



# HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	穀類の通気乾燥 : 通気乾燥機的设计資料
Author(s)	久郷, 昌夫; Kugo, Masao; 向井田, 健一 他
Citation	北海道大學工學部研究報告, 35, 83-106
Issue Date	1964-06-30
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/40752">https://hdl.handle.net/2115/40752</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	35_83-106.pdf



# 穀類の通気乾燥

——通気乾燥機的设计資料——

久郷昌夫  
向井田健一  
渡辺昇

## A Calculation of Drying Rate of Some Grains for Through-Dryer

Masao KUGO  
Kenichi MUKAIDA  
Noboru WATANABE

### Abstract

Drying rates of some grains, such as unhulled rice, Taisho-Kintoki and wheat, were measured with a small batch through-dryer. According to the Newman's Equation the results were analysed as the rate controlling step of moisture-transfer being the diffusion process in solid. Because of a large dependency of diffusion coefficients calculated by the equation upon the air velocity, it seems to be true that the resistance of moisture-transfer consisted of not only that in the solid, but also one of the outside. It was probable, however, to eliminate the resistance at the outside by increasing the air velocity, then the diffusion coefficient of moisture-transfer in unhulled rice was obtained by extrapolating the value of apparent coefficient from the equation up to the infinite of air velocity. By postulating dependences of the apparent coefficient upon temperature, air velocity and depth of dryer-bed, a equation (eq. 6) was obtained to illustrate the drying curve of unhulled rice which might be useful to design any through-dryers of unhulled rice.

The apparent diffusion coefficients for Taisho Kintoki at 10 cm. of the depth of bed were obtained as  $1.62 \times 10^{-7}$  at  $40^{\circ}\text{C}$  and  $3.24 \times 10^{-7}$  at  $60^{\circ}\text{C}$ , respectively.

The coefficients for wheat at 12.5 cm. of the depth were  $1.44 \times 10^{-7}$  at  $40^{\circ}\text{C}$  and  $4.68 \times 10^{-7}$  at  $60^{\circ}\text{C}$ .

The pressure drop of air through the bed was measured to obtain relations of the drop to the air velocity as well as the depth of bed as shown by eq. (8) to (10).

### 1. 緒 論

工業に於ける乾燥操作の占める役割は極めて重要である。いかなる工業をとってみても、その工程に乾燥部門が含まれないものはないと云ってもよい。乾燥の対象となる原料物質も非常に広範囲に亘り、多種多様である。そして乾燥装置や操作も、それぞれの対象原料に最適の

ものが選定されなければならない。即ち、対象物質の物理的性質や化学的性質、製品の品質面から考えて、充分適応出来る装置を設計し、最適操作条件で、能率良く乾燥することが要求される。

本報においては、乾燥の対象物として、農産物の粃、小麦、大正金時等を取扱った。近年、農業の近代化が進められ、多方面から、農法に対して検討が加えられている。農産物収穫後の処理過程中、乾燥の役割は、すこぶる大きい。即ち貯蔵中の腐敗防止の上から充分乾燥されることが要求される。又、コンバイン刈取り一乾燥一脱穀という連続機械化による能率向上等は、特に悪天候の多い短かい収穫期を持つ地域においては、今後の進むべき必然的方向と考えられ、その面で機械乾燥は農業近代化の鍵を握っているといっても過言ではない。このような状況下において、本研究の意義を見出したのであるが、何分にも対象が食品であるため、いろいろな制約が加わってくる。例えば、製品の胴割れ、香り、又は外観の損傷、発芽性などである。

本報では、このような、胴割れの原因、発芽性などと乾燥条件との関連性については深く追及せず、おおよその限界を知り、その限界内で、乾燥装置設計に必要な乾燥速度を測定し、考察を試みた。

元来、穀物には、含水率のそれほど大きなものはなく、本実験での乾燥条件では、減率乾燥期間である。このように低含水率で減率乾燥期間にある穀物に対して得られた基礎資料について報告する。

## 2. 実験方法とその結果

本研究における方法は穀類の乾燥装置としてその型式はともあれ、通気方式が最も能率的であり経済的であると予測されたので、一応上向気流での通気乾燥方式で基礎実験を行なうこととした。

### 2.1 実験装置

実験装置のフローシート、Fig. 1 (a) に示す通り、円筒型通気乾燥筒と1 $\frac{1}{4}$ " ガス管製空気加熱器、ロータリーブロワー (0.5 m<sup>3</sup>/min)、レザerver、流量計から成っている。乾燥筒はFig. 1 (b) に示す通り底面に金網を張った二重円筒 (スリ合せ) で、層高 30 cm まで変えられる様になっている。内筒の直径は 14 cm で、通気断面は 154 cm<sup>2</sup> である。外筒には保温のためのアスベスト板が巻いてある。加熱器は 1 $\frac{1}{4}$ " ガス管内に二重に磁製管を通し、その間に容量 100 V、1 kW のニクロム線を巻き込んである。空気温度の測定は、水銀棒状温度計により、図の如く、4箇所できり、Th-2 を入口空気温度、Th-4 を出口空気温度の測定にあてた。又材料層中間に金網一枚をはさみ、その面まで Th-3 を埋めこみ、層中央部での空気温度を測定した。Th-1 は空気加熱温度調節用である。このような温度測定法によって、層の入口、出口、内部での各ガス温度を測定した。実例を諸条件に対して Fig. 2 に示す。通気量が 2500 [kg/hr·m<sup>2</sup>] の場合には、

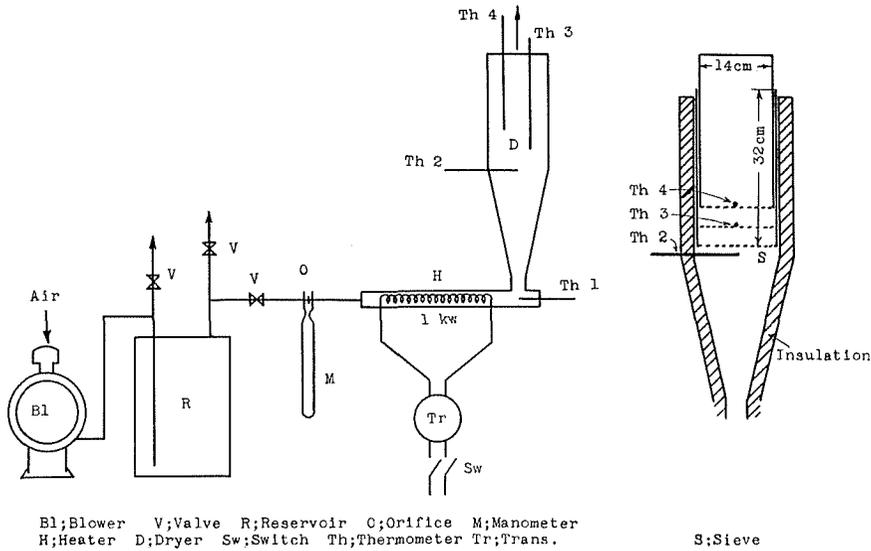


Fig. 1 (a). Experimental apparatus

Fig. 1 (b). Dryer

層内部ガス温度は約 10 分で入口ガス温度と等しくなる。通気量が, 1000, 1500 [kg/hr·m<sup>2</sup>] 程度の低い場合は, 約 20 分を要し, 500 [kg/hr·m] に下ると一定温度になるには, 30~40 分を要する。この際, 同一温度計で測定しても, 入口ガス温度の温度計指示が, 壁に対する輻射熱損失や充填層内のガス線速度に比べて入口線速度が小さい為若干低く出ることがわかった。又, 乾燥筒半径方向の温度分布についても検討した結果, 層入口までは, 空気は層流をなしており, 温度分布は放物線状であった。平均流速域での温度は, 筒軸部の温度より 1°~°C 低い。又層内部, 層出口における温度分布は, 殆んど均一とみなせることがわかった。

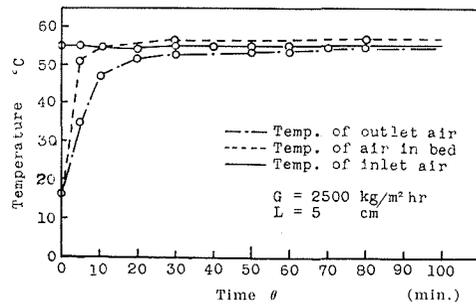
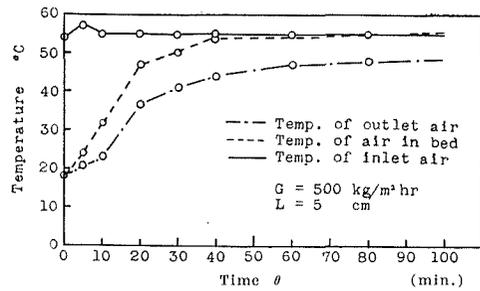


Fig. 2. Temperature of air

通気の湿度は, ブロワー空気取入口附近での大気湿度の測定から求めた。

2.2 実験試料と乾燥条件

実験試料は, 粳, その他大正金時, 小麦が用いられ, それらの通気乾燥速度曲線を得ると同時に, 製品の品質に対する検討も行った。粳の乾燥条件は, 温度 40°~55°C, 層高 5~25 cm, 通気質量速度 500~2500 [kg-air/hr·m<sup>2</sup>] である。一方, 空気湿度は 0.005~0.008 [kg-water/kg-

dry air] であり、この程度の変動では乾燥速度への影響が省略し得る位に小さいことが実験的に確かめられたので、乾燥速度の解析の要因から省いた。

また、小麦、大正金時の実験条件は、小麦では、空気温度 40°~70°C、層高 12.5~25 cm、通気量 2500, 2000 [kg/hrm<sup>2</sup>]、大正金時では 35°~50°C、10~20 cm、2500~1500 [kg/hr·m<sup>2</sup>] とし、それぞれ乾燥時間は 100 分間とした。

### 2.3 実験方法

最初、湿潤材料を乾燥装置内筒に所定の層高に充填する。温度計 Th-3, Th-4 も内筒に取付け、最初の重量を測定する。重量測定には上皿天秤を用い、±0.5 g の精度で測定された。原料含水率は、Kett の赤外線水分計\* によるか、キシレン蒸留法によって、湿潤基準の水分を計り、これを乾量基準の含水率に換算した。一方、乾燥装置は、予め加熱器で加熱した所定の質量速度の空気を通じながら、長時間一定温度に温められる。さき充填した内筒を外筒に差し込み、実験開始時間とする。その後 10 分毎に円筒を引き出して、重量を計り乾燥による重量減少量を知り、最初の含水率を基準にして、各時間毎の層全体にわたる総括含水率を算出する。層が薄いほど層厚さ方向の水分分布が一様となるから、一粒毎の乾燥速度、即ち真の乾燥速度に近づく。しかし本実験では、層をうすくし過ぎるとガスチャンネリングが生じ、又内筒重量に比べて試料の量が少なすぎると重量減少量測定の精度が落ちるので、最低の層高を 5 cm とした。実験温度については、従来より、経験的に粳の場合は、38°C が品質をいためない温度とされていたことから、常温から最高 55°C までとした。

### 2.4 実験結果

粳、大正金時、小麦の乾燥実験結果は、夫々 Table 1, 2, 3 に示した。Table 1 では、粳の初期含水率が 0.243 [kg-water/kg-dry stock] のものに対して、層高 5 cm、温度 40, 45, 50, 55°C、通気量 2500, 2000, 1500, 1000, 500 [kg/m<sup>2</sup>·hr] の各条件での実験結果を示した。これを図示したのが、Fig. 3 (a)~(e) である。これは、時間に対して含水率 [kg-water/kg-dry stock] を点綴したもので、通気温度によって、かなり乾燥速度が変化することがわかる。またこれらの実験の

Table 1. Results for unhulled rice

Inlet air temp. (°C)	Inlet air humid. (kg/kg)	Dep. of bed (cm)	Mass vel. of air (kg/m <sup>2</sup> ·hr)	Moist. content of materials (γg/kg·10 <sup>2</sup> )							
				Time of drying (min.)							
				0	10	20	30	40	60	80	100
40	0.006	5	2500	24.3	21.0	19.9	19.0	18.6	17.5	16.6	15.7
	0.007		2000	24.3	21.7	20.8	20.1	19.6	18.9	17.4	16.8
	0.005		1500	24.3	22.2	21.3	20.3	19.9	19.1	18.7	17.7
	0.006		1000	24.3	22.2	21.5	20.7	20.2	19.3	18.0	17.6
	0.007		500	24.3	22.8	22.2	20.9	20.6	19.6	18.6	17.7

\* ケット科学研究所製、F-1 型。

Inlet air temp. (°C)	Inlet air humid. (kg/kg)	Dep. of bed (cm)	Mass vel. of air (kg/m <sup>2</sup> ·hr)	Moist. content of materials (kg/kg·10 <sup>2</sup> )							
				Time of drying (min.)							
				0	10	20	30	40	60	80	100
45	0.008	5	2500	24.3	20.9	19.5	18.7	17.8	16.2	15.2	14.3
	0.006		2000	24.3	21.5	20.3	19.4	18.9	17.5	15.7	
	0.005		1500	24.3	21.5	20.3	19.6	18.8	17.7	16.7	15.8
	0.007		1000	24.3	22.0	20.9	20.1	19.7	18.3	16.9	
50	0.008	5	2500	24.3	20.2	18.4	17.6	16.5	15.0	13.5	12.4
	0.005	5	2000	24.3	20.7	19.5	18.6	17.7	16.2	14.7	13.8
	0.005	1500	24.3	21.3	20.0	19.0	18.1	16.7	15.3	14.4	
	0.008	1000	24.3	21.9	20.0	19.2	18.6	17.1	16.0	15.0	
55	0.007	5	2500	24.3	19.6	18.1	16.7	15.3	13.5	12.1	10.8
	0.005		2000	24.3	20.7	19.2	17.9	16.6	14.6	13.3	12.3
	0.006		1500	24.3	20.5	19.2	18.0	16.9	15.1	13.6	12.6
	0.007		1000	24.3	21.5	19.9	18.5	17.7	16.2	14.7	14.0
	0.007		500	24.3	22.2	20.6	19.3	18.2	16.4	15.3	14.5

Table 2. Results for Taisho Kintoki

Inlet air temp. (°C)	Inlet air humid. (kg/kg)	Dep. of bed (cm)	Mass vel. of air (kg/m <sup>2</sup> ·hr)	Moist. content of materials (kg/kg·10 <sup>2</sup> )							
				Time of drying (min.)							
				0	10	20	30	40	60	80	100
35	0.015	10	1500	26.7	26.3	25.7	24.9	24.6	23.6	23.0	22.3
35	0.014	15	2500	17.7	17.4	17.0	16.6	16.2	15.7	15.2	
35	0.015	20	2500	26.7	26.0	25.6	25.0	24.6	23.7	22.9	22.2
40	0.016	10	2500	17.7	17.2	16.9	16.2	16.1	15.6	15.1	
40	0.014	10	2500	26.7	25.7	25.1	24.4	23.7	22.6	21.8	21.1
40	0.015	20	2500	26.7	26.2	25.4	24.7	24.2	23.0	22.1	21.3
50	0.017	10	2500	17.7	17.0	16.3	15.7	15.3	14.5	13.9	

Table 3. Results for wheat

Inlet air temp. (°C)	Inlet air humid. (kg/kg)	Dep. of bed (cm)	Mass vel. of air (kg/m <sup>2</sup> ·hr)	Moisture of material (kg/kg·10 <sup>2</sup> )							
				Time of drying (min.)							
				0	10	20	30	40	60	80	100
40	0.011	12.5	2500	20.6	19.4	18.3	17.3	16.5	15.2	14.1	13.1
60	0.012	12.5	2500	21.6	18.5	15.8	13.8	12.3	10.0	8.7	7.5
70	0.006	25.0	2500	25.0	23.7	22.12	20.2	18.6	16.0	13.8	
70	0.005	25.0	2500	25.0	24.1	22.4	20.8	19.4	16.5	14.4	

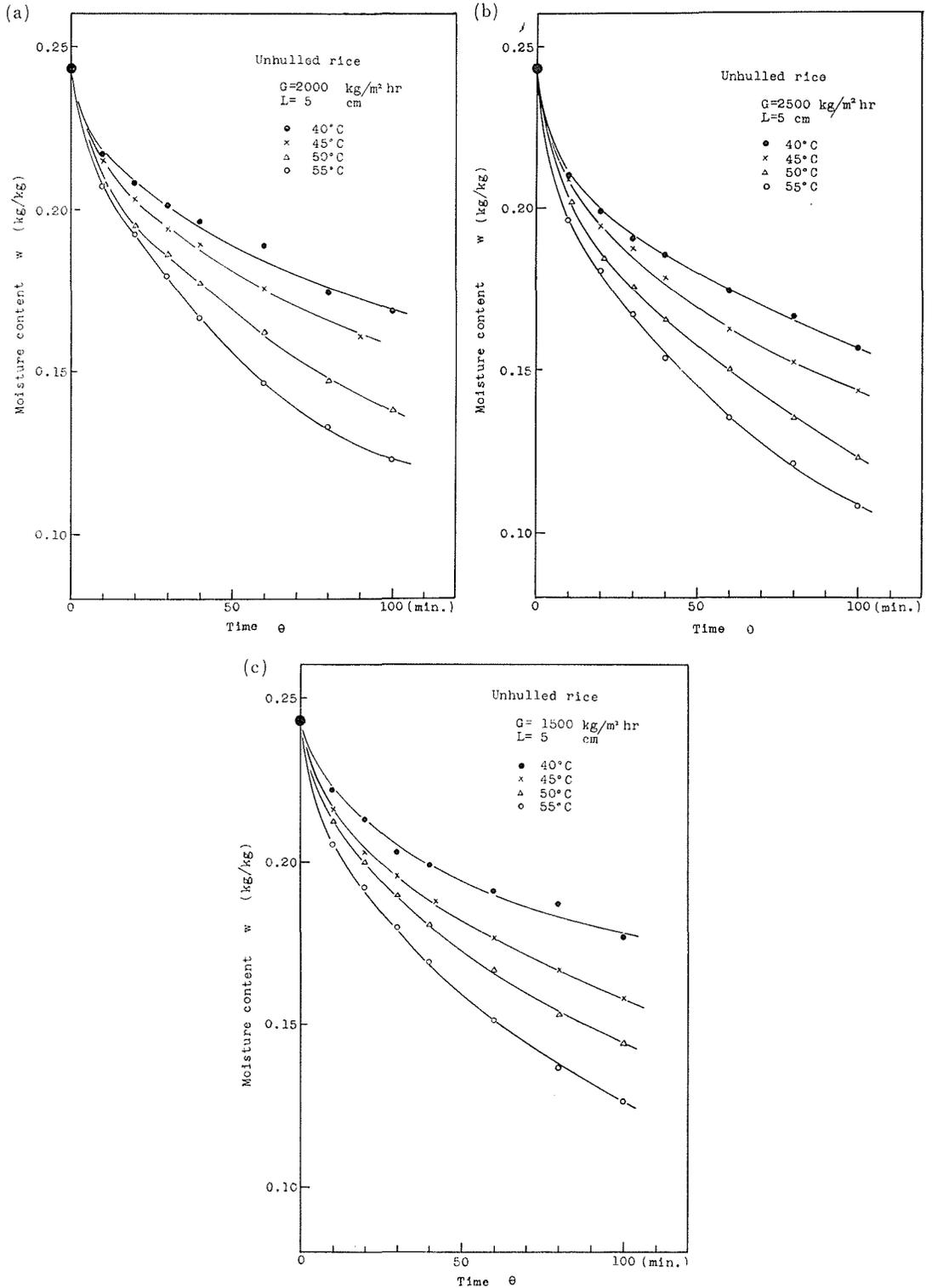


Fig. 3 (a~c) Drying curves

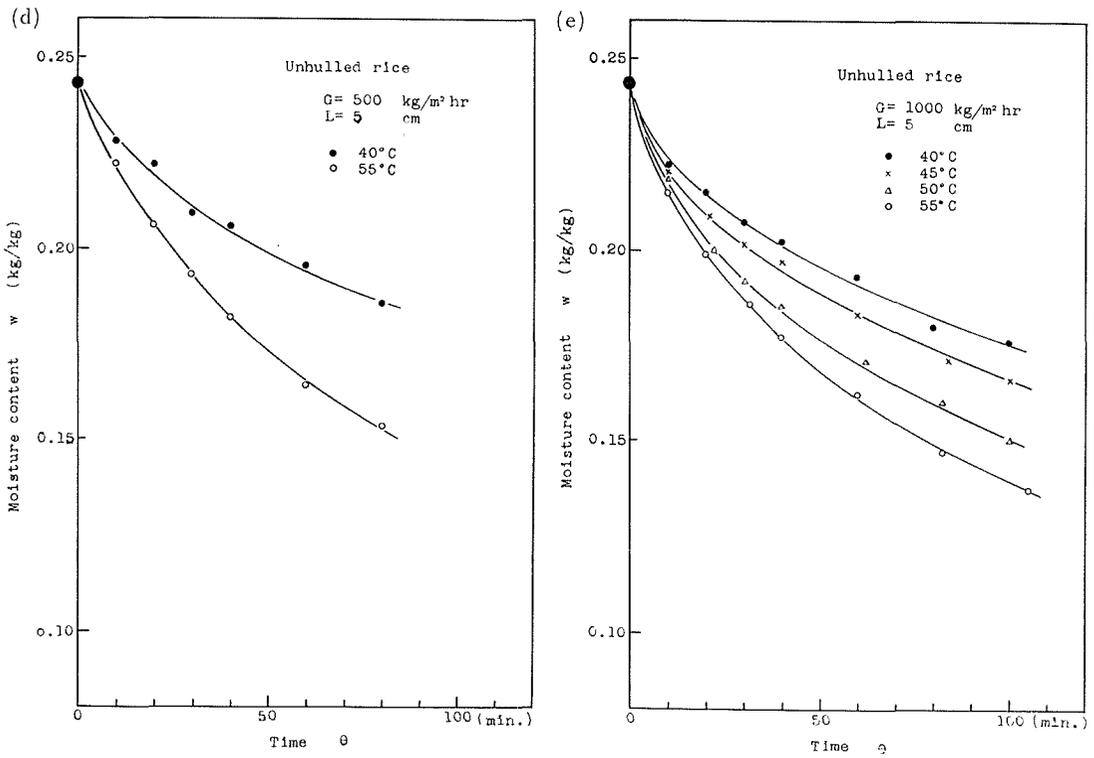


Fig. 3. (d~e) Drying curves

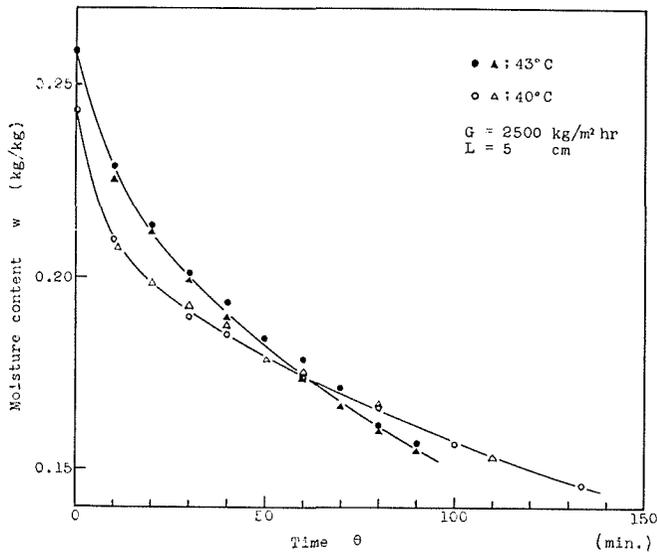
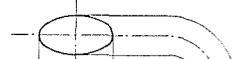
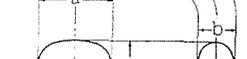
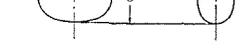


Fig. 4. Reproducibility (drying of unhulled rice)

再現性を確かめるための実験として、同一条件にて同一試料を乾燥してえたのが、Fig. 4 である。即ち、40°C と 43°C の場合であるが、2 回の実験では、殆んど同一曲線にのるものとみなせる。実験に使用した穀類の形状、物性値は、Table 5 に示されている。

Table 5. Geometrical dimensions for grains

	Unhulled rice	Taisho Kintoki	Wheat
a*  (m)	$6.71 \times 10^{-3}$	$1.42 \times 10^{-2}$	$6.5 \times 10^{-3}$
b*  (m)	$2.38 \times 10^{-3}$	$7.08 \times 10^{-3}$	$2.93 \times 10^{-3}$
c*  (m)	$3.45 \times 10^{-3}$	$9.40 \times 10^{-3}$	$3.63 \times 10^{-3}$
equivalent diameter (m)	$3.80 \times 10^{-3}$	$9.83 \times 10^{-3}$	$4.10 \times 10^{-3}$
volume of particle (m <sup>3</sup> )	$1.74 \times 10^{-8}$	$4.95 \times 10^{-8}$	$3.62 \times 10^{-8}$
mass of particle (kg)	$2.84 \times 10^{-5}$	$6.95 \times 10^{-5}$	$4.69 \times 10^{-5}$

### 3. 結果に対する考察

従来、このような農産物の乾燥に対しては、かなり検討されてはいたが、食品としての品質問題も含めての総合的な見地から行なわれたものは少ないので、装置設計の資料となるものは殆どない。又、平衡含水率は通気の温度、湿度によって、同一材料においても、変化するのが当然である。本実験における通気湿度の影響は無視出来るので、湿度一定として、温度のみの関数として求めた。これを、他の報告された物質に対する値と共に図示したのが Fig. 5 である。同じ植物の間には、類似の温度依存性がみられる。

#### 3.1 籾の乾燥特性

Fig. 6 (a)~(e) は、Fig. 3 (a)~(e) において示した実験曲線 ( $w:t$ ) に基づいて、 $dw/dt:w$  曲線として点綴した乾燥速度曲線である。これによると、全実験域にわたり、恒率乾燥期間が現われていない。即ち、減率乾燥期間のみである。桐柴ら<sup>1),2)</sup>の結果においては、恒率乾燥速度は、例えば、初期含水率が、1.0~2.0 [kg-water/kg-dry stock] 程度のマユ、スフについては、

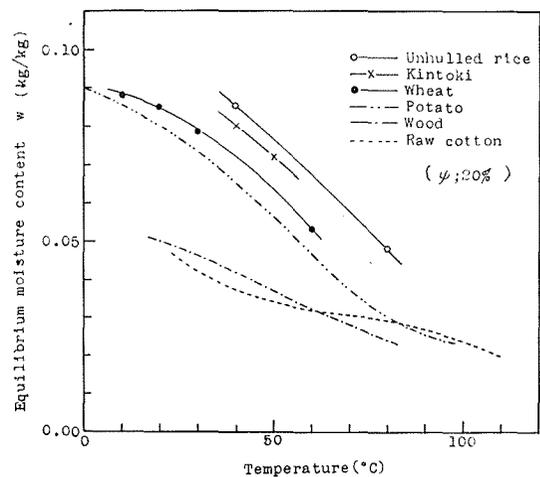


Fig. 5. Equilibrium moisture content

80~90 [kg-water/hr kg-dry-stock], 16~17 [kg-water/hr kg-dry stock] であり, 初期含水率が 3.5~4.5 [kg-water/kg-dry stock] のシリカゲル, カーボンブラック, 2.0 [kg-water/kg-dry stock] の炭酸マグネシウムについては, 夫々 8~12, 9~18, 7~9 [kg-water/hr kg-dry stock] と発表されている。木材や皮革などは初期含水率が比較的多く, 限界含水率は, 0.5~1.0 [kg-water/kg-dry stock] 程度とされている。従って初期含水率が 0.25 [kg-water/kg-dry stock] の粳では, 減率乾燥期間であることは当然と言えよう。

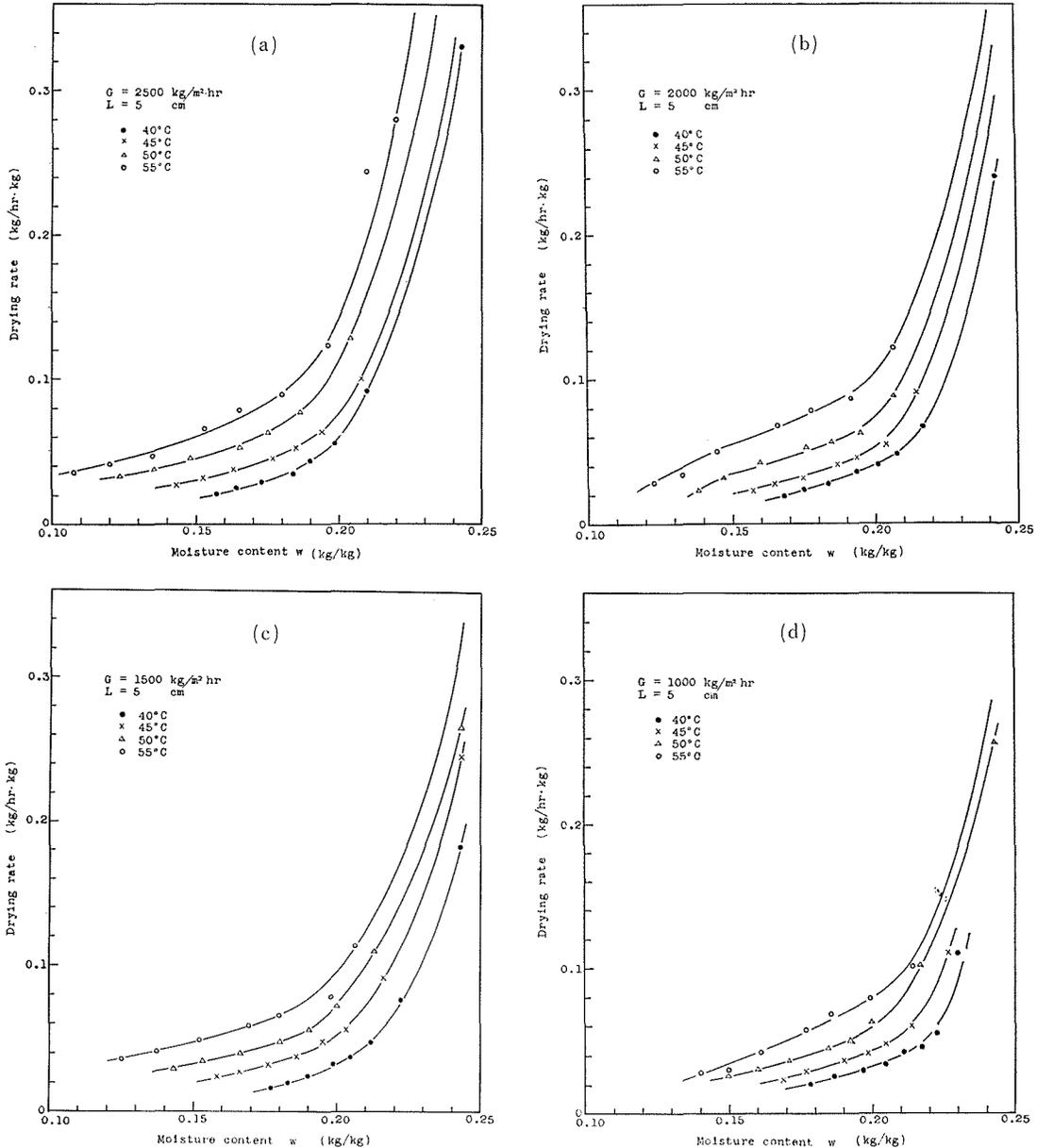


Fig 6 (a~d). Rate curve of drying

### 3.2 粉の乾燥機作

一般に、Fig. 6 の如く、下向きに凸な特性曲線を有する材料は、例えば石鹼<sup>3)</sup> などのように緻密な固体の乾燥では内部水分の拡散移動が律速段階になる場合が多い。この減率期間では、表面への水分移動は内部の水分勾配によって起るものとされている。即ち、Fick の法則に従って水分移動が起ると考えられる場合は、板状材料、球状材料について、初期水分分布が内部で均一な場合について一般解がある。今、ここでは、球状材料に対する初期水分分布が均一の場合の式(1)を用いて、実験結果からこのモデ

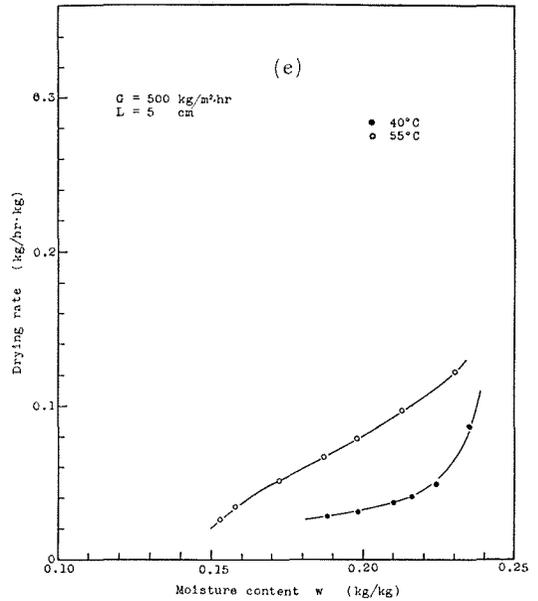


Fig. 6 (e). Rate curve of drying

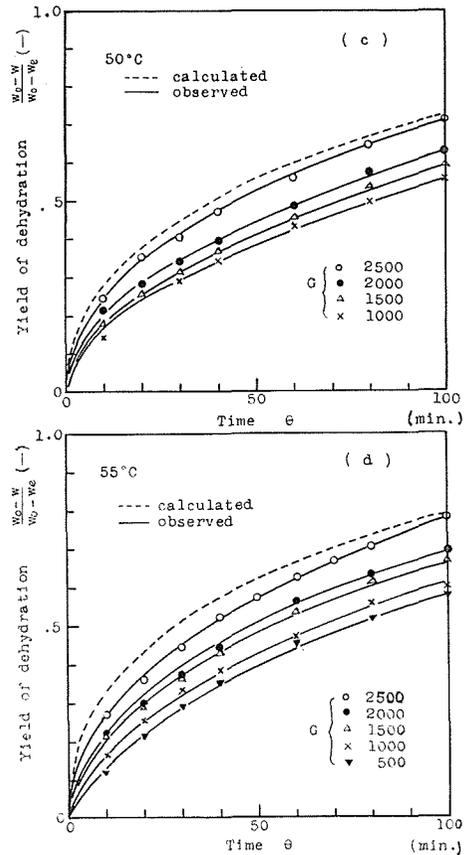
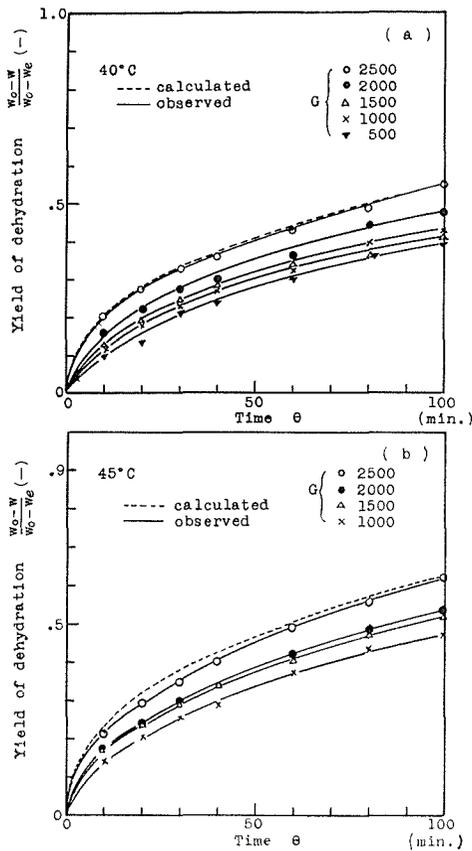


Fig. 7. Dehydration curves calculated and observed

ルの適否を検討する。

$$\frac{w_0 - w}{w_0 - w_c} = 1 - \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \cdot e^{-\frac{4n^2\pi^2 D\theta}{a^2}} \quad (1)$$

式(1)は、Newmanの式<sup>4)</sup>として知られている。左辺を実験結果より求め、時間 $\theta$ に対して記し、一方これらの点群を最も良く表わす拡散係数 $D$ を答試法によって求め、同一図にかくとFig. 7 (a)~(d)となる。この図では、乾燥初期において特に、式(1)からの値が実測値よりやや大きく出ている。そこで、各時間毎に実験値より求めた左辺が式(1)の右辺を満足する拡散係数 $D$ を逆算し、時間との関係を求めてみた(Fig. 8)。これによる拡散係数は初期には小さく、時間とともに増大し一定値に近づく傾向が認められる。これは固体内温度の上昇にともなう増大と考えられる。即ち粒外表面から内部への熱拡散による温度勾配の経時変化による変動と一致するものと思われる。なおその外、乾燥初期では粒外表面温度と内部温度との差が大きく、それに基づく熱拡散の負の効果も一応考えられる。従って拡散係数としては一定値を示した時のものがその温度における値としてとることとした。

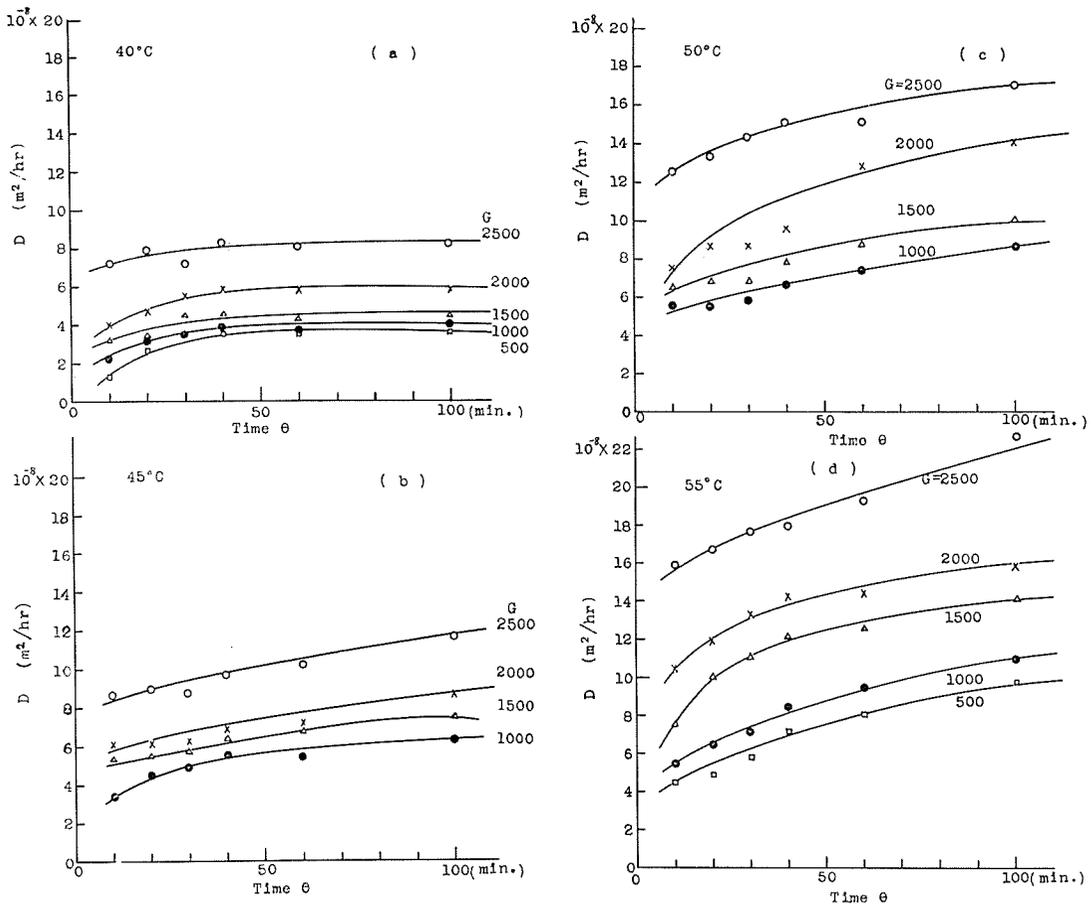


Fig. 8. Variation of diffusion coefficient based upon drying time

Fig. 8 (a)~(d) のいずれも、拡散係が空気数質量速度  $G$  によって著しく影響を受けていることが認められる。これは元来、固体内物質移動係数であるから、外部条件によって影響を受けないはずのものであるのに、かく影響を受けることは結局固体表面水分濃度の影響がこの頃に含まれて来ているためであろう。(Newman モデルの (1) 式の境界条件と異なるため)。今固体表面水分濃度が常に一定になるような状態、即ち Newman モデルの (1) 式が厳密に適用出来る状態として  $G$  が無限大の場合を仮定する。即ち外部通気速度が著しく大きく  $Re$  数が無限大、つまり固体表面の水分移動が極めて速く、従って表面水分濃度が常に一定である状態を考える。そ

のため  $1/G$  と  $D$  との関係から  $D_{\infty}$  を求めたのが、Fig. 9 である。こうしてえられた  $D_{\infty}$  は、もはや温度のみの関数で、この  $D_{\infty}$  と温度の関係を求めると、次式がえられる。

$$D_{\infty} = 2.09 \times 10^{-11} \cdot t^{2.78} \quad [\text{m}^2/\text{hr}] \quad (2)$$

ここで得られた拡散係数はエゾマツ、ブナ等と同一オーダーの値で、ベルベット石鹼<sup>3)</sup>よりは数倍高い値を示しており、榎等の値としては妥当なものと考えられる。

さて  $G$  を無限大にして得られた  $D_{\infty}$  を (1) 式に代入すると高い乾燥率が得られ、実測値との差を各時間毎に求めると Fig. 10 (a)~(d) のような結果が得られる。この差は結局前述の如く表面水分が一定でない事のために表われるものであって、この差の表現方式としては水分移動に対する固体外抵抗とする方式も考えられるが、今回はこれらの Newman モデルからの差を全部拡散係数に帰せしめる方式をとることとした。従ってこの拡散係数を仮に複合拡散係数と名づけることとする。それは普通の意味の有効拡散係数とは異なるものであることが明らかなので別名を附することとしたのである。この方法によることとし、 $D'_{\infty} - D'_g$  の差を  $G$  について関係づけると Fig. 11 のような半対数目盛で直線となる。

従ってこれから次式が得られる。

$$\begin{aligned} D'_{\infty} - D'_g &= 3.6 \times 10^{-11} \cdot t^{2.62} \exp(-6.43 \times 10^{-5} \cdot G) \\ D'_g &= D'_{\infty} - 3.6 \times 10^{-11} \cdot t^{2.62} \exp(-6.43 \times 10^{-5} \cdot G) \end{aligned} \quad (3)$$

(3) 式中の  $D'_{\infty}$  に (2) 式を代入すると

$$D'_g = 2.09 \times 10^{-11} \cdot t^{2.78} - 3.6 \times 10^{-11} \cdot t^{2.62} \exp(-6.43 \times 10^{-5} \cdot G) \quad (4)$$

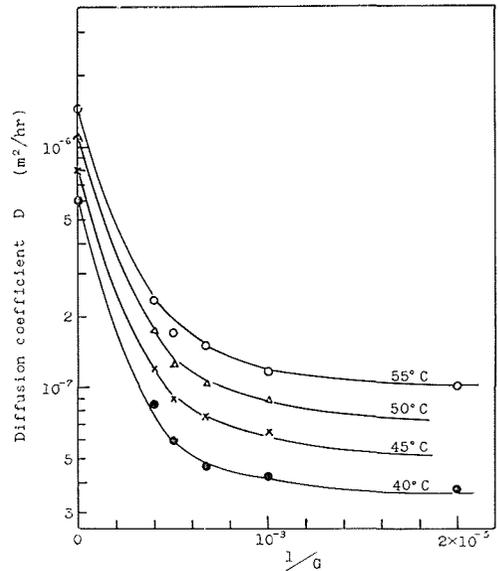


Fig. 9. Variation of diffusion coefficient accompanied with mass velocity

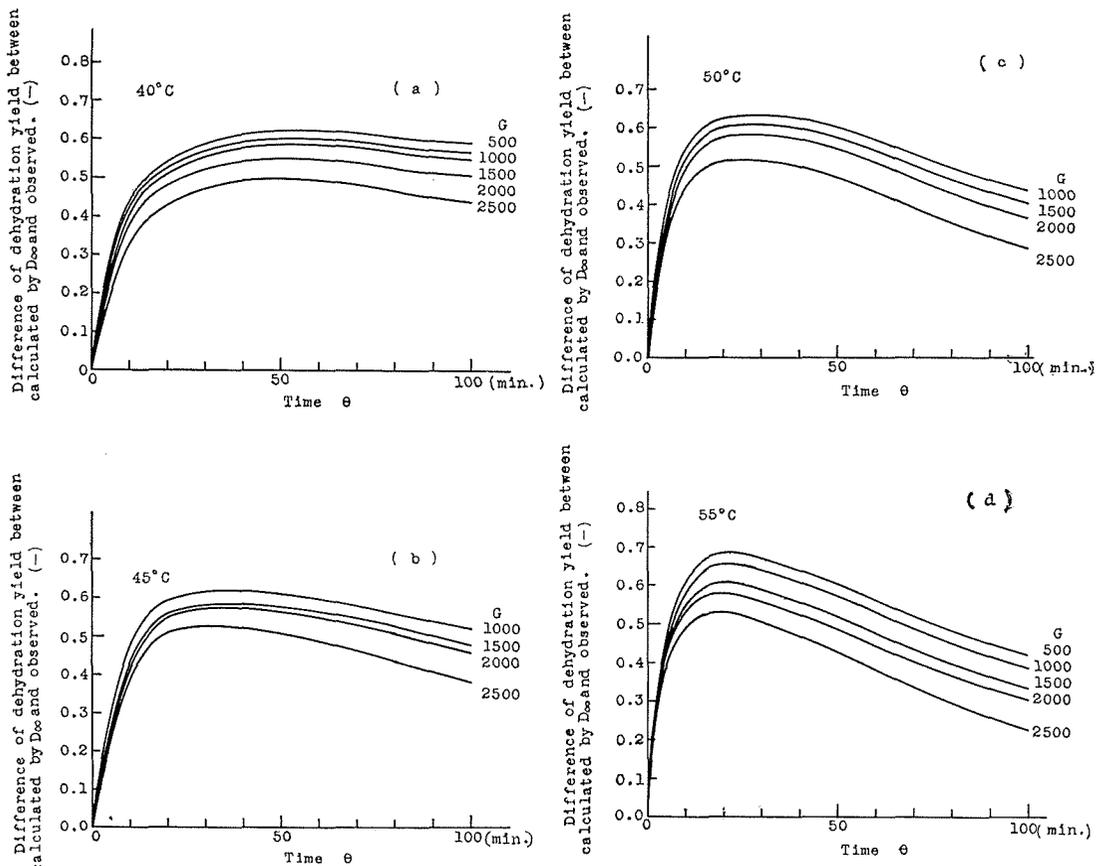


Fig. 10. Difference of dehydration yield between calculated by  $D_{\infty}$  and observed with time

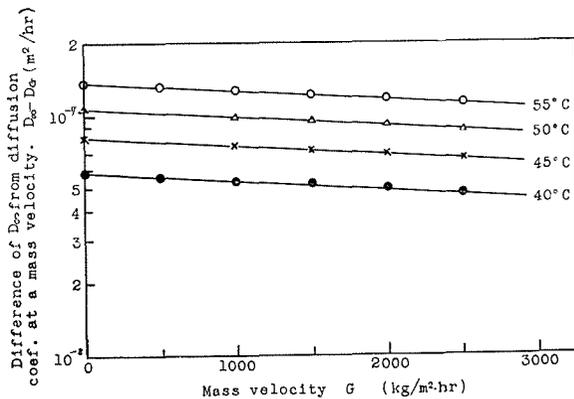


Fig. 11. Difference of  $D_{\infty}$  from Diffusion coef. ( $D_e$ ) at a arbitrary mass velocity

となり、複合拡散係数  $D_g'$  は、温度と通気量の関数で表わされたことになる。

この式では  $G$  が無限大の時に最も大きい拡散係数、即ち純粋に近い固体内拡散係数  $D_{\infty}'$  を示し、 $G$  が 0 の場合は最も小さい複合拡散係数  $D_0' = D_{\infty}' - 3.6 \times 10^{-11} \cdot t^{2.615}$  を与えることになる。つまり  $G$  が 0 の場合は固体内拡散の抵抗の外に固体外抵抗の影響を最も多く含む場合となる。

### 3.3 層高に対する関係

通気乾燥の如き装置の設計にあたっては、層高を如何にすべきかが、非常に重要な問題と

Table 4. Results of unhulled rice

Inlet air temp. (°C)	Inlet air humid. (kg/kg)	Dep. of bed (cm)	Mass vel. of air (kg/m <sup>2</sup> ·hr)	Moisture of material (kg/kg·10 <sup>2</sup> )								
				Time of drying (min.)								
				0	10	20	30	40	60	80	100	
40	0.007	5	2500	31.3	28.0	26.2	25.5	24.6	23.0	21.0	20.9	
				18.3	16.3	15.7	15.1	14.7	13.8	13.3		
				16.7	14.9	14.1	13.7	13.2	12.4	12.0		
				15.3	13.5	12.8	12.3	11.8	11.1	10.4		
40	0.004	5	2500	24.4	20.8	19.9	19.3	18.8	17.5	16.7	15.3	
		15		24.4	22.3	21.1	20.5	19.8	18.5	17.5	16.8	
		25		24.4	23.1	21.4	20.7	20.0	18.9	18.1	17.2	
55		15		24.4	21.5	19.0	18.3	17.0	16.1	14.4	13.2	

なる。従来の穀類乾燥装置としては、殆んどが、通気バンド型で、層高も 5~10 cm 程度のもので多く、処理量の増大をはかる立場からは、検討の要を感じさせていた。即ち、層を何倍かに厚くすることが出来れば、それだけ装置は小型化され、経済性にも大きく影響して来る。

Table 4 には、40°C の場合と 55°C の場合の結果を示したが、他の温度条件においても同様の傾向が得られるものと思われる。これらの結果を図示したのが Fig. 12 (a), (b) である。層が厚くなると装入原料全量に対する乾燥率、速度等は当然小さく現われてくるが、Fig. 12 (c) に示したように単位通気面積当りの水分蒸発速度は大きくなっている。即ち、層を

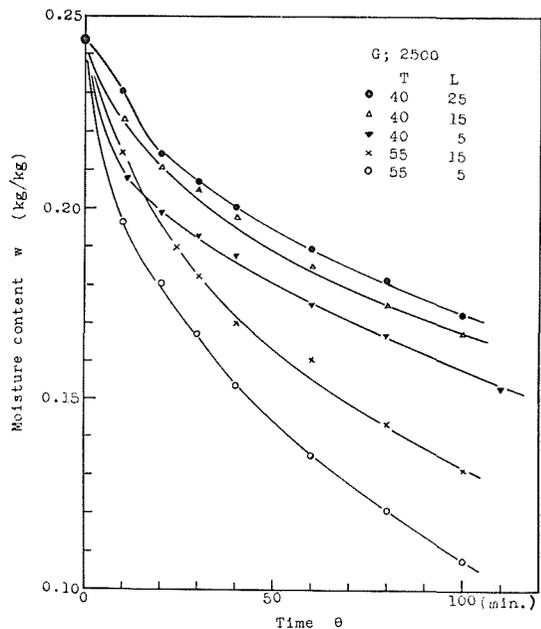


Fig. 12 (a). Variation of drying curves due to bed depth

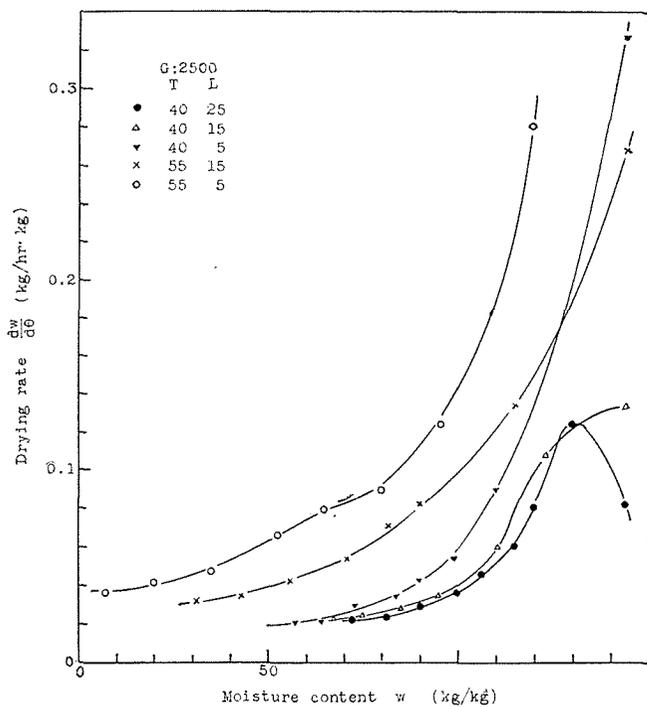
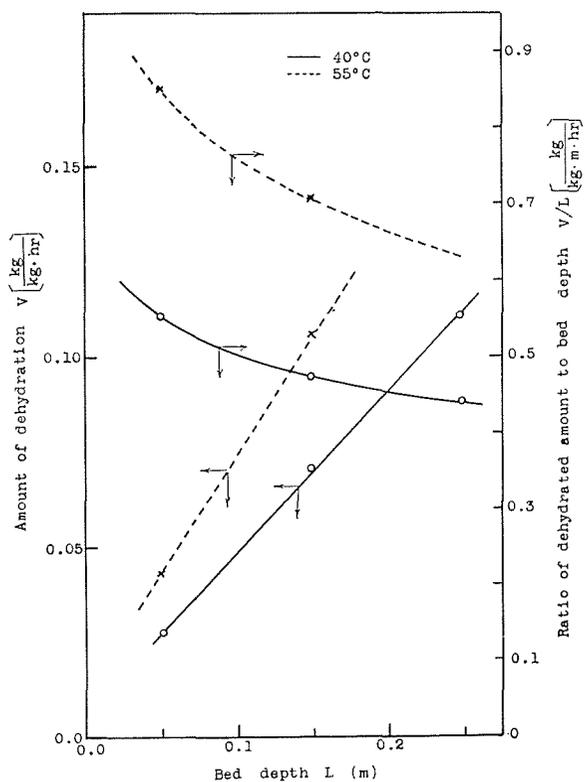


Fig. 12 (b). Variation of rate curves of drying due to bed depth

Fig. 12 (c). Relation of dehydrated amount to bed depth



厚くすることによって、乾燥能率がほぼ直線的に増大していることがわかる。この結果更に層高を増すことが出来る可能性があるが、あまり層高を厚くしすぎると乾燥むらを生じ易いので、むしろその面で制約を受けることとなる。

また前節(3)式で、複合拡散係数  $D_G'$  を求めたが、これは、前述のようにチャネリングをさける等の実験上の問題点からと、実用上 5 cm 以下の層高で通気乾燥を行なうことがないと予想されたので、5 cm 厚の場合のみをとって求めたものである。従って、層高 5 cm 以上の場合の複合拡散係数  $D_G'$  には、層高の項も当然入ってくるべきであり、これについて検討する。

Fig. 11 は層高 5 cm の場合についての  $(D_\infty' - D_G')$ :  $G$  の関係であるが、これに、 $L=0, 15, 25$  cm の場合の複合拡散係数を層高 5 cm の場合と同様に求め (Fig. 13), その結果から Fig. 14 が得られる。すなわち  $G$  が無限大の場合はこの  $D_\infty' - D_G'$  の値は 0 になるので、層高  $L$  に関するこれら直線は、全て平行線で表わされるはずである。これらの関係をまとめると(4)式で示された関係に更に  $L$  の影響を加味した、より一般性のある表式となる。

$$D_\infty' - D_G' = \{6.3 \times 10^{-8} \exp(0.054t) + 6.49 \times 10^{-9} \cdot L \cdot \exp(0.0962t)\} \exp(-6.43 \times 10^{-5} \cdot G) \quad (5)$$

$$D_G' = 2.09 \times 10^{-11} \cdot t^{2.78} - \{6.3 \times 10^{-8} \exp(0.0545t) + 6.49 \times 10^{-9} \cdot L \cdot \exp(0.0962t)\} \exp(-6.34 \times 10^{-5} \cdot G) \quad (6)$$

(6)式では、複合拡散係数  $D_G'$  が温度  $t$ 、通気量  $G$ 、層高  $L$  の3つの要因により決ってくる。即ち、(6)式は、右辺第1項が物質の固有値である粒内部での拡散項を表わし温度のみに依存し、第2項は、粒外部表面の水分濃度の拡散係数に及ぼす影響の項を表わすもので、温度  $t$  および通気量によって決定される項であり、第3項は、層高  $L$  を含んでおり、層全体が均一温度にな

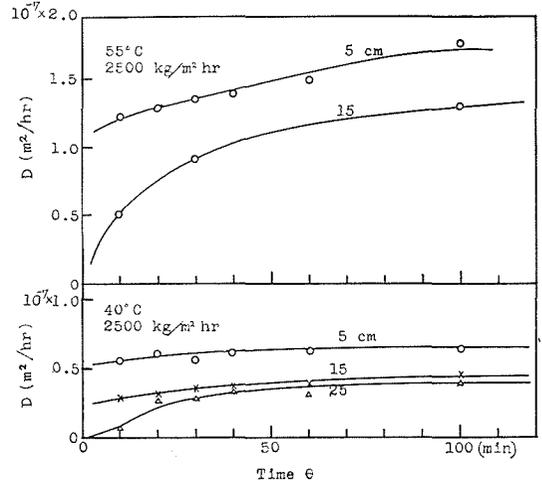


Fig. 13. Variation of diffusion coefficient observed with drying time due to bed depth

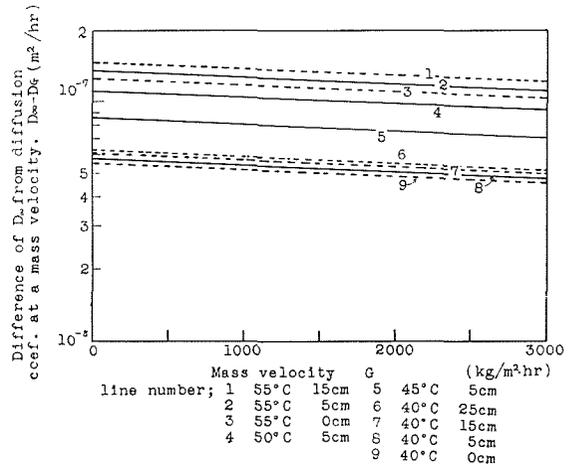


Fig. 14. Variation of  $D_\infty - D_G$  due to bed depth.

るまでの温度上昇に要する時間に対する拡散係数の径時変化及び層内ガス温度差の変化による外部表面水分濃度の変化等のすべての影響を含む項と考えられる。

### 3.4 過渡状態における補正

Fig. 8 (a)~(d) に示すように、 $D'_G$  の値は、時間とともに、徐々に大きくなり一定値に近づくことがわかる。我々は、この一定値をとって、複合拡散係数  $D'_G$  を説明したが、実際にこの  $D'_G$  を用いて、乾燥率を計算すると、かなり、乾燥速度が実際より速いという結果が出る。我々はこの  $D'_G$  の変化を層全体が温度均一になるまでの過渡状態と判断した。即ち、層が厚い場合か、または通気量が小なる場合に最もこの過渡状態が長く続くこと (Fig. 13) から、層高  $L$  と通気量  $G$  の比 ( $L/G$ ) の値が小さければ小さいほど、この過渡状態が短くなるものと考え、Fig. 8 (a)~(d) 及び Fig. 13 から、全乾燥時間中の複合拡散係数  $D'_G$  の平均値  $D_{av}$  を求めて、これと計算に使用した  $D'_G$  との比から実用上の速度を求める補正係数  $\phi$  を算出することとした。即ち前に求めた複合拡散係数  $D'_G$  とこの  $D_{av}$  の比  $\phi$  をこの  $L/G$  に対して点綴すると直線関係が成立し Fig. 15 となる。実用上、40°C より高温での乾燥は製品に胴割れが生じ、不適当なので、40°C の場合と高温の場合として 55°C の場合について示した。その結果、設計の安全係数も含めて過渡状態を考慮した場合の複合拡散係数  $D_{av}$  に対する補正項として  $\phi$  を次のように求めることができた。

$$\phi = 1 - (0.147t - 3.9) \times 10^3 \left( \frac{L}{G} \right) \quad (7)$$

即ち、 $D'_G$  を求め、補正值  $\phi$  を掛けることによって、実際の乾燥時間を得る拡散係数を求めることが出来る。

例えば、温度 40°C の空気を質量速度 2500 [kg/hr°m<sup>2</sup>] で通し、層高 25 cm として、通気乾燥する場合は、(6) 式を用いて、 $D'_G$  を求め、補正係数  $\phi$  を乗じて、平均の複合拡散係数を求める。(6) 式よりこの場合の  $D'_G$  を求めると、 $5.45 \times 10^{-8}$  [m<sup>2</sup>/hr] を得る。また補正係数  $\phi$  はこの場合 (7) 式から、0.803 となるので、 $D_{av}$  は  $4.38 \times 10^{-8}$  [m<sup>2</sup>/hr] となる。乾燥材料の初期含水率が 0.243 [kg-water/kg-dry stock] であり、0.173 [kg/kg] まで乾燥するための所要時間は次の様に関係線図<sup>5)</sup> から求められる。

$$\frac{w - w_e}{w_0 - w_e} = \frac{0.173 - 0.085}{0.243 - 0.085} = 0.557$$

$$\text{このときの } \frac{4Dt}{d^2} = 0.025 \text{ (線図より)}$$

$$D = 4.38 \times 10^{-8} \text{ [m}^2\text{/hr]}, \quad d = 3.8 \times 10^{-3} \text{ [m]}$$

として、乾燥所要時間は

$$\theta = 2.06 \text{ [hr]} \quad (\text{実測値 } 1.67 \text{ [hr]})$$

即ち約 20 分間の余裕を示している。

### 3.5 初期含水率の異なる試料に対する乾燥特性

元来、籾は、収穫時の場所や天候、品種によって含水率が異なるものである。本実験で主として用いた籾の含水率は 0.243 [kg/kg] であるが、それより多いもの、並びに少ない含水率の試料についても、検討した。なお、普通、製品として要求される籾の水分は、14~15% (wet base) である。

Table 4 にその結果を示す。これを図に示すと、Fig. 16, (a), (b) となる。(b) 図から、初期乾燥速度は、含水率の大きなほど大であり、ほぼ同じ傾向で乾燥速度が低下することがわかる。又、同図に増湿籾としたのは、籾を高湿度雰囲気中に長時間放置させて増湿させたものであってその場合の一例を示したのであるが新籾と比べて、かなり特性曲線が異なっている。これは強制増湿のために、固体内の水分分布が自然のものの場合とは異なり、どちらかと云えば表面の水分濃度が大きかったために速度が速かったものと考えられる。

### 3.6 大正金時の乾燥に関して

Table 2 にのせた結果を図示すると、Fig. 17 となる。籾などに比べて、非常に乾燥速度が小さい。また、金時は表皮が弱く、胴割が生じ易いので、高温乾燥は不可能である。

これらの結果より、籾と同じく、Newman の式から、見かけの拡散係数を求めてみる。Fig. 18 (a) は、時間に対する乾燥率を点綴しているが、その各時間

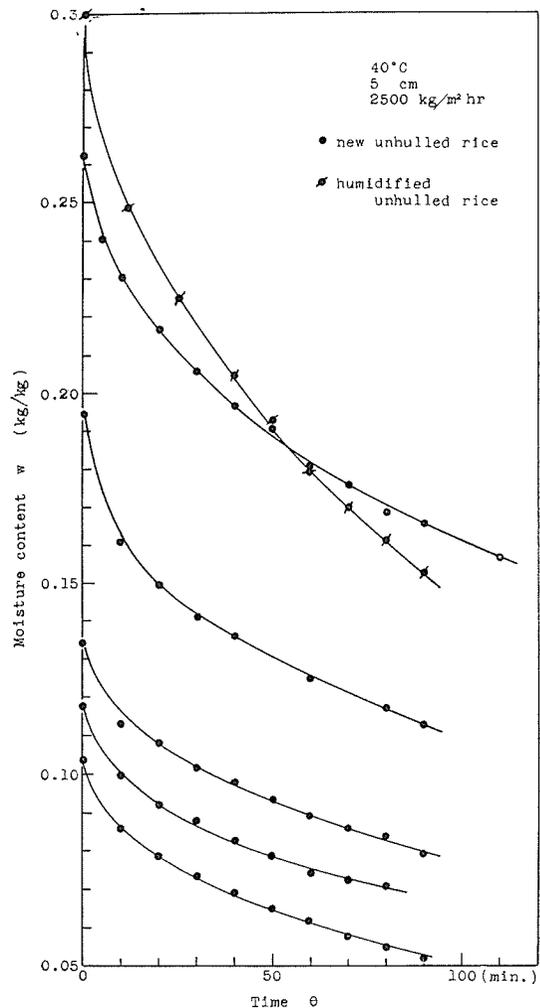


Fig. 16 (a). Drying curves of unhulled rices which have different moisture content

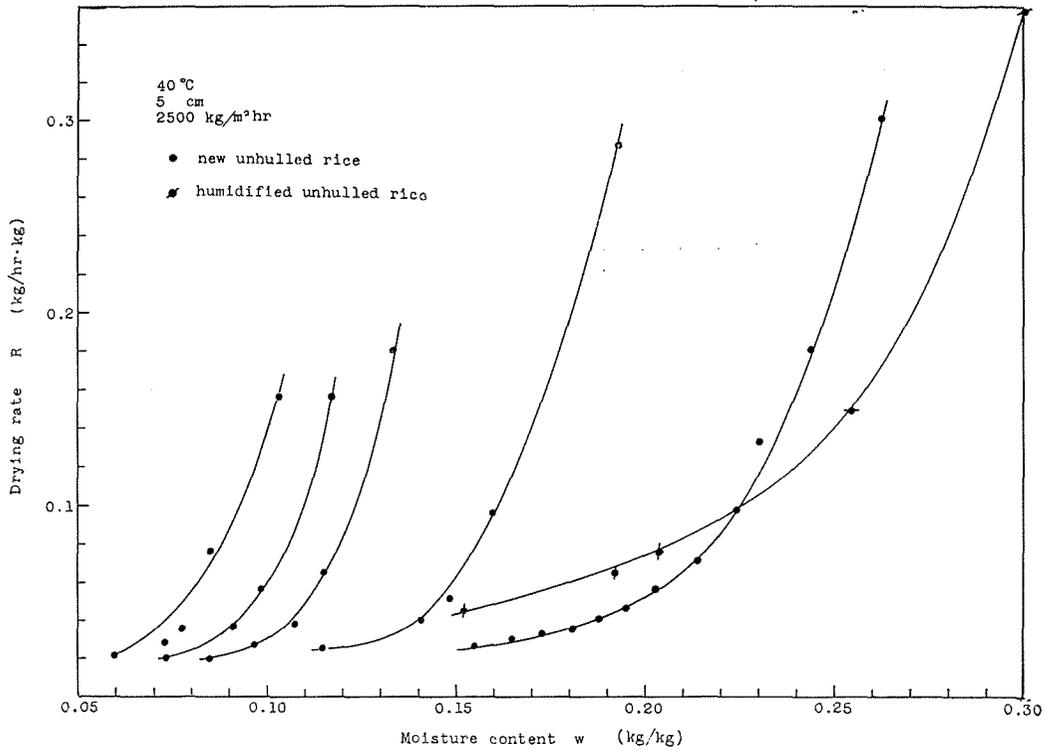


Fig. 16 (b). Drying rates of unhulled rices which have different initial moisture content

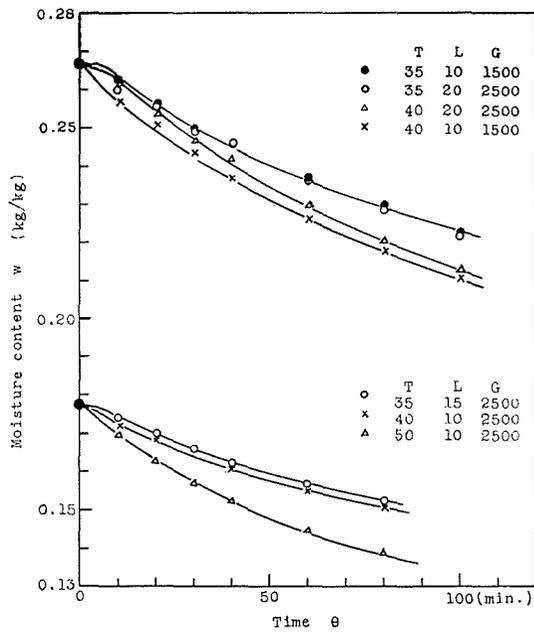


Fig. 17. Drying curves of taisho kintoki

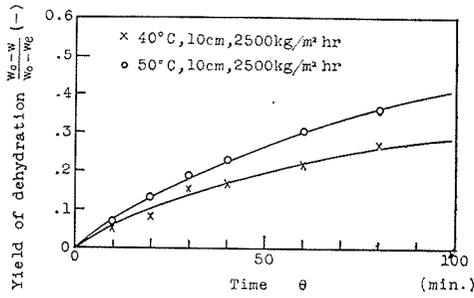


Fig. 18(a). Correlation between  $\frac{w_0-w}{w_0-w_e}$  and  $\theta$  (Taisho Kintoki)

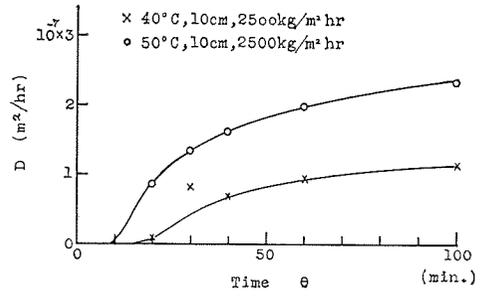


Fig. 18(b). Variation of diffusion coefficient based upon drying time (Taisho Kintoki)

に対して、拡散係数を求めたのが Fig. 18 (b) であり、時間とともにかなり変動している。これは粳の場合でも述べた通り、試料温度が外部より内部への熱拡散によって高まるため、その遅れが水分移動の拡散係数に影響しているもので、金時は粳に比し相当直径が2倍以上であるため、その影響も粳に比して著るしく大きく現われているものと考え。この図から金時の場合複合拡散係数としては、40°Cで大略 $1.62 \times 10^{-7}$ 、50°Cで $3.24 \times 10^{-7}$  [m<sup>2</sup>/hr]と推定される。

### 3.7 小麦の乾燥

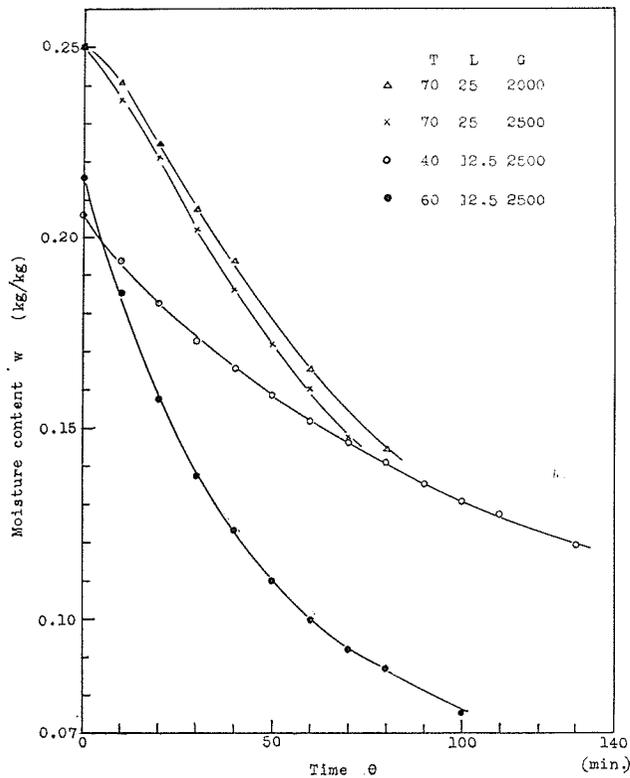


Fig. 19(a). Drying curve of wheat

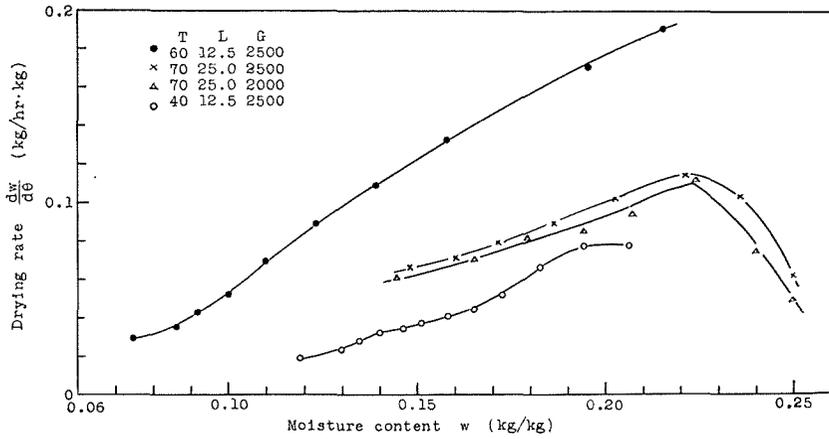


Fig. 19 (b). Rate curve of drying of wheat

結果は Table 3 と Fig. 19 (a) に示した。小麦は粳と、形状、大きさにおいて類似しているが、全体に柔軟性があり、胴割れの心配が少く、比較的高温で乾燥することが可能である。小麦の実験では層を厚くして、12.5 cm, 25.0 cm としたが、Fig. 19 (b) によりわかる如く、予備乾燥期間が現われるのは、粳と同じである。この 12.5 cm の層高の温度が、40°C, 60°C の場合について、金時と同様に、複合拡散係数の算出を試みた。その結果 Fig. 20 (a), (b) のように、時間とともに  $D^2$  が増加しているが、層高が厚いため一定値となるため長時間を要している。これを外挿して求めると、40°C では、 $1.44 \times 10^{-7}$ , 60°C では、 $4.68 \times 10^{-7} [m^2/hr]$  となり、温度によりかなり影響を受けることがわかった。

3.8 製品品質について

粳については、胴割れが問題となる。胴割れは、表面部の乾燥が内部の乾燥よりかなり先行する結果、不均一収縮が起るため起るものと考えられる。従って内部拡散によって乾燥が進行するような物質では、乾燥速度に関連して温度が問題となる。本実験でも色々温度を変えて、胴割れの有無を調べた結果、40°C 以下では胴割れが起らず、速度の点から

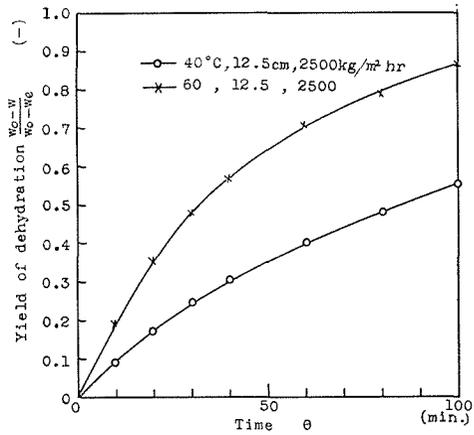


Fig. 20 (a). Correlation between  $\frac{w_0-w}{w_0-w_e}$  and  $\theta$  (wheat)

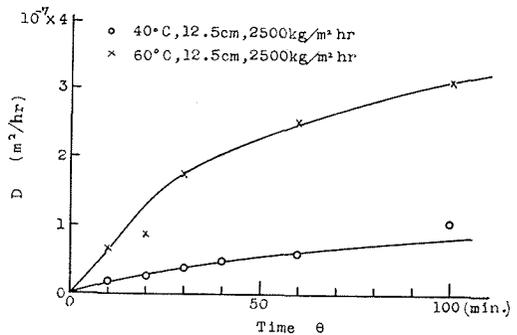


Fig. 20 (b). Variation of diffusion coefficient based upon drying time (wheat)

40°C が最適であると断定された。

金時は、粒径も大きく、表皮も弱いので乾燥には品質の点で最も注意すべきである。このような粒径の大きいものに対しては、はじめ高湿空気を使用して、表面乾燥を抑制し内部拡散を促進して出来る限り均一乾燥を行なう事が得策と思われる。普通外気を使用する場合は金時は 38°C 位が適当と認められた。

小麦の場合は、表面の胴割れは生じない。従って、発芽試験のみに合格すればよいのであり、70°C 高温の乾燥でも、この試験に合格した。

### 3.9 圧損失について

最後に充填層の圧損失について実験した結果を図示すると Fig. 21 の通りである。

これから空気量との関係が次のように得られた。

$$\text{粳} : \Delta P/L = (5.5 \times 10^{-5}) G^{1.35} \tag{8}$$

$$\text{小麦} : \Delta P/L = (1.8 \times 10^{-4}) G^{1.24} \tag{9}$$

$$\text{大正金時} : \Delta P/L = (2.0 \times 10^{-5}) G^{1.37} \tag{10}$$

即ち圧損失は小麦が最も大きく、粳、大正金時の順である。金時は代表径が大きいにもかかわらず圧損失の比較的大きいのは、球形度が他の二者に比し大きい。従って充填層の空間率が粳、小麦の 0.607, 0.473 に比し 0.40 と小さくそのため圧力損失が大きいものと考えられる。三者の充填層単位容積当りの表面積  $a_t$  [1/m] と空隙率  $\epsilon$  の関係  $a_t/\epsilon^3$  をみると下表のようになる。

	粳	小麦	金時
$a_t$	$1.03 \times 10^3$	$7.70 \times 10^2$	$3.69 \times 10^2$
$\epsilon$	0.607	0.473	0.40
$a_t/\epsilon$	$4.61 \times 10^3$	$7.27 \times 10^3$	$5.77 \times 10^3$

これらの値から小麦が最も大きい圧損失を示すことは理解出来るが、粳、金時の値から前者の損失が後者より低いことが予想されるにもかかわらず、むしろ前者の損失の大きいのは粳表面の粗度が金時に比し大きいためと考えられる。

## 4. 総 括

穀類の中、粳、小麦、金時豆の 3 試料、特に粳について詳しく通気乾燥速度を測定し、その結果について通気乾燥装置の設計に必要な資料を提供する立場から考察を加えた。

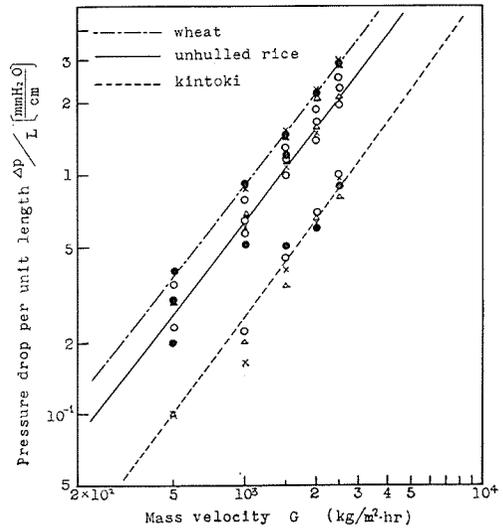


Fig. 21. Variation of pressure drop of air through bed based upon mass velocity

元来穀類はその貯蔵に際して水分として14~15%程度まで低下せしめればよいのであり、一方乾燥原料としての水分は18~20%程度であるから除去すべき水分量としては多いものではないが、全体が減率乾燥段階にある。

従って乾燥速度の解析法には、固体内の水分拡散速度を律速段階としてNewmanモデルを適用することとした。

粳の場合 1) Newmanモデルにより得られた拡散係数が通風速度により変化することから、純粋な固体内拡散のみならず、固体表面にも水分移動の抵抗の存在することを認め、通風量を無限大に増大した場合の拡散係数を外挿により求め、これを粳の内部における水分の拡散係数として温度依存性を含めて $2.09 \times 10^{-11} t^{2.78}$ を得た。

2) 通風量によって変化するNewmanモデルによる係数は固体外抵抗も含むものであることから、複合拡散係数と名づけ、この温度、通風量との関係を表式化して式(4)を得た。

3) なお充填層厚によっても見掛上の拡散係数が変化するので、式(4)の $3.6 \times 10^{-11} t^{2.52}$ の項に層高を含ませることとして式(6)を求めた。

これまでの計算に使用した複合拡散係数は、乾燥開始後試料温度の上昇と共に上昇する拡散係数値の一定値に到達した値、即ち試料内部温度が略々一定値になった場合の値を適用して来ている。従ってこの値を採用した計算値は、試料内部温度が一定値になるまでの経過を含む実測値より大となるので、その補正項を加えることとした。

即ち、4) 乾燥初期の不整定時の平均拡散係数と、採用した一定値に達した時のそれとの比の $G/L$ 値との関係式から補正項 $\phi$ を求め、式(7)を得ている。

以上より粳の通気乾燥に関する限り、温度、通風量、層高が定められれば乾燥曲線が得られることとなった。

その他金時、小麦等についても乾燥速度を測定し、Newmanモデルによる複合拡散係数を算出し、前者に対し、40、50°Cの場合 $1.62 \times 10^{-7}$ 、 $3.24 \times 10^{-7}$ なる値を得ており、後者に対し40、60°Cで $1.44 \times 10^{-7}$ 、 $4.68 \times 10^{-7}$ なる値をそれぞれ得ている。

一方通風抵抗も測定し、圧損失として三試料に対し、通風量との関係式(8)~(10)を求めた。

### Nomenclature

$D_G^a$ : Apparent diffusion coefficient at arbitrary mass velocity  $G$  and temperature of  $t$   
°C ( $m^2/hr$ )

$D_G^\infty$ : Diffusion coefficient at infinite air velocity ( $m^2/hr$ )

$d$ : Particle diameter (m)

$G$ : Mass velocity ( $kg/m^2 \cdot hr$ )

$L$ : Depth of bed (m)

$\phi$ : Correction factor (-)

$R$ : Drying rate ( $kg\text{-water}/hr \cdot kg\text{-dry stock}$ )

$T, t$ : Temperature (°C)

$w$ : Moisture content of grain ( $kg\text{-water}/kg\text{-dry stock}$ )

$w_e$ : Equilibrium moisture content (kg/kg)

$w_0$ : Initial moisture content (kg/kg)

$\theta$ : Time (hr)

$\psi$ : Percent humidity (%)

#### 文 献

- 1) 桐柴: 化学工学便覧 (丸善).
- 2) 桐柴, 平岡: 化学工学, **25**, 323 (1961).
- 3) 亀井: 化学機械協会年報, **1**, 15 (1937).
- 4) Newman, A. B.: Trans. Am. Inst. Chem. Eng., **27**, 203, 310 (1931).
- 5) 化学工学便覧 (丸善), 542 (1958).