

立体的な培地を用いたマッシュルーム栽培

Mushroom cultivation using a three-dimensional medium

齋藤 鴻樹¹, 小川 純², 渡邊 洋輔²,

エムディ ナヒン イスラム ジブリ², 川上 勝², 古川 英光²

Koki SAITO¹, Jun OGAWA², Yosuke WATANABE², MD Nahin Islam SHIBLEE²,

Masaru KAWAKAMI², Hidemitsu FURUKAWA²

¹山形大学工学部, ²山形大学大学院理工学研究科

¹Faculty of Engineering, Yamagata University, ²Graduate School of Science and Engineering, Yamagata University

【要約】

マッシュルーム栽培は収穫期の速度が早く、生産量に収穫量が追いつかないという課題を抱えている。本研究は、収穫ロスの改善のためにマッシュルームの自動収穫機構の開発を目標とした立体的かつ変形可能な培地を提案する。提案する培地は、弾性異方性をもつ 3D プリント造形物により崩れやすい培土を立体的に保持し、側面および底面からも菌糸成長を許容する構造となっている。この立体培地でマッシュルームが栽培しうるかを検証し、培地の変形を用いてマッシュルームの収穫が可能かどうかを確かめる。成果として、立体的な培地により生産効率の向上させることができ、自動収穫機構により収穫ロス問題の解決が見込まれることを示す。

キーワード: 3D プリンター, 異方性, 自動収穫, 菌糸成長

【Abstract】

Mushroom cultivation faces the problem that the harvest rate does not keep pace with the production volume due to the rapid pace of the harvest season. The goal of this study is to develop an automatic mushroom harvesting systems to improve harvest loss, and here we propose a cubic and deformable culture medium. The proposed medium is constructed using elastic anisotropic 3D-printed structure that hold the crumbly soil in three dimensions and allow mycelial growth from both the sides and bottom. We verify whether mushrooms can be grown in this cubic medium and whether mushroom harvesting is possible using the deformation of the medium. The results show that the cubic medium can improve production efficiency and that an automatic harvesting mechanism is expected to solve the problem of harvest loss.

Keywords: 3D printer, anisotropy, automatic harvest, mycelial growth

1. 緒言

1-1. 研究背景

農業従事者の高齢化を背景に受けて、年々農作物の無人化栽培への需要が高まっている^[1]。目覚ましい進展を遂げる AI/IoT 技術や 3D プリンティング技術を駆使して多種多様な作物の特性に合わせた自動収穫機構の研究開発が盛んに実施されている^[2]。ここでマッシュルーム栽培に着目すると、マッシュルームは図 1 に示す生育過程を経て収穫されるが、図1のステージⅢにおける収穫期の成長速度は著しく、日に 2 倍程度に大きくなる個体があることが知られている。そのため適切な収穫時期を見定めつつ、広大な耕地から手作業で収穫するためには、多くの人手と人件費を必要とする。オランダに代表される諸外国では、人件費が比較的安価で広大な土地を確保できる他国を拠り所にマッシュルーム栽培を展開し、コスト負担を抑えた人海戦術で多大な収穫量を実現している。日本でもマッシュルーム栽培は盛んであるが、日本の占める国土は諸外国と比較すると狭く、前述のような大規模な農業を展開しづらく、若年層の農業離れの影響で慢性的な人手に直面している課題がある。しかし、国内のマッシュルーム栽培がオランダなどの諸外国と同等の経済効果を生むには、現在

の 5 倍以上の収穫量が要求される。大規模な農業展開が困難で、自国で人件費も負担しなければならない状況において、この収穫目標を達成するには革新的な自動収穫機構が必須である^[2]。

現在の農作物の自動収穫は、ピッキングロボットが担う事例^[3]がほとんどであり、マッシュルームにおいても同様である^[4]。しかし、マッシュルームは、群生の性質をもち、生長方向が不定であり、柔らかく、傷みやすいため、品質を維持したままピッキングすることは難しい。またピッキングロボットによるマッシュルーム収穫の研究事例は報告されているが、大型のロボットの導入が必要などの制約もあり、参入障壁は高い^[5]。

1-2. 研究目的

前節の背景を受けて、本研究は変形可能な立体的な培地を用いたマッシュルーム栽培を提案する。この立体的な培地は、マッシュルームの発生点を上面のみに限らず、立方体の側面と下面も発生点として活用することにより、従来の平面のみの培地と比較して最大 6 倍の収穫量が期待できる。また、この培地は内部に 3D プリンターで作製された異方弾性をもつ支持構造を有しており、培土を立方体形状に保持しつつ、特定方向の圧

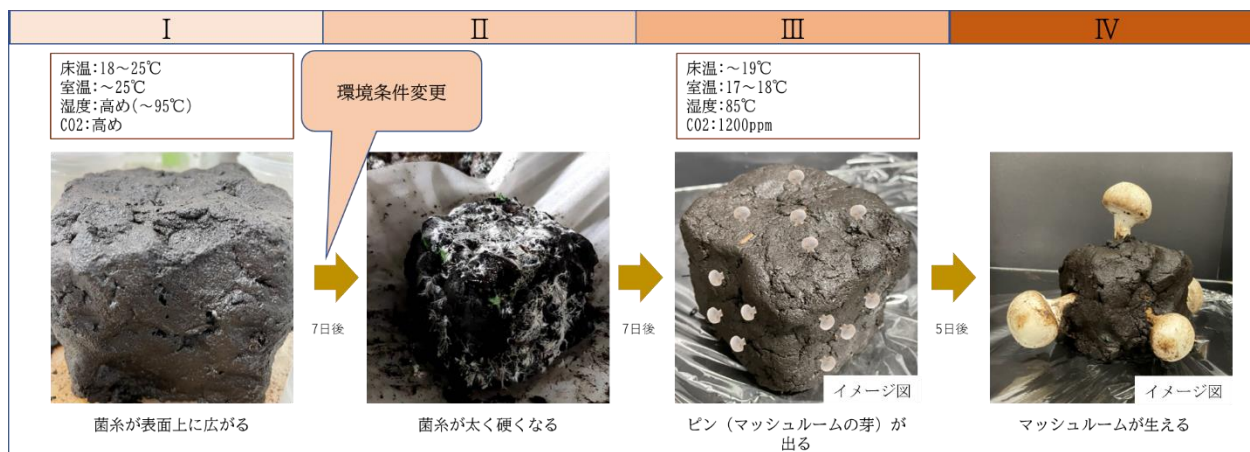


図 1. マッシュルームの生育段階

縮により変形が生じる。この変形により培地を規定された変形に沿って崩壊させ、マッシュルームが生えている部分の培地を剥落されて収穫することを狙う。

2. 異方弾性支持構造を駆使した立体培地

2-1. 基本骨格および機能

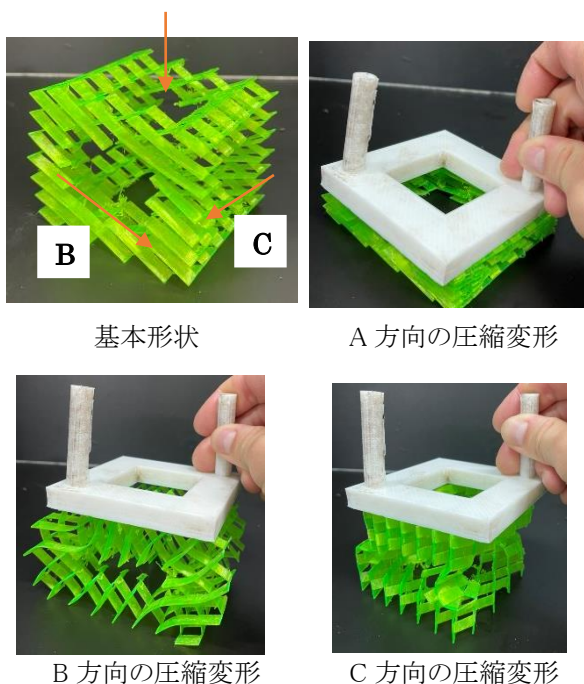


図 2. 異方弾性支持構造の基本形状と変形の様子

本実験の立体的な培地は、マッシュルーム菌がついている藁を主原料とした菌床、覆土として扱われるピートモス、収穫のための変形と形状保持を行う 3D プリンターで作られた異方弾性支持構造の 3 つから構成されている。異方弾性支持構造の基本形状と圧縮収穫機による変形の様子を図 2 に示す。異方弾性支持構造は FDM 方式の 3D プリンター (QIDI TECH 製 3D プリンター x-pro) で作製した。フィラメントは熱可塑性ポリウレタン (以下 TPU, SainSmart 製 3D プリンター TPU フィラメント 緑 1.75mm 径) という弾力性があり、柔らかいものを使用し

ている。また、この異方弾性支持構造を造形する際にサポート材として水溶性サポート材 (eSUN 製 PVA 1.75mm) を用いた 2 色造形を用いて作製している。構造としては、特定方向でのみ規則的に収縮する異方弾性構造を基とし、菌床を入れる空間 (中心部) と各面にマッシュルームの生長を阻害しないように覆土を被せる空間 (各面部) を備えたものとなっている。柔らかい TPU で作製した板を小さな点で接続させることで変形しやすい構造になっている。それに加え、板の交差に角度をつけることで図 2 の A 方向に外力を加えた場合は一軸収縮するが、B および C 方向から圧縮した場合は不規則な座屈が生じる。

立体的な培地の作り方としては図 3 に示すとおりである。まず異方弾性支持構造の中心部に菌床を詰め、その菌床を包むように各面部に覆土を被せる。その後、全体をさらに覆土で包み込むことで作製できる。この方法により、異方弾性支持構造によって培地を最低限度体積で十分な形状保持を実現しつつも、各面からマッシュルームが生えてくる培地条件を作り出すことができる。

2-2. 培地変形による収穫アプローチ

提案する立体的な培地の十分に生かすためには上下面にもマッシュルームが生長する空間を確保しつつ、圧縮により全方向から発芽したマッシュルームを傷つけずに収穫するアプローチが求められる。そこで、異方弾性支持構造がある部分のみ圧縮できるように穴あきの圧縮機を作製する。この圧縮機により、マッシュルームを傷つけることなく培地の圧縮変形を生み出し、異方弾性支持構造で保持できる培地が減少させて各面の覆土が押し出すことでマッシュルームを剥落させて収穫できる。また、圧縮により押し出されるのは主に周辺を覆っている覆土であるので、中の菌床は異方弾性支持構造に保持されたままであり、再度次の栽培に使用可能である。菌床の交換目安は 3 回となっている。

また、図 4 に示すように菌床と覆土のみを用いて作製した立体的な培地との比較も行った。製作段階での比

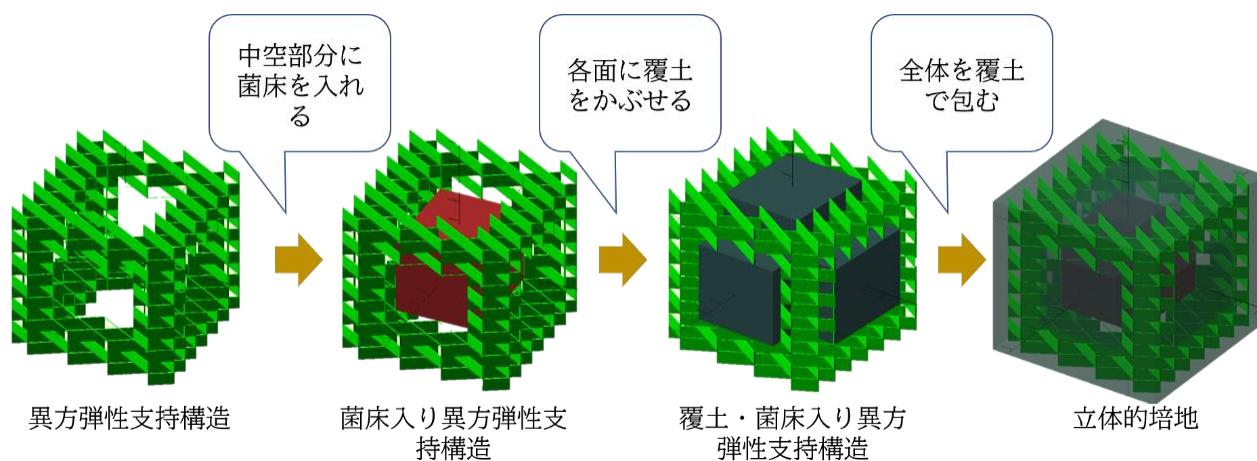


図 3.立体的培地の作り方

較としては、異方弾性支持構造を持たないものは立方体の形状を維持すること自体が難しく製作が困難であった。それに加え、菌床と覆土の位置関係の目安がないため、各面に対して均等なバランスで培地を作製ことが困難である。収穫に関しては、培地を崩すことは支持構造の有無にかかわらずどちらも十分な変形が得られた。しかし、支持構造をもたない場合では、菌床と覆土が混ざってしまい菌床の回収が困難である。それに加え支持構造をもたない場合では、常に決まった形で培土が崩壊しないため、収穫精度が判断しづらい。

図 4.支持構造の有無による圧縮収穫の比較
(左:支持構造有り 右:支持構造無し)

2-3. 立体培地による菌糸成長

マッシュルームが生えてくるためにはマッシュルームの菌が広がっている菌床と、十分に水分を含んだ覆土が必要である。また、栽培の環境条件はマッシュルームの生育可否を決定づける重要な要因となる。図1のステージ I に表される菌糸が菌床から伸び、表面上に広が

る段階では、床温 18～25℃、室温 25℃以下、湿度 95℃程度、CO₂ はなるべく高濃度を維持することが理想である。図 1 のステージ I が進んでいき菌糸が表面に十分広がった後は、床温 19℃以下、室温 17～18℃、湿度 85℃、CO₂ 濃度は 1200ppm に環境を変更することで、ステージ II への成長誘導を行うことができる。これらのパラメータはマッシュルームの成長に合わせて都度調節が求められる。本稿における培地周りの環境管理は低温恒温チャンバー(EYELA 製 FMC-1000)を用いている。また、湿度の管理はビニールカバーでの湿度減少の防止や、定期的な霧吹きでの水分供給によって調節している。

菌糸が覆土を超えて表面にまで上がってくるには菌糸が通ることのできるすきまが必要である。従来の平面でのマッシュルーム栽培ではゴルフボールほどのサイズの 1 粒の覆土を押し付けずに菌床の上に乗せることですきまを作り出している。しかし、本研究では立方体の形状を保持する必要があるため、覆土を押し固める必要がある。そのため、覆土を十分に押し固めた後、細い針で土を掘り起こし、割れ目ができるように表面から菌床まで菌糸の通り道を作る。この方式により、提案する立体的な培地は図1のステージ II までの菌糸成長を実現できることが明らかとなった。

3. 考察

立体的な培地の懸念点としては、異方弾性支持構造が菌糸の成長を阻害することが挙げられる。支持構造が物理的な障壁として働いてしまい、菌糸の成長を阻害する確率が高くなると推測される。この点を考慮し、提案の支持構造は菌糸成長の領域を広げるためには、構造化の最小単位にくびれをもつような構造により解決が期待できる。図5に本稿で採用した支持構造とくびれをもつ支持構造を比較したものを示す。くびれをもつ支持構造は体積が減少し、空間全域に菌糸が成長しうる部分を増やすことができる。

また、図 6 に示すようにマッシュルームの菌糸の伸び方には上下の概念がなく、菌床と覆土の関係が理想的

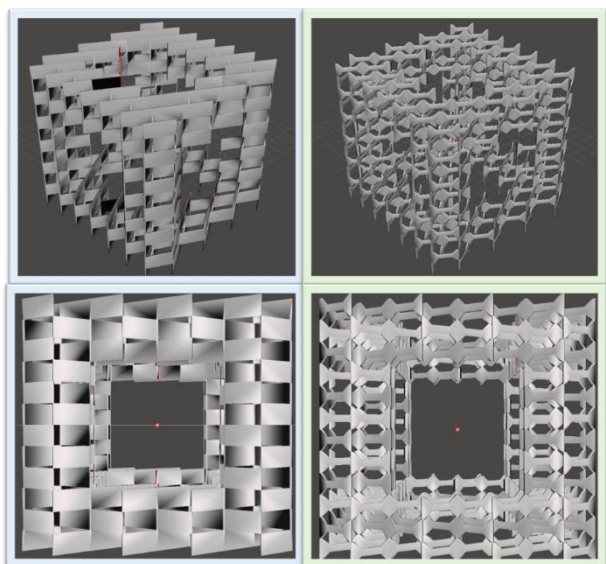


図 5. 菌糸成長を促す構造設計の比較

であれば横にも伸びる。提案する培地はすべての面における菌床と覆土の配置関係は同じであるため、すべての方向に生長する可能性は十分であると予測される。また、現在使用している覆土は粘度が高く土自体の保持力が強く、密度の低い異方弾性支持構造でも培地の保持が可能である。しかし、ほかの粘度が弱く、粒度が大きいものと、本稿の異方弾性支持構造では保持できなくなる可能性が高い。そのため保持面積を拡張するなど、対象とする倍土に応じて立体保持に足る異方弾性支持構造の再設計が必要である。

異方弾性支持構造は熱可塑性ポリウレタン製のため材料に依存した復元力を持っており、変形後に少し時間を置くと基本の形状に戻ることができる。しかし、培地を詰めた状態で圧縮すると、培地の重みと覆土の粘り気の影響で自力での復元が困難である。復元させるためには圧縮後に周りに残った覆土を振り落とすことで基本形状に戻ることができる。この点においては図 5 のように改良した密度の低い異方弾性支持構造の方が土の出口が大きく、復元は比較的簡単になると推測される。

また、異方弾性支持構造を2色造形で作製しているため、造形時間が長くなってしまう。立体的な培地は単体での使用ではなく複数個結合させての使用を想定しているため、大量生産の観点からは長すぎる造形時間も課題として挙げられる。また、培地周りの環境管理に用いている低温恒温チャンバー(EYELA 製 FMC-1000)では、温度の調節しかできない。したがって、現状では湿度 80~90℃程にしか保てないため効率的な菌糸成長の促進のためより高湿度を保てる方法の開発が必要である。

4. 結言

本稿は3Dプリンターによる異方弾性支持構造を埋め込んだマッシュルームの立体的な培地設計と変形によ



図 6. マッシュルームにおける平面栽培と立体栽培

る収穫方法の検討を実施した。提案する培地がマッシュルームの菌糸成長を促し、培地の剥落をコントロールできることを示した。本稿で報告した異方弾性支持構造は、変形方向の外力では破損しにくいがその他の方向の力には弱く、板同士の結合が取れてしまう課題も発見された。そのため今後の展開としては、頑健で大変形する支持構造に改良することでマッシュルームの収穫量向上に貢献するとともに、別種の菌糸成長や植物における立体的栽培の検討を推し進める。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 JP18H05471, JP19H01122, JP21H04936, JP21K14040, JP22K17972, JST OPERA JPMJOP1844, ムーンショット農林水産研究開発事業(MS508, JPJ009237), 内閣府が進める「戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)第2期/フィジカル空間デジタルデータ処理基盤」, 「官民による若手研究者発掘支援事業」(管理法人:NEDO)によって支援を受けたものである。

参考文献

1. Zhang, Chi and Noguchi, Noboru “Development of a multi-robot tractor system for agriculture field work” (2017)
2. Tao, Yongting and Zhou, Jun “Automatic apple recognition based on the fusion of color and 3D feature for robotic fruit picking” (2017)
3. King, Anthony “Technology: The future of agriculture” (2017)
4. J. N. Reed; S. J. Miles; J. Butler1; M. Baldwin; R. Noble “Automatic Mushroom Harvester Development” (Received 4 December 1999; accepted in revised form 8 August 2000, published online 24 October 2000)
5. Muscato, Giovanni and Prestifilippo, Michele and Abbate, Nunzio and Rizzuto, Ivan “A prototype of an orange picking robot: past history, the new robot and experimental results” (2005)