

氏名	姜 卓秋		
本籍（国籍）	中華人民共和国		
学位の種類	博士（農学）		
学位記番号	連研第 845 号		
学位授与年月日	令和 5 年 9 月 2 5 日		
学位授与の要件	学位規則第 5 条第 1 項該当課程博士		
研究科及び専攻	連合農学研究科 地域環境創生学専攻		
学位論文題目	<b>Fuel and material utilization of a waste shiitake (<i>Lentinula edodes</i>) mushroom bed derived from hardwood chips</b> <b>（広葉樹チップを原料とするシイタケ廃菌床の燃料・材料利用の可能性）</b>		
学位審査委員	主査	岩手大学教授	関野 登
	副査	岩手大学教授	小藤田 久義
	副査	弘前大学教授	丸居 篤
	副査	山形大学教授	芦谷 竜矢

## 論文の内容の要旨

本研究は、広葉樹チップを用いたシイタケ菌床栽培で排出される廃菌床（以下、廃菌床）を、燃料や材料としてリサイクル利用することを目指している。

まず、廃菌床の燃料特性を把握するため、廃棄時および廃棄 1 ヶ月後の含水率、発熱量、灰分、元素組成などを調べた。その結果、廃棄時の湿量基準含水率 ( $MC_w$ ) は 78%、1 ヶ月放置後でも 63%であった。廃菌床の乾燥が遅い原因として表面の透湿性の低さが考えられるため、廃菌床は乾燥前に粉砕することが望ましい。廃菌床の乾燥時の発熱量を原料チップと比べると、廃菌床の内部ではほぼ同等であったが、表面部の方は約 11%低かった。この理由を元素組成から分析すると、廃菌床表面部では木材と比べて窒素と灰分の含有量が著しく高いことが挙げられた。さらに、酸素含有量の多さから水素はほとんど燃焼に寄与せず、廃菌床の発熱量が炭素の発熱に依存することが発熱量の理論計算から示された。また、ボイラー燃料として利用可能な発熱量を含水率との関係から調べると、 $MC_w$  が 50%で発熱量は 7.6MJ/kg となり、スギの辺材や樹皮の値とほぼ同等であることが分かった。また、廃菌床の灰分は約 7%と高く、これは樹皮の値と同等で原料チップに対して約 10 倍であった。

廃菌床の材料利用の方向性として、内部構造の特性を活かす視点、粉砕して原料化する視点の二つが考えられる。廃菌床の特性の一つは、乾燥後の内部構造にある。最初は原料チップの堆積状態にあった菌床が、菌糸の蔓延に伴って腐朽残渣と菌糸が一体化した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、本研究では材料利用の一つとして、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。

廃菌床を回収する際、形状が崩れないものは全体の約 9 割であり、そのうち乾燥後に比較的均質な内部構造（粗空隙が少ない）を持つものは約 1 割であった。つまり、均質な内部構造を持つ廃菌床だけを対象とすると、利用できる資源は廃菌床発生量の 1/10 以下に過ぎない。そこで、廃菌床内部の粗空隙を排除して均質化するため廃菌床の厚さを 4 レベルで圧縮乾燥し、気乾密度 150-600 kg/m<sup>3</sup>の範囲で断熱性能および強度特性を調べた。圧縮乾燥された廃菌床の密度と熱伝導率の間に直線関係が認められた。密度 200-300 kg/m<sup>3</sup>程度では、廃菌床の熱伝導率は木材素材のそれと同等であり、IFB のそれより若干大きかった。一方、密度 500-600 kg/m<sup>3</sup>程度では、木材のそれよりも低く、木質パネルの断熱性に近接した。さらに、熱伝導モデルを用いて実質熱伝導率を算出した結果、その値は廃菌床で 0.288W/mK、菌糸で 0.368W/mK、原料チップで 0.218W/mK であった。また、同じ熱伝導モデルを廃菌床に適用して、熱流方向の実質熱伝導率を求めた結果、廃菌床実質にも熱伝導率の異方性があることが示唆された。

次に廃菌床の強度に関して、内部結合力と圧縮特性を気乾密度との関係を調べるとともに、強度特性の基礎となる実質の弾性率を、廃菌床、原料チップおよび菌糸自体の圧密試験から決定した。その結果、圧縮乾燥により廃菌床の密度を 600 kg/m<sup>3</sup> 程度に増加させても、内部結合力は市販の密度 250 kg/m<sup>3</sup>程度の IFB とほぼ同等であった。内部結合力の増加は、密度の増加に対して僅かであり、その理由として、内部の腐朽木材の凝集力低下が激しいこと、圧縮乾燥で密度を高めても菌糸の疎水性により新たな水素結合が発生しにくいことが考えられた。また、廃菌床の実質弾性率は 0.80GPa で、原料チップの 0.87GPa と比較して僅かに低かった。一方、菌糸自体の実質弾性率は原料チップの 1.6 倍（1.42GPa）であった。廃菌床は菌糸と木材の腐朽残渣の混合体であるため、この結果は木材実質の腐朽残渣の弾性率が著しく低いことを示唆する。また、廃菌床を圧縮乾燥すると、圧縮弾性率の増加率は密度の増加率よりも大きくなった。この要因として、密度増加により粗空隙が徐々に減少し、荷重の抵抗要素（実質）の接触点が増えて面状接触となり、高い圧縮弾性率をもつ菌糸自体の寄与も増えたと解釈できる。圧縮乾燥された廃菌床の降伏応力と降伏ひずみは、市販の IFB のそれと同等以上であることが確認された。

廃菌床を原料化して材料利用する方法として、バインダレスボード（自己接着）の製造方法と性能について検討した。廃菌床表面部には撥水性があるため自己接着への悪影響が危惧されるが、資源の有効利用の観点からは廃菌床の全て（表面部+内部）をボード原料に使うことが望ましい。そこで本研究では、3 種類の原料（廃菌床の内部、表面部、廃菌床の全て）を用い、プレス温度を 210±10℃で一定とし、目標密度 1.0 g/cm<sup>3</sup>、目標厚さ 5mm のバインダレスボードを作製した。その際、原料小片の粒度、熱圧スケジュール（息抜き時の残圧、第二圧縮の有無）を変化させ、適切な製造条件を調べた。その結果、ボードの厚さと密度が最も目標値に近くなる条件は、廃菌床内部由来の 2 mm 以下の小片を用いて第二圧縮を行う条件であった。しかしながら、息抜き時の残圧が最も高い 1.5MPa の場合、ボードの内部割れが生じ易かった。機械的性質が最も優れる製造条件は、廃菌床内部由来の 2 mm 以下の小片を用い、息抜き時残圧が 1.0 MPa または 1.5MPa、第二圧縮がある組み合わせであった。この条件では暗色化された試験体が得られ、明度  $L^*$ は 35-50 の範囲に存在し、自己接着能力の発揮が確認された。一方、廃菌床全体および表面部由来の小片を用いてもボード厚さと密度は内部由来小片の場合と同等であったが、機械的性質は劣り、2 mm 以下の小片では顕著な内部割れが発生した。危惧されたとおり、表面部由来の原料は内部割れおよび強度低下の要因となることが確認

された。

本研究により、広葉樹チップを原料とするシイタケ廃菌床の燃料および材料利用の可能性が見えてきた。また、本研究で得られた知見がシイタケ以外の菌床栽培の廃棄物にも応用され、資源循環が進むことを期待する。

## 論文審査の結果の要旨

本論文は、広葉樹チップを原料としたシイタケ菌床栽培の廃棄物（以下、廃菌床）の利用技術に関する研究であり、木質バイオマス燃料としての燃料特性、廃菌床の形状を活かしたブロック断熱材の製造方法と性能評価、廃菌床の粉末化とそれを熱圧成形した高密度自己接着ボードの製造方法と性能評価、という3つの内容で構成される。

燃料特性として、廃菌床の含水率、発熱量、灰分、元素組成などが調べられた。その結果、廃菌床は表面の透湿性の低さから乾燥が遅く早期の粉碎操作が必要、圧搾水の酸性度が高いため、排水の中和処理が必要、発熱量（無水高位）は廃菌床内部に比べて表皮が約1割低い、それが窒素および灰分の多さに起因する、含水率50%程度に乾燥すれば同含水率の木材チップと同等の発熱量が得られる、燃焼後の灰発生量は樹皮チップと同程度に多いなど、基礎知見の収集と実用化に向けた課題整理がなされている。

廃菌床表皮の撥水性と内部の多孔性を活かす材料利用の方法として、廃菌床を金属型枠中で圧縮乾燥し、様々な密度のブロック断熱材が試作された。密度400 kg/m<sup>3</sup>以上に圧縮乾燥されると、熱伝導率は木材よりも小さくなり、断熱性に優れることが明らかとなった。その理由として、密度増加に伴って廃菌床内の大きな空隙（概ね直径2mm以上）が減少して対流伝熱が抑制される、腐朽残渣（廃菌床の実質）の伝熱においては、木材自体の熱伝導の異方性に起因して密度増加とともに繊維方向伝熱の割合が低下する、という仮説を立てた。これを検証するため、空隙と実質の2要素から成る直列・並列の数値計算モデルを適用し、密度増加に伴う熱流方向の実質熱伝導率と粗空隙の熱伝導率を試算した。その際、木材実質の熱伝導率と真密度を腐朽前と腐朽後で実測しており、これは貴重な新規知見と評価できる。一方、ブロック断熱材の強度性能として圧縮特性や内部結合力が調べられ、密度増加との関係が詳細に検討されるとともに既存の木質系材料と比較された。その結果、ブロック断熱材の用途に床面施設の木レンガ同様の使い方を想定した場合、強度面に問題はなく、断熱に有利な材料となる可能性が示唆された。ただし、屋外使用に向けては未実施の耐水性の検討が課題である。

腐朽によって木材成分が低分子化すると、高圧水蒸気の下では自己接着性を発現する可能性が示唆されていた。本研究では、自己接着性が促されるように廃菌床を粉末化し、それを高温プレスするボード製造方法が検討された。様々な圧力変化の熱圧条件が試された。熱圧後のボード密度、表面変色、内部割れ、曲げ性能、剥離強度などを調べた結果、自己接着性を誘発する適切な水蒸気発生とその開放のタイミングが明らかとなった。ただし、廃菌床表皮の粉末は強度低下の要因となること、耐水性の向上には更なる熱圧条件の検討や接着補強材の添加が課題となった。

以上のように、本論文は廃菌床の燃料および材料利用に向けて、多くの基礎知見を得ており、また、今後検討すべき課題も適切に整理されている。

よって、本審査委員会は、「岩手大学大学院連合農学研究科博士学位論文審査基準」に則り審査した結果、本論文を博士（農学）の学位論文として十分価値のあるものと認めた。

【学位論文の基礎となる学術論文】

Jiang, ZQ., Sekino, N. (2022) Fuel and material utilization of a waste shiitake (*Lentinula edodes*) mushroom bed derived from hardwood chips II thermal conductivity of compression-dried waste mushroom beds

Journal of Wood Science 68, Article number 5

<https://doi.org/10.1186/s10086-022-02067-w>