

3D 技術を活用した陶製品製造技術に関する研究（第2報）

植西 寛*
UENISHI Hiroshi

坂山 邦彦*
SAKAYAMA Kunihiko

神屋 道也*
KAMIYA Michinari

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⁾。本年度はペレット溶融積層式3Dプリンタとセラミックスコンパウンドによるセラミックス製品の直接造形に関する検討を実施した。吐出量や造形に影響を与える種々のパラメータについて検証をおこない、造形性との関連を確認した。

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。一般に、材料押出法（MEX）といえば樹脂フィラメントを材料とした3Dプリンタ（フィラメント式3Dプリンタ）が広く普及しているが、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の高さから、近年新たにこの方式の3Dプリンタを発売するメーカーも増えてきており、注目されている方式である。しかしながら、普及が進むフィラメント式3Dプリンタは造形に関する調査や研究も多く見受けられるが、ペレットを材料とした3Dプリンタに関しては、機器の導入事例も少なく、造形条件等を検討した報告はみられない。

そこで、本研究ではセラミックス製品の直接造形技術として、セラミックスコンパウンドを用いた造形条件の検討をおこなった。

2 実験概要

2.1 造形材料と条件

セラミックスコンパウンドとしてアルミナ含有ペレット（第一セラモ株式会社製）を用い、3Dプリンタにはペレット式3Dプリンタ（エス・ラボ株式会社製 GE M550D）を用いた。造形時のノズル径はΦ1 mmとΦ2 mmを用い、シリンダ温度は1：100℃、2：130℃、3：155℃、4：185℃、Table温度は75℃とした。

モデルデータはFusion360 (Autodesk)により作成し、スライサにはSimplify3Dを用いた。また、Gコードの軌跡確認や移動距離の確認はCIMCO editによりおこなった。

2.2 吐出量とスクリュ回転数の関係

ペレット溶融積層式3Dプリンタはスクリュによりシリンダ内のペレットを溶融しながら押し出し、ノズルから吐出する仕組みである。吐出量とスクリュ回転数の関係を確認するため、スクリュ回転数を手動設定し、一定時間連続で吐出した際の重量を測定した。スクリュ回転数は0.2、0.5、1、2、4、5、10 rpmとし、吐出時間は30および60 sとした。

続いて、モデル造形時のスクリュ回転数を調べるため、Φ25 mm、高さ5 mmの円柱をCorkscrew printing modeと呼ばれる一筆書きでの出力により出力した。吐出量の調整のパラメータにはスライサ側での吐出量調整の乗数（以下、Extrusion multiplier）と3Dプリンタ側での吐出量調整のパーセンテージ（以下、Overwrite）を用いた。Extrusion multiplierは1.00、1.30、1.50とし、Overwriteは100、130、150 %とした。なお、Printing Speedは250、500、750、1000、1250、1500、1750、2000 mm/minとし、それぞれの条件における造形中のスクリュ回転数を調査した。

2.3 フィラメント径と吐出量Eの関係

フィラメントを用いる一般的な熱溶融積層方式の3Dプリンタでは、ノズルからの材料吐出量が造形に使われた材料の体積となる。

ノズル吐出量 = フィラメント断面積 S × 吐出量 E	… 式①
造形体積 = 射出幅 w × 積層ピッチ p × 移動距離 l	… 式②

* セラミック材料係

** 陶磁器デザイン係

ここで、フィラメント断面積 S 、射出幅 w 、積層ピッチ p はスライサにより設定するパラメータであり、

Corkscrew printing mode での移動距離 l はモデル形状により定まる。押出量 E はスライサから出力される G コードにおける値であることから、吐出量に影響を与える指標は E であることが分かる。フィラメント断面積 S は Filament diameter から算出でき、スクリュにより押し出すペレット式 3D プリンタの場合、Filament diameter はペレットの嵩密度などを参考に定めることとなる。

この E が造形性に与える影響を調査するため、 $\Phi 25$ mm、高さ 5 mm の円柱を Corkscrew printing mode により出力した。Filament diameter は Extrusion multiplier : 1.50 においては 40.0、45.0、50.0、54.1、60.0、65.0、70.0、75.0 mm、Extrusion multiplier : 1.00 においては 27.5、30.0、32.5、35.0、37.5、40.0、45.0、50.0 とした。Overwrite は 100、130、150 % とし、Printing Speed は 1000 mm/min とした。

2.4 リトラクションについて

熱溶融積層方式の 3D プリンタにおいて、一筆書きでない動作で造形をおこなう際、パスの終点で吐出を一旦止め、移動後に吐出を再開することとなる。この際、樹脂の垂れ流しによる糸引きを防ぐための動作はリトラクションと呼ばれており、熱溶融積層方式の 3D プリンタでは重要なパラメータである。リトラクション動作はフィラメントを用いる 3D プリンタの場合はフィラメントの引き抜き→移動→引き抜き分の送り出し→吐出再開となる。一方、ペレット式 3D プリンタではスクリュの逆回転→移動→逆回転分の送り出し→吐出再開という流れとなる。Simplify3D で設定可能なリトラクションのパラメータには Retraction Distance、Extra Restart Distance、Retraction Vertical Lift、Retraction Speed がある。また、Coasting Distance と呼ばれるループ終点の手前から吐出を止め、惰性で移動させる距離を設定する機能も存在する。そこで、今回は Retraction Distance と Coasting Distance のパラメータが造形物に与える影響を調査した。造形には $\Phi 50$ mm、高さ 50 mm の円柱のモデルデータを用い、Top Solid Layers : 0、Bottom Solid Layers : 2、Outline : 1、Infill : 0 % としたカップ形状の造形体を出力した。なお、底面には 1 層のラフトを設けた。なお、Filament diameter : 54.1 とし、Extrusion multiplier : 1.50、Overwrite は 150 %、Printing Speed は 1000 mm/min とした。

3 結果と考察

3.1 吐出量とスクリュ回転数の関係

スクリュ回転数を手動設定し、一定時間連続で吐出した際のスクリュ回転数と吐出重量との関係を図 1 に示す。30 s、60 s ともにスクリュ回転数と吐出重量は比例関係であることが確認できた。

モデル造形時のスクリュ回転数を調査した結果について、Extrusion multiplier : 1.00 の時のスクリュ回転数

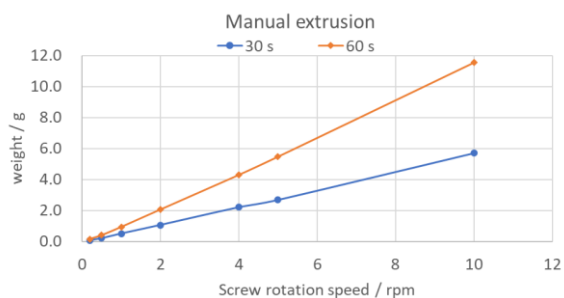


図 1 手動吐出でのスクリュ回転数と吐出重量の関係

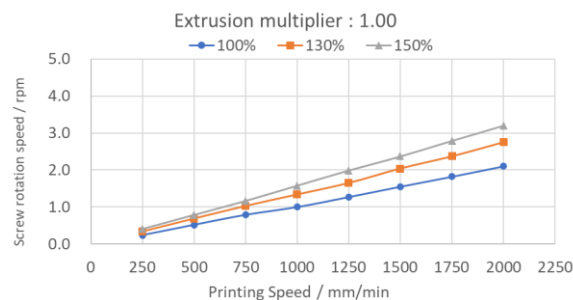


図 2 Extrusion multiplier : 1.00 におけるスクリュ回転数と造形速度の関係

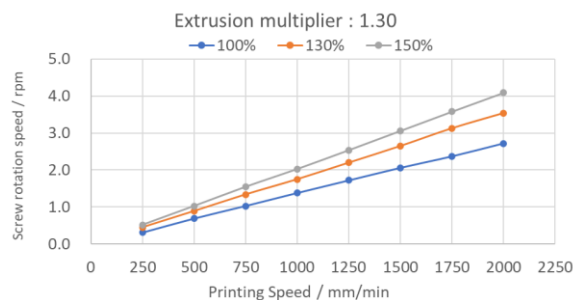


図 3 Extrusion multiplier : 1.30 におけるスクリュ回転数と造形速度の関係

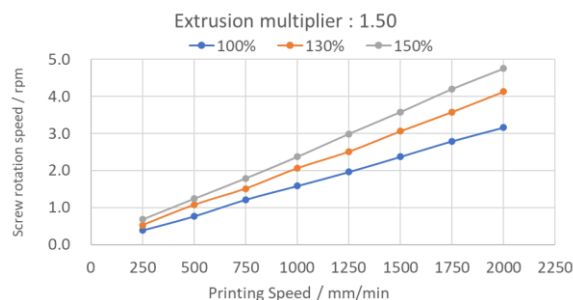


図 4 Extrusion multiplier : 1.50 におけるスクリュ回転数と造形速度の関係

の実測値と Printing Speed の関係を図 2 に示す。同様に Extrusion multiplier : 1.30 および 1.50 での結果をそれぞれ図 3、図 4 に示す。これらの結果から、Printing Speed は速く、Extrusion multiplier や Overwrite は大きくなるにつれ、単位時間当たりの吐出量は増加することになるので、それに対応するかたちでスクリュ回転数により調整していることが分かる。

続いて、Extrusion multiplier : 1.00 としたとき、各 Printing Speed において Overwrite を 100%、130 %、150

%と変化させて造形した結果を図5に示す。同様に Extrusion multiplier : 1.30 および 1.50 での結果をそれぞれ図6、図7に示す。ノズルからの吐出量が少ないと底面が密着せずに造形できず、吐出量を増加させていくと、造形が安定する傾向にあった。また、Extrusion multiplier と Overwrite が同じ条件では、Printing Speed が速い方が安定した造形ができる傾向にあった。しかし、実際はノズルからの吐出量が少ない場合に、造形が乱れる傾向にあったことから、スクリュー回転数が低い領域での造形は避けるようにパラメータ設定をおこなう必要があることが確認できた。

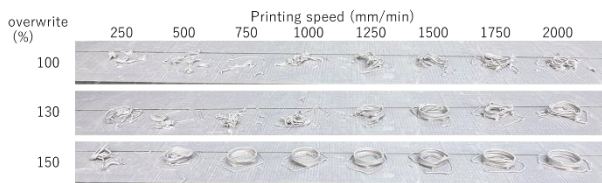


図5 Extrusion multiplier : 1.00 における造形結果

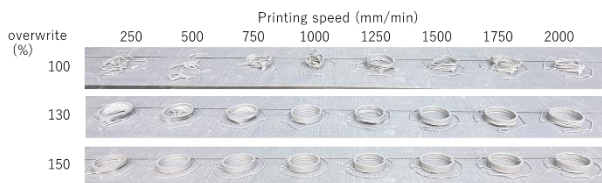


図6 Extrusion multiplier : 1.30 における造形結果

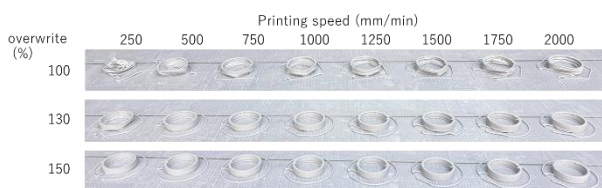


図7 Extrusion multiplier : 1.50 における造形結果

3.2 フィラメント径と押出量 E の関係

前項の結果より、スクリュー回転数に影響するパラメータである押出量 E に関する調査をおこなった。例えば、ノズル径 : $\Phi 1$ mm、フィラメント断面積 S : 54.1 mm²、射出幅 w : 1.2 mm、積層ピッチ p : 0.5 mm の条件で $\Phi 25$ mm、高さ 5 mm の円柱を Corkscrew printing mode を用いて出力すると造形のための移動距離は 822.0 mm となることから、2.3 項に示した式①、②より造形に必要な押出量 $E = 0.2146$ mm と算出される。

式②より、ノズル吐出量はフィラメント断面積 S と押出量 E の積で表されることから、これらの関係を Extrusion multiplier : 1.50 にて調査した。Overwrite を 100 % としたときの、Filament diameter と G コードに出力された押出量 E の関係を図8に示す。制御上、Filament diameter を細くするほど、押出量 E を増加させることが確認できる。これらの条件で、 $\Phi 25$ mm、高さ 5 mm の円柱を Corkscrew printing mode にて出力した結果を図9に示す。これらのうち、造形が可能であった条件は Overwrite : 100 % においては、Filament dia

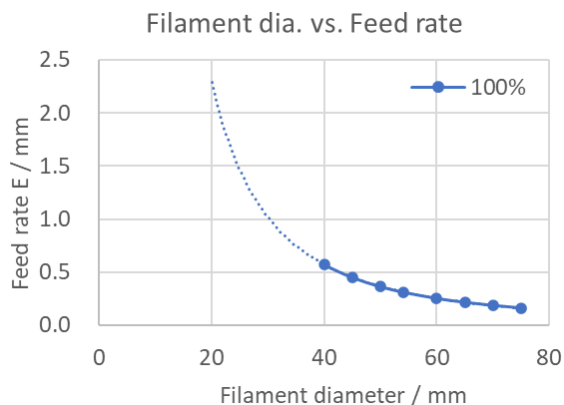


図8 Filament diameter と G コードに出力された押出量 E の関係

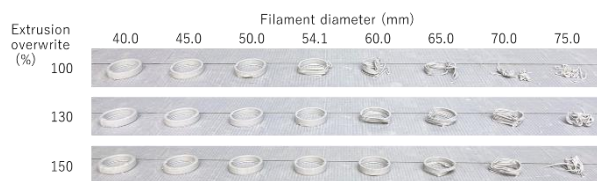


図9 Extrusion multiplier : 1.50 における造形結果

meter : 40.0、45.0 であり、Overwrite : 130 % においては、Filament diameter : 40.0、45.0、50.0、54.1、Overwrite : 150 % においては、Filament diameter : 40.0、45.0、50.0、54.1、60.0 であった。しかし、Overwrite : 130 % - Filament diameter : 40.0 と Overwrite : 150 % - Filament diameter : 40.0、45.0 の条件においては、外形寸法が 5 % 以上大きくなっており、吐出が過剰となっていた。

図9のモデル造形時の Filament diameter と G コードに出力された押出量 E の一覧を表1に示す。今回検証をおこなった範囲においては、押出量 E が 0.381~0.588 では適正な造形ができた。0.366 を下回ると吐出が少なくなったことで、造形は失敗した。また、0.678 を超えた場合、造形は可能であったが、吐出が過剰となっていた。以上の結果から、ペレット式 3D プリンタにおいては、Filament diameter の設定が造形性に大きな影響を与えることが確認できた。

次に、Extrusion multiplier : 1.00 における Filament diameter と押出量 E の関係を計算により求めた結果を表2に示す。押出量 E が 0.381~0.588 の範囲に入る Filament diameter が Overwrite : 100 %、130 %、150 % それぞれの条件で存在することが確認できた。Extrusion multiplier を小さくしているため、Extrusion multiplier : 1.50 の条件よりも Filament diameter は細くなっている。これらの試算を参考に、Extrusion multiplier : 1.00、Filament diameter : 27.5、30.0、32.5、35.0、37.5、40.0、45.0、50.0 の条件で、 $\Phi 25$ mm、高さ 5 mm の円柱を Corkscrew printing mode にて出力した結果を図10に示す。造形が可能であった条件は Overwrite : 100 % においては、Filament dia

表 1 Filament diameter と押出量 E の関係
(Extrusion multiplier : 1.50)

dia.	Extrusion multiplier			Extrusion multiplier Overwrite
	1.5	1.5	1.5	
	100%	130%	150%	
27.5	1.213	1.576	2.049	
30.0	1.019	1.324	1.722	
32.5	0.868	1.129	1.467	
35.0	0.749	0.973	1.265	
37.5	0.652	0.848	1.102	
40.0	0.572	0.744	0.858	<< excessive
45.0	0.452	0.588	0.678	
50.0	0.366	0.476	0.549	
54.1	0.313	0.407	0.469	<< appropriate
60.0	0.254	0.331	0.381	
65.0	0.217	0.282	0.325	
70.0	0.187	0.243	0.280	<< poor
75.0	0.163	0.212	0.244	

表 2 Filament diameter と押出量 E の試算
(Extrusion multiplier : 1.00)

dia.	Extrusion multiplier			Extrusion multiplier Overwrite
	1.0	1.0	1.0	
	100%	130%	150%	
27.5	0.808	1.051	1.366	
30.0	0.679	0.883	1.148	
32.5	0.579	0.752	0.978	
35.0	0.499	0.649	0.843	
37.5	0.435	0.565	0.735	
40.0	0.382	0.496	0.572	<< appropriate
45.0	0.301	0.392	0.452	
50.0	0.244	0.317	0.366	
54.1	0.208	0.271	0.313	
60.0	0.170	0.220	0.254	
65.0	0.144	0.188	0.217	
70.0	0.125	0.162	0.187	
75.0	0.108	0.141	0.163	

表 3 Filament diameter と押出量 E の関係
(Extrusion multiplier : 1.00)

dia.	Extrusion multiplier			Extrusion multiplier Extrusion overwrite
	1.5	1.5	1.5	
	100%	130%	150%	
27.5	0.807	1.049	1.211	
30.0	0.678	0.882	1.017	
32.5	0.578	0.751	0.867	<< excessive
35.0	0.498	0.648	0.747	
37.5	0.434	0.564	0.651	
40.0	0.381	0.496	0.572	
45.0	0.301	0.392	0.452	<< appropriate
50.0	0.244	0.317	0.366	

35.0、37.5、40.0 であり、Overwrite : 130 % においては、Filament diameter : 27.5、30.0、32.5、35.0、37.5、40.0、Overwrite : 150 % においては、Filament diameter : 27.5、30.0、32.5、35.0、37.5、40.0、45.0、50.0 であった。しかし、Overwrite : 100 % - Filament diameter :

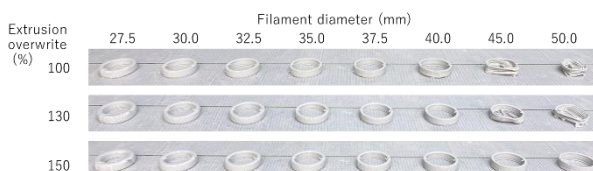


図 10 Extrusion multiplier : 1.00 における造形結果

27.5、30.0 と Overwrite : 130 % - Filament diameter : 27.5、30.0、32.5、35.0 と Overwrite : 150 % - Filament diameter : 27.5、30.0、32.5、37.5 の条件においては、外形寸法が 5 % 以上大きくなっており、吐出が過剰となっていた。

図 10 のモデル造形時の Filament diameter と G コードに出力された押出量 E の一覧を表 3 に示す。表 2 における適正範囲と Overwrite : 130 % - Filament diameter : 45.0 と Overwrite : 150 % - Filament diameter : 50.0 の 2 条件において異なる結果となったが、その他は試算通り、押出量 E が 0.381~0.578 の範囲に入る条件で適正な造形ができた。CIMCO edit により確認したモデル造形時のノズル移動距離は 822.0 mm であったので、ノズル移動距離 1 mm あたりの押出量 E は $4.6 \times 10^{-4} \sim 7.0 \times 10^{-4}$ の範囲であれば適正な造形が可能となることが示唆された。

3.3 リトラクションについて

Retraction Distance と Coasting Distance のパラメータが造形物に与える影響調査として、Φ50 mm、高さ 50 mm の円柱のモデルを造形した結果を図 11 に示す。一般的なフィラメント式 3D プリンタにおいては Retraction Distance は 1 mm 以上の数値とされることが多いが、ペレット式 3D プリンタでは Retraction Distance : 0.05 mm であってもループ終点・開始箇所には大きな樹脂だまりができてしまった。Retraction Distance : 0.01 mm においてはループ終点・開始箇所の樹脂だまりがやや小さくなった。また、Coasting Distance については数値が大きくなるにつれ、樹脂だまりはやや小さくなる傾向がみられたが、ループ開始後の吐出が少なくなる結果となった。また、Coasting の開始後から吐出が減少しているため、新たにくびれのような外観があらわれる結果となった。今回調査した範囲では、適切なリトラクションのパラメータを見つけることはできなかった。

次に、同じモデルを Corkscrew printing mode にて造形した結果を図 12 に示す。Corkscrew printing mode をおこなわない設定での造形では吐出の途切れが無いため、図 11 に示したような樹脂だまりの形成は確認されなかったことから、モデル造形の際は Corkscrew printing mode のようにリトラクションを必要としない設定での動作が推奨される結果となった。ただし、Corkscrew printing mode については一筆書きでの出力となるため、CAD でのモデル作成段階から、形状の設計をおこなう必要がある。

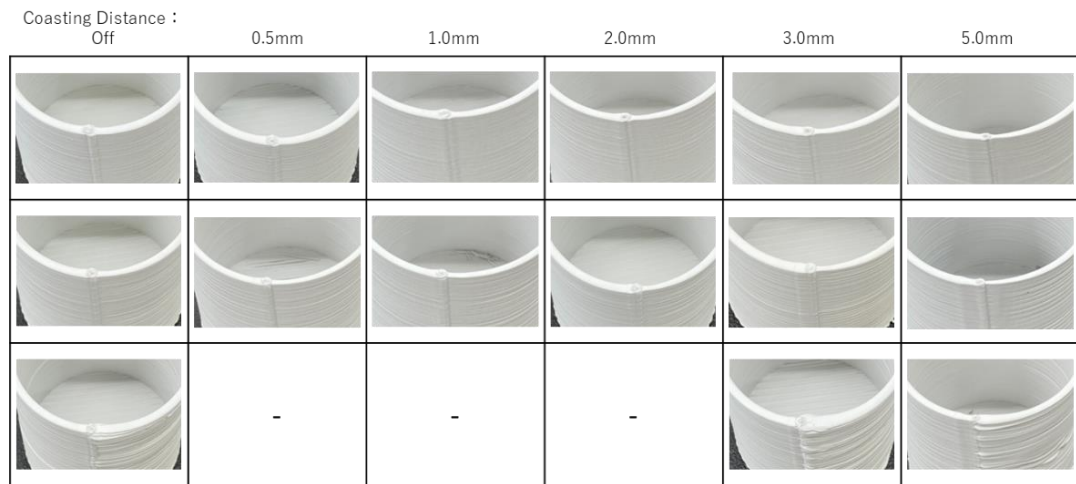


図 11 Retraction Distance 及び Coasting Distance の値によるリトラクション箇所の変化



図 12 Corkscrew printing mode における造形結果

参考文献

- 1) 総務省：情報通信白書, 229-230 (2016)
- 2) 植西寛ほか：滋賀県工業技術総合センター業務報告 104-107 (2022)

4 まとめ

ペレット式 3D プリンタにおいては、ノズルからの吐出量が少ない場合に、造形が乱れる傾向にあったことから、スクリュー回転数が低い領域での造形は避けるようにパラメータ設定をおこなう必要があることが確認できた。

また、造形性には Filament diameter の設定が大きな影響を与え、押出量 E が 0.381~0.578 の範囲に入る条件で適正な造形ができることが確認できた。ノズル移動距離 1 mm あたりの押出量 E は $4.6 \times 10^{-4} \sim 7.0 \times 10^{-4}$ の範囲であれば適正な造形が可能となることが示唆された。

リトラクションに関しては、樹脂だまりを解消できるパラメータを見つけることはできなかったが、Corkscrew printing mode のようにリトラクションを必要としない設定での動作が推奨される結果となった。