

3D 技術を活用した陶製品製造技術に関する研究（第 3 報）

植西 寛*
UENISHI Hiroshi

坂山 邦彦*
SAKAYAMA Kunihiko

山内 美香**
YAMAUCHI Mika

要旨 本研究では 3D 技術を活用した商品開発やプロセス・イノベーションによる省コスト化や生産性の向上を図るべく、3D プリンタや CNC 切削加工機をはじめとするデジタルファブリケーション¹⁾を活用した新しい陶製品製造技術の確立を目指している²⁾。昨年度に引き続きペレット溶融積層式 3D プリンタとセラミックコンパウンドによるセラミック製品の直接造形に関する検討を実施した結果、既存スライサの課題が明らかとなったため、ノードエディタを用いてスライサの作成をおこない、造形品質向上を図った。また、切削加工機を用いた陶製品製造技術としては、陶磁器素地の直接切削加工技術に関する検討を実施し、バインダの添加による加工性の違いを確認した。

1 はじめに

ペレット溶融積層式 3D プリンタ（以下、ペレット式 3D プリンタ）は JIS B9441:2020 において材料押出法（MEX）に分類される 3D プリンタであり、樹脂ペレットやコンパウンドを材料とした造形が可能である。ペレット式 3D プリンタはフィラメント式 3D プリンタと比較して、造形速度の速さ、材料コストの低さや材料選択の自由度が高い。しかしながら、一般に普及しているフィラメント式 3D プリンタとは吐出の制御が異なるため、造形品質の向上のためにはリトラクションを必要としない設定での造形動作（一筆書き）が必要であることが分かった³⁾。今年度は造形品質の向上に向け、一筆書きでの造形の検証をおこなったところ、標準スライサでのツールパス生成に新たな課題が見つかったため、ノードエディタを用いて作成したスライサによりツールパスを再生成し、比較検証をおこなうこととした。また、アルミナペレットを用いたセラミック製品の試作をおこない、併せて施釉による加飾についても検討をおこなった。

オーダーメイド等の極少ロット製品の効率的な製造や、型では成形が難しい緻密な形状の製造のため、セラミック分野ではグリーン加工と呼ばれる焼成前の成形体をマシニングセンタや旋盤を用いて加工する方法が用いられることがある。陶磁器分野においては長崎県窯業技術センターにおいては、磁器質である天草陶土を鑄込み成形した乾燥素地を切削加工機によって直接切削加工する技術が検討されている⁴⁾。本研究では産地で用いられる材質や成形方法の特徴を鑑み、陶器質の市販陶土を用いた。乾式および湿式プレス成形により作製した乾燥素地を切削加工機によって直接切削加工する技術について、バインダや加工条件等の基礎的な検討をおこなった。

* セラミック材料係

** 陶磁器デザイン係

2 実験概要

セラミック製品の直接造形に関する検討

2.1 造形材料と条件

造形材料や条件等は既報と同様の方法で実施した。標準スライサについても既報と同様に Simplify3D ver 4.1.2 を用いた。

2.2 一筆書きでの造形の検証

既報のリトラクション調査と同様に造形には $\Phi 50$ mm、高さ 50 mm の円柱のモデルデータを用い、Cork screw printing mode にて Top Solid Layers : 0、Bottom Solid Layers : 0、Outline : 1、Infill : 0 % とした円筒形状の造形体を出力した。なお、Filament diameter : 45.0 とし、Extrusion multiplier : 1.00、Overwrite は 100 %、Printing Speed は 1000 mm/min とした。ノズル径は $\Phi 1$ mm および $\Phi 2$ mm を用いた。

2.3 造形時のにじみの検証

Corkscrew printing mode における造形時、意図せぬところで樹脂のにじみが発生した。このにじみは周期的ではないものの、再現性があった。そこで、G コードもしくは装置の動作制御に問題がある可能性が示唆されたため、CIMCO edit (CIMCO A/S) を用いてツールパスの制御点および軌跡の確認および修正をおこなった。ノズル径は $\Phi 1$ mm および $\Phi 2$ mm を用いた。

2.3 Grasshopper を用いた G コード生成

3D プリンタの造形においてはプリンタに付属するスライサソフトウェアもしくは Simplify3D のような市販のソフトウェアを用いてツールパスである G コードを生成するが、形状を判断して自動的にツールパスを作成してくれる反面、ツールパスの制御を任意におこなうことは難しい。そこで、Grasshopper (Robert McNeel & Associates) や Illustrator (Adobe Inc.)、Python、Excel などを用いて G コードを直接生成、編集する方

法が公開されている^{5),6),7),8)}。本研究におけるスライサ作成にはノードエディタである Grasshopper を用いた。Grasshopper は 3DCAD ソフトウェアである Rhino (Robert McNeel & Associates) 上で動作するビジュアルプログラミング言語⁹⁾であり、3D モデル作成ツールとして主に建築やプロダクトデザイン分野での活用方法が紹介されている^{10),11),12)}。陶磁器分野における 3D モデル作成に関しては、新製品開発手段として、野上によりパラメトリックな設計技術シーズの確立に関する報告がなされており^{13),14)}、その後は他県でも有用性の検証が始まっている¹⁵⁾。スライサとして Grasshopper を活用した事例については、スライサソフトウェアでは主に作成が困難な形状における G コード生成手段として報告等がある^{16),17),18)}。

Grasshopper を用いて作成したスライサにより、標準スライサに近い条件で、意図的に E 値が重複する箇所を設けたツールパスと、E 値の重複の無いツールパスを作成し検証した。検証に用いたスクリプトを図 1 に示す。なお、造形に用いたモデルは $\Phi 50$ mm、高さ 50 mm の円筒状とし、ノズル径は $\Phi 1$ mm を使用した。

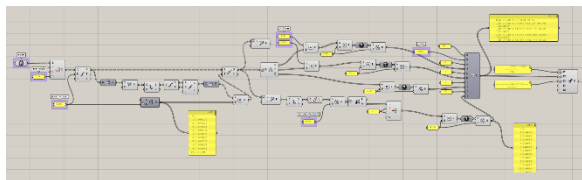


図 1 検証に用いたスクリプトの一部

2.4 試作品の造形と脱脂・焼結条件

試作品（冷酒器）の 3D モデルは野上の報告¹³⁾にある Grasshopper スクリプトを引用して作成した。ノズル径は $\Phi 1$ mm を使用した。スライサには Simplify3D を使い、Corkscrew printing mode により造形したが、bottom Solid Layers : 3 とし、底面も同時に造形した。

試作品（セッター）については $\Phi 100$ mm \times 5 mm の円柱モデル用いた。スライサには Simplify3D を使い、Infill : Internal Fill Pattern : Full Honeycomb にて、Infill Percentage : 30 %、45 %、60 % の各条件で造形した。ノズル径は $\Phi 1$ mm を使用した。

これらの造形体は 500°C で脱脂した後、電気炉（アドバンテック東洋株式会社製、KS-1703）1550°C で焼成をおこなった。

2.5 施釉による加飾の検討

前項で作製した試作品（冷酒器）に表 1 に示した基礎釉に金属酸化物および顔料を添加した釉薬を用いた。釉焼の温度は 1230°C とした。なお、素地および釉

表 1 基礎釉の調査割合

	wt%
釜戸長石	30
合成土灰	30
合成藁灰	40

の熱膨張係数は熱膨張率測定装置（ネッチジャパン製、

DIL402 Expedis select) により測定し、50~500°C における平均線膨張係数を求めた。

陶磁器素地の直接切削加工技術に関する検討

2.6 切削用素地の作成

市販陶土には新特漉土（信楽陶器工業協同組合製）を用いた。バインダにはポリビニルアルコール（平均重合度：500、以下 PVA）、平均分子量が 4000、6000、20000 のポリエチレングリコール（以下 PEG-4000、PEG-6000、PEG-20000）および糖アルコール（D ソルビトール、マルチトール、ラクチトール）を用いた。なお、PVA は乾式プレス用バインダとして使い、添加量はそれぞれ 0.125、0.25、0.5、1.0 wt.% とした。PEG 各種および糖アルコール各種は湿式プレス用バインダとして使い、添加量はそれぞれ 0.5、1.0、2.0 wt.% とした。

PVA は新特漉土を乾燥後、粉碎し、粉末に対して、バインダが所定量となるように調整した PVA 溶液を加え混練した後、卓上型顆粒製造機（KAR-130、不二パウダル）を用いて直径約 2 mm に成形し、乾燥した顆粒を用いた。金型を用いて 100 \times 30 \times h8 mm の試験片および 200 \times 200 \times h8 mm の平板を成形した。

各 PEG は新特漉土と所定量の PEG を混合し、65°C で 24 時間保持した後、混練して作製した坯土を用いた。金型を用いて 100 \times 30 \times h20 mm の試験片を成形した。

各糖アルコールは新特漉土を乾燥後、粉碎し、粉末に対して、所定量の糖アルコールを混合した後、加水混練して作製した坯土を用いた。金型を用いて 100 \times 30 \times h20 mm の試験片を成形した。

試験片は 110°C で乾燥した後、三点曲げ強度の測定および切削加工をおこなった。



図 2 3D モデルデータ

上：Shiga Ceramics research Institute

下：立体地形図（滋賀県）¹⁹⁾

表 2 Shiga Ceramics research Institute
プレートの切削加工条件

加工パス	エンドミル	送り速度	径方向 切込深さ
走査線	Φ6 mmフラット	1000 mm/min	0.50 mm
ペンシル	Φ0.5 mmボール	400 mm/min	0.25 mm

表 3 立体地形図（滋賀県）の切削加工条件

加工パス	エンドミル	送り速度	径方向 切込深さ
負荷制御	Φ6 mmフラット	1000 mm/min	0.50 mm
走査線	Φ0.5 mmボール	1000 mm/min	0.50 mm
走査線	Φ0.25 mmボール	400 mm/min	-
走査線	Φ0.125 mmボール	400 mm/min	-

2.7 陶磁器素地の切削加工

加工用モデル作成およびツールパス作成には Fusion（オートデスク株式会社）を用いた。モデルデータを図 2 に示す。5 軸モデリングマシン（株式会社岩間工業所製、MM1000R-5）を用いて表 2、表 3 に示した条件で加工した。

3 結果と考察

セラミックス製品の直接造形に関する検討

3.1 一筆書きでの造形の検証

Corkscrew printing mode にて円柱を造形した結果を図 3 に示す。発生個所に違いはあるものの、Φ1 mm および Φ2 mm のノズルを用いた造形のいずれも樹脂のにじみが散見された。これまでの実験結果から樹脂のにじみはスクリュの吐出に変動があった場合には発生していたが、Corkscrew printing mode ではリトラクションをしない一筆書き動作のツールパスを生成する。造形時は移動距離に対して一定の割合で吐出がおこなわれるため、一筆書きの円柱では吐出の変動が起こる要素は無いと想定していた。この結果から、G コードもしくは装置の動作制御に問題がある可能性が示唆されたため、次項のような検証をおこなうこととした。



図 3 円柱造形結果

（左：Φ1 mm ノズル、右：Φ2 mm ノズル）

3.2 造形時のにじみの検証

前項で用いた G コードを、NC プログラムの編集・描画システムである CIMCO edit を用いて検証した。にじみの出た箇所と問題の無かった箇所ツールパスおよび制御点を比較したところ、にじみの出た箇所では制御点が狭い範囲に集中していることが分かった（図 4）。G コード上で制御点の集中する箇所を確認したところ、XY が変化しても Z および E 値が変化していないことが分かった。当該箇所の G コードを図 5 に示す。この重複箇所を全て削除した G コードを用いて造形を実施したところ、にじみは解消された。

これらの結果から、今回のケースでは制御点の集中がにじみの原因であったと考えられる。一般的に 3D プリンタのツールパスは G1（直線補間）により直線移動の連続で構成される。曲線の場合、曲率に合わせた一定の規則で制御点を定めて曲線に近似した動作をおこ

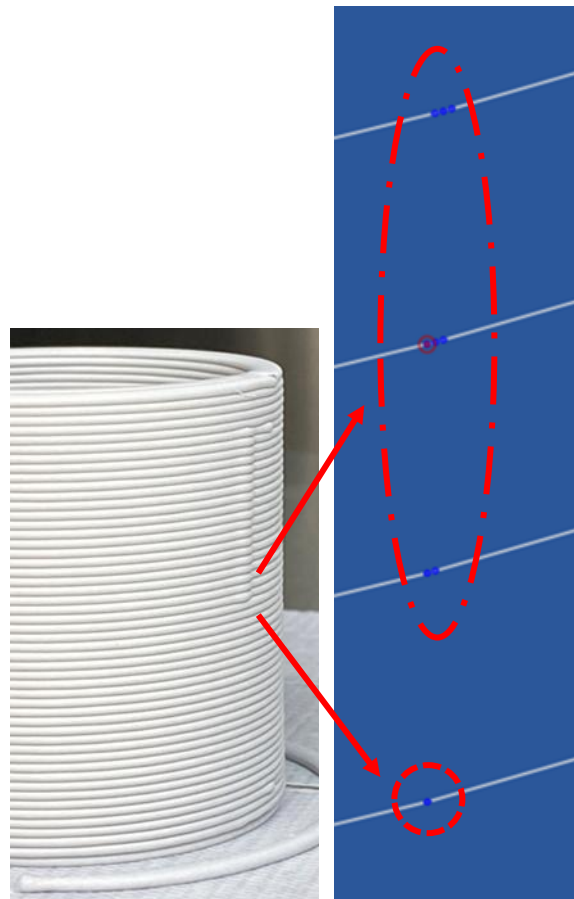


図 4 にじみ箇所とその制御点（Φ2 mm ノズル）

```

4333 G1 X168.255 Y194.732 Z26.447 E6.4340
4334 G1 X169.282 Y196.051 Z26.458 E6.4365
4335 G1 X170.162 Y197.356 Z26.468 E6.4389
4336 G1 X170.907 Y198.629 Z26.478 E6.4411
4337 G1 X171.653 Y200.125 Z26.489 E6.4436
4338 G1 X172.246 Y201.548 Z26.500 E6.4459
4339 G1 X172.259 Y201.578 Z26.500 E6.4460
4340 ; layer 28, Z = 27.500
4341 G1 X172.269 Y201.608 Z26.500 E6.4460 F1000
4342 G1 X172.727 Y202.942 Z26.510 E6.4482
4343 G1 X173.181 Y204.619 Z26.521 E6.4508
4344 G1 X173.487 Y206.162 Z26.532 E6.4532
4345 G1 X173.519 Y206.407 Z26.533 E6.4535
    
```

図 5 E 値が重複していた箇所の G コード

なう。また、スライサソフトウェアは基本的にモデルを平面分割し、その平面に対してツールパスを生成するため、条件によってはレイヤの区切り位置で制御点が集中する箇所が発生すると考えられる。「制御点が近い＝移動距離が短い」ため、必然的にそれに伴う吐出も微小となるため、出力される桁数ではE値が変化しない。E値の変化が無いと、制御上は吐出の動作が瞬間的に止まるため、リトラクションと同様の挙動が発生することとなる。Simplify3Dは産業分野でも用いられているスライサソフトウェアであるが、そのほとんどがフィラメント式3Dプリンタでの利用である。フィラメント式の場合はフィラメントの応答に対する吐出の応答性が良いため、制御点の集中によりE値が重複しても対応が可能であるが、スクリュを用いるペレット式の場合はスクリュの応答に対する吐出の応答性が良くないため、図4に示したようににじみが発生したと考えられる。

一方で、制御側のパラメータ設定でにじみへの対応ができる可能性も残るため、こちらについては今後の検討課題としたい。

3.3 Grasshopperを用いたGコード生成

Grasshopperを用いて作成したスライサにより、意図的にE値が重複する箇所を設けたツールパスと、E値の重複の無いツールパスのGコードを出力した。E値の重複する箇所を設けたGコードの一部を図6、E値の重複の無いツールパスのGコードの一部を図7に示す。前項での検証と同様に、E値を意図的に重複させた箇所でもにじみが発生した。続いて、図8に示したモデルを用いて、Simplify3Dを用いて作成したGコードにより造形したモデルと、Grasshopperを用いて作成したスライサにより作成したGコードにより造形したモデルの比較を図9に示す。Grasshopperを用いたモデルではSimplify3Dを用いたモデルで発生していた不規則なにじみは発生しなかった。

これらの結果から、E値の重複がないGコードを用いた造形体にはにじみが発生しなかったことから、スクリュを用いるペレット式3Dプリンタの造形品質を高めるためには、E値の重複を回避する必要があるといえる。

```

133 G1 F1000 X174.803 Y146.867 Z0.49 E0.0751
134 G1 F1000 X174.950 Y148.430 Z0.495 E0.0758
135 G1 F1000 X174.950 Y148.430 Z0.5 E0.0758
136 G1 F1000 X175 Y150 Z0.5 E0.0758
137 G1 F1000 X174.951 Y151.570 Z0.505 E0.0766
138 G1 F1000 X174.803 Y153.133 Z0.51 E0.0773
  
```

図6 E値の重複箇所を設けたGコード(抜粋)

```

133 G1 F1000 X174.803 Y146.867 Z0.495 E0.0751
134 G1 F1000 X174.951 Y148.43 Z0.5 E0.0758
135 G1 F1000 X175 Y150 Z0.5 E0.0766
136 G1 F1000 X174.951 Y151.57 Z0.505 E0.0774
137 G1 F1000 X174.803 Y153.133 Z0.51 E0.0781
  
```

図7 E値の重複がないGコード(抜粋)

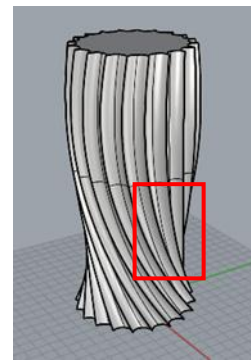


図8 3Dモデル(冷酒器)



図9 造形体の壁面比較

左: simplify3Dで作成したGコードにより造形
 右: Grasshopperを用いて作成したスライサにより作成したGコードにより造形

3.4 試作品の造形と脱脂・焼結について

試作品(酒器)については、従来の方法では成形が難しい螺旋状+くびれのある形状を念頭に、Grasshopperにより図10のような3Dモデル案を複数作成した。これらのモデル案から図8に示したモデルを採用した。

3Dプリンタにて造形後、脱脂をおこない、1550°Cで焼成した。脱脂については所定の条件で造形をおこなったものでは脱脂および焼結の工程で問題となる点は見受けられなかった。しかし、3Dプリンタ本体のOverwriteにて吐出量を絞りと、意図的に壁面を薄くした造形体は図11のように脱脂中に潰れていたため、造形時だけでなく脱脂時の形状保持も考慮した肉厚設計とする必要があることが分かった。本研究においては、形状(肉厚)と脱脂時の保形性についてのさらなる検証

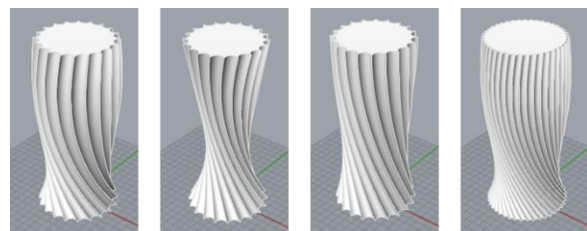


図10 試作用3Dモデル案

は進めていないが、造形するモデルによっては十分な事前検証が必要となる。

セッターに関しては造形ならびに脱脂・焼結において、特に問題となる点は確認できなかった（図 12）。



図 11 脱脂後の造形体（上）と潰れた造形体（下）



図 12 焼結後のセッター

3.5 施釉による加飾の検討

前項の焼成体に表 1 に示した基礎釉に金属酸化物および顔料を添加した釉薬を施釉し、所定の温度で釉焼をおこなった。施釉後の焼成体を図 13 に示す。釉焼後の焼成体には貫入やその他の問題になる点は見受けられなかった。なお、素地の熱膨張係数は $7.6 \times 10^{-6} / K$ 、釉は $8.0 \times 10^{-6} / K$ であった。



図 13 アルミナ焼成体（左）と釉焼後の焼成体（右）

陶磁器素地の直接切削加工技術に関する検討

3.6 切削用素地の作成

市販陶土に各々のバインダを添加した素地で作製した試験片の三点曲げ強度について、市販素地単独に対する強度の増加率を図 14 に示す。各々のバインダの添加により素地の乾燥強度に向上が見られた。PEG は分子量が大きいほど三点曲げ強度は向上する傾向であった。また、糖アルコールについては分子量等に相関は見られなかった。今回用いたバインダの中では PVA が最も優れた結果であった。

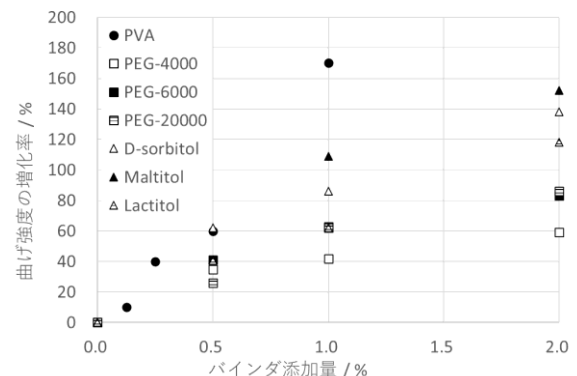


図 14 各種バインダ添加量と曲げ強度増加率の関係

3.7 陶磁器素地の切削加工

市販素地単独および前項にて増加率の優れていた PVA を添加した素地（0.5 %および 1 %）について、表 2 に示した条件で切削加工をおこなった結果を図 15 に示す。市販素地単独（バインダ添加無し）の場合と比べ、PVA を添加して強度が向上した素地は細部の欠けが減少し、文字輪郭のエッジもはっきりと見える結果となり、より精細な加工が可能となった。本研究で試験片を作製した中では PVA を 1 % 添加した素地の結果が最も良好であった。

続いて、PVA を 1 % 添加した素地を用いて作成した $200 \times 200 \times h8$ mm の平板の一部から切削加工により、奥行約 55 mm、幅約 35 mm の「立体地形図（滋賀県）」を作製した結果を図 16 に示す。加工条件は表 3 に示した通り。山脈部や島嶼部も亀裂や欠けなく加工するこ

とができた。切削後に最も薄い箇所の厚みは約 3 mm であったが、取扱いについても問題なくおこなえることが確認できた。



図 15 素地の切削加工結果

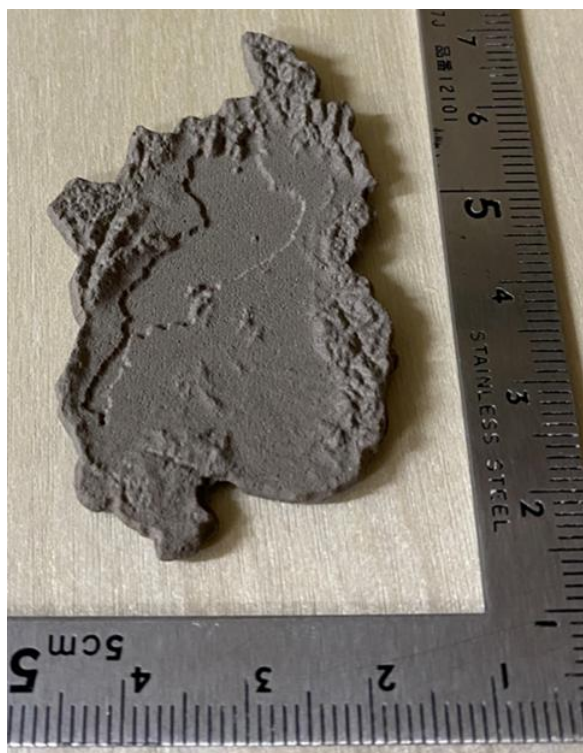


図 16 立体地形図（滋賀県）の切削加工結果

4 まとめ

セラミックス製品の直接造形に関する検討の結果、ペレット式 3D プリンタによるセラミックスの直接造形条件を検証し、造形に重要なパラメータの検討およ

び検証を実施した。高品位な造形体を作るに際し、Gコード内での E 値の重複が課題となることを明らかにした。なお、この課題は Grasshopper を用いたスライサにより解決できることも分かった。また、アルミナペレットを用いたセラミック製品の試作をおこなった結果、釉焼により陶磁器釉薬を用いた加飾が可能であることも確認できた。

陶磁器素地の直接切削加工技術に関する検討の結果、陶器質の市販陶土にバインダとして PVA、PEG、糖アルコールを添加することで、素地の乾燥強度が向上し、加工性が改善することが分かった。本研究の範囲では PVA を 1 % 添加した素地での結果が最も良好であり、亀裂や欠けのない加工が可能な切削加工条件を把握することができた。

参考文献

- 1) 総務省. 情報通信白書, 229-230 (2016)
- 2) 植西寛ほか. "3D 技術を活用した陶磁器製造技術に関する研究". 滋賀県工業技術総合センター令和 4 年度業務報告, 104-107 (2022)
- 3) 植西寛ほか. "3D 技術を活用した陶磁器製造技術に関する研究 (第 2 報)". 滋賀県工業技術総合センター令和 5 年度業務報告. https://www.shiga-irc.go.jp/application/files/2817/3692/5120/11_3D.pdf, (参照 2025-03-13)
- 4) 永石雅基, 依田慎二. "3D データを活用した精密な陶磁器製品製造技術の開発". 平成 27 年度長崎県窯業技術センター研究報告, 64, 35-37 (2016)
- 5) Diego García Cuevas, Gianluca Pugliese. ADVANCED 3D PRINTING with Grasshopper® Clay and FDM. Independently published (2020)
- 6) Andy Gleadall. "Full Control GCode Designer". <http://fullcontrolgcode.com/>, (参照 2025-03-13)
- 7) 田中浩也. "Fabrix". <https://www.fabrix.design/>, (参照 2025-03-13)
- 8) 谷口朝洋. "G-coordinator: G-code 生成の新たな手法とその可能性". Conference on 4D and Functional Fabrication 2023, 93-96 (2023)
- 9) AppliCraft. "Grasshopper". 株式会社アプリアフト HP. <https://www.applicraft.com/products/rhinoceros/grasshopper/>, (参照 2025-03-13)
- 10) 石津優子, 堀川淳一郎. Parametric Design with Grasshopper 建築/プロダクトのための、Grasshopper クックブック 増補改訂版. 株式会社ビー・エヌ・エヌ (2018)
- 11) 三井和男. Rhinoceros×Python コンピュータショナル・デザイン入門. 株式会社彰国社 (2017)
- 12) Rhinoceros + Grasshopper 建築デザイン実践ハンドブック 第 3 版. ノイズ・アーキテクト. 株式会社彰国社 (2019)

- 13) 野上雅彦. ”コンピューテーショナルデザインを活用した陶製品開発 (第1報)”. 滋賀県工業技術総合センター令和2年度業務報告. 114-117 (2020)
- 14) 野上雅彦. ”コンピューテーショナルデザインを活用した陶製品開発 (第2報)”. 滋賀県工業技術総合センター令和3年度業務報告. 107-110 (2021)
- 15) 富田亮, 新島聖治, 谷口弘明. ”パラメトリックデザインを用いた陶磁器の試作”. 三重県工業研究所研究報告. 48, 59-62 (2024)
- 16) 高盛竜馬. ”特殊 3D プリンティング手法を統合するためのノードベース・スライサーを用いたプラットフォーム開発と提案”. https://fab.sfc.keio.ac.jp/paper/files/2019_Ryoma.pdf, (2025-3-13)
- 17) 高木祐輝, 伊藤慎一郎. ”熱溶解積層方式 3D プリンタを用いたパラメトリックに設計可能な網構造素材の提案”. 日本デザイン学会研究発表大会概要集. 69, 476-477 (2022)
- 18) WASP. “3D Printing with Grasshopper”. WASP S.r.l. HP. <https://www.3dwasp.com/en/3d-printing-grasshopper/>, (2025-3-13)
- 16) 国土地理院. ”県別の立体模型”. 国土地理院ウェブサイト. <https://maps.gsi.go.jp/3d/prefecture/prefecture.html>, (参照 2024-03-01)