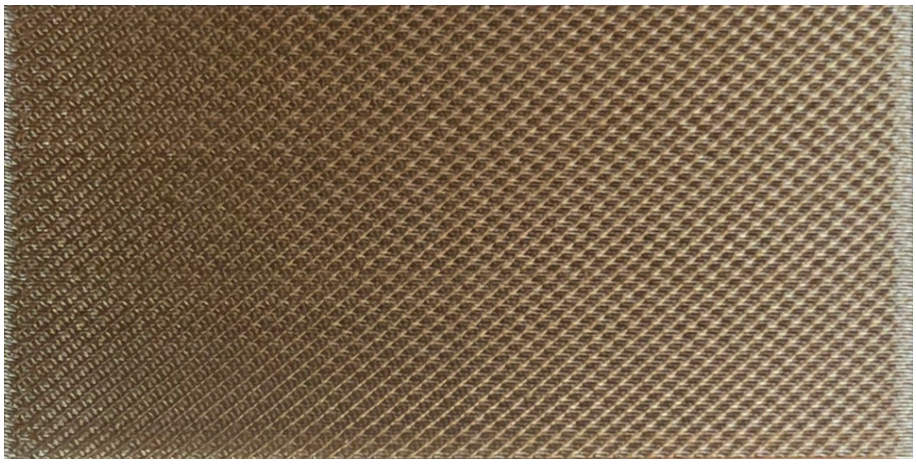


図72 振動有りのテクスチャ(予想されるテクスチャ)

5.4.1 The right Prudhoe lion

こちらのモデルは大英博物館のコレクションの1つであるエジプトのアメンホテプ3世のライオン像を3Dスキャンしたもので、大英博物館がSketchfabで公開している3Dモデル[28)]を基に造形した。

図73 造形したThe right Prudhoe lion(正面)

図74 造形したThe right Prudhoe lion(背面)

The right Prudhoe lionでは、予想されるテクスチャ(側面のテクスチャ確認モデル)の面影は感じられるものの、立方体の造形サンプルと比較するとテクスチャが薄くなり、場所によって微妙に異なるテクスチャが付与されることが分かった。平面に近い形状をもつ箇所では予期されるテクスチャに近いが、より急峻な曲面や、ライオンの頭部など、造形時における1層当たりの外周が短い区間においては特にテクスチャが薄く感じられた。また、モデル形状が複雑な場合は場所によって造形物の振動具合(動き)が異なり、これも場所によって異なるテクスチャが付与される原因の1つと考えられる。このように、曲面の造形では立方体の造形サンプルにおけるテクスチャをそのまま曲面に適用することは難しいことが分かったため、曲面ではなく平面を多用した立体物として次に挙げるLow Poly Stanford Bunnyの造形に至った。

5.4.2 Low Poly Stanford Bunny

こちらはjohnny6氏によりThingiverseで公開されている3Dモデル[29]で、”Stanford Bunny”をローポリゴン化したものである。The right Prudhoe lionと比較するとテクスチャ自体は予期されるものに近いが、造形エラーも増幅してしまう結果となった。

1つはインフィルパターンに沿って面の継ぎ目とは別に格子状の模様が浮き出るエラーで、これはインフィルの造形時にも振動を与えているため、振動によってノズルが樹脂をわずかに押しつぶされ、造形物の外壁が盛り上がることで起こるものと思われる。もう1つはオーバーハングにおける造形エラーで、図77に示すように、ウサギの耳の下側にトウモロコシ粒の集合体のような造形エラーが発生している。また、インフィル(内部充填)の造形中に振動を与えると、インフィルがUnder-Extrusionを起こしたかのようにボロボロになり、造形物の強度低下を引き起こす恐れもある。

より複雑な形状にテクスチャを付与する制作を通じて、振動を与えてテクスチャを付与すること自体は可能であるが、立方体をベースとする造形サンプルで得られたテクスチャをそのまま曲面に適用出来るわけではなく、より造形サンプルの形状(平面)に近いほど同様のテクスチャが得られるという示唆が得られた。また、造形エラーを増幅してしまう場合があるため、造形エラーを増幅する恐れがある区間では振動を止める必要性を感じた。こうした点を踏まえて、次項では最終制作について述べる。

図75 造形したLow Poly Stanford Bunny(前面)

図76 造形したLow Poly Stanford Bunny(背面)

図77 オーバーハングにおける造形エラー

5.5 最終制作

5.5.1 最終制作に向けて

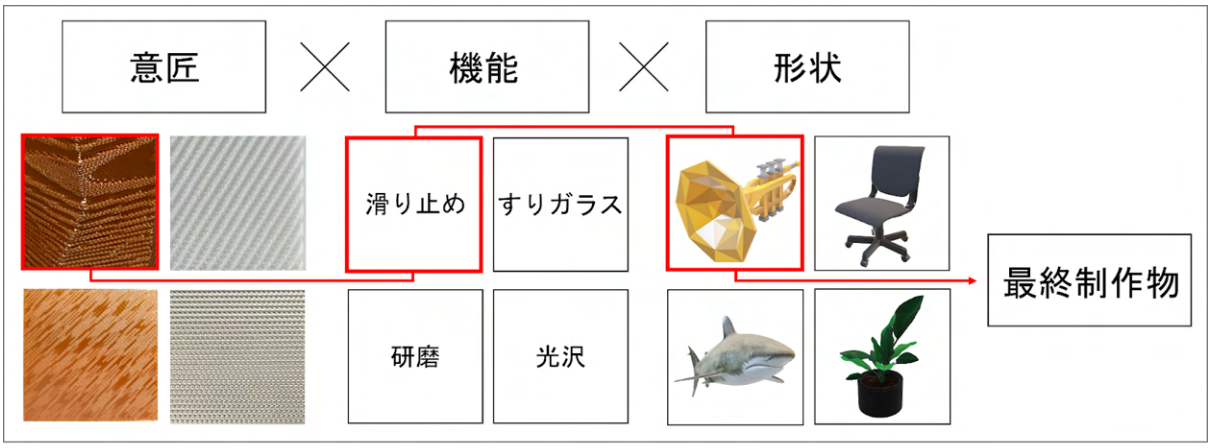


図78 最終制作物を決定するためのプロセス

これまでの実験や制作を踏まえ、本研究を代表する最終制作に向けた方針について述べる。振動によって造形物表面に生成されるテクスチャには、高級感など感性に働きかける「意匠」、滑り止め効果といった「機能」の役割があり、ここに形状を掛け合わせることで最終制作物(造形物)となる。つまり、最終制作物の要素を意匠・機能・形状に分け、それぞれの要素を掛け合わせることで最終制作物を決定する方針をとった。

形状

2.2項において「形状(G-Code)とテクスチャが切り分けられるため、どんな形状にもテクスチャを付与することが出来る」という仮説が示されたが、5.4項で述べたように形状によっては造形エラーを増幅してしまう点、曲面よりも平面の方がテクスチャが予想(設計)しやすい点などを踏まえ、多面体が適していると考えた。また、インフィル(内部充填)やオーバーハングは造形エラーを増幅する恐れがあり、最終制作として造形が綺麗となるように踏まえた結果、Vaseモード(外周のみ)で造形可能な形状が適していると考えた。こうした条件を満たす形状のなかから、筆者は最終制作物のイメージを花瓶(Vase)とし、Ferjerez氏がThingiverseで公開している”Low poly vases”[30]の1つをモデルとして選定した。

機能

意匠(テクスチャ)と殆どセットに近い要素ではあるが、花瓶においてテクスチャに求められる重要な機能は「滑り止め」であると考えた。これは、植物や水、土などを落下させないという点は勿論だが、後述する意匠においてシルクPLAを選定した影響が大きい。シルクPLAによる造形物は比較的滑りやすく、多面体かつ広い面をもつ形状という点も相まって、より滑りやすくなる。そこで、細かい凹凸(テクスチャ)を付与することで、振動を与えない場合の造形物表面と比較して滑り止め効果を与えられるのではないかと考えた。

意匠

比較的安価なFFF方式3Dプリンタでは、殆どの場合どんなに”綺麗に”造形出来たとしても僅かに造形エラーは存在し、ノイズのように目に入る。ノイズのように現れる造形エラーを逆手にとり、エラーを意図的に起こして造形物を覆うことで『あたかも造形エラーが存在しないかのような』意匠となること、研究目的でもある”未知なるテクスチャの開拓”という観点から、『未知なるテクスチャとして感じられる』意匠となることを念頭に置いて考えた。

最終制作物としては1種類の造形物ではなく、振動によるテクスチャの代表として『モアレ模様を意匠のメインにした造形物』と、『場所ごとに異なるテクスチャが混在する造形物』の2種類を造形し、比較のために振動無しの最終制作物も造形した。また、本研究の代表としてマテリアルはシルクPLAを採用し、それぞれ異なるカラーを用いている。

5.5.2 最終制作物

図79にモアレ模様を意匠のメインとした花瓶(最終制作物A)を、図80に「場所ごとに異なるテクスチャが混在する花瓶(最終制作物B)」を、図81と図82に「振動無しで造形した花瓶」を示す。

モアレ模様を意匠のメインとした花瓶(最終制作物A)

4.5項のパラメータを基に振動周期を遅めに調整することで、造形物全体にモアレ模様のテクスチャを付与した。造形物の高さに応じてモアレ模様の細かさが変化していき、低い場所から高い場所にかけて模様が大きくなっていく。

図79 モアレ模様を意匠のメインにした花瓶(側面)

図80 モアレ模様を意匠のメインにした花瓶(内側)

図81 振動無しで造形した花瓶(側面)

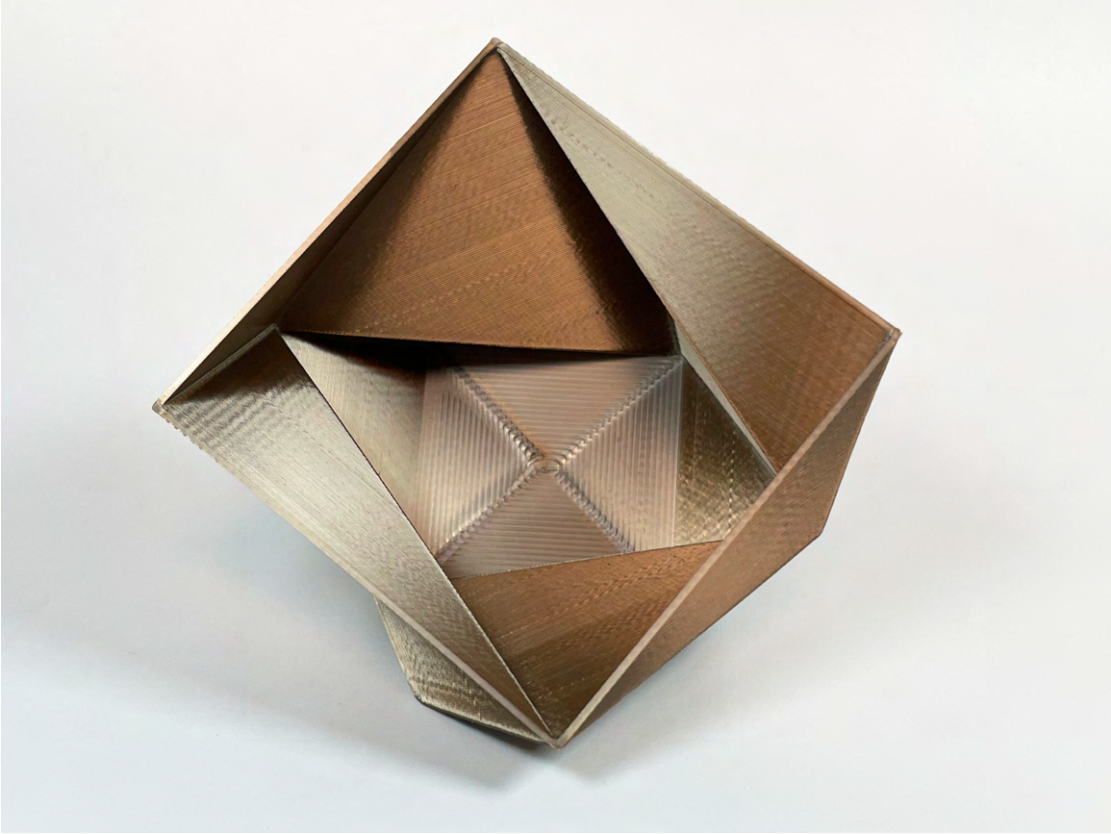


図82 振動無しで造形した花瓶(内側)

場所ごとに異なるテクスチャが混在する花瓶(最終制作物B)

　こちらも4.5項のパラメータを基に振動周期や音量などを調整することで、モアレ・縞模様・波紋といった複数のテクスチャ(模様)が異なる箇所で現れるような花瓶を造形した。

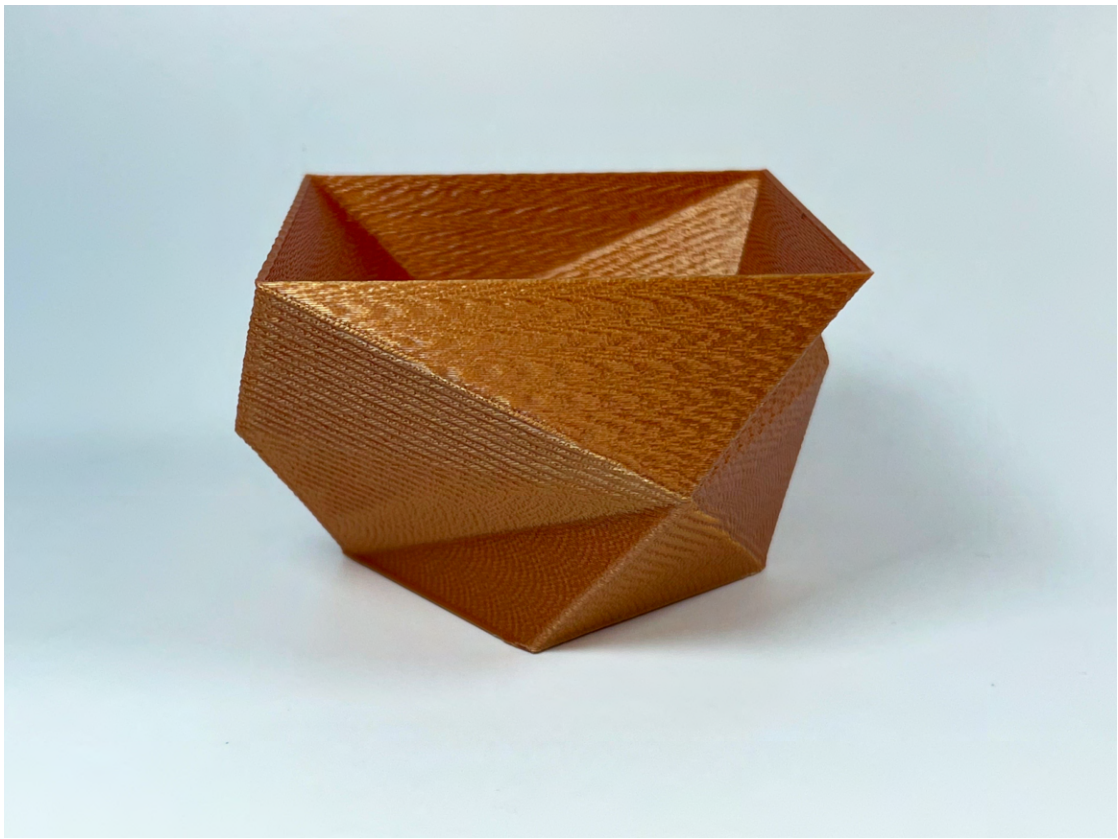


図83 場所ごとに異なるテクスチャが混在する花瓶(側面)

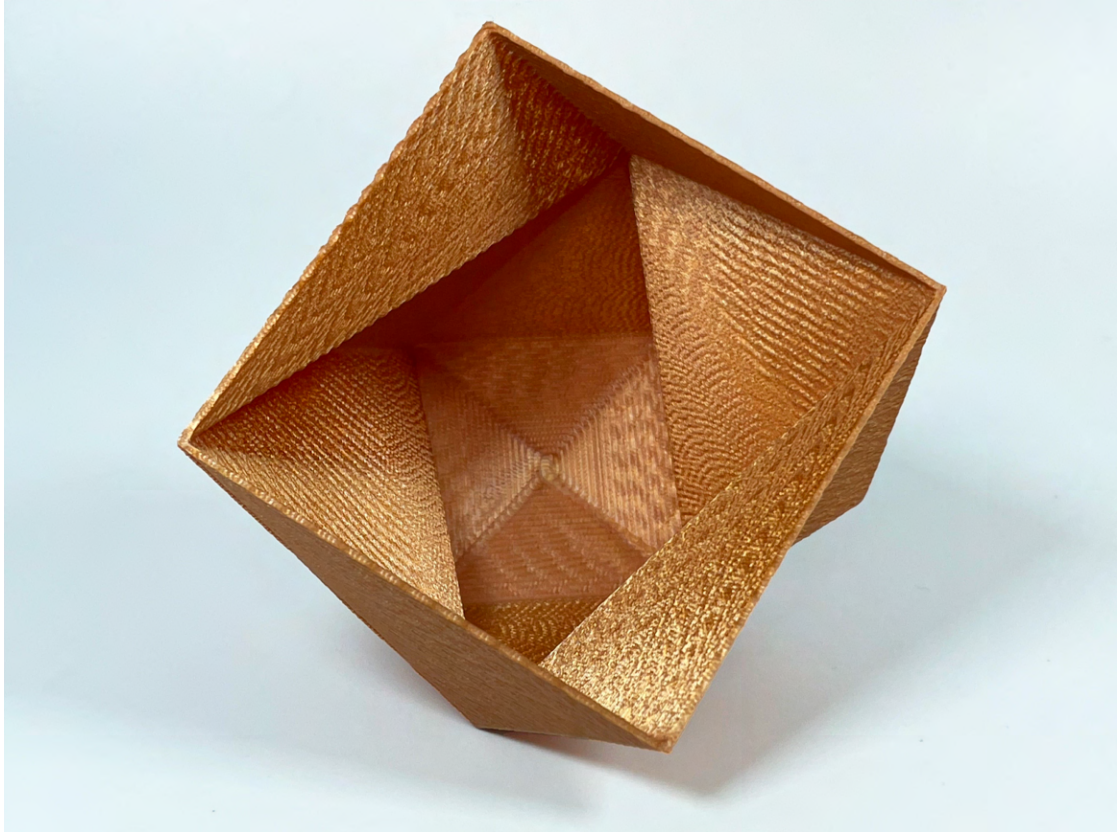


図84 場所ごとに異なるテクスチャが混在する花瓶(内側)

第６章　考察

6.1 テクスチャを変化させる要因

これまでの実験や制作を振り返ると、テクスチャを変化させる要因は①スライス設定、②ツールパス、③マテリアル、④音の4種に大別されることが分かった。

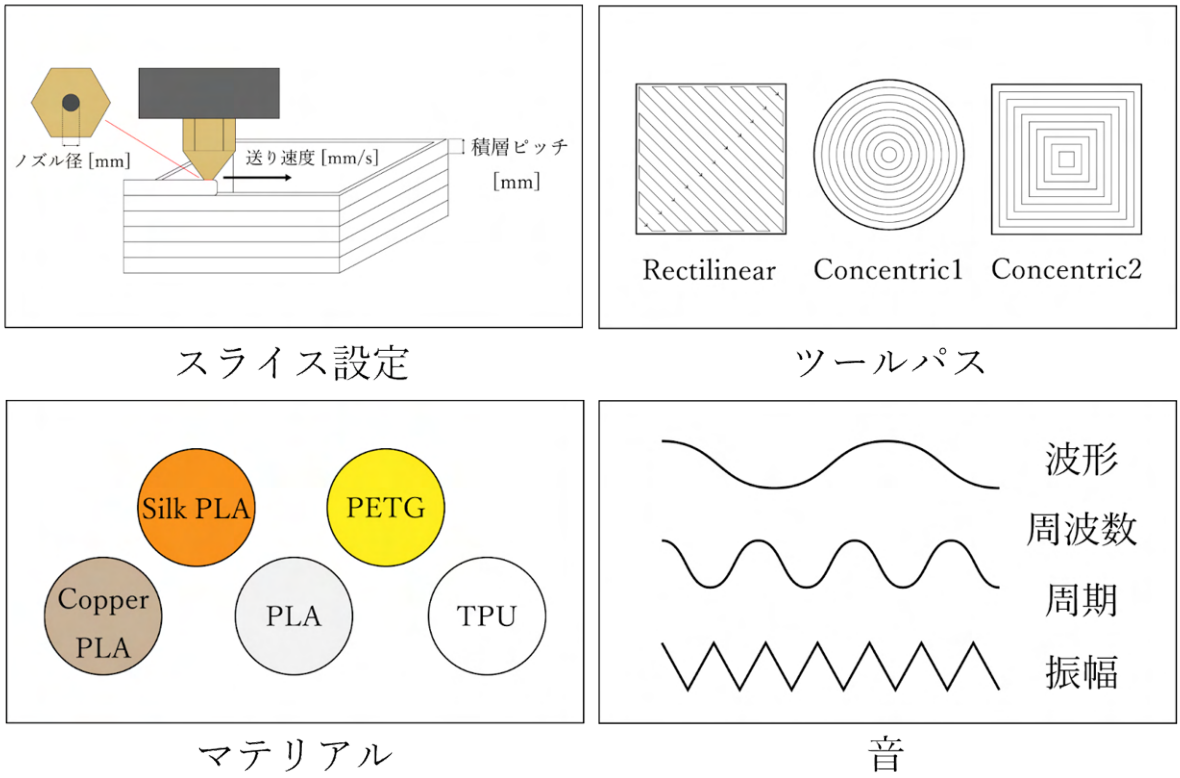


図85 テクスチャを変化させる要因

① スライス設定

スライス設定は3Dプリンタの送り速度・積層ピッチ・ノズル径(≒樹脂の押出幅)といったパラメータで、ここで列挙したものはどれもテクスチャへ非常に強い影響を与えるため、テクスチャの探索・設計を行う場合は可能な限りスライス設定を固定することが重要となる。

② ツールパス

ツールパスはノズルが移動する経路である。3DプリンタはG-Codeに従って動き、G-Codeにはツールパスが含まれている。そのためツールパスにはインフィルパターン(内部充填)だけでなく、形状も含まれる。インフィルパターンは立方体上面など、特に平面におけるテクスチャに影響を与え、Vaseモードのように螺旋状に積層するのか、素直に1レイヤーずつ積層するのかによってもテクスチャは変化する。また、曲面・平面、同じレイヤーにおける外周の長さなど、造形物の形状に応じてツールパスは変化し、テクスチャも影響を受ける。

③ マテリアル

マテリアルはPLA・ABS・PETGなど、3Dプリンタで用いる素材(フィラメント)である。メーカーが異なるPLAフィラメント同士など、同系統のマテリアルではテクスチャの変化は起こりにくいが、PLAとTPUのように明らかに樹脂の物性(硬度など)が異なる場合、同じ振動を与えても異なるテクス

チャが生成されることがある。例えば、造形物の形状とマテリアルの硬さ・柔らかさに応じて振動の具合が変化し、テクスチャも変わるといったケースがあると思われる。

④ 音

音は波形・周波数・周期・振幅(≒音量)といった複数の要素から成り立っており、振動を作り出す源である。周波数や振幅はテクスチャの濃薄に関わり、特に周期(言い換えればリズム)は生成されるテクスチャに特に大きな影響を及ぼし、振動周期を非常に遅くすればモアレ模様や霞模様が現れ、周期を早くするにつれてテクスチャが変化し、目の細かいものとなっていく。

まとめ

本研究を通じてテクスチャに影響を与えるパラメータが膨大であることが分かり、一部のパラメータについては実験や制作を通じてテクスチャにどのように影響を与えるのか、または与えうるのかといった示唆が得られた。しかしながらパラメータ間の関係性が完全に明らかになっておらず、技術として見たとき、意図したテクスチャの設計や再現可能性についてあやふやな点が多く残っており、今後の課題と言えるだろう。

6.2 テクスチャの分類

6.2.1 テクスチャの分類結果

本研究をまとめ上げるなかで、実験や制作を通じて得られたテクスチャの分類を行った。これまでの経験から織りパターンと相性が良いのではないかと仮定し、織りパターンをメインに分類を行ったところ、爬虫類・すりガラスといった例外もあるが、大抵のテクスチャを織りパターンの一種として分類することが出来た。この分類は最終制作前に行い、大まかに分類することでテクスチャの意匠と機能を整理し、『最終制作物を決定するためのプロセス』(図78)に繋がっている。

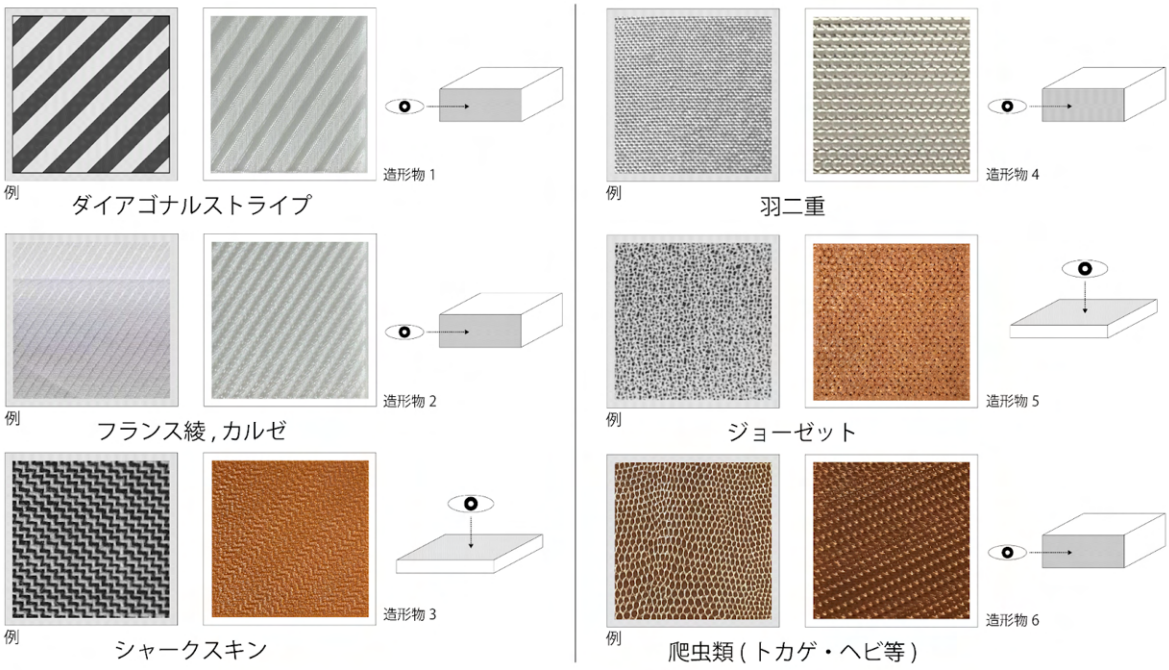


図86 テクスチャの分類結果(1)

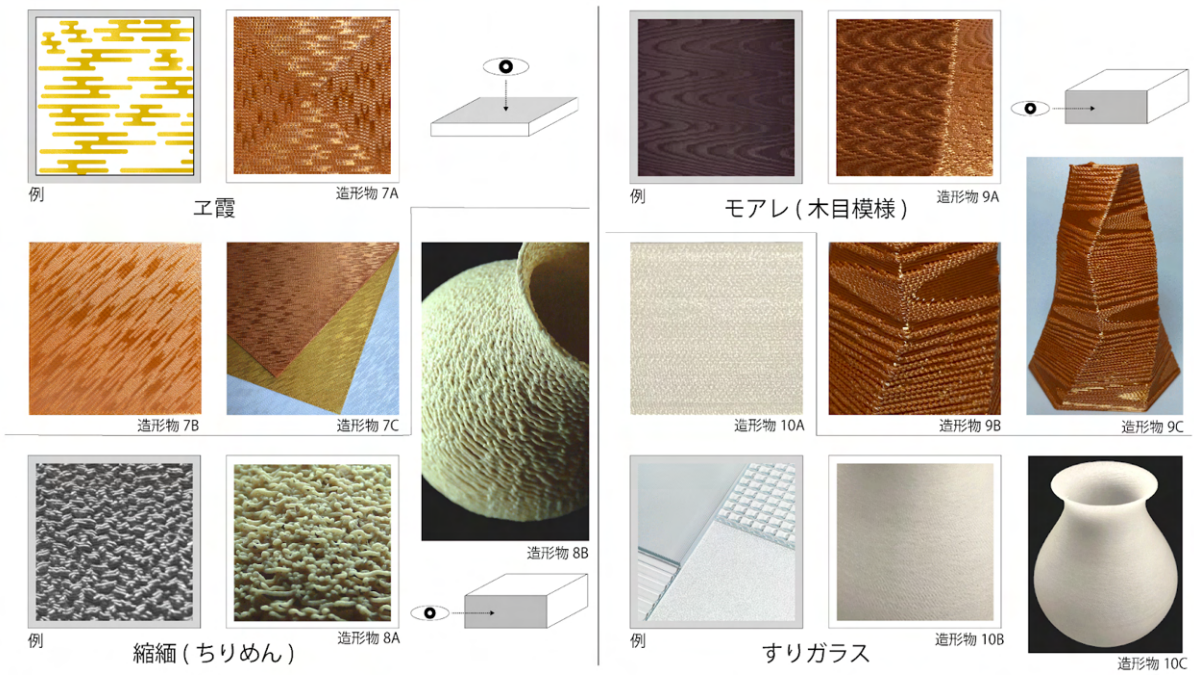


図87 テクスチャの分類結果(2)

6.2.2 テクスチャの機能について

滑り止め効果

テクスチャの意匠に注目した分類に伴い浮かび上がってきた、テクスチャの機能について述べる。本研究の提案手法で得られるテクスチャの機能として最も典型的なのは滑り止め効果で、最終制作における花瓶のように、周波数や振動周期を調整することで滑り止め効果を持たせつつ(あるいは調整しつつ)、従来の滑り止め加工(シボ・梨地など)とは異なる表現が両立可能ではないかと考えている。

すりガラス(目隠し効果)

次に特筆すべき効果として、すりガラスのような目隠し効果が挙げられる(図54, 図61, 図62など)。透明色のマテリアルに対して振動を与えることですりガラスのように曇らせることができ、振動の与え方次第ではすりガラスの曇り具合や、曇りのパターンを変えることが出来る。

通気性

こちらは本文で触れてこなかったが、実験や制作のなかで得られたテクスチャの中には、振動によって微細な隙間が空き、振動無しで造形した物と比較して通気性の良いものも見られた。0.4mmノズルを用いる(押出幅を狭くする)ことや、振動を激しくすることで生じやすく、花瓶で発生すると「水が徐々に染み出してくる」という現象も見られた。こういった経験からコーヒーフィルターのように液体のみを通過させるフィルターや、1.2.6項で紹介したDefeXtilesのような布・繊維としての応用可能性があるのではないかと考えている。

研磨

こちらは5.2項で制作したシート材表面がザラザラしていることに端を発し、わさびおろしとして使用したことで浮かび上がった機能である。実際にどんな物まで研磨可能なのか等、検証の余地は大いにあるが、ここでは可能性の1つとして挙げる。

6.2.3 テクスチャのスケール・分解能について

また、先行事例と本研究のテクスチャのスケールや分解能の違いを、糸の太さである『番手』で説明できるのではないかと考えた。例えば先行事例のなかでもTildeが太い毛糸を用いた”編み物スケール”で、「40番手」程度の分解能とすれば、本研究の提案手法ではミシン糸のように細い糸を用いた”織物スケール”で、「120番手」といった非常に目の細かいテクスチャまで造形可能なのではないかと考えている。ただし、FullControl GCODE DesignerやSlice-Upなど、G-Codeを高度に編集可能なツールにおいてユーザーによる試行と開発者によるアップデートが継続しており、今後同様のスケール・分解能でテクスチャを付与出来る可能性は残されている。図88に、ozieの「糸番手と特徴」[37]を基に作成した「番手(糸の太さ)による分類イメージ」を示す。

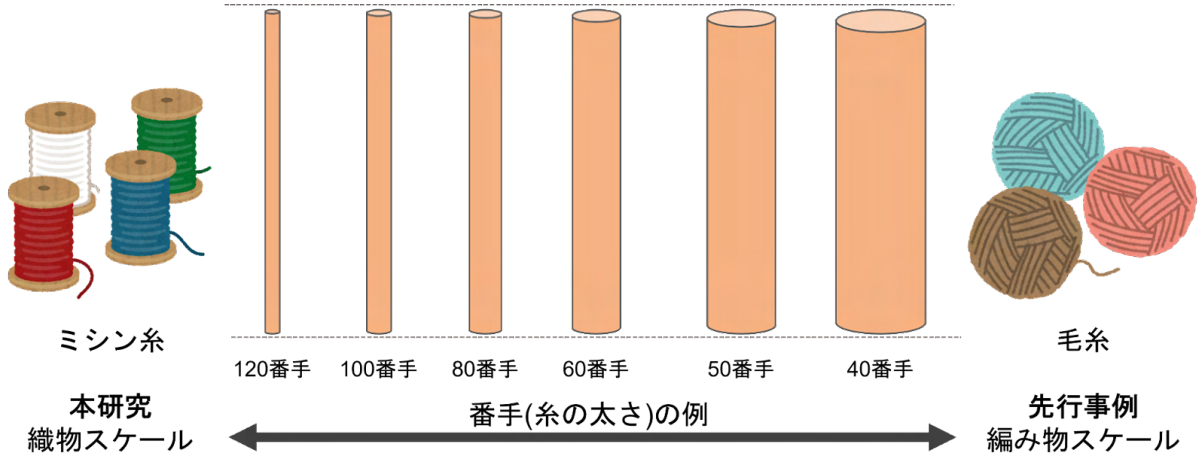


図88 番手(糸の太さ)による分類イメージ

6.3 Vibratory-Vibrant-Weavingの由来

本研究のタイトルを決めるにあたり、先行事例においてテクスチャや技法をどのように捉えているのか、いわば”テクスチャ観”を自分なりに解釈していった。Velocity Paintingでは、技法名に現れている通り『送り速度(の差)でペイントしたもの』をテクスチャと捉えている。Tildeでは、蛇行するツールパスを積み重ねていく様子を編みに例えて「編み重ね」という技法名を名づけ、そして編み重ねの様子をTildeという記号『~』で代表し、プロダクトシリーズ名としている。Solid Vibrationsでは、名前の通り『振動を固体化する』と捉えている。こうした先行事例におけるテクスチャ観を踏まえて、本研究におけるテクスチャ観は一体何であろうかと考えを巡らせた。

結果として、本研究では特に透明系統の色やシルクPLAといった光沢のあるマテリアルに対して音響振動(造形エラー)に由来するテクスチャを付与することで、通常の造形によって得られる均一・滑らかなテクスチャ(積層痕)から脱し、これを「造形物をより鮮やかに、より煌めかせる」と捉えた。また、あるレイヤー(層)の造形において3DプリンタのノズルがXY方向に動きつつプラットフォームがZ方向に振動する様子はさながら織りのようであり、実際に振動を与えることで得られるテクスチャのなかには織りパターンと似ているものも多い。こうして考えを巡らせ、最終的に振動(Vibration)によって造形物をより煌めかせる、鮮やかにする(Vibrant)ように織り上げる(Weaving)という意味を込め、Vibratory-Vibrant-Weaving(略称：VVW)とした。VVWという略称には、文字そのものが振動や波形を表すという意味も込めている。

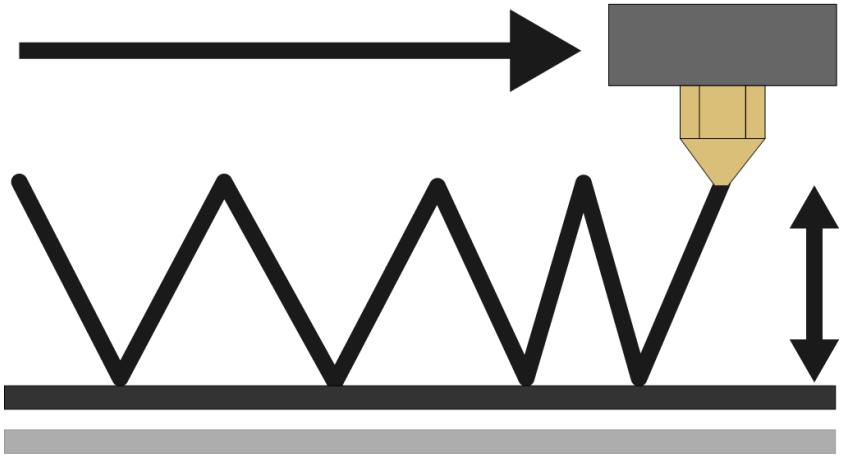


図89 VVWのイメージ。プラットフォームを振動させつつ造形する様子

図90 Vibratory-Vibrant-Weavingの由来

第７章　結論

7.1 本研究のまとめ

本研究は、FFF方式3Dプリンタユーザーの1人である筆者が、あるときステッピングモータの不具合(振動)によって特徴的な造形エラーに出会い、「意図的に振動を与えることで造形物にテクスチャを付与することが出来るのではないか」と問いを立てたことに端を発し、3Dプリンタの造形中に振動スピーカーによる音響振動を意図的に与えることで造形物にテクスチャを付与する手法の提案に至った。

予備実験から予め音以外の様々なパラメータがテクスチャに影響し得るという所感を得たうえで、周波数や周期など音に関するパラメータに加え、積層ピッチやツールパス、マテリアルといった様々なパラメータを変えて実験を行い、テクスチャを変化させる要因が『スライス設定・ツールパス・マテリアル・音』の4種類に大別されることが明らかとなった。

壺・シート材・化粧箱といった制作を通じてテクスチャパターンや表現、機能を開拓し、テクスチャの分類を行うことで、提案手法により生成されるテクスチャが織りパターンとして分類可能なこと、テクスチャの機能が『滑り止め・すりガラス(目隠し効果)・通気性・研磨』に大別されることが明らかとなった。

テクスチャのスケールや分解能の観点から、糸の太さである番手で分類することで先行事例が太い毛糸を用いた”編み物スケール”のテクスチャであるのに対し、本研究は細い糸を用いた”織物スケール”のテクスチャと言えるのではないかとの示唆を得た。

先行事例と比較して本研究の特筆すべき点は『形状(G-Code)とテクスチャが切り分けられていること』であると仮定し、より複雑な形状での造形実験を行った結果、テクスチャを付与すること自体は可能であるが、立方体ベースの造形サンプルと必ずしも同じテクスチャ(外観)を得られるわけではなく、形状(ツールパス)によっては造形エラーを増幅してしまうという課題が明らかとなった。

こうして明らかとなった課題とテクスチャの分類をもとに、意匠・機能・形状の3要素から最終制作物を決定し、提案手法のポテンシャルを活かした最終制作物として多面体の花瓶を制作した。

本研究を通じて、振動(Vibration)によって造形物をより煌めかせる、鮮やかにする(Vibrant)ように織り上げる(Weaving)という意味を込めたVibratory-Vibrant-Weaving(略称：VVW)という概念の着想に至った。

7.2 今後の課題と展望

研究の再構築

本研究においてパラメータを網羅的に変えた実験や様々な制作を通じて多くの事が明らかとなった一方、実験計画として見ると纏まりが無いように思える。また、3Dプリンタ・シンセサイザー・振動スピーカーなど、本研究で用いた機材の殆どは筆者が元々所有していた物を利用しており、特にシンセサイザーに関してはアナログであるがゆえ、実験パラメータの扱いや信頼性に難があると思われる。したがって、使用する機材と構成、どのパラメータを如何に変えていくかなど研究全体を振り返り、今一度研究計画を再構築する必要があると考えている。

リズムに注目した研究展開

本研究を通じて、特に重要な要素だと感じたのは周期(リズム)である。実際、実験と制作を通じて振動周期を変えることによって様々なテクスチャ表現が得られている。加えて、プラットフォームを十分に振動させ、目に見えるテクスチャの変化をもたらすことが可能なのは500Hz程度より低い周波数帯であり、よりテクスチャを際立たせるにはベースやキックといった音色を選択し、delayやreverbといったエフェクトを切ることで音(振動)にメリハリを付けるのが望ましいという示唆を得ている。検証の余地は残っているが、主観的にはテクスチャを変化させるためのパラメータとして振動周期、すなわちリズムが最も重要なのではないかと考えている。

また、5.4.2項における”Low Poly Stanford Bunny”の例では、インフィルの造形中に振動を与えると、インフィルがボロボロになり、むしろ造形物の強度低下を引き起こしたり、造形品質を損なう恐れもあるなど、常に振動を与え続けることによる弊害も明らかとなった。Vaseモード(造形物の外周を螺旋状に造形するモード)であれば、振動を与え続けることによる問題は少ないものの、Vaseモードでは造形不可能な形状や、内部充填を伴う造形において適切にテクスチャを付与するには、音(振動)のタイミング制御(広義のリズム)や、ツールパスを工夫することが必要である。

したがって、今後は周期から羽を広げて”リズム”に注目し、リズムパターンによるテクスチャの探索や、音を適切なタイミングで制御することで造形エラーの”増幅”を防ぎたいと考えている。

7.3 おわりに

本研究の提案手法は、振動を意図的に与えることでノズルと造形物を衝突させ、溝を刻んでいるともいえる。振動は音であり、音から溝を刻む様は、アナログレコードの溝、すなわちグルーヴを刻むように思える。見方を変えると、本研究では『3Dプリンタをメディアとして音をテクスチャに変換している』と考えられないだろうか。つまり聴覚情報(音)を、3Dプリンタを介して視覚・触覚(テクスチャ)に変換するということである。

グルーヴは音楽においてノリの良さ、カッコよさといったポジティブな意味で用いられ、「グルーヴを感じる」、「溝にハマる」といった様々な表現がある。グルーヴは、均一なリズムに対して僅かなズレや抑揚をもつことで生まれるとされているが、本研究に当てはめると、振動によって造形物に溝を刻んでいき、均一な積層痕に対してズレを生じさせ、モアレ模様のテクスチャなどは実際に1層あたりの”打痕”にズレがあるからこそ生まれ、これはまさに「グルーヴを感じるようなテクスチャである」と考えている。

本研究ではこれまで造形中に聴こえる音やリズムに対しては焦点を当てていなかったが、今後は音と造形物の形状、そして表面テクスチャを総じて「グルーヴを感じる」ようにしていきたい。

謝辞

本研究が趣味に留まらず研究として昇華したのは、田中浩也教授に背中を押して頂いたからに他なりません。私は元々他大学から修士として田中研に入り、技術的にもマインドセットも全く異なる状態からはじまりました。そんな私に対しいつも懇切丁寧に、粘り強くご指導をいただいたことに加え、本研究以外のプロジェクトにも関わり、成長する機会をいただきました。心より感謝いたします。

副査をお引き受けいただいた藤井進也准教授には、振動周期をリズムとして考えることや、グルーヴという概念を知るきっかけとなる重要なフィードバック・ご助言を頂きました。深謝いたします。

副査をお引き受けいただいた松川昌平准教授には、いつもポジティブなフィードバック・ご助言をいただき、研究を進めていくなかで非常に勇気づけられてきました。深謝いたします。

また、右も左も分からない状態から始め、ここまで来れたのは田中研メンバー皆のお陰です。先輩である脇本智正さんには、入学当初から3Dプリンタに関する知識や技術を教わったお陰で、3Dプリンタを物理的にハックするという発想に至ったと考えています。ここに感謝いたします。

修士としての同期である岡崎くん、賀下さん、黄くん、酒井さんは、研究内外のことを気軽に話せるメンバーであり、コロナ下でも精神的に健やかに過ごせたのは同期の皆の支えがあったからだと思います。また、皆が異なるバックグラウンド・研究テーマだからこそ学びを得たり、面白い観点の意見が出たり、修士論文をチェックしあったりと、研究仲間としても大変お世話になりました。ここに感謝いたします。

コロナ下で研究室に集まれなかった反面、田中研メンバーと深夜帯にdiscordで作業通話をしたり、slackやzoomを通じたやり取りに大変助けられました。また、田中研メンバーの作るもの(造形物や動画、コンセプトなど)に刺激を受けたり、メンバーの頑張りを肌で感じることでモチベーションを維持することが出来ました。田中研の皆に感謝いたします。

本研究はコロナ下ではじまり、3Dプリンタをはじめとする全ての機材は自宅に置く、いわゆる”ホームラボ”環境での研究でした。作業で深夜帯に大きな音を出したりすることに対する寛容さ、金銭面と生活面のサポートに対する感謝は計り知れません。

2022年1月14日

荒井 将来

参考文献・出典

[1] Kerry Stevenson. “Six Good 3D Printing Troubleshooting Guides”. Fabbaloo. 2018. https://www.fabbaloo.com/2018/08/six-good-3d-printing-troubleshooting-guides,(参照2022-01-03)

[2] 株式会社メルタ. “応募120件！3Dプリント猛者が集った「もじゃコン」結果発表”. note. 2021. https://note.com/melta/n/n26688d6e17f0#xJOYw, (参照2022-01-03)

[3] u/donnysaysvacuum. “Over extrusion on layer change?”. reddit. 2016. https://www.reddit.com/r/FixMyPrint/comments/4b0qfk/over_extrusion_on_layer_change/, (参照2022-01-03)

[4] Oscar. ”Can't seem to fix over extrusion”. StackExchange. 2019. https://3dprinting.stackexchange.com/questions/10038/cant-seem-to-fix-over-extrusion, (参照2022-01-03)

[5] u/t0x1k_x. “Under extrusion on outer wall start... Why. Been having this problem since almost day one.”. reddit. 2018. https://www.reddit.com/r/3Dprinting/comments/8f6mnb/under_extrusion_on_outer_wall_start_why_been/, (参照2022-01-03)

[6] Hironori Kondo. “3D Print Ghosting & Ringing – 3 Easy Fixes”. All3DP. 2019. https://m.all3dp.com/2/3d-printer-ringing-easy-fixes/, (参照2022-01-03)

[7] Jack Forman, Mustafa Doga Dogan, Hamilton Forsythe, and Hiroshi Ishii. 2020. DefeXtiles: 3D Printing Quasi-Woven Fabric via Under-Extrusion. Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 1222–1233. DOI:https://doi.org/10.1145/3379337.3415876

[8] 青木弘行・松岡由幸・寺内文雄(2017).「プラスチックの逆襲」,丸善プラネット

[9] “プラスチックめっきに加えた新たな価値”. FEEL GOOD CREATION. https://feelgood-c.com/work/cmf-design-03/, (参照2022-01-03)

[10] “ソフト触感樹脂のデザインと新用途イメージ”. FEEL GOOD CREATION. https://feelgood-c.com/work/cmf-design-07, (参照2022-01-03)

[11] ”How to Apply Texture in ideaMaker” . RAISE3D. https://www.raise3d.com/academy/how-to-apply-texture-in-ideamaker/, (参照2022-01-03)

[12] 高橋治輝, 宮下芳明． Road単位の造形に着目した熱溶解積層方式3Dプリンタでの質感表現, 情報処理学会論文誌, Vol.59, Issue.2, pp.644-656, 2018, http://id.nii.ac.jp/1001/00185783/

[13] 高橋治輝, 宮下芳明. ブリッジ構造と樹脂の引き伸ばしを用いた高密度な毛構造の造形手法, 第25回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ(WISS2017)論文集, 2017, http://www.wiss.org/WISS2017Proceedings/demo/2-A21.pdf

[14] Mark Wheadon. “Lacy Moorish Vase”. Velocity Painting. 2017. https://www.velocitypainting.xyz/blog/lacy-moorish-vase/, (参照2022-01-03)

[15] Tilde. 2021. https://www.tilde-printed.com/photo/photo2021, (参照2022-01-03)

[16] Tilde. ~HyotanStand. https://www.tilde-printed.com/portfolio/~hyotanstand (参照2022-01-03)

[17] Extrusion Width Critically Affects Fibre Orientation in Short Fibre Reinforced Material Extrusion Additive Manufacturing. Jiongyi Yan, E. Demirci, Ajith Ganesan, A. Gleadall. Additive Manufacturing. 2021.

https://www.semanticscholar.org/paper/FullControl-GCode-Designer%3A-open-source-software-in-Gleadall/aeec7012c62d41e91d5516620dcd970e009c1cfc#citing-papers, (参照2022-01-03)

[18] “Slice-Up”. 2021. https://www.slice-up.org/, (参照2022-01-03)

[19] Andy Gleadall. “fullcontrolgcode”. instagram. 2021. https://www.instagram.com/fullcontrolgcode/,(参照2022-01-03)

[20] “Slice Up”. 2021. https://www.facebook.com/sliceup.3d/photos/pcb.137184878680936/137184818680942, (参照2022-01-03)

[21] Olivier van Herpt. “Solid Vibrations”. Olivier van Herpt. 2015.https://oliviervanherpt.com/solid-vibrations/, (参照2022-01-03)

[22] “Ender-5 3D Printer”. Creality. https://www.creality.com/goods-detail/ender-5-3d-printer, (参照2022-01-03)

[23] “JD-Xi”. Roland. https://www.roland.com/jp/products/jd-xi/, (参照2022-01-03)

[24] “TOPPING TP21 ヘッドフォンアンプ内蔵 小型デジタルアンプ 25W+25W”. amazon.co.jp.

https://www.amazon.co.jp/gp/product/B004LLC3L8/ref=ppx_yo_dt_b_asin_title_o09_s01, (参照2022-01-03)

[25] “DAEX58FP Flat Pack 58mm Exciter 25W 8 Ohm”. DAYTONAUDIO. https://www.daytonaudio.com/product/1150/daex58fp-flat-pack-58mm-exciter-25w-8-ohm, (参照2022-01-03)

[26] “TT25-8 PUCK Tactile Transducer Mini Bass Shaker Quick Overview”. DAYTONAUDIO. https://www.daytonaudio.com/product/1104/tt25-8-puck-tactile-transducer-mini-bass-shaker, (参照2022-01-03)

[27] “Ironing”. Prusa Knowledge Base. https://help.prusa3d.com/ja/article/ironing_177488, (参照2022-01-11)

[28] The British Museum. “The right Prudhoe lion”. Sketchfab.https://sketchfab.com/3d-models/the-right-prudhoe-lion-985367270ab4493c9676e4ff01a01a5e, (参照2022-01-11)

[29] johnny6. “Low Poly Stanford Bunny”. Thingiverse. https://www.thingiverse.com/thing:151081/files,

(参照2022-01-11)

[30] Ferjerez. ”Vasemania: Low poly vases”. Thingiverse. https://www.thingiverse.com/thing:2638924/files,

(参照2022-01-11)

[31] ラベンダー. 伝統文様＿工霞セット（3段）金色. https://www.ac-illust.com/main/detail.php?id=2213741&word=%E4%BC%9D%E7%B5%B1%E6%96%87%E6%A7%98%EF%BC%BF%E3%82%A8%E9%9C%9E%E3%82%BB%E3%83%83%E3%83%88%EF%BC%88%EF%BC%93%E6%AE%B5%EF%BC%89%E9%87%91%E8%89%B2&searchId=2798316798#, (参照2021-12-20)

[32] rawpixel.com. freepik. https://www.freepik.com/free-photo/background-with-pattern-glass-texture_17207340.htm, (参照2021-12-20)

[33] ”ファブリック・柄の種類(Name of patterns)”. SENI-SEARCH.JP. https://www.seni-search.jp/fabric2.html, (参照2022-01-11)

[34] “繊維/テキスタイル/織物の名称/特徴(Name of fabric)”. SENI-SEARCH.JP. https://www.seni-search.jp/fabric3.html#fila, (参照2022-01-11)

[35] “生地の素材を知る”. ozie. https://www.ozie.co.jp/sm/base/material.htm, (参照2022-01-11)

[36] “モアレ(干渉波とは)”. モダリーナ.https://www.modalina.jp/modapedia/w/e383a2e382a2e383ac/,(参照2021-12-20)

[37] “シンプルな上質白シャツならコレ！！　～高級120番手双糸使用シャツ②～”. ozie. https://www.ozie.co.jp/blog/2019/01/21/16161/, (参照2022-01-22)

[38] “糸玉のイラスト(裁縫)“. いらすとや. https://www.irasutoya.com/2014/02/blog-post_1889.html, (参照2022-01-16)

[39] “糸巻きのイラスト”. いらすとや. https://www.irasutoya.com/2018/02/blog-post_1.html, (参照2022-01-16)

[40] “繊維用語集”. 株式会社トータス. https://www.ttsmile.co.jp/glossary/category/technique/weave/ayaori.html, (参照2022-01-11)

[41] photo3idea_studio. “3d Printer free icon”. flaticon. https://www.flaticon.com/free-icon/3d-printer_1114752?related_id=1114503&origin=search, (参照2022-01-26)