



## 循環式穀物乾燥機の乾燥条件に関する研究

豊田, 浄彦  
前川, 孝昭  
山沢, 新吾

---

**(Citation)**

神戸大学農学部研究報告, 16(2):499-508

**(Issue Date)**

1985-01-31

**(Resource Type)**

departmental bulletin paper

**(Version)**

Version of Record

**(JaLCOI)**

<https://doi.org/10.24546/00225571>

**(URL)**

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/00225571>



## 循環式穀物乾燥機の乾燥条件に関する研究\*

豊田浄彦\*\*・前川孝昭\*\*\*・山沢新吾\*\*\*

(昭和59年8月10日受理)

### AN INVESTIGATION OF DRYING CONDITIONS OF A CIRCULATING GRAIN DRYER

Kiyohiko TOYODA, Takaaki MAEKAWA and Shingo YAMAZAWA

#### Abstract

The authors have studied the drying characteristics of a thin layer of grain by experiments and developed „Two-Tanks Model”, which could explain the drying characteristics of the initial drying period and „tempering effect” in the intermittent drying process accurately.

In this paper, the expression of this model was expanded and adopted to grain drying of a thick layer in a crossflow dryer with a recirculator. A computer simulation of a drying process of the dryer was carried out and presented relations between drying factors and the index of drying capacity, which were the mean drying rate and the energy required for drying. Optimum values of the drying factors, such as temperature of drying air, air velocity and velocity of the downward flowing grain in a drying chamber, were obtained.

#### I 緒言

穀物乾燥機の最適な乾燥条件を解明する方法の一つとして、空気温度や乾燥部滞留時間等の乾燥条件が乾燥過程に与える影響を計算機シミュレーションにより調べる方法がある。

Youngら<sup>1)</sup>はトウモロコシ (shelled corn)の堆積層乾燥について、空気温度、風量と乾燥所要経費との関係を、Hukillの乾燥式<sup>2)</sup>を用いた計算機シミュレーションにより調べ、乾燥所要経費が最小となる乾燥条件の組み合わせを見出すことができると報告した。

一方、国内では前川<sup>3)</sup>が乾燥特性及び穀物温度(以下、穀温と略す)の予測式に基づいた計算機シミュレーションにより、もみ、ビール麦の循環乾燥過程について考察した。そして、品質面の安全を図り、かつ乾燥能力の増大を望むには空気温度の上昇よりも風量の増加が好ましく、合わせて穀物の混合操作により、乾燥むらを減少すべき

であると報告した。また、西山<sup>11)</sup>はもみ粒子内部の水分分布を把握するために、もみを球状均質系の材料と見なし、水分移動に液状拡散を想定した球モデルを用いて、間欠乾燥における「テンパリング効果」の理論的な説明を行った。そして、球モデルの応用により、マルチパス乾燥における乾燥条件の最適化問題を検討し、各パスの乾燥時間を等しくすることにより、高い乾燥速度が得られると述べた。しかし、これらの研究では装置設計や運転条件の選定のための具体的な乾燥条件を提示するには至っていない。

球モデル以外にも現在まで多数の乾燥モデル(乾燥式)が提唱されているが、それらの応用により装置設計等について有益な知見が得られた例は少ない。

特に、現在国内で広く利用されている循環式穀物乾燥機(以下、循環式乾燥機と略す)では、乾燥と休止操作を繰り返す間欠乾燥が行われるため、その乾燥特性は複雑であり、従来の乾燥モデルによる間欠乾燥過程の正確な予測は困難である。

これに対し、筆者らの提唱する2槽モデル<sup>13,14)</sup>では、間欠乾燥過程の初期乾燥特性及び「テンパリング効果」について一貫した説明が得られ、従来の乾燥モデルに比

\* 農業機械学会第40回総会(昭和56年4月、東京農工大)

にて一部講演

\*\* 農産機械学研究室

\*\*\* 筑波大学農林工学系

べ、予測精度の向上も期待できる。

本報では2槽モデルを基礎とした計算機シミュレーションにより、循環式乾燥機の乾燥過程を数値的に再現し、乾燥速度等の乾燥能力と乾燥条件との関係を調べる。

そして、効率的な乾燥条件を明らかにし、乾燥条件選定の資料を得ることを目的とする。

なお、計算機シミュレーションの検証並びに乾燥条件の検討のために試験用乾燥機による乾燥実験を行い、その結果も合わせて報告する。

## II 実験方法及び装置

### 1) 実験装置

計算機シミュレーションの検証のために、試験用穀物乾燥機 (crossflow dryer, 満量処理量300kg) を供し、乾燥実験を行う。試験用乾燥機の概略を図1に、諸元を表1に示す。本装置は空調部、穀物循環部及び排気部より構成され、穀物循環部は2枚の多孔板 (スクリーン) にはさまれた乾燥部とその上部の貯槽部及びスクリュコンベア、バケットエレベータから成る穀物搬送部より構成される。

### 2) 測定方法

乾燥過程における状態量として、入排気の温湿度、乾燥部の穀物層内温度、乾燥部重量を測定し、測定器の出力をパソコン (pc-8001) に接続、オンライン計測を行った。穀物含水率の測定は乾燥部通過後の試料を採取し、ケット式赤外線水分計及び炉乾法 (10g粒-135℃-24hr) による直接測定法と乾燥重量及び入排気の温湿度の測定による間接測定法から各々求めた。風量は熱線風速計を用いて、排気部で10分割法により測定した。

### 3) 試料

収穫直後のもみ (ニホンバレ), ビール麦 (二条大麦, アズマゴールデン) を試料に用いた。

### 4) 実験条件

もみ, ビール麦の実験条件の概略を表2に示す。

## III 乾燥過程の計算方法

乾燥機内の穀物層 (厚い層) の乾燥過程を計算する方法として、従来、幾つかの例<sup>4,5)</sup> が示されているが、本報では、厚い層を一粒程度の厚さの層 (薄い層) の集合

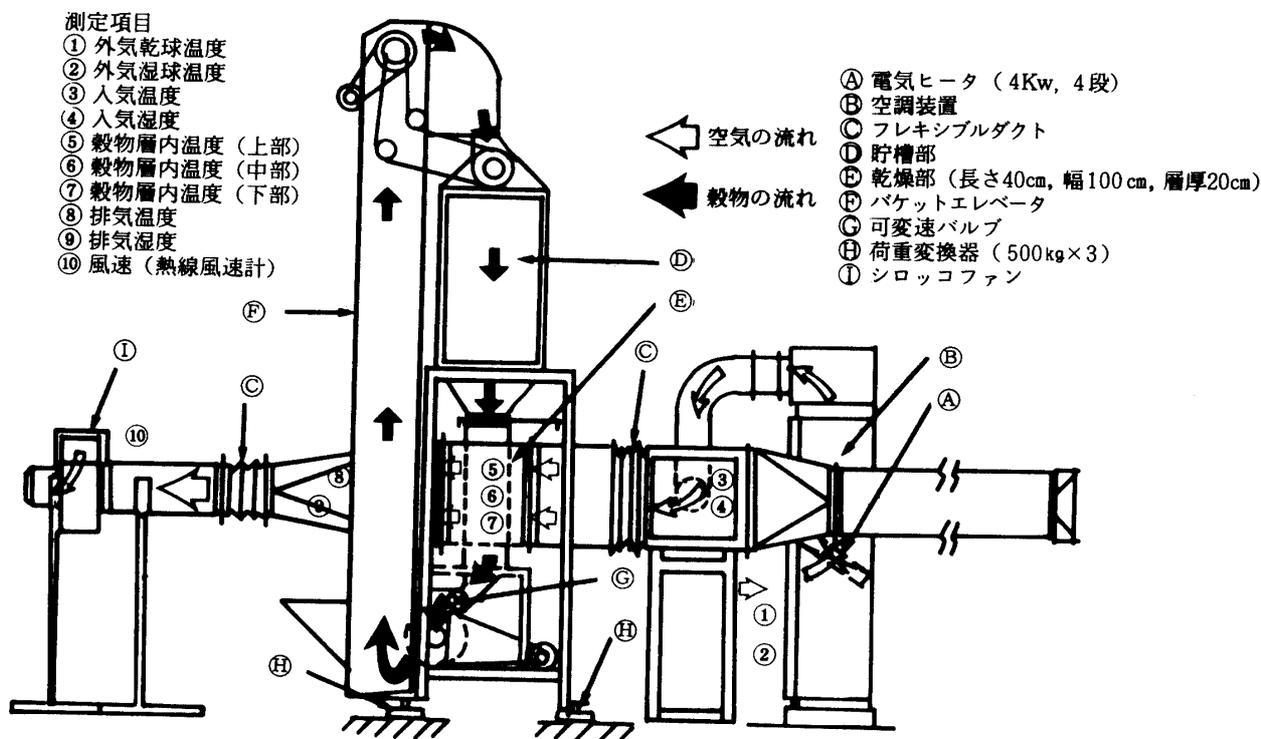


図1. 試験用循環式乾燥機の概略

表1. 試験用循環式穀物乾燥機の仕様

乾燥機本体の仕様	
形式	: 柱状型横流式穀物乾燥機 (スクリーン型)
張り込み量	: 300 kg (もみ, かさ密度 645kg/m <sup>3</sup> の場合)
穀物循環量	: 0~9.5 kg/min (可変速バルブにより調節)
乾燥部寸法	: 層厚 20cm, スクリーン長さ 40cm, 風路幅 100cm
貯槽部寸法	: 0.5×1.0×1.3m, 同容積: 約0.65m <sup>3</sup>
スクリーン面開口比	: 0.38
空気調整装置の仕様	
形式	: パッケージエアコン (リモートコンデンサ型, SPR-M50DE サンヨー製)
送風量	: 42~45 m <sup>3</sup> /min
ヒータ	: 4KW×4段 (各段ごとにスイッチを設け, うち1段は スライダックスにより電圧を制御した。)
総合消費動力	: 最大6.6KW
力率	: 87.5~88.2%
冷房能力	: 12000~15000Kcal/hr (14~17.4KW)

表2. 実験条件

試料	初期含水率 (%d.b.)	空気温度 (°C)	空気絶対湿度 (Kg/Kg')	風速 (m/s)	張り込み量 (Kg)
もみ ビール麦	34.25	41.3	0.00737	0.25	289.4
	20.60	43.1	0.01022	0.16	311.6
	穀物流下速度 (m/hr)	室内温度 (°C)	試料初期温度 (°C)	1循環時間 (min)	かさ密度 (Kg/m <sup>3</sup> )
もみ ビール麦	2.273	21.1	20.2	58.9	660.0
	2.340	21.4	22.8	60.5	660.0

した状態と考え、個々の薄い層の熱・水分収支から厚い層全体の乾燥過程を計算する方法を採用し、前川<sup>9)</sup>の循環式乾燥機の計算例を参考とした。

乾燥部の穀物層を通風方向 (I方向) にM列、穀物流下方向 (J方向) にL行の薄い層にそれぞれ分割し、M

×L個の薄い層を想定する。個々の薄い層の位置は配列表示で表す。例えば、図2に示すように、薄い層 (I, J) の入気は隣接する薄い層 (I-1, J) の排気であり、(I, J) の排気は同様に薄い層 (I+1, J) の入気となる。一方、時間の経過と共に薄い層 (I, J)

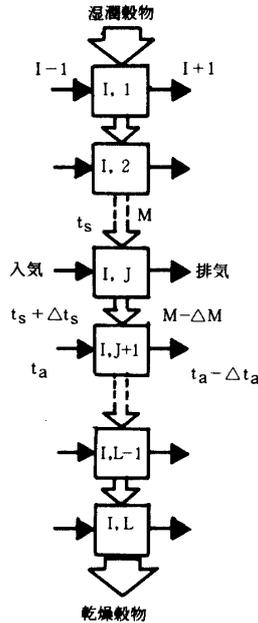


図2. 配列による表現

は流下し、(I, J + 1) の位置に達する。そして、この間の薄い層 (I, J) の熱・水分収支を計算し、通風方向、流下方向、それぞれについて、順次この手順を繰り返す。厚い層全体の乾燥過程の計算を行う。

乾燥過程の計算に際して、以下の仮定を設ける。

- (a) 乾燥部以外では空気-穀物間の熱・水分移動は起こらない。
- (b) 乾燥部の出口では I = 1 ~ N の薄い層の穀物が十分に混合され、I = 1 ~ N の薄い層の稈 (ふ)、穎果の水分と穀温は各々平均化される。
- (c) 休止期間中には穀粒内部の稈と穎果の間のみ水分移動が生じる。
- (d) 休止期間中、穀温は一定とする。
- (e) 乾燥部、貯槽部での穀物の流れは押し出し流れとする。
- (f) 穀粒内部に温度分布はないものとする。

1) 薄い穀物層の熱収支について 9)

薄い層の熱収支を次式のように考える。

$$Q_{in} = Q_v + Q_s + Q_w + Q_{out} \quad (1)$$

ここに、 $Q_{in}$  : 入気により薄い層に流入する熱量

$Q_v$  : 水分蒸発に消費される熱量

$Q_s$  : 穀物の顕熱上昇に消費される熱量

$Q_w$  : 装置壁面からの熱損失量

$Q_{out}$  : 排気により薄い層から流出する熱量

(1) 流入熱量  $Q_{in}$

$$Q_{in} = G_a C_a t_{in} d\theta \quad (2)$$

ここに、 $G_a$  : 空気の質量流量、 $C_a$  : 空気の比熱  
 $t_{in}$  : 入気温度、 $d\theta$  : 微小時間

(2) 水分蒸発に消費される熱量  $Q_v$

$$Q_v = r_v r_s V_s (dM/100) \quad (3)$$

ここに、 $r_v$  : 蒸発潜熱量<sup>9)</sup>、 $V_s$  : 薄い層の容積  
 $r_s$  : 穀物のかさ密度

$dM$  : 時間  $d\theta$  内の穀物の水分変化、2槽モデルの次式を用いて計算される<sup>13)</sup>。

$$M = \{ (\lambda_1 + \alpha F_2) e^{\lambda_2 \theta} - (\lambda_2 + \alpha F_2) e^{\lambda_1 \theta} \} \times (M_0 - M_{ed}) / (\lambda_1 - \lambda_2) + M_{ed} \quad (4)$$

ここに、 $M$  : 穀物含水率、 $M_0$  : 初期含水率

$M_{ed}$  : 動的平衡含水率

$\alpha$  : 穀粒一粒に対する稈の乾物重量比

$F_2$  : 稈の乾燥定数

$\lambda_1, \lambda_2$  : 2槽モデルのパラメータ<sup>13)</sup>

(3) 穀物の顕熱上昇に消費される熱量  $Q_s$

$$Q_s = C_s V_s r_s dt_s \quad (5)$$

ここに、 $C_s$  : 穀物の比熱

$dt_s$  : 時間  $d\theta$  内の穀温変化

(4) 壁面からの熱損失量  $Q_w$

$$Q_w = 2 \cdot h_w \cdot A_w (t_{in} - t_r) d\theta \quad (6)$$

ここに、 $h_w$  : 壁面での熱貫流率<sup>9)</sup>、 $A_w$  : 壁面伝熱面積

$t_r$  : 室内温度

(5) 流出熱量  $Q_{out}$

$$Q_{out} = Q_{in} - (Q_v + Q_s + Q_w) = G_a C_a t_{out} d\theta \quad (7)$$

(6) 穀温の計算方法

① 予熱期間

$$t_s = t_a - \exp \{ -h_p a_s d\theta / (C_s + 0.01 M) \} \times (t_a - t_0) \quad (8)$$

ここに、 $t_0$  : 初期温度、 $a_s$  : 穀物の比表面積

$h_p$  : 穀物-空気間の熱伝達率

熱伝達率  $h_p$  [W / (m<sup>2</sup>K)] の算出には穀物充填層の通風伝熱実験<sup>12)</sup>より求めた次式を用いる。

$$\text{粗} : h_p = 34.13 V_a^{1.02}, \quad 0.11 \leq V_a \leq 0.53$$

$$\text{ビール麦} : h_p = 193.1 V_a^{1.99}, \quad 0.20 \leq V_a \leq 0.60$$

ここに、 $V_a$  : 風速 (m/s)

② 減率乾燥期間

減率乾燥期間の穀温の計算には前川<sup>8)</sup>らの計算方法を採用するが、その説明は省略する。

2) 高湿度雰囲気中の水分移動

穀物層内を通過する空気の状態量は、層内の熱・水分移動に伴い変化するが、相対湿度が90%以上の範囲では平衡含水率の予測精度に問題が生じる<sup>10)</sup>。

相対湿度90%以上の雰囲気中での水分移動や平衡含水率については、凝縮やかびの発生により、実験が困難なことから十分明らかにされていない。ここでは計算の便宜上、以下の仮定を採用する。

- ① 空気の相対湿度が90%未満、かつ穀温が空気の湿球温度より高い場合に水分移動と熱移動が起こる。穀温が空気の湿球温度より低い場合には熱移動のみが起こる。
- ② 空気の相対湿度が90%以上の場合には水分移動は起こらず、熱移動のみが起こる。

#### IV 結果及び考察

##### 1. 実験結果

試験用乾燥機を用いた、もみ、ビール麦の乾燥実験より次の知見が得られた。

- (1) 乾燥部重量からの穀物含水率の間接測定値と炉乾法による直接測定値との間には高い相関関係が認められ、重量測定による穀物含水率の連続測定が可能である(図3)。
- (2) 入排気の温湿度からの穀物含水率の間接測定値は炉乾法による直接測定値に比べて総じて高く現れた。これは入排気の温湿度測定器の測定精度及び応答特性の影響と考えられる。
- (3) 乾燥部排気側で粉塵の発生とその堆積を認めた。粉塵発生量は全水分蒸発量の約10%の重量に達し、その発生状態は乾燥期間中、一様であった。

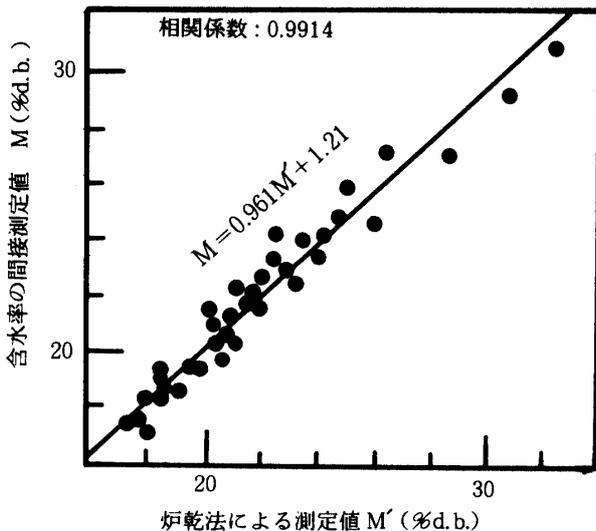


図3. 乾燥部重量からの穀物含水率の間接測定値

##### 2. 入排気のエンタルピ差

乾燥モデルを用いて厚い穀物層の乾燥過程の予測を行う前に、通風空気の状態変化について検討する。乾燥モデルを求めるための薄い層の乾燥実験では、穀物に大量の空気を通風し、穀温は通風開始直後に空気温度と等しくなり、空気から穀物へ供給される熱量は全て水分蒸発に消費される。そのため、薄い層の入排気のエンタルピは一致する。しかし、厚い層では穀物量が多いため、穀温上昇に消費される熱量の影響で層内通風方向に温度分布と水分分布が生じ、薄い層の乾燥実験で得られた乾燥モデルをそのまま適用することはできない。

西山<sup>11)</sup>はカントリーエレベータの試験用乾燥機によるもみ乾燥の際、各バスの乾燥期間で入排気のエンタルピ差(=排気-入気のエンタルピ)  $\Delta i$  は、時間の経過に伴い正の値から急激に減少し、最小値(負値)に達する。そして、その後、緩やかに増加し、零値に漸近すると報告した。

本実験の結果より入排気のエンタルピ差を求め、その結果を図4に示す。図4より、エンタルピ差  $\Delta i$  は正の値より減少し、最小値を示した後、増加する等、西山らの報告と類似するが、西山らが1バスごとの過程について報告したのに対し、本実験では乾燥時間700minにおよぶ全乾燥過程について報告した。図4に示すとおり、 $\Delta i$  が正または負を示す期間が長いこと、循環式乾燥機的全乾燥過程において通風空気の等エンタルピ変化を仮定することは困難であると思われる。これより、循環式乾燥機の乾燥過程の解析では穀物の顕熱上昇の影響を無視できないことが再確認された。

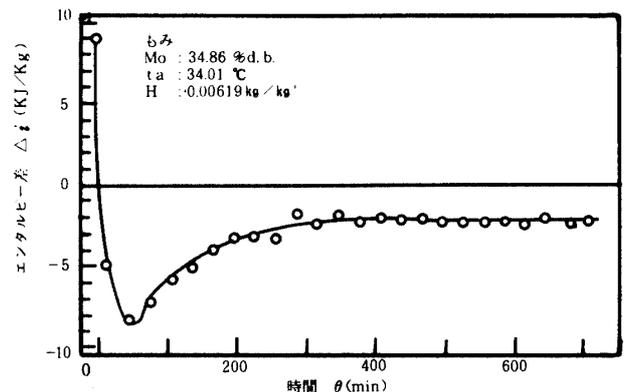


図4. 入排気のエンタルピ差

##### 3. 計算機シミュレーション結果の検証

もみ、ビール麦の乾燥実験より、穀物含水率、排気温度の実験値と計算値を図5、6に各々示す。

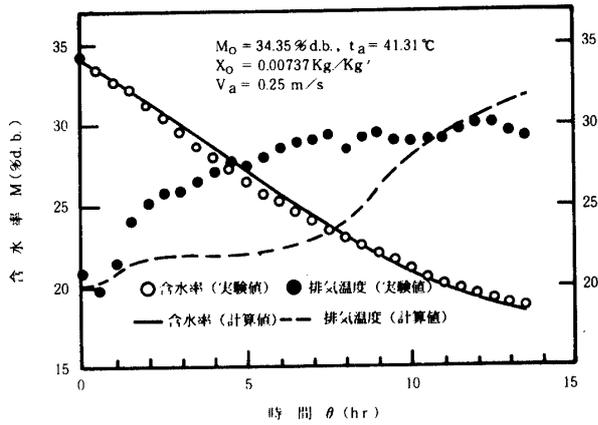


図5. 計算値と実験値の比較 (もみ)

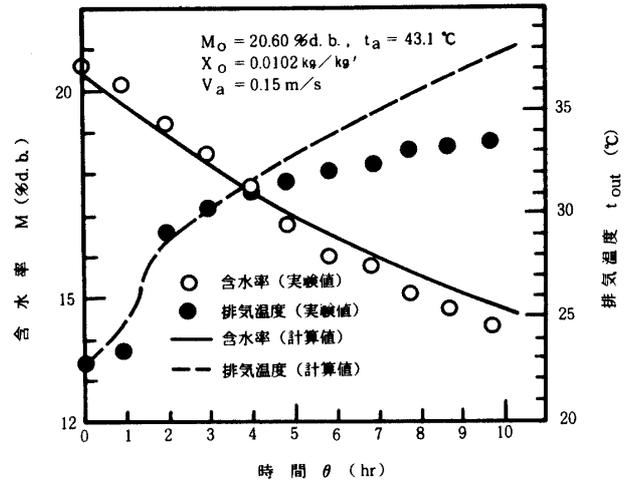


図6. 計算値と実験値の比較 (ビール麦)

表3. 入力データの一例

入力項目	単位	もみ	ビール麦
材料表面積	m <sup>2</sup> /kg	1.682	1.005
風路幅	m	1.0	1.0
スクリーン長さ	m	0.4	0.4
長さ分割幅	m	0.02	0.02
層厚	m	0.2	0.2
層厚分割幅	m	0.01	0.01
穀物流下速度	m/hr	2.273	2.34
材料初期含水率	-	0.3425	0.206
入気絶対湿度	kg/kg'	0.00737	0.01022
風速	m/s	0.25	0.159
張り込み量	Kg	289.35	311.60
仕上げ含水率	-	0.177	0.1426
壁外面熱伝達率	W/m <sup>2</sup> K	9.37	9.37
壁内面熱伝達率	W/m <sup>2</sup> K	19.03	19.03
壁体熱伝導率	W/m <sup>2</sup> K	53.50	53.50
壁体厚さ	m	0.001	0.001
室内温度	°C	21.09	21.42
穎果部乾物重量	mg	19.93	41.55
稃部乾物重量	mg	4.30	5.37
無水材料比熱	KJ/KgK	1.017	1.017
乾燥空気温度	°C	41.31	43.10
かさ密度	Kg/m <sup>3</sup>	660.0	660.0
材料初期温度	°C	20.2	22.8

図5のもみ乾燥は比較的、初期含水率が高い例であるが含水率の計算値と実験値は良い一致を示す。しかし、排気温度については、計算値の立ち上がりの時期が遅く、10hr後に実験値と一致する。

一方、図6のビール麦の乾燥では、含水率については一部の期間で計算値と実験値は偏差を示すものの、全体的に両者は良く一致する。排気温度については、乾燥後半の4hr以降で計算値が大きく上昇し、水分減少の割合も実験値に比べやや緩やかとなり、水分蒸発が若干少なめに計算された。

このような計算値と実験値間の差の原因は、測定誤差や穀温計算上の仮定の誤り等によるものと考えられるが、穀物含水率について計算値と実験値は比較的良く一致するので、次節以降では計算シミュレーションによる穀物含水率の予測が可能なものとして考察を行う。

#### 4. 乾燥条件の考察

前節の説明から、本報の計算機シミュレーションの手法により、穀物含水率の予測が可能なが確認された。そこで、設定された乾燥条件での乾燥所要時間及び、乾燥能力を表す平均乾燥速度、乾燥所要エネルギーを順次計算し、乾燥条件と乾燥能力との関係を調べた。ここで、乾燥所要エネルギーとは蒸発水分1kg当たりの空気加熱エネルギー(後述)と送風エネルギーの和を表し、KJ/kg-H<sub>2</sub>Oの単位で示す。

乾燥条件の検討に際して、単純な構造の試験用乾燥機を前提とし、その諸元を計算機シミュレーションの入力データとして用いるものとした(表3)。

以下に、空気温度、風速及び乾燥部内の穀物流下速度の3項目の乾燥条件と乾燥能力との関係について述べる。

##### 1) 空気温度と風速について

国内の穀物乾燥機の乾燥条件は、①低温大風量方式と②高温小風量方式に大別される。伴<sup>2)</sup>らは循環式乾燥機を用いて、空気温度と風量比(穀物100kg当たりの風量)について検討し、胴割れ防止の面から、低温大風量方式が好ましいと述べている。しかし、一般に40℃以下を低温と呼ぶことが多いものの、高温及び低温の呼称に関して厳密な定義は得られていない。また、大・小風量の呼称についても同様である。風量、風量比は装置の仕様を表す場合に用いられるが、熱・水分移動の現象自体を把握するという点からは風速を用いるのが妥当と考えられる。このことは風速から熱伝達率が直接計算できることから理解できる。そこで、本節では風量に関する項目として風速を採用する。

##### (1) もみの場合

蒸発水分1kg当たりの送風に要したエネルギーを送風エ

ネルギー $q_f$ と定義し、次式で表す。

$$q_f = Q_f / \Delta W = 0.278 L_f \cdot \theta_d / \Delta W \quad (9)$$

ここに、 $q_f$  : 送風エネルギー (KJ/Kg-H<sub>2</sub>O)

$Q_f$  : 送風に要する全エネルギー (KJ)

$\theta_d$  : 乾燥所要時間 (hr)

$\Delta W$  : 水分蒸発量 (Kg-H<sub>2</sub>O)

$L_f$  : 送風機所要動力 (W)

0.278 : 換算係数 (1 W = 0.278 KJ/hr)

送風機の所要動力は送風機の性能曲線<sup>3)</sup>、穀物層の圧力損失<sup>1)</sup>、スクリーン面多孔板の圧力損失(開口比0.38)

6)から求めた。ただし、全機械効率を0.5と仮定した。

空気温度を10℃間隔に30~80℃の範囲に、また、風速を0.15~0.5m/sの範囲に各々設定した。穀物の仕上げ含水率は16.96%d.b. (14.5%w.b.)とした。

送風エネルギーと空気温度との関係について風速をパラメータにとり、図7に示す。当然のことながら、空気温度が低く、風速の大きい場合程、送風エネルギーは増大する傾向が認められた。

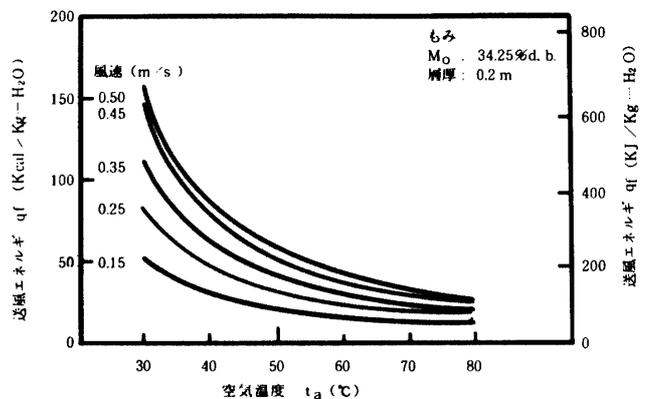


図7. 送風エネルギーと空気温度、風速との関係

一方、蒸発水分1kg当たりの乾燥空気の加熱に要するエネルギーを空気加熱エネルギー $q_h$ と定義し、次式で表す。

$$q_h = Q_h / \Delta W = G_a C_a (t_a - t_r) \theta_d / \Delta W \quad (10)$$

ここに、 $q_h$  : 空気加熱エネルギー (KJ/Kg-H<sub>2</sub>O)

$Q_h$  : 空気加熱に要する全エネルギー (KJ)

$G_a$  : 空気の質量流量 (Kg/hr)

$C_a$  : 空気の比熱 (KJ/KgK)

$t_a - t_r$  : 加熱による空気の上昇温度 (K)

空気加熱エネルギーの計算結果を図8に示す。図8では空気温度の上昇に伴う空気加熱エネルギーの増減傾向が風

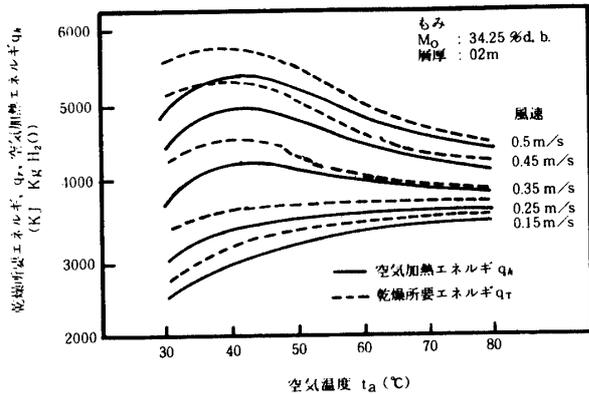


図8 空気温度と風速の影響(もみ)

速の大小によって異なる。特に、風速0.35m/s以上では空気加熱エネルギーは空気温度40°C付近で最大値を示す。この傾向を生じる理由は次のように考えられる。

(10)式を空気温度 $t_a$ で微分した次式を考える。

$$\frac{\partial q_h}{\partial t_a} = \frac{C_a \theta_D}{\Delta W} G_a + \frac{G_a C_a (t_a - t_r) \theta_D}{\Delta W} \cdot \frac{\partial \theta_D}{\partial t_a} \quad (11)$$

上式中、右辺第一項は風量による影響を表し、第二項は空気温度の上昇に伴う、乾燥所要時間の短縮による効果を表す。式中、第一項と第二項の符号は異なり、両項の絶対値の差により、図中の $q_h$ の増減傾向が変化するものと推論される。この空気加熱エネルギーが最大となる時の空気温度は乾燥速度の温度依存性、風速と熱伝達率の関係、乾燥部滞留時間等によって変化するものと考えられるが、各因子の関係が錯綜するため解析的に求めることは困難である。しかし、図8のように各因子の関係を求めることによって、風速の大きい場合に空気温度40°C付近を避け、30°C以下あるいは60°C以上で乾燥することにより、 $q_h$ は400~630KJ/Kg-H<sub>2</sub>O程度低減できるとの知見が得られる。

乾燥所要エネルギー $q_T$ を空気加熱エネルギーと送風エネルギーの和と定義し、 $q_T$ と空気温度との関係を図8中に破線で示す。図中、空気加熱エネルギー $q_h$ の曲線群に比べ、乾燥所要エネルギー $q_T$ は低温側でわずかに増加し、図8の範囲では $q_h$ に比べ $q_T$ の値は無視できる程度に小さいことが分かる。ただし、空気温度のより低い範囲では、送風エネルギーの著しい増加が見込まれるので、送風エネルギーの影響は無視出来なくなるものと思われる。穀物が初期含水率から仕上げ含水率に達するまでの全乾燥期間の平均乾燥速度(乾減率)を図9に示す。図より、平均乾燥速度の増加は主に空気温度の上昇によって得られ、風速の

大きい程、その影響が顕著なことが分かる。

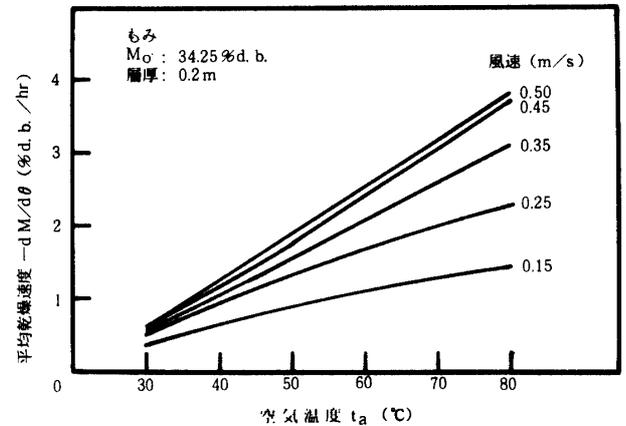


図9 平均乾燥速度と空気温度、風速との関係(もみ)

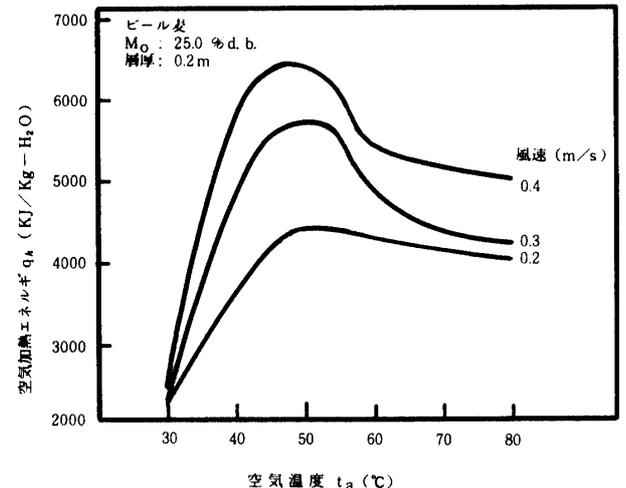


図10 空気加熱エネルギーと空気温度、風速との関係(ビール麦)

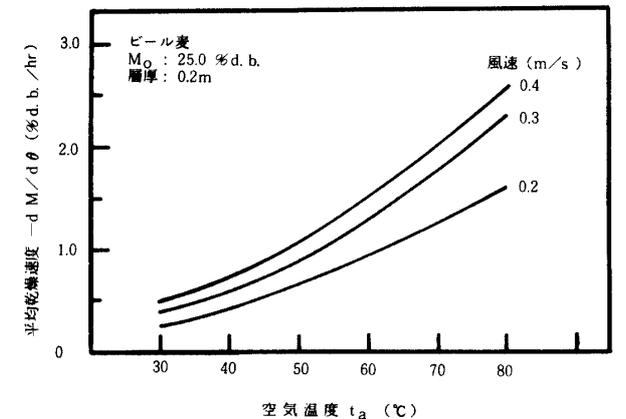


図11 平均乾燥速度と空気温度、風速との関係(ビール麦)

(2) ビール麦の場合

ビール麦についての空気加熱エネルギー、平均乾燥速度

の計算結果を図10, 11に示す。送風エネルギーについては、もみ乾燥の計算結果から、無視できる程度に小さいものとして省略した。

空気加熱エネルギー $q_h$ は2100~6300KJ/Kg-H<sub>2</sub>Oの範囲にあり、もみの場合と同程度であるが、空気温度30℃~40℃間の $q_h$ の増加はもみの場合に比べて顕著である。また、 $q_h$ が最大となる時の空気温度の値は50℃付近であり、もみの場合に比べて約10℃高い。

2) 穀物流下速度について

循環式乾燥機では穀物の循環に伴い、間欠乾燥が行われる。各パスにおける乾燥時間と休止時間は、穀物が乾燥部、貯槽部を流下し、両部に各々滞留する時間を示す。ここでは、穀物の流下の影響について調べた結果を述べる。

(1) もみの場合

乾燥部の流下方向長さを0.4m、穀物流下速度を0.1~5 m/hrとした時の空気加熱エネルギーと平均乾燥速度の計算結果を図12に示す。図中、乾燥部の穀物層厚 $X$ をパラメータとした。

図12より、平衡乾燥速度は穀物流下速度 $V_g$ の増加と共に増加し、 $V_g$ が約2 m/hrとなる付近で平衡値に達する。この平衡値に達する傾向は各層厚とも同様に認められる。

もみ乾燥では稈の乾燥が主体となる乾燥期間Iから乾燥が始まり、乾燥の進行に伴って、玄米(穎果)の乾燥が主体となる乾燥期間IIに移行する。この時の稈の乾燥

がほぼ終了する乾燥時間 $\theta_k$ の前後でもみの乾燥速度は大きく減少する。図12の空気温度41.3℃の場合、2槽モデルより求めた上記の乾燥時間 $\theta_k$ は12.5minとなる。スクリーン面の長さを0.4mと仮定したので、乾燥部において乾燥期間Iのみが生じる時の穀物流下速度は約1.9 m/hrとなる。この穀物流下速度の値は前述の平均乾燥速度が平衡化する時の値とほぼ一致する。 $\theta_k$ に対応する穀物流下速度を図中に破線で示す。

空気加熱エネルギー $q_h$ についても同様に、穀物流下速度の増加と共に空気加熱エネルギーは減少し、 $\theta_k$ を境に平衡化し、低い値に落ち着く。

これらの結果から、穀物の乾燥部滞留時間 $\theta_d$ を $\theta_k$ 以下に設定することにより、層厚に関係なく、平均乾燥速度が大きく、かつ空気加熱エネルギーが小さい、効率的な乾燥が行えるものと判断される。

(2) ビール麦の場合

穀物流下速度と平均乾燥速度、空気加熱エネルギーとの関係について、空気温度をパラメータにとり、図13に示す。もみの場合と同様に、穀物流下速度の増加とともに平均乾燥速度は増加する。各空気温度での $\theta_k$ を求め、 $\theta_k$ に対応する穀物流下速度 $V_g$ の値を図中に破線で示す。図13では空気温度の増加に伴い、平均乾燥速度が平衡化する時の穀物流下速度の値は明瞭でなくなる。これはビール麦における乾燥特性の温度依存性に起因するものと思われる。ビール麦の乾燥では、空気温度が高くな

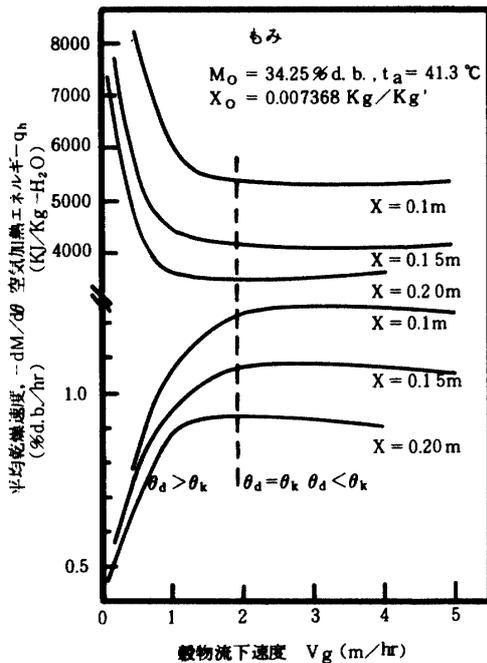


図12 穀物流下速度の影響 (もみ)

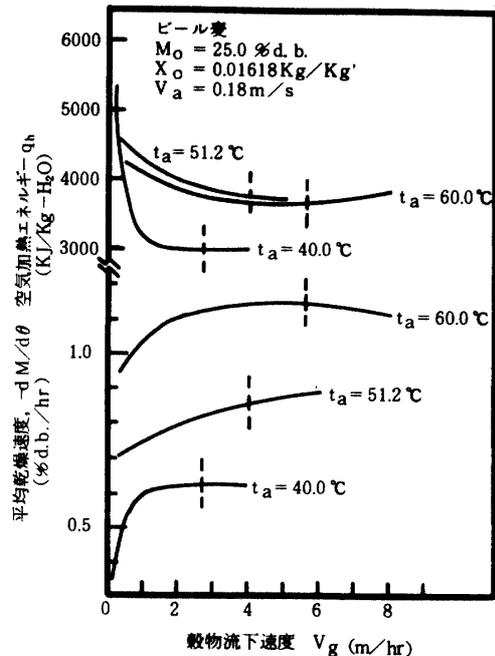


図13 穀物流下速度の影響 (ビール麦)

る程、稗と類果の乾燥速度の差は小さくなり、乾燥時間  $\theta_k$  の前後での乾燥速度の変化は空気温度が低い場合に比べて小さくなる<sup>13)</sup>。これにより、図中の平均乾燥速度の平衡化する時の穀物流下速度の位置も明確でなくなるものと思われる。加熱エネルギーについても同様の傾向が認められる。

以上のように、空気温度、風速、穀物流下速度の各乾燥条件の値を任意に設定し、それら乾燥条件と乾燥能力（乾燥所要エネルギー等）との関係を計算機シミュレーションにより調べ、効率的な乾燥条件を見出すことが可能なことを示した。特に、薄い層の乾燥モデルとして既に提唱されている2槽モデルを用いて、稗の乾燥がほぼ終了する乾燥時間  $\theta_k$  を計算し、穀物の乾燥部滞留時間  $\theta_d$  を  $\theta_k$  以下と設定することにより、効率的な乾燥が行えることを示した。

また、実験的手法により最適な乾燥条件を求める場合においても、本計算機シミュレーションの手法によって、予め実験範囲を限定し、実験回数を少なくすることが可能と思われる。

今後、休止期間の水分移動や高湿度雰囲気中での水分移動、排気温度の予測方法等について研究を進め、計算機シミュレーションの精度を向上させることにより、穀物乾燥機の自動設計への応用も期待できる。

## V 摘要

2槽モデルに基づいた計算機シミュレーションにより空気温度等の乾燥条件と乾燥能力との関係を調べ、循環式乾燥機の乾燥条件について次の知見を得た。

- (1) 風速0.15~0.5m/s、空気温度30~80℃の範囲で送風エネルギーは空気加熱エネルギーに比べ無視できる程度に小さく、乾燥所要エネルギーの代わりに空気加熱エネルギーを用いても考察の結果に大きな差異は生じない。
- (2) 空気加熱エネルギーは風速の小さい範囲（例えば、0.2m/s以下）では空気温度の上昇とともに漸増傾向を示すが、風速の大きい範囲（例えば、0.3m/s）以上では、もみの場合40℃付近で、ビール麦の場合50℃付近で各々最大値を示す。その際、空気温度の上昇に伴う空気加熱エネルギーの増加傾向はビール麦においてより顕著である。
- (3) 平均乾燥速度の増加は主に空気温度の上昇によって得られ、風速が大きい程、空気温度の平均乾燥速度への影響は大きい。
- (4) 穀物流下速度の増加に伴い、平均乾燥速度は増加

し、一方、空気加熱エネルギーは減少する傾向を示すが、ある穀粒流下速度以上では、共に平衡化し、一定値に近づく（図12, 13）。両者が平衡に達する時の穀物流下速度は穀物の乾燥部滞留時間  $\theta_d$  を  $\theta_k$ （稗の乾燥がほぼ終了する乾燥期間）とした時の値に対応する。したがって、乾燥部滞留時間を  $\theta_k$  以下に制御することにより、平均乾燥速度が大きく、空気加熱エネルギーの小さい、効率的な乾燥を行うことができる。

## 参考文献

- 1) A. S. A. E. : A. S. A. E. Data 272, p.399, Year Book, 1977
- 2) 伴敏三, 諏訪健三, 鷹尾宏之進: 農業機械化研究所報告, pp. 1-52, 農業機械化研究所, 1971. 2
- 3) Bühler 社カタログ: MGJA-25 型送風機性能曲線, 1600 rpm.  $Q_{max} = 28m^3/min$ ,  $P_{st. max} = 58mmAq$ .
- 4) J. R. O' Callaghan, D. J. Menzies and P. H. Bailey : J. Agric. Engng. Res., 16 (3), 223-244, 1971
- 5) J. R. Hammerle, J. C. W. Hsu : J. Agric. Engng. Res., 19 (1), 13-23, 1974
- 6) ヘンダーソン, ペリー共著, 吉崎他訳: 農業プロセス工学, p.261, 東京大学出版会, 1972
- 7) W. V. Hukill : Agric. Engng., 28, 335-338, 1947
- 8) 前川孝昭, 吉崎繁, 山沢新吾: 農業機械学会誌, 37 (4), 652-657, 1975
- 9) 前川孝昭: 東京教育大学農学部紀要, 24, 35-118, 1978
- 10) 村田敏: 九大農学部学芸誌, 27 (3, 4), 259-280, 1973
- 11) 西山喜雄: モミ乾燥の基礎的研究, 東京大学大学院博士課程学位論文, 1962
- 12) 豊田浄彦, 前川孝昭, 山沢新吾: 農業施設, 12 (2) 5-14, 1982
- 13) 豊田浄彦, 前川孝昭, 山沢新吾, 上田貞夫: 農業機械学会誌, 45 (1), 95-102, 1983
- 14) 豊田浄彦, 前川孝昭, 山沢新吾, 上田貞夫: 農業機械学会誌, 45 (2), 223-228, 1983
- 15) J. H. Young, J. W. Dickens : Trans. ASAE, 18 (5), 734-739, 1975