

キノコの食感を生み出す組織化学的要素の解明

信州大学工学部物質化学科 田川聡美

(2025 年 3 月現在の所属：宮崎大学工学教育研究部応用物質化学プログラム)

研究の目的と意義

キノコはその旨味・香り、独特の食感から古来より食材として親しまれてきた。さらに、免疫機能の向上や栄養源として健康に寄与している。担子菌は菌糸体を形成し、最終的に多様な形状・物理特性を持つ子実体を作る。この特性を活かし、近年では肉の代替材料としての利用も試みられているが、キノコ特有の食感を生む組織構造や成分分布の知見はまだ乏しい。そこで本研究では、キノコ子実体の物性と組織構造の関連を調査し、その食感を生み出す要因を解明することを目的とする。また、キノコの菌糸は成長時のエネルギー消費が低く副産物もほばないため、バイオベース材料としての利用も進んでいる。物性と組織化学的特徴の相関が明らかになれば、材料設計や食感のデザインが可能となり、新規材料創出へと繋がる。本研究は、キノコの食利用の拡大と、バイオベース材料開発の基盤確立に寄与する。

材料と方法

1. 実験材料

食感の異なるエノキタケ (*Flammulina velutipes*) 2 種類 (野生株と栽培株) を用いた。具体的には、市販の柿の木茸およびえのき茸 (信州森のきのこ工房) を購入し、子実体の柄を用いた (図 1)。柿の木茸は茶色を呈し、より野生のエノキタケに近い株である。以降、柿の木茸を茶エノキ (野生株)、えのき茸を白エノキ (栽培株) と表記する。



図 1 使用したエノキタケ
(左) 柿の木茸、(右) えのき茸

2. 組織切片試料の作製

試料を 4% パラホルムアルデヒドで固定後、PBS で洗浄し、エタノールで脱水した。キシレンで置換し、75° C のパラフィンに浸透・包埋した後、リトラトームで切片作製し、カルコフローホワイトで染色。切片をスライドガラスに展開し、封入後、落射蛍光顕微鏡で観察した。

3. エノキタケ断面の蛍光顕微鏡観察

茶エノキ・白エノキの柄の組織構造の違いを明らかにするため、横断面切片を落射蛍光顕微鏡 (OLYMPUS BX51) で観察。励起波長 330-385 nm、検出波長 420 nm 以上のフィルターを使用し、ImageJ Fiji で菌糸の面積・密度を解析した。

4. 破断強度測定

長さ 2 cm の柄を各 30 個測定。クリープメーター（YAMADEN RE2-33005B）および専用解析ソフト（BAS-3305）を使用。プランジャー（13 mm×30 mm×25 mm、30°）の移動速度 1 mm/sec、測定歪率 100%、測定点数 300 個。菌糸方向に対して垂直・平行の 2 方向で測定し、接触面積を以下の式で算出した。垂直方向：柄の幅 × プランジャー面積（1 mm）、平行方向：柄の長さ（2 cm） × プランジャー面積（1 mm）。以上の手法により、エノキタケ子実体の組織構造と物性を解析した。

結果と考察

1. 組織化学的特徴の比較

茶エノキ及び白エノキの柄の組織構造の違いを明らかにするために、柄の横断面蛍光顕微鏡観察し、画像解析を行った。茶エノキと白エノキの柄の横断面を蛍光顕微鏡で観察した像の一例を図 2 に示した。これはカルコフローホワイトの蛍光像で、菌類の細胞壁に含まれるキチンや β -グルカンが染色されている。まず、エノキタケの柄の中央部分が中空であることが確認された。中空の維管束様構造は、軽量性を保持しつつ強度を確保することが可能であり、エノキタケが長く成長し続けることを可能にしていると推察される。

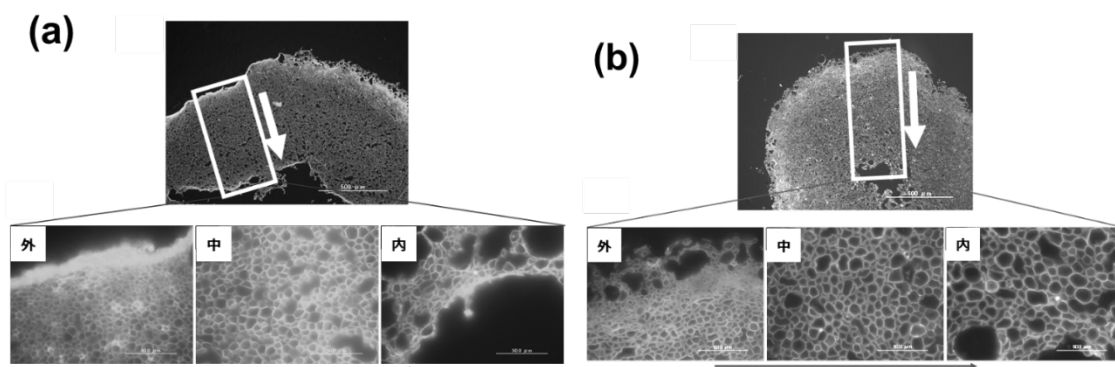


図 2 エノキタケの横断面切片の蛍光観察像。

カルコフローホワイトの蛍光像を示す。下図は上図の拡大像、(a)茶エノキ、(b)白エノキ、拡大像のスケール:50 μ m。白矢印は黒矢印の方向に対応。

菌糸の直径や密度にはばらつきが認められたため画像解析を行い、菌糸の面積と菌糸数密度を測定した。その結果、菌糸面積は、両エノキに共通して、外側よりも内側の方が大きいことが判明した（図 3）。また、茶エノキ（図 3a）よりも白エノキ（図 3b）の方が、菌糸面積が大きい傾向が認められた。加えて、茶エノキと比べ、白エノキの面積はばらつきが大きく、不均一であることが分かった。菌糸数密度は、内側よりも外側の方が高く、白エノキよりも茶エノキの方が高かった。よって、茶エノキは菌糸が小さく密に集合しており、白エノキは菌糸が大きく疎であることが明らかとなった。このように、子実体の外部と内部で菌糸体の大きさに違いが見られ、子実体は均一な菌糸の集合体ではなく、簡易的な組織構造を有していることが明らかになった。この事実は、きのこの子実体の組織構造を研究する意義を示している。

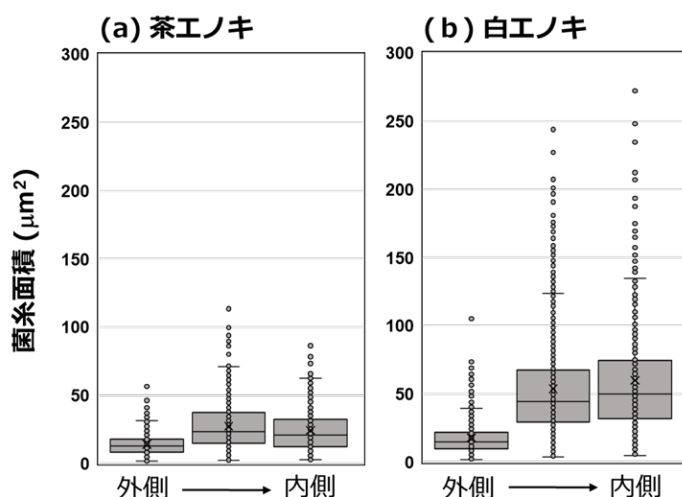


図 3 菌糸面積の箱ひげ図

(a)茶エノキ、(b)白エノキ、 外側は柄の外側、内側は柄の中心部を意味する。

2. エノキタケ子実体の破断強度測定

組織観察で認められた子実体の柄の組織構造が、物性にどのように関連しているのかを理解するために、エノキ子実体の破断強度測定を行った。具体的には、柄の長軸方向に対して垂直方向と平行方向の2方向に力を加え比較した。

図 4a に示すように、エノキタケの柄に垂直方向の力を加えると複数の破断点が生じた。一方、長軸方向に平行な力では破断点の一つだけだった(図 4b)。この違いは、菌糸の配向によるもので、垂直方向では複数の菌糸が破壊されるのに対し、平行方向では引き裂かれるように破断するためと考えられる。このような構造的特性は、エノキタケが外部からの力に対してどのように応答するかを左右する要因と考えられる。

さらに、茶エノキと白エノキの破断挙動を比較すると、破断点の数には有意差がなかったが、破断強度には有意差があり、白エノキの方が強度が高かった。また、白エノキの破断強度のばらつきは茶エノキより大きく、これは菌糸面積のばらつき(図 3b)と関連している可能性がある。

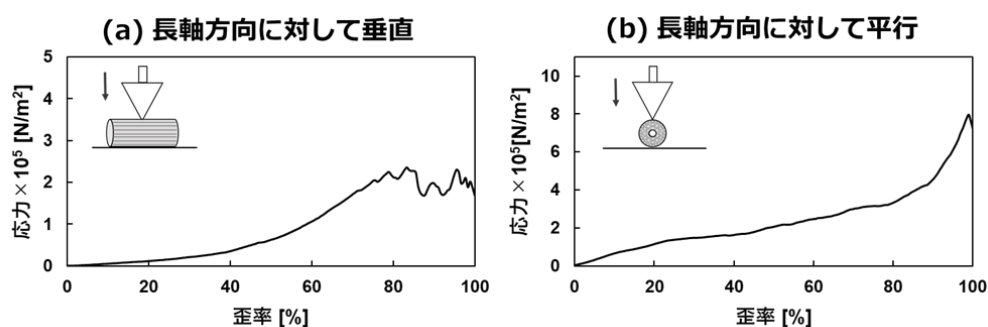


図 4 歪み-応力グラフの一例 (茶エノキ)

(a)柄の長軸方向に対し垂直、(b)柄の長軸方向に対し平行。

長軸方向に平行な力を加えた場合の破断強度を比較すると、茶エノキの最大応力平均は $6.77 \pm 0.95 \times 10^5$ [N/m²]、白エノキは $5.23 \pm 0.54 \times 10^5$ [N/m²] となり、茶エノキの方が破断強度が高いことが分かった。この違いは、菌糸同士の結着性や菌糸密度が影響していると考えられる。結着性に関与する可能性のある成分として、マンノプロテイン、ハイドロフォビン、 β -1, 3-グルカンが挙げられるが、これらの詳細な解析は今後の課題とする。

3. 菌糸マットの試作

キノコは子実体だけでなく菌糸体の状態でも利用されている。そこで、エノキタケの子実体と菌糸体の組織構造や物性を比較し、それぞれの材料特性を明らかにするために、菌糸シートの試作を行った。エノキタケをアルカリと過酸化水素で処理し、ミキサーで分散させたが、紙漉きの要領でシート化を試みたものの、濾水効率が悪く成功しなかった。シート作製の方法を確立することが今後の課題である。さらに、培養による菌糸シートの作製も試みたが、現時点では薄い膜状のものしか得られておらず、より厚みのある膜を形成する培養条件の確立が必要である。

まとめ

本研究では、エノキタケ（白エノキ・茶エノキ）の組織構造と破断強度を解析し、菌糸の密度や配向が物理的特性に影響を与えることを示した。特に、茶エノキは白エノキよりも菌糸の密集度が高く、結着性が強いいため、破断強度にも優れていた。また、エノキタケの柄には中央に中空構造が存在し、軽量性と強度維持に寄与していることが示唆された。

今後の課題として、菌糸シートとの比較を行い、より詳細な材料特性の評価を進める必要がある。また、他の種類のキノコとの比較を通じてデータベースを構築し、より広範な応用可能性を探ることが求められる。

本研究で明らかになった中空構造と菌糸の配向は、エノキタケの食感や物理的特性に密接に関係し、バイオベース材料としての利用を促進する可能性がある。特に、これらの構造的特徴が食感や強度に大きく関与することが確認されたため、今後の材料研究や応用において貴重な知見となる。

学会発表・論文発表

高橋茉那、中内宙弥、水野正浩、天野良彦、田川聡美、“2 種のエノキタケ子実体 (*Flammulina velutipes*) の組織構造と物性の比較”、日本きのこ学会 2023 年度大会、2023 年 8 月、奈良。

現在、日本きのこ学会誌に本研究に関連する論文を投稿中である。

謝辞 本研究遂行にあたり、本研究をご支援いただきました一般財団法人 杉山化学研究所に深く感謝申し上げます。