

論文

シイタケ乾燥工程の効率化*1

—燃料消費量の削減—

石井秀之*2 · 山下和久*2

石井秀之・山下和久：シイタケ乾燥工程の効率化—燃料消費量の削減— 九州森林研究 63：29—33, 2010 乾シイタケ生産における乾燥工程について、燃料消費量削減の観点から見直しを行った。この結果、乾燥初期状態の設定において、乾燥室内空気の循環を利用することにより18%程度、送風機を1段階下げることによって10%程度の燃料消費量を削減できることが明らかになった。また、乾燥失敗の一例である「にえこ」の再現試験に成功し、発生条件を明らかにした。これらの結果から、シイタケの乾燥工程全体を見直し、燃料消費量を20%程度削減可能な乾燥スケジュールを作成した。

キーワード：シイタケ、乾燥、乾球温度、湿球温度、にえこ

I. はじめに

シイタケの乾燥工程は、乾シイタケを製品として仕上げるための重要な工程であり、現在は、間接熱風式送風乾燥機により十分な乾燥が行われている。しかし、省エネルギーや効率化の観点から乾燥工程を検討した事例はみられず、また、最近の原油価格高騰などの現象もあり、将来的な燃料価格に対する生産者の不安は大きいものがある。近年になり、低燃料消費量を標榜した新型乾燥機も市販され始めたが、シイタケを取り巻く生産の現状からみると、高齢化や後継者不足などにより、一部の生産者を除いて新たな投資は困難な状況にある。

これらのことから、今回、既設の乾燥機の乾燥工程を見直し、燃料消費量の削減可能な乾燥スケジュールについて検討した結果を報告する。

II. 材料および方法

1. 乾燥機

シイタケの乾燥に使用される乾燥機は、大きく分けると送風方向により2つに区分される。一つは、従来から使用されてきた乾燥機で、乾燥室内の下部から上部に向かって送風を行う方式で、一般的には「下吹き式」や「吹き上げ式」などと呼ばれており、本報告では「垂直気流式」に統一して表記する。もう一方は、比

表-1. 供試乾燥機の基本性能

型式	エビラ枚数	送風機出力 (W)	燃料種別	最大燃料消費量 (L/時)	備考
C-60	30	550	重・灯油薪	5.12	60枚用を30枚で使用
MH-30	30	400	灯油	4.74	30枚専用

較的新しく実用化された乾燥機で、乾燥室の横から送風を行うことから、一般的には「横吹き式」と呼ばれている。今回は、従来から使用されてきた垂直気流式乾燥機を検討対象とし、試験に用いた乾燥機（豊国煙草、C-60）の基本性能を表-1に示した。

2. 乾燥スケジュール

乾燥されるシイタケ子実体（以下、子実体とする）は、収穫時の気象条件によって、降雨の影響がある場合の「雨子」、乾燥した晴天に収穫された「日和子」に大別されることから、乾燥スケジュールも同様に区分される。一般的に、雨子は乾燥の所要時間が長くなり、時には24時間以上の時間を要することから、今回は、雨子の乾燥スケジュールを主体に検討することとし、表-2に従来の標準的なスケジュールを示した。

3. 乾燥試験

乾燥試験は、各試験日ごとの乾燥工程の進行状況を均一にするために、中温性あるいは低温性シイタケ品種の原木栽培により秋期から春期に発生した子実体が、乾燥室の収容能力の80%以上収穫されたときに実施した。調査は、乾燥機の制御と工程の進行状況を把握するための温度条件および燃料消費量、子実体の状態変化を把握するための重量および菌さん直径について行った。

表-2. 雨子の標準乾燥スケジュール

設定温度 (°C)	乾燥時間	風速制御	吸排気制御 (ダンパ開度)		
			吸気	排気	循環
40	2	高速	全開	全開	全閉
45	2	高速	全開	全開	全閉
45	4	中速	全開	全開	全閉
50	4	中速	半開	半開	半開
55	3	低速	半開	半開	半開
55	3	低速	全閉	全閉	全開
58	5	低速	全閉	全閉	全開

*1 Ishii, H. and Yamashita, K.: A studies on drying time schedule of shiitake (*Lentinula edodes*) for fuel saving.

*2 大分県農林水産研究センターきのこ研究所 Mushroom Res. Inst. Oita Pref. Agri. For. and Fish Res. Center, Mie, Bungo-Ohno, Oita 879-7111

温度条件の調査は、乾燥機本体の温度制御を行っている熱風吹き出し口（垂直気流式乾燥機の場合は、乾燥室本体の下部にある）の中央部で、乾球温度と湿球温度を測定した。温度の測定は、T熱電対で検出し、5分間隔で記録計（チノー、グラフィックロガー CR1320-A）に記録した。また、乾燥機を設置してある施設内の温度（気温）を同様の方法で測定、記録した。なお、湿球温度の測定については、日本工業規格（1981）を参考にして、湿球温度測定用の熱電対を製作し測定を行った。

燃料消費量の調査は、流量センサ（堀場エステック、液体微小流量センサ LM05ZAT-AR）を燃料パイプに取り付け、検出した流量パルスを表示器（ユーアイニクス、瞬時・積算流量指示計 SP-564）を用いて変換し、記録計（チノー、ハイブリッド記録計 AL-560）により15分間隔の積算流量（燃料消費量）として記録した。

子実体の状態変化については、乾燥室中央部のエビラ上に並べた子実体を対象に調査を行い、乾燥開始時から1時間ごとに、重量と菌さん直径の変化を測定した。重量測定を行った子実体は、設定した工程による23時間の乾燥処理後、全乾（105℃、72時間）重量を測定し含水率を算出した。

菌さん直径は、短径方向および短径に直角方向の2箇所をデジタルノギスで測定し、乾燥開始時の直径を基準として収縮率を算出した。供試子実体数は2～12個とした。

4. 「にえこ」再現試験

「にえこ」は古くからある乾燥失敗事例の代表的なものであり、乾燥工程初期の温度制御の失敗により発生するとされていた。この発生条件については、河合・河合（1961）の電気定温乾燥機を用いた試験で湿球温度が35℃以上で発生すると報告されている。しかし、今回は、現在の乾燥機での発生状況を確認することと新たに検討した乾燥スケジュールの安全条件を求めるために、表-3に示した設定で子実体の乾燥試験を行った。試験には、垂直気流式で湿球温度が制御可能な乾燥機（キハラ製作所、MH-30）を用い、乾燥室中央部のエビラに8～15枚の子実体を並べて行った。当該機種の基本性能を表-1に示した。

処理時間については、河合・河合（1961）の報告では5時間で発生するとされていたが、今回は、生産者への説明の簡略化（4時間であれば、半日あるいは半昼と説明できる）のために4時間の設定とし、残りの19時間については、標準の雨子乾燥スケジュールで追加乾燥する設定とした。

再現処理試験中の温度については、乾燥試験と同様の方法および機材で測定し、5分間隔で記録を行った。

子実体の状態変化については、開始時と処理後（4時間後）に

表-3. 「にえこ」再現試験の温度設定条件¹⁾

試験区	乾球温度 (℃)	湿球温度 (℃)
45-40区	45	40
40-40区	40	40
40-37区	40	37
40-35区	40	35
40-30区	40	30
40-25区	40	25

¹⁾ 処理時間は全試験区 4時間

重量の測定を行い、組織の状態や臭気の変化を目視および官能検査により判定した。また、追加の乾燥終了後に最終的な「にえこ」の判定を行うとともに、乾燥試験の場合と同様に全乾重量を測定し含水率を算出した。供試子実体数は8～15個とした。

Ⅲ. 結果および考察

1. 標準スケジュールによる乾燥試験

2008年3月24日に行った乾燥試験について、乾燥中の子実体重量および燃料消費量の積算値の変化を図-1に示し、子実体の状態調査の結果を表-4に示した。乾燥工程全体（23時間）の燃料消費量は72.5ℓであり、乾燥工程の前半で2/3の燃料を消費していた。また、18時間目以降の燃料消費量の増加量が前半と比較して低下していた。これらについて、乾燥スケジュールとの関係を検討した結果、送風量の低下や乾燥機内空気の流れを利用することによる燃料消費削減の可能性が考えられた。また、温度の上昇については、燃焼に供給される空気の温度が高いほど、乾燥機内の温度を上昇させるための熱量は少なく済むことから、外部要因としての気温の影響も評価する必要性が考えられた。

以上のような示唆が得られたことから、乾燥工程の初期状態（制御温度40℃、吸気および排気ダンパ全開）を前提条件として空気の循環や送風量の低下による燃料削減効果および乾燥機設置場所の気温と燃料消費量との関係を調査した。空気の循環と送風量についての調査結果を表-5に、気温と燃料消費量の調査結果を図-2に示した。空気の循環を最大限利用することで18%、送風機の回転速度を1段階落とすことで10%の燃料消費量を削減できることが明らかとなった。これらの結果から、乾燥工程の初期段階から循環を利用することで、燃料消費量を削減できる乾燥スケジュールの作成が可能と考えられた。また、気温が1℃上昇すれば、1時間当たり約170mlの燃料消費が削減可能となることも明らかになったことから、乾燥機の設置場所の気温についても、

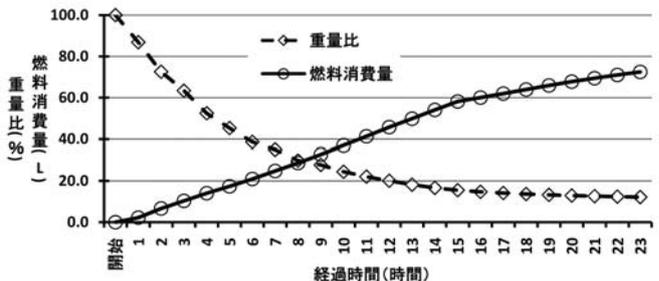


図-1. 標準乾燥スケジュールによる乾燥中の燃料消費量と子実体重量変化

表-4. 乾燥前後における子実体の状態比較 (標準スケジュール)

銘柄	乾燥前菌さん直径(mm) ¹⁾	子実体重量(g) ²⁾		含水率(%) ²⁾		収縮率(%) ¹⁾
		乾燥前	乾燥後	乾燥前	乾燥後	
香信	75.8	42.78	4.53	89.7	3.9	23.3
香菇	76.1	62.54	6.61	90.2	6.0	35.1
冬菇	40.6	55.55	7.81	87.4	10.2	29.5

¹⁾ 菌さん直径及び収縮率は各銘柄2個体の平均値

²⁾ 子実体重量及び含水率は各銘柄4個体の平均値

表-5. 乾燥工程初期における循環利用及び送風量低下の場合の燃料消費量¹⁾

循環ダンパ開度 (L/時)		送風機回転速度 (L/時)	
全閉	2.28(100) ²⁾	高速	2.38(100) ²⁾
半開	2.06(90)	中速	2.13(90)
全開	1.88(82)		

¹⁾ 設定温度40℃, 吸気及び排気ダンパは全開

²⁾ 括弧内は全閉及び高速を100としたときの指数

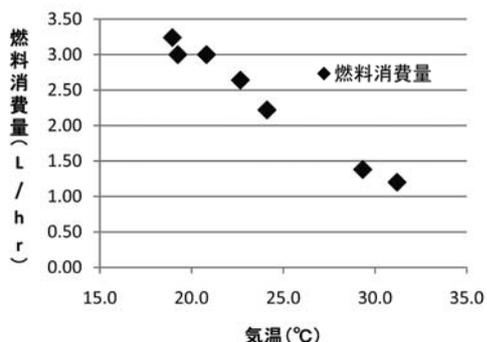


図-2. 気温と1時間当たりの燃料消費量の関係

検討が必要な事項であることが明らかとなった。

2. 試行乾燥スケジュールによる乾燥試験

標準スケジュールの試験結果を基に、生産現場での適応を考慮した以下に示す条件を設定して、試行乾燥スケジュールを作成し(表-6), 乾燥試験を実施した。

①既設の乾燥機を使用することから、乾燥工程の制御温度はなるべく変更しない。

②収穫の最盛期には毎日収穫されることから、24時間以内で仕上がる(設定は23時間とする)。

③乾燥操作を省力化するために、吸気や排気ダンパの操作回数を少なくする。

また、今回は、試行の乾燥スケジュールであることから、以下の2条件も付加した。

④乾燥機内空気の循環効果を最大限に利用するために、循環ダンパは常時全開とする。

⑤乾燥機本体の背面に、吸気口があるため、吸気ダンパは常時全開とする。

試行乾燥スケジュールによる乾燥試験を2008年3月31日に行い、乾燥中の子実体重量および燃料消費量の積算値の変化を図-3に示し、子実体の状態調査の結果を表-7に示した。乾燥工程全体の燃料消費量は48.6ℓとなり、標準スケジュールと比較すると燃料消費量が約30%少なかった。乾燥中の子実体重量の変化は、標準スケジュールの場合とほぼ同様であり、乾燥仕上がりの状態も同等であった。これらの結果から、試行スケジュールでも、含水率や収縮率の面から見れば標準スケジュールの場合と同等の乾シイタケ製品が得られることが明らかとなった。なお、今回の試験では30%程度の燃料消費削減効果が得られたが、乾燥機の基本性能からも明らかのように、供試機種種の燃料消費量や送風機の能力が30枚専用の乾燥機と比較して過大とみられることから、通常の30枚用の乾燥機の場合には20%程度(30%×400(w)/550(w)×4.74(L)/5.12(L))の削減効果になると考えられる。

表-6. 雨子の試行乾燥スケジュール

設定温度 (°C)	乾燥時間	風速制御	吸排気制御 (ダンパ開度)		
			吸気	排気	循環
40	2	中速	全閉	1/4	全開
45	3	中速	全閉	1/4	全開
45	2	低速	全閉	1/4	全開
45	1	低速	全閉	全閉	全開
50	6	低速	全閉	全閉	全開
55	6	低速	全閉	全閉	全開
58	3	低速	全閉	全閉	全開

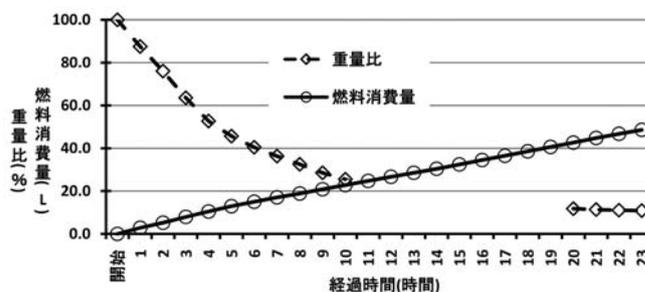


図-3. 試行スケジュールによる乾燥中の燃料消費量と子実体重量変化

表-7. 乾燥前後における子実体の状態比較 (試行スケジュール)¹⁾

銘柄	乾燥前菌さん直径 (mm)	子実体重量 (g)		含水率 (%)		収縮率 (%)
		乾燥前	乾燥後	乾燥前	乾燥後	
香信	85.5	64.86	6.91	89.7	4.3	23.5
香菇	81.2	81.62	9.51	89.8	11.0	29.1
冬菇	58.6	51.90	4.85	90.7	6.3	22.3

¹⁾ 各銘柄4個体の平均値

以上の結果から、乾燥機内の空気の循環を利用することによって、燃料消費量削減可能な乾燥スケジュールが作成できることが明らかとなった。

3. 「にえこ」の再現試験

再現試験による「にえこ」の発生状況を表-8に、子実体の状態を表-9に示した。

「にえこ」は、含水率の低い日和子でも湿球温度が35℃以上あれば発生がみられ、逆に、湿球温度が30℃以下であれば、含水率の高い雨子でも発生がみられなかった。また、45-40区と40-40区で比較すると、「にえこ」の発生は乾燥温度が高い45-40区の方が少なかった。これらのことは、河合・河合(1961)の報告と同様であることから、現用の乾燥機においても、乾球と湿球の温度差があれば子実体の乾燥が進行すること、「にえこ」発生防止のためには乾燥初期の湿球温度を30℃以下にする必要があることが確認された。

しかし、乾燥終了時の子実体の着色などの仕上がり状況を考慮すると、湿球温度の初期設定値は、通常乾燥の重量減少など同等の数値を示す25℃以下が望ましいと考えられる。

4. モデル乾燥スケジュールの作成

モデル乾燥スケジュールの基準条件の検索のために、試行乾燥スケジュールを基に、収穫日ごとの子実体の状態にあわせて条件を設定し、繰り返し乾燥試験を行い試験ごとの乾燥の仕上がり状

表-8. 「にえこ」再現試験結果

試験区	区分	重量 ¹⁾ 減少率 (%)	重量 ²⁾ 減少量 (g/時間)	子実体含水率 (%)		「にえこ」 発生数 ³⁾
				開始時	処理後	
45-40区	処理区	29.3	2.15	80.4	72.3	8/10
	対照区 ⁴⁾	52.3	3.66	79.5	56.7	0/5
40-40区	処理区	6.2	0.62	86.6	85.7	10/10
	対照区 ⁵⁾	- ⁶⁾	-	-	-	0/5
40-37区	処理区	21.9	1.89	82.0	76.9	7/10
	対照区 ⁷⁾	41.2	4.51	79.7	65.9	0/5
40-35区	処理区1	38.4	4.97	88.2	86.9	4/10
	処理区2	32.0	2.04	79.1	69.5	4/8
	対照区 ⁸⁾	54.6	3.86	78.2	52.2	0/4
40-30区	処理区	42.2	5.14	91.4	84.8	0/15
40-25区	処理区	56.5	5.06	92.4	81.9	0/15

¹⁾ 重量減少率 = (開始時重量 - 処理後重量) / 開始時重量 × 100
²⁾ 重量減少量 = (開始時重量 - 処理後重量) / 4 (時間)
³⁾ 供試数が少ないため実数を記載、表示は確認数/供試数
⁴⁾ 雨子乾燥スケジュール (電気式送風乾燥機を使用)
⁵⁾ 標準雨子乾燥スケジュール
⁶⁾ 調査無し
⁷⁾ 試行雨子乾燥スケジュール
⁸⁾ 標準日和子スケジュール

表-9. 「にえこ」再現試験後の供試子実体の状態調査結果

試験区	温度処理後 (4時間) の状態			乾燥処理後 (23時間) のヒダの色調など
	ヒダの色調	組織	臭気 ¹⁾	
45-40区	褐色から黄色味の着色	軟化	あり	濃く濁りのある黄色
40-40区	濁った乳白色 (着色なし)	軟化	あり	薄く濁りのある黄色、菌さんの緑などが黒く固化
40-37区	濁った乳白色 (着色なし)	軟化	あり	やや濃い濁りのある黄色
40-35区	薄い黄色味の着色	やや軟化	多少	やや濃い濁りのある黄色
40-30区	薄い黄色味の着色	やや硬化	なし	やや濃い黄色
40-25区	無着色から薄い黄色味の着色	硬化	なし	多少の濃淡はみられるが正常の範囲

¹⁾ 「にえこ」特有の臭気

態を表-10に示した。

日和子の場合では、乾燥終了時の基準含水率を13%以下 (乾シイタケの日本農林規格、現在は廃止) としてみると、全てのスケジュールで基準を満たしていた。また、調査した子実体の中で早いものは14~15時間程度で基準を満たし、ほとんどが20時間程度で乾燥終了とみられる状態となった。従って、日和子の乾燥スケジュールについては、45℃で乾燥を開始し、全行程を20時間で終了するよう設計した (表-11)。

雨子については、23時間でも基準を満たさない場合がみられ、肉厚の銘柄である「冬菇」や「香菇」でその頻度が高かったが、「香信」ではほぼ基準を満たしていた。その中で、雨子5区は他の試験区より乾燥開始時の含水率が高く、燃料消費量も多かったが、終了時の含水率は基準を満たしていた。また、雨子4区において、乾燥開始後3時間経過した時点で、菌さんの収縮率が負となり、菌さんが開く現象が観察された。湿球温度は、熱の有効利用の面では高い方が効果的であるが、乾燥途中で菌さんが開くことは、乾シイタケの製品としての品質に影響を与える可能性が考えられたので、この点も考慮に入れて、雨子5区の工程を基準として、全行程23時間の雨子のモデル乾燥スケジュールを作成した (表-12)。

表-10. 乾燥試験結果

試験区	燃料消費量 (L)	子実体含水率 ¹⁾		菌さん収縮率 ¹⁾ (%)	湿球温度 ²⁾ (℃)	気温 ³⁾ (℃)
		開始時 (%)	終了時 (%)			
日和子1	42.90	84.5	3.2	23.3	22.8	14.1
日和子2	37.18	83.3	4.6	15.1	25.2	18.4
日和子3	49.99	79.0	5.7	19.2	22.4	11.4
雨子1	37.92	88.6	17.5	21.9	25.7	15.6
雨子2	37.64	91.6	13.8	23.2	26.1	16.4
雨子3	38.48	89.1	5.2	23.1	25.4	17.6
雨子4	38.33	91.4	17.8	29.2	26.9	17.4
雨子5	45.05	93.9	10.2	35.0	25.0	10.1 ⁴⁾

¹⁾ 調査した子実体の平均値 (試験区により調査個数は異なる)
²⁾ 乾燥開始後4時間の平均値
³⁾ きのご研究所に隣接する野菜・茶業研究所の観測点の測定値
⁴⁾ 研究所内観測点 (百葉箱) の測定値

表-11. 日和子のモデル乾燥スケジュール

設定温度	工程時間	送風機速度	吸排気ダンパ制御		
			吸気	排気	循環
45℃	2時間	中速	全閉	1/4開	全開
50℃	2時間	中速	全閉	1/4開	全開
50℃	6時間	低速	全閉	全閉	全開
55℃	7時間	低速	全閉	全閉	全開
58℃	3時間	低速	全閉	全閉	全開

注) ・乾燥開始後4時間は湿球温度25℃以下
 ・湿球温度が25℃を超える場合は、吸気ダンパを開けて調整する
 ・4時間目以降の湿球温度は、特に注意する必要はない
 ・乾燥の進行状況の調整は50℃の工程で行う
 ・乾燥仕上がりは58℃の工程で調整する
 ・エビラの入替えは少なくとも1回は行う

表-12. 雨子のモデル乾燥スケジュール

設定温度	工程時間	送風機速度	吸排気ダンパ制御		
			吸気	排気	循環
40℃	4時間	高速	全閉	1/2開	全開
45℃	4時間	中速	全閉	1/2開	全開
50℃	2時間	中速	全閉	1/4開	全開
50℃	5時間	低速	全閉	全閉	全開
55℃	5時間	低速	全閉	全閉	全開
58℃	3時間	低速	全閉	全閉	全開

注) ・乾燥開始後4時間は湿球温度25℃以下
 ・湿球温度が25℃を超える場合は、吸気ダンパを開けて調整する
 ・4時間目以降の湿球温度は、特に注意する必要はないが、8~10時間目までは26~27℃以下で制御した方がよい
 ・4時間経過後の乾燥が不十分な場合は、45℃の工程の送風機速度を高速にして調整する
 ・乾燥仕上がりは58℃の工程で調整する
 ・エビラの入替えは前半と中盤で2回程度は必要

なお、燃料消費量については、いずれの試験区においても試行スケジュールと同等であったことから、乾燥開始時からの乾燥機内空気の循環を利用することによる燃料消費量削減効果は明らかと考えられる。また、乾燥機内循環の利用は、燃料消費量削減効果とともに収穫された子実体の状態に応じた乾燥機制御の自由度が確保できる有効な手法と考えられる。

IV. おわりに

今回の試験では、生産現場で使用可能な乾燥スケジュールの作成はできたと考えられるが、先にも述べたように、このモデルが

絶対的な条件を表すものでないことから、経験的知識および技術の習得が必要となる。このため、現地適応のための生産現場における実証試験が必要である。今後は、普及指導部門と連携をとりながら生産現場での試験を行い、普及定着と技術としての検証を進めていきたい。

また、生産現場で使用されている乾燥機には、本報告の冒頭でも紹介したように、方式の異なる「横吹き式」と呼称される乾燥機も多数存在することから、今後はこの「横吹き式」についても検討を行っていく予定である。

なお、気温が燃料消費に影響を与えていることが示されたこと

から、乾燥スケジュールには直接的に関係しないが、乾燥機の設置場所の選定も効率的な乾燥を行う上での重要な項目の1つとなり、普及指導上の利用価値があると考えられる。

引用文献

河合弥・河合晃（1961）菌蕈研報 1：29-34.

日本工業規格（1981）湿度測定方法 JIS Z 8806-1981.

（2009年10月24日受付；2010年1月25日受理）