

早期米の乾燥システムの開発

田原迫昭爾・魏 長楽・田中俊一郎

守田和夫・仲川政市*¹・朝隈寛治*²

(農業機械学第二研究室)

昭和63年8月10日 受理

Development of Drying System for Unhulled Rice in Early Season Culture.

Shôji TAHARAZAKO, WEI Chang Le, Shunichirô TANAKA, Kazuo MORITA,

Masaichi NAKAGAWA*¹ and Kanji ASAKUMA*²

(Laboratory of Agricultural Machinery II)

緒 言

鹿児島県内の普通期水稲と早期水稲を合わせた全水稲作付け面積は 38,460 ha (昭和 60 年資料) であり、最近ではほぼ横這いの状態を続けている。しかし、早期水稲の占める割合は年々増加の傾向を示し、昭和 55 年に 20.4% であったものが、昭和 60 年には 23.3% に増加している。収穫量に関しても、普通期米は毎年増減の変動があるにもかかわらず、早期米は着実にその収穫量を増し、全収穫量に対して昭和 55 年には 18.2% であったものが、昭和 60 年には 23.1% に増加している³⁾。この要因としては、(1)早期米は端境期に収穫できる。(2)適切な乾燥調整の下で出荷すれば、同時期の貯蔵米に比べ食味や香りの点で消費者の評価が高い。(3)生産者側から見れば早期米は貯蔵の必要がなく、収穫後他の作物の作付が可能で圃場収益性が高いことが挙げられる。しかし、早期米は普通期米に比べ、単位面積当りの収穫量が低く、過去鹿児島県 5 年間の平均で普通期米 4.25 t/ha に対し、早期米 3.82 t/ha と劣っている。また、早期米は普通期米に比べ、穀実の充実度が低く、物性的には抗張力、粘弾性などが小さく、熱的、力学的処理に対しては破損しやすい等の欠点がある⁴⁾。

著者らが昭和 61 年に行った予備実験でもこの事は明らかであり、天日乾燥においても多くの胴割れ米が認められている⁵⁾。以上のことより、今後増大する早期米の品質向上を目的とした適切な乾燥調整加

工技術を確立することは、重要な課題である。

こうした問題に対処するため、早期米の乾燥調整に常温で除湿した空気を通気し、乾燥を行う方法を提唱し、その乾燥装置を豊国工業株式会社プラント部と共同で開発してきた⁶⁾。

本研究はこの技術延長上のもので、常温除湿乾燥装置を改良し、実用規模での早期米の乾燥実験を行った。すなわち、実験装置の除湿能力や制御精度等の技術面について検討するとともに、乾燥経費などのコスト面についても検討を加えた。また、従来の熱風および天日乾燥方式に関して、品質面から比較し、合わせて検討した。

実 験 方 法

1. 供試材料

実験に供試した早期米品種はコシヒカリで、昭和 62 年 8 月 3 日に自脱型コンバインにより収穫し、直ちに実験を行った。実験は常温除湿乾燥、天日乾燥、日陰乾燥および熱風乾燥に分けて行った。また、テンパリング乾燥は同一の試料を東串良町農協ライスセンタに依頼し、乾燥実験を行った。供試材料の諸元としては籾の初期含水率 26.9% (w. b.)、見掛け比重 650 kg/m³、乾燥前の胴割れ率(軽胴割れ以上を含む) 2.5% であり、立毛中や収穫時の胴割れ発生も多かった。なお、常温除湿乾燥、熱風乾燥および天日乾燥実験は鹿児島県肝属郡串良町細山田の鹿児島県農業試験場大隅支場で、日陰乾燥実験は鹿児島大学農学部で行った。

2. 実験装置

改良した常温除湿乾燥装置の概要を Fig. 1 に、同乾燥システムの概略を Fig. 2 に示す。

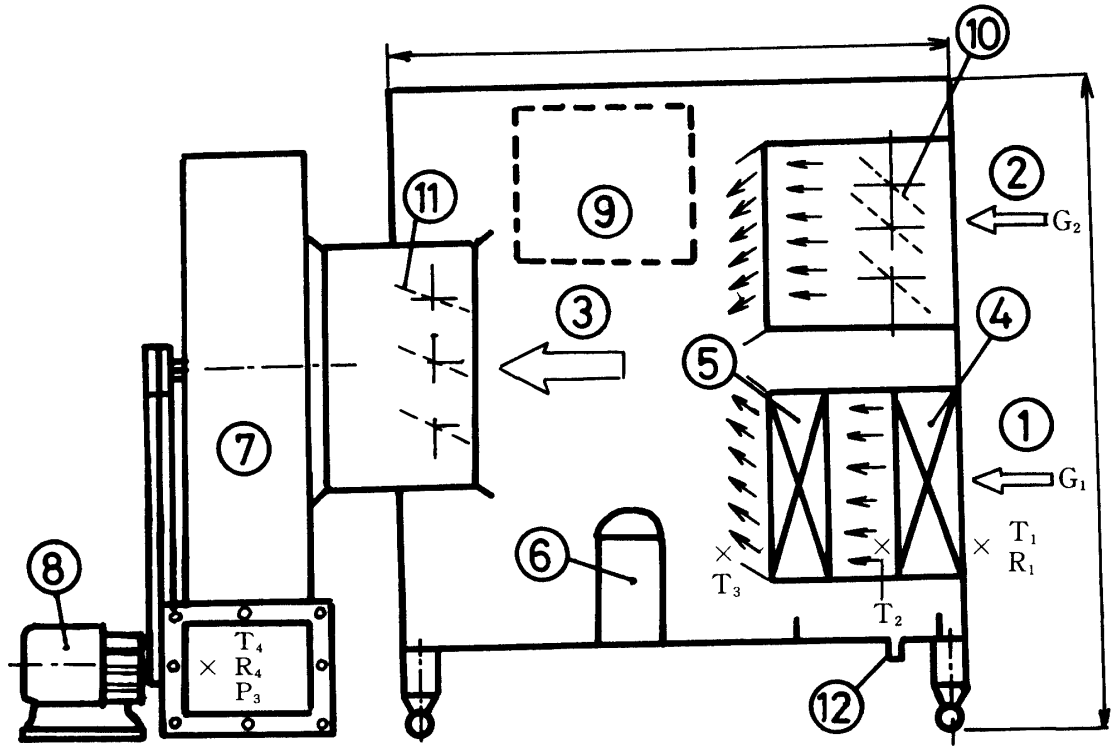
本装置はヒートポンプ除湿機、送風機、送風ダク

*¹鹿児島県農業試験場

Agricultural Experiment Station in Kagoshima Prefecture

*²豊国工業株式会社

KK. Hokokukogyou, Higashihiroshima-shi



- ① Inlet of dehumidified air
- ② Inlet of open air
- ③ Mixed air
- ④ Evaporator
- ⑤ Condenser
- ⑥ Compressor
- ⑦ Fan
- ⑧ Electric motor
- ⑨ Control device
- ⑩ ⑪ Damper
- ⑫ Drain

Fig. 1. Schematic diagram of heat pump dehumidifier drier.

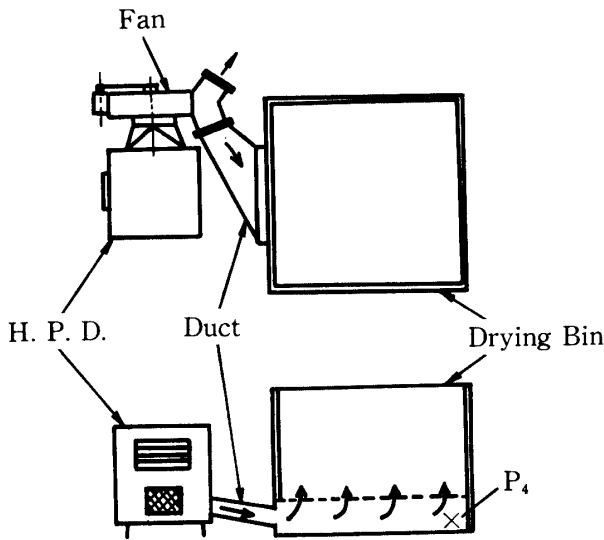


Fig. 2. Schematic diagram of dehumidifier drying system.

ト、乾燥ビンおよび除湿機内に内蔵される制御部より構成されている。空気の流れは、一次空気入口から流入した外気が、エバポレータで冷却除湿され、コンデンサで加熱された後、二次空気入口から流入した外気と混合され、送風機で乾燥ビンに送られる。

今回の改良機は61年度に用いた1号機⁷⁾を改良したものであり、次の通りである。

第一の改良点は、送風湿度等の操作装置にある。すなわち、従来は定湿操作だけであったものに、新たに除湿操作を加えたことである。ここで定湿操作とは、一定の相対湿度の空気を乾燥ビンに送風することで、外気条件によって送風量は変化する。除湿操作とは、除湿機が最高の除湿効率で運転される条件⁸⁾にあわせて風量調節を行うことで、この場合、エバポレータ部を通過する風量はほぼ一定に保たれるが、乾燥ビンに送風される空気湿度は外気により変動する。除湿操作は、水分の多い乾燥初期に行うと有効である。

第二の改良点は、外気温度が5°C以下か35°C以上

になった場合の対策である。すなわち、気温が5°C以下になるとエバポレータフィンに着霜現象が生じる。35°C以上では、コンプレッサが過負荷になり、ヒートポンプの性能が著しく低下する。本装置では以上のような場合コンプレッサが自動的に運転を停止し、外気だけの通風に切り換わる機構になっており、装置の安全と効率化を図っている。

なお、装置の主な部分の仕様は次の通りである。

- (1) ヒートポンプ除湿機：D. A. G. 1000 型
豊国工業(株)
- (2) 送風機：S. KTR-323AO 昭和風力(株)
- (3) 乾燥ビン：静置式箱型
1850mm×1850mm×800mm

3. 測定方法

(1) 常温除湿乾燥

常温除湿乾燥装置の測定項目は以下の通りである。ヒートポンプ除湿機内では、一次空気入口の風量(G_1)、乾球温度(T_1)および相対湿度(R_1)、二次空気入口の風量(G_2)、エバポレータフィン直後およびコンデンサフィン直後の乾球温度(T_2)、(T_3)の測定を行った。エバポレータによる除湿分量は、下部に設けた受皿からパイプにより取り出し、メスシリンダで計量した。送風機および送風ダクト内では、送風機出口の乾球温度(T_4)、相対湿度(R_4)および静圧(P_3)の測定を行った。

乾燥ビン内部では、送風、排気空気の温度および相対湿度と、体積層10 cmごとの乾球温度を4点測定した。乾燥中の含水率の測定は各層を二重管穀挿(採取口66 mm×15 mm, 間隔14 mm, 中心間隔74 mm, 穀挿直径30 mm)で一定時間ごとに試料を採取し、行った。全送風量は、乾燥ビンからの排気空気を一定時間ごとに熱線風速計で20カ所測定し、これを平均して算出した。所要電力はシステム全体および除湿部について積算電力計により求めた。

(2) 天日および日陰乾燥

プラスチック製育苗箱(530 mm×320 mm×60 mm)に収穫直後の籾2.5 kgを体積高さ1.8 cmまで入れ、8時から18時まで野外で乾燥し、夜間は屋内に収納した。試料の攪はんは1日に2回行い、一定時間ごとに総重量の変化を測定し、含水率を算出した。乾燥条件としては、外気温度、湿度および風速、日射量を測定した。

(3) 熱風乾燥

収穫直後の籾2.0 kgをトレイ(530 mm×320 mm×40 mm)に均一に充填し、それを強制対流循環式乾

燥機(内容積0.216 m³)で乾燥した。乾燥中の含水率は、初期には1時間、後期には2時間の籾の重量変化から換算して算出した。乾燥前後の含水率は、10 g粒-135°C-24時間乾燥法(M₁₃₅)で求めた。実験は、熱風温度範囲40°C~200°CのTABATA PS222型を用いて、乾燥設定温度40°C, 50°C, 60°Cの3段階に分けて行った。

(4) テンパリング乾燥

東串良町農協ライスセンタ(鹿児島県肝属郡東串良町)に依頼して、調査を行った。調査に使用したのはサタケ式テンパリング乾燥機で、1基の張込量3トンであった。含水率の測定は施設内にあるKett含水率計を用いて行った。

実験結果と考察

1. 常温除湿乾燥機の制御操作と送風空気湿度の関係

Fig. 3に乾燥期間中における外気および乾燥ビンへの送風、排気および外気の乾球温度と相対湿度の時間的推移を示した。すなわち、外気温度は24.3°C~32.4°Cを昼夜で変化し、その平均気温は28.4°Cであった。外気相対湿度は夜間は最高92.8%近くまで上昇するが、昼間は最低65.4%まで下がった。これは高温多湿な南九州地方の典型的な夏型気候である。

本実験では、乾燥開始後34時間までは除湿操作、46時間までを定湿操作(1)、57時間までを定湿操作(2)、最後の66時間までの仕上げ時間を再び定湿操作(1)で行った。この定湿操作(1)とは、外気湿度に対し送風空気湿度を大きく下げる操作であり、定湿操作(2)とは、外気湿度に対し送風空気湿度をあまり下げない操作をいう。こうした一連の操作は籾の水分が高い場合、除湿操作により送風量を多くして、全層からの蒸発分量を増加させ、乾燥の進んだ後期には、下層の籾が過乾燥を生じないように定湿操作により平衡湿度の空気を送り、平衡含水率に達するまでの最適な乾燥を得るために、行ったものである。

この乾燥方式の特徴的な変化としては、除湿操作期間中、外気湿度の増減につれて送風湿度も同じように増減し、夜間は約20%、昼間は約10%近くの低下を示していることが挙げられる。また、定湿操作(1)の期間中、外気湿度の増減に関係なく送風湿度はほぼ一定に保たれ、最高30%の除湿が行われ、設定湿度に対し±2%の精度で作動していることがわかる(Fig. 3)。次に、乾燥実験における各操作で

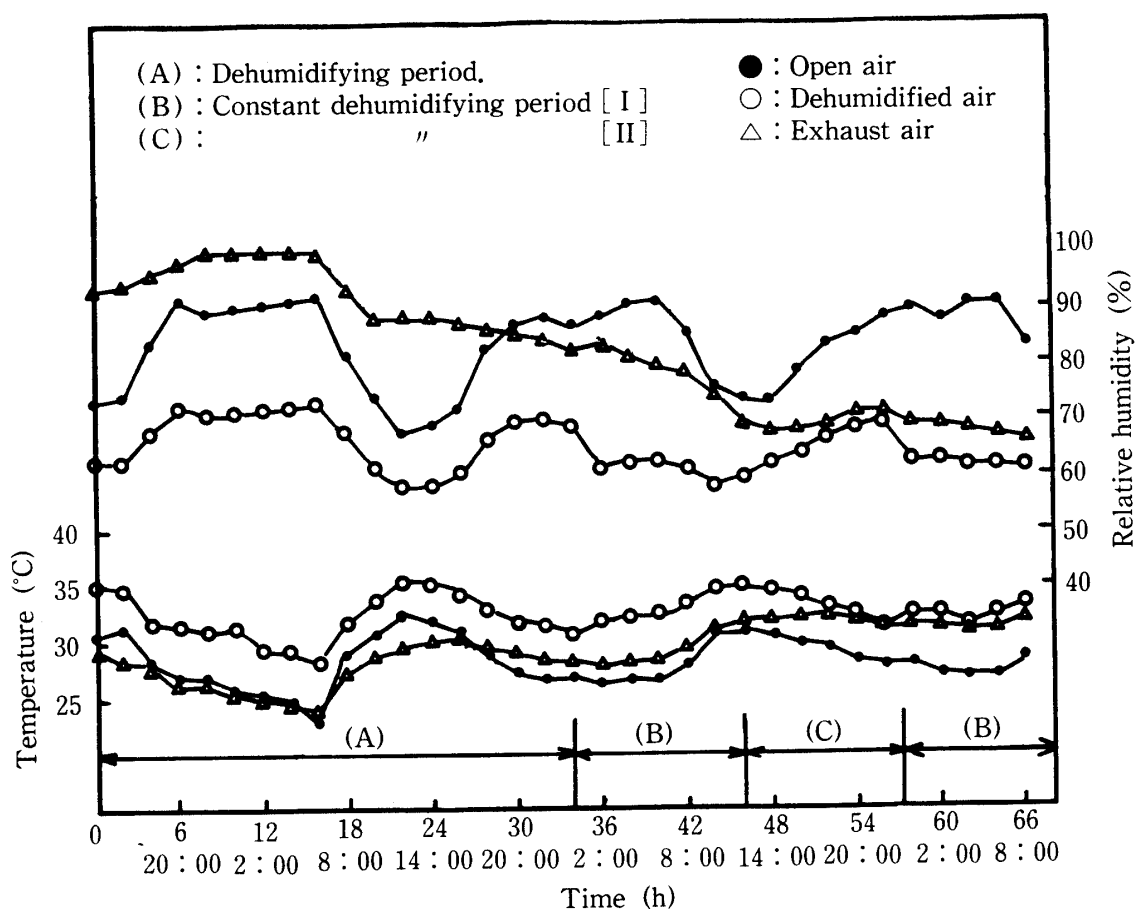


Fig. 3. Air condition of heat pump dehumidifier drier.

Table 1. Drying condition of heat pump dehumidifier drier

Drying time (h)	Operation	Static pressure (mmAq)				Air flow (m ³ /min)				Air of flow rate (m ³ /s.t)	R.H. (%)	
		P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	G ₁	G ₂	G ₃	G ₄		O.A.	D.A.
4	(A)	-12.5	-32.0	44.0	37.5	38.0	35.6	34.0	39.6	0.404	84	67
31	(A)	-14.5	-35.0	46.5	38.5	35.2	34.3	31.0	38.5	0.369	88	70
41	(B)	-9.0	-94.0	24.0	21.0	22.9	15.3	19.1	19.1	0.230	90	61
49	(C)	-31.0	-16.0	50.0	43.0	12.7	74.1	36.4	50.4	0.430	75	63
64	(B)	-7.5	-89.0	27.0	21.5	23.1	17.1	20.4	19.8	0.240	90	61

P₁ : Air pressure at condenser, P₂ : Air pressure just before fan, P₃ : Air pressure just after fan,
 P₄ : Air pressure in the drying bin, G₁ : Dehumidified air flow, G₂ : Open air flow, G₃ : Mixed air flow,
 G₄ : Unnecessary air flow, O. A. : Open air, D. A. : Dehumidified air, (A), (B), (C) : Refer to Fig. 3.

の静圧および風量の測定を行い、その結果の一例を Table 1 に示す。ここで、表中 G₁, G₂ は一次および二次空気入口の吸込風量, G₃ は乾燥ビンへの送風量, G₄ は乾燥ビンへ送られない廃棄風量を示し, P₁ はコンデンサ室, P₂, P₃ は送風機の前後, P₄ は乾燥ビン風胴の静圧をそれぞれ示している。

除湿操作では一次と二次空気入口の吸込風量は外気条件で多少影響を受けるが、ほぼ一定であり、35 m³/min 前後の値を示し、全送風量は 70 m³/min となった。しかし、粗層には 31~34 m³/min の風量を送り、残りの 36~39 m³/min は実験上不要な風量であったので廃棄ダクトより廃棄した。このとき送風

機の負荷を示す全静圧 (P_3-P_2) は 80 mmAq 前後であったが、廃棄風量および送風ダクト抵抗の影響で、乾燥ビン風胴では 37~41 mmAq となった。

定湿操作 (1) では、外気湿度が最高 90% を越えるものを設定値 60% 近くまで大幅に下げたため、一次風量の割合が多くなるようダンパが操作される。この場合、一次風量は約 23 m³/min であるのに対し、二次風量は約 16 m³/min 程度と少ない。従って、ダンパはかなり閉鎖され、送風機の負荷を示す全静圧は 110 mmAq 以上となり、システム全体の送風量も 38.2 m³/min と少なくなる。定湿操作 (2) では、外気湿度 75% 前後のものを 63% 前後と小幅に下げれば良いので、定湿操作 (1) とは逆に、一次風量の割合は少なくなる。この場合には、一次風量は二次風量の約 1/5 となり、ダンパは大きく開き、多くの外気を吸入している。従って、送風機の負荷を示す全静圧 66 mmAq と少なくなり、システム全体の送風量も 50.4 m³/min と多くなっている。

以上のことより、本装置は内蔵コンピュータで、二次空気入口のダンパを自動開閉し、混合空気により設定した湿度の空気を送風するように設計している。このため、常に一定静圧および一定風量は得られないが、湿度制御が可能となり、実験操作条件から見て、その精度も実用的な範囲内にあると考えられる。

2. ヒートポンプ除湿機の除湿能力評価

(1) 除湿量の簡易算定法

ヒートポンプ除湿機のエバポレータ入口の流入空気の乾球温度、絶対湿度を T_1, R_1 、エバポレータ出

口とコンデンサ入口間の空気温度を T_2 、コンプレッサ出口を T_3, R_3 、とした。エバポレータでの実測除湿量を Δm (kg/min)、ヒートポンプ除湿機内を通過する質量風量を G_0 (kg/min)、コンプレッサ動力を W_c (kcal/min) とすれば、このシステムにおける各部のエネルギー収支は次式で示される。

(a) エバポレータへの吸込空気が冷媒へ与える熱量 Q_1 (Kcal/min)

$$Q_1 = G_0 G_p (T_1 - T_2) + C_1 \Delta m \dots\dots\dots (1)$$

(b) コンデンサへの吸込空気が冷媒から受ける熱量 Q_2 (Kcal/min)

$$Q_2 = G_0 C_p (T_3 - T_2) = G_0 C_p (T_3 - T_1) + G_0 C_p (T_1 - T_2) \dots\dots (2)$$

(c) コンデンサに冷媒が与える熱量 Q_3 (Kcal/min)

$$Q_3 = Q_1 + W_c = G_0 C_p (T_1 - T_2) + C_1 \Delta m + W_c \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $Q_2 = Q_3$ とすれば (2), (3) 式より $G_0 C_p (T_3 - T_1) = C_1 \Delta m + W_c \dots\dots\dots (4)$

となる。また、 $G_0 C_p (T_3 - T_1) = Q_0$ とすれば、 Q_0 はヒートポンプ除湿機で生ずる総熱量を示し、エバポレータ入口とコンデンサ出口の温度較差 ΔT すなわち $(T_3 - T_1)$ に比例する。従って、算定除湿量 Δm_c (kg/min) は近似的に次式で算定できる。

$$\Delta m_c = (Q_0 - W_c) / C_1 \dots\dots\dots (5)$$

但し、 C_p : 乾空気比熱 (Kcal/kg°C), C_1 : 凝縮潜熱 (Kcal/kg) とする。

(2) 除湿量の実測値と算定値の比較

Fig. 4 は常温除湿乾燥中にエバポレータで発生し

Table 2. Comparison of measured and calculated dehumidified water

Drying time (h)	Operation	T_1 (°C)	R_1 (%)	T_3 (°C)	G_0 (kg/min)	Δm (g/min)	Δm_c (g/min)
4	(A)	27.9	90.0	32.3	43.3	57.0	58.6
5	"	27.4	91.0	31.8	43.4	63.4	58.8
31	"	27.3	84.0	32.0	40.0	61.5	57.9
32	"	26.9	91.0	31.5	40.1	61.5	56.3
33	"	26.8	91.0	31.4	40.1	61.4	56.3
41	(B)	27.6	82.0	34.8	26.1	64.0	63.9
42	"	28.1	79.0	35.7	26.0	59.0	61.4
51	(C)	29.5	77.0	44.2	14.4	65.2	67.2
52	"	28.8	78.0	43.5	14.5	67.0	67.5

T_1, R_1 : Temp. (°C) and R. H. (%) of open air, T_3 : Air temp. of condenser (°C) G_0 : Air flow (kg/min), Δm : Measured dehumidified water (g/min), Δm_c : Calculated dehumidified water (g/min)

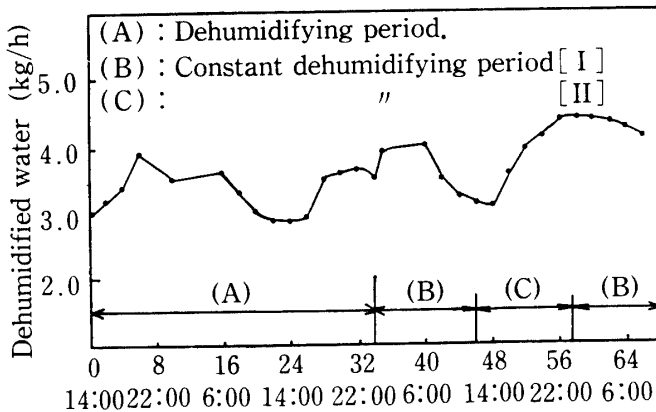


Fig. 4. Change of the dehumidified water.

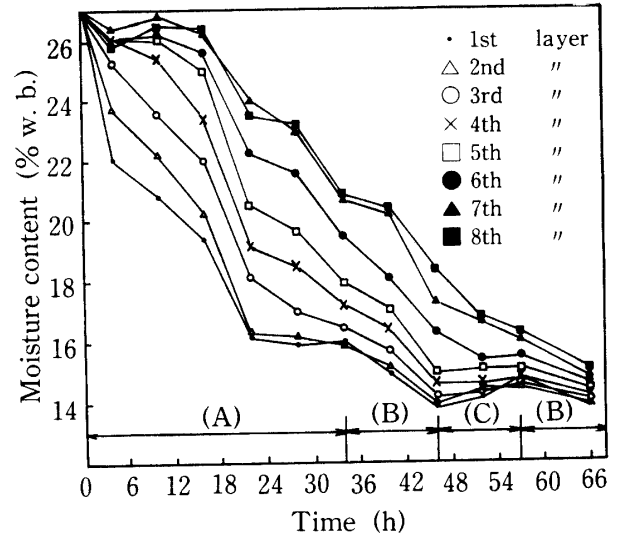
た除湿量を測定した結果である。すなわち、除湿量の最高は75 g/min (4.5 kg/h)、最低は45 g/min (2.7 kg/h)、平均で約60 g/min (3.6 kg/h)であった。内蔵されたコンプレッサの定格所要動力は1 PS (632 kcal/h)であるので、乾燥中のこのヒートポンプ除湿機は、空気中から水分1 kg 除去するのに平均176 kcalの動力を要したことになる。Table 2はエバポレータで除湿された除湿量 (Δm)と(5)式により算定した除湿量 (Δm_c)を比較した一例である。表より実測値 Δm と算定値 Δm_c がほぼ等しいので、ヒートポンプ除湿機内の上昇温度 ΔT すなわち ($T_3 - T_1$)、通過風量 (G_0) およびコンプレッサ動力 (W_c)を知ることにより、除湿量の推定が可能となる。

3. 乾燥効率と風量比

早期米をコンバインで収穫する場合、籾の含水率は25%~30% (w. b.)の範囲であり、本実験の27% (w. b.)は当地方では平均的な初期含水率と考えてよい。

今回の実験に用いた乾燥ビンの籾堆積層は0.613 mの一層であったが、含水率測定部までの0.074 m間隔を各層とし、合計8層に分割し、解析を行った。各層の含水率と乾燥時間の関係を Fig. 5に示す。すなわち、乾燥22時間ですでに1, 2層は平衡に達しているが、上層では乾燥が活発に進められている。しかし、この状態では16% (w. b.)前後の含水率に収束するため、34時間目以降は除湿操作から定湿操作へ切り換え、全層を14~15% (w. b.)の乾燥状態へ進めている。このように除湿操作と定湿操作を組み合わせることにより、下層では過乾燥を防ぎ、上層では乾燥を維持し、66時間目には全層の平均含水率が含水率14.3% (w. b.)に達している。

次に、堆積高さの違いによる乾量基準含水率 (d.



(A) : Dehumidifying period,
(B) : Constant dehumidifying period [I]
(C) : " [II]

Fig. 5. Moisture content as a function of drying time on each layer.

b.) と乾燥時間との関係を Fig. 6に示す。含水率は各堆積高さごとの平均値で示している。この乾量基準含水率は、籾からの蒸発水分量の変化を知ることができ、乾燥過程で最も重要な要因となる乾燥速度と直接的な関係を持つものである。除湿操作期間中、各堆積高さとも、0~4, 16~22時間で乾燥速度は速くなっている。この期間は昼間部で外気温度が高く、相対湿度が低くなっているためである。他の期間は夜間部で逆に外気温度が低く相対湿度が高くなるため、含水率の変化も少なく、乾燥速度はゆるやかになっている。このように常温除湿乾燥では通常の熱風乾燥とは異なり、除湿操作では、外気温度、相対湿度に大きく影響を受け、含水率の変化割合が一定しない。しかし、定湿操作では、外気温度、相対湿度の影響はほとんどなく、含水率の減少割合を任意に設定することが可能であるので、乾燥速度設定、全層の最終含水率の平均化および予測が可能である。ここでは定湿乾燥(1),(2)を組み合わせることにより、下層では吸湿、上層では乾燥が行われ、最終的には過乾燥および乾燥不足のない、全層が平均した含水率に収束していることが特徴的な変化として挙げられる。このように操作を途中で切り換えて乾燥する場合、除湿操作では外気条件を、定湿操作は設定湿度を考慮すれば、最適乾燥速度が算定でき、最終含水率および乾燥時間の推定が可能と思われる。

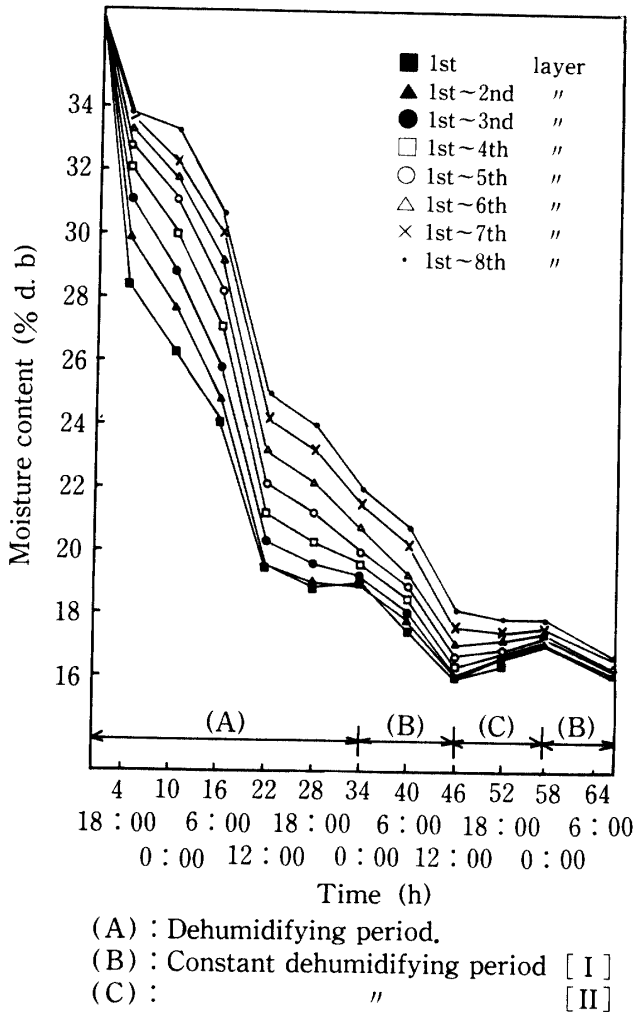


Fig. 6. Moisture content as a function of drying time on each height of layer.

堆積層内の通過風量を全期間平均 30 m³/min (空塔風速 0.15 m/s) とした場合の各堆積高さでの風量比に対する 27% より 15% (w. b.) までの平均乾燥速度および乾燥時間について算定した結果を Table 3 に示す。すなわち、各堆積高さで算出された風量比に対し、平均乾燥速度は減少の傾向を示しているが、その減少割合は風量比に比べ小さい。しかし、乾燥時間は風量比の減少にともない明らかに増加している。そこでこの風量比と乾燥時間との関係をさらに詳しく調べ Fig. 7 を求め、最適風量比の推定を行った。その結果、今回の実験においては風量比 Q (m³/s. t) と乾燥時間 H (h) の間には次の関係が近似的に認められた。

$$H = 42.1 Q^{-0.093} \dots \dots \dots (6)$$

これらのことより、システムの風量比を設定すれば、堆積高さに関係なく乾燥時間の予測が可能となる。しかし、システムの乾燥効率から見れば風量比

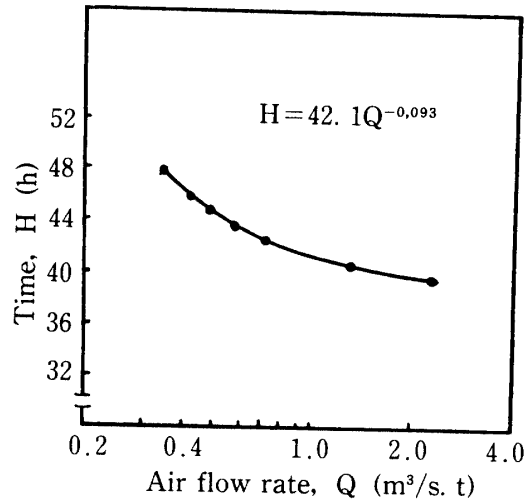


Fig. 7. Relationship between air flow rate and drying time.

が今回の実験においては、0.367 (m³/s. t) で乾燥を行うのが最も効率的であると思われる。

4. 風量比と水分較差

充填塔を使った堆積層による籾の乾燥を行う場合、乾燥終了時の下層と上層の含水率較差は、その後の籾の混合効果を考慮すれば、1.0%~1.5% (w. b.) の範囲であることが望ましいと言われている。今回の実験では、終了時の含水率は全層平均で 14.3% (w. b.)、下層と上層との水分較差は 1.2% (w. b.) であった。しかし、そのままの状態でも 8 時間放置した後、水分較差は 0.6% (w. b.) に減少している。Table 4 は層全体の平均含水率が 15% (w. b.) 以下で、水分較差の許容範囲が 1.0 および 1.5% の場合について、各風量比による乾燥時間の算定結果を示したものである。これによると風量比が 0.707 (m³/s. t) 以上では 1.0% と 1.5% の較差で乾燥時間に差は見られない。しかし、それ以降は風量比の減少とともに乾燥時間は増大し、0.367 (m³/s. t) では、水分較差が 1.0% と 1.5% で、乾燥時間に 6 時間近くも開きができる。乾燥時間から見れば、風量比を大きくすると最高水分較差も小さく、短時間で乾燥が行える。しかし、風量比を大きくすると、乾燥経費も大幅に増大し、実用面から見れば不向きである。また、水分較差を 1.0% 以下とすれば、品質面では有効であるが、乾燥時間も大幅に長くなるので、経済面から考えると水分較差 1.5% 以下が実用的である。

以上のことより、上下層の水分較差を考慮した乾燥技術としては今回の実験では風量比を 0.480 (m³/s. t) で含水率 15% (w. b.) まで乾燥すること

Table 3. Drying efficiency of heat pump dehumidifier drier

Layer No	Height of layer (m)	Ratio of flow rate (m ³ /s.t)	Average drying rate (% w.b./h)	Drying time (h)
1 st	0.095	2.370	0.303	39.6
2 nd	0.169	1.320	0.294	40.8
3 rd	0.243	0.924	0.288	41.6
4 th	0.317	0.707	0.283	42.4
5 th	0.391	0.570	0.275	43.6
6 th	0.465	0.480	0.270	44.4
7 th	0.539	0.417	0.261	46.0
8 th	0.613	0.367	0.252	47.6

Average air flow : 30.0 (m³/min)

Drying time : Moisture content from 27% to 15% (w.b.)

Cross section area of drying bin : 1.85×1.85m (3.42m²)

Table 4. Air flow rate and drying time under special gap of moisture content between top and bottom layer

Air flow rate (m ³ /s. t)	Drying Time		Maximum gap of M.C. between top and bottom layer % (w.b.)
	Gap within 1.0% (w. b.)	Gap within 1.5% (w. b.)	
1.320	40	40	0.95
0.707	40	40	2.3
0.480	44	40	3.3
0.367	53	47	4.1

が最も適した方法であると思われる。

5. 乾燥に要する経費

ヒートポンプ除湿機および送風機は全乾燥期間にわたり稼動したが、その間の所要電力および水分蒸発に使われた熱量を Table 5 に示す。すなわち、夏期高温高湿下で含水率 27% から 15% (w. b.) まで、常温除湿乾燥する場合、籾から 1 kg の水分を蒸発させるのに必要な熱量は平均 350 kcal (0.406 kw) であった。ここで 1 kwh の電力料金を 25 円とすれば、籾から水分 1 kwh 脱水するに要する電力料金は約 10.15 円となる。例えば、含水率 25% (w. b.) の早期米 1 トンを 15% (w. b.) まで常温除湿乾燥する場合の電力費は約 1,343 円となる。現在の共同乾燥施設で籾から 1 kg の水分を脱水するのに必要な熱量を調査した結果、(A) 地区では 1,312 kcal (燃料熱量 : 984 kcal, 電気熱量 : 328 kcal), (B) 地区では 2,179 kcal (燃料熱量 : 1,046 kcal, 電気熱量 : 1,133 kcal) であった⁸⁾。また、広島県農業試験場で行った

火力乾燥機の試験結果より試算すれば、含水率 24% (w. b.) の籾 1 トンを 14% (w. b.) まで乾燥するのに要する 7 機種の平均燃料費および電力料の合計は 2,114 円 (燃料 80 円/ℓとして計算) であった²⁾。

以上の結果を比較した場合、常温除湿乾燥システムは省エネルギーかつ経済的な乾燥方式であるといえるであろう。

6. 乾燥方法と品質の比較

米の外部品質で最も重要な要因である胴割れと内部品質を示す食味について、それぞれの乾燥方法の違いによる差を比較した。Table 6 は乾燥方法の違いによる初期含水率、最終含水率および胴割れ増加率について示した結果である。ここで胴割れ増加率はコンバイン収穫で生じる 2.5% の胴割れ率を基準として、以後乾燥により発生する胴割れを百分率で示したものである。熱風乾燥方式では熱風温度が 60°C, 50°C および 40°C で、それぞれ胴割れ増加率が 45%, 28% および 11% となり、普通期米に比べ胴割

Table 5. Performance of heat pump dehumidifier drier

Item	Performance	Note
Dehydrated water from unhulled rice	206.5 Kg	(26.9-14.3% w. b.)
Total electric power	83.7 Kw	Exhaust air
Power of compressor	44.8 Kw	Drying time 66 (h)
Power of blower	38.9 Kw	Drying time 66 (h)
Electric power of dehydrated water 1 kg	0.4 Kw/Kg	
Calorie of dehydrated water 1 kg	349.4 Kcal/Kg	(1 Kw=860Kcal)
Coefficient of performance	4.4 (Average)	(4.28-4.52)

Table 6. Comparison of drying method and cracking rate

Drying method	Initial M.C. % (w.b.)	Final M.C. % (w.b.)	Cracking rate %
H.C.D. 60°C	26.9	14.7	45.0
" 50°C	26.9	14.7	28.0
" 40°C	26.9	14.8	11.0
Solar drying	26.9	15.0	21.0
T.D. 45°C	26.9	14.0	6.3
H.P.D.	26.9	14.3	0

H.C.D.: Heat Convecting drying.
T.D.: Tempering drying.

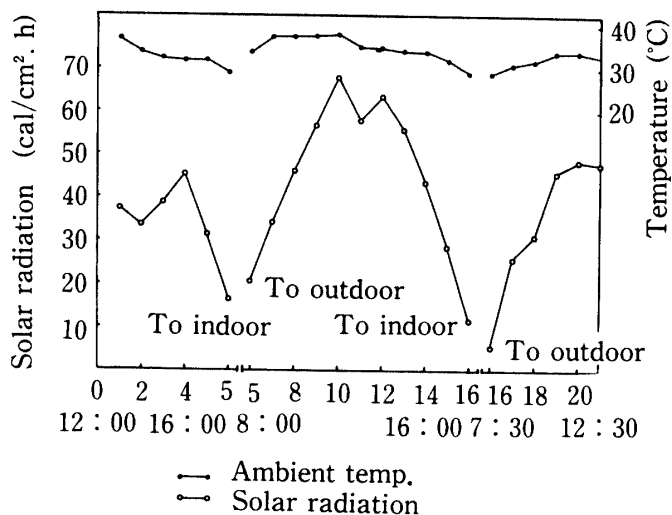


Fig. 8. Drying condition of solar drying.

Table 7. Drying method and quality of milled rice

Drying method	Taste value (STU)	M.C. of milled rice (% w.b.)	Whiteness
H.C.D. 60°C	56	12.8	40.4
" 50°C	50	11.6	40.1
" 40°C	56	12.4	40.5
Shade drying	52	12.4	40.2
Solar drying	53	12.4	40.4
Tempering drying	61	12.7	41.5
H.P.D.	61	12.3	40.5

れが発生し易いことがわかる。天日乾燥でも胴割れ増加率は予想以上に高く 21% に達したが、これは昭和 61 年 8 月に鹿児島大学農学部指宿試験場で行った調査 (品種ナツホナミ) でも同じ傾向が見られている⁵⁾。その原因としては、太陽光を直接受ける表層部分の粒が急速に乾くため、この部分に多くの胴割れが発生するものと考えられる。従って、夏期の直射日光下での早期米のむしろ干し乾燥は好ましくない。なお、Fig. 8 は天日乾燥期間中の晴天日射量の推移を示したものである。また、テンパリング方式による乾燥は、産地の共同乾燥施設に委託したものであるが、若干の胴割れが生じていた。しかし、常温除湿乾燥で行った早期米については、胴割れが全く認められなかったことは注目される。これは、この乾燥法ではほとんど過乾燥が生じないのが原因であろうと考えられる。

なお、胴割れ増加率は各乾燥方法とも 500 粒について調査を行い、常温除湿乾燥では各堆積層から 500 粒ずつ合計 4000 粒について調査したものである。次に食味については、S 社に依頼し、S 式食味計を用いて測定を行った。Table 7 は乾燥終了後、1 カ月経過した粒を精米し、食味値と白度について測定した結果である。今回は乾燥終了から測定までに日数がかかり、精白米の含水率が低下した。このため、乾燥直後の食味値とは多少異なるものと思われる。一般に、水分がある程度多いほど、STU 値(食味値)も高い傾向が認められている。この表では従来のうまいとされていた天日および日陰乾燥米の STU 値が 52, 53 と他の乾燥法より低い値を示し、熱風乾燥では、それぞれの熱風温度で含水率に差があるため STU 値による判断はできなかった。しかし、常温除湿乾燥では含水率は 12.3% (w. b.) と低いにもかかわらず、STU 値はテンパリング乾燥と同じ 61 とか

なり高い評価になっていることは注目される。白度に関してはテンパリング乾燥を除きほとんど差は見られなかった。

以上のことより、常温除湿乾燥は胴割れ率、食味値から見ても早期米において最も優れた乾燥法と見ることができる。

要 約

常温除湿乾燥システムの開発を行い、早期米の乾燥特性および品質について検討し、以下の結果を得た。

1. 常温除湿乾燥装置により、除湿操作および定湿操作を組み合わせた早期米の乾燥を行った。
2. 常温除湿乾燥システムは、送風湿度を制御するため、過乾燥、充填層の乾燥ムラの少ない乾燥が行えた。
3. 送風湿度はヒートポンプ除湿機で制御され、その除湿能力は簡易算定法により計算することができた。
4. 除湿、定湿操作を組み合わせた乾燥法により、最適乾燥速度が得られ、平衡含水率、乾燥時間の推定が可能となった。
5. システム内の風量比 (Q) と乾燥時間 (H) の関係は近似的に次式で表され、風量比を設定することにより、充填層の堆積高さに関係なく乾燥時間の予測が可能となった。

$$H = 42.1Q^{-0.093}$$
6. 本システムの实用面および経済面から見て、風量比は $0.48 \text{ (m}^3/\text{s, t)}$ 以下で充填槽内の設定最終含水率 15% (w. b.), 水分較差 1.5% 以内で乾燥す

るのが最も望まし。

7. 常温除湿乾燥では、早期米から水分 1 kg を除去するのに平均 350 kcal の熱量が必要であった。これを電力料金に換算すれば約 10 円となり、火力乾燥 (灯油+送風機電力) に比べ約 65% の経費で行えた。

8. 本システムによる乾燥では、胴割れ増加率は全くなく、食味値 (STU) も他の乾燥法に比べ、最も高い値を示した。

謝辞 本研究を進めるにあたり、ご校閲を頂いた本学農学部植木健至教授、材料の提供および実験等に多大な強力を戴いた鹿児島県農業試験場大隅支場農機具研究室の上園伝室長、森幸一郎研究員並びに機材の提供、改良および現地での指導にご強力頂いた豊国工業 (株) の林純男、吉原国彦、山下英俊氏、とりまとめに際し、ご協力頂いた町田俊子技管に深く感謝します。なお、本研究の一部は鹿児島県資源開発協議会の受託研究費によって行われたものであり、謝意を表します。

文 献

- 1) Bak, C. K.: Dry Air Generator for On-Farm Barley Drying, Presentation at the 1981 Summer Meeting, American Society of Agricultural Engineers.
- 2) 広島農試: 籾乾燥機における自動含水率検出装置の性能, 広島県農政部, 1-17 (1982)
- 3) 鹿児島県農林統計協会: 鹿児島県農林水産統計年報 (I 稲), 47 (1986-1987)
- 4) 農山漁村文化協会: 農業技術体系 (稲編) 624 (1976)
- 5) 田原迫昭爾・繆治煉・林純男・吉原国彦・朝隅寛治: 常温、除湿空気による穀類の通気乾燥, 農業施設学会誌, 18 (3) 23-33 (1988)
- 6) 田原迫昭爾・繆治煉: ヒートポンプ除湿機の除湿性能および穀類乾燥への利用, 鹿大農学術報告 37 261-268 (1987)
- 7) 田原迫昭爾・佐藤賢一郎: ヒートポンプ除湿機稼動中における温度計測による相対湿度の検出, 第 46 回農業機械学会講演要旨 (1987)
- 8) 山下律也: 共乾施設の内容と運営の再検討, 農機春秋, 11 (65) 76-83 (1986)

Summary

In order to develop a dehumidifying drying system for unhulled rice in early season culture, some fundamental drying properties of the unhulled rice were investigated.

1. Using the operations of the dehumidifying drying and the constant dehumidifying drying in the system, optimum drying of the unhulled rice was obtained.
2. As the drying air humidity was controlled in the system, over drying was protected and uniform drying was performed in the drying process.
3. The dehumidifying capacity of the system could be evaluated by a simple calculation method.
4. As optimum drying rate in the system was calculated, equilibrium moisture content and drying time could be estimated.
5. Experimental equation derived from the air flow rate (Q) and the drying time (H) in the system was shown as follows.

$$H = 42.1Q^{-0.093}$$

Therefore, the drying time could be estimated without any relation to the height of layer in the drying bin.

6. From the point of view of the practical and the drying cost, it was desired that the drying conditions should be established as follows.

- (a) Air flow rate : below $0.48\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{t}$
- (b) Final moisture content : approximately 15 % (w. b.)
- (c) Gap of moisture content between top and bottom layers in the drying bin : below 1.5 % (w. b.)

7. The calorific value of dehydrated water 1 kg from unhulled rice was fixed to be 350kcal (average) and it was about 10 yen in terms of power rates. The cost of the drying system could be reduced down to 65 % in comparison with the heat drying with burner.

8. The cracking rate and STU value of the drying system were better than those observable in any other drying methods.