



室蘭工業大学

学術資源アーカイブ

Muroran Institute of Technology Academic Resources Archive



籾の反転通気乾燥

メタデータ	言語: jpn 出版者: 室蘭工業大学 公開日: 2014-06-04 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 野沢, 勝広 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10258/3275

籾の反転通気乾燥

野沢勝広

The Inversion Through A Dryer Of Unhulled Rice

Katuhiro Nozawa

Abstract

The present writer makes a discussion in this paper about the inversion through a dryer of unhulled rice under the operation which does not give any variation to the natural character of unhulled rice.

The dimension of the experimental equipment; the through dryer is shown in Fig. 1, and the through pressure drop, in Fig. 2.

[Results obtained]

- 1) The drying ratio has been found from 1.5~2.0 D.B %/hr under the following condition ;

air velocity $V_g = 0.175$ m/sec.

feed moisture $W_1 = 19\sim 36$ D.B. %.

product moisture $W_2 = 19$ D.B. %.

feed speed $W = 300$ kg/1 Batch.

gas temperature $t = 35\sim 45^\circ\text{C}$.

- 2) The empirical fomula of the through pressure drop has been found as follows ;

$$\Delta P/L = 0.51 V_g^{1.6}$$
$$200 \leq L \leq 600 \text{ mm.}$$

$$\Delta P/L = 0.64 V_g^{1.85}$$

$$L = 800 \text{ mm.}$$

I. 緒 言

農業機構の機械化の現象は、平和産業の発展の影響を受けて急速に実現されているにもかかわらず穀類の乾燥法として従来の天日自然乾燥では、高速化された機械力に釣合が取れぬ現状である。ところで籾などの乾燥の基礎応用面についての研究は少なく、通気乾燥の報文^{1)~6)}も若干あるのみである。いずれも一方通気の層厚さの薄い場合であって、伝熱特性には触れず乾燥特性を迫研している。しかし層厚さが若干厚くなると、無水状態まで乾燥する以外では、ある含水率の製品を取り出す場合に上層と下層の間の乾燥むらが非常に大きく開く。この乾燥むらを除くために、小型高性能の二段式反転通気乾燥器の試作研究を行ない、これによって乾燥むらを除去することが出来た。この試作器は小型であるが、1.3~1.5% D.B./hr の乾燥速度

を持ち、伝熱係数が $300\sim 800$ [kcal/m²·hr·°C] [m²/m³] なる優秀な結果をえた。そこで本報文は、籾の一般的乾燥条件下における乾燥機構ならびに伝熱機構を明らかにすることを目的とし、また旧籾、新籾の乾燥特性を比較検討し、乾燥器の熱効率も含めて籾乾燥器の設計に寄与する。

II. 実験装置

実験装置は反転二段通気乾燥器本体と、通気測定装置からなる。

1. 通気乾燥器本体

実験装置は 図-1 に示す通りである。本

体は鋼板厚さ 1.6 mm を使用し、スポット溶接構造とした。上段第 1 層と下段第 2 層のおのにおに 100~150 kg の籾を投入して乾燥を開始する。一定時間後に切換器にて下段の籾を排出し、上段の籾を下段に落下移動させ、さらに上段に原料を投入する。これを一定時間乾燥すると、下段の製品は均一の含水率となるので、以下同様の操作をくり返す。熱風は、プロパンガ

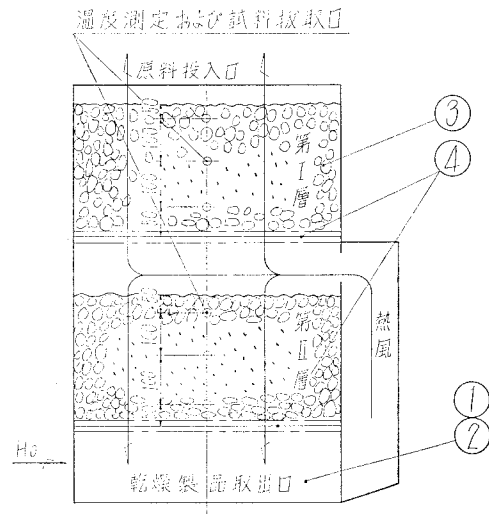


図-1 反転通気乾燥器

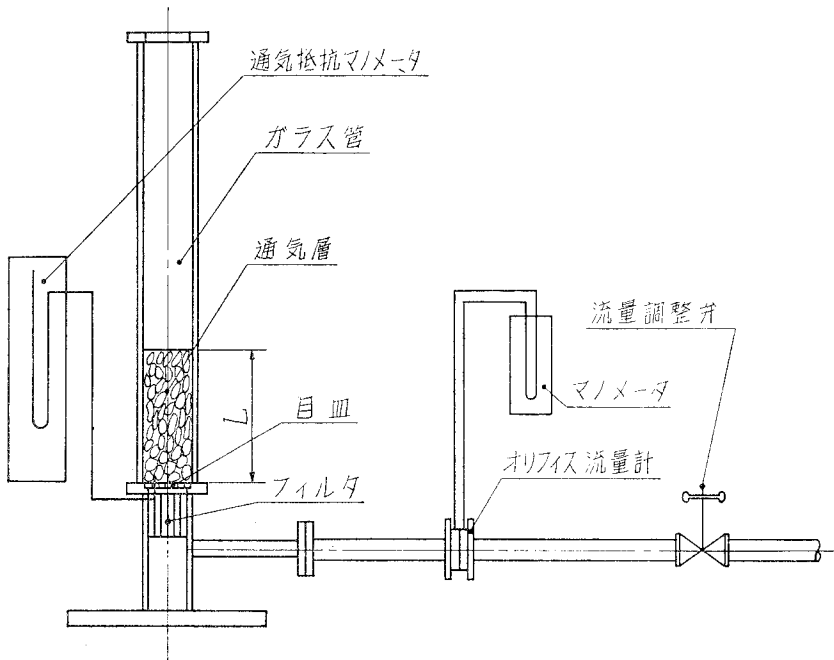


図-2 通気抵抗測定装置

ス・石油・都市ガスなどで、下段取出口の下側におさめられている燃焼装置にて発生される。送風機は押込型 1/2 HP, 20 m³/min, 50 mmAq とし、熱風は上段下段の中間に送風し、上下に二分され、籾の層を通過し排気される。温度測定は熱風入口、自然空気の乾湿球温度、排ガス温度、試料充填層内温度をアルコール棒状温度計にて測定した。

2. 通気抵抗測定装置

装置詳細は 図-2 に示す通りである。通気抵抗は内径 60 φmm ガラス管を用い下側には開口比 2/3 の目皿を用い、下方からの空気はフィルタにて整流した。試料はガラス管上部開口から投入し目皿上面からの層厚さを測定し、さらに流動中も層厚さの変化を観察出来るように考慮した。これによって 10~15°C の自然空気を用いて通気抵抗の測定を行なった。圧損失は目皿下側と開口部で取り、水柱にて表現した。

III. 籾乾燥の特殊性

1. 概 要

自然界の生物・無生物の乾燥機構はまったく同一の原理によるのであるが、生物の乾燥は一般に食品に多く、植物においては、種子としての発芽力、食品としての味および臭気に影響あることは明らかである。したがってこれらを見捨てた乾燥操作は無価値であるので多くの制約を受けた条件で乾燥を行なわなければならない特殊性を持っている。この種子としての植物は収穫期が限定され長期の実験は困難である。しかし新・旧籾の乾燥機構の類似性も検討する必要がある、それと合せて貯蔵中に増湿した籾の乾燥への応用も考慮に入れて増湿した旧籾の試料についても検討を加えた。

2. 乾燥条件の決定

籾の乾燥において前記のごとく特殊条件が付加されるので、その条件を決定する必要がある。それらは生物学的、生理変化の限界ならびに物理的变化の制約を受ける報告^{1),5)} が多数ある。前者においては乾燥による細胞変化・発芽力の変化であり、後者においては急激な熱処理による胴割れ、燃料の悪臭の添加変色および味の変化などである。これらが品質の低下の原因となるが、完全に除去しなければならない。胴割れについては、市村・中村ら¹⁾、居垣⁵⁾ の研究と著者の実験の一部を加えて比較検討を行なった。一方通気の乾燥において 15°C 程度の籾を 35°C の熱風で急激に乾燥すると胴割れが多く出た例などもあるが、これらは温度急変による籾表面の急膨張と、急激な乾燥による表面水分の蒸発による収縮のくり返し熱応力の影響などが考えられるが未解決である。一般的に 40°C 前後の熱風で風速 0.5 m/sec 以下であれば、発芽力、および胴割れに大きな影響がない傾向があるので、プロパンガス熱風にて 40°C 前後での乾燥機構を実験的に解明する。

IV. 実験方法

最初に旧籾を湿潤空気にさらし含水率を上げて調湿した試料を用いて 40, 50, 60°C の各温度にて乾燥速度を求め、伝熱の検討を加えた。次に農業現地にて刈取直後の籾を 35~45°C の熱風温度の範囲において乾燥特性を求めた。またこれらの籾の層厚さと通気抵抗の関係を流速を変えて実測し、その実験式の検討を行なった。

1. 原料の選択

実験期間は 9~11 月上旬と短期間であるので、6~7 月に旧籾を使用して増湿された籾の乾燥特性を調べ、収穫期に刈取直後の籾を選択した。特に北海道、空知・上川・十勝地方の米所のもを使用した。

2. 乾燥速度曲線

表-1 に示す条件によって、装置に試料を投入し、層の上中下の位置にて一定時間ごとに試料採取を行ない、化学天秤法ならびに Ket 水分計により含水率変化の測定を行なった。これと同時に反転通気による乾燥を行ない、第 1 層の上中下の含水率変化を測定した。

旧籾については 図-5、新籾については 図-6 に結果を示した。これらに基づいて乾燥速度曲線を求め、既発表のデータを含めて 図-8 に示した。

3. 通気抵抗測定

通気乾燥器には送風機決定のために通気抵抗の測定が必要である。これについて若干の報文があるが、流動層域まで測定せる例を見ず、充填層、輸送域にその例を見る。そこで 図-2 に示した装置によって層高さ、流速などを変化させて、流動域までの速度増加方向に通気測定を行ない、その後、速度減小方向に流速を変えて連続的に測定した結果を 図-11 に示した。通気抵抗と層高さの関係を 図-10 に示した。

4. 熱風湿度の補正

使用熱風はプロパンガス燃焼により発生させたが、燃料中の水素成分の燃焼による発生水分が、熱風に含まれるので、これを計算によって補正した値を入口熱風湿度の基準に取った。

5. その他

刈取直後の籾の乾燥では、その温度変化を一方通気の場合について 図-7 に示した。乾燥方法と胴割れ率、発芽力について既発表文献^{1),5)} も含めて 図-14 に示した。反転乾燥法による装置の熱効率と温度の関係は 図-13 に示した。

V. 結果と考察

1. 反転通気乾燥法

通気乾燥において、1 回以上通気の方法を変えながら乾燥操作を行なう方法を反転通気乾

燥法と定義する。

籾の場合、試作器では1回だけ通気方向が変るように操作出来るので、これと一方通気の乾燥との違いを考察することにする。図-3の実線に示す変化は一方通気乾燥における全層厚に対する平均値的な籾の含水率変化と時間の関係である。これを $d\omega/dt$ なる乾燥速度と籾の含水率 ω の関係にて示したのが、図-4の実線（一方通気）と点線（反転通気）である。右座標目盛は $dt/d\omega$ として示してある。ところで反転通気の効果があるのは減率乾燥であって、恒率乾燥においては排気が飽和状態または乾燥が断熱冷却線に沿うて進行するので、反転の効果は少ないと考察される。

減率乾燥において、一方通気で乾燥すると厚い層の場合、上層と下層の温度差および含水率の差が出来る。これは図-6、図-7から考察される。ここで一方通気の乾燥の途中で通気方向を反転すると、乾燥速度の早い含水率の大きい方が高温ガスの方に近づき、含水率の小さくなって来た温度の高い籾には逆に排ガスの方向に来るので、全体として排気ガス温度が高められ、層全体の温度が上るため、拡散速度も上昇する、などの条件によって乾燥速度が大きくなる。したがって図-3の実線で示すごとき平均値的全乾燥行程ならば、これを直線の変化に近似されるので、恒率乾燥の近似解法が成立するのである。またこれによって乾燥効率を上げることが明らかである。これを実験によって求めたのが図-8及び図-3'である(図-8は乾燥速度によって表現している)。これによると新籾も部分的には減率乾燥を示しているが、反転乾燥することによって減率乾燥の形はくずれ、平均値的に恒率乾燥に近似せしめる。乾燥速度曲線を用いて理論的な乾燥所要時間を求めるには次式を用いる。

$$\int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{dt}{d\omega} d\omega = \int_0^{\theta_a} dt = \theta_a \quad (1)$$

図-4は実験例で、区分求積的に計算により $\omega_1=25$ 、 $\omega_2=15\%$ D.B. としたときの結果を表わし、 $\theta_a=4.78$ hr となり、実測値 $\theta_{aE}=4.6$ hr, 誤差 4% 以内で良く一致した。

2. 新・旧籾の乾燥速度の比較

旧籾については図-5、新籾については図-6に示した。含水率と時間の関係を図-8に示した乾燥速度曲線について考察する。旧籾は水中に2~3時間浸して水分調整を行ない、35~37%と41~45%の試料としたが、これを用いて乾燥速度を調べると図-5の点線が示すごとく乾燥むらが時間の経過とともに大きくなって行き、さらに長時間乾燥すると上層部の含水率が下層部の含水率に近づいて行くために乾燥むらは低下して来る。ところが一般に食品の乾燥では製品を平衡含水率の状態にて保存するのが理想的であり、食品の細胞を生かすためには若干乾燥した自然空気が最も良い条件であることから、水分0%になるまで乾燥することは考えられない。従って希望される含水率まで乾燥すると一方通気では当然大きな乾燥むらが生ずる。次に図-5に示すごとく熱風温度が40°Cにて3時間、50°Cにて2時間、60°Cにて1.75時間で通気

方向を切り換えて逆流させると実線で示されるごとく、その時間の2倍の時間で上下層の含水率の差は最小になり、ほとんど一致する状態であった。これ以上乾燥すると逆に乾燥むらが開き始める。これらのデータを検討すると、原料含水率から成品の含水率を差引いて、その差の含水率を二等分し、その値を乾燥速度の平均値で割って求めた時間で通気を反転させると均一の乾燥製品がえられた。

刈取り直後の新穀について、25% D.B. 前後の含水率の実験例の結果を図-6に示す。これによると24.5% D.B. の穀では、1.5時間、25.5% D.B. の穀では2時間で反転させ、その2倍の時間を全乾燥時間として、18~18.5 D.B. % の均一の乾燥製品がえられた。これらのデータと他の報文(方法が若干異なるので参考のため用いる)から乾燥速度を考慮するために図-8を用いる。図は縦軸に乾燥速度 dw/dt 横軸に含水率を取ったものである。①, ②, ③は旧穀の浸潤試料であるが、これは熱風温度が高くなると限界含水率が小さい方向に移動する傾向がある。次に①⑤⑥⑦と④の曲線から考慮して限界含水率は25~42% D.B. の範囲にあり、熱風の温度に大きく左右されることが明らかとなった。また穀の平衡含水率15°C, 18.5 D.B. % まで乾燥する一方通気乾燥では減率一二段が支配的である。含水率23~24 D.B. % から18.5 D.B. % までの乾燥では、層が厚い場合には通過空気の吸収可能な水分の量が断熱冷却によるガス温度の低下による露点、飽和温度などの低下があり、これらの総合的關係から、恒率乾燥に近似されることが考察される。この場合、排ガスがかならずしも飽和状態とは限らない。ここで乾燥速度は非常に小さい値であるが(今までの調査では1~5% D.B./hr)、図-5、図-6とその他の文献によっても含水率変化が緩慢なることが推察される。特に反転乾燥装置の場合には層が厚く

表-1 実験記録

	7月	7月	7月	7月	7月	7月	10月	10月	9月	10月	10月	10月
原料穀含水率 (D.B. %)	44	42	44.7	34.8	36.6	36.3	24.2	20.7	24.2	25.6	25.6	25.6
上 段 (")	24.5	17.2	13.5	14.9	12.5	11.8	18.5	20	21.6	22.9	21.2	22.2
下 段 (")	—	—	—	—	—	—	17.6	18	19.7	19		19.6
燃焼ガス温度 (°C)	40	50	60	40	50	60	40	40	42	36	40	38
使用空気温度 (°C)	18	20	20	20	20	20	13	13	18	13	13	13
使用空気湿球温度 (°C)	15	16	16	16	15	15	8.5	9	8	12	12	12
絶対湿度 (H_1)	0.009	0.0098	0.0098	0.0098	0.0098	0.0085	0.0055	0.0055	0.0028	0.0084	0.0084	0.0084
飽和湿度 (H_s)	0.016	0.020	0.028	0.020	0.020	0.018	0.0137	0.0139	0.0126	0.0142	0.0148	0.0145
乾燥空気重量 G_0 kg/hr	1463	1463	1463	1463	1463	1463	1590	1590	1590	1590	1590	1590
原料乾燥重量	143.8	141	139	158	168	171.5	150	150	150	150	150	150
乾燥時間(上段)	2.8	2	1.825	6	5	4	2	0.5	1.5	2.75	2	2.14
乾燥時間(下段)	2.8	2	1.875					0.5	1.5	2	2.14	2
合計乾燥時間	5.6	4	3.75	6	5	4	2	1	3	4.75	4.14	4.14
恒率換算蒸発速度 kg/hr	5.02	8.64	11.55	5.23	8.1	10.5	4.28	4.65	3.1	1.86	2.4	2.8

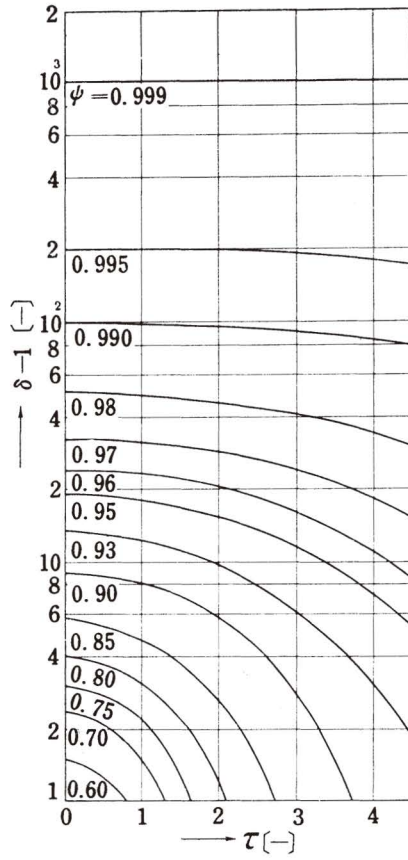


図-5 $\tau \sim \delta-1$

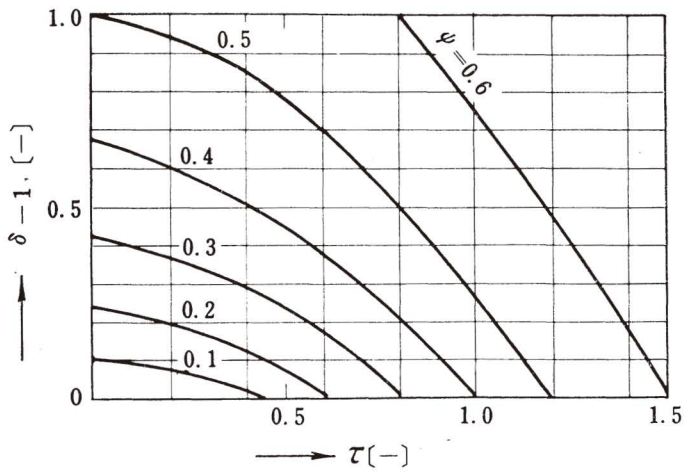


図-6 $\tau \sim \delta-1$

また粳乾燥の一般の場合は含水率 15% 以下 50% 以上については考察の範囲外であるのでこれについても省略する。

3. 粳の物性

粳ガラを付けた真比重: 1.385 gr/cc, 粳の嵩比重 30.2 W.B. %, 0.624 gr/cc, 14.0 W.B. %, 0.57 gr/cc, 粒径平均値, 長径×短径=7.06×3.94×2.46 mm, 球近以径 $dp=3.64$ ^球 mm, 無水比熱 0.3025 cal/gr·cc.

4. 伝熱物質移動の機構

伝熱物質移動の機構は装置設計上最も重要な事項であるが研究例も少なく, 伝熱については泉⁴⁾が Marshall & Ranz, 川淵ら, 白井らの実験式を用いて推算する程度で他に例を見ない。物質移動については拡散支配に重点を置いた久郷・向井田らの研究があるが, これも 40°C 以下について層厚さの影響については完全に解決されておらず, 胴割れ, 発芽力の変化に若干の疑問を残しているがこの方面での重要な研究であった。著者は実験データを基にして物質移動速度について概略の値を求めた。

4-1 伝熱

粳充填層内での伝熱は熱風温度が低いので, 伝導と対流が支配的である。また粳表面と熱風接触面の伝熱では伝導は対流に比して極小であるので無視出来て, 粳と気体間の伝熱を対流のみについて考えるとよい。基礎式は伝熱移動の熱収支から次式となる。

$$\begin{aligned} \frac{dq}{dt} &= \frac{d\omega}{dt} \cdot W_0 \cdot r_m = h \cdot a \cdot (\Delta t)_m \cdot V \\ &= h \cdot a \cdot (\Delta t)_m \cdot S \cdot L \end{aligned} \quad (2)$$

dq/dt : [kcal/hr] 単位時間あたりの伝熱量 (熱流束) $d\omega/dt$: [kg/hr·kg] 乾燥速度
 W_0 : [kg/hr] 充填層にある粳の乾量重量 r_m : [kcal/kg] 水の蒸発潜熱
 h : [kcal/m²·hr·°C] 粳表面の対流伝熱係数 a : [m²/m³] 粳の比表面積
 $(\Delta t)_m$: [°C] 粳層と空気平均温度差 V : [m³] 粳の全容積

対流伝熱係数は単一球に近似させると実験式として, Marshall & Ranz らの式, 白井らのを用いて泉⁴⁾が計算した結果 $h_p = 47$ kcal/m²·hr·°C の近くの値をえている。

$$Nu = 2 + 0.65 (Pr)^{1/3} (Re)^{1/2} \quad (4)$$

$Nu = (h \cdot a) / \lambda$: [-] ヌッセルト数 Pr : プラントル数 Re : レイノズル数

著者は実験的に求めるために (2), (3) 式を変形して次式から計算した。

$$h \cdot a = \frac{d\omega}{dt} \cdot \frac{\rho_{Bulk} \cdot r_m}{(\Delta t)_m} \quad (5)$$

$h \cdot a$ を求めるために, $d\omega/dt$ と $(\Delta t)_m$ を測定するとよい。 ρ_{Bulk} : 粳の嵩比重とする。反転通気乾燥において, 図-5, 図-6 から考察して, 層厚さの大きい場合の一般に要求される乾燥速度の

近似解法として、恒率乾燥を仮定すれば、(5)式において右辺の $d\omega/dt$ は一定となり、 $(\Delta t)_m$ も一定と考えられるから、反転通気乾燥においてはこの仮定に基づいて $h \cdot a$ は求まる。計算の結果、平均的に $a=1070$ [m^2/m^3], $h \cdot a=470$ [$\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$] [m^2/m^3], $h_p=0.45$ [$\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$] と非常に小さな値となり、泉らの推算値とは大きな差を示した。さらに他の乾燥器のデータを調べると $h \cdot a=300 \sim 800$ の範囲が多く、特に通気乾燥で風速 1 m/sec 以下ではほとんどがこの範囲にあることからこの実験値も妥当であると考察する。

4-2 物質移動

物質移動の基礎理論式は物質収支から次式で示される。

$$W_0 \frac{d\omega}{dt} = k_g \cdot a \cdot V \cdot (\Delta H)_{lm} \quad (6)$$

変形して

$$k_g \cdot a = \frac{d\omega}{dt} \cdot \frac{\rho_{\text{Bulk}}}{(\Delta H)_{lm}} \quad (7)$$

$$= \frac{d\omega}{dt} \cdot \frac{\rho_{\text{Bulk}}}{\frac{H_2 - H_1}{\ln\left(\frac{H_s - H_1}{H_s - H_2}\right)}} \quad (8)$$

$k_g \cdot a$: [$\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$] [m^2/m^3] 単位容積あたりの物質移動係数,

$(\Delta H)_m$: [$\text{kgH}_2\text{O}/\text{kg Dry Air}$] 平均湿度差, H_s : [$\text{kgH}_2\text{O}/\text{kg Dry Air}$] 熱風の飽和湿度,

H_1, H_2 [$\text{kgH}_2\text{O}/\text{kg Dry Air}$] 熱風入口, 出口湿度 とする。

$k_g \cdot a$ の値は (8) によって $d\omega/dt$ と H_2, H_1 と入口, 出口の熱風温度から求められる。これらの二・三の例について求めた結果, $k_g \cdot a=3.5 \times 10^3$, $k_g=3.27$ をえた。実験条件として $(d\omega/dt) = 0.02$, 層厚さ 300 mm , 温度 40°C , $(\Delta H)_m=4.28 \times 10^{-3}$ である。

拡散理論による検討

粉を均質均密な単一球と仮定すると、物質内における水分分布が位置と時間の関数として変化するときの水分拡散方程式は次式で示される。

$$(\partial c / \partial t) = D \Delta c \quad (9)$$

水分分布が半径の函数とすると次式となる。

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial r^2}$$

初期条件 $t=0$ にて $c=c_0$ 環界条件 $r=0$ にて $\left(\frac{\partial c}{\partial t}\right)_{r=0} = 0$, $r=a$ にて $c=0$

記 号 r : 半径方向の距離 a : 球の半径 t : 時間

以上の条件を入れ、球全体の平均自由水分値を c_m とすると、この偏微分方程式の解は次式となる。

$$-\frac{c_m}{c} = 1 - \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} e^{-\frac{Dn^2\pi^2 t}{a^2}} \quad (10)$$

これは Newman の式とされ、久郷・向井田らもこの式から籾の拡散係数を実験的に解明している。ところが反転通気乾燥では、久郷・向井田らの式は直接使用出来ない。そこで著者の実験の平均値的値の計算を行なった結果、 $t=36^\circ\text{C}$ 、 $G=788\text{ kg/m}^2\cdot\text{hr}$ 、 $L=300\text{ mm}$ とすると (10) 式

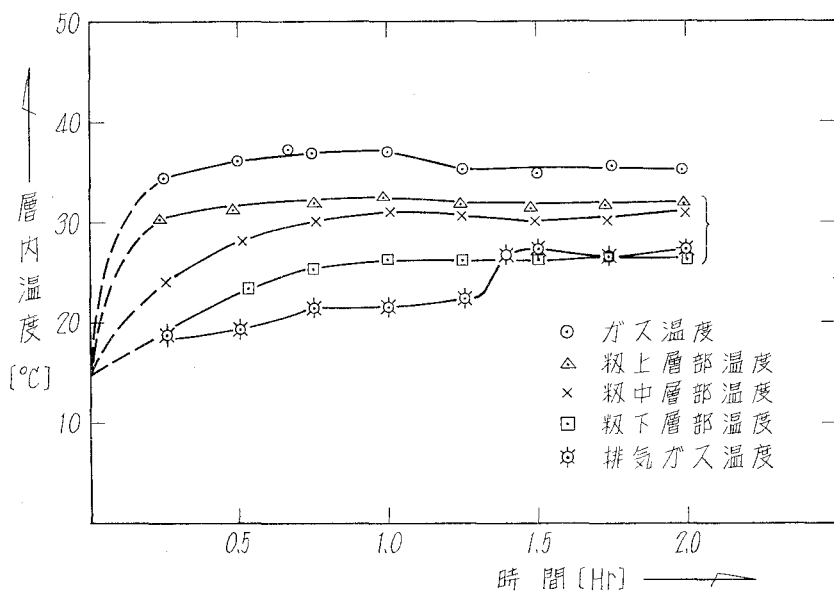


図-7 層内温度変化状態実測値

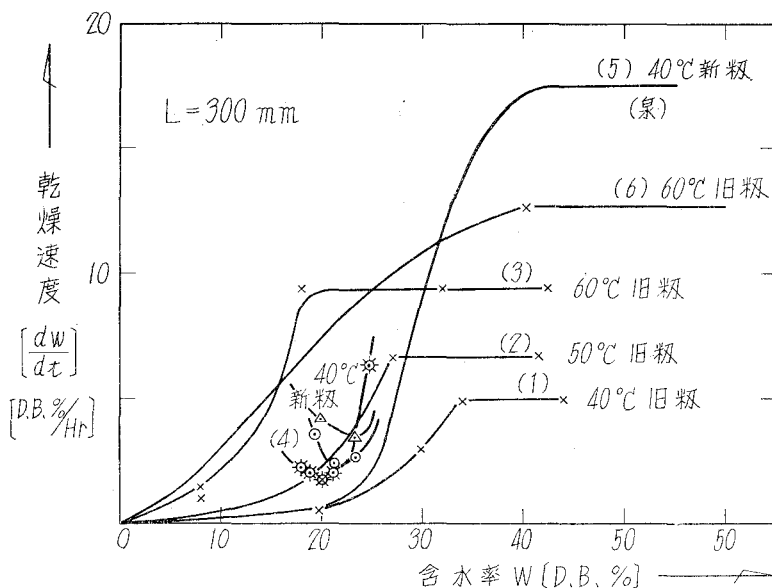


図-8 籾の乾燥速度特性曲線

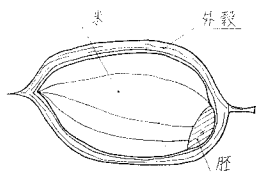


図-9 籾

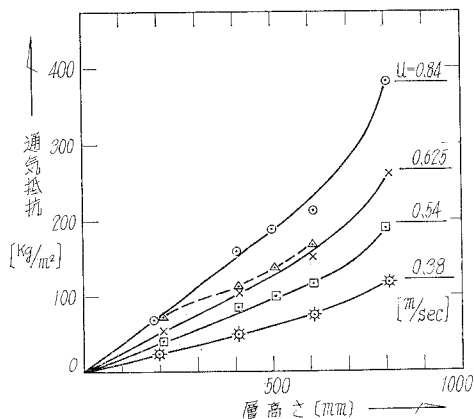


図-10 通気抵抗層高さ

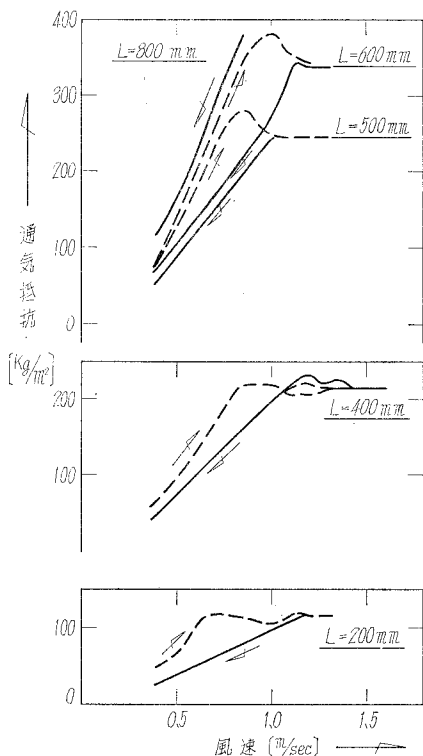


図-11 籾層通気抵抗

から $D_m=3.9 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{hr}$ をえた。実用器において $D=4.0 \times 10^{-8}$ 附近に拡散係数の範囲が存在することが明らかとなった。しかし正確には三次元の偏微分方程式から求めるべきもので、厳密解について今後の課題とする。今回は今まで不明であった値がオーダ的に求まった点で検討を終える。

5. 通気抵抗

図-2 に示した装置によって、流速をパラメータとし、通気抵抗と層高さの関係を求めたものが図-10 である。 $L=600 \text{ mm}$ までは通気抵抗が層高さに比例していることが観察される。 L が 600 mm を超えると加速的に通気抵抗が増加する。層高さをパラメータとして通気抵抗と流速の関係を求めると図-11 に示すごとくなる。点線は固定層を持ち上げる方向に流速をかえたときの通気抵抗である。実線は流動域から逆に流速を下げて行く場合を示している。実験の結果 L が 800 mm まではいずれの層の場合でも流速 1.3 m/sec 以上になると通気抵抗が一定値を示している。流動開始

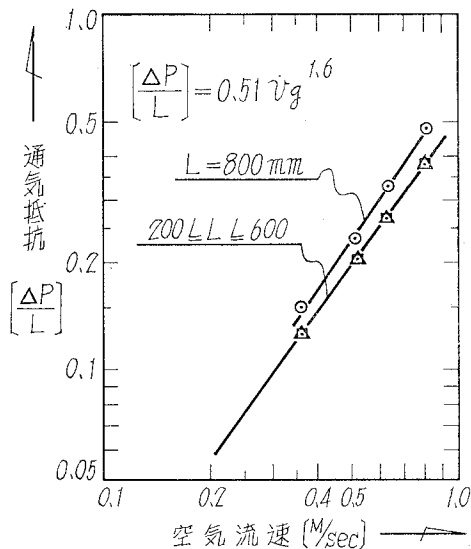


図-12 籾層通気抵抗

域直前から輸送域の初期までに、バブリング、チャンネリングの現象が観察され、この部分では通気抵抗は変動が激しくなるが、籾の場合その変動範囲が狭く比較的安定の流動層を形成した。通気抵抗の実験式を求めるために 図-12 を用いると次式となり、

$$(\Delta P/L) = 0.51v_g^{1.6} \tag{11}$$

層厚さの範囲は $200 < L < 600$ mm とする。 $L=800$ mm では

$$(\Delta P/L) = 0.64v_g^{1.55} \tag{12}$$

なる式をえた。

記号： ΔP ： [mmAq] 水柱通気抵抗 L ： [mm] 層厚 v_g ： [m/sec] 流速

一般に通気抵抗 $[\Delta P/L]$ は v_g^2 に比例するとされているが、この傾向は、籾の層が厚くなるに従って2乗に近づくものと考察される。層の薄い場合については v_g の2乗より小さい指数である。久郷・向井田らは1.34乗に比例するとし $(\Delta P/L) = (5.5 \times 10^{-5}) G^{1.35}$ 、 G ：質量速度となっている。

(11), (12) 式を用いて通気抵抗を決定する場合 10~20% 大きく取る必要がある。これは流動域から逆に流速を下げ的方向に向って通気抵抗を測定したからである。

6. 乾燥効率

乾燥効率の実験結果は 図-13 に示した。これによると反転通気乾燥において熱風温度と乾燥効率の関係は顕著である。しかし熱風温度を上げると逆に発芽力、胴割れなどに悪影響があるので、この種の乾燥器では実用的に 35~40°C の熱風を使用するのが理想的であり効率も 40% 前後ならば、通気乾燥器としても優れた部に入る。乾燥効率の表現は次式によった。

$$\eta = \frac{W_0(\omega_1 - \omega_2)}{G_0(H_s - H_0) \cdot t} \tag{13}$$

記号： W_0 ： [kg/回] 原料供給量，乾量基準

ω_1, ω_2 ： [D.B. %] 原料，製品の含水率

G_0 ： [kg/hr] 熱風重量，乾量基準

H_s ： [kgH₂O/kg Dry Air] 熱風の理論的飽和湿度

H_0 ： [kgH₂O/kg Dry Air] 熱風の初期湿度

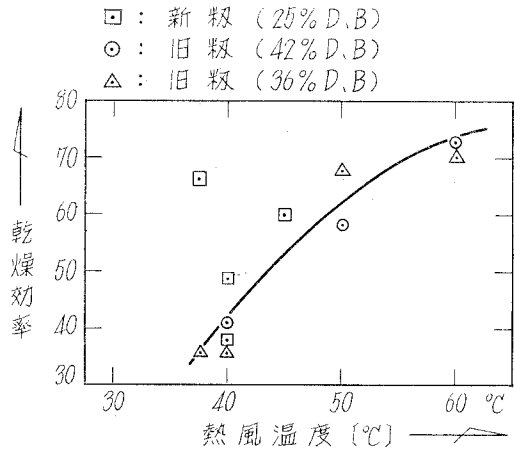


図-13 乾燥効率

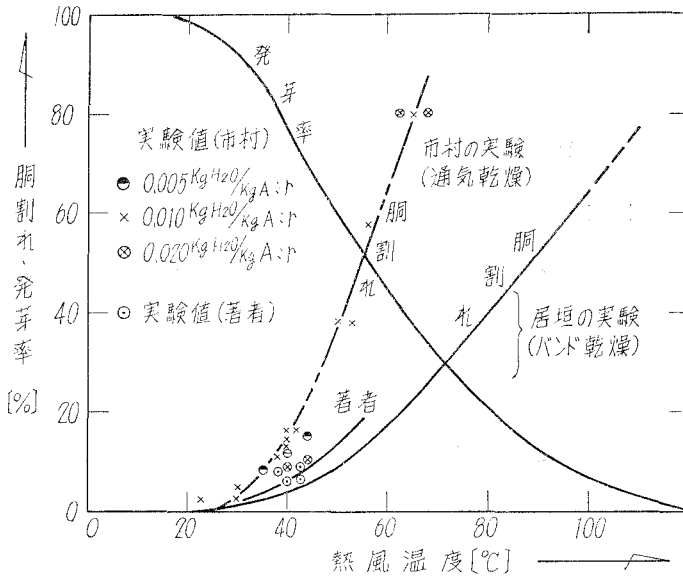


図-14 胴割れ・発芽率と乾燥の影響

7. 発芽力・胴割れ・臭気・着色・味の変化

乾燥製品が種籾に使用される場合発芽力が重要となって来る。これについて図-14に市村らの研究を参考にした、同時に米の等級を決定する胴割れ率について市村ら・居垣らの研究を合せて示した。これによると著者の結果は胴割れ率については居垣らの研究に一致し、40°C以下の反転通気乾燥は、胴割れ率も低く等級の低下なき良好の結果であった。

着色・臭気・味の変化を数式で表現出来ないが20数人に食味試験を行なった結果、自然乾燥米との区別が付かないことが確認された。この項は食品であるので特に考慮加えた。

8. 乾燥速度におよぼす層厚さの影響

図-15に示すごとく、2 cmの層は渡辺・清水ら、5 cm、20 cmの層は、久郷・向井田ら30 cmの層は著者の実験値で乾燥条件がおのおのそろった部分を取ったもので、層がある程度以上厚

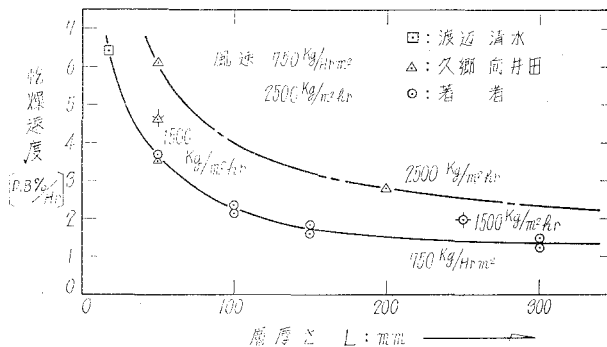


図-15 層厚さと乾燥速度曲線

くなると、空気の持ち出す蒸気量が限界値に近づくために乾燥速度そのものにおよぼす層厚さの影響は小さくなるが、逆に厚い層になるほど乾燥むらが大きく開くと考えられる。反転通気乾燥の場合もあまり層が厚くなると全体は平均的に恒率乾燥となってしまう、反転の効果は薄くなって来る。

反転の効果は減率乾燥において乾燥むらを利用して逆に拡散係数を大きくする事により、乾燥速度を早め同時に乾燥むらを取り除くときに大きく現われるのである。

VI. 結 論

穀の反転通気乾燥器によって層厚さの比較的厚い場合の乾燥機構を実用装置によって実験的に検討した結果次のことが明らかとなった。

1. 薄い層の穀の通気乾燥特性は減率一・二段であった。
2. 層が厚くなると、一方通気では、恒率・減率の乾燥特性を示すが、反転通気(1回切換)によって、減率二段の所で平均的に恒率乾燥に近似して解ける。この場合の誤差も小さく、推算値と実験値は良く一致している。
3. 2.の仮定範囲において伝熱係数 $h \cdot a = 470$ 付近にあった。
4. 物質移動係数 $k_p = 3.27$, $k_p \cdot a = 3.5 \times 10^3$ この近くのオーダーに存在することが明らかとなった(但しここでは $L = 300$ mm, 熱風温度 36°C とする)。
5. 通気抵抗の実験式は(11), (12)式で表わされる。これは流動域から逆に流速を下げた測定したもので、実用上は10~20%大きな通気抵抗が初期に存在する。
6. 発芽力・胴割れ・味の変化・着色について製品をそこなわない条件は熱風温度 $35 \sim 40^\circ\text{C}$ とし、燃料は燃焼ガスに着色または臭気の発生しないものが良く、風量の調整の点で液体またはガス体がよく、固体燃料は熱風温度調整・風量調整に困難で好ましくない。

今後の研究計画として、楕円体二重殻の拡散ならびに伝熱の理論解析と実験検討および各種物質への理論の応用と、これに関連する反転通気乾燥過程の理論解析を検討したい。

終りに御指導賜りました、東北大学 前田四郎教授、大谷茂盛教授に甚大なる謝意を表します。日頃御助言などいただき、また機器の貸与下さいました本学機械工学科の諸先生に厚くお礼申し上げます。また有力なる助言を賜った、千谷茂教授・水野忠治教授に敬意を表します。

(昭和40年6月 日本機械学会盛岡地方講演会発表)

(昭和41年4月30日受理)

文 献

- 1) 市村・中山：農電研究所報, **2** (昭36), 136.
- 2) 渡辺・清水：農業機械学会誌, **10**, 4.
- 3) 渡辺・清水：農業機械学会誌, **34**, 12.
- 4) 泉：日本機械学会誌, **17**, 1.
- 5) 居垣：農業機械学会誌, **17**, 1.
- 6) 久郷・向井田・渡辺：北大工研報, 35 (1964).
- 7) 桐栄・平岡：化学工学, **22**, 5 (271), (1958).
- 8) 桐栄・平岡ら：化学工学, **30**, 4 (329), (1966).