

エノキタケ菌床栽培におけるシイタケ廃菌床の利用 －炭酸カルシウムの添加効果－

清水達哉¹

要旨：スギおが粉を基材とするエノキタケ菌床栽培において、シイタケ廃菌床の利用可能性と炭酸カルシウムの添加効果を検討した。廃菌床の置換率（容積率）を0、25、50、100%とし、炭酸カルシウムの添加の有無を比較した結果、25%置換、25%置換と50%置換に炭酸カルシウムを添加した条件では、対照群と同等の収量および生育日数で栽培可能であった。一方、100%置換では収量が低下し、全量置換は困難であると示された。収量低下の要因は、廃菌床の混合による培地pHの低下と菌回りの遅れと考えられた。特にシイタケ廃菌床を含む培地においては、炭酸カルシウムの添加による増収効果が顕著であり、pH調整剤としての有効性が示唆された。

キーワード：チクマッシュ T-011, スギおが粉, pH調整剤, 培地基材, 資源の循環利用

I. はじめに

エノキタケ (*Flammulina velutipes*) は日本における主要な食用きのこの一つであり、長野県や新潟県を中心に年間約13万t生産されている（林野庁 2024）。エノキタケの栽培方法には菌床栽培と原木栽培がある（山本 2001）が、現在ではほとんどが菌床栽培によって行われている。

菌床栽培による食用きのこの生産増加に伴い、大量の廃菌床が排出されるようになった（村上 2014）。これら廃菌床の一部は有機肥料などとして再利用されている（寺嶋 2009）が、大半は廃棄物として取り扱われており、有効な用途開発が望まれている（村上 2014）。また、廃菌床を菌床栽培に再利用できれば、おが粉などの原材料費のコストダウン（寺嶋 2014；高島 2021）、資源の有効利用、環境保全に寄与する（高島 2021）と期待される。

エノキタケ菌床栽培において、廃菌床を培地基材と置換して利用可能か検証した研究はいくつか存在する。例えば清水（2025a）は、スギ (*Cryptomeria japonica*) おが粉を培地基材としたエノキタケ菌床栽培において、コーンコブミール主体の配合培地で栽培されたエノキタケ廃菌床の利用可能性を検証した。その結果、スギおが粉の容積率10～50%の置換であれば、対照培地の同程度以上の収量が期待できたが、70%以上になると収量が減少したことを報告している。また、清水（2025b）は、同様のエノキタケ菌床栽培において、ナメコ (*Pholiota*

microspora) 廃菌床の利用可能性を検証した。その結果、スギおが粉の容積率10～50%、および100%の置換であれば、対照培地の同程度の収量が期待できたが、70%では収量が大きく減少したことを報告している。さらに、武田（2024）は、同様のエノキタケ菌床栽培において、シイタケ (*Lentinula edodes*) 廃菌床の利用可能性を検証した。その結果、スギおが粉の容積率30%をシイタケ廃菌床で置換し、添加材の消石灰を少量添加した場合、培地基材がスギおが粉のみで構成された培地と比較して、子実体収量が増加したと報告している。

しかしながら、武田（2024）の栽培試験では、シイタケ廃菌床の置換率が30%に限定されており、置換率の変化が収量に与える影響については明らかでない。また、消石灰が添加されたのはシイタケ廃菌床を含む培地に限られており、収量増加に寄与したのが廃菌床か添加材かは不明である。そこで本研究では、スギおが粉を培地基材としたエノキタケ菌床栽培において、シイタケ廃菌床の利用可能性と、シイタケ廃菌床の置換率を段階的に変化させた培地に炭酸カルシウムを添加し、その効果を検証した。

II. 材料と方法

1. 供試菌

チクマッシュ T-011（株式会社千曲化成）のおが粉種菌を使用した。

¹新潟県森林研究所（〒958-0264 新潟県村上市鵜渡路2249-5）
（2025年5月19日受付，2025年7月25日受理）

2. 培地資材

培地基材には、2022年12月22日に購入後、16か月野積みしたスギおが粉を使用した。スギおが粉の粒度ごとの質量割合は、2.8 mm以上が3.4%、2.0 mm以上2.8 mm未満が40.8%、1.4 mm以上2.0 mm未満が48.5%、1.4 mm未満が7.3%だった。培地基材の置換材のシイタケ廃菌床は、2024年4月10日に新潟県内の菌床シイタケ生産施設から収集した。収集したシイタケ廃菌床は約3 cm厚に切り分け、含水率（湿量基準）が約50%になるまで屋外で乾燥後、樹木粉碎機（株式会社大橋、GS70G）で粒状に粉碎した。粉碎後室温約2℃の暗所で培地調整直前まで保管した。栄養材には、米ぬか（JA北新潟）を使用した。添加材には、炭酸カルシウム（有恒鋳業株式会社、飼料用30 kg入り、以下、炭カル）を使用した。

3. 培地調整と種菌の接種

2024年4月25日に培地調整、その翌日の26日に接種した。培地基材のすべてをスギおが粉で構成した培地（以下、0%置換）を対照群、培地基材のスギおが粉の容積率25、50、および100%をシイタケ廃菌床で置換した培地（以下、x%置換と表記：xはそれぞれの置換率）、0、25、50、および100%置換に炭カルを1供試ビンあたり乾燥質量1.90 g添加した培地（以下、x%置換&炭カルと表記：xはそれぞれの置換率）を実験群とした計八つの試験培地を設定した（表-1）。栄養材の米ぬかは、1供試ビンあたりの混合量を乾燥質量90 gとした。試験培地の含水率は水道水を加えて、計算上の値が64.15%となるように水分量を調整した。

培地調整については、各試験培地をミキサー（協全商事株式会社）で攪拌後、850 mLのPPビン（ホクト産業株式会社）に手詰めした。供試ビンは各試験培地あたり32本作製し、16本ずつコンテナに格納後（4行×4列）、瓶詰め機（田中技研工業株式会社）で接種孔を培地上面中央に1か所成形した。培地調整と瓶詰め作業は約3

時間で完了し、その後、高圧殺菌釜（株式会社千代田製作所、TFK-T06 W-C）で高圧殺菌（119℃、60分）した。高圧殺菌後、半日程度室温17.0℃に設定されたクリーンルーム内で放熱し、手作業でおが粉種菌を約10 g接種した。

4. 栽培条件と子実体の収穫

接種後、試験培地ごとに供試ビンの管理位置が偏らないように、一つのコンテナ内に各試験培地2本ずつ格納した。

接種後の培養は、室温16.0℃、湿度70%、二酸化炭素濃度2,000 ppm以下になるように設定した暗黒条件下の培養室内で28日間行った。なお、本研究では対照培地と同様のサイクルで栽培できるかに着目したため、対照培地の菌回り完了に合わせて培養を終了した。培養は台車に載せたまま行った。

培養完了後、菌掻機を使用して発生処理を行った。発生処理は接種した種菌と培地表面を削り取る「ぶっ掻き」で行った。

芽出し工程は、室温13.5℃、湿度97%以上、二酸化炭素濃度2,000 ppm以下に設定した暗黒条件下の部屋で管理した。子実体の傘径が約1 mm、子実体が約3 mmに伸長し、接種孔が子実体で概ね塞がった時点で芽出し完了とみなし、生育工程に移した。この際、子実体の成長に差がみられたことから、以降は収穫に至るまで成長の程度が類似する供試ビンごとにコンテナで管理した。

生育工程の前期は、室温6.0℃、二酸化炭素濃度2,000 ppm以下に設定した暗黒条件下の部屋で管理した。生育工程の後期は、子実体が約1.5 cmに伸長した時点で、室温5.0℃、二酸化炭素濃度2,000 ppm以下に設定した暗黒条件下の部屋に移すとともに、光抑制（15分/日×2日、自走式光源：長野産業NS-0900、白色蛍光灯、最大照度：1,200 lx）を行った。

光抑制後、子実体が約6.0 cmに伸長した時点で、プラ

表-1. 栽培試験の培地条件

試験培地	培地基材 (g, 乾燥質量)		栄養材 (g, 乾燥質量)	添加材 (g, 乾燥質量)	水 (g)	充填量 (g)	含水率 (%, 湿量基準)	培地pH		n
	スギおが粉	シイタケ廃菌床	米ぬか	炭酸カルシウム				殺菌前	殺菌後	
0%置換(対照群)	100.00	-	90.00	-	340.00	530	64.15	6.678	6.172	32
25%置換	75.00	37.33	90.00	-	362.06	564	64.15	5.966	5.566	32
50%置換	50.00	74.65	90.00	-	384.11	599	64.15	5.525	5.283	32
100%置換	0.00	149.30	90.00	-	428.22	668	64.15	5.039	4.896	32
0%置換&炭カル	100.00	-	90.00	1.90	343.40	535	64.15	7.094	6.450	32
25%置換&炭カル	75.00	37.33	90.00	1.90	365.46	570	64.15	6.221	5.885	32
50%置換&炭カル	50.00	74.65	90.00	1.90	387.51	604	64.15	5.799	5.490	32
100%置換&炭カル	0.00	149.30	90.00	1.90	431.62	673	64.15	5.360	5.115	32

スチック製青色有孔巻紙（ホクト産業株式会社，高さ12.5 cm）で紙巻きした。なお，生育工程は湿度調整を行っていないが，湿度は約80～90%で推移した。

子実体の収穫は，株のほぼすべての菌傘が巻紙の高さを越えた時点で行い，ビン口から石づき方向に3.0 cmの位置で子実体を切り取った。収穫直後に子実体の湿潤質量を0.1 g単位で測定し，これを1供試ビンあたりの収量とした。併せて，発生処理から収穫までの日数（以下，生育日数）を記録し，試験培地ごとに平均生育日数を求めた。

5. 培地のpH測定

各試験培地の殺菌前と殺菌後の培地pHを測定した。試験培地ごとに栽培試験の供試ビン32本のほかに2本を作製し，このうち片方は栽培試験の供試ビンとともに高圧殺菌した。培地のpHの測定は，殺菌しなかったものは培地調整後，殺菌したものは高圧殺菌から半日程度室温17℃に設定されたクリーンルーム内で放熱した後に行った。培地を100 mLコニカルビーカーに10 g秤量し，そこに蒸留水を50 mL加え，5分間ホットプレートスターラー（HOT PLATE PC-351（AGCテクノグラス株式会社）とC-MAG HS 7（IKA）を併用）で攪拌し，室温で60分間静置した後，上澄み液のpHをpHメーター（株式会社堀場製作所，LAQUA F-72）で測定した（表-1）。

6. 統計解析

シイタケ廃菌床の置換率および添加材の炭カル添加がエノキタケの1供試ビンあたりの収量に与える効果を評価するため，一般化線形モデル（以下，GLM）で解析した。GLMのパラメータはベイズ推定した。応答変数には，1供試ビンあたりの収量を使用した。説明変数には，シイタケ廃菌床の置換率（0，25，50，70%の4区分の質的データ），炭カル添加の有無（なし，ありの2区分の質的データ），およびシイタケ廃菌床の置換率と炭カル添加の有無の交互作用を使用した。ベイズ推定におけるMCMCのサンプリング設定は，バーンイン回数を1,000回，乱数生成の繰り返し数を2,000回，チェーン数を4本，事前分布には無情報分布を適用した。また，応答変数の誤差構造は正規分布，リンク関数はidentityとした。モデルの収束判断は収束指標であるRhatが1.1未満であることにより行った（松浦 2016）。なお，説明変数の効果は，事後期待値の95%信用区間にゼロを含まない場合に統計学的に有意であると判断した。GLM解析はR version 4.4.2（R Core Team 2024）のbrmsパッケージのbrm関数（Bürkner 2017）で行い，Stan version 2.23

（Stan Development Team 2020）を使用してベイズ推定した。

Ⅲ. 結 果

1. 栽培試験

収穫時の子実体を写真-1に示す。1供試ビンあたりの収量は，25%置換&炭カルで最も多く，次いで0%置換&炭カル，0%置換，25%置換，50%置換&炭カル，100%置換&炭カル，50%置換，100%置換の順に多かった（表-2）。また，生育日数は，0%置換&炭カルで最も短く，次いで25%置換&炭カル，50%置換&炭カル，25%置換，0%置換，50%置換，100%置換&炭カル，100%置換の順に短かった（表-2）。

2. GLM解析

GLM解析のRhatはすべてのモデルで1.1未満であり，MCMCは収束したと判断した。

1供試ビンあたりの収量を応答変数としたGLM解析の結果（表-3），50%置換と炭カル添加の交互作用は対照群に対して収量に有意な正の効果があった。50，100%置換は対照群に対して収量に有意な負の効果があった。25%置換，炭カル添加，25%置換と炭カル添加の交互作用，および100%置換と炭カル添加の交互作用は対照群に対して収量に有意な効果が認められなかった。

Ⅳ. 考 察

対照群の0%置換と同程度の収量，生育日数で栽培を行うことができたのは25%置換，0%置換&炭カル，25%置換&炭カル，および50%置換&炭カルであった（表-2）。一方で，50，100%置換，および100%置換&炭カルでは0%置換よりも収量が約20～30 g減少した（表-2）。したがって，シイタケ廃菌床はエノキタケ菌床栽培においてスギおが粉で構成される培地と同様に栽培するうえで，培地基材の全量の置き換えは困難であるが炭カルを添加することで置換材として利用できると考えられた。

GLM解析の結果（表-3），エノキタケ子実体の収量はシイタケ廃菌床の置換率の増加に伴い大きく減少した。主な要因として，培地pHの低下が影響したと考えられた。エノキタケの菌糸体はpH 4～8で生長し，pH 6付近に最適域がある（中村 2000）とされている。各試験培地の殺菌後の培地pHは，0%置換が6.172であった一方で，シイタケ廃菌床の置換率の増加によりpHは6から酸

性側に偏った(表-1)。炭カル添加により比較的pHが6に近づいたことで増収したことからとも言えるだろう。また、シイタケ廃菌床の多い培地では菌回りが遅れる傾向があり、十分な培養期間を設けなかったことも減収の一因と考えられた。本研究では対照培地と同様のサイクルで栽培できるかに着目したため、対照培地の菌回り完了に合わせて発生処理を行った。スギおが粉を培地基材としたエノキタケ菌床栽培において、廃菌床の置換率が大きいほど菌回りが遅れる現象はエノキタケ廃菌床(清水2025a)、ナメコ廃菌床(清水2025b)を使用した場合でも確認されている。エノキタケ菌床栽培において、培養後の適切な発生処理のタイミングは菌回り完了時であり、早すぎても遅すぎても収量に影響する(山本2001)ことから、最適な菌回り日数の検討が望まれる。

炭カルの添加により、エノキタケ子実体の収量は有意に、あるいは有意とは言えないが増加した(表-2, 3)。

表-2. 各試験培地のエノキタケ子実体の収量および生育日数

試験培地	収量(g/ビン)		生育日数(日)		n
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	
0%置換(対照群)	225.37	5.23	27.31	0.82	32
25%置換	223.85	16.00	27.28	0.77	32
50%置換	205.01	13.76	28.13	0.87	32
100%置換	193.45	21.78	29.28	1.20	32
0%置換&炭カル	229.52	7.30	26.69	0.64	32
25%置換&炭カル	236.71	11.00	26.75	0.67	32
50%置換&炭カル	221.99	21.50	27.22	0.79	32
100%置換&炭カル	208.39	22.23	28.38	0.83	32

表-3. エノキタケ子実体の収量を応答変数としたGLM解析の結果

項目	事後期待値	事後標準偏差	95%信用区間	
			下限	上限
Intercept (0%置換)*	225.38	2.89	219.65	231.02
25%置換の効果	-1.53	4.14	-9.55	6.90
50%置換の効果*	-20.31	4.10	-28.25	-12.10
100%置換の効果*	-31.93	4.09	-39.82	-23.91
炭カル添加の効果	4.19	4.11	-3.80	12.29
25%置換と炭カル添加の交互作用	8.70	5.77	-2.56	19.82
50%置換と炭カル添加の交互作用*	12.72	5.83	1.45	24.30
100%置換と炭カル添加の交互作用	10.72	5.79	-0.53	21.94

単位はg。

*が付いた説明変数は、95%信用区間にゼロを含まなかったことを示す。

特に、シイタケ廃菌床を加えた試験培地では、シイタケ廃菌床を加えなかった培地(0%置換&炭カル)よりも増収効果が大きかった(表-3)。このことから、シイタケ廃菌床を基材として用いる場合、pH調整剤として炭カルを添加することが有効であると示唆された。ただし、本研究での添加量ではpHは最適とされるpH6に達せず、より高い添加量による効果の検証が今後の課題である。

V. 謝 辞

本研究で使用したシイタケ廃菌床は株式会社SHKに提供いただいた。この場を借りて深く感謝申し上げる。

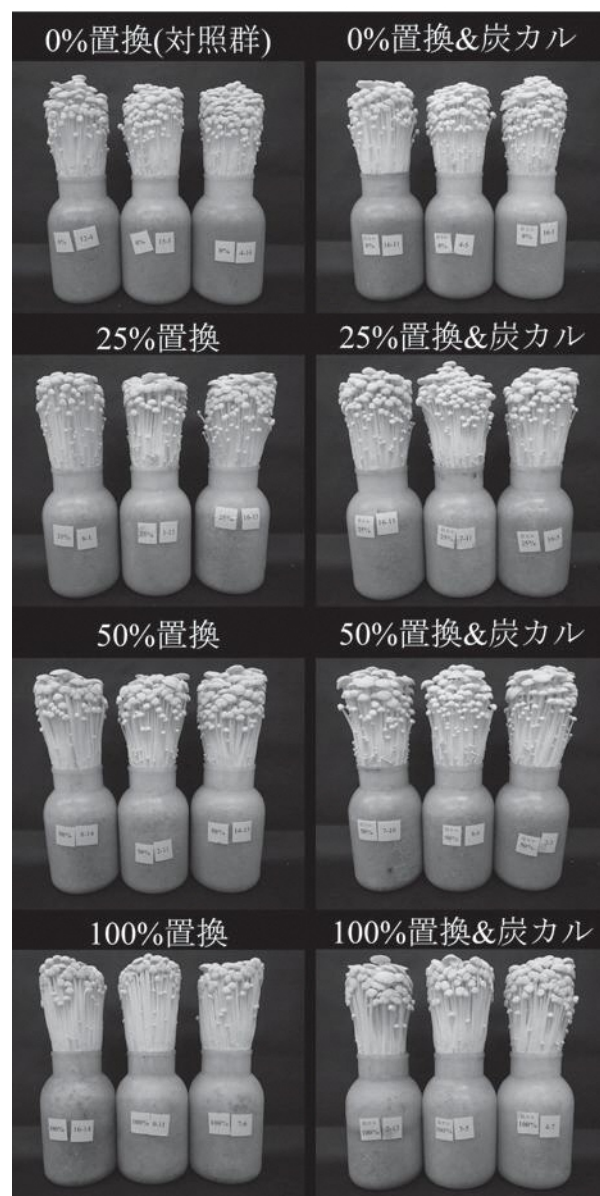


写真-1. 各試験培地のエノキタケ子実体

開示すべき利益相反はない。

引用文献

- Bürkner PC. 2017. brms: An R package for Bayesian multilevel models using Stan. *J Stat Softw.* 80: 1-28.
- 松浦健太郎. 2016. StanとRでベイズ統計モデリング. 東京: 共立出版.
- 村上重幸. 2014. 近年のきのこ栽培品種開発の方向. 大橋等編, 改訂版最新きのこ栽培技術. 東京: 株式会社プランツワールド. p. 18-22.
- 中村公義. 2000. エノキタケ. 衣川堅二郎, 小川眞編, きのこハンドブック. 東京: 朝倉書店. p. 68-76.
- R Core Team. 2024. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- 林野庁. 2024. 令和6年版森林・林業白書. 東京: 全国林業改良普及協会.
- 清水達哉. 2025a. スギおが粉エノキタケ菌床栽培におけるコーンコブミール培地のエノキタケ廃菌床による培地基材置換率の検証. *新潟森林研報.* 65: 20-26.
- 清水達哉. 2025b. スギおが粉エノキタケ菌床栽培におけるナメコ廃菌床の利用. *日林誌.* 107: 123-127.
- Stan Development Team. 2020. Stan: A C++ Library for Probability and Sampling, Version 2.23.
- 高畠幸司. 2021. 未利用資材による食用きのこ生産技術の開発. *日本きのこ学会誌.* 29: 5-14.
- 武田綾子. 2024. エノキタケ菌床栽培におけるシイタケ廃菌床の利用. *新潟森林研報.* 64: 46-51.
- 寺嶋芳江. 2009. 千葉県におけるきのこ培地材料用おが粉の流通および廃培地利用の現状. *千葉農林総研研報.* 1: 1-12.
- 寺嶋芳江. 2014. 多様化する培地材料の特徴と利用. 大橋等編, 改訂版最新きのこ栽培技術. 東京: 株式会社プランツワールド. p. 29-36.
- 山本秀樹. 2001. エノキタケ. 大森清寿・小出博志編, キノコ栽培全科. 東京: 農山漁村文化協会. p. 85-96.