

博士論文

菌床シイタケの大規模生産施設環境の最適化

平成 30 年 9 月

柏野泰章

岡山大学大学院
環境生命科学研究科

目次

I 諸言	1
1. 摘要	1
2. 研究背景	3
(1) シイタケとは	3
(2) シイタケ各部の名称	5
(3) シイタケの生活環	6
(4) シイタケの歴史	7
(5) 原木栽培	9
(6) 菌床栽培	15
a. 菌床栽培のはじまり	15
b. 菌床栽培の流れ	16
(7) 原発事故の影響	28
3. 先行研究	30
(1) 栽培温度について	30
(2) CO ₂ 濃度について	30
(3) 光について	30
(4) 培地	30
(5) 省エネルギー	31
4. 研究目的	33
II 培養工程における温度と CO ₂ 濃度の影響	34
1. 目的	34
2. 材料および方法	35
(1) 培地及び菌床	35
(2) 温度試験	35
(3) CO ₂ 濃度試験	36
(4) 収穫量の計測	36
3. 結果および考察	37
(1) 温度試験	37
(2) CO ₂ 濃度試験	41
III 培養施設における内外温度差を考慮した省エネルギー換気システム開発	43
1. 目的	43
2. 材料および方法	44
(1) 培地および菌床	44
(2) 施設および装置	44
(3) 制御プログラム	46
3. 結果と考察	49
(1) 各条件の作動状況	49
a. 条件 I	49
b. 条件 II	50
c. 条件 III	51

(2) 平均気温別の省エネルギー効果.....	52
(3) 年間の省エネルギー効果	54
IV 結言	56
参考文献.....	58
謝辞	61

I 諸言

1. 摘要

和食には欠かすことのできないシイタケであるが、労働力不足などの影響で現在国内生産量の 9 割が菌床栽培となった。これは栽培基材に、木材粉碎物と米ぬか等の栄養材と水とを混合し、成型・殺菌した基材を用いて行うもので、施設内での周年栽培が可能であるが、大規模栽培施設では菌の活性により発生する大量の熱と CO₂ が問題となっている。シイタケ菌は高温に暴露されると成育障害を起こすとされ、年中冷房が必要であるが、作業員の安全のために換気が必須になるからである。そこで、本研究ではまず温度の菌成長に及ぼす影響を明らかにすることで、目標となる温度を設定することにした。つぎに、その温度を効率的に維持するために熱交換型換気扇の運転方法について検討を行った。

シイタケ栽培は、大きく培養と発生工程に分けられるが、今回はより熱と CO₂ が問題となっている培養工程について取り扱った。最適な施設温度を発生の結果から検討したところ、20～24 °Cでの培養で収量が高く、特に 24 °Cでは市場価値の高い L や M サイズ規格の大きさの物の割合が多く発生した。一方、20 °C以下での低温域では発生に悪影響を与える場合があり、26°C以上の高温域では培養に悪影響を与え、収量が大きく低下することが明らかになった。これらより、目標温度は 1 °Cずつマージンを取って、21-23 °Cすることが定まった。また、CO₂ 濃度は高すぎると奇形の発生等の懸念もあったが、今回設定した労働基準法の上限である 5,000 ppm 以下では問題なかった。

熱交換型換気扇は、空調効率を向上させるために、オフィスや一般家庭でも普及が進んでいるが、外気温によっては熱交換をせずに、直接外気を取り込んだ方がエネルギー効率が良い場合がある。今回であれば、24 °Cを目標に冷房を行うので、外気温がそれ以下の場合である。この点に注目して、外気温に応じて熱交換を行うかどうかを決定するシステムを試作し、実際の運転試験を行いながらその省エネルギー効果を実測した。その結果、連続して熱交換を行った場合と比べて、岡山県玉野市では年間 24 %の省エネルギー効果を発揮することが明らかになった。他の地域でも、実際の気温変化を基にシミュレーションしたところ、緯度が高いなどで、低温が有効に使える地域で効果が高くなった。また、CO₂ 濃度は慣行よりも高めに設定できたので、これに起因する換気はほ

とんど発生しなかった。

以上のことから、事前に生体の特性を十分に把握した上で、それに応じた制御を行うことで、熱と CO₂ が問題となっているシイタケの栽培現場に貢献できる提案が出来た。特に、既存の施設に大きく手を加えること無く、制御装置の付加だけで得られる省エネルギー効果は、経営的側面だけでなく環境負荷低減の観点からも意義深いと言える。

2. 研究背景

(1) シイタケとは

シイタケ (*Lentinula edodes*) は菌界担子菌門ハラタケ目に属し、木材を腐朽して成長する木材腐朽性のキノコである。林内のカシ、シイ、コナラ、ミズナラといった広葉樹の倒木や立ち枯れた木に発生する (Fig. 1-1) ¹⁾。



Fig. 1-1 倒木に発生したシイタケ ¹⁾

日本以外にも中国や朝鮮半島，ネパール，東南アジア，ニュージーランドに至る環太平洋の温帯，暖帯，亜熱帯に分布している。旨味成分のグアニル酸や，香り成分のレンチナンといった他の食材にはない独特の成分を持ち，また乾燥させることで長期保存や長距離輸送も可能になるため，家庭料理や精進料理の材料，天皇や大名への上納品，中国への輸出商材等として古くから日本で利用されてきたキノコである。現在では，スーパー青果売り場には生シイタケが，乾物コーナーには乾燥シイタケが一年を通じて販売されており，炒め物や汁物，煮物，焼き物，天ぷらなど多くの料理にシイタケは利用される。

農林水産省の特用林産基礎資料 ²⁾を基に，Fig. 1-2 と 1-3 にキノコ 5 種の国内

生産量と東京都中央卸売市場平均価格の年間推移を示す。

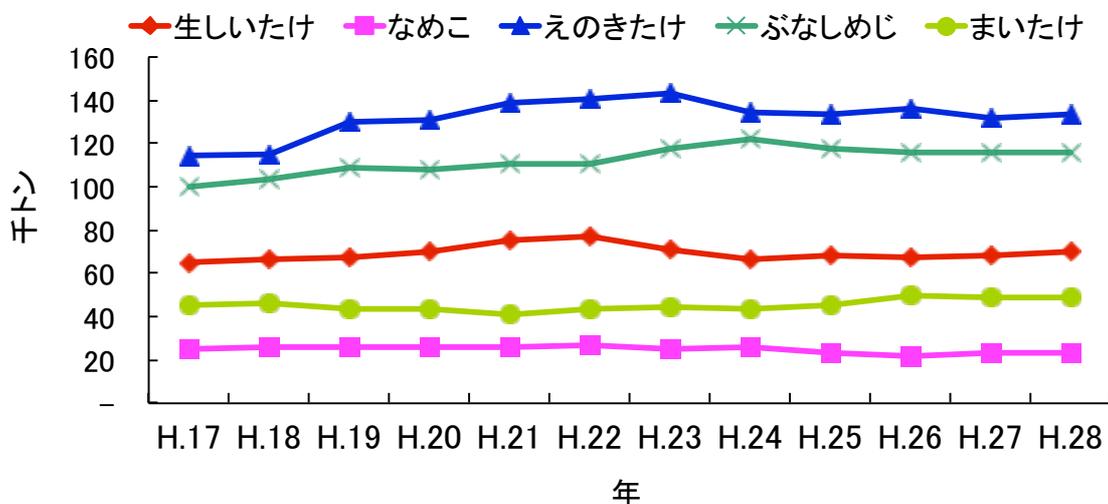


Fig. 1-2 キノコ 5 種の国内生産量の推移

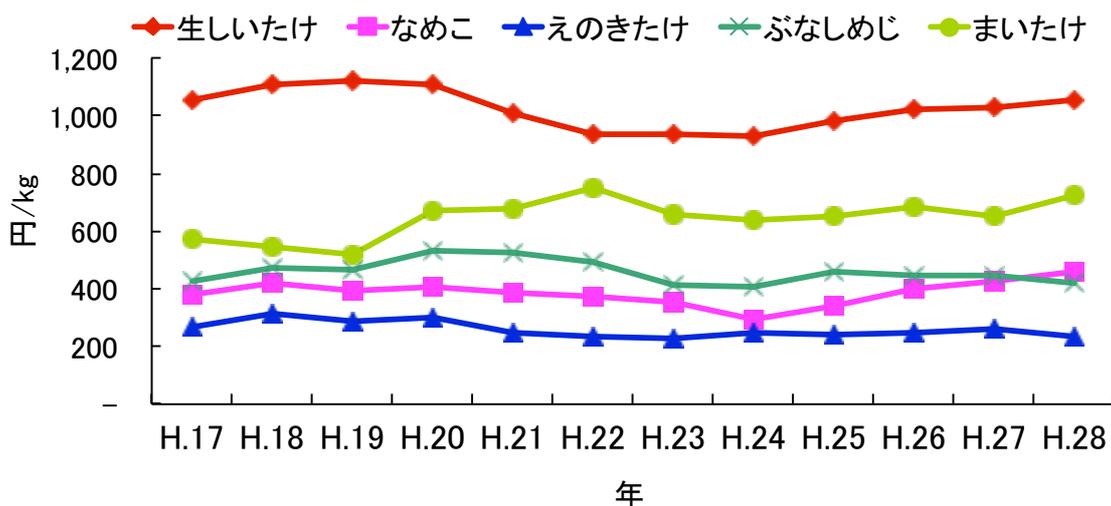


Fig. 1-3 キノコ 5 種の東京都中央卸売市場平均価格の推移

Fig. 1-2 より生しいたけの生産量はえのきたけとぶなしめじの次に多い、年7万トン前後で推移している。一方、Fig. 1-3 より、平均価格は他のキノコよりも高く、平成23年の930円/kgからH.28年には1,050円/kgまで増加している。

(2) シイタケ各部の名称

学術的に“キノコ”とは、菌類に属し繁殖器官として有性胞子をつくる子実体 (fruit body) が肉眼で認められるものを示す。分類学的に担子菌と子のう菌に属する仲間がキノコに含まれるが、分類上の特定のグループを示すものではない³⁾。食材としてのキノコは、菌糸ではなく子実体のみを指すことが一般的である。シイタケを例にとると、消費者庁「しいたけ品質表示基準」⁴⁾によって、食品としての「しいたけ」は「しいたけ菌の子実体であって全形のもの、柄を除去したもの又は柄を除去し、若しくは除去しないでかさを薄切り等にしたもの」と定義されている。ここで、シイタケ子実体の各部位の名称を Fig. 1-4 に示す。シイタケは大きく柄と傘に別れる。傘は、シイタケ上部の帽子のような部分のことであり、胞子は傘の中のひだに存在している。発生初期の傘が形成されたばかりの段階では、傘裏側は膜に覆われていてひだ確認することができない。傘は成長の過程で徐々に開いていくことで、自然に膜が柄から離れ、中のひだが現れる。柄は傘の下についている円筒状の部位である。また、柄下部の木材（あるいは菌床）内部には、シイタケ菌糸層が広がっている。



Fig. 1-4 シイタケ子実体各部位の名称

(3) シイタケの生活環

ここで、シイタケの生活環を Fig. 1-5 に示す³⁾。自然界では、シイタケ胞子はコナラやクヌギ、シイ、ミズナラといった広葉樹の倒木や枯れ木に付着し、発芽して菌糸に成長する。この菌糸は一つの核を有するもので一次菌糸と呼ばれ、別の胞子から発芽した他の一次菌糸と融合し、二つの核を持つ二次菌糸となる。一次菌糸および二次菌糸は、セルロースやヘミセルロース、リグニンといった難分解成分を分解し栄養として吸収し、寄生木材を腐朽することで成長・分化する。そして、二次菌糸は木材の表面に子実体のもとになる原基を形成し、春や秋の数日間の中に子実体を発生させる³⁾。従って、子実体は二次菌糸のかたまりそのものである。この子実体のヒダ部分に胞子が形成され、胞子は風に乗って飛ばされ、運が良ければ新たな寄生先を見つけることができる。胞子を飛ばした後、子実体は朽ちていく。そのため、シイタケが自然界で子実体を形成するのは生活環の中でもほんの一時のことであり、多くの時間を占めるのは菌糸の状態である。

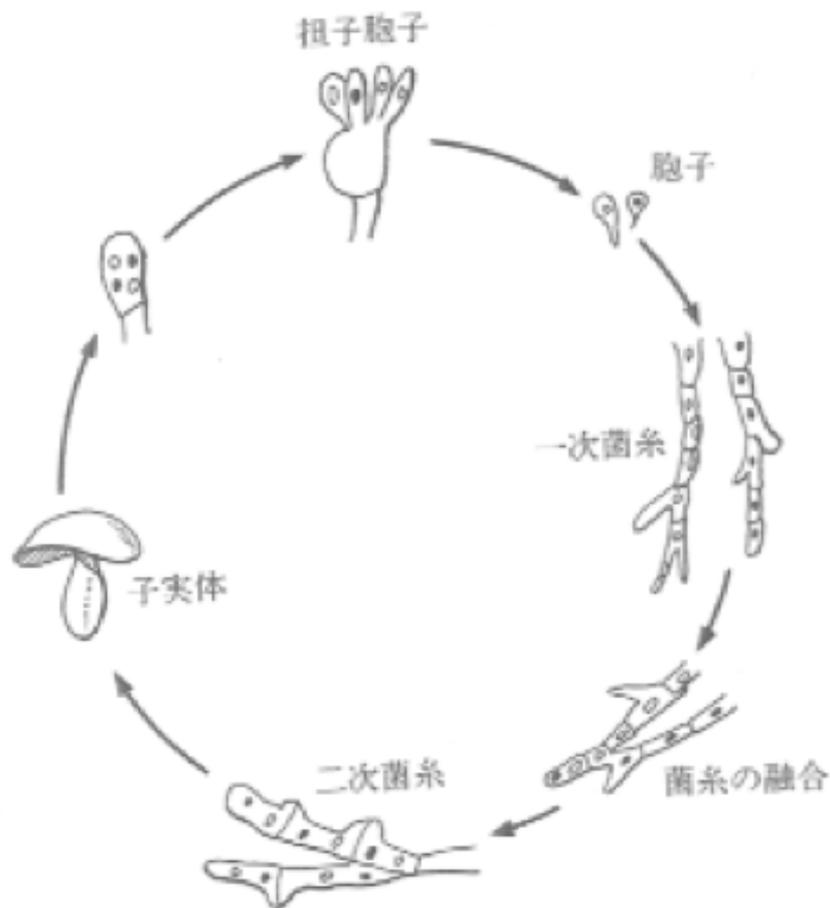


Fig. 1-5 シイタケの生活環³⁾

(4) シイタケの歴史

日本特用林産振興会の HP より、シイタケと日本人の関わりの歴史を Fig. 1-6 に示す⁴⁾。人工栽培が可能になる以前は、シイタケを食べるには山で採取するしか方法がなかったが、発生時期が限定的で採取量もわずかであったため、その美味しさや保存性も相まって稀少で高価な食材であった。こうして自然採取されたシイタケは乾燥し、鎌倉時代には大陸へ輸出されていた記録が残っている。また、室町時代には足利将軍が、安土桃山時代には豊臣秀吉が好んで食べていたことが記録に残っている。江戸時代には人工栽培がなされていたが、その方法はコナラやクヌギといった経験的にシイタケが生える事が分かっている木を伐倒し、幹に切れ込みを入れそのまま林内に置いておき、そこからシイタケが発生するのを数年間待つという運任せの方法であり、生産量は不安定であった⁵⁾。明治維新後、シイタケ栽培は中国からの外貨獲得および、農山村振興のために推奨された。この頃、田中長嶺によりシイタケが胞子で繁殖することが初めて明らかにされ、田中は各地で栽培指導を行うなど、栽培方法の確立と普及に尽力した。その後、1907年に三村鐘三郎が、1918年に田原郷造、1928年に大日本山林会、1936年に矢野富香と金子誠次郎、1937年に北島君三などが生シイタケの栽培書を出版している。そして、1943年に森喜作により純培養種菌駒法（種駒法）の発明がなされ、シイタケ菌糸の蔓延した種駒を原木に打ち込む原木栽培が広まった⁶⁾。



Fig. 1-6 日本人とシイタケの関わり 4)

(5) 原木栽培

原木栽培のタイムスケジュールを Fig.1-7 に、その栽培方法を以下に記す^{7,8)}。用いる原木は、コナラやクヌギを葉が七分黄葉する 11 月頃に切り倒し、枝葉がついたまま 1~2 ヶ月乾燥させ、その後 1~1.2 m に玉切りし、原木とする。この原木に、シイタケの二次菌糸を蔓延させた種駒 (Fig. 1-8) を直径の 2 倍の数を目安に打ち込む。

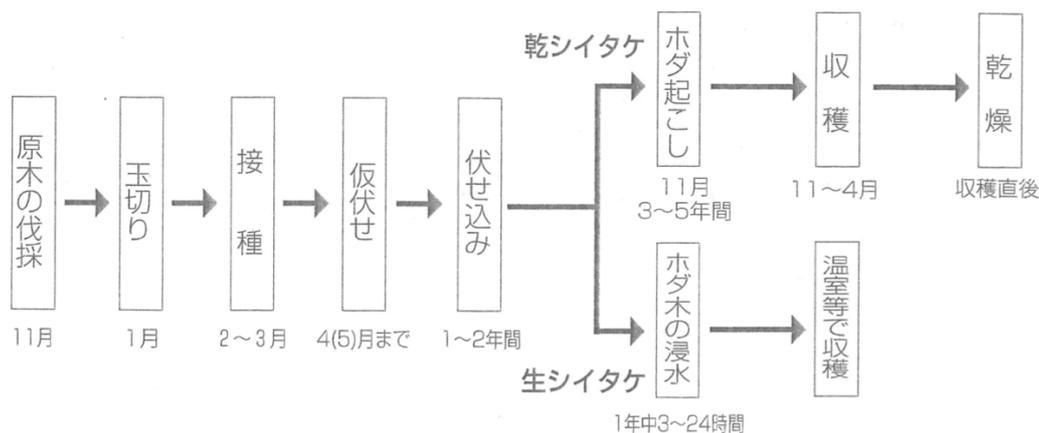


Fig. 1-7 原木栽培のタイムスケジュール⁷⁾



Fig. 1-8 シイタケ菌糸が蔓延した種駒

種駒は百種類以上の品種が各メーカーから販売されており、それぞれ特徴や形質が異なるため、生産者は目的に応じて最適な品種を選択する。種駒を接種された原木 (ほだ木と呼ぶ) は、種駒の水分の過度の減少を防ぎ、活着をよくするために仮伏せを行う (Fig. 1-9)。

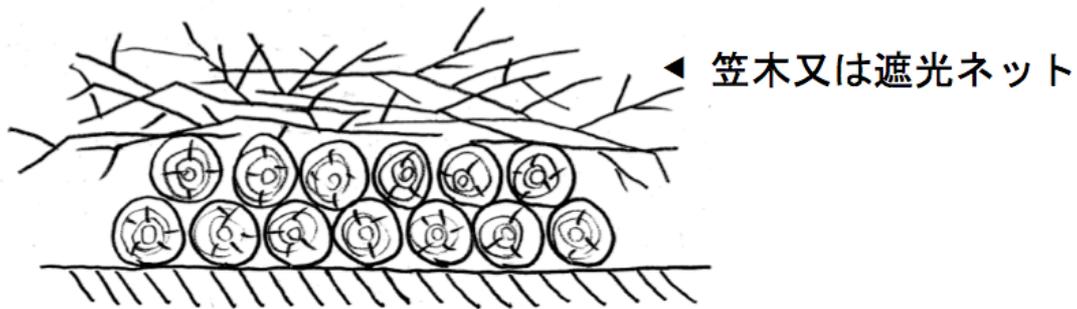


Fig. 1-9 仮伏せの断面図

仮伏せでは、ほだ木を横向きに積み上げ、上面は枝葉や遮光ネットで覆うことで、乾燥をふせぐ。数週間後、種駒を数個抜いて、抜いた駒の先端や穴の中が白い菌糸で覆われていれば仮伏せは完了である。仮伏せは、3月や4月をメドに平均気温が15℃を超えない時期までに終了させる。その後、シイタケ菌がほだ木内によく蔓延するようほだ木を組む伏せ込みを行う (Fig. 1-10)。

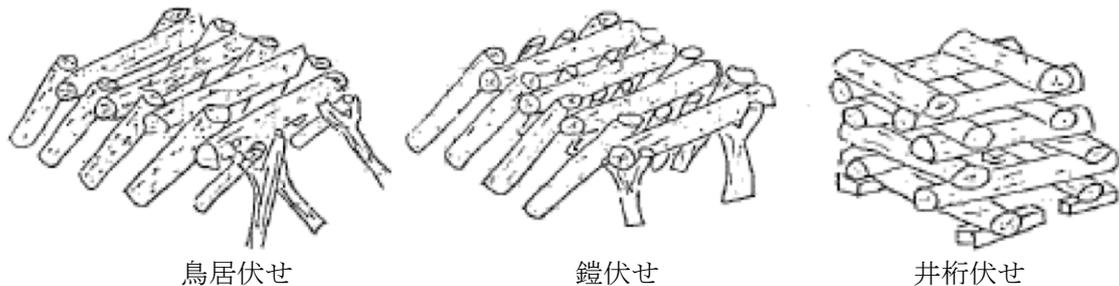


Fig. 1-10 ほだ木の組み方

伏せ込みは6乾4湿と呼ばれ通風や排水がよい場所が適しており、下草や枝打ちをした林内や、砂利を敷き散水装置と排水溝を設けた人工ホダ場で行われる。伏せ込み中は、林内なら伏せ込み部分やその周囲の雑草を刈り払い、通風を促す。人工ホダ場であれば、高温と乾燥による障害を防ぐために、適宜散水する。伏せ込みは1年半～2年かけて行われた後、ほだ木を発生場所へ移動させ、Fig. 1-11のようにほだ木の間隔をあけて立てかけるホダ起こしを行う。発生場所としては6乾4湿という伏せ込み場所に比べ、やや湿気の多い場所が適している。ホダ起こし時期は種駒の特性により異なるが、中温性品種では9～10月頃に、中低温性および低中温性品種では10～11月頃に、低温性品種では11～1月頃に実施する。

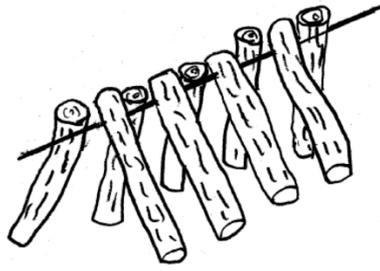


Fig. 1-11 合唱式模式図

Fig. 1-12 に発生中の様子を示す¹⁾。発生を促す気象条件として、雨や落雷があった数日後にシイタケの発生が増えることが経験的に知られているが、詳細なメカニズムは分かっていない。これを応用し、散水や木槌による打突は、シイタケの発生に有効である。発生したシイタケは、傘の成長具合や膜の切れ具合を適宜判断し、収穫される。膜の切れ具合は、乾燥シイタケとして販売する際に商品グレードの判断材料となり、販売単価に直結するため注意が必要である（後述）。



Fig. 1-12 原木シイタケ発生の様子（原木栽培 出典 wikipedia)

原木シイタケは、収穫時期によりその名称が変わり、春に発生するものを春子、秋に発生するものは秋子と呼ばれる。収穫されたシイタケは、生で販売される場合は選別・計量・包装され出荷される。乾燥する場合は、エビラとよばれる網目状に成型された板に並べられ、天日で干す。天日からの紫外線により、シイタケ中のプロビタミンDはビタミンDに変化し、カルシウムの腸内での吸収を助ける働きをする⁹⁾。天日だけではシイタケは十分乾燥せず、商品として

の保存性が悪いため、温風乾燥を利用し水分率 8%以下を目安に乾燥させる。事前に天日による予備乾燥を行うことで、温風乾燥の時間を短縮し、乾燥機の燃料を節約することが可能となる。仕上がった乾物は、膜が開ききった薄いものを香信（こうしん），膜が開ききらず肉厚で丸みがあるものを冬菇（どんこ）というグレードに分けられる（Fig. 1-13）¹⁰⁾。そして、グレード毎に選別，包装し製品として市場や小売店で販売される。乾燥シイタケは小さいものより大きいものの方が，また香信よりも冬菇のほうが市場では高値で取引される。



左 香信：傘が開ききったもの。肉薄で扁平。

右 冬菇：傘が 7 分開きになる前に収穫したもの。肉厚で丸みがある。

Fig. 1-13 冬菇と香信¹⁰⁾

原木栽培の確立により，これまでの運任せの栽培から一転し，シイタケをより多量に安定的に生産することが可能となった。Fig. 1-14 に明治～平成にわたる乾燥シイタケの年間生産量を示す¹¹⁾。森喜作が種駒法を開発する 1943 年以前，乾燥シイタケの生産量は非常に不安定で，年ごとのバラツキが大きかった。太平洋戦争が終わった 1945 年以降，種駒法は徐々に全国に普及し，乾燥シイタケの生産量は年々増加した。1963 年（昭和 38 年）には 4 千トンを上回り，1971 年（昭和 46 年）には 8 千トンを上回った。その後，生産量は 1984 年（昭和 59 年）の 1.6 万トンがピークであり，以後下降し続け 2003 年には 4 千トンとピークの 25%まで落ち込んでいる。

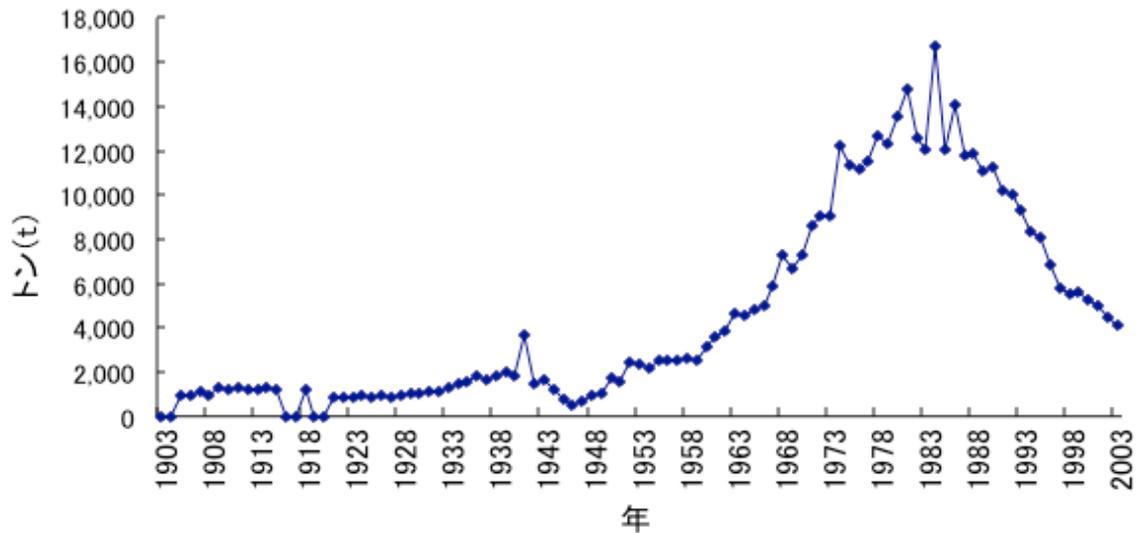


Fig. 1-14 乾燥シイタケの生産量の推移¹⁾

1960年（昭和35年）から、生シイタケ生産量の集計も開始された。生シイタケの生産量も年々増加し、1987年（昭和62年）には8.2万トンでピークを迎え、以後低下している（Fig. 1-15）。近年は7万トン前後で安定しているが、70年代に誕生した菌床栽培（後述）による生産量が増加しつづけ、現在では生産量の9割を占めている²⁾。原木シイタケの生産は、乾燥・生ともにピーク時の半分以下にまで低下している。

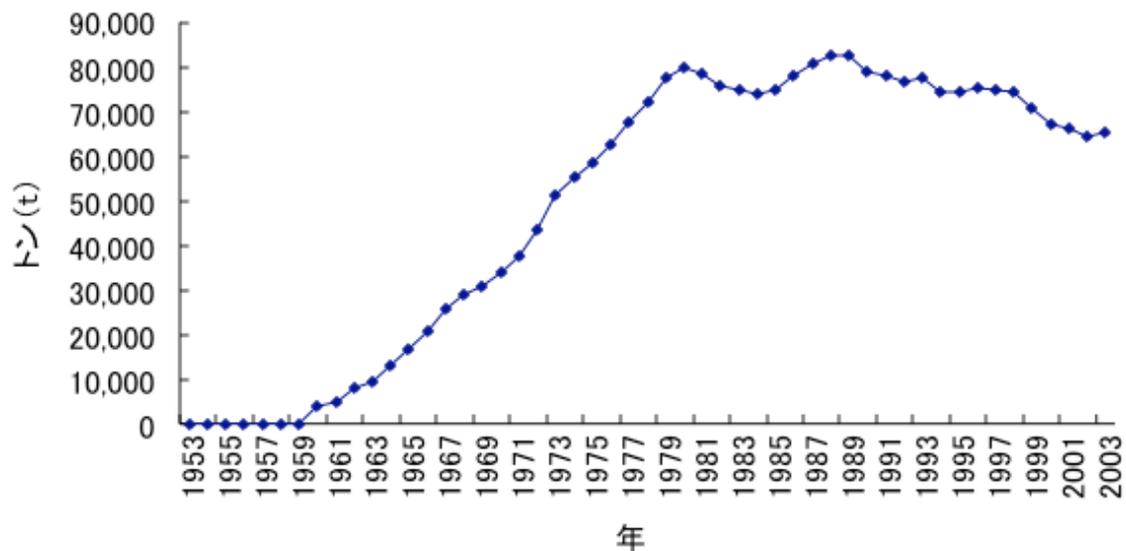


Fig. 1-15 生シイタケの生産量の推移¹⁾

生産量が増えた原木栽培であったが、原木の運搬等の機械化が困難で人の負担の大きい重労働であり、春秋に仕事が集中しそれ以外の季節は仕事が極端に少ないことから労働集約性も低かった。だが、販売単価の良さや、林業や農業

の副業として行えることから、昭和期には全国の農山村に広く認知された。しかし、他の一次産業同様、生産者の高齢化や価格の低下により、原木栽培によるシイタケの生産量、特に乾燥シイタケの生産量は徐々に低下した。栽培技術や機械設備と発達とともに、これら課題を解決するための新たな栽培方法として1975年頃に誕生し、その後普及したのが菌床栽培である¹²⁾。

(6) 菌床栽培

a. 菌床栽培のはじまり

菌床栽培は、原木の変わりに原木を粉碎したオガクズと、米糠やフスマ（小麦の糠）などの栄養材と水を混合し培地として利用する。培地は専用の栽培袋に納め、成形機によりブロック状に成型し、殺菌した後にシイタケ菌を接種し、菌床とする。この菌床内でシイタケ菌を培養し、発生・収穫するのが菌床栽培であり、エノキタケでは1930年頃から栽培に利用する柿等の原木が入手困難になってきたことから、マッシュルーム栽培で既に利用されていた瓶詰めされた種菌をヒントにおがくず栽培として既に実施されていた。菌床栽培の普及の理由は、原木栽培よりも作業を省力化できる点にある。その特性を Table 1-1 に示した（松尾，2016）⁶⁾。

Table 1-1 原木栽培と菌床栽培の特性

	項目	原木栽培	菌床栽培
栽培の 特性	使用（栽培）期間	2～3年	3ヶ月～1年
	重量	約10kg/本	約0.5～2kg/個
	シイタケの形状 (丸み、傘の開き具合)	A・B品が菌床より少ない	A・B品が原木よりも多い
	入手方法	自伐・購入	自家（自社）生産・購入
	購入価格	200～300円台/本	200～300円台/個
経営収 支	年度始め世帯員数	3.59人	3.87人
	年間使用ホダ木・菌床数	8,610本	16,530個
	出荷数量	2,711kg	10,708kg
	所得	26.8万円	211.9万円
	総労働投下時間	1,934時間	3,413時間
	労働1時間当たり所得	145円	756円
	培養用地面積	2,675㎡	378㎡
	発生用地面積	624㎡	435㎡

原木栽培では、原木の大きさや重さから配置に広い面積を必要とし、建物内に展開するには制限があり露地栽培が多かった。しかし、菌床は栽培のための基材としては単位あたりのサイズが原木より小さく軽く、また形と重さが一定の規格に決まっている。そのため、棚の利用が可能となり、小さい面積にたくさんの栽培基材（菌床）を配置することが可能となった。また、軽く小さくなることで、運搬作業の負担が軽減された。栽培期間も菌床栽培の方が短く、原料の仕入れから現金化までの期間が短いことで、年間の販売機会も増え売り上げを増やしやすくなった。また、形のいいシイタケも菌床栽培のほうが発生しやすいため、販売単価の面からも菌床栽培の方が有利である。現在の生シイタケ産量年間約7万トンのうち、約9割は菌床栽培由来であり、原木栽培由来は1割に満たない量にまで減少している。

b. 菌床栽培の流れ

菌床栽培の栽培手法を Fig. 1-16 から示す¹³⁾。菌床栽培では、まず培養基材となるコナラ等広葉樹のオガクズに米ぬかやフスマなどの栄養材を混合し、水分率を 60 %程度に調整したものを培地とする。これをガス交換のためのフィルタのついた専用の栽培袋に充填し、ブロック状に成型する (Fig. 1-16)。



Fig. 1-16 菌床製造

そして、栽培袋内の培地を無菌状態にするために高温高圧殺菌を行う (Fig.1-17)。



Fig.1-17 高温高压殺菌

この培地を室温程度まで冷却した後に、シイタケ菌を播種し、害菌が侵入しないよう袋を閉じる (Fig. 1-18)。これを菌床と呼ぶ。



Fig. 1-18 シイタケ菌の接種

この時使用するシイタケ菌は‘種菌’と呼ばれ、1 L 程度の容器内で広葉樹の

オガクズとフスマ等を培地にしてシイタケ菌の二次菌糸を蔓延させており、1 菌床に対して数 g ずつ播種し、菌床内で拡大培養させる (Fig. 1-19)。

作業としては播種であるが、業界では接種と呼ぶため、以後、接種に統一する。種菌は、多くの場合種菌メーカーから購入したものを使用する。原木の種駒同様に、様々な種菌メーカーが栽培条件 (例：自然栽培向け、空調栽培向け、培養中の高温に耐性がある等) やシイタケの形質や発生 (例：傘が厚い、初回発生が多い) 等に特徴ある品種を開発しており、各生産者は自社の栽培方法や経営方針に適合した品種を購入し、使用する。



Fig. 1-19 種菌

接種後，袋を閉じた菌床は温湿度を一定にした培養施設に移され，培養工程に入る。



Fig. 1-20 培養初期



Fig. 1-21 一次培養

培養は，菌糸が菌床に蔓延するまでの一次培養と，褐変化および原基形成が

起きる二次培養に大別される。一次培養では、接種した種菌から菌糸が栄養剤等を養分として拡大していく (Fig. 1-21)。菌床表面はもちろん、菌床内部まで菌糸は蔓延する。菌床サイズや種菌の種類、栄養剤等の条件によっても異なるが、2.5 kg 菌床で接種から一次培養完了までにおよそ1ヶ月必要である。一次培養の間、菌床は害菌の汚染を受けやすく、殺菌不良や作業中に栽培袋にわずかな穴 (ピンホール) が空いただけで、そこから害菌汚染が起こる。汚染された菌床では、適切な収穫量を望むことができず、周囲の菌床の汚染源となる恐れがあるため、直ちに廃棄される。

二次培養では、菌床表面が赤褐色の皮膜に徐々に覆われ褐変化していく (Fig. 1-22)。



Fig. 1-22 二次培養

この皮膜は、菌床内への害菌の侵入を阻むもので、更に皮膜下に菌糸から分化した子実体のもとになる原基が複数形成される。一次培養完了から、菌床全体が褐変化するまでには更に30日程度要する。褐変化が完了した後も、原基形成を更に促すため培養は継続される。前述した通り、菌床栽培は原木栽培に比較して培養のための用地面積が小さくてよく、培養施設内では様々な培養ステージの菌床が数万菌床収容されている。培養にかかる期間は、種菌メーカーが種菌の品種毎に日数あるいは、培養期間中の積算温度で推奨値を設定しており、

生産者はそれに基づいて適切な培養日数を設定している。マニュアルや、メーカーの推奨値としては 100 日前後のものが多い (Fig. 1-23)。



Fig. 1-23 100 日経過時の菌床

褐変化開始直後から、菌床は少ないながらも子実体を生やすことが可能になり、物理的な衝撃や 20℃以下の温度に晒されるといった刺激を受けると、培養中にも関わらず袋内で子実体が発生する袋内発生が起こる。袋内発生により発生した子実体は栽培袋への接触等により変形し、出荷に適さないため除去される。作業の手間が増えるため、袋内発生は忌避されており、培養期間中は刺激を避けるために温度を一定にした上で、菌床は所定の場所へ静置することが通常である。

培養中の環境は Table 1-2 が推奨されており^{7) 13) 14)}、冷暖房・換気・加湿・照明といった各設備を備え、それぞれの要素を管理する。培養施設に収容された数千～数万の菌床は、それぞれ呼吸により熱と CO₂を排出しているため、冷暖房設備と換気設備の管理は重要である。換気を止めると CO₂濃度が人体に影響を及ぼす 30,000 ppm を容易に上回るため、作業者の安全を担保するために換気を止めることは困難である^{7) 13) 14)}。換気を行いつつ温度管理を行うため、夏期では換気により暑い外気を導入しながら冷房を行うという非常に効率の悪い温度管理を強いられる。そのため菌床栽培における、夏季の電

気代は高額であり、生産者は施設の断熱性能向上や、省エネ性能の高い冷房設備の導入といった工夫を行っている。一方、冬期においては、施設の断熱性能と菌床の発熱により、必ずしも暖房設備を利用して温度を維持する必要はなくなる。著者の所属する組織では、培養施設（岡山県県南）に暖房設備はついておらず、冬期においても菌床の発熱と施設の断熱性能、冷房設備によって温度を管理している。湿度は加湿設備により、また明るさは照明により管理する。

Table 1-2 培養工程および発生工程の環境条件

	培養	発生・休養
温度	20 °C前後	17 °C前後
相対湿度	60 %	70～80 %
CO ₂ 濃度	3,000 ppm 未満	1,500 ppm 未満
明るさ	うっすら明るい程度	150 lx 以上
日数	80 日～130 日	3～5 回発生させる

培養の完了した菌床は、栽培袋を除袋し、発生用の棚へ並べ発生工程に移行する（Fig. 1-24）。この際、発生した子実体が隣の菌床の子実体とぶつからないようにするため、菌床は間隔を空けて並べられる。また、シイタケの呼吸により発生した褐色色の水が菌床に付着しており、そのままでは発生した子実体を汚す原因になるため散水により菌床を洗い流す。皮膜が十分形成されていれば、菌床を袋外に晒しても散水をしてしても害菌に汚染されることはない。菌床は、施設の移動や栽培袋からの露出といった環境の変化、また移動作業に伴う振動や散水といった刺激を受け、除袋後直ちに子実体を発生させる。



Fig. 1-24 除袋

除袋後，発生した子実体は 3 日程度で親指サイズまで成長し，これを芽と呼んでいる（Fig. 1-25）。



Fig. 1-25 芽の発生

芽同士の距離が近い場合，成長した際に接触して痛みや変形を起こし，商品

価値を下げる恐れがある。そのため、芽は芽同士の間隔を空けて間引かれる (Fig. 1-26)。



Fig. 1-26 初回発生

その後、芽は成長し製品サイズまで成長したものを収穫する (Fig. 1-27)。1つの菌床からは、数日間に渡って収穫可能であり、除袋してから収穫が終わるまではおよそ10日程度である。



Fig. 1-27 収穫

収穫の終わった菌床は、まだ廃棄せず 2 回目の発生操作に備えて散水による給水を行いながら休養させる (Fig. 1-28)。



Fig. 1-28 休養

収穫や芽の間引きを行うと、菌床皮膜下の内部がむき出しになり、そこにはカビの汚染源となる。カビを散水により落としながら休養させることで、むき出し部分は再度皮膜を形成する。適切に休養された菌床は、1回目発生より全体的に黒みがかり、より厚い皮膜を形成する。2回目の発生操作として、休養菌床を水に数時間浸水するあるいは、水を直接注水によることで刺激を与える。いずれの操作も、休養中の散水では得られなかった量の水を菌床内部に注入することが刺激となり、子実体の発生を誘発する。2回目に発生する子実体は、1回目よりも肉厚で大きくなる傾向にある (Fig. 1-29)。



Fig. 1-29 2回目発生

休養と発生を繰り返すことで、1つの菌床から子実体を複数回にわたり収穫することが可能である。繰り返す毎に子実体の発生量は減っていくため、何回繰り返すかは費用対効果を鑑みて決められる。こうして収穫されたシイタケは、包装・検品された後、出荷される。発生施設および休養施設の環境は、Table 2の通りであり、必要な設備は培養施設とほぼ同じである。発生施設では、培養施設ほど菌床密度が高くなく(前述)、また菌床からの呼吸量も小さいため(大賀, 1998)¹⁵⁾、CO₂濃度を 1,500 ppm 未満に維持することは比較的容易である。相対湿度は、原木栽培同様に培養(伏せ込み)よりも高い方が子実体は発生しやすい。照度も子実体の発生や色づきに必要であるが、作業者が作業しや

すい明るさを担保してやれば，子実体の発生に通常問題はない。

複数回発生を行った菌床は廃棄され，これを廃菌床と呼ぶ（Fig. 1-30）。廃菌床は，廃棄には産業廃棄物として処分費用が必要であるが，堆肥メーカーへ堆肥原料として販売することが可能であり，また菌床培地としての再利用（伊藤，2016）¹⁶⁾や飼料化する方法^{17) 18)}等が研究されている。



Fig. 1-30 廃菌床（廃棄）

(7) 原発事故の影響

2011年3月11日に発生した東日本大震災と、それによる東京電力福島第一原子力発電所の放射能事故は、シイタケ業界に大きな影響を及ぼした。原木露地栽培の生シイタケ等から、当時の国の基準を上回るセシウムが検出されたと公表されるようになり、福島や岩手などの東北地方産を中心に、Table 1-3 に示すような価格下落や取引停止などの深刻な風評被害が生じた¹⁹⁾。

さらに、主に東日本のキノコ産地に対する原木の供給地であった福島、群馬、茨木、千葉などの木がほぼ使用できなくなり、その他の産地に需要が集中したため、原木栽培・菌床栽培問わず原木不足と原木価格の上昇を招くことになった。代表的な原木であるナラ類のほだ木1本あたりの価格はTable 1-4 に示す通り、震災翌年の2012年から毎年上昇している²⁰⁾。原木の供給減と価格上昇は、生産者にとって死活問題である。また、家庭や事業所で発電された太陽光などの再生可能エネルギーを電力会社へ買い取ってもらえる制度が開始されたことに合わせ、電力会社の買い取り費用の一部を電気利用者全員で負担するという、再生可能エネルギー発電促進賦課金(以下、再エネ賦課金と記す)制度²⁰⁾が2012年に開始された。これによって、民間・事業者問わず電気使用量に応じた金額が電気代に新たには加えられている。この再エネ賦課金の単価(従量電灯A、使用量15kWhを超える場合)は、2012年度導入時の22銭/kWhから2018年度には2.90円/kWhまで年々上昇しており、仮に電気使用量が増えていなくても電気代は増え続けている²⁰⁾。空調に多量の電気を必要とする菌床栽培においては、経費にかかる電気代の割合が増加しており、栽培の省エネルギー化は重要な課題である。

Table 1-3 シイタケ風評被害の一部

組織・地域	具体的内容
全農	(品目)乾燥シイタケ (内容) 2012年岩手県産の入札が低迷しており、通常より5割以上値下げして販売した。 数年取引をしていた静岡県産が約200ケース商談取り止めになった。
全国椎茸商業組合連合会	(品目)乾燥シイタケ (内容) 取引先スーパーが西日本産に変更した。 学校給食で九州産を指定された。 原発事故前の岩手県産であっても、売りにくいという理由で338袋返品された。 放射性物質検査で検出しなかったが、伊豆産は売りにくいという理由で35,000袋返品された。
岩手県内のJA	(品目)生シイタケ (内容) 量販店より、一方的に取引中止になった。 市場価格が例年の半値以下になった。

Table 1-4 なら類の価格推移

年次	ほだ木1本当たり価格(円)
2007	229
2008	233
2009	232
2010	237
2011	228
2012	247
2013	254
2014	262
2015	296
2016	297

3. 先行研究

(1) 栽培温度について

阿部は、培養工程における菌床への短期間の高温曝露が収穫量に与える影響を検証しており²¹⁾、菌糸蔓延直後または褐変完了直前に培養温度を 30℃にすると子実体発生量が増加傾向となり、発生操作 5 日前に温度を 30℃にすると減少傾向になることを明らかにしている。また、プレートを用いた研究で、シイタケ菌糸は 25℃で最も培養速度が早くなることが分かっているが⁽¹²⁾、菌床にて最も培養が短期間で完了する温度は不明である。

(2) CO₂濃度について

大賀は、培養期間では菌糸が蔓延する時期に CO₂ 排出量が最も多くなりその後減少していくこと、また発生時に再度排出量が多くなることを明らかにした¹⁵⁾。培養工程における CO₂ 濃度が与える影響についての報告は非常に少なく、Lambert, E B らがアガリクス茸を CO₂ 濃度 3,000 ppm 以上の環境で栽培すると、子実体に奇形が起こることを報告した²²⁾。一方、発生工程においては、高濃度 CO₂ 暴露がシイタケや他のキノコに及ぼす影響を、形態異常や化学成分組成の変化から評価している報告は多数ある²³⁻²⁶⁾。培養施設の CO₂ 濃度については、多くのマニュアルでは 3,000 ppm 以下と示されているが⁷⁾¹³⁾¹⁴⁾、その根拠は明確ではなく、3,000 ppm 以上で培養した菌床の収穫量に関する報告はまだない。Lambert, E B らのアガリクス茸に関する研究結果²²⁾が反映されていると考えられる。多くの菌床が培養されている培養施設ではその呼吸量は膨大であり、CO₂ 濃度を 3,000 ppm 以下に維持するために換気設備を常時稼働させることがシイタケ生産現場では慣例となっている。そのため、マニュアルに従う生産者の多くが培養施設の換気を行いながら冷暖房を行うという非効率的な空気調和を強いられている。

(3) 光について

阿部は青色 LED が赤色 LED や緑色 LED に比較して、菌糸伸長が遅くなること、原基形成期に照射することで子実体発生量が増加することを明らかにした²⁷⁾。

(4) 培地

先行研究としては、栽培環境や生育方法よりむしろ培地組成に関するものの

方が多い。培地の基材や栄養材の変更が子実体の収穫量や品質に与える影響を評価したものであり、これはシイタケだけでなく、栽培品種のキノコ全般にも当てはまる。シイタケ栽培には広葉樹を使用することが基本であるが、川島は培地基材としてスギオガコが容積比1割までであれば、子実体の発生に影響がないことを報告した²⁸⁾。新田らは、栄養材のフスマの代わりにソバ焼耐粕を用いることで、収穫量が増加することを報告した²⁹⁾。長野県林業総合センターは栽培を安定化させる手法として、シイタケ培地にエノキタケ栽培後の廃オガやクエン酸を混ぜる方法を報告した³⁰⁾。徳島県農林水産総合技術センターでは、カキ殻粉末を培地重量の2%混合することで子実体発生量が増加することや、一次発生後の菌床をトウモロコシ水浸出液に浸漬することで子実体発生個数は増加しないものの、サイズが大きくなることを報告した³¹⁻³²⁾。寺嶋らは、培地にトレハロースを添加することで、Mサイズ以上の子実体の個数割合が多くなることを報告した³³⁾。藤原らは、栄養添加物の種類や混合割合を変えることで、収穫量増加だけでなく、子実体の質も制御できる可能性を示唆した³⁴⁾。数々の報告があるが、商業栽培においては高い生産効率と安定生産（質および量）が重要であり、上記培地組成に必要な素材の供給量や品質が安定しているか、生産効率が向上するか、また生産が安定するかが導入の鍵になる。

(5) 省エネルギー

述べた通り、菌床栽培では菌床からの発熱と呼吸により換気と冷暖房が重要であり、換気しながら空調機器を稼働させるため、夏期の冷房コストの負担が大きい。夏季における空調機器の負担を少しでも軽減するため、上村らは雪山の融解水をシイタケハウスに循環し冷房とすることで、冷凍機と比較して2割以上のコストを低減した³⁵⁾。しかし、この方法は雪国でしか利用することができない。近年、全国的に導入されているのが熱交換型換気扇という換気装置である。これは、媒体を介して2つの流体間で熱交換を行う装置であり、物体の加熱あるいは冷却を行う目的で使用される³⁶⁾。換気装置としての熱交換型換気扇は独立した吸気機構と排気機構を有し、外気を吸気する際に排気する内気との間で媒体を介して熱交換を行わせる（Fig. 1-31）。このため、外気を内気温度に近づけた状態で吸気することが可能となり、夏期では室温を上回る外気を冷却して吸気し、冬期では室温を下回る外気を加熱し吸気することで、冷暖房設備の省エネルギー化に大きく貢献することが可能になる³⁶⁾。オフィスビルを対象

にした研究^{37), 38)}では、熱交換型換気扇は夏季においては空調設備の消費電力を13～19%削減し、冬期においては25～30%削減すると報告されている。装置は、換気モードを熱交換と通常の換気を行う普通換気とを切替ることが可能である。しかし、実際のオフィスビルも菌床シイタケ栽培施設も、熱交換のまま通年で稼働させていることが多い。そして、菌床シイタケ栽培施設では室内の菌床から多量の熱が発生しており、冬季に熱交換で換気を行うと室温が上昇し冷房が稼働することがある。そこで、冬季に室温が上昇した際には、熱交換型換気扇の換気モードを普通換気に切替え、室温を冷却するほうが省エネルギーではないかと考えた。

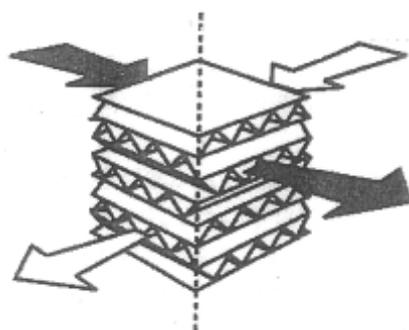


Fig. 1-31 熱交換器の特徴

4. 研究目的

以上の通り、シイタケ栽培は自然採取から原木栽培、菌床栽培とその栽培手法が開発され、生産量も年 7 万トンまで増加し、年間通じて生シイタケを日本中で安定的に食することが可能になった。そして現在では生産者の 9 割が菌床栽培によりシイタケを生産している。しかし、原材料費や空調費は年々増大し、菌床シイタケ栽培事業者の経営を大きく圧迫している。更に、栽培の効率化は進んでいない。こうした影響や後継者不足問題等から、中小規模の事業者は年々数を減らしている。このままでは、我が国のシイタケ産業は衰退し、手軽に美味しいシイタケを食することが困難になる可能性がある。そこで、菌床シイタケの栽培条件や空調設備を効率化することで、栽培にかかるコストを低減し、シイタケ産業を盛り上げる一助になることができると考えた。

まず、菌床シイタケ栽培において発生のための準備工程であり生産性に関連深いにも関わらず、栽培環境条件が明らかでない培養工程について、生産に最適な温度および CO₂ 濃度の検討を行なった。次に、培養施設および熱交換型換気扇の特徴を利用し、外気導入による室内冷却を目指した熱交換型換気扇の制御装置を試作した。この装置による省エネルギー効果を、実際の培養施設で検証した。

II 培養工程における温度と CO₂ 濃度の影響

1. 目的

菌床シイタケ栽培において、培養工程における温度を 20 °C 前後と推奨する栽培テキストもあるが、この温度まで低下すると袋内発生が起こることが経験的に分かっており、袋内で発生したシイタケは商品価値を損なう。一方、温度が上がりすぎるとシイタケ菌の成長が抑制され、発生までの期間延長や発生量減少の恐れがある。CO₂ 濃度については、各栽培テキスト等で指摘されている 3,000 ppm 以下を維持するため、収容する培養菌床数に応じた高い換気効率を要求される。しかし、培養施設には同時に冷暖房設備も稼働しており、換気効率を維持するあまり冷暖房設備の負担が大きい。培養温度は低すぎても高すぎてもシイタケの生産効率が低下するために避ける必要があり、一方では高めれば夏季の冷房設備の負担が減り経済的である。また CO₂ 濃度は、生産に影響しない濃度に管理することができれば、経済的である。そこで、発生のための準備工程であり収穫量と関連の深い培養工程について、施設の環境管理の最適化を目的として温度および CO₂ 濃度の検討を行った。

2. 材料および方法

(1) 培地及び菌床

培地は、栽培マニュアル^{7, 13, 14)}を参考に我々が常時栽培に用いている組成とした (Table 2-1)。

Table 2-1 培地組成

	材料	1ブロックの量
基材	広葉樹チップ	1.4 L
	広葉樹オガクズ	3.3 L
栄養材	デルトップ	180 g
	ふすま	62.5 g
水	水道水	60 %W.B.

用いた基材はブナなどの広葉樹を使用しており、チップは 15 mm×10 mm×2 mm 程度の木片であり、ノコクズは 4 mm×2 mm×1 mm 以下の大きさの木材粉碎物である。この基材に栄養物としてデルトップ (森産業(株)) およびフスマ、さらに水道水を加えて含水率 60 %W.B.に調整し、ブロック状に成型した。成型した菌床は呼吸用フィルタの取り付けられた専用のポリエチレン製栽培袋 ((株)エフテック社製, ST50-20W 40φ) へ収め、高温高圧殺菌 (118°C, 0.2MPa, 40 分) を行い、無菌状態で冷却後シイタケ菌株約 10 g を植菌して、袋を閉じた。菌株は、菌床シイタケ生産者が主に用いる森産業(株)製の菌株 XR-1 を使用した。

(2) 温度試験

温度試験用に小型培養箱を自作した。幅 1,100 mm×奥行 440 mm×高 1,480 mm のガラスケースに温度管理用のヒータ ((株)ピカコーポレーション社製, プレートヒーターFHA-PH60) と、換気用のファン ((株)アイネックス社製, CFY-80F) を取り付け付けた。さらにシイタケ菌床の褐変化には光が必要なので、照明用に白色 LED (IDEC(株)社製, LF1B-C3S-2THWW4) を設置した。この培養箱を、温度 20 °C, 相対湿度 70 %R.H, CO₂ 濃度 500 ppm 以下に管理した実験室に設置して、ヒータの加温により温度条件を変化させた。各試験区の温度は、先行研究²¹⁾や栽培マニュアル^{7, 13, 14)}から 20 °C を下限, 28 °C を上限とし、20, 22, 24, 26, 28 °C の 5 区を設定し、それぞれの区に 12 菌床を用いた。温度制御はサーモスタットにより設定温度±0.7 °C の精度で行い、記録はデータロガ ((株)T&D 社製, TR-74Ui) に温度センサ (同社製, THA-3151) を接続し 5 分毎に行った。換気用ファンを常時稼働して、相対湿度を 60±15 %R.H, CO₂

濃度を 1,000 ppm 以下に維持した。照度は菌床上面で 300 lx とした。

菌床は植菌から 85 日間培養した後、子実体を発生させた。発生施設の温度は、昼間（8～17 時）18 °C、夜間（17～8 時）15 °C、相対湿度 90 %R.H、CO₂ 濃度 3,000 ppm 以下に設定した。

(3) CO₂ 濃度試験

CO₂ 濃度試験用に、温度試験とは別の小型培養箱を自作した。幅 410 mm×奥行 620 mm×高 1,180 mm のプラスチックケースに指示調節計（Azbil(株) 社製, ARF100）, CO₂ センサ（(株)チノー社製, MA5002-0P）, 換気用のファン（同上製品）および照明用の白色 LED（同上製品）を設置した。制御装置として、指示調節計, CO₂ センサ, 換気用のファン, 更にデータロガ（(株)CHINO 社製, KR2000）を接続し使用した。制御はファンを ON/OFF させることにより設定値に対して±300 ppm の精度で行い、記録は 1 分毎に行った。この培養箱を温度 22 °C、相対湿度 60 %R.H、CO₂ 濃度 1,700 ppm の自社培養施設に設置し、箱内の温度と相対湿度は施設と同じになるようにした。各試験区の CO₂ 濃度は、培養施設と同じ 1,700 ppm が下限で、上限は労働施設の CO₂ 濃度を 5,000 ppm 未満にすることを定めた労働安全衛生基準法に準拠して 4,500 ppm とし、1,700, 2,500, 3,500, 4,500 ppm の 4 試験区を設定し、それぞれの区に 12 菌床を用いた。照度と発生条件は、温度試験と同様とした。

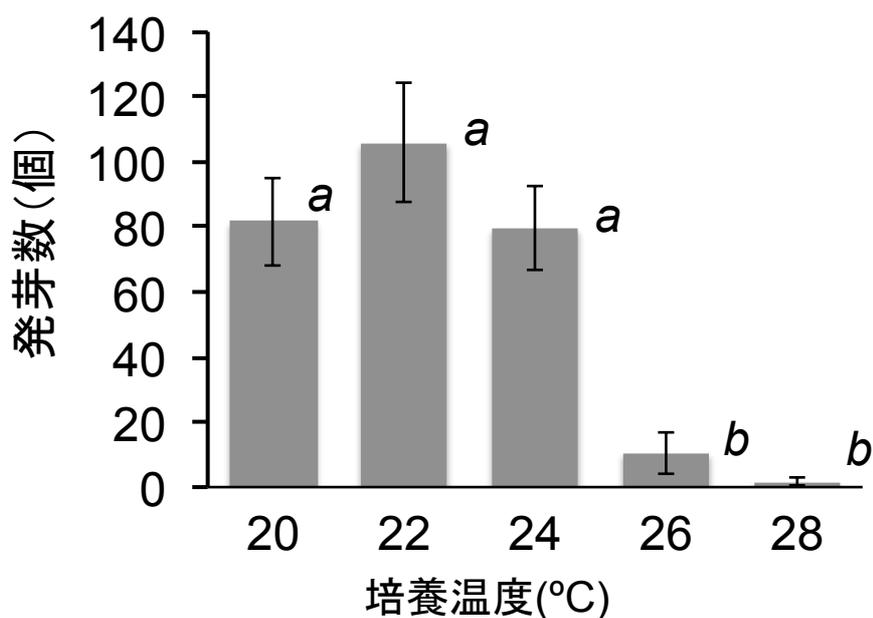
(4) 収穫量の計測

発生工程に移行した菌床は、3 日目に発芽数を計測した。この後、成長に伴う子実体同士の接触を避けるため、芽欠き作業を行い各菌床の芽数を 40±3 個に調整した。収穫は傘の膜が切れそうなもの、および切れてしまったものを対象として、午前 9 時と午後 4 時の 1 日 2 回実施した。収穫した子実体は重量および各規格の個数を計測した。規格は傘の最大直径により、4 cm 未満を S, 4 cm 以上 4.5 cm 未満を M, 4.5 cm 以上 5.5 cm 未満を L, 5.5 cm 以上は LL とした。収穫量は 1 回目に発生した子実体で評価した。1 回目以降の発生は、休養工程の環境条件が収穫量に影響するため、今回の試験では除外した。集計した発芽数、子実体の個数、重量は分散分析により有意差の検定を行った。

3. 結果および考察

(1) 温度試験

各温度区における発芽数を Fig. 2-1 に示す。発芽数は 1 菌床あたりの平均とした。最も発芽数の多かったのは 22 °C 区で 100 個以上を得た。次いで、20、24 °C 区が 80 個であったが、これら 3 区には有意差は無かった。一方、26 °C 区では 10 個、28 °C 区では 2 個で発芽の見られなかった菌床もあり、いずれも 24 °C 以下の区と比べて有意に少なかった。



異なる符号間で有意差あり ($p < 0.01$)

Fig. 2-1 培養温度毎の袋切り 3 日目の発芽数

この原因として、26 °C 区および 28 °C 区では、菌糸蔓延後の隆起および褐変化が遅延したことが考えられた。55 日目の菌床の褐変化状況を Fig. 2-2 に示す。22 °C 区では菌床全体が褐変化したが、26 °C 区では右下部分のみ褐変化し、残りは白い菌糸の状態のままであった。28 °C 区においては、全面が白い菌糸の状態のままであり褐変化していなかった。26 °C 区では菌床全体の褐変化に 65 日前後必要であった。28 °C 区では、培養 85 日目においても 7~8 割程度しか褐変化しなかった。20 °C 区および 24 °C 区は 22 °C 区と同様の状態であった。このことより、培養施設温度が 26 °C 以上の場合、シイタケ菌床の褐変化および隆起が阻害されることが明らかになった。

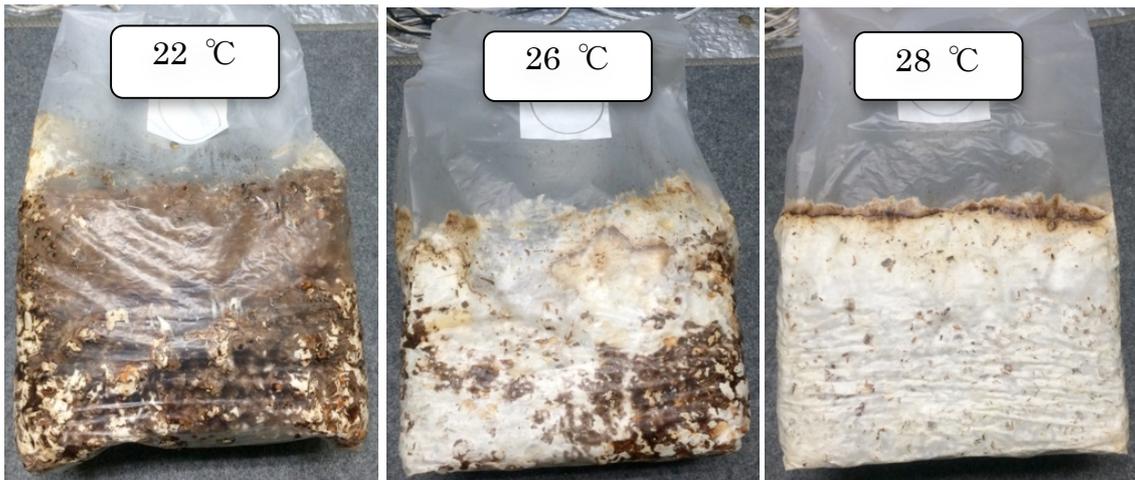
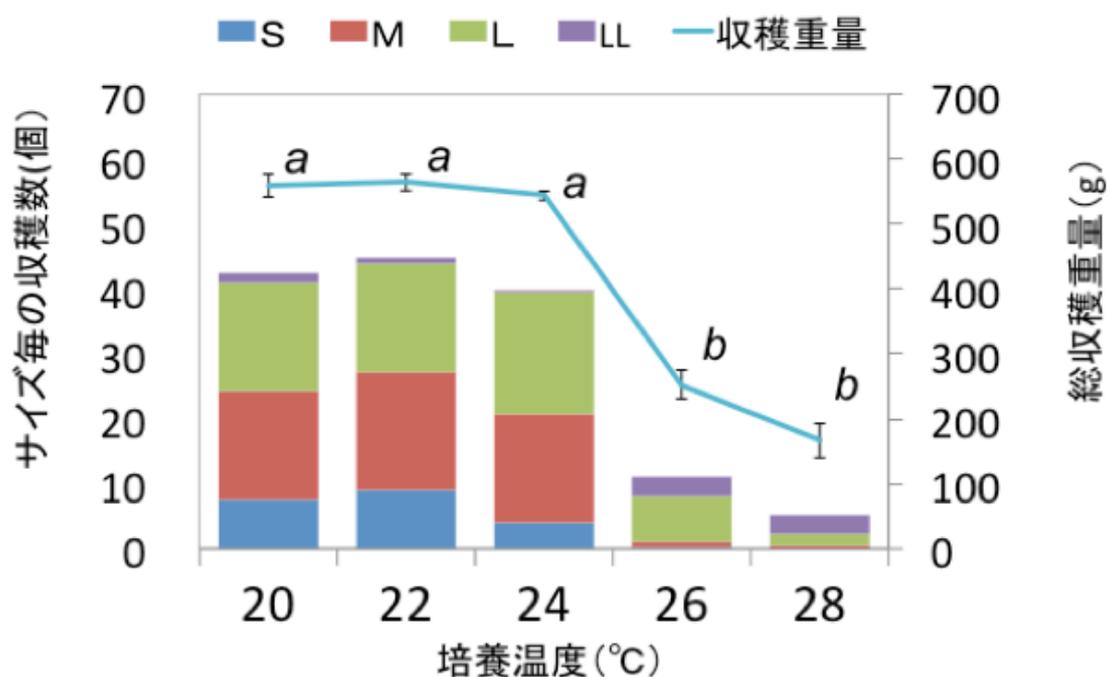


Fig. 2-2 55 日目の菌床の褐変化の状況

各温度区の収穫重量と収穫個数を Fig. 2-3 に示す。各区とも 40 個程度に芽欠きを行ったため、20~24 °C 区の収穫個数も 40 個程度であり、収穫重量も 3 区とも 550 g 程度であった。この 3 区の規格を見ると M と L が多く、この 2 種類で約 80 % を占めた。いずれの規格にも奇形は認められなかった。現在、スーパーマーケットを中心に最も流通量の多いシイタケの規格は M および L であり、商品としての価値は高かったといえる。商品価値の小さい S の少ない 24 °C 区は、培養温度として適している傾向にあった。一方発芽数の少ない 26 °C 区および 28 °C 区では、収穫個数 10 個程度で収穫重量も 200 g 程度と他の試験区よりも有意に低かった。規格は L が中心であり奇形もなかったため、収穫物は商品としての価値はあった。しかし、収穫重量が低く収益性が低いため、26 °C および 28 °C は高い収穫重量を得るための培養温度として不適であると考えられた。



異なる符号間で有意差あり (P<0.01)
 Fig. 2-3 培養温度毎の収穫数と総収穫重量

発生工程において 26 °C 区は 28 °C 区とともに低い発芽数であったが、培養工程中の菌糸伸長速度は他の試験区より早かった。Fig. 2-4 は培養 20 日目の 22 °C 区および 26 °C 区の菌床の様子で、白い部分はシイタケ菌糸の伸びた部分を示しており、26 °C 区のほうが早く菌糸が伸びていることが確認できる。菌糸が蔓延するまでの日数は 26 °C 区が 5 日程度早かった。他の区は 22 °C 区と同様であったことから、シイタケ菌糸の培養最適温度が 26 °C 付近にあることが示唆された。このことより、培養工程の中でも菌糸伸長と褐変化でそれぞれ異なる最適な温度があり、菌糸伸長期間の培養菌床を 26 °C、菌糸が蔓延し褐変化が開始してからの期間は培養菌床を 22~24 °C のそれぞれ異なる温度に管理することで、培養工程の期間を短縮することができると考えられた。しかし、阻害温度と隣り合わせであることから、リスクとの兼ね合いを考えるべきである。

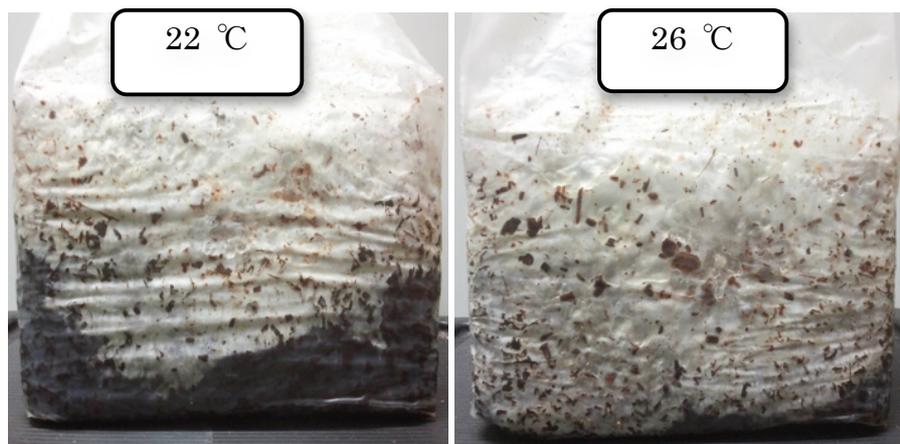


Fig. 2-4 培養 20 日目の 22℃区および 26℃区の菌床の様子

20 °C区では、培養 70 日目前後に袋内発生が生じた菌床があった。このことから、20 °Cという培養温度は、培養だけでなく発生も可能な温度帯であることが確認された。この菌床においては、除袋時に袋内発生した子実体を全て除去して発生工程へ移した。その後の発生や収穫量は 22, 24 °C区と同等であったが、2 回目発生以降の収穫量低下のリスクや、余計な作業が増えるといった観点から、培養環境における温度設定として避けるべき温度であると考えられた。

これらの結果から、今回の条件においては、培養施設の温度設定は 22～24 °Cが適していることが明らかになった。なお、菌糸伸長期間と褐変化期間で異なる温度管理が可能であるなら、菌糸伸長速度が他の試験区よりも大きかった 26 °Cは、菌糸蔓延までの温度として設定すれば培養工程の期間を短縮できると考えられた。

(2) CO₂ 濃度試験

CO₂ 濃度毎の袋切り 3 日目の発芽数を Fig. 2-5 に、収穫重量と収穫個数を Fig. 2-6 に示した。発芽数・収穫個数・収穫重量のいずれにおいても、有意差は認められなかった。収穫された子実体の規格については、温度試験の 20~24 °C 区の結果とほぼ同じであった。

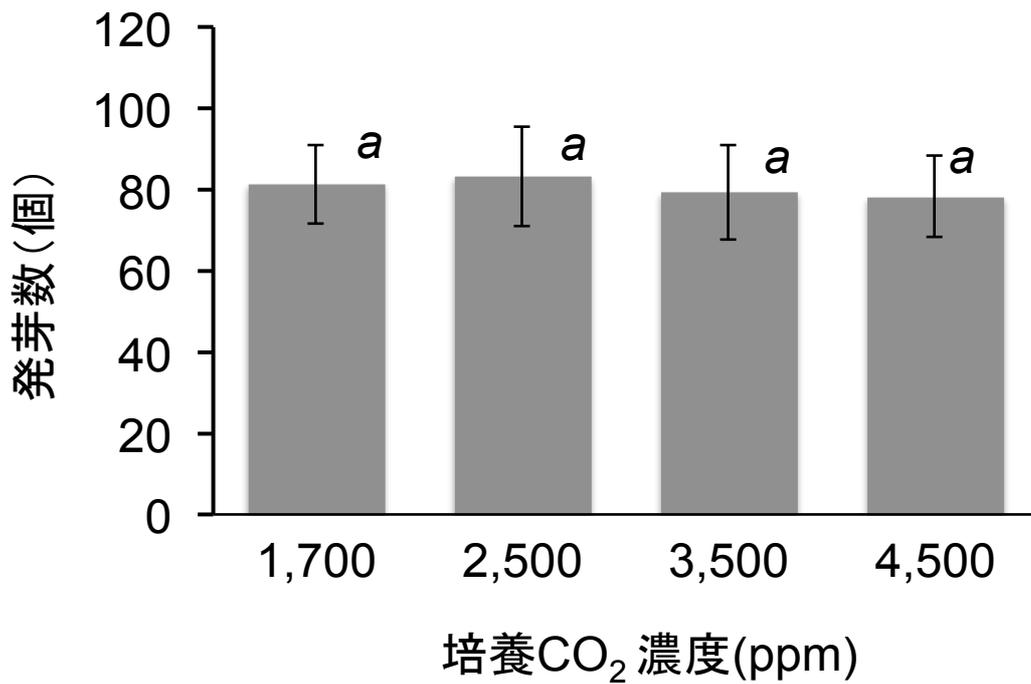


Fig. 2-5 培養 CO₂ 濃度毎の発芽数

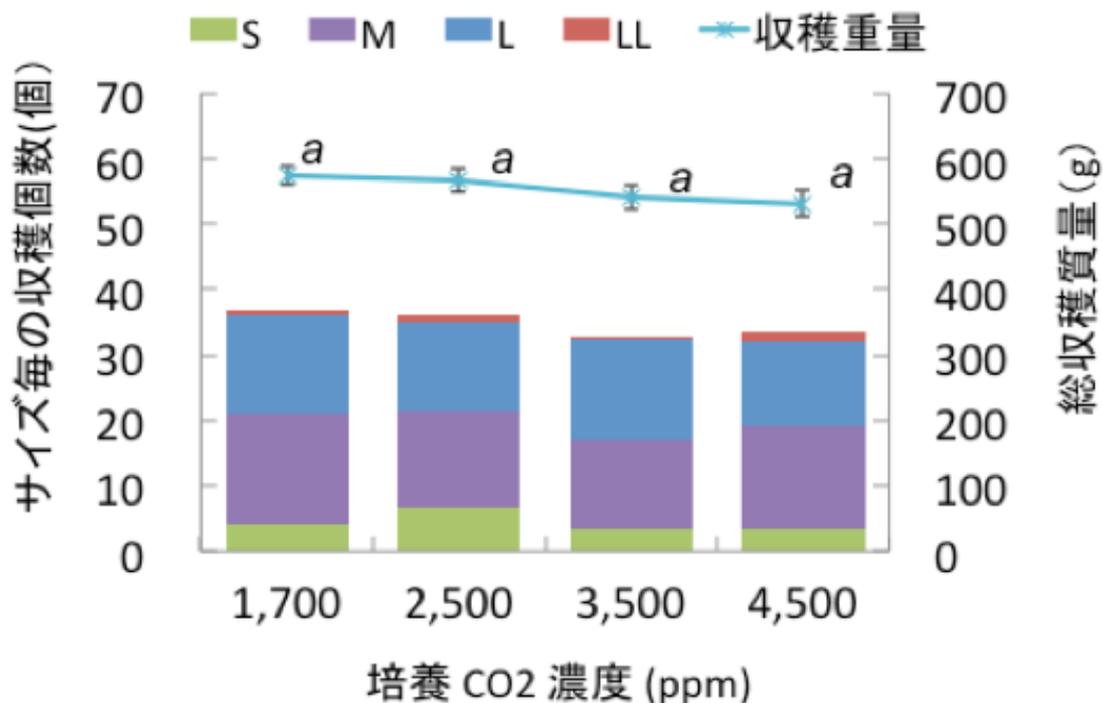


Fig. 2-6 培養 CO₂ 濃度毎の収穫数と総収穫重量

これまで培養環境として不適とされてきた CO₂ 濃度 3,000 ppm 以上においても、子実体は量・大きさともに異常なく発生した。形状についても傘の奇形や軸の徒長はなく、全て出荷可能なものが収穫された。先行研究²²⁻²⁶⁾において、一部のキノコでは発生工程での高濃度 CO₂ 暴露がキノコの傘の奇形や軸の徒長といった現象が起こることが指摘されているが、今回の実験ではそうした影響が見られなかった。これは、本来シイタケが木内部といった低 O₂・高 CO₂ 濃度の環境にて成育していることと無関係ではないと考えられる。また、呼吸フィルタのガス交換能が低いため、菌床袋内の CO₂ 濃度は 5% (50,000 ppm) 以上であり、培養環境の 3,000~5,000 ppm といった CO₂ 濃度の変化は、菌床袋内部にとっては 5% 程度の変化でしかない。そのため、3,000 ppm を上回る 4,500 ppm という培養環境においても、収穫量に影響しなかったものと考えられる。この結果から、これまで推奨されていた以上に高 CO₂ 濃度での培養が可能であることが明らかになった。CO₂ 濃度は 4,500 ppm 以下を維持すればよい事が分かり、換気能力あるいは換気回数を低減することで、冷暖房設備の負担軽減が期待でき、培養施設の省エネルギー化に寄与できると考えられた。

III 培養施設における内外温度差を考慮した省エネルギー換気システム開発

1. 目的

菌床シイタケ栽培工程において、菌の成長期にあたり発熱および呼吸が活発で、菌床収容密度の高い培養工程は、他の工程に比較して冷暖房設備と換気設備の制御が重要である。外気を直接吸気する換気方式では、夏期においては30℃以上に達する外気を22℃前後の室内に取り込むことになり冷房設備の負担が重い。また冬期においては、10℃未満の外気を室内に取り込むことになり袋内発生のリスクが増大する。換気による熱損失を小さくするためには熱交換型換気扇が有効であり、夏期と冬期のいずれにおいても外気を内気温に近づけて吸気することで、冷暖房設備の省エネルギー化に貢献することが可能になる。しかし、ただ熱交換による換気を行うだけでは最大限の省エネルギー効果を得ることはできない。培養施設は菌床由来の熱で室温が上昇するため、外気が室温より低温の場合はむしろ、熱交換より普通換気の方が省エネルギーになると考えた。我々はより高い省エネルギー効果を得ることを目的として、菌床シイタケ培養施設および熱交換型換気扇の特徴を利用し、熱交換型換気扇の制御装置を試作した。また制御装置は実際の培養施設に設置し、その省エネルギー効果を実測した。装置は培養施設内外の温度をそれぞれ計測し、それらに応じて熱交換と普通換気の換気モードを自動制御するものである。

2. 材料および方法

(1) 培地および菌床

培地および菌床は、2章と同じとした。

(2) 施設および装置

本研究では熱交換型換気扇の換気モード自動制御による省エネ効果を実測するため、浅野産業（株）が岡山県玉野市に保有する横並びの2棟の施設を利用し、施設構造、空調装置、培養菌床等の条件を処理区と対照区で統一した（Fig. 3-1）。施設の大きさは15.4 m×6.9 mである

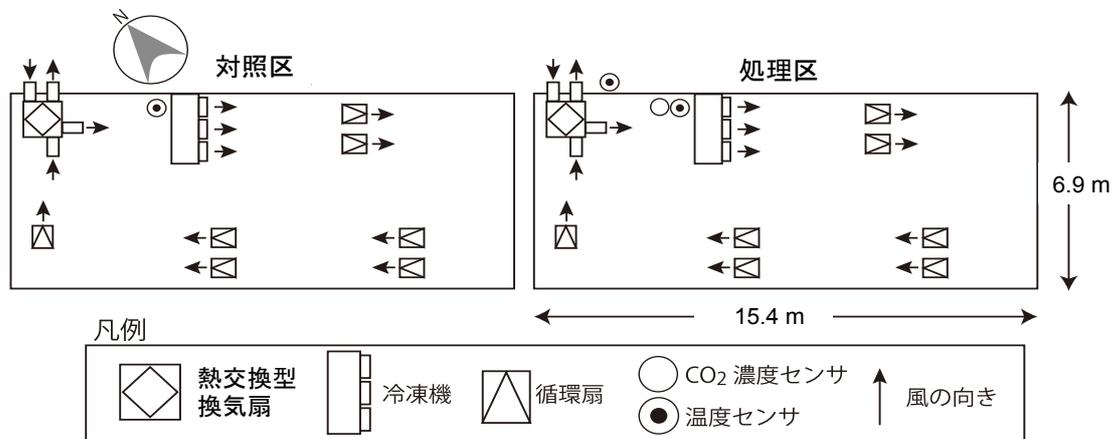


Fig. 3-1 培養施設上面図

施設の構造と収容菌床に関する情報を Table 3-1 に示す。施設は鉄骨構造であり、床はコンクリートで舗装されている。各壁は、施設の断熱性を高める目的から、種々の断熱処理を施している。試験期間中の菌床由来の熱および CO₂ を一定にするため、製造直後の菌床を週 3 回 200 個ずつ実験室および対照室に収容し、培養の完了した菌床も同数ずつ各施設から搬出することで、収容した全菌床の平均培養日数を常に一定に保った。また、平均培養日数は 42.7 日であった。

Table 3-1 施設構造と収容菌床

項目	内容
構造	鉄骨
屋根	ハゼ折板 (0.6 mm 厚)
外壁	角波サイディング (0.4 mm 厚)
天井壁	アキレスボード (50 mm 厚)
内壁	アキレスボード (50 mm 厚) DDS ボード (50 mm 厚)
床	コンクリート
床面積	106.3 m ²
高さ	3.4 m
収容菌床	7,400 個
菌床密度	20 個/m ³
培養日数	42.7 日 (平均)

熱交換型換気扇（三菱電機（株）社製，LGH-80RS）は換気量 800 m³/h の物を，冷凍機（日立アプライアンス（株）社製，KX-8AU3）は冷凍能力 23.9 kw の物を，室内機（日立アプライアンス（株）社製，US-10H5）は最大風量 10,800 m³/h の物を使用した。室内機は常時稼働させ，風量 1,320 m³/h の循環扇（三菱電機（株）社製，EF-25ASB）7 台と共に施設内環境を整えた。冷凍機の稼働条件は，先の報告を基に 1 °C ずつ安全をとって 23.0 °C_{on}～21.0 °C_{off} に設定し，消費電力は電力量記録計（Panasonic(株)社製，多回路エネルギーモニタ BT3720 および多回路電力チェッカ CT250A）で毎分記録した。湿度は加湿器（（株）いけうち社製，AKiMist D）4 台で 60 %R.H. とした。光条件は作業用の蛍光灯を，午前 8 時～午後 5 時までの 8 時間点灯とした。

室温計測は，気体温度測定センサ（（株）CHINO 社製，1YRC631）を室内機裏面に設置して行った。処理区では外気温計測を熱交換型換気扇の外気側吸気口の直下で行った。なお玉野市では，冬期においても室温の維持に加温装置は必要なかったため，設置しなかった。

(3) 制御プログラム

制御プログラムは室温と外気温それぞれの組み合わせを以下 3 つの条件に分類し、各条件に応じて換気モードを切替えることにした。

I 室温を上げる必要があり外気温が室温より低い（熱交換）

II 室温を下げる必要があり外気温が室温より低い（普通換気）

III 室温を下げる必要があり外気温が室温より高い（熱交換）

の 3 種類である。なお、室温を上げる必要があり外気温が室温より高いケースは、冷凍機の運転設定に問題がある場合（過冷却）なので、条件から除外した。

条件 I は、菌床が発熱体であることを利用して室温を上げる、条件 II は、あえて普通換気により低温の外気を利用して室温を下げる、条件 III は、夏季における通常の熱交換型換気扇の使い方では冷房効率を上げることが、それぞれ目指している。試作した制御装置の外観は Fig. 3-2 の通りである。



Fig. 3-2 制御装置外観

制御のフローチャートを Fig. 3-3 に示す。作動温度は $23.0\text{ }^{\circ}\text{C}_{\text{Con}}\sim 21.0\text{ }^{\circ}\text{C}_{\text{Coff}}$ の冷凍機との連携を考慮して、 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ずつ差を付けた。室温 $20.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上かつ $22.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 未満の条件では、換気モードの不定領域として熱交換型換気扇は直前の換気モードを引き継ぐものとした。例えば冬期であれば、下がった室温を熱交換モードで菌床の発熱を利用して上昇させる（条件 I）。室温 $22.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ を越えるまで直前の熱交換モードを引き継ぎ、その後普通換気により外気を取り込んで $20.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ まで温度を下げる（条件 II）。これを繰り返すことで、状況によっては熱交換型換気扇だけで温度管理を行えると考えた。

この制御を行った処理区に対して、対照区は熱交換モードの連続運転とした。

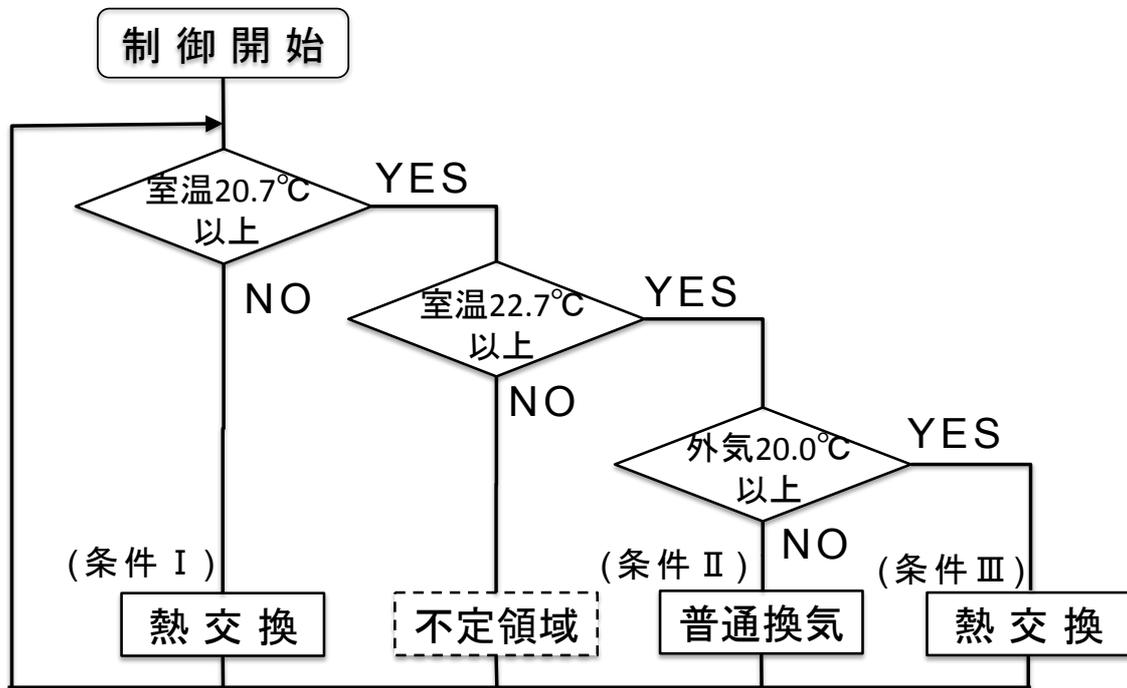


Fig. 3-3 換気モード制御フローチャート

3. 結果と考察

(1) 各条件の作動状況

a. 条件 I

Fig. 3-4 に、条件 I の作動例を示す。図中横軸は時刻、縦軸は外気温と、対照区および、処理区の室温、斜線部分は普通換気モードを示す。処理区の室温は普通換気により外気を吸気しており徐々に下降していた。午前 0 時 40 分頃に 20.7 °C を下回り、条件 I を満たしたため熱交換モードへ切り替わり、ゆるやかな上昇に転じた。一方、熱交換モード連続運転の対照区では常に室温は上昇し、午前 1 時 50 分頃 23.0 °C に達したことで冷凍機が作動した。

このことより、施設の断熱が十分であれば、冬期においても加温および冷却設備無しで、本制御装置によって室温を目標の 20.7~22.7 °C に維持できることが明らかになった。

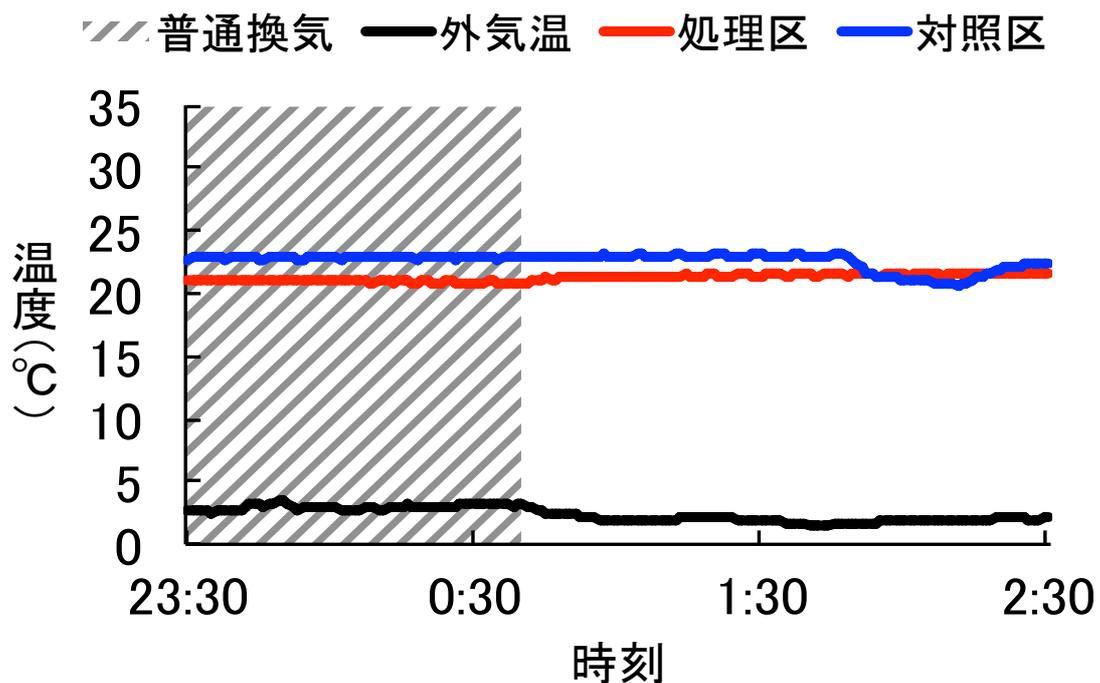


Fig. 3-4 条件 I の作動状況

b. 条件 II

Fig. 3-5 に、条件 II の作動例を示す。処理区の室温は上昇を続けていたが、12 時 20 分頃室温が 22.7 °C を上回り、かつ外気温が 20 °C 以下と条件 II を満たしたため、普通換気へ切り替わった。それに伴い室温の上昇は抑制され、その後も 23.0 °C に達しなかったため冷凍機は稼働しなかった。一方、対照区では 12 時頃と 14 時頃の 2 度冷凍機は稼働した。

このことより、普通換気により外気を直接吸気することで、室温の上昇を抑制可能であることが明らかになった。春期あるいは秋期のような平均気温が 10 ~ 20 °C となる日においては、外気を積極的に導入することで冷凍機の稼働コストを削減できることが示唆された。

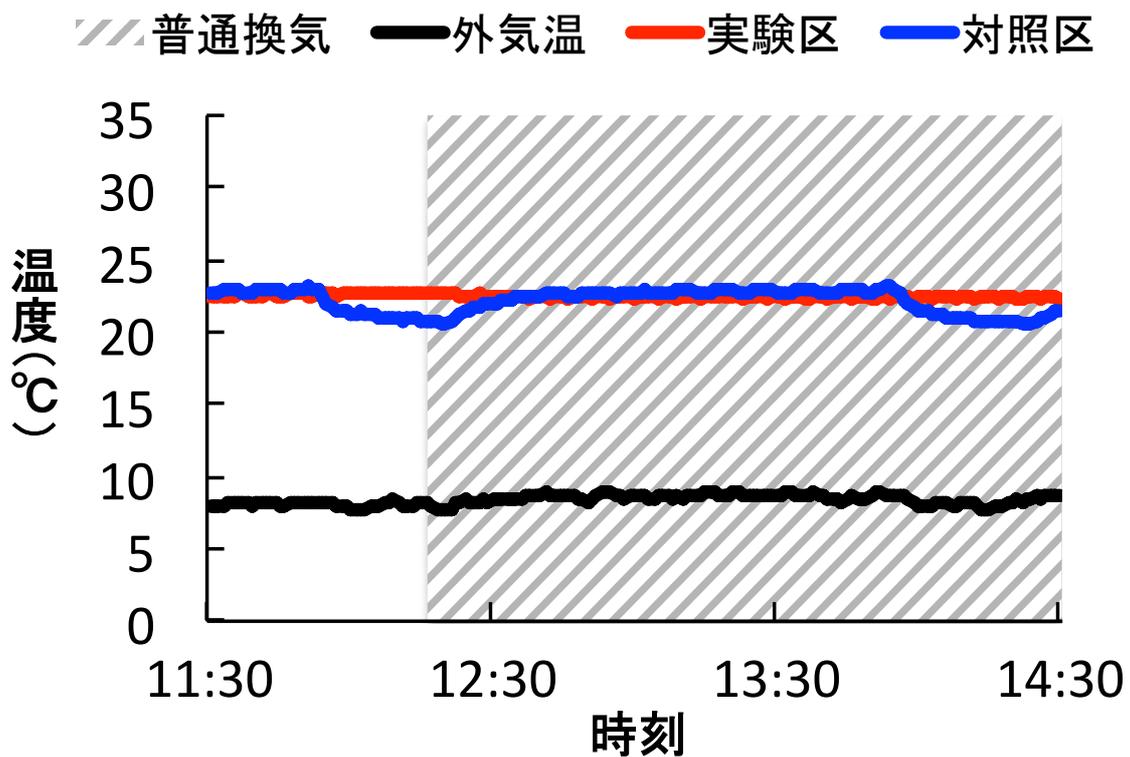


Fig. 3-5 条件 II の作動状況

c. 条件 III

夏期のような常に外気温が室温を上回る状況下では、常に条件は III となり対照区との差は無くなり (Fig. 3-6) , 普通換気の稼働はなかった。熱帯夜が続く最近の夏季条件では、シイタケ栽培施設の省エネルギー化にも厳しい状況であると言える。

なお、いずれの換気モードも換気能力は十分で、実験期間を通じた CO₂ 濃度は 2,000±200 ppm であった。

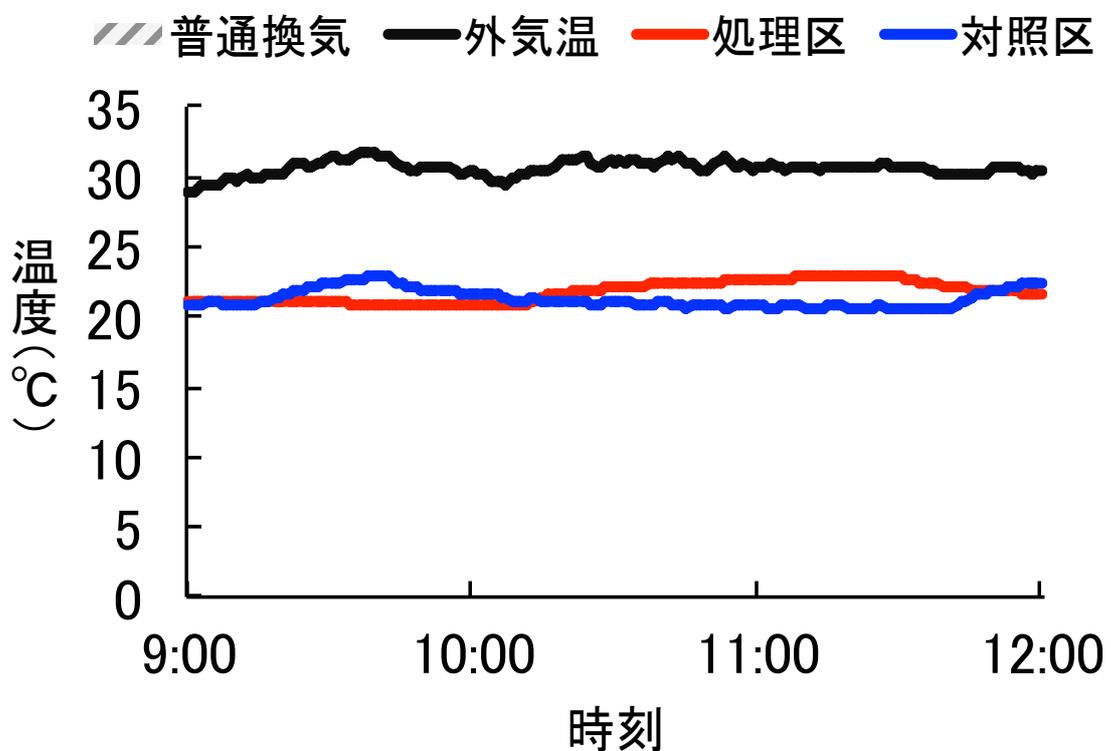


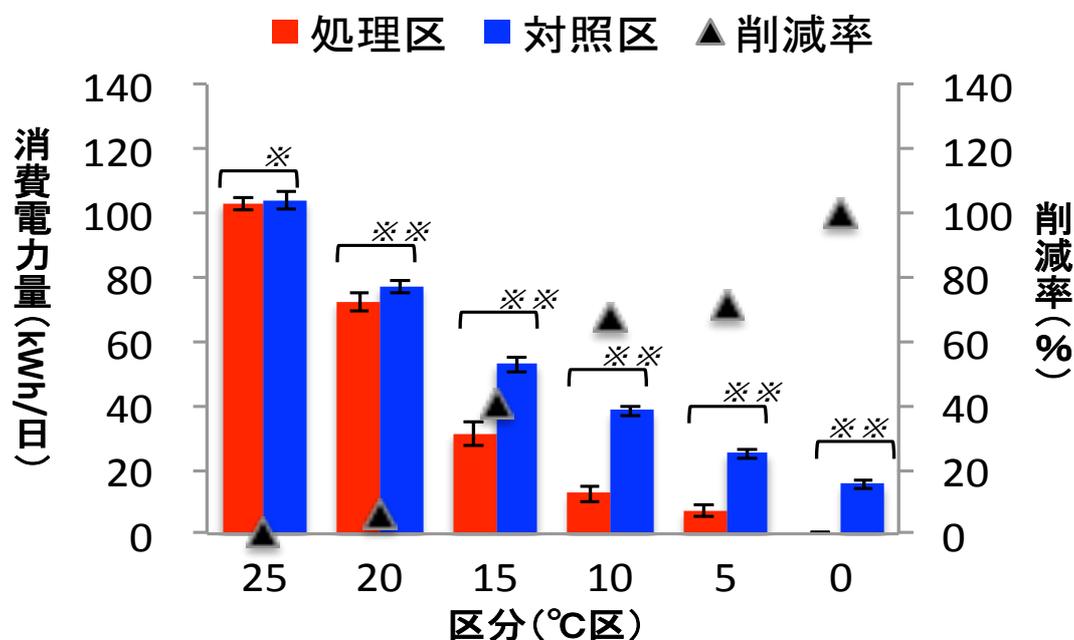
Fig. 3-6 条件IIIの作動状況

(2) 平均気温別の省エネルギー効果

外気温によって装置の稼働状況は異なるので、省エネルギー効果は Table 3-2 のように1日の平均気温を5℃毎に区分して評価した。期間中の最大値は29.5℃、最小値は-0.2℃であった。

区分名 (℃区)	範囲 (1日の平均気温)
25	25℃以上
20	20～25℃
15	15～20℃
10	10～15℃
5	5～10℃
0	5℃未満

Fig. 3-7 に区分毎の1日の冷凍機消費電力量(左軸)および、その削減率(右軸)を示す。削減率は対照区と処理区の消費電力の差分を対照区の消費電力で除して求めた。消費電力量は25℃区で最も高く、平均気温が下がるにつれて低くなった。逆に削減率は25℃区で最も低く、0℃区で最大の100%となった。また、25℃区以外での消費電力量は処理区が対照区に比べて有意に少なかった。

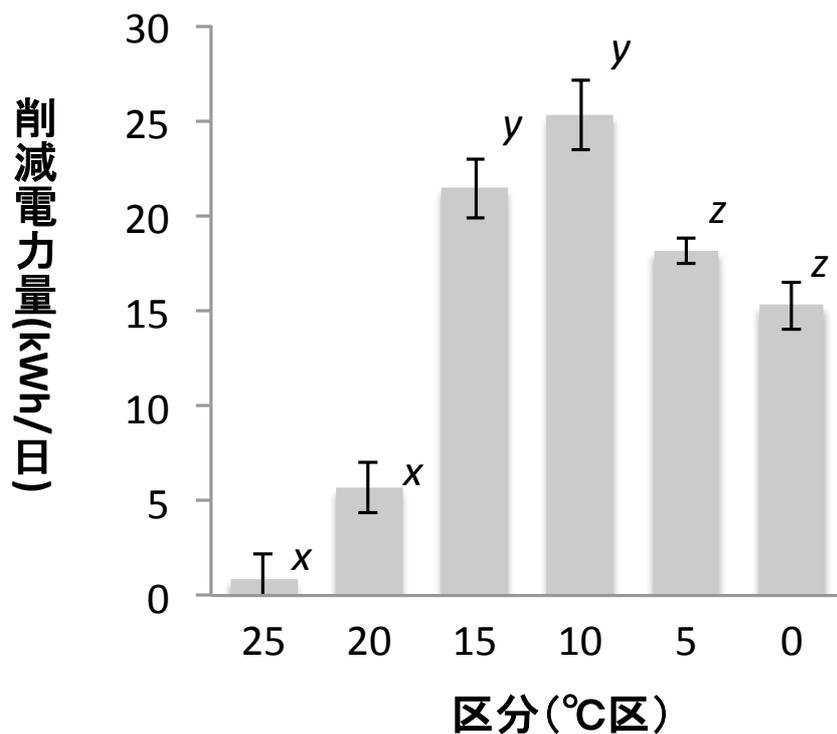


※※に有意差あり ($p < 0.05$)

Fig. 3-7 各区分の消費電力と削減率

これらより本制御装置は、平均気温が 25 °C を超えるとほぼ条件 III での運転となり、省エネルギー効果は見込めなくなることが分かった。また平均気温 5°C 未満では、冷凍機は全く稼働せず、熱交換型換気扇だけで温度を管理できることが改めて確かめられた。

冬期における削減率は高かったが、対照区の電力量も小さいので、量的な省エネルギー効果を評価するために、対照区と処理区の電力量の差を削減電力量として Fig. 3-8 に示す。最も電力を削減できたのは 10 °C 区で、次いで 15 °C 区であった。対照区の消費電力はほぼ平均気温に比例していることから、これら温度区では効果的に低温の外気を利用していただことが分かる。加えて、区分毎に削減効果が異なることが明らかになったので、各地域の気象情報と合わせることで、地域毎あるいは年毎の省エネルギー効果を試算することが可能になった。



異なるアルファベット間に有意差あり ($p < 0.05$)

Fig. 3-8 各区分の削減電力量

(3) 年間の省エネルギー効果

気象庁の 2016 年玉野市の日平均気温データ³⁹⁾を基に消費電力量を試算し、削減電力量を対照区の消費電力で除したものを省エネルギー効果 (%) として算出した (Table 3-3)。玉野市の気候は温暖で、外気温の冷却利用が期待できない平均気温 20 °C 以上の日が例年 40 %程度ある。一方、処理区の電力量が 0 となる平均気温 5 °C 未満の日は 18 日で、総削減エネルギー量中の 6 %未満に過ぎなかった。これは多い年でも 15 %程度であり、この地方での電力削減は削減エネルギー量中 80 %以上を占める平均気温 5~20 °C の日数に期待するところが大きい。年間の削減効果は、約 5,000 kWh, 24 %と試算された。

Table 3-3 玉野市 2016 年の省エネルギー効果の試算

区分 (°C区)	日数 (日)	電力量 (kWh/年)			{割合(%)}
		対照区	処理区	削減量	
25	78	8,112	8,034	78	(1.6)
20	67	5,159	4,824	335	(6.7)
15	62	3,286	1,922	1,364	(27.1)
10	63	2,394	819	1,575	(31.3)
5	78	1,950	546	1,404	(27.9)
0	18	270	0	270	(5.4)
合計	366	21,171	16,145	5,026	(100)
				省エネルギー効果 (%)	23.7

Table 3-4 に玉野市 2012~2016 年の省エネルギー効果の試算結果を示す。夏の暑さにより年ごとに多少変動はあるものの、効果は地域に依存することが分かった。玉野市の省エネルギー効果は 5 年間の平均値として、24.7 %と算出された。

Table 3-4 玉野市 2012-2016 年の省エネルギー効果の試算

年	省エネルギー効果 (%)
2016	23.7
2015	26.3
2014	25.2
2013	23.6
2012	24.6
平均	24.7

Table 3-5 に 2015 年菌床シイタケ生産量上位 5 県の、県庁所在地の気象データを用いた試算結果を示す。2012~2016 年の 5 年間の平均値であるが、ほぼ緯

度に準じて効果が高くなった。例えば札幌市では平均気温が 5 °C未満の日が、年 140 日程度あり、この温度区分の削減量が大きくなった。また、平均気温が 25 °Cを越える日も 10 日程度であったことから、消費電力自体も処理区では玉野市の半分程度となった。施設の断熱が十分であるという前提はあるが、本装置が提案する方法は寒い地方でより有効であると言える。ただし、あまりに低温の外気に菌床が直接暴露されることは望ましくないので、外気の取り込み方法に少し工夫が必要である。

Table 3-5 菌床シイタケ生産量上位 5 県の省エネルギー効果の試算

県庁所在地	省エネルギー効果 (%)
徳島市	23.6
札幌市	41.1
盛岡市	35.8
長崎市	22.4
秋田市	32.5

今回試作した制御装置は培養施設の大きさや収容菌床数等の条件に関わらず、1 施設につき 1 台の設置で省エネルギー効果を発揮することが可能である。更に、今回実験を行った培養施設より大規模な商業レベルの施設では、冷凍機の消費電力量がより高くなると同時に、制御装置による削減電力量もより大きくなり、熱交換型換気扇を含めた設備投資の回収もより短期間で完了する。現在、多くの菌床シイタケ生産者が上昇する外気温と増加する電気代に苦しめられており、そのコスト対策として培養施設への熱交換型換気扇の設置が増加している。そうした施設にて本制御装置を活用することより、大きな省エネルギー効果がわずかなコストで得ることができ、より安定的かつ長期的に美味しいシイタケを供給することが期待される。

IV 結言

2章では、菌床シイタケ栽培において発生のための準備工程であり生産量と関連の深い培養工程について、最適な温度およびCO₂濃度の検討を行った。結果、省エネルギーを実現しつつ生産を最大化する培養環境は、温度 22~24 °C、CO₂濃度 4,500 ppm 以下であることが示された。温度試験では、20 °C区では培養後期に袋内発生が確認され、26 °C区および28 °C区では培養の遅延が確認されたため、培養温度として不適であった。ただし、26 °C区においては培養初期に限り菌糸伸長速度が他の温度区よりも早く、菌糸蔓延までの温度としては適切である可能性が示唆された。CO₂濃度試験においては、設定したいずれの濃度においても生産への影響は確認されなかった。ただし、明らかにされた上限4,500 ppm は労働安全衛生基準法に準拠して設定した法律上の上限であり、シイタケの生育における生物学上の上限値を明らかにしたものではない。明らかになった温度を、次章で冷凍機の設定に生かした。

次に3章では、熱交換型換気扇と室内に熱源である菌床を多数培養している培養施設の特徴を利用し、普通換気による室内の冷却から冷凍機の省エネルギー化を目指した。そのため、培養施設内外の温度をそれぞれ計測し、それらに応じて熱交換と普通換気の換気モードを自動制御する制御装置を試作し、実際の培養施設に設置・運用することで省エネルギー効果を検証した。装置は、外気温25 °C未満の条件で省エネルギー効果を発揮し、5 °C未満の条件では削減率100 %となり冷房設備を使用せず制御装置による換気モード切換えおよび菌床由来の発熱のみで室温を維持することが可能であった。外気温25 °C以上の条件では、熱交換器の換気モードが終日熱交換になり、普通換気に切り替わることがないため省エネルギー効果を発揮しなかった。また削減量が最も多いのは、10 °C区ついで、15 °C区であった。制御装置から省エネルギー効果を得るためには、外気温20 °C未満という条件が重要であることが、明らかにされた。これら結果を過去の気象庁資料に参照することで、年間の省エネルギー効果を試算した。実験地点である岡山県玉野市においては、培養施設の冷房設備の稼働を年間で24.7%節約できる可能性が試算された。更にシイタケ産業が盛んな徳島市、札幌市、盛岡市、長崎市、秋田市においては、それぞれ23.6、41.1、35.8、22.4、32.5 %であると試算された。本制御装置は外気温20 °C未満で効果を発揮する

ため、日平均気温が 20 °Cを下回る日が多い地域程、高い効果を得ることが可能になる。ただし、あまりに低温の外気に菌床が直接暴露されることは望ましくないので、外気の取り込み方法に少し工夫が必要である。また、今回実証実験した際の期間中の日最高気温は 29.5 °C、日最低気温は-0.2 °Cであり、それ以上または以下の外気の際に制御装置がどのような稼働をするか、また省エネルギー効果がどう変化するかは不明である。

今回の研究により、これまでは情報が十分でなかった培養工程における温度および CO₂濃度の、生産に影響をしない上限値を明らかにすることができた。

また、培養施設の内外温度差を感知して熱交換換気装置を自動制御する試験では、実験地点で年間 24%以上の冷房設備の省エネルギー効果を得ることができると試算した。今回試作した制御装置は、培養施設の大きさや収容菌床数、冷凍機の台数に関わらず、1施設につき1台の設置で省エネルギー効果を発揮することが可能である。制御装置の設置にかかる費用は数 10 万円と試算しており、1台設置するだけで培養施設にて稼働する複数台の冷房設備から省エネルギー効果を得ることができるため、設置コストの回収は 3 年程度の短期間で完了すると見込んでいる。

更に、今回実験を行った培養施設はあくまで実験用のため、規模としては小～中規模である。より大規模な商業レベルの培養施設では、冷凍機の消費電力量がより高くなると同時に、制御装置による削減電力量もより大きくなり、熱交換型換気扇を含めた設備投資の回収もより短期間で完了する。現在、世界的な需要増加や政治的背景をもとに、原油価格は増加している。また日本国内では、再生可能エネルギー発電促進賦課金制度の導入により、使用量は同じでも電気料金は年々増加している。

こうした経費増大の要因に加え、ライフスタイルや食材の多様化といった要因からシイタケ消費量は低下し、需要低迷に連動し市場価格も低下している。こうした自助努力だけではどうにもならない経営環境のもと、中小の菌床シイタケ生産者は廃業に追い込まれている。省エネルギー設備として熱交換器の導入は一部生産者では進んでいたが、本制御装置も合わせて活用することで、より大きな省エネルギー効果がわずかなコストで得ることができ、日本中のシイタケ生産者の経営を助けるツールとなることが期待される。

参考文献

- 1) Wikipedia. シイタケ, <https://ja.wikipedia.org/wiki/シイタケ>, Accessed Jan 20, 2018.
- 2) 林野庁. 特用林産基礎資料,
http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/tokuyo_rinsan/, Accessed Jan 20, 2018.
- 3) 檜垣宮都. キノコを科学する シイタケからアガリクス・ブラゼイまで, 地人書館, 11-19, 2001.
- 4) 消費者庁. シイタケ品質表示基準, 2006,
http://www.caa.go.jp/policies/policy/food_labeling/quality/quality_labelling_standard/pdf/kijun_06.pdf, Accessed Jan 20, 2018.
- 5) 中村克哉. シイタケ栽培の史的研究, 東宣出版, 238-250, 1983.
- 6) 松尾忠直. 日本におけるシイタケ栽培の普及—群馬県における産地の展開を事例に—, 地球環境研究, 18, 57-70, 2016.
- 7) 大森清寿, 小出博志. キノコ栽培全科, 社団法人農山漁村文化協会, 56-64, 2001.
- 8) 熊本県林業研究指導所, シイタケ栽培の手引, 熊本県林業研究指導所, 2013,
http://www.pref.kumamoto.jp/kiji_11116.html, Accessed Jan 20, 2018.
- 9) 桐渕壽子. 紫外線照射による各種キノコ中のビタミン D2 含量に関する研究, 日本家政学会誌, 41, 401-406, 1990.
- 10) 熊本県椎茸農業協同組合. 熊本産原木椎茸,
<http://www.kumamoto-shiitake.jp/index.html>, Accessed Jan 20, 2018.
- 11) 総務省統計局. 特用林産物生産量(明治32年~昭和23年, 昭和24年度~34年度, 昭和35年~平成15年),
www.stat.go.jp/data/chouki/zuhyou/07-34.xls, Accessed Jan 20, 2018.
- 12) 株式会社プランツワールド, 2015年度版きのこ年鑑, プランツワールド, 60-64, 2015.
- 13) 山中勝, きのこの基礎科学と最新技術, 農村文化社, 212-220, 1991.
- 14) 清水豊, 赤石博, 鮎沢澄夫, 山内隆弘, 馬場隆彦. 改訂版最新きのこ栽培技術, プランツワールド, 138-164, 2014.

- 15) 大賀祥治, Carbon dioxide and Ethylene Levels during Incubation and Fruiting Stages on Saedust-Based Culture of *Lentinus edodes*, 九州大学農学部演習林報告, 79, 13-20, 1998.
- 16) 伊藤俊輔. 菌床シイタケ栽培におけるシイタケ廃菌床の再利用, 九州森林研究, 69, 177-179, 2016.
- 17) 早田剛, 岩元禎, 橋元大介, 峰 靖彦. コーンコブ主体廃菌床の飼料化と給与技術の開発, 長崎農林技術センター研究報告, 6, 159-164, 2015.
- 18) 株式会社大木きのこ種菌研究所. ブナシメジ廃菌床の高消化性飼料化によるリサイクル促進, 泌乳牛用きのこ廃菌床開発研究会資料, http://www.recycle-ken.or.jp/k_seika/2015/0403_KINOKO.pdf, 2013.
- 19) 文部科学省. 配布資料 1-2, 原子力損害賠償紛争審査会(第 29 回), 2012.
- 20) 資源エネルギー庁 HP, http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/index.html, Accessed Jan 20, 2018.
- 21) 阿部正範. シイタケ子実体発生に及ぼす培養温度の影響, 日本応用きのこ学会誌, 10(3), 129-134, 2002.
- 22) Lambert, E B. Effect of excess carbon dioxide on growing mushrooms. *Journal of Agricultural Research*, 47(8), 599-608, 1933.
- 23) 衣川堅二郎, 高松義博, 鈴木彰, 田中浄, 近藤矩朗. 数種栽培担子菌の子実体形成に対する高濃度二酸化炭素の影響 (I), 日本菌学会会報, 27, 253-265, 1979.
- 24) 鈴木彰. キノコの成長とガス環境, 微生物, 2(6), 619-626. 1986.
- 25) Kenjiro Kinugawa, Akira Suzuki, Yoshihiro Takamatsu, Masumi Kato, Kiyoshi Tanaka. Effect of concentrated carbon dioxide on the fruiting of several cultivated basidiomycetes (II), *Mycoscience*, 35, 345-352, 1994.
- 26) 鈴木彰. 担子菌きのこの生産に関する基礎的研究—特に環境制御の観点から, 日本きのこ学会誌, 19(4), 155-166, 2012.
- 27) 阿部正範. 発光ダイオード照射がシイタケ菌糸体の成長と子実体収量に及ぼす影響, 日本きのこ学会誌, 15(2), 103-108, 2007.
- 28) 川島祐介. 菌床シイタケ栽培におけるコストダウンに関する研究, 群馬県林業試験場研究報告, 14, 38-44, 2009.

- 31) 新田剛, 工藤哲三, 上米良壽誕, 吉留高志, 目黒貞利. ソバ焼酎粕を利用したシイタケの菌床栽培, 日本きのこ学会誌, 17(1), 25-30, 2009.
- 30) 長野県林業総合センター. シイタケ菌床栽培の安定化に関する試験, 長野県林業総合センター研究報告, 14, 63-88, 2000.
- 31) 阿部正範. 菌床シイタケ栽培におけるかき殻粉末の添加効果, 徳島県立農林水産総合技術センター森林林業研究所研究報告, 3, 11-14, 2004.
- 32) 阿部正範. 栄養液浸漬処理によるシイタケ子実体の発生, 徳島県林業総合技術センター研究報告, 36, 27-32, 1999.
- 33) 寺嶋芳江, 渡辺智子, 鈴木亜夕帆, 白坂憲章, 寺下隆夫. シイタケ栽培培地へ添加したトレハロースの子実体への影響Ⅲ, 日本きのこ学会誌, 18(2), 57-62, 2010.
- 34) 藤原しのぶ, 春日敦子, 菅原龍幸, 橋本浩一, 清水豊, 中沢武, 青柳康夫. シイタケの菌床栽培における培地窒素量と子実体の窒素含有成分との関係, 日本食品科学工学会誌, 47(3), 191-196, 2000.
- 35) 上村靖司, 小杉用高, 今泉直人, 全潤樹. シイタケ栽培ハウスにおける雪山冷房システムの経済性評価, 日本雪工学会, 雪氷研究大会講演要旨集, 2014.
- 36) 三菱電機株式会社. ロスナイとは,
http://www.mitsubishielectric.co.jp/ldg/ja/products/air/lineup/ventilationfan/about/detail_03.html, Accessed April 20, 2017.
- 37) 大西茂樹, 田島昌樹, 伊藤一秀. 中規模オフィスビルを対象とした全熱交換型換気扇の空調消費電力削減効果に関する実測研究 第1報—冬期暖房時を対象とした実測と削減効果, 空気調和・衛生工学会論文集, 162, 17-24, 2010.
- 38) 大西茂樹, 田島昌樹, 伊藤一秀. 中規模オフィスビルを対象とした全熱交換型換気扇の空調消費電力削減効果に関する実測研究 第2報—夏期冷房時を対象とした実測と削減効果, 空気調和・衛生工学会論文集, 172, 9-16, 2011.
- 39) 気象庁. 過去の気象データ,
<http://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php>, Accessed April 20, 2017.

謝辞

本論文の執筆にあたり，岡山大学大学院環境生命科学研究科農生命科学専攻教授田村先生には，詳細で有益なご助言をいただいた。ここに深謝の意を表す。また，同農生命科学専攻教授神崎先生，同環境科学専攻教授門田先生および准教授難波先生には，本研究の遂行にあたって終始ご指導いただいた。ここに深謝の意を表す。実験には浅野産業株式会社ライフサイエンス研究所および食品事業部の設備や資材を利用させていただいた。同研究部門所長明貝博士には有益なご助言をいただいた。ここに深謝の意を表す。

本研究は，平成 24 年度新たな農林水産政策を推進する実用技術開発事業（課題番号 22042）の助成を受けたものである。