

# 3D プリント型枠と菌糸の複合材モジュールを用いた菌糸構造物の設計

## Prototyping Mycelium Building with Composite Modules Using 3D Printed Molds

鳥居 巧<sup>1</sup>, 知念司泰<sup>1</sup>, 田中浩也<sup>2</sup>

Takumi TORII<sup>1</sup>, Moriyasu CHINEN<sup>1</sup>, Hiroya TANAKA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 慶應義塾大学大学院, <sup>2</sup> 慶應義塾大学

<sup>1</sup> Keio University Graduate School, <sup>2</sup> Keio University

### 【要約】

近年,ますます土壌分解性を有する材料として菌糸が注目されており,欧米諸国の研究機関を中心に造形方法や現実的な利用方法が模索されている.筆者は過去3年間の研究により菌糸の造形方法の模索として,菌糸と一体化し複合材として利用することを目的に,生分解性プラスチックを3Dプリントした型枠の開発を行ってきた.この複合材は構造物全体を構成するモジュールになる.実証実験として菌糸構造物の設計および制作を行った.本稿では,これらのプロジェクトを全体像(マクロ)・プラスチック型枠を使った菌糸モジュールの設計(マイクロ)・モジュールの接合方法(メゾ)に分けて報告を行う.以上の実践から菌糸の土壌分解性を活かすことを目的とし複合材の考慮すべき点と社会実装を目指す上での菌糸成型技術の展望を考察する.

キーワード:3Dプリンティング, 生分解性プラスチック, 菌糸材, マテリアル

### 【Abstract】

In recent years, mycelium has been attracting more and more attention as a soil degradable material, and research institutes in Europe. have been exploring methods of forming mycelium and realistic ways of using it. In the past three years of research, the author has been developing a 3D-printed framework made of biodegradable plastic to be used as a composite material integrated with mycelium. This composite material becomes a module that constitutes the entire structure. As a demonstration experiment, we have designed and produced a mycelial structure. In this paper, these projects are divided into three parts: the overall picture (macro), the design of mycelial modules using plastic framework (micro), and the method of joining the modules (meso). From the above practices, we will discuss the points to be considered for t-composites aiming to take advantage of the soil degradability of mycelium and the prospects of mycelium molding technology for social implementation.

Keywords:3Dprinting, biodegradable plastic, mycelium, materials

## 1. 序論

土壌分解性を持つサステナブルな材料として,菌糸材の建築やプロダクトへの利用を目指した研究がますます活発化している.菌糸はキノコを構成する糸状の構造体であり,リグニンやセルロースを含む木材や藁を分解しながら,その全体を覆い尽くすように成長,固定化したものを菌糸材(Mycelium Based Composites)と呼ぶ[1].菌糸材は,土壌分解性に加え,低い熱伝導率,高い音響吸収性,耐火性,軽量性などの特性から,断熱・吸音パネル[2],家具の材料[3]として,環境負荷の少ない建築製品の開発が進められている.一方で,強度不足が実用化の妨げとなっているという報告もある[4].近年の研究では,こうした菌糸材の欠点である強度を補うため,他の素材を組み合わせた複合材の開発が多く見られる.しかし,これらの研究では,建築材料として使用した後の処理に関する考慮が不足していると考えられる.菌糸材が注目された理由の一つは土壌分解性にあるが,あまりにも強固な複合材は,解体の困難さから分解が遅くなる可能性がある.そのため,菌糸材の土壌分解性を活かすためには,建物として使用する際にある程度の構造を維持しつつ,使用後は容易に解体・細分化できる複合材の開発が必要である.

そこで本研究では,菌糸材の強度を補完しつつ,容易に解体できることを目指し,3Dプリントによって成形した生分解性プラスチックを菌糸材と組み合わせた複合材を製作した[5].この複合材を踏まえ,まずは実際に山間部で利用されることを想定した,「菌糸シェルター」の設計を行った.次に設計によって明らかになった課題をもとに製作可能な菌糸構造物の設計を実施し,最終的に「菌糸の間」を製作するに至った.以上の研究活動の過程で,菌糸と生分解性プラスチックの複合材の機能と可能性における検証を行った.

## 2. 関連研究

菌糸材は基本的に圧縮力には強い一方で,引張力やせん断力には弱い傾向がある.この物理的特性を踏まえ,引張力やせん断力を補いつつ,菌糸材の生分解性を損なわないことを目的に,籐[6]や綿[7],木[8]といった天然資源を組み合わせた研究事例やプロダクトが多く見られる.しかし,複合材全体の土壌分解性についての検討は,組み合わせる素材が土壌分解性を持つかどうかという点に限られており,解体時の考慮がされている事例は現時点では確認されていない.土壌分解性を

最大限に活かすためには、解体時に複合材をできるだけ細分化し、土と接触する表面積を増やす必要がある。したがって、構造物を一体で成形するのではなく、複数のモジュールから構築する複合材がより適していると考えられる。

### 3. 3D プリントした生分解性プラスチックの複合材

本研究で製作した生分解性プラスチックと菌糸材の複合材の製作手順を図1に示す。まず、用途や設計要件に応じて、型枠をCADソフトで設計し、生分解性プラスチックを3Dプリントする。次に、菌糸材を一度ほぐしておがくず状にし、型枠に充填する。その後21~23℃の温度で、おがくず内の水分が蒸発しない環境下で3~4日間保管し、菌糸が型枠に沿って成長・固定化するように促す。こうして一体化した生分解性プラスチックと菌糸材を乾燥させ、複合材を完成させる。

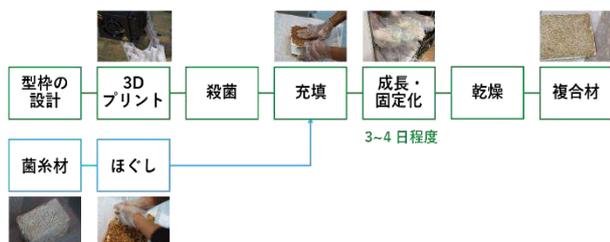


図1. 複合材の製作手順

乾燥によって複合材内部の水分が蒸発し、多孔質な構造が形成されることで、軽量性や断熱性といった建築材料として有用な機能が発揮される。また、複合材内部に水分が残るとカビが発生しやすく、状態が不安定になるため、乾燥工程は菌糸材や菌糸を用いた複合材の実用化において不可欠である。3Dプリントされた生分解性プラスチックの型枠は、筆者らが過去の研究で開発した「ダクト乾燥方式」[5]において、通気口と菌糸材が充填される部分を隔てる役割も担う。

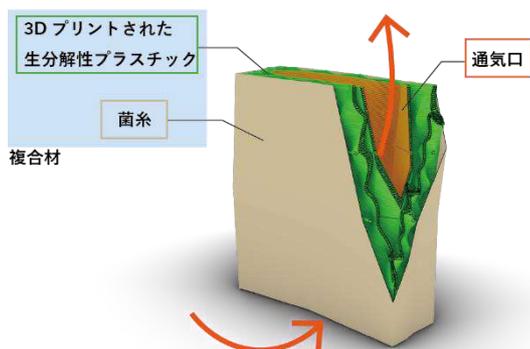


図2. 複合材の構造

この方式では、内部に空間を作ることで菌糸材を密実に充填する必要がなく、複合材全体の重量を軽量化できる。さらに、生分解性プラスチックは一般に熱や炎に弱い性質を持つが、菌糸材と組み合わせることで、ガスバーナーの炎に対してある程度の耐火性能と断熱性能を示し、生分解性プラスチックの欠点を補うことが確認された。

### 4. 菌糸シェルター

山間部での森林火災が多発していることを背景に、菌糸の耐火性に注目し、万が一の火災時にも燃えないようなドーム状の「菌糸シェルター」を設計した(図3)。本プロジェクトでは、車での運搬が困難な山道でも持ち運びやすいように、分解・組み立てが可能なモジュールを検討した。



図3. 設計した「菌糸シェルター」

#### 4-1. モジュールの設計

「菌糸シェルター」の設計における重要な検討事項は、簡単に組み立て・分解が可能なモジュールの設計である。そこで、単一モジュールで形状を構築することを目指し、菱形十二面体(Rhombic Dodecahedron)を模した型枠を製作した(図4)。菱形十二面体は、単一のジオメトリで無限に空間を埋め尽くすことが可能であり、12面の合同なひし形から構成される。この特性を活かし、1種類のひし形パネル型枠からモジュールを構築し、1種類のモジュールで「菌糸シェルター」を組み立てられるようにすることで、誰でも簡単に施工に参加できると考えた。このモジュールを「Circular Bricks」と名付け、製作した。Circular Bricksの内部は空洞になっており、これによって軽量化を実現するとともに、「ダクト乾燥方式」の適用を可能にしている。誰でも持ち運べる大きさに調整し、卓上3Dプリンタでも造形できるサイズを基準に、モジュールとパネル1枚の大きさを決定した(図5)。



図4.5. 設計した Circular Bricks

#### 4-2. 楔形ジョイントの設計

パネル同士を接合するパーツとして、型枠と同様に生分解性プラスチックを3Dプリントし、楔形ジョイントを製作した(図6)。楔形ジョイントは、建材として使用する際に形状を維持できる強度を保ちつつ、簡単に組み立てられるようにするために角度と幅という2つの設計パラメータの調整を行った(図7)。

楔型ジョイントの角度を急にするとパネル型枠同士をつなぐ結合力が高まるが、急すぎてしまうと造形荒れが生じ、組み立てが難しくなる可能性がある。また、幅を広げることでも結合は強くなるが、パネルの面積が小さくなり結果として複合材の機能が低下してしまう。このような設計上の制約を考慮しながら、ジョイントの検討を行った。



図 6. 製作した楔形ジョイント

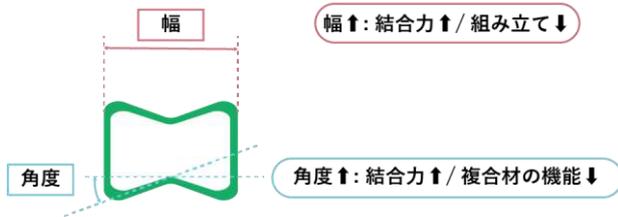


図 7. 楔形ジョイントの設計パラメータ

#### 4-3. 全体の積み方の検討

「菌糸シェルター」は、3~4 人用のテントの大きさを参考に、天井が閉じた形状で菱形十二面体のみで構成しやすいドーム形状に設計した。CAD で設計した基本的なドーム形状をもとに、菱形十二面体で構成するための積み方を計算するソフトウェアを開発した。設計の結果、幅 2m、奥行 3m、高さ 2m のドームを構成するために、152 個のモジュール(パネル型枠:1824 枚、楔形ジョイント 7296 個)が必要であることが判明した。

### 5. 菌糸の間

「菌糸シェルター」の設計では、構造物の大きさ・必要なモジュール数の膨大さから製作に至れなかった。そのため、構造物のサイズをやや落とし、屋外公共空間に設置するパーティションとして「菌糸の間」を改めて製作可能なように設計・製作を実施した(図 8)。



図 8. 菌糸の間

この作品はモジュール造形でありながら、3D プリントによる自由曲面を菌糸によって滑らかな面として仕上げることが可能である複合材の可能性を検証したものである。

#### 5-1. 菌糸の間の設計

「菌糸の間」は、菌糸の防音性に注目し、内部に座ると周囲の歩行者の視線から遮断され、落ち着いて読書や景観を楽しめる空間を目指して設計した。

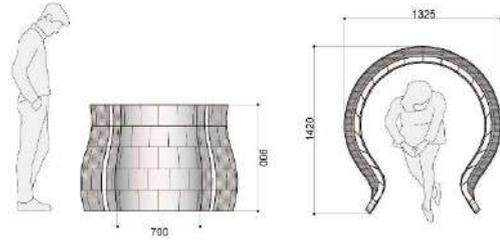


図 9. 菌糸の間の設計

#### 5-2. 型枠設計

「菌糸の間」のモジュールを構成する 2 種類の型枠をデザインした(図 10)。最初に設計した放射状型枠では、モジュールの外周を内側にオフセットし、乾燥のための通気口と、その通気口から外周に向かって並ぶ壁によって、菌糸材の層を 2 層構造にした。しかし、この壁が原因で鉛直方向の菌糸の結合が阻害される問題が発生した(図 11)。これを受けて、どの方向においても菌糸の結合を促すために壁を取り除き、型枠と菌糸の一体化を向上させるため、内側の通気口部分に波状のテクスチャを施した波型枠を開発した。

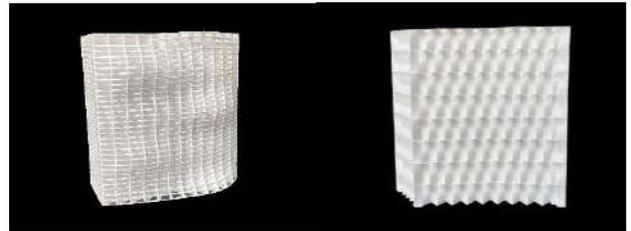


図 10. 設計した 2 種類の型枠  
(左:放射状モジュール,右:波モジュール)

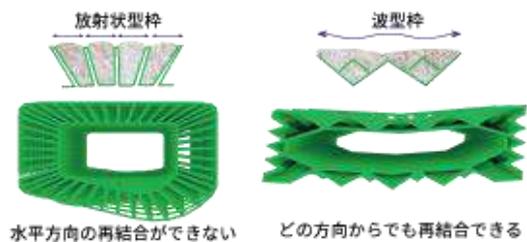


図 11. 放射状型枠と波型枠の違い

『菌糸の間』の全体の 3D モデルを 3D プリントの造形範囲に合わせて 102 個のメッシュに分割し、それぞれをモジュールとして、一つずつ形状の異なる波型枠を製作した(図 12)。波型枠の特徴であるテクスチャは、凹凸が多いほど菌糸材と一体化しやすく強度が増すが、その分造形時間が長くなる(図 13)。これを踏まえ、製作期間と保有するプリンタの台数を考慮し、適切な凹凸の量を決定した。

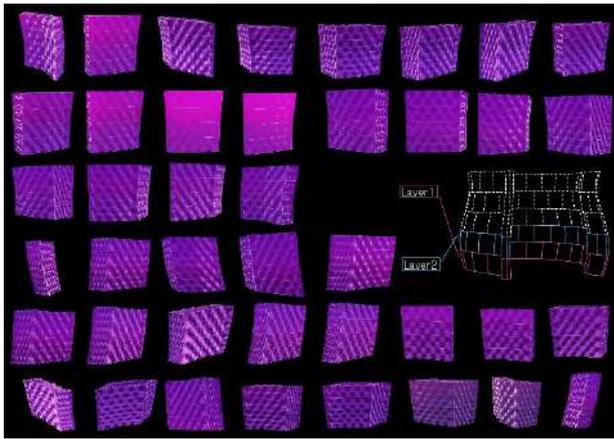


図 12.分割した 102 個モジュールの様子(一部)

	凹凸	強度	造形時間
	多い	強い	長い
	少ない	弱い	短い

図 13 波型枠の製作上のトレードオフ

### 5-3. Re-Growth Joint による接合方法の検討

金物や接着剤などの他素材を一切使用せず、単一の複合材だけで構造物を製作できるようにするために、菌糸本来の機能によって接合する「Re-Growth Joint」を考案した。「Re-Growth Joint」は菌糸の再結合性を用いて、モジュール同士の接地面に菌糸材をモルタルのように塗ることで接合する。波型枠の縮小サンプルを作り、実際に「Re-Growth Joint」の簡易的な実験を行った(図 14)。実験の結果「Re-Growth Joint」は、接合されたモジュールを引っ張ることで容易に解体できる一方で一定期間は構造を維持することができる適度な強度を持つことが分かった。

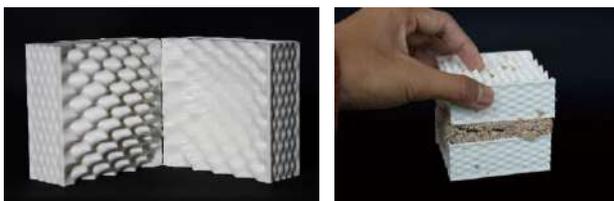


図 14. 「Re-Growth Joint」の簡易的な実験の様子

## 6. 結論

本研究では、3D プリントした生分解性プラスチックと菌糸の複合材を製作し、この複合材をモジュールとしての利用する「菌糸シェルター」の設計を行った。その結果、モジュールで菌糸構造物を製作する上で課題となる、必要なモジュール数が膨大になってしまう限界が浮き彫りになった。この限界を踏まえ、「菌糸の間」では実際にモジュールによって製作可能な構造物を設計し、製作に至った。以上の実践の過程で、容易に分解可能な単一ユニットの「Circular Bricks」・施適度な強度を持つ菌糸の再結合性を利用した「Re-Growth Joint」など、建築材料として使用

された後の処理を考慮した複合材の可能性を複数検証した。

今後の展望として、解体後の土壌分解を促進させるために、より高度な 3D プリント技術を活用したツールパスや Gcode の設計により、特定の方向に力を加えると容易に破碎できる仕組みを持つ型枠を開発し、複合材に機能的な分解性能を持たせることが考えられる。また、複合材のデザインに加えて、今回製作した複合材の土壌分解速度や、環境への影響についての検証も今後並行して行いたい。

## 謝辞

本研究で制作した、「菌糸の間」は三菱ケミカル株式会社より、生分解性樹脂コンパウンド FORZEAS™ の提供、支援を受けたことで進めることができた。加えて、本研究は JST 共創の場形成支援プログラム JPMJPF211 の支援を受けたものである。ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

1. E. Elsacker, S. Vandeloock, A.V. Wylicka, J. Ruytinx, L. De Laeta, E. Peeters, A comprehensive framework for the production of mycelium-based lignocellulosic composites, *Sci. Total Environ.*, xxx 1-17 (138431), 2020.
2. Grownbio, Insulation panel, <https://www.grown.bio/product/insulation-panel-set-of-10/>(参照 2024/09/19).
3. M.A. Shakir, B. Azahari, Y. Yusup, M.F. Yhaya, A. Salehabadi, M.I. Ahmad, Preparation and characterization of mycelium as a bio-matrix in fabrication of bio-composite, *J. Adv. Res. Fluid Mech. Therm. Sci.* 65 (2) 253-263,2020.
4. M. Sydor, A. Bonenberg, B. Doczekalska, Cofta, Mycelium-based composites in art, architecture, and interior design: A Review, *Polymers* 14 145,2021.
5. 知念司泰, 鳥居巧, 名倉泰生, 田中浩也 菌糸と生分解性プラスチックを複合した多孔質構造体の可能性, *Conference on 4D and Functional Fabrication*,2021.
6. Aimi Berton, Fatima Abenova, Valeria Marsaglia, Woven Mycelium, <https://www.materialbalance.polimi.it/2021/05/21/woven-mycelium/>,2021(参照 2024/09/19).
7. Mardin, Grown Structures,<https://www.mandin.earth/work#/grown-structures/>,2017(参照 2024/09/19).
8. Özdemir E, Saeidi N, Javadian A, Rossi A, Nolte N, Ren S, Dwan A, Acosta I, Hebel DE, Wurm J, et al. Wood-Veneer-Reinforced Mycelium Composites for Sustainable Building Components. *\*Biomimetics\**. ; 7(2):39,2022.