

論文

生分解性プラスチック支持枠を用いた菌糸材ユニットによる 小規模仮設空間の分解性能に関する実証的研究

鳥居 巧*, 田中 浩也

(2025.2.27 受理)

Experiment on Decomposition Performance of Small-Scale Temporary Structure With Mycelium-Based Composites Unit Using Biodegradable Plastic Support Frame

Takumi TORII* and Hiroya TANAKA

In this study, we focused on mycelium-based composites and applied it to biodegradable plastic support frame to create modular units. These units are then assembled into a small-scale temporary structure. Furthermore, we categorized two aspects of decomposition performance: unit disassembly and degradability and verified them. In this paper unit disassembly refers to the introduction of an intermediate scale, the unit, between the smallest component (module) and the assembled structure, to streamline assembly and disassembly. By enabling burial at a scale smaller than the full structure, unit disassembly is expected to enhance the efficiency of soil biodegradation. As a test, a small-scale temporary structure composed of 20 units was fabricated and subjected to a 263-day outdoor durability and weathering test. After the test, the structure was disassembled and buried. Approximately one year later, the units were excavated and observed to have degraded, allowing for the tracking of the structure's lifecycle from initial to end-of-life.

Keywords : Mycelium-based composites, Biodegradable plastic, Degradability, Unit Disassembly, Biofabrication

近年、資源の持続可能性や廃棄物の低減を目的に堆肥化可能な天然資源を用いたデザインの提案が多くなされている。本研究では、その一つとして注目されている菌糸材を生分解性プラスチック支持枠に塗布してユニットを製作し、さらにそのユニットを組み合わせて小規模仮設空間を構成した。そして、ユニット分解性と土壌分解性という2種類の分解概念を整理し、双方の分解性能を検証した。本論文でいうユニット分解性とは、最小構成要素であるモジュールと仮設空間の間にユニットという中間的なスケールを設け、組み立てや分解作業効率化を図るものである。ユニット分解により、造形物よりも小さいスケールで埋土することが可能となり、効率的な土壌生分解を促すと考えられる。本研究はその実証として、20組のユニットからなる小規模仮設空間を、屋外で263日間耐久性および耐候性の検証を実施した後に、ユニット分解（解体）・埋土し、約1年後に掘り起こして劣化を確認することで、ライフサイクルの初期から最終期までの経過を観察した。

キーワード : 菌糸材, 生分解性プラスチック, 土壌生分解性, ユニット分解性, バイオフィabrication

1. 研究背景

近年、資源の持続可能性や廃棄物の低減を目的に、天然資源をはじめとする堆肥化可能な材料を用いたデザインの提案が多くなされている。たとえば、植物由来のバイオプラスチック¹⁾や、菌糸体^{2,3-5)}といった生分解性、堆肥化可能性のある新素材を積極的に活用し、地球環境に負荷をかけないものづくりが提

案されている。さらに「つくる」のみならず「壊す」作業まで想定した設計手法はUnmaking^{2,6,7)}とも呼ばれ研究されている。

本研究では土壌生分解性を持つプラスチックで成型した支持枠に、菌糸材を塗布したモジュールを開発し、そのモジュールを組み合わせてユニットをつくり、小規模仮設空間を構成することに取り組む。菌糸材を用いた大型の建築プロジェクトは、The Living による Hy-Fi⁸⁾や New Heros による The Growing Pavilion⁹⁾、MYCL 社や Block Research Group らによる Myco Tree^{10,11)} など多数存在するものの、ライフサイクルの初期から最終期までの経過を観察した実証的研究は少ない。以上の現状認識により、製作したその仮設空間が、実用可能な強度で約250日強程度の耐久性・耐候性を持つことを確認し、さらに使

* 責任著者, Corresponding author

¹ 慶應義塾大学 湘南藤沢キャンパス

〒252-0082 神奈川県藤沢市遠藤 5322

Keio University 5322, Endo Fujisawa-shi 252-0882, Japan

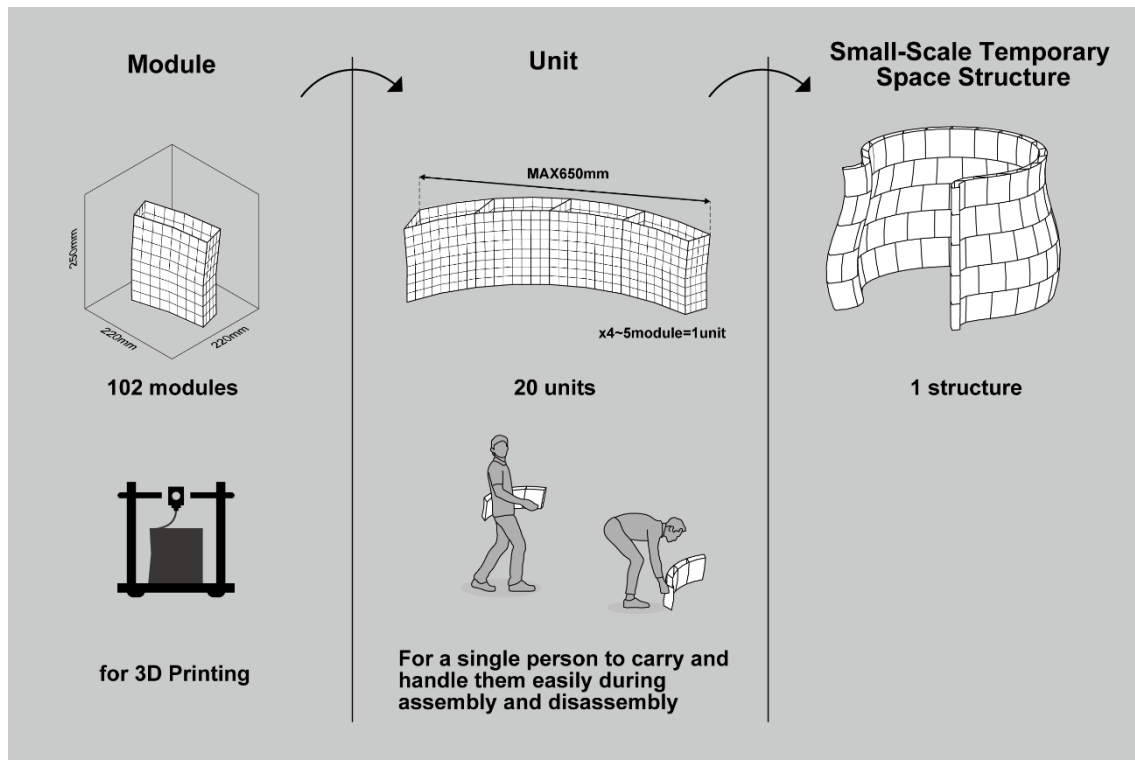


Fig. 1 Conceptual diagram of unit disassembly. The module was sized to fit within the build volume of a 3D printer, while the units were designed to be of a size that allows a single person to carry and handle them easily during assembly and disassembly.

用後は容易に解体可能で、かつ土壌中で生分解しやすいものであることを検証する。

なお「分解」という概念は多義的なものであるが、本論文では「ユニット分解」と「土壌生分解」という2つに分類して論じる。従来物理的な分解性、解体性は「モジュール化」や「易解体設計 (Design for disassembly)」¹²⁾と呼ばれ、体系化されてきたものである。その上で「ユニット分解」とはそれらと類似しつつも、ユニットという構成要素をもとに人が運んで組み立てることができ、使用が終わった造形物は再びユニットまで容易に解体可能であることを指す。ユニットは最小構成要素であるモジュールと小規模仮設空間の中間のスケールに当たり、モジュールを複数接合した人間が一人で運びやすい大きさ、重さとなっている。Figure 1 に示すように、モジュールは本研究で用いる FFF (Fused Filament Fabrication) 方式の卓上 3D プリンタ (Ender 3 Pro, Creality 社製) の造形範囲に則した製造上の単位、ユニットは人間が組み立てや分解を容易に行うことのできる作業上の単位として位置づけられる。このユニットという中間的なスケールの概念を導入することで、作業の柔軟な効率化を図る。「ユニット分解」は解体の概念に近いものの、解体という語句は「易解体設計」に見られるように自動車、家電および家具の領域では再利用を前提としている一方で、建築の領域では建設前の状態に戻すことを指すように、使用される領域によって想起される意味に違いがある。そこで、本研究の製作物は小規模仮設空間であることを踏まえ、「ユニ

ット分解」と区別した。次に「土壌生分解」とは、土の中で微生物等の働きによって生分解されることを指す。生物化学的な分解性についても、ある特定環境で生分解させ、残量を計測する「崩壊性試験」や生分解する環境ごとに区分された「生分解性」規格が存在するが、本研究は認証機関から認証された生分解性プラスチックと、自然界のサイクルにより元来堆肥化可能なことが自明である菌糸材の組み合わせになっているため、土壌生分解性が担保された範囲内で製作を実施している。この2つの分解性は連関しており、ユニット分解は造形物をユニットごとに分解して埋土できることから、土との接地面積を増やすことにつながり、結果的に土壌生分解性の向上に寄与すると考えられる。

以後、第2章では先行研究と本研究の位置づけをさらに詳しく明らかにする。第3章と第4章では、ユニットの開発や小規模仮設空間の設計及び製作の過程について詳述する。第5章では耐久性、ユニット分解性、土壌生分解性の3点についての評価実験を実施する。第6章では、得られた結果をもとにまとめを行い、さらに今後の課題についても述べる。

2. 先行研究

菌糸体はキノコを構成する糸状の構造体であり、木材や農業廃棄物を含む基材を分解しながら、その全体を覆い尽くすように成長する。成長過程で固定化した材料を菌糸材 (Mycelium-based composites) と呼ぶ。菌糸材はその高い土壌生分解

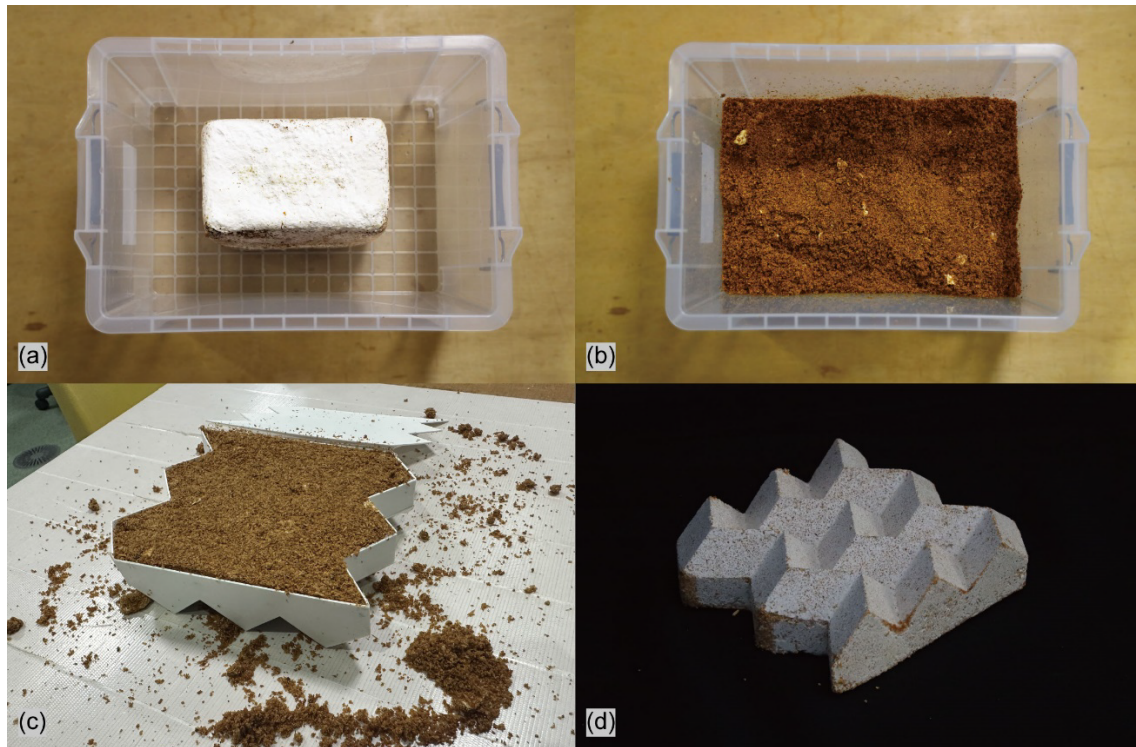


Fig. 2 Common methods for fabricating mycelium-based composites. (a) A block of mycelium-based material. (b) Crushed into flake-like. (c) Fill into the support frame. (d) Molded mycelium object.

性により、地球環境に負荷をかけない材料として、建築材料、梱包材といった様々な製品に応用されはじめている^{13, 14)}。

成型方法としては、予め菌糸体が培養されたおがくずを主成分とする、ブロック状に成型された菌床を破碎し、支持枠に充填させて、再度成長させることが一般的である (Fig. 2)。菌糸材をプロダクトや工業製品に応用することを妨げる要因として、強度の低さが指摘されている^{14, 15)}。その解決策のひとつとして、成長後支持枠から取り外さず、一体化したユニットとしてそのまま利用することで強度不足を補うことが考えられる。この際菌糸材の土壌生分解性を損なわないようにするためには、支持枠に使用する材料も堆肥化可能であるものが望ましい。これまで、籾¹⁶⁾や木¹⁷⁾、天然の繊維^{18, 19)}といった材料を支持枠の材料として利用することが提案されている。

本研究においても、土壌生分解性を損なわないようにするために、支持枠として3Dプリント可能な生分解性プラスチックを用いる。他の堆肥化可能な天然資源よりも、比較的成型性の高い生分解性プラスチックを使用することで、目的に応じた細かい形状の操作ができると考えた。本研究と同様に生分解性プラスチックを菌糸材と組み合わせている事例として、Katherine らによる木質プラスチックを用いた型枠と組み合わせて成長過程で外観を白く変化させる提案²⁾や Klarenbeek による有機的な形状のバイオプラスチック型枠と菌糸材を一体化させた椅子などがある²⁰⁾。しかしこれらの関連研究では、ユニット分解性については考慮されていない。プロダクトを構成する材料が全て堆肥化可能であったとしても、使用後プロダクト全体を埋土するにはプロダクトの大きさと同規模の深さの土中空間を要

する。また仮に埋めることができたとしても土との接地面積が小さく、土壌生分解の効率が低いと考えられる。そこで本研究ではユニット分解という観点を導入し、その効果を検証する。

本研究と最も類似したプロジェクトとして、PLP labs によるインスタレーションがある²¹⁾。このプロジェクトでは木質プラスチックを3Dプリントした型枠と菌糸材を組み合わせでユニットを構成し、これらを連結させることで造形物を成形しており、本研究との共通点が多い。しかしこのプロジェクトでは、ユニットの連結には木材で製作したジョイントが使用されている。一方、本研究ではユニット同士の接合にも菌糸材自身が持つ再結合性を応用する。また、本研究ではインスタレーションのみならず、263日間耐久性の検証を実施したあとユニット分解 (解体) を行い、埋土したうえで、約1年間土中で放置したユニットを掘り起こし、劣化の進行を確認した。この点でインスタレーションのみの提案とは異なり、人工物のライフサイクルのはじめから終わりまでを長期にわたって実証している。

3. モジュールの設計

3.1 材料の選定

本研究で開発したモジュールは生分解性プラスチック (生分解性樹脂コンパウンド FORZEASTM、三菱ケミカルグループ社製) と菌糸材で構成されている。まず、生分解性プラスチックは、ヨーロッパの生分解性製品の認証機関 TÜV AUSTRIA 社による、海洋生分解認証である “OK biodegradable MARINE” を取得しており²²⁾、海水中 (30℃) で、生分解度が6ヵ月以内に90%以上になる材料であることを示している。この認証

は産業用コンポスト、家庭用コンポスト、土壌、淡水、海水と生分解させる環境によってグレードが分けられており、海水中は土壌よりも微生物が少なく、生分解が難しいとされている。また、本材料の主成分である植物由来の琥珀酸を用いたPBS (Poly Butylene Succinate) は、先行研究の崩壊試験において、土壌環境下 (30℃) で1年以内に完全に生分解されたことが確認されている。3Dプリンタで使用できる生分解性プラスチックとして、58℃で分解が始まるPLA (Poly Lactic Acid) と比較して、比較的分解されやすいプラスチックであると言える²³⁾。本研究では、小規模仮設空間の製作に加えて、使用が終わったら自然土壌に埋土し分解の検証にも取り組むためこの生分解性プラスチックが適していると考えた。生分解性プラスチックを3Dプリントした支持枠の周囲に、フレーク状に破碎した菌床を15mm程度の厚みになるよう塗布し、成長の過程で一体化させる。今回、菌糸材は成長において環境の影響を受けづらく、比較的扱いが容易な菌種として知られるヒラタケ種 (*Pleurotus ostreatus*) を用いて製造された昆虫飼育用の菌床を用いた。生分解性プラスチックは3Dプリントが可能な熱可塑性樹脂であるため、熱および火に弱い。一方で菌糸材は多孔質構造による低い熱伝導率⁸⁾や炭化することで火が燃え広がらない性質^{24, 25)}を持つことで知られる。先行研究では、本研究と同じ菌種で製作された幅、奥行き125mm厚み16mmの試験片に裏面から炎を当て、表面に炎が到達するまでに35分間、また燃焼速度試験では試験体点火後に質量の10%が失われるまでに17分30秒要したことが確認されている²⁵⁾。そのため、生分解性プラスチックで作られた支持枠を菌糸材で覆うことで、炎に晒されるまでの時間を確保し、比較的長時間の構造維持が期待できる。この意味で2種類の材料は双方の性質を補完し合う関係となっている。

3.2 支持枠設計における工夫

支持枠が堆肥化する効率を上げるためには、使用するプラスチックの量を低減すること、土と触れる面積を増加させることの2点が設計時の工夫として考えられる。これらを踏まえ、支持枠を薄い2層で構成し、支持枠の内部に空間を設けた筒型の形状を採用することで軽量化を図った。土に埋めた際、支持枠内部の空間によって内外の両面からの土壌生分解が期待できる。菌糸材を用いた造形物の製作プロセスにおいては乾燥工程が発生する。これは、菌糸材の成長に必要な水分が内部に残っていることから、カビの発生を防ぐために行われる。従来の方法では構造物全体を囲い空間全体の温度を上昇させることで乾燥させているが、この乾燥方式では造形物の大きさに応じて、乾燥に必要な設備が大規模化してしまう。支持枠内部の空間は、菌糸材の量を少量化することによって内部の水分量を減らし、空気が通る道として機能させることで乾燥工程の簡略化を実現することもできる。この設計技法は、「ダクト乾燥方式」²⁶⁾を応用したものである。

また支持枠と菌糸材を一体化しやすくする目的で、菌糸材を塗布する面にはFig. 3に示す凹凸が連続した波状の表面形状を付与することとした。この表面形状によって菌糸材が支持枠の表面から剥がれづらくすることが期待される。以上のように支持枠の設計においては、支持枠自体の土壌生分解性能と実用

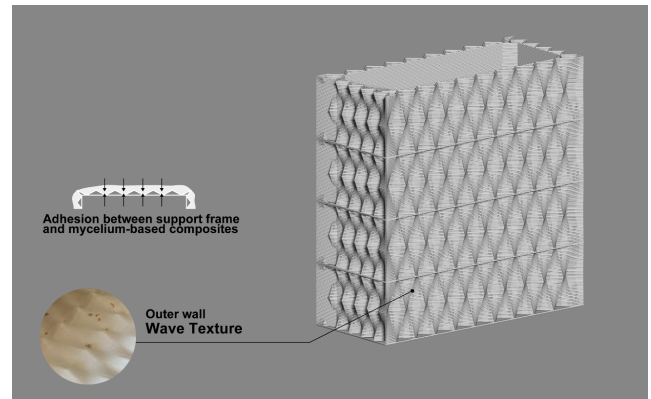


Fig. 3 Designed support frame with a wavy texture.

に耐えうるモジュールの一体化向上の両立を目指し、設計を行った。設計した支持枠を用いて菌糸材と一体化したものを、本研究における最小構成単位である1モジュールとして扱い、造形物を構成した。

3.3 菌糸材の再結合性を活かした接合

接合する際には菌糸材自身が持つ再結合性を利用することとした。再結合性とは菌糸材が空気に触れた際成長に必要な水分が内部から蒸発することを防ぐために、菌糸が再度全体を覆いつくすように成長する生物的性質を指す。この性質を活用し、ユニット同士の接地面にフレーク状に破碎した菌糸材を、モルタルのように再度塗布し、成長を促すことで接合する方法を考案した。再結合性を活用した接合の有効性を検証するために、幅100mm奥行き35mm高さ100mmの支持枠を菌糸材の再結合性によって接合する実験を行った。その結果として、二つの支持枠は接合され、Fig. 4に示すように片方の支持枠をつかみ持ち上げたところもう片方の支持枠の自重25gを支えることができた。この接合方法によって、接合のために新たにジョイントを使用することなく、生分解可能な2種類の材料のみで構造物を構成できることが明らかになった。ただしユニット同士の接合は可能なものの、接合部は菌糸材のみによって構造が保持されているため比較的弱い接合方法となっている。そのため、一定期間は構造を維持しつつ、使用後にはユニット同士を引っ張りあうことで容易にユニット分解 (解体) できる。容易にユニット分解可能な構造物を製作するという本研究の目的において、今回の手法は適切な程度の強度を持つ最低限の接合方法であると考えられる。

4. 小規模仮設空間の製作

4.1 設計

前章で開発したモジュールの応用例として、人が一人入れる程度の仮設の小規模空間を製作した。Figure 5に示す通り今回設計した小規模空間は幅1350mm、高さ900mm、奥行き1420mmである。小規模仮設空間は、複合商業施設「WATERS 竹芝」において実施した公開実験に向けて製作された。実験場所である同施設は、子連れの家族が遊ぶ場所として利用される一方で、読書やオンラインミーティングを行う来場者も多く、多様な利用目的をもった人々が行き交う、プライバシー

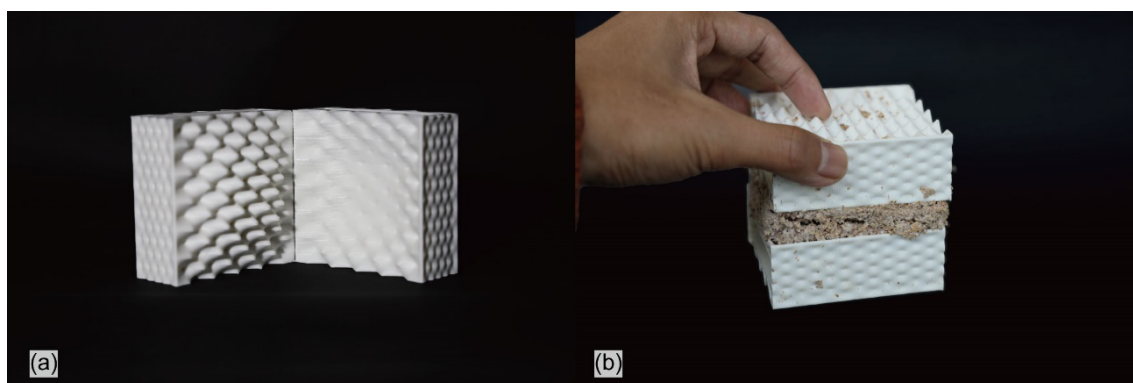


Fig. 4 The process of joining using mycelium's rebinding properties. (a) Support frame before joining. (b) One support frame being lifted after joint assembly, confirming sufficient joint strength to endure the support frame's own weight.

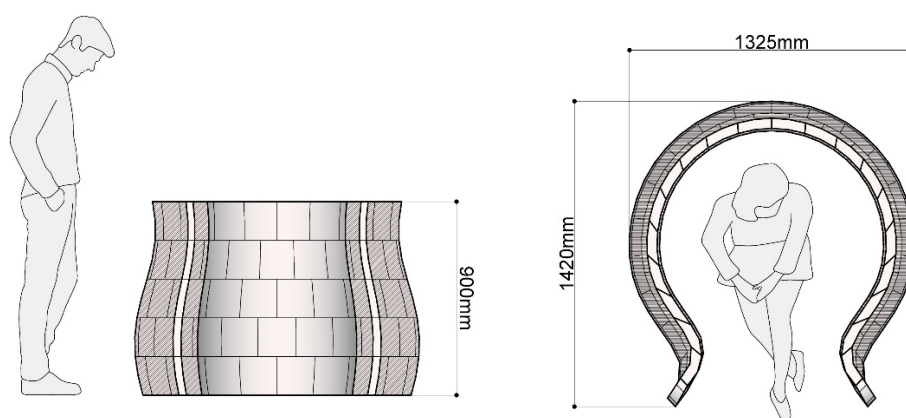


Fig. 5 Plan for the small-scale temporary structure.

の確保に関しては比較的難しい開放的な都市型施設である。このような背景を踏まえ、本研究では、単身で来訪した利用者が、内部に腰掛けた際に、周囲の視線を遮り一時的なパーソナルスペースを確保できるよう、高さや内部寸法を決定した。製作におけるプロセスを **Fig. 6** に示す。

初めに小規模空間の全体 3D モデルを CAD (Computer Aided Design) ソフトウェアである Rhinoceros 上で作成する。この 3D モデルを、卓上 3D プリンタの造形範囲 (幅 220 mm 奥行 220 mm 高さ 250 mm) に収まる大きさのモジュールに分割する。結果として合計 102 個に分割された。分割の際、水平方向にモジュールを半分ずらし、互い違いの状態にすることで構造の強化を図った。分割されたモジュール 1 つ 1 つに対し Rhinoceros の拡張機能である Grasshopper 上で実装したスライソソフトウェアで、波状の表面形状を付与した。波状のテクスチャの凹凸は、菌糸材との一体化にとって有利である。そこで、1 つの支持枠に付与する凹凸の数を 52 に決定し、合計の 3D プリント時間は 1012 時間 42 分となった。

4.2 モジュールの製作

102 個の支持枠を 5 台の卓上 3D プリンタで製作した。プリント後、消毒液を染み込ませたウェスで支持枠表面をふき取り、菌床を一度フレーク状になるまで破碎し、支持枠全体に塗

布した。そして、温度が 23℃ から 26℃、湿度が 80% 以上の環境下で 7 日間保管し、成長させることで、支持枠と菌糸材を一体化させた。白い皮膜が全体を覆いつくす一体化によって、モジュールの出来上りを目視で確認できる。

4.3 組み立て

小規模仮設空間の組み立ては 2 段階に分けて実施された。第一段階として、**Fig. 7(a)** のように 4 から 5 個のモジュールを菌糸材の再結合性を活用し接合させ、20 組のユニットをつくる。この時、ユニットは幅が最大で 650 mm、重さは 3.5 kg 程度であり、学生一人で持ち運び可能なサイズにすることで、後に実施される小規模仮設空間の効率的な組み立てを目指した。第二段階では連結されたユニットを **Fig. 7(b)** の通りに接合させていくことで全体を構築する。各段階で接合部の菌糸材の成長に 4 日間が必要となる。成長させている期間を除き、組み立て作業は 5 名の作業員によって約 14 時間を要した。

4.4 小規模仮設空間としての利用

まず、小規模仮設空間としての実用性を初期的に検証するため、複合商業施設「WATERS 竹芝」で開催された「みらい作庭記 II—2022 Autumn—」にて 2022 年 11 月 3 日から 6 日までの 3 日間、来場者に小規模仮設空間を使用してもらう公開実験を行った (**Fig. 8**)。一人ずつが空間に入ることは問題なく

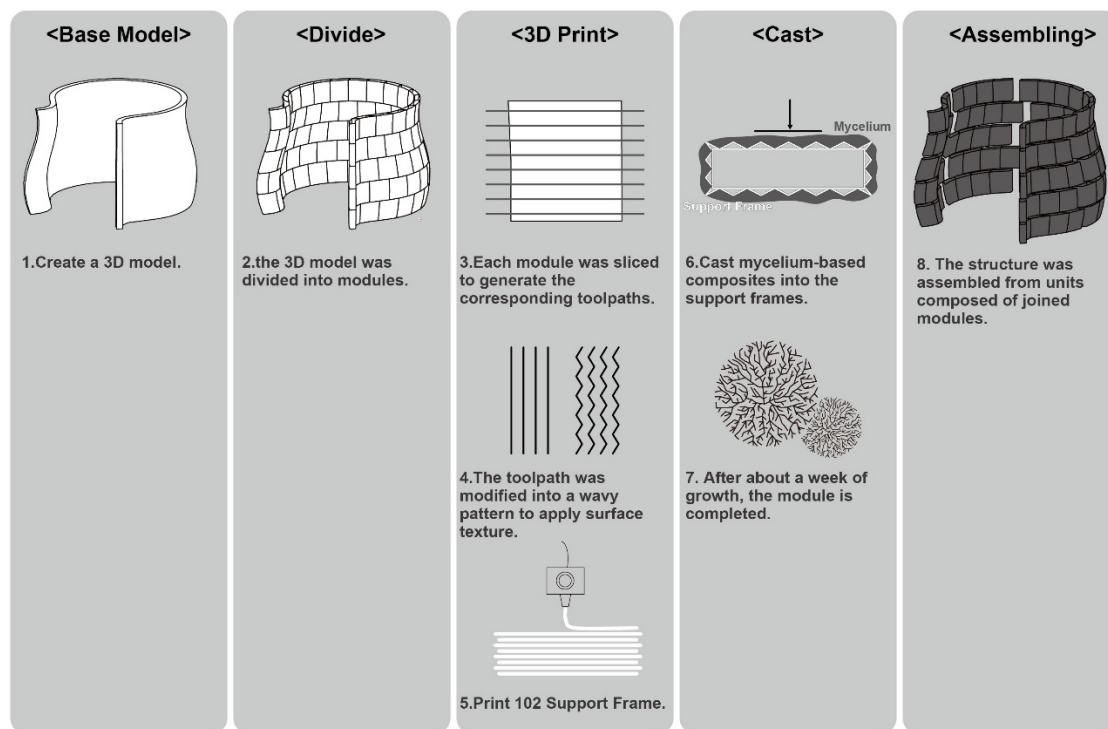


Fig. 6 The Fabrication Process of the small-scale temporary structure.

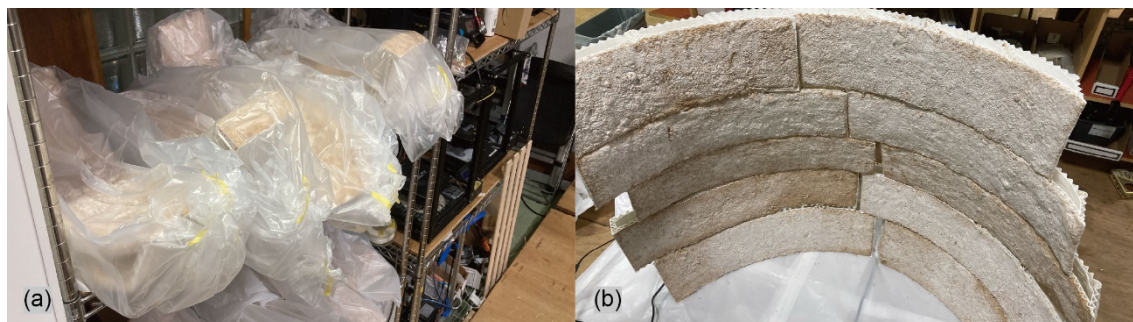


Fig. 7 The process of assembling the small-scale temporary structure. (a) Integration of 4-5 modules into a unit by utilizing the rebinding property of mycelium. (b) Assembling these units to complete the full structure.



Fig. 8 The scene of a public experiment at WATERS Takeshiba. (a) The fabricated small-scale temporary structure was installed on a stepped area with high foot traffic and was also used by children as a play space. (b) Children playing around the small-scale temporary structure.



Fig. 9 Progress observation (a) Initial relocation (November 15, 2022). (b) Partial damage occurred at the joint (August 6, 2023).



Fig. 10 Testing for unit disassembly. (a) The small-scaled temporary structure was successfully dismantled into units (October 14, 2023). (b) After being buried in the soil for one year (October 14, 2024).

実現された。また児童が小規模仮設空間の周囲で駆け回り、ユニットと衝突するという場面が見られたが、破損することなく構造を保つことが確認された。

5. 耐久性と分解性の検証と評価

5.1 耐久性と耐候性の検証

公開実験の終了後、小規模仮設空間の耐久性を検証するため、慶應義塾大学湘南藤沢キャンパスに移設し、経過を観察した。Figure 9 に示すように 2022 年 11 月 15 日より開始し、2023 年 8 月 6 日まで、降雨により上部の接合部から一部破損するまでの 263 日間、小規模仮設空間は構造を保持した。観察の過程では風雨に晒される場面があったものの、支持枠内部の空間によって菌糸材の量を減らしたことで素早く乾燥され、支持枠の表面形状によって菌糸材と一体化した状態を維持することができた。

5.2 ユニット分解性の検証

上記の耐久性・耐候性の検証後、2023 年 10 月 14 日に小規模仮設空間をユニット分解する実験を実施した。本検証は筆者

一人で行い 1 時間 42 分かけて行われた。小規模仮設空間は、溝が入っているチョコレート菓子を手で二つに折る程度の外力を掛けるだけで、道具を使用することなくユニットに戻すことができた。Figure 10(a) はユニット分解後の小規模空間の様子である。

5.3 土壌生分解性の検証

続いて、ユニット分解（解体）されたユニット群を土中に埋め、土壌生分解の実験を行った。慶應義塾大学湘南藤沢キャンパスは、令和 6 年度後期に環境省によって「自然共生サイト」^{27, 28)} の認定を受けており、活発な生態系を維持している。小規模仮設空間を埋土した場所は、クヌギ・コナラといった落葉広葉樹の林があり、秋になると落ち葉が体積し腐葉土のような柔らかい土壌になっている²⁸⁾。2023 年 10 月 14 日から 2024 年 10 月 14 日の 365 日間放置した後、掘り起こして様子を観察した。Figure 10(b) に掘り起こした様子を示す。すでにユニットは非常に脆くなっており、菌糸材による接合が解かれたモジュールに分かれ、掘り起こしを行う過程で一部のモジュールはバラバラになってしまった。比較的モジュールの原形が維持

されていたモジュールを確認すると、ユニット表面を覆いつくしていた菌糸材の大部分は視認できなくなっており、支持枠の表面には土が付着している状態であった (Fig. 11)。残存していた生分解性プラスチックの支持枠は、Fig. 12 のように積層痕から容易に破碎できる状態となっていた。なお、今回先行事例の試験片のように支持枠が完全に生分解されなかった原因として、土中環境の温度が低かったことが考えられる。



Fig. 11 Unit buried for 365 days. The mycelium-based composite had disappeared.

また、掘り起こした支持枠と埋土していない支持枠に対し、目視によって比較を行った。ここでは、型枠の内部の面と、外部の菌糸材と接触する凹凸のある面から切り出した合計4つの試験片（埋土していない型枠の内部の面・外部の面・掘り起こした型枠の内部の面・外部の面）を使用した。Figure 13 に内部の面、Fig. 14 に外部の面を示す。両面とも埋土したものは表面が白く濁っており、埋土する前のつるつるとしたなめらかな手触りから、ざらざらとした凹凸のある感触に変化していることを確認した。

6. まとめと今後の課題

本研究では、使用時には実用可能な耐久性を持ちつつ、使用後はユニット分解し、効率の良い土壌分解性が期待できる設計手法として、生分解性プラスチック支持枠と菌糸材の組み合わせによるユニットの製作と、それを応用した小規模仮設空間の設計手法を提案した。3D プリントした支持枠には、菌糸材との結合を高める波状の表面形状を付与する工夫、内部に空間のある構造にすることで、ユニット分解（解体）後は支持枠の内外から土壌生分解を促進する工夫など、3D プリントの自由度を活かした設計を施した。さらに、再結合性という菌糸材特有の生物学的性質を活用し、使用時には最低限の構造を保つ一方で、簡単にユニット分解可能な、あえて強度の低い接合方法を採用した。

合計 20 組のユニットからなる小規模仮設空間を製作し、公



Fig. 12 Evaluating the manual breakdown process. (a) Before breaking. (b) After breaking.



Fig. 13 Comparison between unburied and buried inner wall segments.

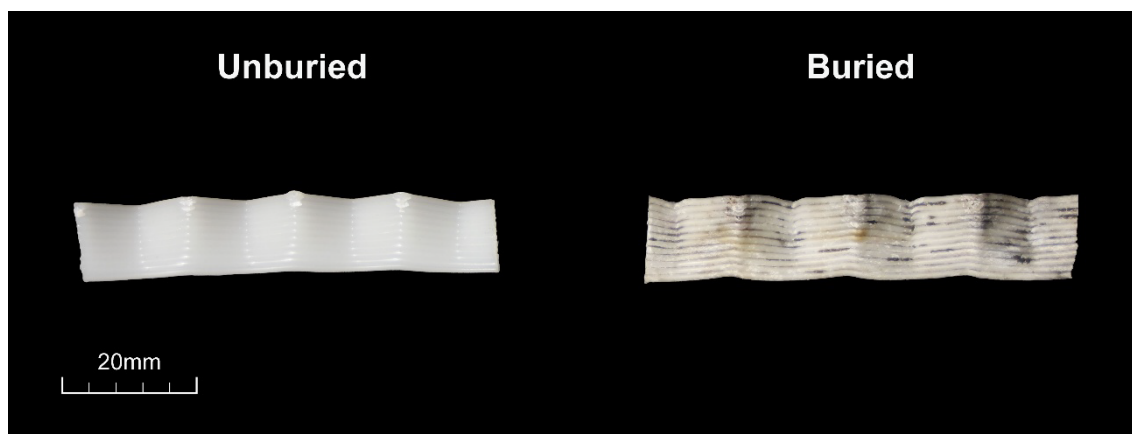


Fig. 14 Comparison between unburied and buried outer wall segments.

開実験と経過観察によって実用性を検証した。さらに小規模仮設空間をユニット分解（解体）、埋土、1年後再度掘り起こし状態を観察するといった、長期にわたる検証を実施した。その結果、ユニット分解性については本設計手法の一定の有用性を確認し、土壌生分解性によるかは断定できないものの埋土することによって、積層層から簡単にバラバラと崩れるほどに劣化したことを確認した。

この検証を通じて、新たな課題も複数考えられる。第一に埋土したユニットに見られる劣化および浸食がどのような作用によって引き起こされたかを特定することが挙げられる。土壌生分解性を確認するためには、埋土している期間中、常に土壌環境の温湿度の計測や、定期的に掘り起こし重量の経過を観察するといったより詳細な実験が必要になる。これらを通して波状の表面形状を付与するという設計工夫が土壌生分解性に寄与しているかについての比較検証もしていきたい。本研究では波状の表面形状を採用したものの、土壌生分解性を向上する上では、3D プリント技術を用いた場合網目状の透過性を持つ表面形状も候補として考えられる。そのため、成型可能な形状のバリエーションやパラメータの調整を踏まえた、土壌生分解性に寄与する最適な表面形状の模索が求められる。

第二に、使用する材料ごとの劣化する速度についても考慮する必要がある。今回は掘り起こした際に支持枠が多く土中に残存する結果となった。これは、材料の性質に起因しており支持枠の形状操作だけでは限界があるため、より土壌生分解性能の高い材料を積極的に採用することが必要であると予想される。そこで、今回使用した生分解性プラスチックに、菌糸材の基材と同じ木材や成長を促進させる米ぬかなどの材料を配合することで、解体後だけでなく使用時にも菌糸によって分解されていく材料の開発を実施していきたいと考えている。

第三に本研究では、分解性能を優先しすぎており、小規模仮設空間の自立する以上の強度に対する検討が不十分である。人がもたれかかる、衝突するといった状況に耐えうる強度を担保し、実用性の高い構造体を製作することが、本研究の応用性を広げる上での検討事項であると考え、本研究は使用する材料の種類を極力減らし、外力を掛けるのみで分解できる接合方法として、菌糸材の再結合性を生かした接合方法を採用した。し

かし、構造物全体の強度を上げる上ではモジュールの外側に木製フレームを付け足し、構造の補強と釘やビスによる比較的強い接合方法を模索していきたい。さらに、今回は複合商業施設という不特定多数の人が活発な活動を行う場所に設置する構造物を製作したものの、菌糸材の強度を考慮するとより静かな活動が多く行われる場所で使われる構造物を製作することも、本研究の応用性を広げる上では検討が必要であると考え、そこで、本研究では取り扱っていない菌糸材の重要な特性として挙げられる、防音性に注目した構造物の可能性も今後は模索していく。この防音性によってノイズを遮断し、自身と向き合う瞑想を行う空間への応用が期待される。

最後に完全に土壌生分解可能であることをコンセプトに掲げる、大型の構造物を模索する動きが活発になりつつある中、材料選定以外でどのような設計工夫が効果的であるか、どれくらいの期間で構造物は完全に生分解されるのかを知ることが必要になる。分解性能を示す上では、使用する材料や構造物の一部から取り出した試験片を用いて、既存の生分解度試験や崩壊性試験を実施することで可能である。しかし、実際に構造物を解体後、自然土壌に埋土することを想定すると、これらの試験のように十分に生分解できる土壌環境を維持することができないことで、完全に分解されない場合があることが本研究を通じて明らかになった。それにより、材料・試験片レベルでは生分解可能であっても、構造物全体の生分解は現実的でない、またはきわめて長い時間を要するといった可能性が考えられる。その意味において本研究の提案するユニット分解性は、構造物を細かくすることで土と触れる面積を増やすだけでなく、十分に生分解できる環境の確保および維持の簡易化にも寄与する可能性がある。そのためユニット分解性のように間接的に生分解性を高める設計工夫を含めた、比較的大型の構造物における新たな土壌生分解性の指標作成が望まれる。

文中に記載のシステム名や製品名は各社の商標あるいは登録商標である。

謝 辞

本研究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 FORZEASTM の材料提供、JST 共創の場形成支援プログラ

ム (JPMJPF211) の支援を受けた。

参 考 文 献

- 1) E. S. L. Vasquez and K. Vega, "From plastic to biomaterials: Prototyping DIY electronics with mycelium," Adjunct Proceedings of the 2019 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing and Proceedings of the 2019 ACM International Symposium on Wearable Computers (UbiComp/ISWC '19 Adjunct), pp. 308-311 (2019). <https://doi.org/10.1145/3341162.3343808>.
- 2) K. W. Song and E. Paulos, "Unmaking: Enabling and celebrating the creative material of failure, destruction, decay, and deformation," Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '21), **429**, pp. 1-12 (2021). <https://doi.org/10.1145/3411764.3445529>.
- 3) Ç. Genç, E. Launne, and J. Häkkinä, "Interactive mycelium composites: Material exploration on combining mushroom with off-the-shelf electronic components," Nordic Human-Computer Interaction Conference (NordCHI '22), **19**, pp. 1-12 (2022). <https://doi.org/10.1145/3546155.3546689>.
- 4) J. Weiler, P. Fernando, N. Siyambalapatiya, and S. Kuznetsov, "Mycelium artifacts: Exploring shapeable and accessible biofabrication," Companion Publication of the 2019 on Designing Interactive Systems Conference 2019 Companion (DIS '19 Companion), pp. 69-72 (2019). <https://doi.org/10.1145/3301019.3325156>.
- 5) F. Bell, L. A. Naimi, E. McQuaid, and M. Alistar, "Designing with alganyl," Proceedings of the Sixteenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction (TEI '22), **2**, pp. 1-14 (2022). <https://doi.org/10.1145/3490149.3501308>.
- 6) K. W. Song, F. Bell, H. Deshpande, I. Mandel, T. Wun, M. Alistar, L. Buechley, W. Ju, J. Kim, E. Paulos, S. Sabie, and R. Wakkary, "Sustainable unmaking: Designing for biodegradation, decay, and disassembly," Extended Abstracts of the 2024 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '24), **489**, pp. 1-7 (2024). <https://doi.org/10.1145/3613905.3636300>.
- 7) Edit by J. Mitani, "Degital Fabrication and Media," 1, Japan, Corona Publishing Co. Ltd. (2024), **174** p, ISBN 9784339013764 [in Japanese].
- 8) MoMA (The Museum of Modern Art), "Young Architects Program 2014 Hy-Fi by The Living," <https://www.moma.org/calendar/exhibitions/3664> (accessed 2025-5-4).
- 9) Company New Heroes, "The Growing Pavilion," <https://companynewheroes.com/project/the-growing-pavilion/> (accessed 2025-5-4).
- 10) BRG (Block Research Group), "Seoul Biennale for Architecture and Urbanism," <https://brg.ethz.ch/research/prototypes/739> (accessed 2025-5-4).
- 11) F. Heisel, J. Lee, K. Schlesier, M. Rippmann, N. Saeidi, A. Javadian, R. Nugroho, T. Mele, P. Block, and D. Hebel, "Design, cultivation and application of load-bearing mycelium components: The MycoTree at the 2017 Seoul Biennale of Architecture and Urbanism," International Journal of Sustainable Energy Development (IJSED), **6**, 1, pp. 296-301 (2018). <http://dx.doi.org/10.20533/ijsed.2046.3707.2017.0039>.
- 12) I. Daigo, M. Sasaki, K. Fujisaki, Y. Matsuno and Y. Adachi, "Method to estimate potential environmental burden reductions by introducing design for disassembly," Journal of Japan Society of Material Cycles and Waste Management, **21** (5), pp. 178-191 (2010) [in Japanese]. <https://doi.org/10.3985/jjsmcwm.21.178>.
- 13) M. Sydor, A. Bonenberg, B. Doczekalska and G. Cofta, "Mycelium-based composites in art, architecture, and interior design: A review," Polymers, **14** (1), 145, pp. 1-21 (2022). <https://doi.org/10.3390/polym14010145>.
- 14) K. K. Alaneme, J. U. Anaele, T. M. Oke, S. A. Kareem, M. Adediran, O. A. Ajibuwa and Y. O. Anabaranze, "Mycelium based composites: A review of their bio-fabrication procedures, material properties and potential for green building and construction applications," Alexandria Engineering Journal, **83**, pp. 234-250 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.10.012>.
- 15) W. Aiduang, J. Kumla, S. Srinuanpan, W. Thamjaree, S. Lumyong and N. Suwannarach, "Mechanical, physical, and chemical properties of mycelium-based composites produced from various lignocellulosic residues and fungal species," Journal of Fungi, **8** (11), pp. 11-25 (2022). <https://doi.org/10.3390/jof8111125>.
- 16) Material Balance Research, "Woven mycelium," <https://www.materialbalance.polimi.it/2021/05/21/woven-mycelium/>, (accessed 2025-2-13).
- 17) E. Özdemir, N. Saeidi, A. Javadian, A. Rossi, N. Nolte, S. Ren, A. Dwan, I. Acosta, D. Hebel, J. Wurm and P. Eversmann, "Wood-veneer-reinforced mycelium composites for sustainable building components," Biomimetics, **7** (2), pp. 3-9 (2022). <https://doi.org/10.3390/biomimetics7020039>.
- 18) R. Kaiser, M. D. Robertson, E. Elsacker and J. Scott, "Knit-mycelium hybrids: Textile design strategies for biofabrication systems based on mycocrete injection in 3D knitted tubular formworks," Journal of Textile Design Research and Practice, pp. 1-26 (2024). <https://doi.org/10.1080/20511787.2024.2389613>.
- 19) SOM Foundation, "MycoKnit: cultivating mycelium-based composites on knitted textiles for large-scale biodegradable architectural structures," <https://somfoundation.com/fellow/davis-ghazvinian-gursoy-oghazian-pecchia-west/>, (accessed 2025-2-13).
- 20) E. Kalenbeek, "Centre pompidou acquires the mycelium Chair for their permanent collection," <https://www.dotunusual.com/>, (accessed 2025-2-13).
- 21) PLP Architecture, "Symbiocene architecture - Building with mycelium," https://issuu.com/plparchitecture/docs/24.10.28_-_designing_with_mycelium_wip_issuu/, (accessed 2025-2-13).
- 22) The Mitsubishi Chemical Group, "Seibunkaisei jushi konpaundo FORZEAS™ ga kaiyo seibunkai ninsho shutoku" [in Japanese]. https://www.mcgc.com/news_mcc/2021/_icsFiles/afieldfile/2021/09/15/20210915forzeasjp.pdf, (accessed 2025-5-4).
- 23) S. Kato, T. Ueda, T. Aoshima, N. Kosaka and S. Nitta, "BioPBS™ (Polybutylene Succinate)," Synthetic Biodegradable and Biobased Polymers, **293**, pp. 269-304 (2023). https://doi.org/10.1007/12_2023_159.
- 24) M. Jones, A. Mautner, S. Luenco, A. Bismarck and S. John, Polymer "Engineered mycelium composite construction materials from fungal biorefineries: A critical review," Materials & Design, **187**, pp. 1-16 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108397>.
- 25) T. Anto, R. C. Rajendran, P. K. Muraleedharan, E. Jayamani, "Effect of Borax-Boric acid treatment on fire resistance, thermal stability, acoustic, and mechanical properties of

mycelium bio composites,” *Applied Science and Engineering Progress*, **17** (4), pp. 1-11 (2024). <http://dx.doi.org/10.14416/j.asep.2023.11.007>.

- 26) M. Chinen, T. Torii, Y. Nagura and H. Tanaka, “Potential of porous structures composed of mycelium and biodegradable plastics,” *Proceedings of Conference on 4D and Functional Fabrication 2021 (4DFF 2021)*, **15**, pp. 61-64 [in Japanese].
- 27) Ministry of the Environment of Japan, “Shizen kyousei saito” [in Japanese]. <https://policies.env.go.jp/nature/biodiversity/30by30alliance/kyousei/>, (accessed 2025-5-4).
- 28) Keio University,” *Keio Gijuku Daigaku Shōnan Fujisawa Kyanpasu (SFC)*”, Ministry of the Environment of Japan. https://policies.env.go.jp/nature/biodiversity/30by30alliance/documents/nintei/R6second26_KeioUniversityShonanFujisawaCampus.pdf, (accessed 2025-5-4).



鳥居 巧

2023 年慶應義塾大学環境情報学部卒業。同年慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科修士課程入学。田中浩也研究室所属



田中 浩也

2003 年東京大学大学院工学系研究科博士後期課程修了。博士（工学）。2005 年慶應義塾大学環境情報学部専任講師。2008 年同准教授。2010 年来マサチューセッツ工科大学（MIT）建築学科客員研究員。2016 年慶應義塾大学環境情報学部教授。経済産業省未踏ソフトウェア開発支援事業・天才プログラマースーパークリエイター賞（2003）。グッドデザイン賞新領域部門など受賞多数