

キノコ由来菌糸パルプの機能性と物性解明

信州大学工学部 田川聡美
(受給時：宮崎大学工学教育研究部所属)

研究の目的と意義

近年、バイオエコノミーの観点から、環境負荷の低い再生可能な材料を見出す動きが世界的に活発化している。その中で、キノコ（担子菌）由来の素材が新たなバイオベース材料として注目されている。キノコはキチン、 β -グルカン、 α -グルカン、タンパク質などの成分を主に含み、これらは自然に再生することが可能な材料であり、持続可能な社会の構築に貢献する可能性を秘めている。さらに、 β -グルカン類が持つ免疫賦活作用や血糖値抑制効果など、機能性成分としての価値も高く、健康食品・化粧品・食品素材としての応用も期待される。

キノコ由来材料の研究開発は、世界的には菌糸体を培養するボトムアップ型のアプローチが主流であり、包装材料・防音材・人工皮革・繊維フィルムなど多様な製品が生産されている。しかしながら、培養環境の制御や材料の均一性確保が課題であるほか、キノコに含まれる色素を完全に除去できないため、製品が茶色やオレンジ色になるという問題もある。一方、既存のトップダウン型の手法では、キノコの有用成分を除去した上で菌糸を微細なレベルまで破壊して利用するため、均一性は担保されるものの、菌糸が本来持つ自然の機能を最大限に活用できていない。

これに対し申請者らは、菌糸の構造を保ったまま子実体から白い菌糸繊維、すなわち菌糸パルプを製造する独自のトップダウン型手法を開発した。本手法は従来の手法と比べて簡便であり、色素の影響を排除できるため白色の繊維が得られる点が特徴である。また、食用・栽培用を問わず利用可能であり、菌床栽培の収穫残渣を原料とすることもできるため、キノコ産業における廃棄物の再利用（アップサイクル）という課題解決にも貢献しうる。本技術については国内特許出願済みであり（特願 2023-113715）、論文としても発表している（Nakauchi H., Amano Y., Tagawa S., ACS Sustain. Chem. Eng. 2023）。

本研究では、この菌糸パルプの繊維材料としてのポテンシャルを明らかにすることを目的として、①成分分析（ β -グルカン・キチン等の残存確認）、②パルプ化条件の最適化と繊維サイズ制御（マイクロ・ナノスケール繊維の調製）、③スラリーの物性評価、の 3 課題に取り組んだ。これらの基盤的知見の蓄積は、健康食品・化粧品・衛生材料など幅広い産業分野への応用展開に向けた重要なステップとなる。

材料と方法

1. 実験材料

長野県産の市販のレイシ（*Ganoderma lucidum*）の子実体を実験材料として用いた。

2. 菌糸パルプの調製

NaOH（250–500 mM）および過酸化水素（15–30%）を混合した溶液にレイシ子実体を浸漬し、同時処理することで漂白した子実体を調製した。処理後、洗浄・ろ過を行った。その後、ブレンダーによる解繊処理を行い、菌糸パルプが水に分散した状態のスラリーを得た。

3. 成分分析（課題 1）

菌糸パルプのキャスト乾燥フィルムを試料として用いた。X 線回折（XRD）測定を Smart Lab（リガク社）を用いて行い、細胞壁成分の同定を試みた。測定条件は CuK α 線（波長 1.5406 Å）、管電圧 40 kV、管電流 30 mA、測定範囲 $2\theta = 5.0^\circ$ – 40.0° 、スキャン速度 $4.0^\circ/\text{min}$ 、ステップ幅 0.01° とした。

4. 繊維サイズ制御（課題 2）

NaOH および過酸化水素による同時処理後の漂白子実体に対し、ブレンダー処理および超音波処理（UDS-200、トミー精工；最大出力 200 W、発振周波数 20 kHz、出力 60–80%）を単独または組み合わせて適用し、繊維の解繊・微細化を試みた。超音波処理時間は 10–30 分とした。解繊前後の試料を落射蛍光顕微鏡（BX43、オリンパス；DAPI フィルター）および透過型電子顕微鏡（TEM）により観察し、繊維の構造変化および繊維径を評価した。

5. 物性評価（課題 3）

菌糸パルプ由来ナノファイバーのスラリーについて、レオメーター（MCR-302、アントンパール社；コーンプレート CP50-1）を用い、25°C でフローカーブ測定およびチキソトロピー試験を行った。

結果と考察

1. 菌糸パルプの成分分析（課題 1）

菌糸パルプの XRD 測定を行ったところ、 $2\theta \approx 12.0^\circ$ および 19.0° にキチンの(011)および(110)面に由来する回折ピークが確認された。さらに、 $2\theta \approx 6.0^\circ$ に β -1,3-グルカンのトリプルヘリックス構造に特徴的なピークが認められた。これらの結果から、本手法で調製した菌糸パルプが、菌糸細胞壁の主要構造多糖であるキチンおよび β -1,3-グルカンを持していることが示唆された。現時点では初期データであり、定量的な成分分析および多種キノコとの詳細な比較については今後の課題とする。

2. パルプ化条件の最適化と繊維サイズ制御（課題 2）

当初計画では、アルカリ処理・過酸化水素処理・UV 照射の 3 段階処理を想定していた。しかし、NaOH と過酸化水素を混合して同時処理することで、酸化反応が効率的に進行することが明らかとなり、UV 照射工程が不要であることが判明した。また、試薬濃度を 250–500 mM (NaOH) および 15–30% (H_2O_2) の範囲で検討した結果、既報と比較して低濃度条件でも同等の結果が得られることが示され、処理時間の短縮および洗浄操作の簡略化が実現した。

繊維の微細化については、当初超音波処理単独で検討していたが、ブレンダー処理との組み合わせを導入することで解繊過程における構造変化の詳細な評価が可能となった。ブレンダー処理単独では菌糸の構造を明確に保持した分散物が得られたが、これに超音波処理（10–30 分）を組み合わせることで、段階的な微細化の進行が観察された。蛍光顕微鏡では微細化後の試料の詳細観察が困難であったため、透過型電子顕微鏡（TEM）を用いて観察した結果、数ナノから数十ナノメートルの菌糸パルプ由来ナノファイバーが認められた。これにより、処理条件の調整によってナノ～マイクロスケールの繊維径を制御できることが示された。また、マイクロファイバーとナノファイバーが混在する構造も得られることから、用途に応じた機能設計が可能であると考えられる。

なお、FT-IR 測定の結果、菌糸パルプおよびそのナノファイバーはグルカン類を多く含むことが示唆されており、菌糸細胞壁成分として知られる β -1,3-グルカンとキチンからなる複合繊維である可能性が高い。詳細な成分分析については現在進行中である。

3. 菌糸パルプスラリーの物性評価（課題 3）

菌糸パルプ由来ナノファイバーのスラリーについてフローカーブ測定を行ったところ、せん断速度の増加に伴う粘度変化が観察され、降伏応力を有することが示唆された。また、チキソトロピー試験により、高速せん断後に粘度が回復するチキソトロピー的挙動が確認された。これらの流動特性は、ナノファイバーが分散系中で構造的なネットワークを形成していることを示唆しており、塗工材料や食品素材としての応用を検討する上で重要な基礎的知見である。シート成形および引張強度・撥水性の評価等については今後の課題とする。

まとめ

本研究では、レイシを材料として、菌糸パルプの機能性と物性の解明に向けた 3 課題に取り組んだ。XRD 測定により、菌糸パルプにキチンの(011)および(110)面に由来するピーク、ならびに β -1,3-グルカンのトリプルヘリックスに特徴的なピークが確認され、本技術が菌糸細胞壁の主要構造多糖を保持した繊維を与えることが示唆された。パルプ化条件の検討では、NaOH と過酸化水素の同時処理による製造プロセスの大幅な効率化を達成し、UV 照射工程が不要であることを明らかにした。また、ブレンダー処理と超音波処理の組み合わせにより、TEM 観察にて数ナノから数十ナノメートルの菌糸パルプ由来ナノファイバーが得られることが確認され、ナノ～マイクロスケールの繊維径制御が可能であることが示された。さらに FT-IR の結果から、グルカン類を多く含む複合繊維である可能性が示唆された。スラリーの流動特性評価では、降伏応力の存在とチキソトロピーの挙動が確認され、本材料がネットワーク構造を形成していることが示唆された。今後は定量的な成分分析の完了、シート成形体の機械的物性評価、および複数のキノコ種への展開を進める予定である。

※ 本報告に含まれる成果は現在論文投稿を準備中であるため、図表の掲載を控えております。ご了承ください。+

学会発表・紹介記事

解説

田川聡美、中内宙弥、天野良彦、「新規マイコマテリアルとしてのキノコパルプ：キノコ由来の非植物性繊維」、Cellulose Communications、研究ニュース、vol.33、no.1、2026.

学会発表（すべて被助成者による口頭発表）

1. 中内宙弥、天野良彦、田川聡美、「キノコ由来の新素材“白色菌糸パルプ”の創製」、日本きのこ学会第 27 回大会、鳥取、2024 年 9 月.
2. Satomi Tagawa, “Utilizing Unused Mushroom Resources: Upcycling into Mycelium Pulp for Sustainable Material Innovation,” The Korean Society of Mushroom Science 20th Anniversary Symposium, Seoul, Korea, 2024 年 10 月. (依頼講演)
3. 田川聡美、天野良彦、中内宙弥、「キノコを原料とする非植物性繊維：キノコパルプ」、セルロース学会第 32 回年次大会、札幌、2025 年 7 月.
4. 田川聡美、「キノコから広がる新素材：持続可能な社会を拓くマイコマテリアル」、バイオナノマテリアルシンポジウム 2025ーアカデミアからの発信ー/第 559 回生存圏シンポジウム、京都、2025 年 11 月. (依頼講演)
5. 田川聡美、「キノコが拓く未来のモノづくりー「分解者」から「素材生産者」への転換とキノコパルプの創製」、伊那谷アグリイノベーション推進機構 第 9 回菌類勉強会、長野、2026 年 3 月. (依頼講演)

謝辞

本研究の遂行にあたり、研究助成をいただきました一般財団法人杉山産業化学研究所に深く感謝申し上げます。