

令和 4 年 6 月 10 日現在

機関番号：11201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K06162

研究課題名(和文) シイタケ廃菌床の半炭化処理による新しい木質系断熱材の開発

研究課題名(英文) Development of new wood-based thermal insulating material by semi-carbonization treatment of shiitake waste mushroom bed

研究代表者

関野 登 (Sekino, Noboru)

岩手大学・農学部・教授

研究者番号：30171341

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：廃菌床の断熱材としての利用可能性を探るため、熱伝導率、強度、半炭化による断熱性改善の可能性、断熱性の発現メカニズムを調べた。廃菌床をそのままの寸法状態で乾燥させた場合(密度200kg/m³程度)、熱伝導率は0.05W/mKで断熱性は良好であったが、強度は軟質繊維板の半分以下となった。半炭化による断熱性向上と強度低下のトレードオフ関係を木材で調べた結果、約15%の熱伝導率低下で強度は半減した。この結果より、強度の低い廃菌床への半炭化は不適と判断され、別の手法として圧縮乾燥を採用した。圧縮乾燥で得た密度範囲200～600kg/m³の廃菌床は、その熱伝導率が木材とほぼ同等であることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究ではミズナラチップを菌床とするシイタケ収穫後の廃菌床を圧縮乾燥させ、その密度と熱伝導率の関係を調べ、その関係が木材とほぼ同様であることを明らかにした。廃菌床は、シイタケ収穫により木質の約7割の質量損失が生じ、菌糸と腐朽残渣の混在体となっている。これを圧縮乾燥した成形体が木材と同等の断熱性能を発揮したことは、廃菌床の有効活用に資する知見と言える。また、熱伝導モデルの適用により、熱橋となる実質の熱伝導率の大小関係(木材<廃菌床(腐朽残渣+菌糸)<菌糸)を得ており、新たな知見として学術的な意義を持つと言える。

研究成果の概要(英文)：To explore the possibility of using the waste mushroom bed as a thermal insulating material, the thermal conductivity, strength, and the mechanisms of the thermal insulation were investigated. When the waste mushroom bed was dried in its original size resulting in a density of about 200 kg/m³, the thermal conductivity was 0.05 W/mK, but the strength was less than half that of the insulation fiberboard. Investigating the relationship between the improvement of thermal insulation and the decrease in strength due to semi-carbonization, it was found that the strength was halved to obtain a decrease in thermal conductivity of about 15%. From this result, it was judged that semi-carbonization to a waste mushroom bed with low strength was unsuitable, and compression drying was adopted as an alternative method. It was found that the waste mushroom bed with a density range of 200 to 600 kg/m³ obtained by compression drying had a thermal conductivity almost equal to that of wood.

研究分野：木質材料学

キーワード：廃菌床 熱伝導率 熱伝導モデル 半炭化 圧縮乾燥 機械的性質

1. 研究開始当初の背景

キノコの菌床栽培における菌床の原料は多種多様であるが、岩手県久慈市にある大規模シイタケ菌床栽培農園では近隣の雑木林から伐採されたミズナラのチップを菌床に使用し、里山の資源循環に貢献している。さらに、地域の製材所等で発生する樹皮を木質バイマスボイラーで燃料させて蒸気と温水を生産し、それを菌床の蒸気殺菌および栽培ハウスの暖房エネルギーに利用することで産業廃棄物の利用促進と化石資源由来の燃料削減に貢献している。このような地域の森林資源と林産廃棄物を結びつけた特用林産物（キノコ）の生産は、21世紀に目指すべき資源循環社会のお手本と言える。ただし、この資源循環の持続には、栽培終了後の菌床（廃菌床）の活用が欠かせない。なぜなら大規模な菌床栽培では毎年大量の廃菌床が発生するためである。例えば、上記の農園では年間100万個以上の廃菌床が発生し、燃料利用や材料利用へのリサイクルが課題となっている。

2. 研究の目的

廃菌床のリサイクルという上記の課題に対して、本研究では廃菌床の特性を生かした材料への転換を目指している。廃菌床の特性のひとつは、乾燥後の内部の状態にある。当初は木材チップの堆積状態にあった菌床が、図1(A)～(C)に示すような構造、すなわち菌糸の蔓延に伴って腐朽残渣と菌糸の一体構造に変化している。これは軽量パーティクルボードや軟質繊維板(IFB)と類似した構造であり、廃菌床が新たな木質系断熱材に転換できる可能性を示唆する。そこで本研究では、乾燥後の廃菌床の断熱性能、断熱性の発現メカニズム、強度性能などを明らかにし、断熱材としての利用可能性を探ることを目的とした。

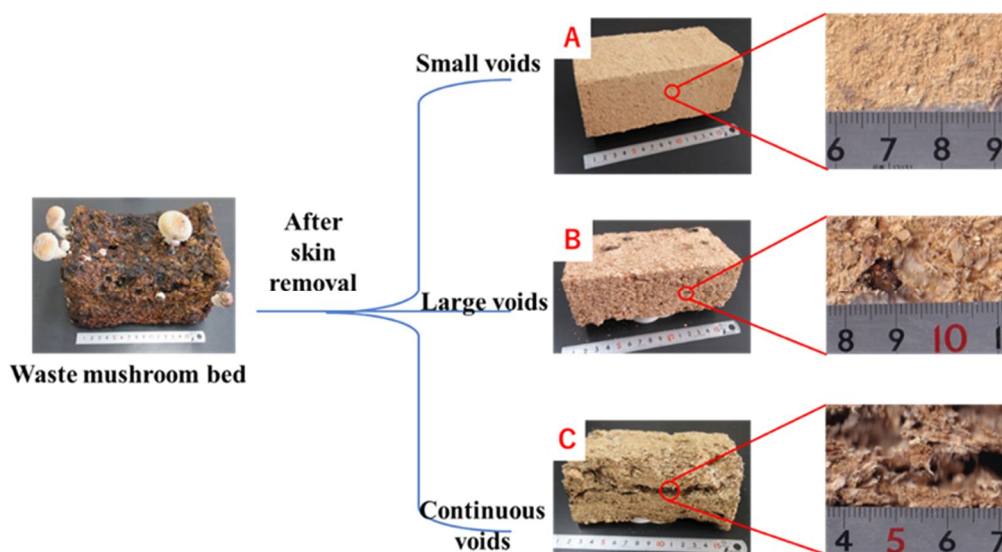


図1 廃菌床の乾燥後の形態（A：比較的均質な構造、B：分散的な粗空隙、C：連続的な粗空隙）

3. 研究の方法

(1) 資源量の調査： 上記のキノコ農園では年間100万個以上の廃菌床が発生するが、材料利用に適する廃菌床の量を把握する必要がある。そこで、回収時に型崩れが生じない廃菌床の割合を調査した。また、廃菌床乾燥後の内部の状態を観察し、図1に示すような均質構造（タイプA）、粗空隙が分散的に存在する構造（タイプB）、粗空隙が連続して存在する構造（タイプC）の存在割合を調べた。

(2) 半炭化による熱伝導率および強度の変化： 本研究では廃菌床の断熱性能を向上させる手段として半炭化処理を提案したが、半炭化処理の有効性を調べるため、木材を用いた実験を行った。木材（ベイマツ心材）を温度4水準（270、280、290、300℃）、酸素濃度4水準（1、2、3、4%）で半炭化処理し、これらが熱伝導率の変化と強度の変化に及ぼす影響を調べた。

(3) 廃菌床の圧縮乾燥： 断熱に不利となる廃菌床内部の粗空隙の削減を目的に、廃菌床の厚さを未圧縮の120mmから60、50、30、25mmへと4水準で圧縮し、圧縮状態のまま乾燥した（以下、圧縮乾燥）。圧縮乾燥による廃菌床の密度増加を調べるとともに、密度が広範囲にわたる熱伝導率試験体を採取し、密度と熱伝導率の関係を求めた。さらに、木材および木質材料の熱伝導率を廃菌床と同一の測定条件で求め、廃菌床の断熱性能の位置づけを検討した。

(4) 廃菌床の断熱メカニズムの検討方法： 廃菌床の構成要素は実質と空隙（微細空隙および粗空隙）の2要素であるため、この2要素で構成される直列・並列の熱伝導モデル（図2）を用いた。まず、廃菌床、菌床原料木材、菌糸（シイタケ子実体を使用）の3者について、粉末マット（粉末間の空隙が対流伝熱を生じない程度のマット密度）を作製し、その熱伝導率を測定した。次に、この測定結果に上記の熱伝導モデルを適用して実質の熱伝導率を推定し、廃菌床の熱橋の質（実質の熱伝導率）を木材および菌糸と比較した。一方、廃菌床に対しても同様の熱伝導モデルを適用し、空隙の見かけの熱伝導率をパラメータとして、熱流方向の実質の熱伝導率を決定した。これらの結果を用いて、廃菌床の密度と熱伝導率の関係を精査し、断熱メカニズムを調べた。

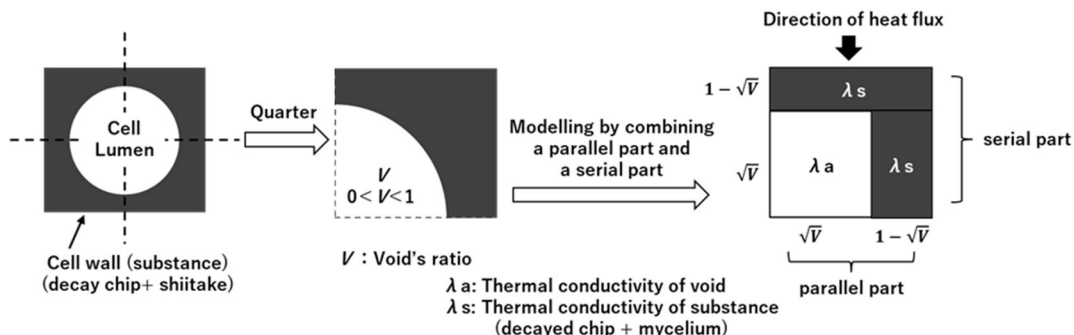


図2 廃菌床に適用した熱伝導モデル（空隙と実質の2要素の直列・並列モデル）

(5) 廃菌床の強度性能： 廃菌床を断熱材に転換する際、使用箇所によっては、ある程度の強度が要求される。具体的には積み重ねて使用される場合の圧縮性能、廃菌床自身が容易に剝離しない程度の剝離強度が想定される。そこで、圧縮乾燥して得た廃菌床から密度が広範囲に渡る強度試験体を採取し、密度と剝離強度の関係、密度と圧縮性能（圧縮弾性率、圧縮降伏強度、圧縮降伏ひずみ）の関係を調べた。

4. 研究成果

(1) 材料利用可能な廃菌床の割合： 廃菌床回収時に型崩れしない割合は約9割であった。そのうち、乾燥後に比較的均質な構造（図1(A)）は約1割、粗空隙が散在する構造（図1(B)）は約6割、残り3割は粗空隙が連続する構造（図1(C)）であった。すなわち、均質な構造(A)のみを利用対象とすると資源量は廃菌床発生量の約1割に過ぎない。しかし、粗空隙が散在する(B)や粗空隙が連続する(C)であっても、圧縮乾燥して粗空隙を削減すれば、回収可能な廃菌床のほとんどを利用できるであろう。

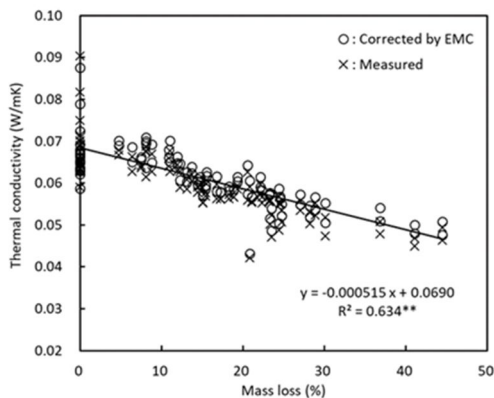


図3 質量減少（半炭化）と熱伝導率の関係

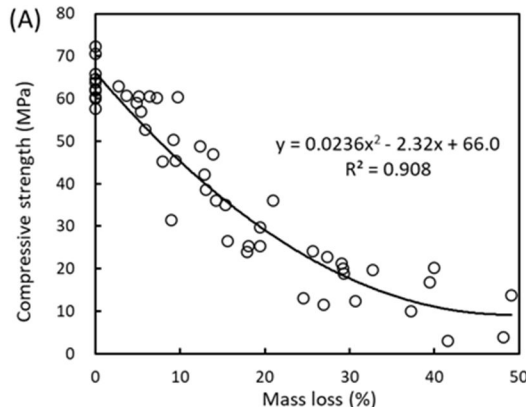


図4 質量減少（半炭化）圧縮強度の関係

(2) 熱伝導率と強度に及ぼす半炭化処理の影響： 加熱温度270~300、酸素濃度1~4%で半炭化させたベイマツ心材について、半炭化で生じた質量減少率と熱伝導率の関係を図3に示す。熱伝導率は質量減少率の増加につれて直線的に低下し、その低下率は質量減少率1%あたり約0.75%であった。熱伝導率低下の主要因は密度低下による空隙率の増加であったが、吸湿性低下と実質密度（真密度）の低下によって、熱橋となる実質熱伝導率も最大で5%低下することが図2の熱伝導モデルを用いた解析で明らかとなった。さて、質量減少率が40%に達すると熱伝導率は約15%低下したが、この時点で圧縮強度（図4参照）およびせん断強度は半炭化前の1/4程度に低下した。これらの結果より、半炭化は断熱性向上のメリットよりも強度低下のデメリットの方が大きいと言える。半炭化は耐腐朽性や寸法安定性付与が可能と報告されており（文献）、強度性能が要求されない用途には有効である。しかし、そもそも強度性能が十分ではない廃菌床に対しては、適切ではない断熱性向上策と判断された。

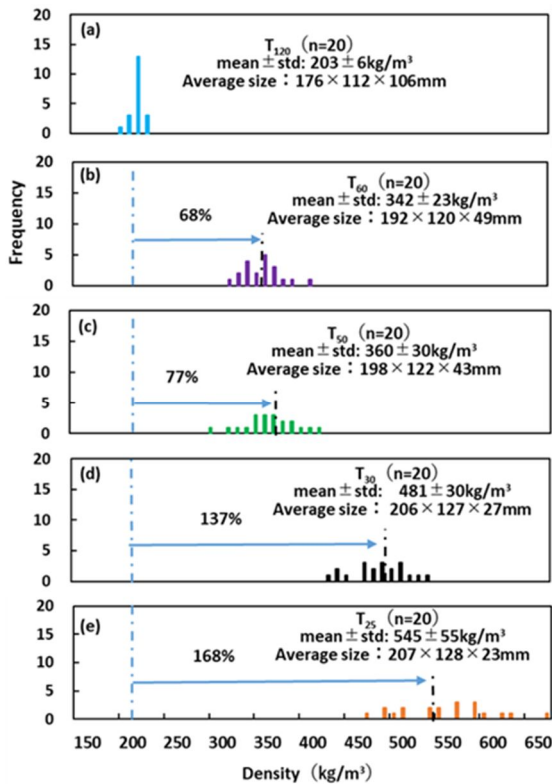


図5 圧縮乾燥後の廃菌床の密度変化

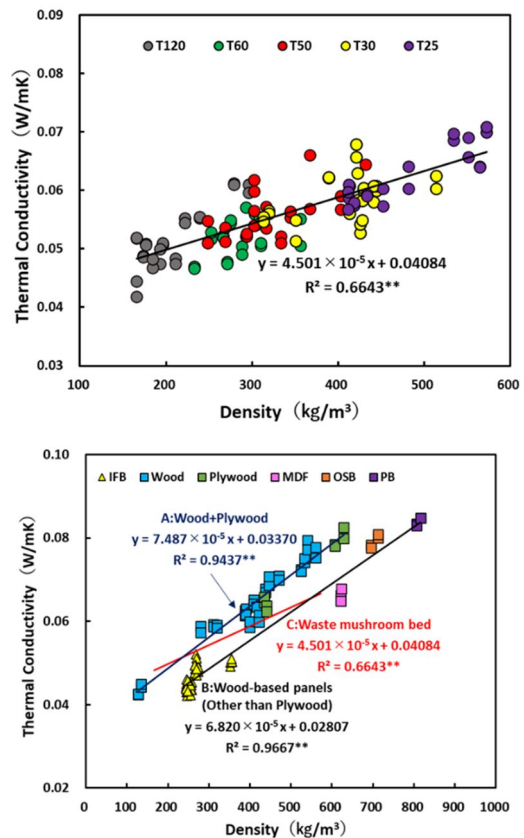


図6 廃菌床の密度と熱伝導率の関係
(上：廃菌床のみ、下：対照材料)

(3) 圧縮乾燥された廃菌床の熱伝導率： 当初の研究計画では廃菌床の半炭化処理による断熱性向上を目指していた。しかしながら、上述のように木材実質の熱伝導率の低下は限定的であること、および著しい強度低下を伴うことが判明した。さらに、廃菌床の内部には分散的あるいは連続的な粗空隙が観察された。粗空隙は対流伝熱を引き起こすため、断熱性の悪化要因となる。そこで、本研究では廃菌床を圧縮乾燥して粗空隙を排除する方針に切り替えた。図5は100個の廃菌床サンプルを重量が均等となるよう5群(各20個)に分け、4水準の圧縮乾燥後の密度を調べた結果である(図中記号：例えば T_{25} は厚さ25mmへの圧縮)。未圧縮の平均密度約 200 kg/m^3 に対し T_{25} では密度 550 kg/m^3 程度まで密度が上昇した。図6(上)に廃菌床の密度と熱伝導率の関係を示すが、未圧縮乾燥(T_{120})と60mmに圧縮乾燥した廃菌床(T_{60})を同一密度で比べた場合、 T_{60} の方が熱伝導率は低く、これは粗空隙がある程度排除された効果と言える。図6(下)は対照材料(木材と合板のグループ、IFB・MDF・OSBのマット成形パネルのグループ)と廃菌床(回帰線のみ)の密度-熱伝導率関係を比較している。廃菌床の熱伝導率は密度 $200 \sim 300 \text{ kg/m}^3$ 程度では木材素材と同等であり、木材繊維の再構成したIFBのそれよりも大きかった。一方、密度 $500 \sim 600 \text{ kg/m}^3$ 程度では木材のそれよりも低く、マット成形パネルの断熱性に近接した。

(4) 廃菌床の断熱メカニズム： 図6に示した廃菌床の熱伝導率の位置づけを、熱橋となる実質の熱伝導率と断熱要素となる空隙の観点から検討した。廃菌床、菌糸、菌床木材の粉末を用いたマットの熱伝導率測定結果に図2の熱伝導モデルを適用し、実質の熱伝導率を算出した結果、それぞれ、 0.288 W/mK 、 0.368 W/mK 、 0.218 W/mK が得られた。一般に、木材実質の熱伝導率には繊維方向とその直交方向で1.6程度の異方向性が認められるが(文献)、実質の熱伝導率に異方向性がある場合、ここで得られた値は両方向の平均値と扱える(粉末試料を使用)。異方向性の有無および程度については別途調査が必要であるが、菌糸の実質熱伝導率が木材のその1.7倍と高いこと、それが要因となって廃菌床実質(腐朽残渣と菌糸の混合体)の熱伝導率は木材実質のその1.3倍となった。この結果より、材料内の熱橋の視点で考えると、廃菌床は木材およびマット成形パネルと比べて不利と言わざるを得ない。それにも拘わらず図6に示したように、廃菌床の熱伝導率は密度 $500 \sim 600 \text{ kg/m}^3$ において木材よりも低く、マット成形パネルに近接した。これより推論できることは、空隙表面における伝熱すなわち輻射伝熱の差異である。腐朽残渣の表面は退色してミクロな凹凸が多いため、輻射率が低減している可能性が示唆される。

さて、廃菌床を圧縮する程度が高まると、腐朽チップの堆積状態は水平に近づく(図7)。廃菌床実質の熱伝導率に木材と同様な異方向性があると仮定した場合、腐朽チップが水平堆積に近づけば、熱伝導し易い繊維方向を熱が通過する割合は減少する。すなわち、廃菌床の熱流方向の実質熱伝導率は低くなると推測される。これを検証するため、廃菌床に図2の熱伝導モデルを適用し、熱流方向の実質熱伝導率を算出した結果が図8である。その際、密度 400 kg/m^3 以下では

空隙の熱伝導率を 3 レベルで変化させたが、密度が低くなると実質の熱伝導率が增大する傾向が認められた。この結果は、廃菌床実質にも熱伝導率の異方性があることを示している。

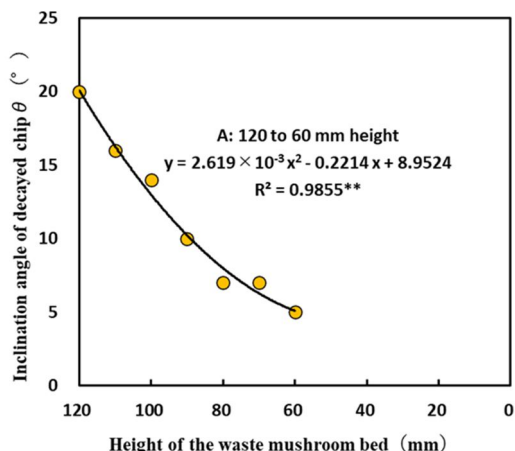


図7 圧縮に伴う腐朽チップ傾斜角の変化

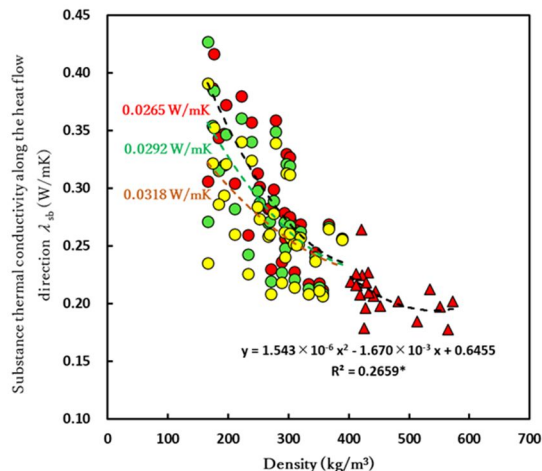


図8 熱流方向の実質熱伝導率と廃菌床密度の関係

(5) 廃菌床の気乾密度と強度性能の関係： 図9に密度と剥離強度の関係を示す。両者の間に有意な正の相関が認められたものの、密度増加に対する剥離強度の増加は僅かであり、市販木質ボードと比べて著しく低かった。菌糸表面は疎水性のため、圧縮乾燥しても水素結合による菌糸同士あるいは菌糸と腐朽チップ間の接着力がほとんど期待できないと推察される。圧縮強度性能の一例として、図10に密度と圧縮弾性率の関係を示す。密度増加が増加すると腐朽チップ間の粗空隙が消滅するとともにチップの接点が増加するため、圧縮に対する抵抗性が高まることが読み取れる。

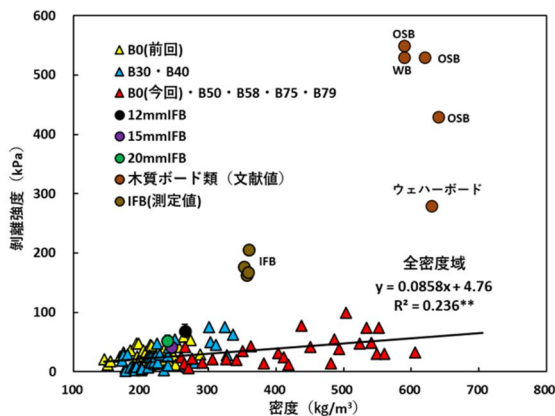


図9 廃菌床の密度の剥離強度の関係

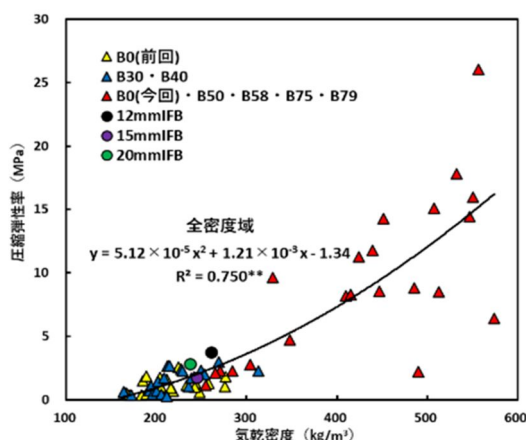


図10 廃菌床の密度と圧縮弾性率の関係

(6) 今後の展望： 今回研究対象とした廃菌床は木材腐朽残渣と菌糸の混合体である。廃菌床の形状特性を生かし、断熱に不利な粗空隙を削減するために圧縮乾燥という手法を適用した結果、密度 400kg/m³ 程度を上回ると同密度の木材よりも低い熱伝導率を持つ材料に変換可能であることが分かった。ただし、強度性能は十分とは言えないため、用途に応じて強度増加の対策が求められる。一方、全く異なる発想の材料利用として、廃菌床を粉末化し、腐朽残渣の化学成分の自己溶着を期待したバイングレス成形も考えられる。いずれにしても様々な方法が模索され、キノコ菌床栽培の廃棄物利用に適用されて資源循環が進むことが期待される。

<引用文献>

吉田貴紘、佐野哲也、大原誠資：トレファクションによる高性能木質ペレット「ハイパー木質ペレット」の技術開発．木材工業 67(12)、560-565 (2012)．
杉原彦一 他 4 名，“新訂基礎木材工学”，フタバ書店，p88 (1979)．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 関野 登、姜 卓秋	4. 巻 75
2. 論文標題 中国吉林省のキノコ栽培と廃菌床の燃料利用	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 木材工業	6. 最初と最後の頁 254-257
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sekino Noboru, Jiang Zhuoqiu	4. 巻 67
2. 論文標題 Fuel and material utilization of a waste shiitake (<i>Lentinula edodes</i>) mushroom bed derived from hardwood chips I: characteristics of calorific value in terms of elemental composition and ash content	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Wood Science	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s10086-020-01935-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 関野 登、田名部功幹、姜 卓秋	4. 巻 67
2. 論文標題 半炭化された木材の断熱性と強度	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 木材学会誌	6. 最初と最後の頁 167-177
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2488/jwrs.67.167	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 姜 卓秋、関野 登
2. 発表標題 シイタケ廃菌床の材料利用の可能性（第7報） ~ 広範囲に密度変化させたブロック材料の機械的性質 ~
3. 学会等名 （公社）日本木材加工技術協会第39回年次大会（旭川・オンライン：2021年9月）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 関野 登、姜 卓秋
2. 発表標題 シイタケ廃菌床の材料利用の可能性（第4報） ～ 圧縮乾燥により密度増加させたブロック材料の機械的性質～
3. 学会等名 （公社）日本木材加工技術協会第38回年次大会（岐阜）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 姜 卓秋、関野 登
2. 発表標題 シイタケ廃菌床の材料利用の可能性（第5報） ～ 未圧縮および圧縮乾燥して得たブロック材料の熱伝導率～
3. 学会等名 第71回日本木材学会大会（オンライン）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 関野 登、姜 卓秋
2. 発表標題 シイタケ廃菌床の材料利用の可能性（第6報） ～ 廃菌床実質の熱伝導率～
3. 学会等名 第71回日本木材学会大会（オンライン）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 関野 登、姜 卓秋、日當和孝、越戸 翔
2. 発表標題 シイタケ廃菌床の材料利用の可能性（第1報） ～ 菌床構造の変化とブロック状材料の採取～
3. 学会等名 （公社）日本木材加工技術協会第37回年次大会（広島）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 関野 登、姜 卓秋
2. 発表標題 シイタケ廃菌床の材料利用の可能性（第2報） ～ブロック材料の採取歩留まり～
3. 学会等名 第70回日本木材学会大会（鳥取）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 姜 卓秋、関野 登
2. 発表標題 シイタケ廃菌床の材料利用の可能性（第3報） ～ブロック材料の密度範囲と機械的性質～
3. 学会等名 第70回日本木材学会大会（鳥取）
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関