

令和元年6月17日現在

機関番号：53101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K17999

研究課題名(和文) FDM式3Dプリンタを用いた傾斜機能セラミックスの作製方法

研究課題名(英文) Establishment of 3D-printing technology of functional gradient ceramic material by FDM 3D-printer

研究代表者

井山 徹郎 (IYAMA, TETSURO)

長岡工業高等専門学校・機械工学科・准教授

研究者番号：00452087

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：3Dプリンティングに代表されるアディティブマニュファクチャリングによる最終製品の作製技術を確立することを目的として、熱溶融積層方式の3Dプリンタに用いる樹脂材料に50vol.%以上のセラミック粉を混合させたフィラメント材料を作製し、このフィラメント材料を用いて造形された造形体の機械的特性を明らかにした。造形体を熱的に脱脂、焼成することでセラミック焼結体を作製できることを確認した。3Dプリンティング時に造形体の充填密度を任意に制御することで焼結体は傾斜機能材料として作製できることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

3Dプリンティングに代表される積層造形法(アディティブマニュファクチャリング)は、今なおその多くは製品の試作やモックアップ等にものみ使用されることが多く、最終製品の製造装置としては普及していないのが現状である。本研究では最も普及しているFDM方式の3Dプリンタを用いてセラミック体を成形する技術を開発したものである。本研究で得られた成果の社会的な意義は、従来は専用の金型などを使用しなければ作製できなかった複雑形状のセラミックスであっても安価な3Dプリンタを用いて作製することが可能であることを明らかにしたことである。

研究成果の概要(英文)：Purpose of the study is to establish a manufacturing technology of final products with additive manufacturing. Mechanical properties of printed test pieces that contain more than 50vol.% of ceramic powder were examined. It was confirmed that a sintered ceramic piece was successfully manufactured via thermal rebinding and sintering process and functionally graded material with controlled infill pattern.

研究分野：精密工学

キーワード：アディティブマニュファクチャリング 3Dプリンティング 傾斜機能材料 複合材料

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

近年 3D プリンタの普及により個人利用での 3 次元加工や試作が容易に行うことができる。金属材料の積層造形技術について、SLS 方式をはじめとする多くの産業用 3D プリンタなどで最終製品をつくる試みがなされている一方で、個人利用が可能な 3D プリンタとしても普及してきた熱溶解積層法（以下 FDM 方式とする）3D プリンタで使用できるフィラメントの材料は熱可塑性樹脂に限定され、材料の機械的特性や、造形物の積層方向に対する機械強度が低いこと、加えて造形精度のばらつきが大きいことなどから製品の製造機械として用いられることは少ない。

### 2. 研究の目的

本研究では FDM 方式の 3D プリンタを用いた造形物の機械的特性の改善を目的として、セラミックと樹脂の複合体の造形の可否について検討し得られた造形物の機械的強度を評価する。

### 3. 研究の方法

FDM 方式の 3D プリンタは特徴として造形の容易さとコストの低さが挙げられるが、その他に造形中に材料であるフィラメントを任意に変更することができ、印刷物の部位や層ごとに材料を変えることができるという特徴がある。本研究では、あらかじめセラミック粉を含有させたフィラメントを作製し、これを一般的な FDM 方式の 3D プリンタに使用しセラミック/樹脂複合体を作製し造形物の機械的性質の向上を試みた。具体的にはフィラメントに含有させるセラミック粉と母材である熱可塑性樹脂の体積比が異なるフィラメントを作製し、これらを用いて得られた造形物の造形精度、耐摩耗性およびデュロメータ硬さについて評価した。

### 4. 研究成果

#### 4. 1 セラミック混合フィラメントの作製

本研究においては FDM 方式の 3D プリンタに用いるフィラメントにあらかじめ所定のセラミック粉を混練させておく。予備実験の結果、市販されているフィラメント製造装置（Filabot 社製 filabot EX2）ではセラミック粉を混練させたフィラメントを連続的に射出することが困難だったため、フィラメント作製装置を自作した。図 1 に作製したフィラメント作製装置の外観を示す。作製したフィラメントは単軸の押出機と同様の構造でホッパー部より材料となる熱可塑性樹脂とセラミック粉を同時に供給し加熱部にて樹脂が熔融、セラミックとの混練がなされノズル部よりフィラメントが連続的に作製される。表 1 に開発したフィラメント作製装置を用いたフィラメントの作製条件を示す。ナイロンを結合剤にすることで、セラミック粉の混合比率が最大で 50% までのフィラメントの作製が可能であった。セラミック粉の粒径については微小なほうが混合比率を上げることができたため、粒径は  $0.3\ \mu\text{m}$  のものを使用した。フィラメントの作製には材料を押出機に投入してもセラミック粉が均一にフィラメント内に分布しないため、セラミック粉と結合材を予め加熱して混ぜ合わせたペレットを粉砕したものを押出機に投入した。

#### 4. 2 造形精度の検証

セラミック混合フィラメントを用いてセラミック/樹脂複合体の作製について検証した。造形物の形状は全長 20.0mm、幅 10.0mm、厚さ 10.0mm とした。積層の方向は厚さ方向とし、3D プリンタの造形ステージに対し垂直な向きになるように造形した。図 2 にセラミック粉を混練したフィラメントを用いて造形した場合の造形精度を比較した結果を示す。セラミック粉の混合比率が増加した場合であっても造形精度に生じる誤差は 5% 未満であり、造形方式が FDM 方式であることを考慮すればセラミック粉の混合比率に対する造形精度への影響は小さいことがうかがえる。

#### 4. 3 摩耗試験による耐摩耗性の検証

積層した造形物をセラミックの混合比率ごとに磨耗試験を行った。図 3 に実験環境を示す。幅 10.0mm、厚さ 10.0mm の面に加重を加えた状態で往

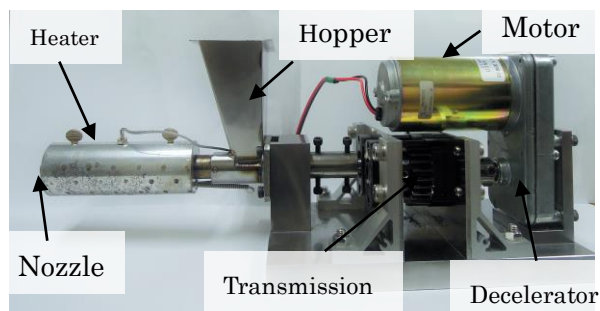


図 1 開発した押出機

表 1 セラミック混合フィラメントの作製条件

Filler	WA
Particle size $\mu\text{m}$	0.3
Binder	Nylon66
Mixing ratio vol.%	10,20,30,45,50

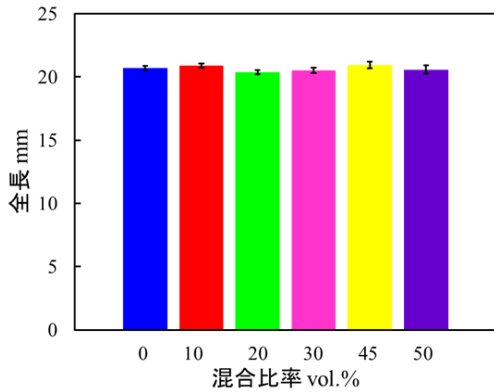


図2 セラミック粉混合比に対する造形精度の変化

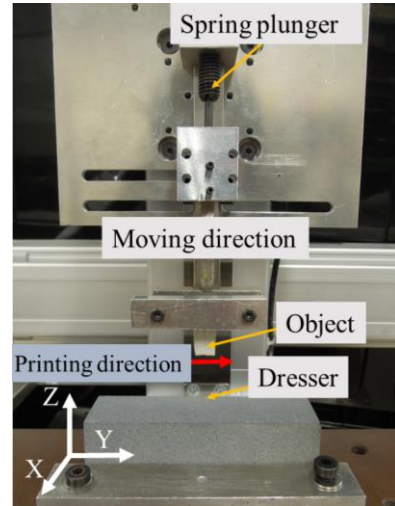


図3 摩耗試験の概要図

復直線運動させ、試料の磨耗高さを測定した。表2に摩耗試験条件を示す。図4に磨耗試験の結果を示す。セラミックを含まない造形物の磨耗量に比べ、セラミックを45%以上含む造形物は著しく脆性化することが確認できた。セラミック粉が造形物の結合を弱めていることを示している。今回行った磨耗試験の結果にはフィラメントの作製方法や3Dプリンタでの造形条件ならび造形のばらつき、さらにはドレッサーの空包による影響が生じていることが結果のばらつきを生じさせたものだと考える。セラミック含有量が30%未満ならば耐摩耗性を維持したままセラミック粉を造形物に混合させられると考える。

表2 摩耗試験条件

Load N	51
Speed mm/s	314
Distance of reciprocation mm	50
Number of round trips	500

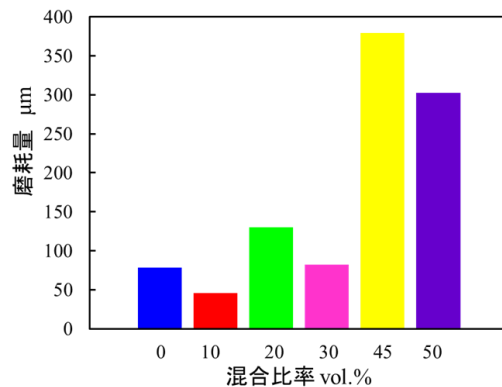


図4 セラミック粉混合比の違いによる磨耗量

4.4 定温荷重試験による耐熱性の検証  
セラミックの混合比率ごとに積層した造形物の耐熱試験を行った。255±5℃に熱せられたホットプレート上に幅10.0mm、厚さ10.0mmの面に加重を加え、熱によって造形物が軟化し、その接触時間に対する造形物の高さの変化を調べた。結果を図5に示す。セラミック粉を多く含む造形物のほうが高さの変化量が大きい結果が得られた。ナイロンの熱伝導率が0.24W/m・Kであるのに対しアルミナは32W/m・Kであるためセラミック粉を混練させることでその材料の熱伝導率を上げてしまったことが原因だと考えられる。

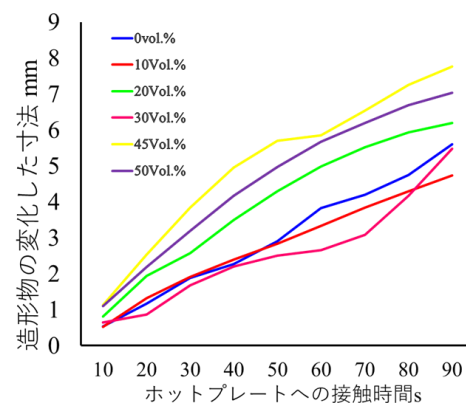


図5 セラミック粉混合比に対する耐熱性の比較 (定温荷重試験の結果)

4.4 デュロメータ硬さ試験の検証  
図6にセラミック粉の混合比率に関する造形物のデュロメータ硬さ(JIS K6253)を比較した結果を示す。セラミック粉を混合させないナイロン単体の場合は77程度の硬さだったのに対し、セラミック粉の混合比率が40%以上では10%程度の改善がみられた。

4.5 傾斜機能特性  
提案する手法で得られたセラミックを50%以上含んだ造形物を後処理として加熱脱脂をすることでセラミックスの焼結体とな

ることを確認した。現時点において当初目標としていた、混合割合の異なるフィラメントを用いた傾斜機能セラミックスの三次元造形は達成できていないものの、後処理を加えることで機械的特性に優れたセラミック複合体の作製に、本手法を適用できることが期待される。

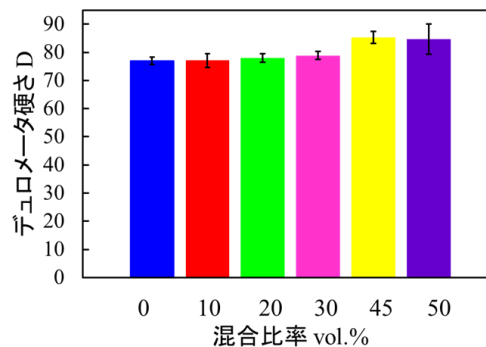


図 6 セラミック粉混合比に対するデュロメータ硬さ

#### 5. 主な発表論文等

片桐 健, 井山 徹郎, 熱溶融積層法によるセラミック/樹脂複合体の作製と評価, 日本機械学会年次大会 2018 講演論文集 S1430003

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号 (8 桁)：

##### (2) 研究協力者

研究協力者氏名： 片桐 健

ローマ字氏名： KATAGIRI TAKERU

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。