

## 3D プリントで製造した木粉・PLA 樹脂複合材に関する研究

位 田 達 哉\*

Research on Wood Powder/PLA Resin Composites  
Produced by 3D Printer

Tatsuya Inden \*

**Abstract:** In order to create a recycling-oriented society, the construction industry needs to reduce waste and promote recycling. The purpose of this study is to develop a new building material using wood powder, which is the endpoint of recycling, and PLA resin that can be returned to the soil. As a composite method for these different materials, it focuses on 3D printers, and the manufacturing method and mechanical properties for using 3D printers were investigated. The summaries of the results are as follows;

- 1) Proper 3D printing was achieved even when wood powder replaced 10% of the resin volume in the FFF method and 20% in the FGF method.
- 2) The substitution of wood powder for PLA resin didn't cause a significant decrease in tensile strength, but rather produced anisotropy depending on the direction of layering.
- 3) In the FGF method, the tensile strength of the PLA resin decreased due to its thermal history. A process that does not apply heat at a substitution ratio of 20% or less is necessary.

**Key words:** 3D Printer, Wood Powder, PLA Resin, FDM, FFF, FGF

## 1. 緒 言

地球環境保全のため、あらゆる産業が循環型社会の形成促進に向けて取り組んでいる。建設業は、全産業の約2割もの廃棄物を排出しており、建設業が担う役割は大きい<sup>1)</sup>。そのなかでも、代表的な建築材料である木材・木質材料は、8割を超えるリサイクル率である。ただし、その多くはカスケード利用であり、最終的には木くずを燃料として用いるエネルギーリカバリによって、その役目を終えている<sup>2)</sup>。これらを建材としてリサイクルすることができれば、省資源の観点からも有用である。

近年、3Dプリンタの高性能化が進み、建設分野ではセメント系材料の開発や事例が増えてきている<sup>3)</sup>。3Dプリンタで使用できる樹脂のなかに、土中の微生物によって分解される植物由来のPLA樹脂がある。機械工学や医療分野では一般的な樹脂材料であるが、建築材料としてはほとんど扱われていない。生分解性を持つPLA樹脂を、例えば樹脂サッシや建築金物の代替として用いることができれば、サステナブルな建築技術の発展が期待できる。これに生分解に寄与するような廃材と合わ

せることで、より効果の高い新建材が開発できるものと考えた。

本研究は、これ以上の再利用が困難となった木くずである木粉を対象とし、3Dプリンタによる木材の新たな建材化技術の確立を目的とする。本論文では、熱溶解積層方式であるFDM (Fused Deposition Modeling) 3Dプリンタを対象として、広く普及している紐状のフィラメントを溶かして印刷するFFF (Fused Filament Fabrication) 方式と、工業的生産で使われている樹脂ペレットを溶かしてダイレクトに印刷するFGF (Fused Granular Fabrication) 方式の2種の方式を採用し、木粉・PLA樹脂複合材の3Dプリント条件およびその力学的性質について検討した。

なお、本論文は、既報<sup>4) 5)</sup>を統合し、さらに追加実験で得られた知見を追加したものである。

## 2. FFF方式による木粉・PLA樹脂複合体

## 2.1 使用材料

使用材料は、図1に示すPLA樹脂および木粉とした。特に木粉は、建築に用いられる代表的な樹種のひとつである桧材を対象とし、家具製作時に発生して集じん機で回収された切削くずを自然乾燥させたものを用いた。

\* 国士舘大学理工学部理工学科、准教授

本論文では、PLA樹脂に木粉を体積置換することで複合体を3Dプリントする計画とした。そのため、JIS A 1104：2019のコンクリート細骨材用の単位容積質量容器（容量2l）に試料をジッキング法で詰め、単位容積質量を測定した。基本的物性を表1に示す。

## 2.2 実験の方法

### 2.2.1 PLA樹脂の熱溶解温度設定に関する検討

FFF方式の3Dプリンタで使用可能な木粉・PLA樹脂フィラメントを作製するため、まずはフィラメント製造器の最適条件の範囲を求めることを目的とし、PLA樹脂ペレットを用いたフィラメントの作製について検証した。

PLA樹脂の融点170℃に対し、フィラメント製造器内部の溶解温度を170、175、180℃の3水準でフィラメントを作製した。フィラメント製造器として、樹脂を熱溶解して攪拌および押出しができる熱溶解装置（W社製 LINE III V.3.0）を用いた。一般の工業的なフィラメントの製造は、熱溶解させた樹脂を所定径の穴へ押し出し、張力をかけながら巻き取ることで均一な径の紐状樹脂を成形している。本論文では、この熱溶解装置を用い、工業的なフィラメント製造を再現した。

作製したフィラメントは、FFF方式3Dプリンタ（V社製 Aquila S2）を用いてプリントした。条件は、ノズル径φ0.4mm、ノズル温度200℃、積層高を0.2mmとした。インフィル形状は、式（1）で近似される3次元曲面であるジャイロイドとした。これは、表面積が大きく応力集中が少ない形状であり、3Dプリントの代表的なインフィルのひとつである。また、インフィルの充填密度は、力学的性質に大きな影響を及ぼすが、本論文ではスライサーの標準値でプリントに不具合を起こさなかった20%とした。その他、試験片の3DCADデータが適切に印刷されるようスライス条件を微調整した。

$$\sin(x)\cos(y) + \sin(y)\cos(z) + \sin(z)\cos(x) = 0 \cdots (1)$$

上記の条件で、JIS K 7161：2014に準拠した多目的試験片（以下、A1試験片と略記）をプリントした。FDM方式の3Dプリンタは、平面上の印刷を上層に重ねていくプリント方法のため、積層方向を考慮する必要がある。3軸方向での総合的に評価するべきであるが、本項では、プリントが最も安定するヒートベッドに寝かせたY方向のみ評価した。その結果を受け、次項では、適切な溶解温度でPLA樹脂と木粉を用いた木粉・PLA樹脂フィラメントを製作する計画とした。

### 2.2.2 木粉・PLA樹脂フィラメントによる3Dプリントに関する検討

#### A. 木粉・PLA樹脂フィラメントの作製方法

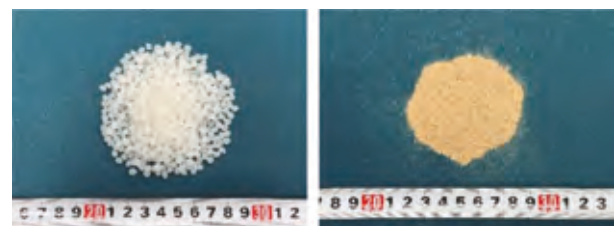
木粉・PLA樹脂フィラメントは、先述のフィラメント製造器を用いて前項で得られた最適な溶解温度により作製した。その調合は、PLA樹脂を木粉で体積置換して用い、PLA樹脂に対する木粉置換率は、0、5、10および15%とした。計量したPLA樹脂と木粉を同時にフィラメント製造器のホッパーに投入し、直径1.75mmの木粉・PLA樹脂フィラメントの作製を試みた。

#### B. 3Dプリントおよび出来形の確認

フィラメント製造器で作製した木粉・PLA樹脂フィラメントを用い、A1試験片をプリントした。試験片の記号は、FFF-Wの後に置換率を併記して表現する。特に、FFF-W00は、木粉を入れずPLA樹脂ペレットのみでフィラメントを作製した。また、比較用として市販のPLA樹脂フィラメント（FFF-PLA）を用いた。

FDM方式は先述のように積層方向による力学的性質の影響を考慮しなければならない。本項では、図2のようにプリント方向を3軸に定義し、それぞれの試験片を作製した。

出来形の確認は、目視で観察した。また、試験片表面には凹凸や空洞があるため厳密な体積の測定が困難であったため、CADデータの体積から概算密度を求めた。



a. PLA樹脂ペレット

b. 木粉

図1 使用材料

表1 使用材料の基本的物性

試料	密度 [g/cm <sup>3</sup> ]	単位容積 質量 [g/l]	備考
木粉	0.48 <sup>1)</sup>	0.19	材種：桧材
PLA	1.24 <sup>2)</sup>	0.80	

1) 切削前の木材をJIS Z 2101：2009に準拠して測定した。

2) 製造元のNatureWorksの試験成績表（ASTM D 1505に準拠）による。

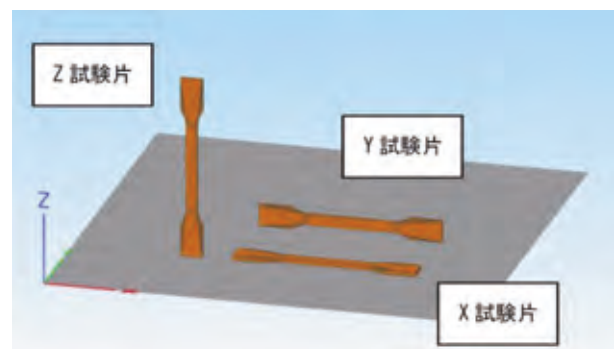


図2 試験片の積層方向の定義

### C. 力学的性質

力学的性質として、JIS K 7161-1:2014に準じてA1試験片の引張強さを測定した。側面中央部にひずみゲージを貼り付け、載荷速度を1.0mm/minで加力することで、応力度とひずみ度から引張弾性係数を求めた。

### 2.3 実験の結果および考察

#### 2.3.1 PLA樹脂による熱溶解温度設定の検討

図3に熱溶解温度ごとの応力度ひずみ度曲線を示す。若干ながらも溶解温度が低い方が、引張強さや靱性が高くなる傾向にあった。強度特性だけでなく、作業性や環境負荷の観点からも、可使温度の範囲でできるだけ低温とすることが望ましい。また、170℃以下ではフィラメントが押し出されず、180℃以上ではフィラメントの軟化が急激に進み、適切に巻き取りができなかった。以上により、PLA樹脂の熱溶解温度は融点と同じ170℃が適切であると判断した。

#### 2.3.2 木粉・PLA樹脂フィラメントによる3Dプリントに関する検討

##### A. フィラメントを用いた3Dプリント性状

木粉を置換した木粉・PLA樹脂フィラメントを作製したところ、わずかな置換率であっても、図4のように粒径の大きい木粉がフィラメントの節を生じさせて不均質なフィラメントとなった。加えて、気乾状態の木粉では、樹脂溶解のための170℃以上の加熱によって水分を放出し、材質の不安定さの一因となった。そこで、炉乾燥状態かつ0.3mmのふるい通過分の木粉のみを用いたところ、スムーズに木粉・PLA樹脂フィラメントを試作できた。この粒度調整した木粉をレーザ回折式粒度分布測定装置（S社製 SALD-3100）で測定した結果、図5のように平均粒径は概ね0.2mm程度の粒度であった。以降、この処理を施した絶乾状態の粒度調整木粉を用いることとした。

PLA樹脂に対して体積比で木粉置換の割合を検討したところ、木粉置換率10%までは問題なく製造ができたが、木粉置換率15%では適切な混合ができず、フィラメント径を一定に制御できなかった。フィラメント径の変動は、3Dプリント時における樹脂量の演算値との乖離が生じ、適切な吐出ができないばかりか、フィラメントの非連続なくびれがフィラメントを途切れさせ、3Dプリンタの押出器やノズルを詰まらせる原因にもなることから、今回の試作の範囲では、木粉置換率10%までが適切な範囲であると判断した。

##### B. 力学的性質

引張試験の結果を表2に示す。

木粉の置換率が引張強さに及ぼす影響を図6に示す。どの試験片においても初期勾配に大きな違いは認められなかったが、載荷が進むに従って木粉置換率が高まるほ

ど勾配が緩やかとなった。引張強さは、FFF方式では、木粉の置換によって若干低下し、木粉の置換率が高くなるほどその影響が顕著となった。

同一のプリント条件において、積層方向の違いが引張強さに及ぼす影響を示したものが図7である。小面積を高く積み上げるZ試験片は、引張強さが他の方向と比較して明らかに低くなった。これは、吐出方向には溶解した樹脂が連続して密実な材質が形成されるのに対し、上下の積層方向では、次の層が印刷されるまでのタイムラグがあり、一体性が失われたためと考えられる。すなわち、3Dプリンタで作製した試験片は異方性を生ずることを確認した。

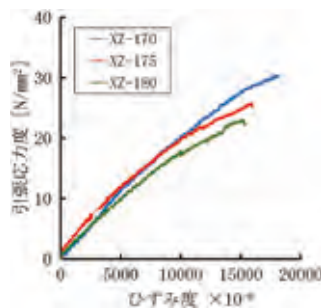


図3 溶融温度の影響



図4 不均質なフィラメント

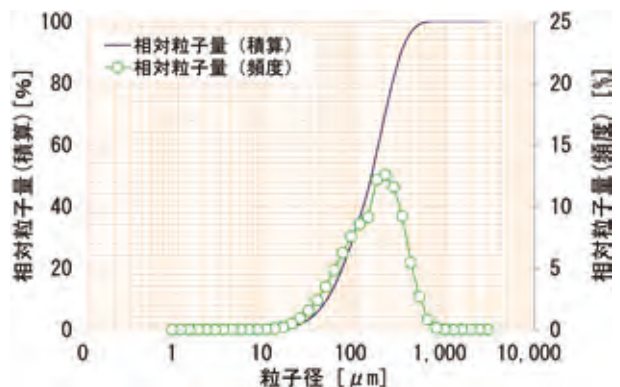


図5 粒度調整をした木粉の粒度分布

表2 力学的性質に関する試験結果（FFF方式）

記号	密度 [g/cm <sup>3</sup> ]	引張弾性 係数 [kN/mm <sup>2</sup> ]	引張強さ [N/mm <sup>2</sup> ]
FFF-PLA (X)	0.56	1.90	14.1
FFF-PLA (Y)	0.67	2.03	17.6
FFF-PLA (Z)	0.83	1.60	7.21
FFF-W00 (X)	0.60	1.97	20.4
FFF-W00 (Y)	0.65	2.16	28.3
FFF-W00 (Z)	0.78	1.85	5.22
FFF-W05 (X)	0.52	1.98	18.4
FFF-W05 (Y)	0.62	2.13	23.6
FFF-W05 (Z)	0.68	1.64	5.38
FFF-W10 (X)	0.49	2.05	21.8
FFF-W10 (Y)	0.57	1.71	20.7
FFF-W10 (Z)	0.62	1.76	4.46



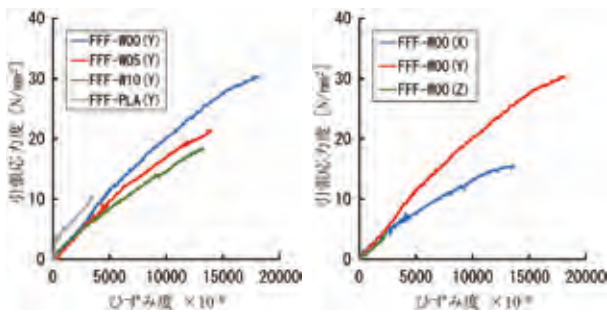


図6 引張強さに及ぼす置換率の影響 (Y 試験片) 図7 同一樹脂条件による積層方向の違い

### 3. FGF 方式による木粉・PLA 樹脂複合体

#### 3.1 使用材料および木粉置換率

使用材料は、前章と同様の PLA 樹脂および木粉とし、特に木粉は、呼び径 0.3mm のふるいを通過した粒度調整した炉乾燥試料を用いた。

調査は、PLA 樹脂を木粉で体積置換して用い、PLA 樹脂に対する木粉置換率は、0、10、20 および 30% とした。

#### 3.2 実験の方法

##### 3.2.1 木粉・PLA 樹脂の投入方法に関する検討

FGF 方式とは、ペレット状の樹脂をホッパーに投入し、スクリューで溶解搅拌しながら直接ノズルへ樹脂を押し出すことで 3D プリントを実現している。工業的な大量生産に向き、無垢小径のフィラメントを製造する手間も省けるが、大型かつ制御が困難なため普及していない。

当初は PLA 樹脂と木粉を直接ホッパーへ投入する計画であったが、予備実験の結果、搅拌スクリューの過熱を抑えるための冷却ファンが軽量な木粉のみを飛散させてしまい、プリント生成物の木粉含有量を制御できないことがわかった。そこで、事前に樹脂表面に木粉を溶着させることで、木粉・PLA 樹脂ペレットの製造を試みた。

木粉・PLA 樹脂ペレットの作製には、恒温炉乾燥およびヒートガンを用いて PLA 樹脂表面を熱溶解させ、木粉を付着させる方法を検討した。加えて、前章で使ったフィラメント製造器を用い、木粉・PLA 樹脂フィラメントを裁断することで作製する疑似ペレットの 3 種類の方法を検討した。

##### 3.2.2 木粉・PLA 樹脂ペレットによる 3D プリントに関する検討

前項で得られた木粉・PLA ペレットを用い、3D プリントのベンチマークとして世界的に普及している #3DBenchy<sup>6)</sup> をプリントし、その状況を目視で観察し

た。また、A1 試験片をプリントし、マイクロ스코プ (K 社製 VH-7000) に 50 倍のレンズを取り付け、試験片表面の出来形を確認するとともに、引張試験を実施した。記号は、FGF-W の後に置換率を併記して表現する。

FGF 方式 3D プリンタ (P 社製 G5) のプリント条件は、ノズル径  $\phi$  3.0mm、積層高さ 1.0mm とし、インフィルは FFF 方式と同様に充填密度 20% のジャイロイドとした。ノズル温度は、FFF 方式の設定値である 200°C を基準に、樹脂が適切に吐出されるように高温側に微調整した。

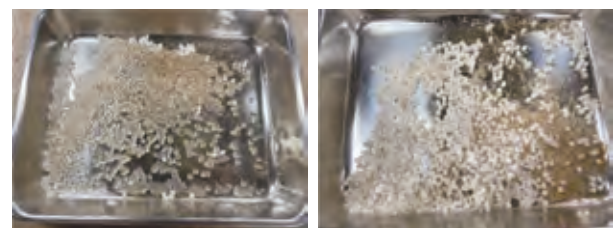
### 3.3 実験の結果および考察

#### 3.3.1 木粉・PLA 樹脂の投入方法に関する検討

恒温乾燥炉およびヒートガンを用いた実験の結果を図 8 に示す。恒温乾燥炉の場合、低温の場合 PLA 樹脂は十分に溶解せず、逆に、過剰な加熱では比熱の高い金属製バットが先に温まり、バット面から溶解して木粉ペレットを取り出すことができなかった。ヒートガンの場合、熱風の温度によらずガンから発生する熱風で木粉が飛散するため、現状の実験環境では困難と判断した。

フィラメント製造器を用いて木粉・PLA 樹脂フィラメントを製作できることは前章で示したが、これを裁断することで作製した疑似ペレット (図 9) では、適切に 3D プリントすることができた。実験の作業性も加味すると、フィラメント製造器で製造した紐状の樹脂を 2mm 程度に裁断したものが最も適していた。本論文では、この疑似ペレットを木質・PLA 樹脂ペレットとして扱う。

木質・PLA 樹脂ペレットによる 3D プリントは、木粉置換率 30% では図 10 のように木粉が固結して排出されるようになったことから、今回の検討では、置換率 20% が限度であると判断した。置換率 20% でプリントした #3DBenchy を図 11 に示す。ノズルサイズが大きい



a. 炉乾燥による加熱 b. ヒートガンによる加熱

図8 作製した木粉・PLA ペレット (W20)

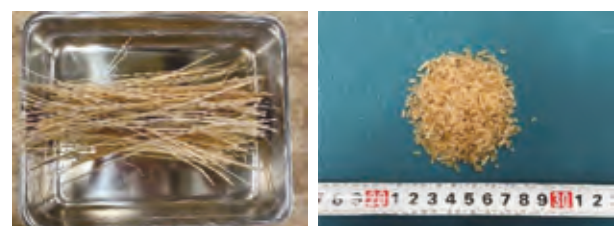


図9 木粉PLA フィラメント (右) と疑似ペレット (左)

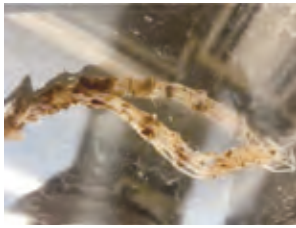


図10 置換率30%の吐出物

図11 #3DBenchy<sup>6)</sup> 出力

a. 吐出不良



b. 過剰加熱による分離

図12 試験片全景と積層方向の拡大写真

め若干粗な出力ではあるが、概ね良好なプリントができることを確認した。

これらの結果を受け、次節の引張試験では、新品のPLA樹脂ペレットを印刷したFGF-PLAと、木粉を置換していない疑似ペレットをFGF方式で印刷したFGF-W00を追加で作製した。

### 3.3.2 木粉・PLA樹脂ペレットによる3Dプリントに関する検討

#### A. ペレットを用いた3Dプリント性状

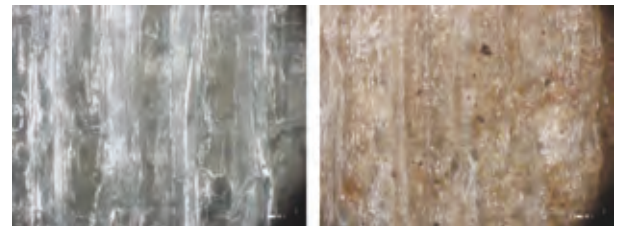
FGF方式の3DプリンタでPLA樹脂ペレット単独で印刷した場合、当然ながら不具合は生じず、精度良くプリントすることができた。これと比較すると、PLAに対する木粉置換率が高まるほど図12のようにプリントの失敗が増え、より繊細な制御が必要となった。これは、木粉の置換によってPLA樹脂量が減ったため、プリント温度を高めなければ溶解した樹脂の流動性を確保できず、吐出不良が生じたものと考えられる。その一方で、ノズル温度を高めすぎると溶解した樹脂と木粉との材料分離が顕著となり、ノズル内に木粉が詰まる原因にもなった。特にZ試験片は、積層面積を小さくして高く積み上げる手順のため、その誤差が蓄積されており、プリントの方向により仕上がり具合が異なることを確認した。

試験片の出来形について、目視ではどの試験片も概ね同じような性状であったが、図13のように試験片の中央部を拡大してみると、明らかな積層方向の違いを確認することができた。積層方向ごとに木粉の有無を比較すると、PLA樹脂の試験片がプリント用G-codeで指定した通りに制御されて規則正しく印刷されていたのに対し、木粉で置換したものは、積層高さが若干高くなり、また押出幅も安定しない様子が確認できた。これは、ノズル温度を高めて印刷したことが主な要因で、PLA樹脂が過剰に軟化したことで、流動性が大きく高まり、ノズルからの吐出量が多くなり安定しなくなったものと考えられる。

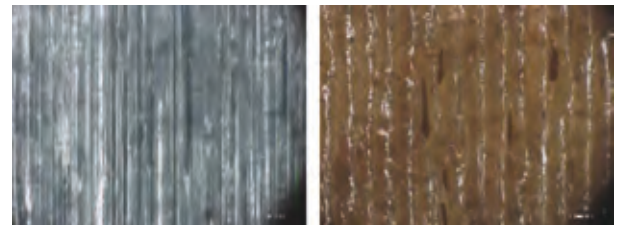
#### B. 力学的特性

引張強さ試験の結果を表3に示す。

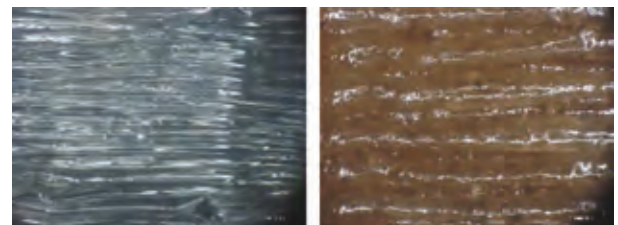
FGF方式では、新品のPLA樹脂ペレットを用いた試験片に対して、疑似ペレットを用いたものの引張強さは



a. X試験片の中央部 (×50倍)



b. Y試験片の中央部 (×50倍)



c. Z試験片の中央部 (×50倍)

図13 上下を載荷方向として撮影した試験片表面の顕微鏡写真 (左図：FGF-PLA, 右図：FGF-W20)

表3 力学的性質に関する試験結果 (FGF方式)

記号	密度 [g/cm <sup>3</sup> ]	引張弾性 係数 [kN/mm <sup>2</sup> ]	引張強さ [N/mm <sup>2</sup> ]
FGF-PLA (X)	0.78	3.88	35.5
FGF-PLA (Y)	0.88	3.42	29.3
FGF-PLA (Z)	0.99	3.52	6.78
FGF-W00 (X)	0.75	2.21	27.7
FGF-W00 (Y)	0.86	2.86	31.7
FGF-W00 (Z)	0.90	1.44	4.41
FGF-W10 (X)	0.72	1.94	29.3
FGF-W10 (Y)	0.80	2.57	26.6
FGF-W10 (Z)	0.84	1.12	3.76
FGF-W20 (X)	0.64	1.72	18.3
FGF-W20 (Y)	0.65	2.64	16.7
FGF-W20 (Z)	0.78	0.92	2.49



低下した。これは、疑似ペレットを作製する際にPLA樹脂を170℃で溶解しており、この熱履歴が引張強さに影響を与えたものと考えられる。PLA樹脂ペレットと木粉をダイレクトに3Dプリントできれば、引張強さが保持できる可能性がある。また、木粉の置換率に対しては、図14のようにFFF方式の倍の20%の置換であっても、引張強さはほぼ変わらなかった。

図15は、積層方向の違いが引張強さに及ぼす影響を示したものである。FFF方式と同様に、特にZ方向において明らかな異方性を有することが確認できた。さらに、引張試験後の破断面を図16のようにマイクロスコプで観察した。Z方向は積層面に垂直に引張力がかかり容易に剥離している様子が確認できた。その一方で、

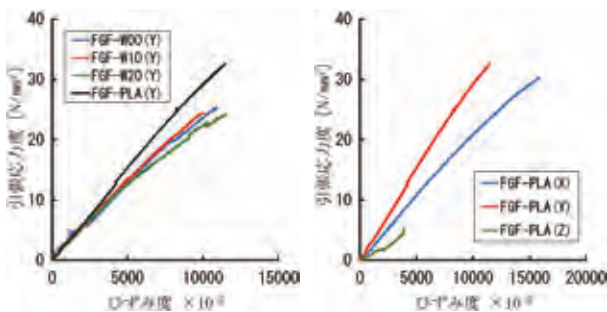


図14 引張強さに及ぼす置換率の影響 (Y)

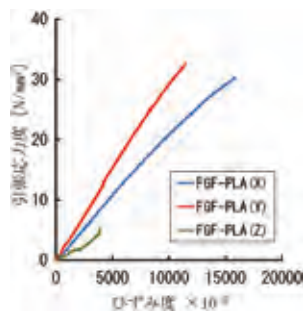
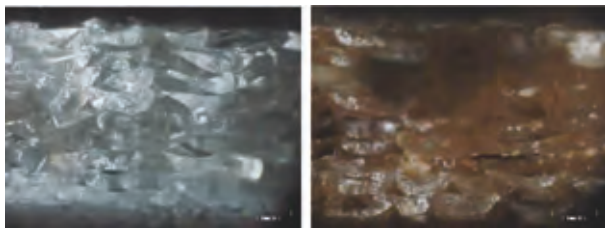
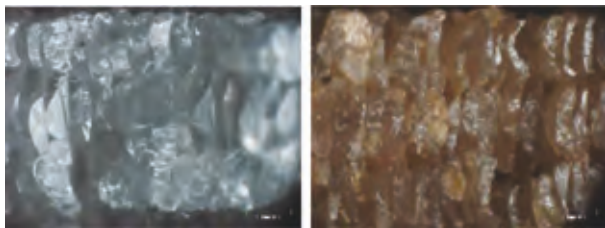


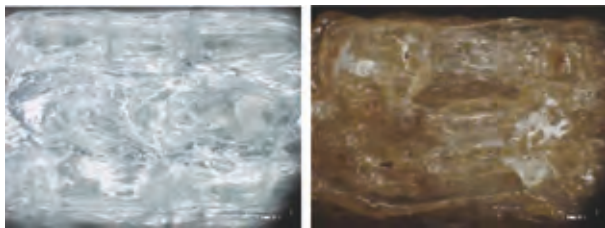
図15 同一樹脂条件による積層方向の違い



a. X試験片 (×50倍)



b. Y試験片 (×50倍)



c. Z試験片 (×50倍)

図16 引張破断面 (FGF-PLA, 右図: FGF-W20)

XおよびY方向は押出方向に引張力がかかり、1本ずつの樹脂で破断しており、強軸方向と弱軸方向が明確となったことの裏付けとなった。破断面をさらに観察すると、細長い繊維状の木粉が押出方向に配向されている様子が確認できた。本論文で用いた木粉は球状に近い粉体であったため、引張強さ低下の原因になり得るが、高アスペクト比の木繊維であれば、PLA樹脂の欠点である靱性を付与できる可能性がある。ただし、積層方向に対する引張強さには大きな影響を与えないものと考えられる。

### 3.4 最適なFGF方式3Dプリント方法に関する考察

フィラメント製造器を用いることで疑似ペレットを作製し、木粉・PLA樹脂複合材のFGF方式3Dプリントを実現することができた。ただし、工業的な生産工程として見た場合、大きな手戻りとなるうえに、熱履歴による強度の低下が懸念される。

この問題を解決するため、木粉を充填した容器にPLA樹脂ペレットを加え、設定温度180℃の乾燥炉内で静置したところ、図17のように、PLA樹脂の外周部のみ溶解して10%程度の木粉が付着したペレットを試作することができた。この改良型の木粉・PLA樹脂ペレットを用い、同条件でY試験片を作製して引張試験を実施したところ、40N/mm<sup>2</sup>程度の引張強さを示し、新品のPLA樹脂ペレットの引張強さと同等以上となった。樹脂の熱履歴を極力抑えることで、強度特性と損なわない木粉・PLA樹脂複合材が製造可能であるものと示唆される。



図17 改良した木粉・PLA樹脂ペレットおよびY試験片

## 4. 結 言

本論文では、木粉とPLA樹脂複合材を作製するため、FFF方式およびFGF方式のFDM3Dプリンタを用いたプリント方法について検討した。得られた知見は以下の通りである。

- 1) FFF方式で樹脂体積の10%, FGF方式で20%を木粉で置換しても適切に3Dプリントすることができた。
- 2) 3Dプリンタで製造した木粉・PLA樹脂複合材の引張強さは、PLA樹脂を木粉で置換することによる

引張強さの低下よりも、積層方向に大きな影響を受ける。

- 3) 特にFGF方式ではPLA樹脂の熱履歴によって引張強さが低下した。20%までの木粉置換率においては、熱の影響を抑えられる製造工程が極めて重要である。

## 謝 辞

本研究は、JSPS科研費（基盤研究（B）23H01585）および住友財団環境研究助成助成（2230120）により実施した。実験では、国土舘大学建築学系卒業生の本場鴻太氏（株式会社竹中工務店）、秋元毬那氏（大成建設株式会社）に加え、同学系4年生の本間悠暉子君（国土舘大学建築学系）らの協力を得た。記して謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 環境省：別添資料（産業廃棄物の排出・処理状況等（令和3年度実績））、<https://www.env.go.jp/content/000211701.pdf>（2024.9.1閲覧）
- 2) 片田陽菜，立花敏：木くずのマテリアルリサイクルの現状分析，林業経済研究，Vol.70，No.1，pp.27-33，2024（DOI：[https://doi.org/10.20818/jfe.70.1\\_27](https://doi.org/10.20818/jfe.70.1_27)）
- 3) 寺西浩司，梶田秀幸，宮野和樹：建設用3Dプリンターに用いるセメント系材料の物性評価方法，日本建築学会技術報告集，Vol.27，No.65，pp.69-74，2021.2（DOI：<https://doi.org/10.3130/aijt.27.69>）
- 4) 野崎，位田ほか6名：3Dプリンタを用いた木粉・PLA樹脂，日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），pp.339-340，2024.8
- 5) 位田，本間ほか6名：3Dプリンタで製造した木粉・PLA樹脂複合材の力学的性質，日本建築仕上学会 2024年大会学術講演会研究発表論文集，pp.149-152，2024.10
- 6) Creative Tools：#3DBenchy-The jolly 3D printing torture-test，<http://www.3dbenchy.com>（2024.9.1閲覧）