

農産物の熱風乾燥法に関する研究 (第2報)

田原 迫 昭 爾

Studies on Drying Methods of Agricultural Products with Heated Air (II)

Shōji TAWARAZAKO
(Laboratory of agricultural machinery)

目 次

第7章*	並行流連続乾燥方式による籾乾燥の基礎的研究
第8章	通気流連続乾燥方式による穀類乾燥の基礎的研究
第9章	イ草の熱風乾燥法に関する研究
第10章	牧草の熱風乾燥に関する研究 特に厚層通気乾燥の場合
第11章	農産物の厚層通気乾燥における乾燥熱効率
第12章	要 約

第7章 並行流連続乾燥方式による 籾乾燥の基礎的研究

(Fundamental studies on the parallel-current-continuous-drying of the unhulled rices.)

目 次

- I. はしがき
- II. 実験装置および乾燥条件
- III. 並行流連続乾燥法における乾燥能率および乾燥装置設計に関する理論および算定法
- IV. 実験結果および考察
 1. 並行流(定常流)における籾の乾燥特性曲線
 2. 籾並行流乾燥における k , および h
 - (1) k , h と堆積量との関係
 - (2) k , h と送風量との関係
 3. 定常流における恒率乾燥速度
 4. 減率期間における乾燥速度勾配 (K_a)
 5. K_a の近似算定法
 6. 定常流下における並行流乾燥の乾燥所要時間
 7. 不定常流下における並行流乾燥の乾燥所要時間
- V. 摘 要

I. はしがき

Band dryer による乾燥方式は多目的乾燥を行う場

* 第1章より第6章までは第1報(本誌17号)に掲載。

合, 非常に有利な乾燥方法である。農産物の乾燥施設をつくる場合, 単一物だけの乾燥を行うより, 数種の農産物を, その収穫時期に応じて多角的に利用出来る方が望ましい。しかし農産物の形状, 品質の多様性からすべての要求を満すのは極めて困難であり, 例えば籾に最適な乾燥装置は牧草の乾燥に不適であったりする。この点 Band dryer は如何なる農産物でもその形状せんたく性がなく, また物理的に品質を破損する心配がないため, 多目的な要求を満す乾燥機構と言える。

ただ問題になる点として, 装置容積の割合に対する乾燥能率が低いこと, および乾燥経費が幾分コスト高になるということがあげられる。

この研究では, 特に生籾について最も普通に行われる並行流乾燥の基礎的実験を行い, 乾燥機設計の場合の基本とすると共に, この乾燥を行う場合の乾燥方法及び能率の算定法について検討した。

II. 実験装置および乾燥条件

実験装置は Fig. 7-1 に示す。温度調節装置及び風量コントロール装置により, 堆積された籾上に恒温, 均一風量を通過させて, 一定時間ごとに乾燥箱重量を計測して減水分量を計測した。乾燥箱は並例に15個, (1個の面積は $0.3m \times 0.3m = 0.09m^2$) 堆積高さは2, 3, 4, 5 cm に区分した。なお風速調節板を

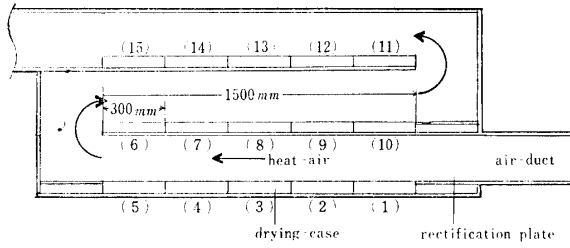


Fig. 7-1. The parallel-current-drying apparatus.

上下して風速を、風量コントロール装置により風量をそれぞれ変えて実験を行った。実験は通常使用される熱風温度 40°C の下に各乾燥条件を変えて、Test No. 1~No. 6 について実施した。この間における乾燥条件は Tab. 7-1 のようである。

なお本章に使用する略記号は次のようである。

- M_w : 供試重量 wet sample weight (kg)
- M_d : 材料無水重量 dry sample weight (kg)
- L : 堆積高さ accumulated-height (m)
- S : 乾燥床面積 area of dry bed (m^2)
- v : 風速 air velocity (m/sec)
- G : 送風量 air quantity (kg/hr)
- W_w : 湿量基準含水率 moisture content (wet-base) (%)
- W_d : 乾量基準含水率 moisture content (dry-base) (%)
- T : 外気乾球温度 dry-bulb-temperature of the open air ($^{\circ}\text{C}$)
- T_w : 外気湿球温度 wet-bulb-temperature of the open air ($^{\circ}\text{C}$)
- H : 絶対湿度 absolute humidity (kg/kg)
- H_w : 飽和絶対湿度 saturated absolute humidity (kg/kg)
- t : 熱風乾球温度 dry-bulb-temperature of heat-air ($^{\circ}\text{C}$)

- t_w : 熱風湿球温度 wet-bulb-temperature of heat-air ($^{\circ}\text{C}$)
- C_H : 空気比熱 specific heat of the air.
- r_w : 蒸発潜熱 latent heat of vaporization.
- W_c : 限界含水率 critical moisture content.
- W_e : 平衡含水率 equilibrium moisture content.

- $\left(\frac{dw}{d\theta}\right)$: 乾燥速度 drying speed per hour.
- $\left(\frac{dw}{d\theta}\right)_c$: 恒率乾燥速度 drying speed of constant-rate-drying (per hour)
- $\left(\frac{dw}{d\theta}\right)_d$: 減率乾燥速度 drying speed of decreasing-rate-drying (per hour)

- k : 物質移動係数 mass transfer coefficient ($\text{kg/hr}\cdot\text{m}^2\Delta H$)
- h : 熱容量係数 film coefficient of heat transfer ($\text{Kcal/hr}\cdot\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$)
- k_c : 恒率乾燥速度係数 coefficient of drying speed of constant-rate-drying
- k_d : 減率乾燥速度勾配 gradient of drying speed of decreasing-rate-drying

III. 並行流連続乾燥法における乾燥能率および乾燥装置設計に関する理論および算定式

Band-dryer のように乾燥材料が連続的に供給され材料の表面を熱風が並流または向流で流れる場合、その位置により乾燥条件が異なり、いわゆる不定常乾燥となる。

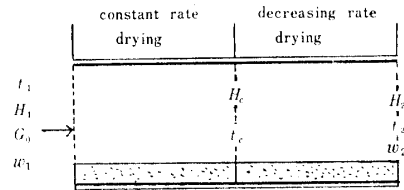


Fig. 7-2. Drying conditions in parallel-current-method.

Tab. 7-1. Drying conditions in the case of the parallel-current-drying. (test No. 1~6)

		Test No. 1	Test No. 2	Test No. 3	Test No. 4	Test No. 5	Test No. 6
sample weight	M_w (kg)	12.00	9.50	7.0	4.75	12.00	12.00
"	M_d (kg)	9.56	7.575	5.572	3.771	9.612	9.516
accumulated height	L (m)	0.05	0.04	0.02	0.02	0.05	0.05
drying space	S (m^2)	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45
air velocity	v (m/sec)	6.6	6.6	6.6	6.6	5.39	4.43
air quantity	G (kg/hr 0.45 m^2)	488.8	488.8	488.8	488.8	399.5	328.1
moisture content	W_w (%)	20.4	20.2	20.4	20.6	19.9	20.7
"	W_d (%)	25.64	25.35	25.64	25.96	24.84	26.10
heat-air condition	H_1 (kg/kg)	0.0056~0.0058	0.0050	0.0080	0.0055	0.0051	0.004
"	H_w (kg/kg)	0.0143	0.0136	0.0147	0.0142	0.0137	0.0130
"	t ($^{\circ}\text{C}$)	41.0 \pm 0.5	41.0	41.0	41.0	40.0	40.5
"	t_w ($^{\circ}\text{C}$)	19.5	18.8	20.5	19.3	19.0	18.2

熱風が Fig. 7-2 のような条件で材料に触接している場合、恒率および減率期間における乾燥速度、乾燥所要時間について検討する。

(1) 恒率乾燥期間

向流の場合、Fig. 7-2 に示す乾燥条件下では、その恒率乾燥速度 R_c ($kg/hr\cdot m^2$) または $(dw/d\theta)_c$ と乾燥条件との間には次式の関係が成立する。

$$R_c = \left(-\frac{M_d \cdot dw}{A_0 \cdot d\theta} \right)_c = k(H_m - H_1) \cong \frac{h}{C_H} (H_m - H_1) \quad \dots(7-1)$$

$$\left(\frac{dw}{d\theta} \right)_c = \frac{kA_0}{M_d} (H_m - H_1) = \frac{hA_0}{M_d \cdot C_H} (H_m - H_1) \quad \dots(7-2)$$

したがって、恒率乾燥期間における乾燥時間 (θ_c) は、物質移動係数 k 、乾燥面積 A_0 (m^2)、送風量 G_0 (kg/hr) を 7-3, 7-4 式に代入することによって求められる。

$$\text{向流の場合, } \theta_c = \frac{G_0}{kA_0} \log \frac{H_m - H_c}{H_m - H_1} \quad \dots(7-3)$$

$$\text{並流の場合, } \theta_c = \frac{G_0}{kA_0} \log \frac{H_m - H_1}{H_m - H_c} \quad \dots(7-4)$$

なお式中の H_c は限界含水比 W_c における絶対湿度 (kg/kg) で次式で計算する。

$$\text{向流では } H_c = H_1 + \frac{M_d(W_c - W_1)}{G_0}$$

$$\text{並流では } H_c = H_1 + \frac{M_d(W_1 - W_c)}{G_0}$$

ここで H_m : 材料の表面温度 t_m に相当する湿度 (kg/kg)

(2) 減率期間

減率乾燥期間は、その乾燥速度が含水率に比例している場合、限界自由含水比を (F_c) とすれば、自由含水比 F における乾燥速度は、7-5 式で示される。

$$\left(-\frac{dF}{d\theta} \right)_a = \frac{k \cdot A_0 \cdot F}{M_d \cdot F_c} (H_m - H) \quad \dots(7-5)$$

$$F = \frac{G}{M_d} (H - H_2) + F_2$$

$$\left(-\frac{G_0 \cdot dH}{A_0 \cdot d\theta} \right) = k(H_m - H) \left[\frac{(G_0/M_d)(H - H_2) + F_2}{F_c} \right]$$

ゆえに向流の場合、減率期間において含水比 F_c から F_2 まで乾燥するに要する所要時間 (θ_a) は

$$\theta_a = \frac{G_0 \cdot F_c}{k \cdot A_0} \int_{H_c}^{H_2} \frac{(H_m - H) \{ F_2 + (G_0/M_d)(H - H_2) \}}{dH} \quad \dots(7-6)$$

近似的計算として減率期間において、熱風温度 t が断熱冷却線にそって変化すると考えると、7-6 式で H_m は近似的に一定とおくことになり、

向流では

$$\theta_a = \frac{G_0 \cdot F_c}{k \cdot A_0 \{ F_2 + (G_0/M_d)(H_m - H_2) \}} \cdot \log \frac{F_c}{F_2} \frac{(H_m - H_2)}{(H_m - H_c)} \quad \dots(7-7)$$

並流では

$$\theta_a = \frac{G_0 \cdot F_c}{k \cdot A_0 \{ F_2 + (G_0/M_d)(H_m - H_2) \}} \cdot \log \frac{F_c}{F_2} \frac{(H_m - H_c)}{(H_m - H_2)} \quad \dots(7-8)$$

として近似的に求められる。

IV. 実験結果および考察

1. 並行流 (定常流) における籾の乾燥特性曲線

並行流乾燥における高水分籾の乾燥特性曲線は Fig 7-3 のように、恒率乾燥期間と減率乾燥期間よりなる

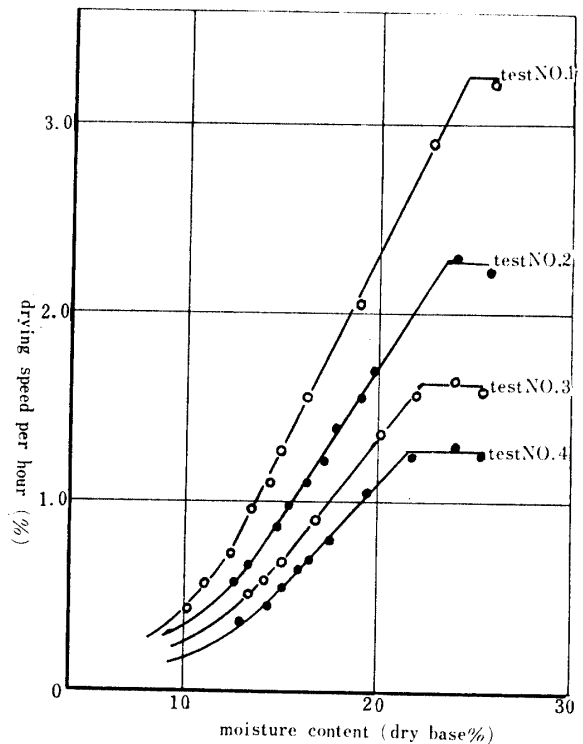


Fig. 7-3. Drying characteristic curves of the wet-unhulled rices in the case of the parallel-current-drying.

ことは明かである。

減率乾燥期間において乾量基準含水率 16% 以上では、その乾燥速度は含水率に比例して、減少するものと見做される。また恒率乾燥から減率乾燥に移行する限界含水率は、Tab. 7-2 のようで、一般に 21.0%~23.0% 附近にある。

2. 粗並行流乾燥における物質移動係数 (k) および熱移動係数 h について

(1) k および h と堆積高さとの関係

送風量を一定 (488 kg/hr) し、層の高さを 5 cm, 4 cm, 3 cm, 2 cm に変えた場合における恒率乾燥速度を実測し、それにより k, h を算定した結果は Tab. 7-3 のようである。

以上の結果より、k=31.74~32.88, 平均 32.17, h=7.45~7.78, 平均 7.56 となり、k, h とともに 5 cm ~ 2 cm 程度の堆積量の差異は影響が小さいものと思われる。

(2) k および h と送風量との関係

質量風量 G₀ (kg/hr-m²) と k との関係を求めるため、送風量および乾燥面積を変えて、恒率乾燥速度を求めた結果は Fig. 7-4 のようである。

この結果から、G₀ (kg/hr-m²) と k との関係のプロットすれば、360 < G₀ < 5500 の間において次の関係

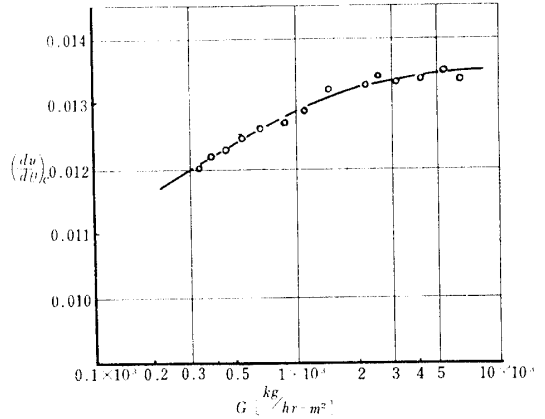


Fig. 7-4. G(kg/hr-m²) v. s. (dw/dθ)_c curve in the case of the parallel-current-drying.

式が成立する。

$$k \approx 25.18 G^{0.031} \quad \dots(7-9)$$

空気-水蒸気系の場合 h/k=C_{II} の関係にあるので h は次式で求められる。

$$h \approx \frac{25.18}{C_{II}} G^{0.031} \quad \dots(7-10)$$

3. 定常流における恒率乾燥速度の近似算定式

乾燥条件のうち、入口における熱風条件 (t-t_w) (H_w-H), 乾燥料の無水重量 M_d (kg), 乾燥面積

Tab. 7-2. The Critical water content (dry base) and the equilibrium ones in each drying condition in the case of the parallel-current-drying.

Test No.	heat-air condition		air quantity (kg/hr -0.45m ²)	initial moisture content W _d (%)	accumulated height L (m)	critical water content W _c (%)	equilibrium moisture content W _e (%)
	(t)	(t _w)					
1	41.0	19.7	488.8	25.50	0.05	21.5	9.0
2	41.0	18.8	488.8	25.35	0.04	22.2	9.5
3	41.0	21.0	488.8	25.64	0.03	23.5	10.0
4	41.0	19.3	488.8	25.96	0.02	24.5	10.5
5	40.0	19.0	399.5	24.84	0.05	22.0	9.3
6	40.5	18.2	328.1	26.10	0.05	22.5	9.5

Tab. 7-3. Relationship between the drying speeds of constant-rate-drying, the film coefficients of heat transfer, the mass transfer coefficient and the accumulated height in the case of the counter-current-drying of the unhulled rices.

Test No.	heat-air conditions		dry sample weight (kg/0.45m ²)	L (cm)	(dw/dθ) _{c-exp} (%/hr)	k (kg/hr -m ² ΔH)	h (Kcal/hr -m ² C)	(dw/dθ) _{c-tho} k=37.17 H=0.0087
	(t)	(t _w)						
1	41.0	19.7	9.56	5.0	1.30	31.74	7.45	1.30
2	41.0	18.8	7.58	4.0	1.65	33.30	7.57	1.64
3	41.0	19.5	5.57	3.0	2.31	32.88	7.78	2.23
4	41.0	19.3	3.77	2.0	3.30	31.78	7.46	3.29

notes : air quantity (G)=488.0 (kg/hr)

(dw/dθ)_c : the drying speed of constant-rate-drying (percentage per hour)

h : the film coefficient of heat transfer.

k : the mass transfer coefficient.

A (m^2), 送風量 G (kg/hr) が既知の場合, 恒率期間における乾燥速度は次の式で近似的に算定出来る.

$$\left(\frac{dw}{d\theta}\right)_c \doteq \frac{k \cdot A}{M_d} (H_w - H) = \frac{25.18(G/A)^{0.031}(H_w - H)}{4.24 L} \quad \dots(7-11)$$

$$\left(\frac{dw}{d\theta}\right)_c \doteq \frac{h \cdot A}{r_m \cdot M_d} (t - t_w) = \frac{25.18(G/A)^{0.031}(C_H)(t - t_w)}{4.24 L \cdot r_m} \quad \dots(7-12)$$

C_H : 湿り空気比熱 ($Kcal/kg \cdot ^\circ C$)

L : 堆積高さ (m)

r_m : 温度 t_m における蒸発潜熱 ($Kcal/kg$)

4. 減率期間における乾燥速度勾配 (k_d)

糸並行流乾燥において減率期間の乾燥速度は含水率に比例して減少し, 実験結果より自由含水率を F とすれば $(dw/d\theta)_d = k_d \cdot F$ なる一般式で示される. 熱風温度 $40^\circ C$ の定常流下で堆積高さが $5\text{ cm} \sim 2\text{ cm}$ に変化した場合における k_d および仮平衡含水率* W_e の実験値は, Tab. 7-4 に示すように k_d の値は, 堆積高さに逆比例して増大し, $k_d = 0.0158 L^{-0.66}$ の関係があり, W_e は堆積高さに比例して増減し, $W_e \doteq 0.5 L + 0.08$ の関係が認められる.

従って, 現在糸乾燥の場合の標準温度である $40^\circ C$ における並行流定常乾燥の場合, 減率期間で含水率 W のときの乾燥速度 $(dw/d\theta)_d$ は, 近似的に次式で計算される.

$$\left(\frac{dw}{d\theta}\right)_d \doteq 0.0158 L^{-0.66} \{W - (0.5L + 0.08)\}$$

5. 減率乾燥速度勾配 (k_d) の近似算定

定常乾燥条件下での減率乾燥速度が含水率に比例して減少する場合, 乾燥機内の任意の微小断面の蒸発面積を dA (m^2) とすると物質収支は次式のようなのである.

$$M_{d0} \left(-\frac{dw}{d\theta}\right)_d r_m = h(t - t_m)(F/F_c) dA \quad \dots(7-13)$$

または

$$M_d \left(-\frac{dw}{d\theta}\right)_d = k(H_m - H)(F/F_c) \quad \dots(7-14)$$

$$\therefore \frac{h_i(t - t_m)}{r_m} = k(H_m - H)$$

M_{d0} : 無水材料重量 (kg)

M_d : m^2 当り無水材料重量 (kg/m^2)

r_m : 蒸発潜熱 ($Kcal/kg$)

F : 自由含水比

F_c : 限界含水比 (自由含水比における)

(7-14) より

$$\left(-\frac{M_{d0}}{A_0} \frac{dF}{d\theta}\right)_d = k(H_m - H)(F/F_c) \quad \dots(7-15)$$

$$\left(-\frac{M_{d0}}{A_0} \frac{dF}{d\theta}\right)_d = \frac{h(t - t_m)}{r_m} (F/F_c) \quad \dots(7-16)$$

実験結果より

$$\left(\frac{dw}{d\theta}\right)_d = \left(\frac{dF}{d\theta}\right)_d = k_d \cdot F \quad \dots(7-17)$$

(7-14) および (7-17) より k_d と k , h との間には (7-18) (7-19) の関係が成立する.

$$k_d \doteq \frac{k}{M_d \cdot F_c} (H_m - H) \quad \dots(7-18)$$

$$k_d \doteq \frac{h}{r_m \cdot M_d \cdot F_c} (t - t_m) \quad \dots(7-19)$$

実験結果で求められた k , F_c を (7-18), (7-19) に代入して求めた k_{d-tho} と, 直接実験による乾燥特性曲線から求めた k_{d-exp} とを比較すれば, Tab. 7-5 のようになり, 結果は近似的に一致する.

すなわち, 並行流乾燥における減率乾燥速度勾配は熱風条件 $(t - t_w)$, $(H_w - H)$, 単位面積当り無水材料重量 M_d , および限界含水比 F_c , 物質移動係数 k ま

Tab. 7-4. The experimental values of the gradient of drying speed of decreasing-rate-drying (K_d), the equivalent moisture content (W_e), and the experimental formul of decreasing-rate-drying speed $(dw/d\theta)_d$ in the case of each drying condition.

Test No.	t ($^\circ C$)	t_w ($^\circ C$)	L (m)	k_{d-exp}	W_{e-exp}	$(dw/d\theta)_d$
1	41.0	19.7	0.05	0.118	0.105	0.118 ($w_1 - 0.105$)
2	41.0	18.8	0.04	0.135	0.100	0.135 ($w_2 - 0.100$)
3	41.0	19.5	0.03	0.165	0.095	0.165 ($w_3 - 0.095$)
4	41.0	19.3	0.02	0.212	0.090	0.212 ($w_4 - 0.090$)

k_d : the gradient of drying speed of decreasing-rate-drying.

W_e : the equivalent moisture content (dry base)

* 仮平衡含水率 : 減率一段期間の乾燥特性線の延長と横軸 (含水率軸) との交点における含水比.

Tab. 7-5. Comparison between the theoretical values of the gradients of decreasing-rate-drying-speed $(k_d)_{-tho}$ and the experimental ones $(k_d)_{-exp}$ in each accumulated height.

Test No.	L (m)	$F_c=(W_1-W_c)$	M_w (kg/m ²)	k_{d-tho}	k_{d-exp}
1	0.05	0.215-0.105=0.110	21.22	0.119	0.118
2	0.04	0.222-0.100=0.122	16.83	0.135	0.135
3	0.03	0.230-0.095=0.135	12.38	0.167	0.165
4	0.02	0.245-0.090=0.155	8.38	0.215	0.212

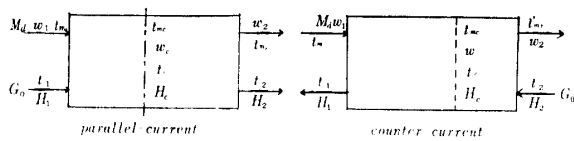


Fig. 7-5. Drying conditions in parallel and Counter-current methods.

たは熱移動係数 h を知ることにより算定出来る。

6. 定常流における並行流乾燥の乾燥所要時間の近似算定

乾燥条件として温度、および湿度推進力 $(t-t_w)$ (°C), (H_w-H) (kg/kg), 送風量 G (kg/hr), 無水樹重量 M_d (kg), 乾燥面積 A (m²), 堆積高さ L (m) の場合に恒率乾燥期間の乾量基準含水比 w_1 (F_1) から w_c (F_c) までの乾燥所要時間 (θ_c) は、次式で示される。

$$\begin{aligned} \theta_c &\doteq \frac{4.24 L (F_1 - F_c)}{25.18 (G/A)^{0.031} (H_w - H)} \text{ (hr)} \\ &\doteq \frac{4.24 L (F_1 - F_c) r_m}{25.18 (G/A)^{0.031} (t - t_w)} \text{ (hr)} \quad \dots (7-20) \end{aligned}$$

減率乾燥期間における、乾量基準含水比 w_c (F_c) から w_2 (F_2) までの乾燥所要時間 (θ_d) は次式で示される。

$$\begin{aligned} \theta_d &= \frac{W \cdot F_c}{kA(H_w - H)} \log \frac{F_c}{F_2} \\ &= \frac{4.24 L \cdot F}{25.18 (G/A)^{0.031} (H_w - H)} \log \frac{F_c}{F_2} \\ &= \frac{4.24 L \cdot r_m \cdot F_c}{25.18 (G/A)^{0.031} (t - t_w)} \cdot \log \frac{F_c}{F_2} \quad \dots (7-21) \end{aligned}$$

したがって総含水比 w_1 (F_1) から w_2 (F_2) まで乾燥するに要する全所要時間 (θ) は、(7-22) 式で示される。

$$\begin{aligned} \theta &= \theta_c + \theta_d \\ &\doteq \frac{4.24 L}{25.18 (G/A)^{0.031} (H_w - H)} \left\{ (F_1 - F_c) + F_c \log \left(\frac{F_c}{F_2} \right) \right\} \text{ (hr)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\doteq \frac{4.24 L \cdot r_m}{25.18 (G/A)^{0.031} (t - t_w)} \\ &\left\{ (F_1 - F_c) + F_c \log \left(\frac{F_c}{F_2} \right) \right\} \text{ (hr)} \quad \dots (7-22) \end{aligned}$$

並行流の場合一般に仮平衡含水率は、9.0%~11% 附近と見做され、また恒率乾燥期間は短い。

7. 不定常流下における並行流連続乾燥の乾燥所要時間

並行流連続乾燥を行う場合、その熱風および材料についての諸元を Fig. 7-5 のように表す場合

(1) 恒率期間における乾燥所要時間 (θ_c)

向流の場合

$$\begin{aligned} \theta_c &= \frac{G_0}{kA} \log \frac{(H_w - H_c)}{(H_w - H_1)} \\ &= 0.0397 \left(\frac{G}{A} \right)^{0.969} \log \frac{(H_w - H_c)}{(H_w - H_1)} \quad \dots (7-23) \end{aligned}$$

並流の場合

$$\begin{aligned} \theta_c &= \frac{G_0}{kA} \log \frac{(H_w - H_1)}{(H_w - H_c)} \\ &= 0.0397 \left(\frac{G}{A} \right)^{0.969} \log \frac{(H_w - H_c)}{(H_w - H_1)} \quad \dots (7-24) \end{aligned}$$

(2) 減率期間における乾燥所要時間 (θ_d)

粉の場合、減率乾燥速度は含水率に比例して減少するので、前述 7-7 式より含水率 F_c から F_2 まで乾燥するに要する所要時間は

向流では

$$\begin{aligned} \theta_d &= \frac{G_0 \cdot F_c}{k \cdot A (F_2 + (G_0/M_d)(H_w - H_2))} \\ &\quad \log \frac{F_c}{F_2} \frac{(H_w - H_2)}{(H_w - H_c)} \quad \dots (7-25) \end{aligned}$$

並流では

$$\begin{aligned} \theta_d &= \frac{G_0 \cdot F_c}{k \cdot A (F_2 + (G_0/M_d)(H_w - H_2))} \\ &\quad \log \frac{F_c}{F_2} \frac{(H_w - H_c)}{(H_w - H_2)} \quad \dots (7-26) \end{aligned}$$

$$k = 25.18 G^{0.031}$$

したがって上記 (7-25), (7-26) 式に実験で求めた k , F_c , および既知乾燥条件, G_0 , t_2 , H_2 , W_0 , W_1 , W_2 (向流), G_0 , t_1 , H_1 , W_1 , W_2 , W_0 (並流) を代入し, H_c については

$$\text{向流 } H_c = \frac{W_0(F_c - F_2) + H_2 G_0}{G_0}$$

$$\text{並流 } H_c = \frac{W_0(F_1 - F_c) + H_1 G_0}{G_0}$$

を代入する。

V. 摘 要

1. 並行流 (定常流) における籾の乾燥特性曲線は実用的乾燥水分の範囲内では, 恒率, 減率, 乾燥期間よりなり減率期間ではその乾燥速度は平均含水率 (乾量基準) に比例して減少する。

2. 高水分籾からの並行流乾燥では, その限界含水率は 21.0%~23.0% の範囲内にあり平衡含水率は 10.5%~9.0% である。

3. 生籾並行流乾燥における物質移動係数 k ($\text{kg/hr-m}^2\Delta H$) および, 熱移動係数 h と, 質量風速 G_0 (kg/hr-m_2) との間には次の関係が認められた。

$$k \doteq 25.18 G_0^{0.031}$$

$$h \doteq \frac{25.18}{C_H} G_0^{0.031}$$

4. 上記乾燥方式における恒率乾燥速度 (ϕ_c) は近似的に次式で求められる。

$$\phi_c \doteq \frac{25.2(G/A)^{0.03}(H_w - H)}{4.24 L} \\ \doteq \frac{25.2(G/A)^{0.03} C_H (t - t_w)}{4.24 L \cdot r_w}$$

5. 上記乾燥方式における減率乾燥速度勾配 k_d は近似的に次式で求められる。

$$k_d \doteq \frac{k}{M_d \cdot F_c} (H_w - H) \doteq \frac{25.18 G_0^{0.031}}{0.12 \cdot M_d} (H_w - H)$$

したがって含水率 W_1 における減率乾燥速度 ($dw/d\theta$)_a は

$$\left(\frac{dw}{d\theta}\right)_a = k_d \cdot W_1 \doteq \frac{25.18 G_0^{0.031} W_1}{0.12 \cdot M_d} (H_w - H) \\ \doteq \frac{25.18 G_0^{0.031} C_H \cdot W_1}{0.12 \cdot M_d \cdot r_w} (t - t_w)$$

6. 定常流において並行流乾燥を行なう場合, 自由含水率 F_1 から F_2 まで乾燥するに要する所要時間 (θ) は次式で近似算定出来る。

$$\theta \doteq \frac{4.24 L}{25.18(G/A)^{0.031}(H_w - H)} \\ \left\{ (F_1 - F_c) + F_c \log \frac{F_c}{F_2} \right\} (hr)$$

$$\frac{4.24 L \cdot r_w}{25.18(G/A)^{0.031}(t - t_w) C_H} \\ \left\{ (F_1 - F_c) + F_c \log \frac{F_c}{F_2} \right\} (hr)$$

7. 不定常流における並行流乾燥を行なう場合, 自由含水率 F_1 から F_2 まで乾燥するに要する所要時間 (θ) は次式で近似的に算定出来る。

向流の場合

$$\theta \doteq \frac{G_0}{kA} \left[\log \frac{(H_m - H_c)}{(H_m - H_1)} \right. \\ \left. + \frac{F_c}{\{F_2 + (G/M_d)(H_m + H_2)\}} \right. \\ \left. \log \frac{F_c}{F_2} \frac{(H_m - H_2)}{(H_m - H_c)} \right] (hr)$$

並流の場合

$$\theta \doteq \frac{G_0}{kA} \left[\log \frac{(H_m - H_1)}{(H_m - H_c)} \right. \\ \left. + \frac{F_c}{\{F_2 + (G/M_d)(H_m - H_2)\}} \right. \\ \left. \log \frac{F_c}{F_2} \frac{(H_m - H_c)}{(H_m - H_2)} \right] (hr)$$

第8章 通気流連続乾燥方式による穀類乾燥の基礎的研究

(Fundamental studies on the ventilation-continuous-drying of the crops.)

目 次

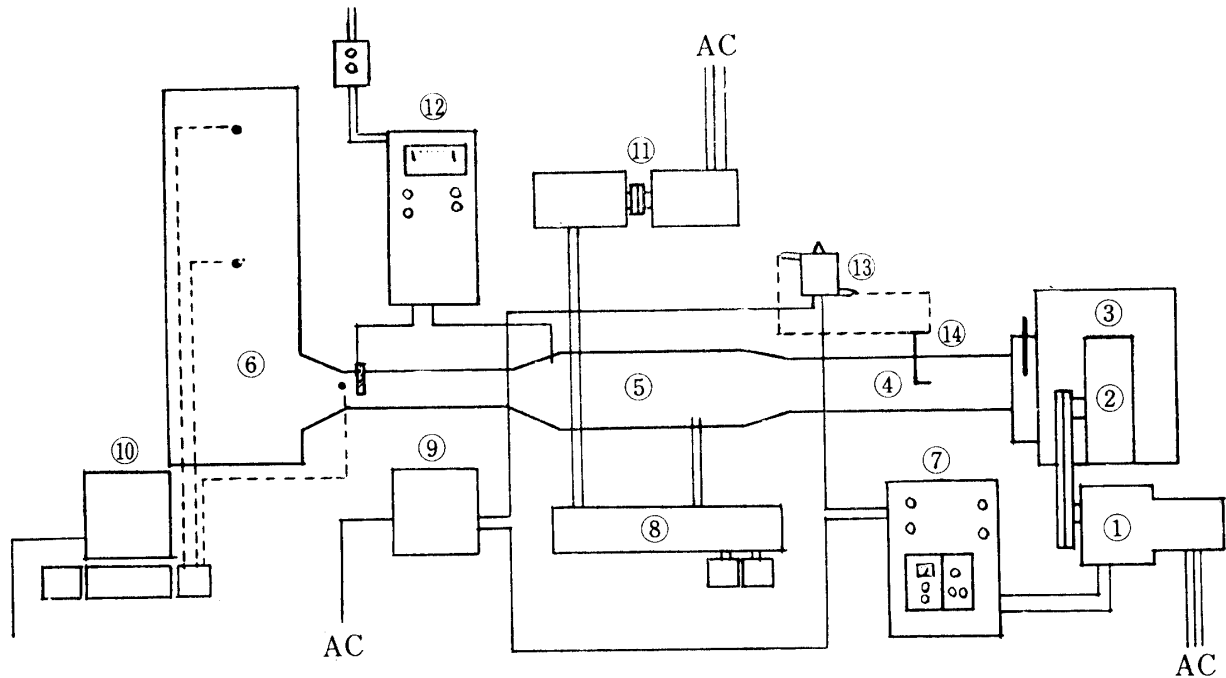
- I. はしがき
- II. 実験装置
- III. 連続通気乾燥法における乾燥速度と乾燥装置容積の設計に関する理論, および近似算定法
- IV. 実験結果および考察
 1. 実験における乾燥条件
 2. 通気定常流下における穀類の乾燥特性曲線
 3. 通気乾燥における穀類の熱容量係数, 物質移動容量係数, および移動単位数について
 4. 不定常流下における穀類の乾燥特性
 5. 不定常流下での連続通気乾燥の場合の乾燥所要時間

I. はしがき

堅型通気乾燥装置は穀類など成形農産物を乾燥する場合,

- (1) 乾燥容積が小さくてすむ。
- (2) 乾燥施設経費が安価である。
- (3) 乾燥熱効率が低い。

という利点があり穀類等の熱風乾燥や, 通気貯蔵乾燥に利用されている。



① v. s. motor ② fan. ③ Air flow blow. ④ Air duct. ⑤ Heater box. ⑥ Deep-bed-dryer
 ⑦ Control equipment of air quantity. ⑧ Distributing panel. ⑨ Recorder with two pen
 (Keep on record of air quantity). ⑩ Ertype-recorder (Keep on record of temperature)
 ⑪ Generator. ⑫ Temperature controller. ⑬ Pressure changer. ⑭ Pitot tube.

Fig. 8-1. The deep-bed-ventilation-drying apparatus.

この研究では最近共同乾燥施設等において使用されつつある並行流通気連続乾燥の場合における基礎的実験を、粃、麦について行い、実用的乾燥条件、及び乾燥方法における、乾燥能率の算定や、乾燥装置、容積等を算出するための基礎的実験を行なった。

II. 実験装置

実験装置は Fig. 8-1 に示す。温度調節装置、及び風量コントロール装置により、恒温、均一風量にして、厚く堆積させた穀層を強制通気させ、各層の含水率の経時的变化を計測した。乾燥箱は1段の厚さ 5 cm、段数 12 段の、計 60 cm 堆積し、1回の乾燥箱床面積は $0.3\text{ m} \times 0.3\text{ m} = 0.09\text{ m}^2$ で実験を行なった。

III. 連続通気乾燥法における乾燥速度及び、乾燥装置容積の設計に関する理論および近似算定法

整形連続通気乾燥装置のように乾燥材料が連続的に供給され、材料間を熱風が並流または、向流状態で強制的に通気する場合、その位置により乾燥条件が異なるので不定常乾燥となる。したがって定常乾燥の乾燥速度式はそのままでは使用出来ない。しかし不定常乾燥をうけている、ある含水率の材料が、ある乾燥条件の熱風と接触して示す乾燥速度は、その材料が同一の乾燥条件で定常乾燥を受けた場合、同一の含水率で示す

乾燥速度に近似する。

上記の考え方にもとずいて、不定常通気乾燥における乾燥速度、乾燥所要時間、及び、乾燥装置容積についての算定方法を検討する。

1. 連続通気乾燥における乾燥速度、乾燥所要時間についての算定式

(1) 恒率乾燥期間

定常通気流における恒率乾燥速度 $(dw/d\theta)_c$ と各乾燥条件との間には、(8-1)、(8-2) の関係が近似的に成立する。

(a) h_a, N_t が既知の場合

$$\left(\frac{dw}{d\theta}\right)_c = \frac{h_a \cdot V_p (1 - e^{-N_t})(t - t_w)}{M_d \cdot r_w \cdot N_t} \\ = \frac{G_0 \cdot C_H}{M_d \cdot r_w} (1 - e^{-N_t})(t - t_w) \quad \dots(8-1)$$

(b) k_a, N_t が既知の場合

$$\left(\frac{dw}{d\theta}\right)_c = \frac{k_a \cdot V_p (1 - e^{-N_t})(t - t_w)}{M_d \cdot N_t} \\ = \frac{G_0}{M_d} (1 - e^{-N_t})(H_w - H) \quad \dots(8-2)$$

また恒率乾燥期間における乾燥所要時間 (θ_c) は、その恒率乾燥が、おこっている全区間の平均乾燥速度

を $(R_c)_{-m}$ とすれば $[\theta_c] = (W_1 - W_c) / (R_c)_{-m}$ と考えられるので

$$[\theta_c] = \frac{M_a(W_1 - W_c)}{k_a(\Delta H)l_m \cdot V_p} = \frac{M_a(W_1 - W_c)}{G(1 - e^{-Nt})(H_w - H)} \quad \dots(8-3)$$

V_p : 材料の充てん容積 $[m^3]$.

$(\Delta H)_{lm}$: 入口, 出口における湿度推進力の, 対数平均値.

(2) 減率乾燥期間

穀類の通気乾燥の場合, 減率乾燥速度 $(dw/d\theta)_a$ は自由含水率 (F) に比例して, 減少すると見做される。したがって通気乾燥の場合, この期間においては, 次の関係が成立する。

$$M_a \left(\frac{dw}{d\theta} \right)_a = k_a(\Delta H)l_m V_p \frac{F}{F_c}$$

$$M_a \left(\frac{dw}{d\theta} \right)_a = G(1 - e^{-Nt})(H_w - H) \frac{F}{F_c} \quad \dots(8-4)$$

減率期間において自由含水率 F_c から F_2 まで乾燥するに要する所要時間 $[\theta_a]$ は,

$$[\theta_a] = \frac{M_a \log(F_2/F_c)}{k_a(\Delta H)l_m V_p} = \frac{M_a \cdot F_c \log(F_2/F_c)}{G(1 - e^{-Nt})(H_w - H)}$$

あるいは, $F = G/M_a(H - H_2) + F_2$, $M_a dF = G \cdot dH$ なる関係を (8-4) 式に代入すれば, 向流では

$$\theta_a = \int_{H_c}^{H_2} \frac{G F_c}{k_a \cdot V_p (\Delta H) l_m \{ (G/M_a)(H - H_2) + F_2 \}} dH$$

$$= \int_{H_c}^{H_2} \frac{F_c}{(1 - e^{-Nt})(H_w - H) \{ (G/M_a)(H - H_2) + F_2 \}} dH \quad \dots(8-5)$$

温度 t が断熱冷却線に沿って変化すると考えると, (8-5) 式の H_w は近似的に一定とおくことになり, 減率期間における自由含水比 F_c から F_2 までの乾燥所要時間 $[\theta_a]$ は, 向流の場合 (8-6-1) のようである。

$$[\theta_a]_{\text{向流}} = \frac{F_c}{(1 - e^{-Nt})(F_2 + (G/M_a)(H_w - H_2))} \log \frac{F_c(H_w - H_2)}{F_2(H_w - H_c)}$$

$$= \frac{F_c}{k_c \{ F_2 + (G/M_a)(H_w - H_2) \}} \log \frac{F_c(H_w - H_2)}{F_2(H_w - H_c)} \quad \dots(8-6-1)$$

同様に並流の場合は, (8-6-2) 式に示す。

$$[\theta_a]_{\text{並流}} = \frac{F_c}{(1 - e^{-Nt})(F_2 + G/M_a(H_2 - H_w))} \log \frac{F_2(H_w - H_c)}{F_c(H_w - H_2)}$$

$$= \frac{F_c}{k_c \{ F_2 + G/M_a(H_2 - H_w) \}} \log \frac{F_2(H_w - H_c)}{F_c(H_w - H_2)} \quad \dots(8-6-2)$$

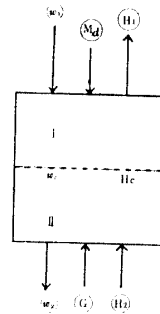


Fig. 8-2. Drying conditions in counter-current in the case of the deep-bed ventilation drying.

ここで

- h_a = 熱移動容量係数 $(Kcal/hr \cdot C \cdot m^3)$
- k_a = 物質移動容量係数 $(kg/hr \cdot m^3 \cdot \Delta H)$
- N_t = 移動単位数
- M_a = 無水材料重量 (kg)
- G_0 = 質量風量 (kg/hr)
- C_{II} = 湿り空気比熱 $(Kcal/kg \cdot C)$
- V_p = 材料の充てん容積 (m^3)
- τ_w = 水の蒸発潜熱 $(Kcal/kg)$
- $(\Delta H)_{lm}$ = 湿度推進力の対数平均値 (kg/kg)
- $(\Delta t)_{lm}$ = 温度推進力の対数平均値 (C)
- θ = 乾燥時間 (hr)
- H_1, H_2 = 入口及び出口の絶対湿度 (kg/kg)
- H_c = 限界含水率における絶対湿度 (kg/kg)
- H_w = t_w に対応する飽和絶対湿度 (kg/kg)
- t_1, t_2 = 入口及び出口における温度 (C)
- t_w = t_1 における湿球温度 (C)

2. 連続通気乾燥装置における乾燥容積の算定

Fig. 8-3 に示すように乾燥機入口における, 熱風条件 (t_1, H_1) , 送風量 $G_0(kg/hr)$, 材料含水比 $(W_1 - dry base)$, 毎時供給無水材料重量 $W_0(kg)$, 乾燥前材料温度 $t_m(C)$ (外気温度の湿球と見做す) が与えられた場合, 含水比が, W_1 から W_2 まで乾燥するに要する乾燥装置容量について考察する。この場合供給された材料は, I. 予熱期間, II. 表面蒸発期間, III 減率乾燥期間, を経過して取出される。

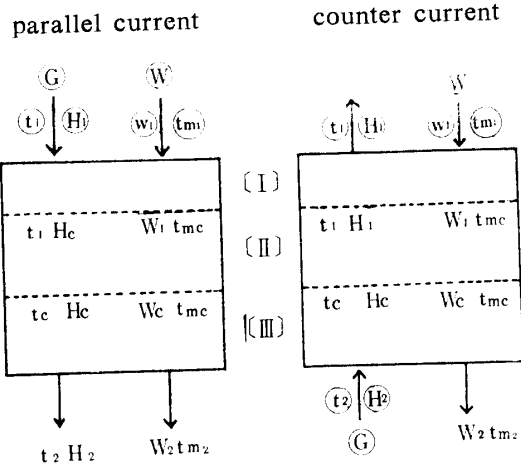


Fig. 8-3. Drying conditions in parallel and counter current methods.

(1) 並流の場合

(A) 予熱期間

材料温度が t_{m1} から t_{mc} まで、上昇する加熱期間で、この間の水分蒸発は行なわないと考える。そして t_{mc} はそこで接触する熱風条件 t'_1, H_1 の湿球温度 t_w にあるから、

$$G_0 C_{H1}(t_1 - t'_1) = M_d(c + w_1)(t_w - t_{m1})$$

$$= h_a V_I \frac{(t_1 - t_{m1}) - (t'_1 - t_w)}{\log\{(t_1 - t_{m1}) / (t'_1 - t_w)\}}$$

$$\therefore V_I = \frac{M_d(c + w_1)(t_w - t_{m1}) \log\{(t_1 - t_{m1}) / (t'_1 - t_w)\}}{h_a \{(t_1 - t_{m1}) - (t'_1 - t_w)\}} \quad \dots(8-7)$$

t'_1 については

$$(t_1 - t'_1) = \frac{M_d}{G_0 C_H} (c + w_1)(t_w - t_{m1})$$

より決定される。

(B) 表面蒸発期間

材料温度は一定 ($t_{mc} = t_w$) で流入熱量がすべて蒸発に使用されるから

$$G_0 C_{H1}(t'_1 - t_c) = M_d(w_1 - w_c) \times r_w$$

$$= h_a V_{II} \frac{(t'_1 - t_c)}{\log\{(t'_1 - t_w) / (t_c - t_w)\}}$$

$$\therefore V_{II} = \frac{M_d(w_1 - w_c) r_w \log\{(t_1 - t_w) / (t_c - t_w)\}}{h_a (t'_1 - t_c)} \quad \dots(8-8)$$

t_c は湿度図表で求めるか、または

$$(t'_1 - t_c) = \frac{M_d(w_1 - w_c) r_w}{G_0 C_{H1}} \text{ より求める。}$$

(C) 減率乾燥期間

$$V_{III} = \iint dV = \int_{w_1}^{w_2} M_d(-dw) F_c r_w / \{h_a(t - t_w) F\} \quad \dots(8-9)$$

上式を図式積分することにより V_{III} を計算出来る。

(2) 向流の場合

(A) 予熱期間

$$G_0 C_{H1}(t'_1 - t_1) = M_d(c + w_1)(t_w - t_{m1})$$

$$= h_a V_I \frac{(t'_1 - t_{m1}) - (t_1 - t_w)}{\log\{(t'_1 - t_{m1}) / (t_1 - t_w)\}}$$

$$= \frac{M_d(c + w_1)(t_w - t_{m1}) \log\{(t'_1 - t_{m1}) / (t_1 - t_w)\}}{h_a \{(t'_1 - t_{m1}) - (t_1 - t_w)\}} \quad \dots(8-10)$$

t'_1 は $(t'_1 - t_1) = \frac{M_d(c + w_1)(t_w - t_{m1})}{G_0 C_{H1}}$ より算定。

(B) 表面蒸発期間

$$G_0 C_{H1}(t_c - t'_1) = M_d(w_1 - w_c) r_w$$

$$= h_a V_{II} \frac{(t_c - t'_1)}{\log\{(t_c - t_w) / (t'_1 - t_w)\}}$$

$$V_{II} = \frac{M_d(w_1 - w_c) r_w \log\{(t_c - t_w) / (t'_1 - t_w)\}}{h_a (t_c - t'_1)} \quad \dots(8-11)$$

t_c は $(t_c - t'_1) = \frac{M_d}{G_0 C_{H1}} (w_1 - w_c) r_w$ より求められる。

(C) 減率乾燥期間

$$V_{III} = \int dV$$

$$= \int_{w_c}^{w_2} M_d(-dw) F_c r_w / \{h_a(t - t_w) F\}$$

上式を図式積分して求められる。従って、乾燥全容積 $V = V_I + V_{II} + V_{III}$ として、求められる。

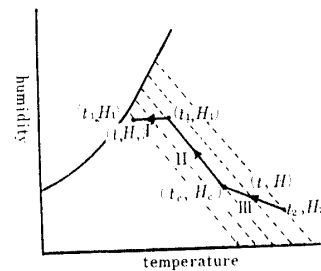


Fig. 8.4. Counter current

IV. 実験結果および考察

1. 実験における乾燥条件

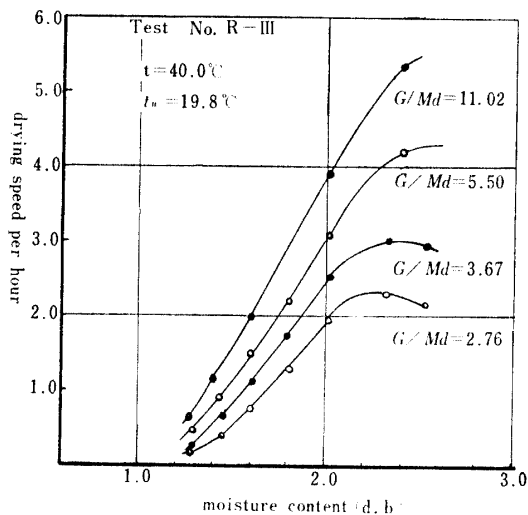
粳 (中生新千本), 小麦 (農林16号) を堆積高さ 5 cm ~ 80 cm まで 16 段階に堆積し、その夫々に実用的熱風温度と思われる 40°C, 50°C, 60°C の熱風を、毎時 150 kg/hr 前後、強制通気させ各層ごとの乾燥速度の変化を追跡した。粳および小麦における概略の乾燥条件は Tab. 8-1 のようである。

Tab. 8-1. Drying conditions in the case of deep-bed-ventilation-drying of the unhulled rices and the wheat grains.

Test No.	heat-air condition				G (kg/hr-0.09m ²)	M_d (kg/0.09m ²)
	t (°C)	t_w (°C)	H (kg/kg)	H_w (kg/kg)		
R-I	60.0	27.0	0.0090	0.00240	73.62	1.8×16
R-II	50.0	21.5	0.00037	0.0160	76.21	1.8×16
R-III	40.0	19.8	0.0056	0.0145	79.35	1.8×16
R-IV	60.5	25.5	0.0064	0.0205	74.95	2.0×16
R-V	50.5	23.0	0.0062	0.0175	75.93	2.0×16
R-VI	40.5	18.5	0.0040	0.0135	76.48	2.0×16
W-I	60.5	25.5	0.0064	0.0205	74.95	2.0×16
W-II	50.5	23.0	0.0062	0.0175	75.93	2.0×16
W-III	40.5	18.5	0.0040	0.0135	76.48	2.0×16

2. 通気定常流下における穀類の乾燥特性曲線

定常流下における粳,小麦の通気乾燥特性曲線(含水率対乾燥速度)は, Fig. 8-5~Fig. 8-7 のようである。



8-5. Heat-air temperature=40°C

Fig. 8-5.~8-7. Drying characteristic curves in each G/M_d in the case of the ventilation drying of the unhulled rices.

(1) 恒率乾燥速度

上記実験における恒率乾燥速度 $(dw/d\theta)_{c-exp.}$ を各乾燥条件ごとに求めた結果は, Tab. 8-2 のようである。

(2) 限界含水率 $[W_c]$ 及び, 平衡含水率 (W_e)

実験結果より粳及び麦における, 限界含水率は実用熱風温度, 30°C~60°C, $G/M_d=2.5\sim11.0$ の範囲内において, 近似的に (8-13) 式で示される。

$$W_c \times 100(\%) \approx 3.0 \left\{ 1 - \frac{(t-t_w)}{100} \right\} G/M_d + \left\{ 17.0 - \frac{(t-t_w)}{12} \right\} \dots (8-13)$$

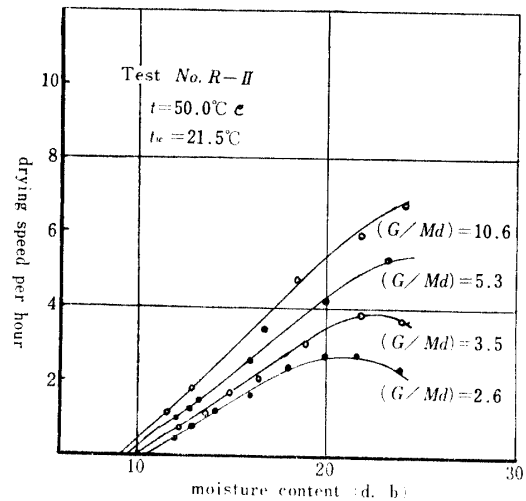


Fig. 8-6. Heat-air temperature=50°C

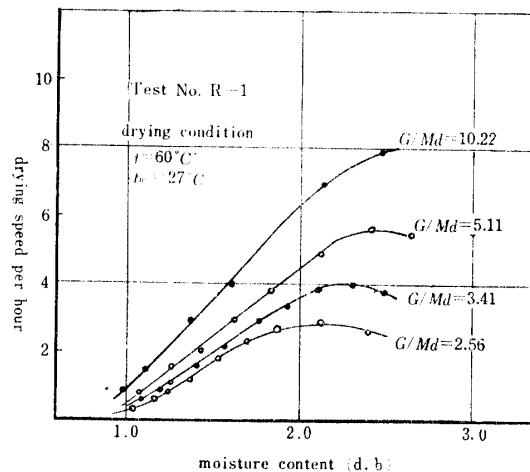


Fig. 8-7. Heat-air temperature=60°C

$G/M_d > 11.0$ の場合, 収穫粳, 小麦についての恒率乾燥期間はなく, 従って限界含水率を考える必要はないと思われる。

平衡含水率は粳及び小麦について $[G/M_d]$ による

Tab. 8-2. Experimental drying speed of constant-rate-drying in each drying condition.

Test No. R - I	$\frac{G}{M_d}$ $(\frac{dw}{d\theta})_{c-exp}$	10.225 0.0794	5.112 0.0572	3.408 0.0308	2.556 0.0282
R - II	$\frac{G}{M_d}$ $(\frac{dw}{d\theta})_{c-exp}$	10.585 0.0680	5.292 0.0542	3.528 0.0379	2.646 0.0271
R - III	$\frac{G}{M_d}$ $(\frac{dw}{d\theta})_{c-exp}$	11.021 0.0530	5.510 0.0427	3.674 0.0305	2.755 0.0235
R - IV	$\frac{G}{M_d}$ $(\frac{dw}{d\theta})_{c-exp}$	9.368 0.0835	4.684 0.0635	3.123 0.0520	2.342 0.0385
R - V	$\frac{G}{M_d}$ $(\frac{dw}{d\theta})_{c-exp}$	9.491 0.0610	4.746 0.0520	3.164 0.0420	2.373 0.0310
R - VI	$\frac{G}{M_d}$ $(\frac{dw}{d\theta})_{c-exp}$	9.560 0.0660	4.780 0.0535	3.187 0.0395	2.390 0.0285
W - I	$\frac{G}{M_d}$ $(\frac{dw}{d\theta})_{c-exp}$	9.374 0.0648	4.687 0.0478	3.125 0.0324	2.343 0.0228
W - II	$\frac{G}{M_d}$ $(\frac{dw}{d\theta})_{c-exp}$	9.491 0.0580	4.746 0.0371	3.164 0.0297	2.373 0.0191
W - III	$\frac{G}{M_d}$ $(\frac{dw}{d\theta})_{c-exp}$	9.560 0.0433	4.780 0.0330	3.187 0.0220	2.390 0.0161

影響は少く，温度推進力 $(t-t_w)$ に影響される。実験結果から， $(t-t_w)$ と平衡含水率 (W_e) との関係をプロットした結果は，Fig. 8-9 のようで W_e と $(t-t_w)$ との間次の実験式が近似的に成立した。

$$W_e = 0.2206 - 0.08275 \log(t-t_w) \quad \dots(8-14)$$

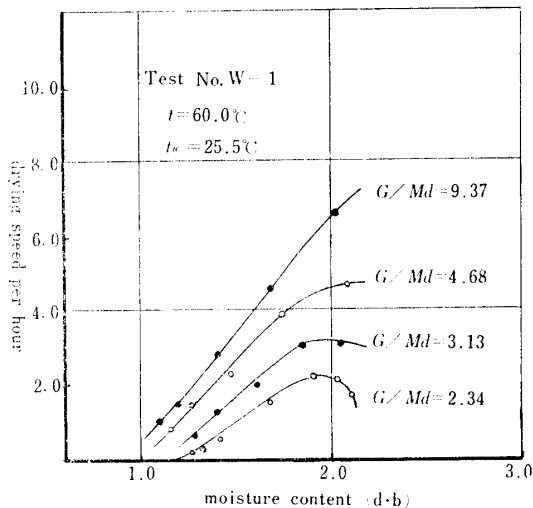


Fig. 8-8. Drying characteristic curves in each G/M_d in the case of the ventilation drying of the wheat grains. (heat-air temperature = 60°C)

(3) 限界自由含水比 (F_c)

減率期間における，乾燥速度を算定する場合に必要な

な限界自由含水比 F_c は， $F_c = (W_c - W_e)$ として与えられる。従って，近似計算式として，熱風温度 $(t-t_w)$ ，風量乾重比 (G/M_d) が既知の場合，実験式 (8-13) 式，(8-14) 式から次式で求められる。

$$F_c = (W_c - W_e) = 0.03 \left\{ 1 - \frac{(t-t_w)}{100} \right\} (G/M_d) + 0.01 \left\{ 17.0 \frac{(t-t_w)}{12} \right\} - \{ 0.2206 - 0.08275 \log(t-t_w) \} \quad \dots(8-15)$$

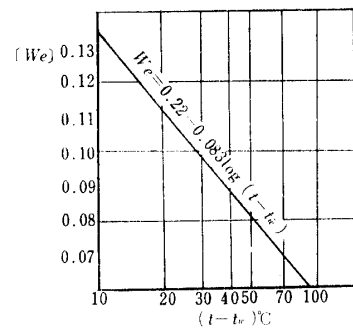


Fig. 8-9. Relationship between $(t-t_w)$ and (W_e) in the case of deep-bed ventilation drying of the unhulled rices.

3. 通気乾燥における穀類の熱容量係数 (h_a) ，物質移動係数 (k_a) ，及び移動単位数 (N_t) について

III 節において述べたように，連続通気乾燥装置に

Tab. 8-3. Drying condition in each test.

Test No.	heat-air condition		G (kg/hr-0.09m ²)	dry sample weight (kg)	accumulated-height (m)
	(t-t _w) (°C)	(H _w -H)(kg/kg)			
R - I	33.0	0.0150	73.62	1.8~28.8	0.05~0.8
R - II	28.5	0.0123	76.21	1.8~28.8	0.05~0.8
R - III	20.2	0.0089	79.35	1.8~28.8	0.05~0.8
W - I	35.0	0.0141	74.95	2.0~32.0	0.05~0.8
W - II	27.5	0.0113	75.93	2.0~32.0	0.05~0.8
W - III	22.0	0.0095	76.48	2.0~32.0	0.05~0.8

おける乾燥速度や装置容積を計算する場合、その乾燥条件における、 h_a , k_a , N_t を各農産物について、求めておくことが必要である。

実験結果より求めた、恒率乾燥速度 R_c [kg/hr] 及び、その乾燥条件における理論最大乾燥速度 R_{max} より N_t , h_a , k_a は次式により求めた。

$$N_t = \log\left(\frac{R_{max}}{R_{max} - R_c}\right)$$

$$h_a = \frac{N_t C_H G_0}{V_p}$$

$$k_a = \frac{N_t G_0}{V_p} \quad \dots(8-16)$$

(1) 実験方法及び乾燥条件

実験方法としては、送風量を一定とし、乾燥材料の堆積高さを16段階に分け、その夫々について、恒率乾燥速度 $(dw/d\theta)_c$ を求め、風量乾重比 (G/M_d) ごとの N_t , h_a , k_a を求めた。乾燥条件は Tab. 8-3 のようである。

(2) 移動単位数 (N_t) と、送風量 G (kg/hr-m³) との関係

籾および小麦について、通気乾燥における N_t と、送風量との関係をプロットすれば、Fig. 8-10-A および Fig. 8-10-B のようになり、熱風条件に関係なく、次の近似式が成立する。

籾の場合 $2.000 < G \quad N_t = 1723.5G^{-0.924}$

$2.000 > G \quad N_t \approx 1.40$

小麦の場合 $2.000 < G \quad N_t = 1113.8G^{-0.877}$

$2.000 > G \quad N_t \approx 1.30$

...(8-17)

(3) 熱容量係数 h_a [Kcal/hr-m³C] と、送風量 G (kg/hr-m³) との関係

籾及び小麦の通気乾燥の場合、熱容量係数と送風量との関係を求めた結果は Fig. 8-11, 8-12 のようである。この結果、穀類 1m³ 当り送風量と、 h_a との間には、次の近似式が得られた。

籾 $2.000 > G \quad h_a = 1.296G^{0.85}$

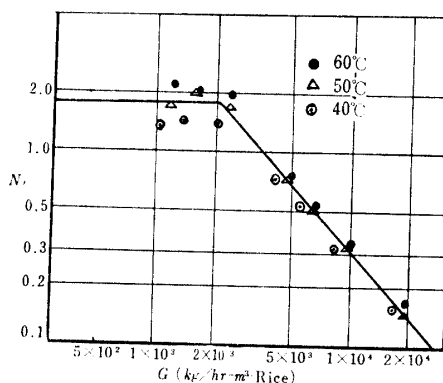


Fig. 8-10-A. Relationship between N_t and G in the case of the ventilation drying of the unhusked rices.

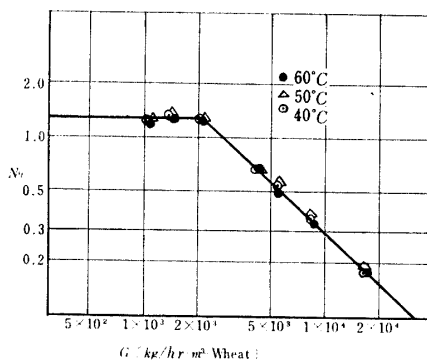


Fig. 8-10-B. Relationship between N_t and G in the case of the ventilation drying of the wheat grains.

” $2.000 < G \quad h_a \approx 800 \sim 900$ (Kcal/hr-m³C)

麦 $2.000 > G \quad h_a = 0.743G^{0.88}$

” $2.000 < G \quad h_a \approx 700 \sim 800$ (Kcal/hr-m³C)

...(8-18)

従って、 G (kg/hr-m³) が 2.000 以下であれば、 h_a は略一定になる。

k_a については、空気、水蒸気系の場合には、 $k_a \approx h_a / C_H$ の関係が近似的に成立するので、(8-18) と同様に算定出来る。

4. 不定常流下における穀類の乾燥特性

連続通気乾燥においては、乾燥材料は、不定常な条

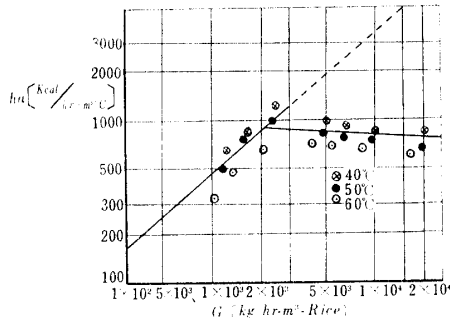


Fig. 8-11. Relationship between ha and G in the case of the ventilation drying of the unhulled rices.

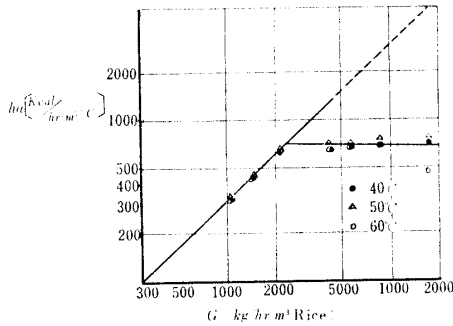


Fig. 8-12. Relationship between ha and G in the case of the ventilation drying of the wheat grains.

件の下で乾燥されるゆえ、この場合の乾燥特性曲線を求めるためには、先ず任意の乾燥条件における乾燥特性曲線を求めそれをもとにして不定流におけるそれを求める必要がある。

(1) 任意の乾燥条件における、乾燥特性曲線の要素の算定

実験結果より、穀類の通気乾燥における乾燥特性は恒率、減率の二期間よりなり、減率期間では、その乾燥速度は、含水率に比例して減少するとの結果を得た。このことから、具体的に任意の乾燥条件における乾燥特性曲線を求めるためには、(1) 恒率乾燥速度、(2) 限界含水率、平衡含水率、(3) 減率乾燥速度勾配を知る必要がある。それ等の一般式は次式で近似的に表わされる。

$$\left(\frac{dw}{d\theta}\right)_c = \frac{G}{M_a} k_c (H_w - H) = \frac{G}{M_a} k_c \frac{C_H}{r_w} (t - t_w)$$

$$k_c = (1 - e^{-Nt}) \text{ 恒率乾燥速度係数}$$

$$\left(\frac{dw}{d\theta}\right)_a = K_a \cdot F = \left(\frac{dw}{d\theta}\right)_c \frac{F}{F_c}$$

$$K_a = \text{減率乾燥速度勾配}$$

$$W_c \approx 0.2206 - 0.08275 \log(t - t_w)$$

(A) 恒率乾燥速度係数 (k_c) と、恒率乾燥速度 ($\frac{dw}{d\theta}$)_c

実験結果から恒率乾燥速度係数 (k_c) と 粳, 小麦の $1 m^3$ 当り送風量 $G(kg/hr-m^3)$ との関係性を求めた結果は、Fig. 8-13, Fig. 8-14 のようである。

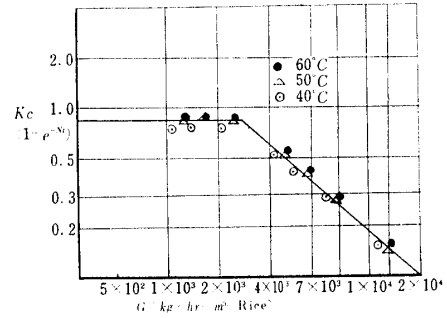


Fig. 8-13. Relationship between K_c and G in the case of the ventilation drying of the unhulled rices.

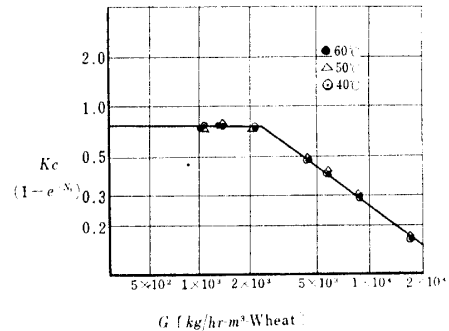


Fig. 8-14. Relationship between K_c and G in the case of the ventilation drying of the wheat grains.

この結果 穀類 $1 m^3$ 当り送風量 $G(kg/hr-m^3)$ と、 k_c との間には次の関係がある。

$$\begin{aligned} \text{粳の場合 } G < 2700(kg/hr-m^3) \quad k_c &\approx 0.82 \\ G > 2700(kg/hr-m^3) \quad k_c &= 597.4G^{-0.84} \end{aligned} \quad \dots(8-19)$$

$$\begin{aligned} \text{麦の場合 } G < 2300(kg/hr-m^3) \quad k_c &\approx 0.78 \\ G > 2300(kg/hr-m^3) \quad k_c &= 244.2G^{-0.77} \end{aligned} \quad \dots(8-20)$$

以上の結果から求めた k_c の値を、恒率乾燥速度算定式に代入し、各熱風条件ごとの恒率乾燥速度 ($\frac{dw}{d\theta}$)_c と送風量 G との関係性をプロットしたものが、Fig. 8-15, Fig. 8-16 で、粳, 小麦ともに $G=3000(kg/hr-m^3)$ 附近で、恒率乾燥速度の風量に対する増加勾配が変化し、次のような関係式が成立する。

籾の場合

$$G < 3000 (\text{kg/hr-m}^3)$$

$$\left(\frac{dw}{d\theta}\right)_c = 5.15 \times 10^{-6} (t-t_w) G^{0.76}$$

$$G > 3000 (\text{kg/hr-m}^3)$$

$$\left(\frac{dw}{d\theta}\right)_c = 2.3 \times 10^{-4} (t-t_w) G^{0.26} \quad \dots(8-21)$$

小麦の場合

$$G < 3000 (\text{kg/hr-m}^3)$$

$$\left(\frac{dw}{d\theta}\right)_c = 2.9 \times 10^{-6} (t-t_w) G^{0.73}$$

$$G > 3000 (\text{kg/hr-m}^3)$$

$$\left(\frac{dw}{d\theta}\right)_c = 2.1 \times 10^{-4} (t-t_w) G^{0.26} \quad \dots(8-22)$$

乾燥条件のうち、 $(t-t_w)$ 、送風量 G 、乾燥材料の無水重量あるいは乾燥材料容量が既知であれば (8-21)、(8-22) 式より、任意の条件における恒率乾燥速度、あるいは恒率期間における毎時蒸発水分量が算定出来る。

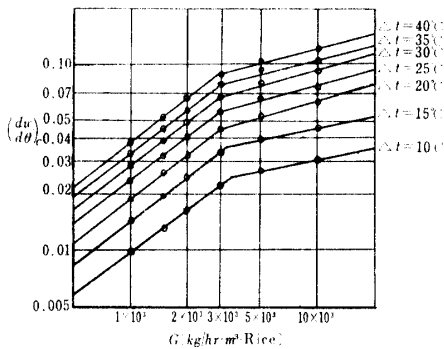


Fig. 8-15. Relationship between $(dw/d\theta)_c$ and G in each $(t-t_w)$ in the case of the ventilation drying of the unhulled rices.

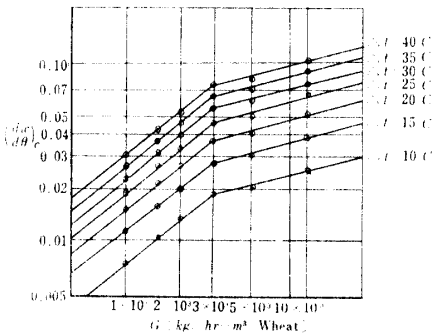


Fig. 8-16. Relationship between $(dw/d\theta)_c$ and G in each $(t-t_w)$ in the case of the ventilation drying of the wheat grains.

(B) 減率乾燥速度 $(dw/d\theta)_a$ 、及び減率乾燥速度勾配 (k_d) と乾燥条件

減率乾燥速度勾配 (k_d) と熱風条件 $(t-t_w)$ との関係、各風量ごとにプロットした結果を Fig. 8-17 に示す。これによると、 k_d の値は $(G \text{ kg/hr-m}^3)(t-t_w)$ の増加につれて増大するが、 $G > 3000$ 以上になれば、 k_d の増加はほとんど僅かであり、近似的に $G=3000$ における乾燥速度勾配に等しいと考えられる (恒率乾燥速度増加も少ない)。

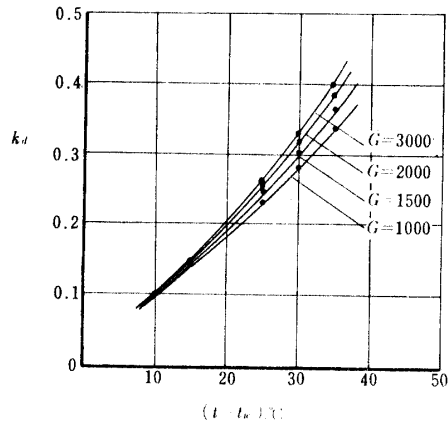


Fig. 8-17. k_d v. s. $(t-t_w)$ curves in each G in the case of the ventilation drying of the unhulled rices.

なお $G < 3000 (\text{kg/hr-m}^3)$ の場合における、 k_d と $(t-t_w)$ との関係実験式は次のようである。

$$G=3000 (\text{kg/hr-m}^3) \quad k_d \doteq 5.5 (t-t_w)^{1.20} \times 10^{-3}$$

$$G=2000 (\text{kg/hr-m}^3) \quad k_d \doteq 6.8 (t-t_w)^{1.15} \times 10^{-3}$$

$$G=1500 (\text{kg/hr-m}^3) \quad k_d \doteq 7.1 (t-t_w)^{1.1} \times 10^{-3}$$

$$G=1000 (\text{kg/hr-m}^3) \quad k_d \doteq 7.8 (t-t_w)^{1.06} \times 10^{-3}$$

また、小麦における k_d については第1報に記載した。

$$(註) \quad k_d = \{34.0(H_w - H)^{1.46} + 0.054\} \{(G/M_d) - 0.24\}$$

(2) 不定常流下における穀類の乾燥特性曲線

不定常流下での穀類の乾燥特性曲線を求めるため、まず風量乾重量比 (G/M_d) あるいは、穀類 1 m^3 当り送風量 $G (\text{kg/hr-m}^3)$ ごとに、各熱風条件下における定常流乾燥特性曲線を前記方法で求める (籾については Fig. 8-18, Fig. 8-19, Fig. 8-20, Fig. 8-21 にそれぞれ $G=1000, 1500, 2000, 3000 (\text{kg/hr-m}^3)$ -rices の場合を例示)。

籾の向流連続通気乾燥を行った場合の、乾燥特性曲線を求めるため、乾燥条件の設定を次のように行った。

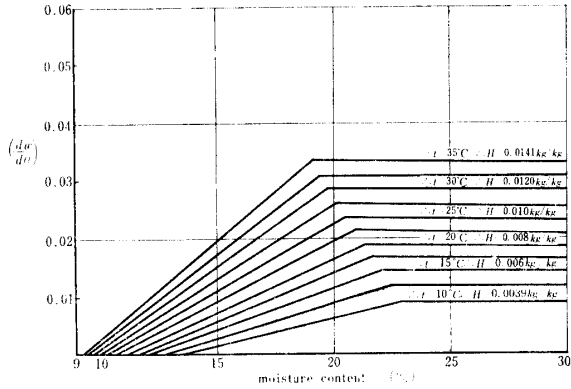


Fig. 8-18. $G=1000$ ($kg/hr\cdot m^3\cdot R$).

Fig. 8-18.~Fig. 8-21. The calculated drying characteristic curves in each $(t-t_w)$ in the case of the deep-bed ventilation drying of the unhulled rices.

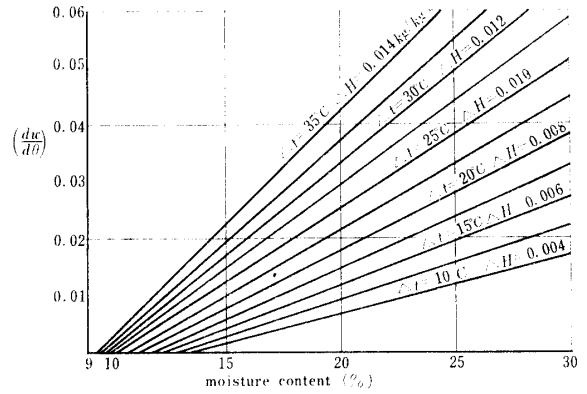


Fig. 8-21. $G=3000$ ($kg/hr\cdot m^3\cdot R$).

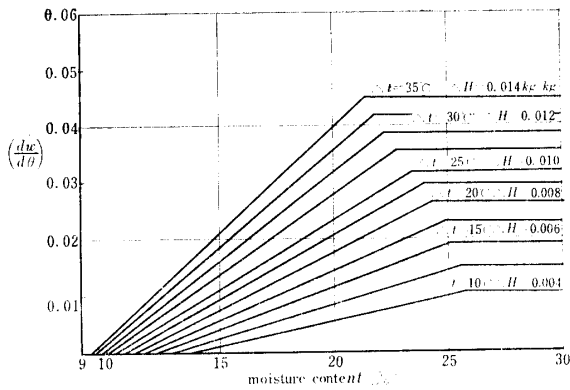


Fig. 8-19. $G=1500$ ($kg/hr\cdot m^3\cdot R$).

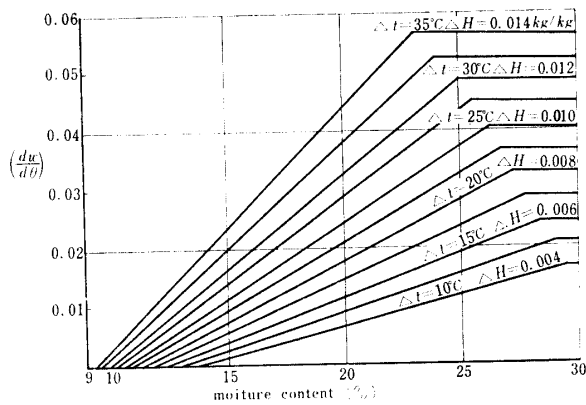


Fig. 8-20. $G=2000$ ($kg/hr\cdot m^3\cdot R$).

(A) G/M_d 一定で熱風温度が $40^\circ C$, $50^\circ C$, $60^\circ C$ の場合 (Fig. 8-22)

設定した乾燥条件,

外気温度, 湿度, $t=14^\circ C$ $H=0.006(kg/kg)^*$

送風量 (G) $5000(kg/hr)$

毎時処理籾重量 (無水状態) $400(kg/hr)$

含水率 (乾量基準), 乾燥前 26.0%

乾燥後 16.0%

熱風温度 $40^\circ C$, $50^\circ C$, $60^\circ C$

* 鹿児島県11月平均温度, 湿度

(B) 熱風温度, 送風量一定で毎時処理量を変えた場合 (Fig. 8-23)

設定した乾燥条件

外気温度, 湿度, $t=14^\circ C$ $H=0.006(kg/kg)$

送風量 $3000(kg/hr)$

含水率 (乾量基準), 乾燥前 26.0%

乾燥後 16.0%

熱風温度 $60^\circ C$

毎時処理籾重量 $100kg$, $200kg$, $300kg$, $400kg$

乾燥条件 (A) における不定常乾燥特性曲線は Fig. 8-22 に, 乾燥条件 (B) におけるそれは Fig. 8-23 のようになる。

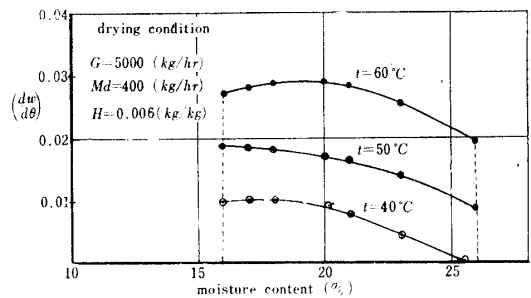


Fig. 8-22. Unsteady-state drying characteristic curves of the ventilation-continuous-drying of the unhulled rices by the counter-current, which are calculated by the experimental results, in each heat-air temperature.

5. 不定常流下での穀類の乾燥所要時間

連続通気乾燥における乾燥特性曲線から, 乾燥速度

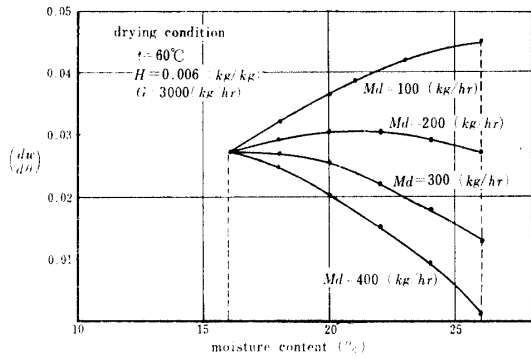


Fig. 8-23. Unsteady-state drying characteristic curves of the ventilation-continuous-drying of the unhulled rices by the counter-current, which are calculated by the experimental results, in each supply of dry-weight per hour.

の逆数をプロットして曲線と横軸の W_1 , W_2 の線に囲まれた面積によって、乾燥時間を算定出来る。

$$\theta_d = \int_{w_1}^{w_2} \left(-\frac{d\theta}{dw} \right) dw$$

この様にして、前記乾燥条件、(A)、(B) の場合における含水率と乾燥時間との関係を計算した結果は、Fig. 8-24 および Fig. 8-25 に示す。

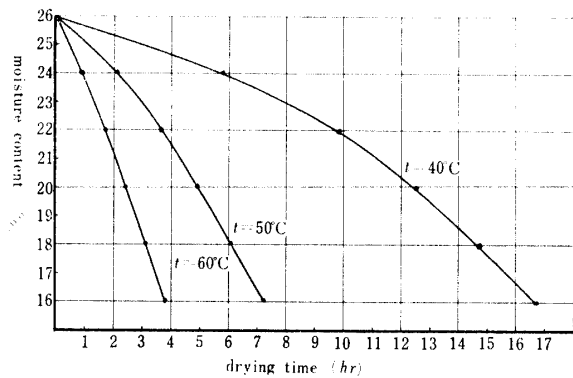


Fig. 8-24. The calculated drying curves (moisture vs. drying time) in the case of the ventilation-continuous-drying of the unhulled rices by the counter-current in each heat-air temperature.

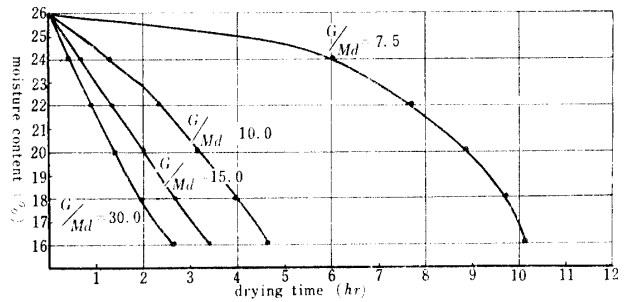


Fig. 8-25. The calculated drying curves (moisture vs. drying time) in the case of the ventilation-continuous-drying of the unhulled rices by the counter-current in each G/Md .

本章第3節で導いた式 (8-6-1) により、乾燥条件 A の場合における乾燥所要時間を計算すれば Tab. 8-4 のようになり、前述乾燥特性曲線から求めた乾燥所要時間と比較した結果は Fig. 8-26 のようである。この結果、多少の誤差はあるが、概算値計算には式 (8-6-1)、式 (8-6-2) を用いて計算して差支えないと思われる。

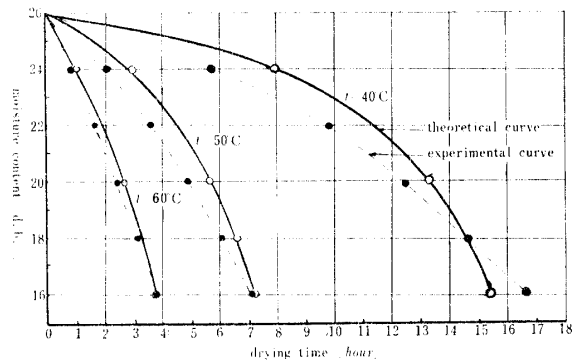


Fig. 8-26. Comparison between the theoretical drying curves and experimental ones in the case of the ventilation-continuous-drying of the unhulled rices by the counter-current in each heat-air temperature.

Tab. 8-4. The drying time calculated by the theoretical formulas in the case of (A) drying condition.

heat-air temp. (°C)	moisture content before the drying (%)	the drying time (hr)		
		m. c.=24%	m. c.=20%	m. c.=16%
40	26.0	7.71	13.35	15.43
50	26.0	3.04	5.66	7.10
60	26.0	1.30	2.75	3.75

$G=5000$ (kg/hr), $M_a=400$ (kg/hr).
open air temp.=20°C, absolute humidity=0.006(kg/kg)

V. 摘 要

(1) 厚層通気, 定常流乾燥の場合, 穀類 1 m^3 当り送風量 $G(\text{kg/hr-m}^3)$ と熱容量係数 $h_a(\text{Kcal/hr-m}^3\text{-}^\circ\text{C})$ との間では, $G < 2000(\text{kg/hr-m}^3)$ の範囲では

$$\text{粳の場合 } h_a \approx 1.30G^{0.85}(\text{Kcal/hr-m}^3\text{-}^\circ\text{C})$$

$$\text{麦の場合 } h_a \approx 0.74G^{0.88}(\text{Kcal/hr-m}^3\text{-}^\circ\text{C})$$

の関係が認められる. なお $G > 2000(\text{kg/hr-m}^3)$ の場合, h_a はほぼ一定となり粳の場合, $800 \sim 900(\text{Kcal/hr-m}^3\text{-}^\circ\text{C})$, 麦の場合, $700 \sim 800(\text{Kcal/hr-m}^3\text{-}^\circ\text{C})$ となる.

(2) 上記と同様の場合物質移動係数 N_t と, 送風量 G の間には, $G < 2000(\text{kg/hr-m}^3)$ の範囲では

$$\text{粳の場合 } N_t \approx 1723.5 G^{-0.92}$$

$$\text{麦の場合 } N_t \approx 1113.8 G^{-0.88}$$

の関係が成立する. $G > 2000(\text{kg/hr-m}^3)$ の場合, N_t は略一定と見做され, 粳で 1.40, 小麦で 1.30 である.

(3) 恒率乾燥速度係数 k_c と, 送風量 $G(\text{kg/hr-m}^3)$ をしらべた結果, 穀類 1 m^3 当り送風量 G が粳 2700, 麦 2300(kg/hr) 以下では

$$\text{粳の場合 } k_c \approx 0.82$$

$$\text{麦の場合 } k_c \approx 0.78$$

でそれ以上の送風量の場合では

$$\text{粳の場合 } k_c \approx 597.3 G^{-0.84}$$

$$\text{麦の場合 } k_c \approx 244.2 G^{-0.77}$$

の結果を得た. また G が $3000(\text{kg/hr-m}^3)$ 附近で恒率乾燥速度勾配が変化する (Fig. 8-15, Fig. 8-16 参照).

(4) 減率期間における減率乾燥速度勾配 (k_d) は本文 Fig. 8-17 に示すように, 温度推進力 ($t-t_w$) の影響にくらべ, 風量乾重比による影響は少く, $G=3000(\text{kg/hr-m}^3)$ 以上においては G/M_d の影響はほとんどみとめられない.

(5) 通気定常流下における穀類の乾燥特性曲線において, この実験範囲では減率期間における乾燥速度は, 含水率に比例して減少すると見做される. 限界含水率 (乾量基準) については, 本文 (8-13) 式で, 平衡含水率については (8-14) 式に, その実験式を記載した. なお $G/M_d > 11.0$ の場合, 粳, 小麦についての恒率乾燥期間は, ほとんどなく, 乾燥後直ちに減率乾燥に移行する.

(6) 通気不定常流下における乾燥特性曲線を設定された任意の乾燥条件の下で求め, それから近似的乾燥能率を算定した.

第9章 イ草の熱風乾燥法に関する研究

(Studies on the drying methods of the rushes with heat-air.)

目 次

第1節	熱風乾燥におけるイ草の乾燥速度に関する基礎的実験
実験 I.	高温熱風による泥染イ草からの乾燥
実験 II.	低温熱風による生イ草からの乾燥
実験 III.	泥染が乾燥速度におよぼす影響, および乾燥部位による乾燥速度の相違
実験 IV.	生干し状態からの乾燥
実験 V.	たてずみ状態からの乾燥
第2節	熱風乾燥とイ草の品質について
第3節	イ草の通気貯蔵乾燥とイ草の貯蔵性
第4節	含水率とイ草の貯蔵性
第5節	イ草の天日乾燥に関する調査
第6節	摘 要

イ草栽培農家は 56,000 戸, 主として, 瀬戸内 (広島, 岡山), 九州地方 (福岡, 熊本) に産地を形成し, その栽培面積 15,000 ha, 年間販売額 150 億円 (昭和 41 年度) に達し, 換金作物として比較的有利であるとされる. しかし, その栽培面積を制約するものとして, 刈取, 収穫作業 (7 月~8 月) の困難があり, そのうち, これの乾燥の労力が大部分をしめる. イ草の人工乾燥に関しては, それ自体が日本における地域的産物であるため, これに関する研究は少く, 特に熱風乾燥法に関する報告では, 岡山農試¹⁾, 広島農試²⁾ 報告があるのみである.

この研究は主として, 実用的面からイ草の人工乾燥法の検討を行ったもので, 昭和 35 年~昭和 39 年に行った研究をとりまとめたものである.

第1節 熱風乾燥におけるイ草の乾燥速度に関する基礎的実験

イ草の乾燥は刈取り後の生イ草を泥染し, 泥水附着状態で直ちに乾燥を行なうため, 乾燥初期には, 泥水の影響が顕著であること, 及び, 長茎作物であるためその根部と, 先端部とは乾燥速度が異なるという特異性がある.

したがって, この実験では処理別として泥染めおよび, 非泥染めの場合, 乾燥方式として, 送風方向に直角にならべる「横ずみ」及び送風方向に垂直にならべる「たてずみ」の場合, また乾燥方法として, 刈取り直後からの乾燥と, 1 日天日で乾燥してからの, 「生干し」状態からの乾燥に区分して行った.

熱風温度は, 急速乾燥を目的とした高温乾燥 ($70^\circ\text{C} \sim 90^\circ\text{C}$) と, 市販乾燥機を利用する場合の, 実用熱風

温度である。65°C~35°C について検討した。

なお本文中における略記号は次のようである。

M_w : 材料重量 (kg)

M_d : 無水材料重量 (kg)

W_d : 乾量基準含水比

W_w : 湿量基準含水比

t, t_w : 熱風温度, 及び温度 t における湿球温度 (°C)

H, H_w : 絶対湿度, 及び飽和絶対湿度 (kg/kg)

G : 質量風量 (kg/hr)

V : 送風量 (m³/hr)

〔実験 I〕 高温熱風による泥染め, 生イ草からの乾燥

乾燥速度を上げるため, イ草乾燥の限界温度附近と思われる 90°C~70°C の高温熱風下における乾燥速度について検討した。高温で送風量が多い場合における乾燥特性曲線, および乾燥速度算定式については, 既報, 第1報, 第2節, 農産物の乾燥特性の項で, また, 高温熱風下で懸念されるイ草自身の品質については, 本報, 第2節, 熱風乾燥とイ草の品質の項に記載した。

1. 実験方法, および乾燥条件

実験装置は Fig. 9-1 のようで, 熱風温度は 90°C~70°C, 送風量は約 90(kg/hr) にコントロールした。

乾燥箱は床面積 0.3 m×0.3 m=0.09 m², 高さは1段 0.05 m で 10 段堆積し, 下層から熱風を強制通気し乾燥した。

実験時における乾燥条件は Tab. 9-1 のようである。

2. 実験結果

各堆積層ごと, および各堆積高さ (風量乾重比) ごとの, 乾量基準含水比の時間的变化を, 測定した結果は Tab. 9-2, Tab. 9-3 のようである。

〔実験 II〕 低温熱風による生イ草からの乾燥

市販の通風乾燥機を利用する場合, そのセットされたバーナーの性能, 使用条件等から考えて, 一般に 65°C 以下の比較的低温熱風で乾燥する場合が多い。

この実験では熱風温度 65°C~35°C の間におけるイ草の乾燥について検討した。

1. 実験装置, および乾燥条件

実験装置は実験 I に準ずるが, 乾燥箱の段数は4段階で行なった。実験における乾燥条件は Tab. 9-4 のようである。

2. 実験結果

各乾燥条件下における平均含水比 (乾量基準) の時間的变化を追跡した結果は, Fig. 9-2~Fig. 9-7 のようである。

3. 〔実験 I〕〔実験 II〕の考察

(1) 横ずみ通気乾燥における, イ草の乾燥特性

Tab. 9-1. Drying conditions in the case of the ventilation drying of the dyed rushes with high heat-air.

Test No.	drying-sample				heat-air conditions				G (kg/hr)
	treatment	M_w (kg)	W_w (%)	t (°C)	t_w (°C)	H (kg/kg)	H_w (kg/kg)		
I-1	dyed	0.5×10	75.0	70.0±0.5	34.0	0.0200	0.034	125.0	
I-2	"	0.5×10	75.0	80.0±0.5	36.0	0.0200	0.038	125.0	
I-3	"	0.5×10	75.0	90.0±0.5	38.0	0.0220	0.043	125.0	

notes : Variety of rushes : Sazanami, drying floor area : 0.3m×0.3m

Tab. 9-2. Relationship between moisture content and drying time in each bed.

Test No.	drying time (hr-min)	positions of the bed. (height from the base. cm)									
		0~5	5~10	10~15	15~20	20~25	25~30	30~35	35~40	40~45	45~50
I-1 (70°C)	1-00	0.647	0.901	1.060	1.200	1.450	1.717	2.020	2.356	2.660	2.937
	2-00	0.175	0.319	0.400	0.414	0.460	0.543	0.700	0.919	1.120	1.381
	3-00	0.120	0.183	0.220	0.255	0.280	0.319	0.350	0.383	0.420	0.477
	4-00	0.095	0.159	0.170	0.199	0.220	0.238	0.260	0.279	0.300	0.319
I-2 (80°C)	1-00	0.376	0.543	0.700	0.833	1.160	1.538	1.980	2.413	2.740	2.953
	2-00	0.167	0.225	0.320	0.376	0.420	0.502	0.660	0.748	1.380	2.056
	3-00	0.100	0.143	0.180	0.209	0.230	0.259	0.300	0.333	0.420	0.500
	4-00	0.083	0.117	0.135	0.144	0.160	0.182	0.200	0.213	0.240	0.259
I-3 (90°C)	1-30	0.064	0.700	—	0.136	—	0.250	—	0.471	—	1.326

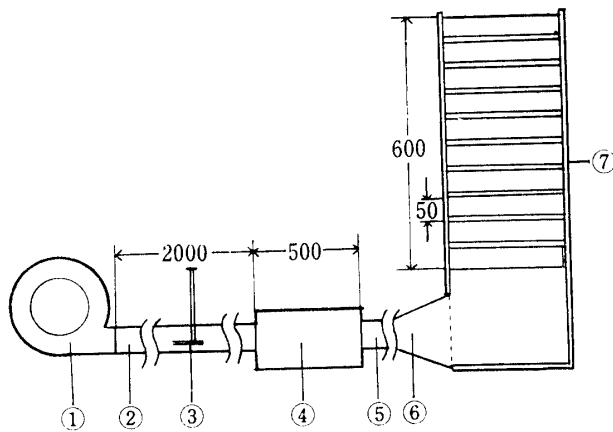
Tab. 9-3. Relationship between G/M_d and mean moisture-content in the case of deep bed ventilation-drying of the dyed-rushes.

Test No.	drying time (hr-min)	ratio of air-quantity to dry-sample weight (G/M_d)					
		50	100	125	267	250	500
I-1	1-00	0.647	0.774	0.952	1.162	1.418	1.694
	2-00	0.175	0.247	0.327	0.385	0.491	0.643
	3-00	0.120	0.151	0.194	0.229	0.263	0.300
	4-00	0.095	0.127	0.155	0.177	0.201	0.223
I-2	1-00	0.376	0.459	0.612	0.857	1.191	1.522
	2-00	0.167	0.196	0.272	0.335	0.427	0.685
	3-00	0.100	0.121	0.157	0.186	0.218	0.266
	4-00	0.083	0.100	0.119	0.136	0.153	0.172
I-3	1-30	0.064	—	—	—	—	—

Tab. 9-4. Drying conditions of the dyed rushes under lower heat-air.

Test No.	drying samples		heat-air conditions						G m ³ /hr
	treatment	M_w (kg)	W_w (%)	t (°C)	t_w (°C)	H (kg/kg)	H_w (kg/kg)	$(t-t_w)$ (°C)	
II-1	dyed	0.5 × 4	76.5	50.0	25.5	0.0105	0.0205	14.5	150.0
II-2	"	1.0 × 4	71.5	64.0	29.0	0.0140	0.0270	35.0	106.0
II-3	"	0.75 × 4	74.2	55.0	28.5	0.0140	0.0250	26.5	160.7
II-4	"	0.75 × 4	68.2	52.5	27.0	0.0130	0.0225	25.5	145.2
II-5	"	0.75 × 4	69.5	48.0	27.0	0.0150	0.0225	21.0	155.8
II-6	"	0.75 × 4	72.0	34.0	22.3	0.0125	0.0170	11.7	140.0

notes : Variety of rushes : Sazanami, floor area : 0.3m × 0.3m



① Blower ② Air flow pipe ③ Pitot tube
④ Heater box ⑤ Rectifying actor
⑥ Temperature controller ⑦ Drying case

Fig. 9-1. The apparatus for the ventilation-drying by heat-air in the case of the rushes.

乾燥量に較べ、風量が充分に多いときは、第1報に記載したように、乾燥速度は含水率に比例して減少し毎時乾燥速度 $(dw/d\theta)_a$ は、近似的に次式で表わされる。

イ草先端部の場合

$$\left(\frac{dw}{d\theta}\right)_a = 1.8(t-t_w)^{1.21}(W_1-0.10) \times 10^{-2}$$

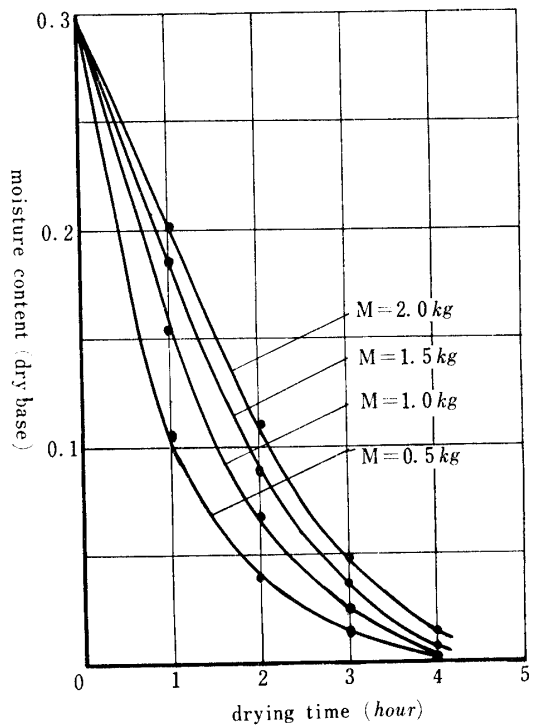


Fig. 9-2. Experimental results of test No. II-1.

Fig. 9-2.~9-7. The experimental drying curves (moisture vs. drying time) in each accumulated weight in the case of the ventilation drying of the dyed rushes.

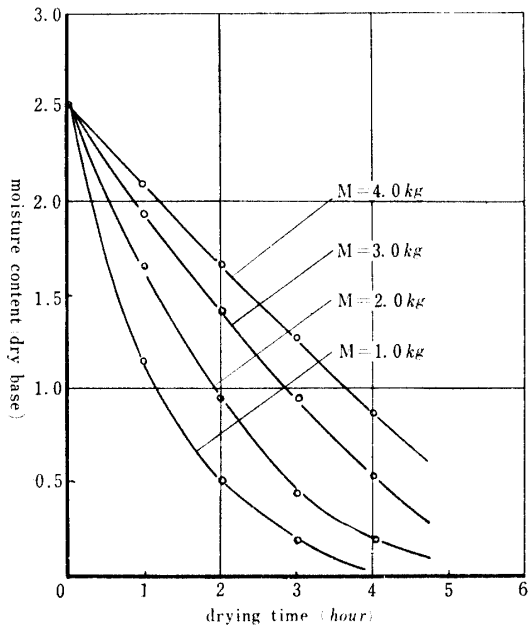


Fig. 9-3. Experimental results of test No. II-2.

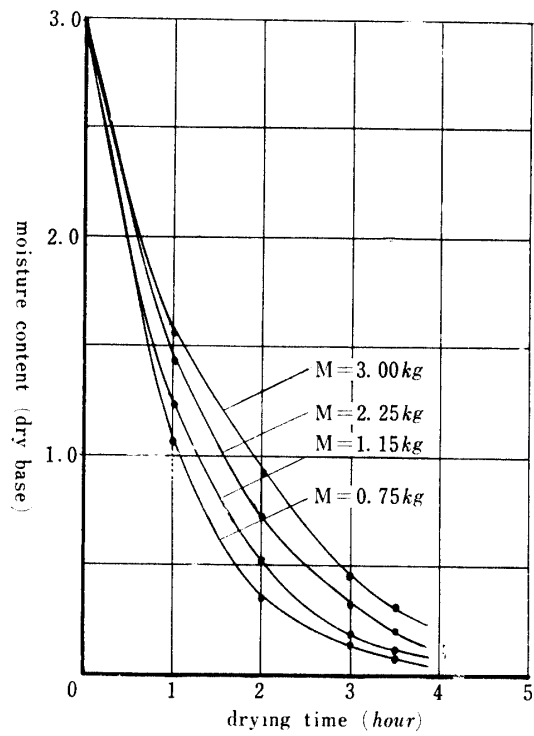


Fig. 9-5. Experimental results of test No. II-4.

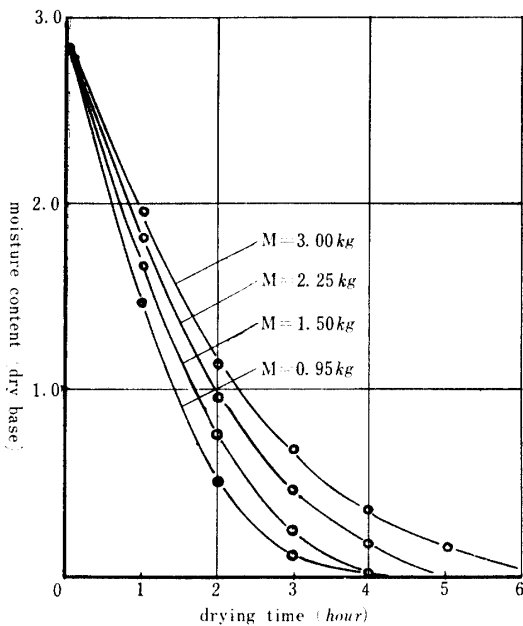


Fig. 9-4. Experimental results of test No. II-3.

イ草根元部の場合

$$\left(\frac{dw}{d\theta}\right)_a = 6.4(t-t_w)^{1.39}(W_1-0.06) \times 10^{-3}$$

厚層通気の場合の乾燥特性曲線の1例を Fig. 9-8 に示す。すなわち G/M_a が小さくなれば、一般に恒率乾燥、減率乾燥期間(減率1段、および2段)に区分される。

(2) 横ずみ通気乾燥における乾燥速度、および乾燥所要時間

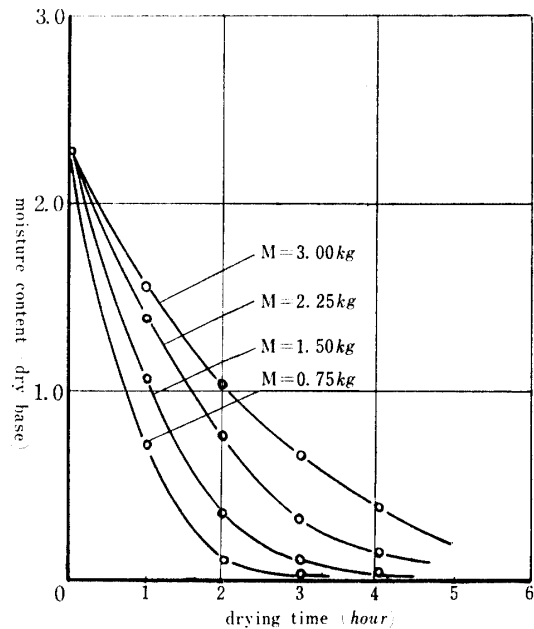


Fig. 9-6. Experimental results of test No. II-5.

上記乾燥条件下における乾燥速度および乾燥所要時間について恒率乾燥期間と減率乾燥期間とに分けて検討する。

(A) 恒率乾燥期間

実験 I, II の結果から各乾燥条件下での恒率乾燥速

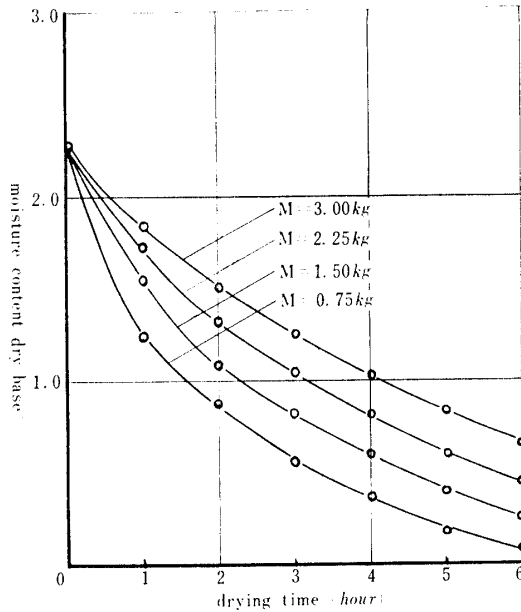


Fig. 9-7. Experimental results of test No. II-6.

度 $(dw/d\theta)_{c-exp}$ および恒率乾燥速度係数 (k_c) を算定すれば Tab. 9-5 のようである。

この結果 (k_c) と (G/M_d) との関係をつプロットすれば Fig. 9-9 のようになり、次の関係が成立する、

$$G/M_d < 170(\text{kg/kg-hr}) \quad k_c \doteq 0.50$$

$$G/M_d > 170(\text{kg/kg-hr}) \quad k_c \doteq 11.4(G/M_d)^{-0.61} \quad \dots(9-1)$$

すなわち G/M_d が $170(\text{kg/kg-hr})$ 以下では、 k_c の値はほぼ一定となり蒸発水分量は G と $(H_w - H)$ に比例して増大するが、 G/M_d が 170 以上になると、 k_c の値は (9-1) 式のように G/M_d の増加につれて減少する。

(9-1) 式より、恒率乾燥速度の一般近似式は次のようである。

$G/M_d < 170(\text{kg/kg-hr})$ の場合

$$\left(\frac{dw}{d\theta}\right)_c \doteq 0.50 \left(\frac{G}{M_d}\right) (H_w - H)$$

$$= 0.50 \left(\frac{G}{M_d}\right) \left(\frac{C_H}{r_w}\right) (t - t_w) \quad \dots(9-2-a)$$

$G/M_d > 170(\text{kg/kg-hr})$ の場合

$$\left(\frac{dw}{d\theta}\right)_c \doteq 11.4 \left(\frac{G}{M_d}\right)^{0.39} (H_w - H)$$

$$= 11.4 \left(\frac{G}{M_d}\right)^{0.39} \left(\frac{C_H}{r_w}\right) (t - t_w) \quad \dots(9-2-b)$$

またこの期間において、含水比 W_1 から限界含水比 W_c まで乾燥するに要する乾燥所要時間 (θ_c) は次式

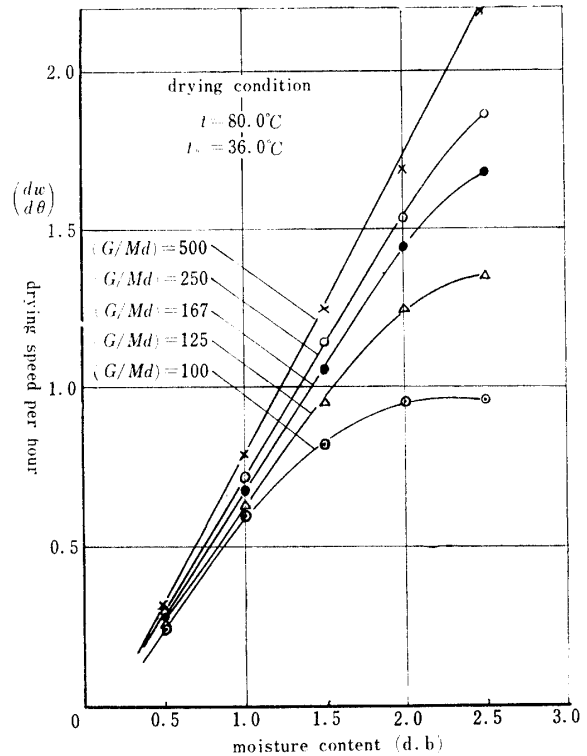


Fig. 9-8-1. Drying characteristic curves in each G/M_d in the case of deep-bed ventilation-drying of the dyed rushes.

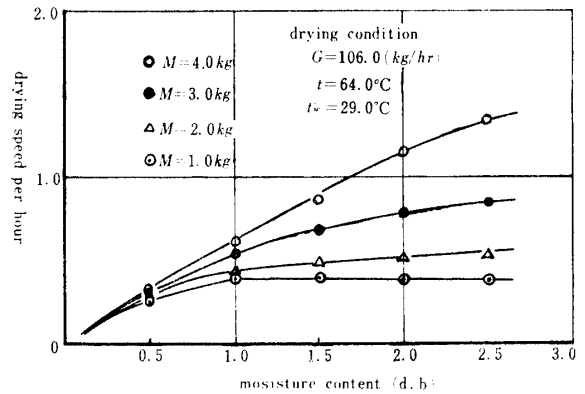


Fig. 9-8-2. Drying characteristic curves in each G/M_d in the case of deep-bed ventilation drying of the dyed rushes.

で求められる。

$G/M_d < 170(\text{kg/kg-hr})$ の場合

$$\theta_c = \frac{W_1 - W_c}{(dw/d\theta)_c} = \frac{W_1 - W_c}{0.50(G/M_d)(H_w - H)}$$

$$= \frac{W_1 - W_c}{0.50(G/M_d)(C_H/r_w)(t - t_w)} \quad \dots(9-3-a)$$

$G/M_d > 170(\text{kg/kg-hr})$ の場合

Tab. 9-5. $\left(\frac{dw}{d\theta}\right)_{c-exp}$ and (k_c) during the constant-rate-drying in each drying condition.

Test No.	G/M_d	heat-air conditions		$(dw/d\theta)_{c-exp}$	k_c
		$(t-t_w)$ (°C)	(H_w-H) (kg/kg)		
I-1-(1)	500.0	36.0	0.0140	1.800	0.257
	(2) 250.0	36.0	0.0140	1.40	0.400
	(3) 166.7	36.0	0.0140	1.19	0.502
	(4) 125.0	36.0	0.0140	0.93	0.530
	(5) 100.0	36.0	0.0140	0.66	0.470
I 2-(1)	500.0	44.0	0.0180	2.35	0.261
	(2) 250.0	44.0	0.0180	1.74	0.387
	(3) 166.7	44.0	0.0180	1.49	0.497
	(4) 125.0	44.0	0.0180	1.16	0.515
	(5) 100.0	44.0	0.0180	0.83	0.461
II-1-(1)	1490.6	24.5	0.0101	2.07	0.139
	(2) 741.0	24.5	0.0101	1.61	0.218
	(3) 494.0	24.5	0.0101	1.35	0.272
	(4) 370.5	24.5	0.0101	1.14	0.303

notes : $(dw/d\theta)_{c-exp}$: experimental values of constant-rate-drying-speed
 k_c : the coefficient of constant-rate-drying speed.

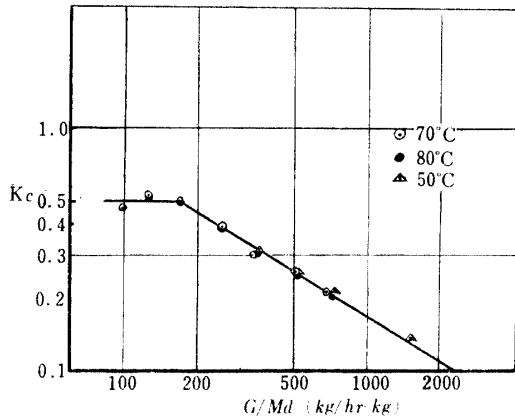


Fig. 9-9. Relationship between K_c and G/M_d in the case of ventilation drying of the dyed rushes.

$$\theta_c = \frac{W_1 - W_c}{11.4(G/M_d)^{0.39}(H_w - H)}$$

$$= \frac{W_1 - W_c}{11.4(G/M_d)^{0.39}(C_H/r_w)(t - t_w)} \dots(9-3-b)$$

(B) 減率乾燥期間

減率乾燥期間において (G/M_d) が大なる場合は、その乾燥速度は含水率に比例して減少するが、 (G/M_d) が小になるにつれその乾燥特性曲線は上方に凸なる形式となる。その限界点は上記実験より、 $G/M_d = 120 \sim 150$ 附近である。 G/M_d が $120 \sim 150$ 以上の場合における k_d と $(t-t_w)$ の関係を G/M_d ごとにプロットした結果を、Fig. 9-10 に示す。

すなわち、各 G/M_d ごとの k_d と $(t-t_w)$ との間には、次の関係がある [適用範囲 $10^\circ\text{C} < (t-t_w) < 45$

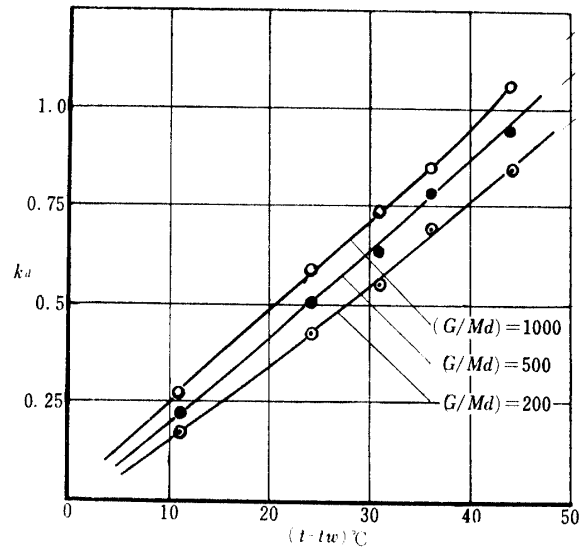


Fig. 9-10. K_d vs. $(t-t_w)$ curves of each G/M_d during the decreasing rate drying in the dyed rushes.

$$G/M_d = 1000(\text{kg/kg-hr})$$

$$k_d = 2.38(t-t_w) \times 10^{-2}$$

$$G/M_d = 500(\text{kg/kg-hr})$$

$$k_d = 2.16(t-t_w) \times 10^{-2} + 1.0$$

$$G/M_d = 200(\text{kg/kg-hr})$$

$$k_d = 1.94(t-t_w) \times 10^{-2} + 3.0$$

$$\dots(9-4)$$

この期間における任意の含水率 W_1 における乾燥速度を求めるには設定された乾燥条件より、乾燥速度勾配 k_d を求め次式に代入して、近似算定を行なう。

Tab. 9-6. Experimental values of moisture content range (ΔW) in each G/M_d in the drying of the laying-down rushes.

Test No.	ratio of the air-quantity to the dry sample weight						drying time (hr)
	736.3	368.2	184.1	122.2	92.0	73.6	
I-1 $t=70^\circ\text{C}$	20.0 0	28.0 8.0	35.5 15.0	43.5 23.5	55.5 35.5	65.0 45.0	1.65
I-2 $t=80^\circ\text{C}$	20.0 0	25.0 5.0	33.0 13.0	45.0 25.0	60.0 40.0	69.5 49.5	1.40
I-3 $t=90^\circ\text{C}$	20.0 0	27.0 7.0	34.0 14.0	43.0 23.0	54.5 34.5	65.5 45.0	0.6

$$\left(\frac{dw}{d\theta}\right)_a = k_a \cdot W_1$$

G/M_d が 120~150 以下の場合.

この場合は $k_a \sim W$ 曲線が上方に凸であるので G/M_d が同一であればイ草の場合にも次の関係式が適用出来る.

$$\frac{\phi_{c1}}{\phi_{c2}} = \frac{\phi_{a1}}{\phi_{a2}}$$

ϕ_{c1} , ϕ_{a1} = 条件 (1) における恒率, 減率乾燥速度
 ϕ_{c2} , ϕ_{a2} = 条件 (2) における恒率, 減率乾燥速度

したがって上記実験結果より任意の熱風条件における, 各 (G/M_d) ごとの乾燥特性曲線を求めておき, 一方各乾燥条件ごとの, 恒率乾燥速度 (ϕ_c) を式 (9-1) を用いて求めれば, 任意の含水率 W_1 における, 減率乾燥速度は, $\phi_{a2} = \phi_{a1}(\phi_{c2}/\phi_{c1})$ より算定出来る.

(3) 横ずみの場合の水分較差

イ草を横ずみ静置したまま, 強制通気乾燥した場合, 上, 下層の水分較差がいちじるしく生ずる. 下層を過乾すれば, 折れによる損害, および弾力の消失があり, 上層が未乾燥状態だと保存中に黄褐色に変色し, 商品価値をいちじるしくおとす.

したがって生イ草から生干し程度まで乾燥する場合下層含水率が 20% (湿量基準) の場合, 上層含水率との較差 (ΔW) を比較してみると Tab. 9-6 のようになる.

Tab. 9-6 より各熱風条件における下層含水率と上層含水率の較差 (ΔW) をプロットすれば Fig. 9-11 のようになり, 高温の場合には, 含水率較差は熱風温度の影響は少なく, (G/M_d) の影響が大である.

実用的な場合として, 下層含水率が 20% の場合の上層含水率との水分較差 $\Delta W(\%)$ と, G/M_d との関係は次式で求められる.

適用範囲 ($t=70^\circ\text{C} \sim 80^\circ\text{C}$, $G/M_d=70 \sim 400$)

$$\Delta W(\%) = 11208(G/M_d)^{-1.27} \dots (9-5)$$

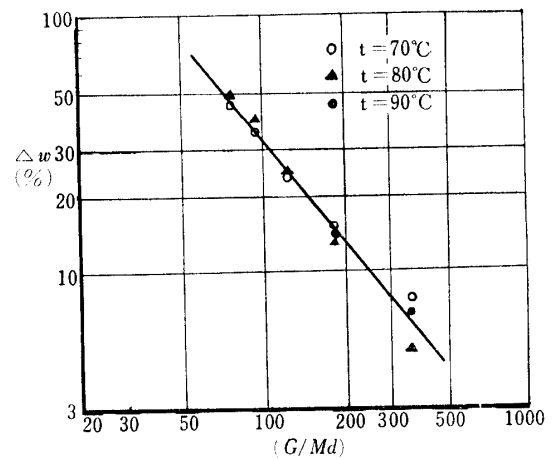


Fig. 9-11. Relationship between the moisture content range (Δw) and G/M_d in the case of ventilation drying of the dyed rushes.

したがって含水率較差が 10% 以内であれば, (G/M_d) は 250 以上で, 8% 以内であれば [G/M_d] は 300 以上で乾燥する必要がある.

〔実験 III〕 泥染めが乾燥速度におよぼす影響, および乾燥部位による乾燥速度の相違

泥染めが乾燥に影響する程度, および, イ草根元, 先端により乾燥速度が, 如何程度異なるかを比較した.

1. 実験装置, および乾燥条件

実験装置は実験 I, II と同様で乾燥箱材質は, 吸湿の影響を考慮してすべて, ジュラルミンとして, 堆積高さを 6 区分した. 乾燥条件の大略は Tab. 9-7 のようである.

2. 実験結果

各乾燥条件における含水率対乾燥時間の測定結果は Fig. 9-12~Fig. 9-16 のようである.

3. 実験結果の整理および考察

(1) 各乾燥条件下での恒率乾燥速度 ($dw/d\theta$)_c, 恒率乾燥速度係数 k_c , および熱容量係数 h_a

Tab. 9-7. Drying conditions in the case of the ventilation drying of the dyed rushes and the undyed rushes.

Test No.	drying position, treatment	heat-air conditions				sample weight (kg)		G (kg/hr)	initial moisture content (w.b) (%)
		t (°C)	t _w (°C)	H (kg/kg)	H _w (kg/kg)	wet	dry		
III-1	dyed, upper part	75.0	32.5	0.0145	0.0325	0.56×60.	17×6	127.7	68.5
III-2	dyed, lower part	75.0	32.5	0.0145	0.0325	0.74×60.	200×6	110.3	73.0
III-3	undyed, lower part	75.0	32.5	0.0145	0.0325	0.74×60.	194×6	110.3	73.8
III-4	dyed, upper part	60.0	30.0	0.0145	0.0270	0.56×60.	179×6	132.3	68.0
III-5	dyed, lower part	60.0	30.0	0.0145	0.0270	0.74×60.	206×6	132.3	72.2

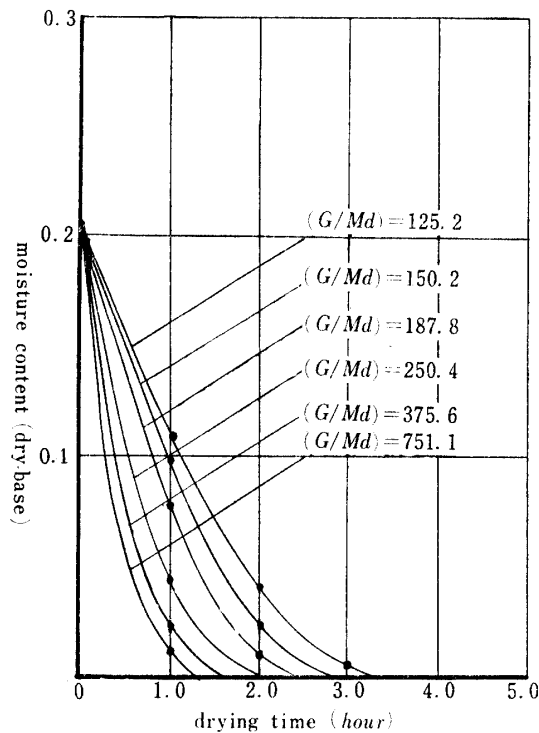


Fig. 9-12. Upper-part of the dyed rushes, heat-air temperature : 75°C, (test No. III-1)

Fig. 9-12.~Fig. 9-16. The drying curves (moisture vs. drying time) in each G/M_d in the case of the ventilation drying of the rushes.

実験結果より求めた恒率乾燥速度 $(dw/d\theta)_{c-exp.}$ から、恒率乾燥速度係数 k_c 、移動単位数 N 、熱容量係数 h_a を求めた結果は Tab. 9-8 のようである。

(2) 泥染および非泥染イ草の比較

Fig. 9-17 は、熱風 75°C における泥染め、非泥染めイ草の根元部についての $(dw/d\theta)_c$ および k_c と (G/M_d) との関係のプロットしたものである。これによると、泥染めと非泥染めの乾燥速度には、差異はみとめられず、僅かに非泥染めが、早い程度である。

Fig. 9-17 より、非泥染め、泥染めイ草において、 (G/M_d) と (k_c) 、 $(dw/d\theta)_c$ の間には次の近似関係式が

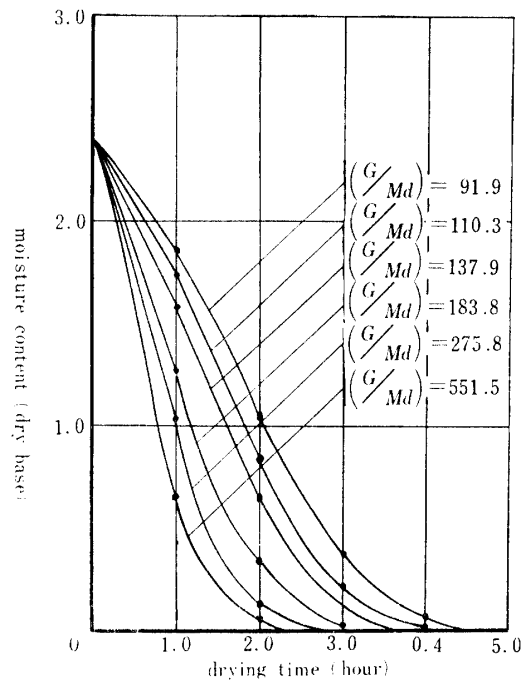


Fig. 9-13. Lower-part of the dyed rushes, heat-air temperature : 75°C, (test No. III-2)

成立する。

(G/M_d) と (k_c) との関係

泥染めイ草の場合 (乾燥部位, 根元)

$$(G/M_d) > 140, k_c \doteq 10.8 \left(\frac{G}{M_d} \right)^{-0.61}$$

$$(G/M_d) < 140, k_c \doteq 0.50 \quad \dots(9-6)$$

非泥染めイ草の場合

$$(G/M_d) > 140, k_c \doteq 14.3(G/M_d)^{-0.66}$$

$$(G/M_d) < 140, k_c \doteq 0.52 \quad \dots(9-7)$$

また (G/M_d) と $(dw/d\theta)_c$ の間には泥染め、非泥染めとも近似的に次の関係が成立する。

$$(G/M_d) < 190, \left(\frac{dw}{d\theta} \right)_c \doteq 0.0444 \left(\frac{G}{M_d} \right)^{0.833} \quad \dots(9-8)$$

$$(G/M_d) > 190, \left(\frac{dw}{d\theta} \right)_c \doteq 0.785(G/M_d)^{0.41} \quad \dots(9-9)$$

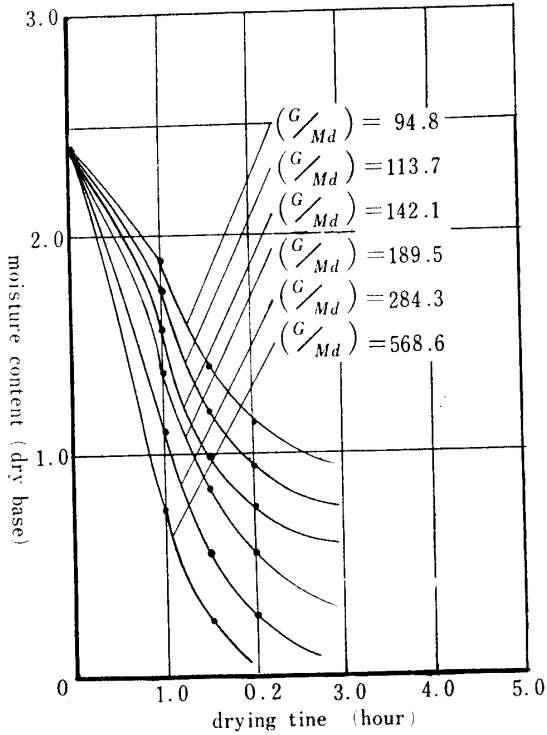


Fig. 9-14. Lower-part of the undyed rushes, heat-air temperature : 75°C, (test No. III-3)

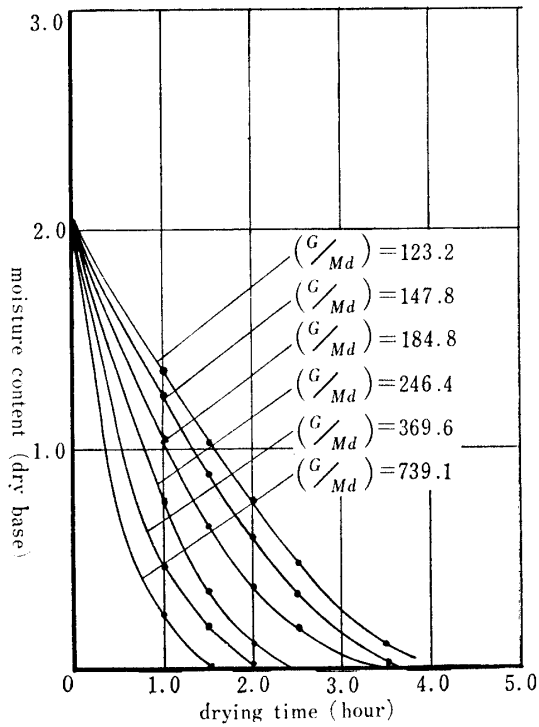


Fig. 9-15. Upper-part of the dyed rushes, heat-air temperature : 60°C, (test No. III-4)

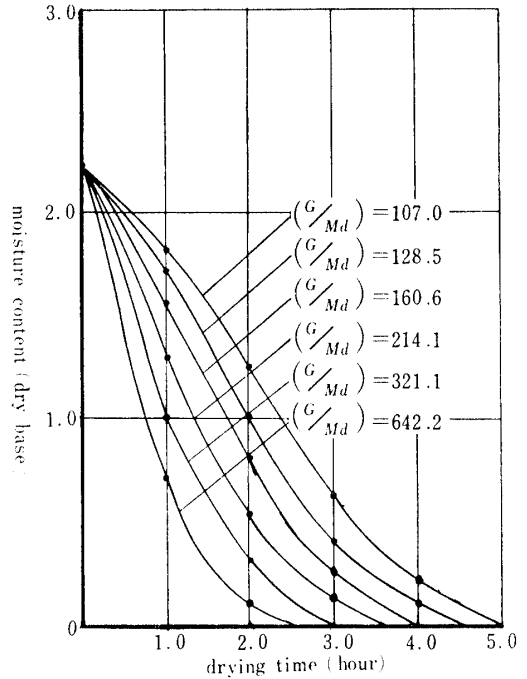


Fig. 9-16. Lower-part of the dyed rushes, heat-air temperature : 60°C, (test No. III-5)

恒率乾燥期間において、 $t=60^\circ\text{C}$ の場合、 (G/M_d) と、 (k_c) 、 $(dw/d\theta)_{c-\text{exp}}$ との関係プロットすれば、Fig. 9-18 のようになり、葉先部において (G/M_d) と $(dw/d\theta)_c$ および (k_c) との間には、

$(G/M_d) > 260$ では、

$$\left(\frac{dw}{d\theta}\right)_c \doteq 0.5(G/M_d)^{0.20}$$

$(G/M_d) < 260$ では、

$$\left(\frac{dw}{d\theta}\right)_c \doteq 0.0158(G/M_d)^{0.82} \quad (9-10)$$

$(G/M_d) > 200$ では、

$$(k_c) \doteq 17.1(G/M_d)^{0.61}$$

$(G/M_d) < 200$ では、

$$(k_c) \doteq 0.50 \sim 0.52 \quad \dots(9-11)$$

また根元部においては、

$(G/M_d) > 300$ では、

$$\left(\frac{dw}{d\theta}\right)_c \doteq 0.5(G/M_d)^{0.20}$$

$(G/M_d) < 300$ では、

$$\left(\frac{dw}{d\theta}\right)_c \doteq 0.0142(G/M_d)^{0.82} \quad \dots(9-12)$$

$(G/M_d) > 220$ では、

$$(k_c) \doteq 11.5(G/M_d)^{0.61}$$

$(G/M_d) < 220$ では、

$$(k_c) \doteq 0.48 \sim 0.50 \quad \dots(9-13)$$

(1) 泥染イ草における根元と先端部の乾燥速度の比較

の関係がある。

Tab. 9-8. Experimental values of the coefficient of constant-rate-drying-speed (k_c), the number of transfer units (N_t) and the film coefficient of heat transfer (h_a) in each drying conditions.

Test No.	G/M_d	$(dw/d\theta)_{c-exp}$	(H_w-H_1)	k_c	N_t	h_a
III-1-(1)	725.5	2.16	0.0180	0.165	0.182	1239.5
	(2) 362.8	1.99	0.0180	0.305	0.364	1239.5
	(3) 241.9	1.71	0.0180	0.393	0.500	1135.1
	(4) 181.4	1.39	0.0180	0.425	0.554	943.3
	(5) 145.1	1.17	0.0180	0.448	0.593	807.7
	(6) 120.9	1.01	0.0180	0.464	0.623	707.2
III-2-(1)	551.5	2.06	0.018	0.207	0.231	1358.9
	(2) 275.8	1.65	0.018	0.332	0.400	1176.5
	(3) 183.8	1.42	0.018	0.429	0.560	1096.1
	(4) 137.9	1.19	0.018	0.480	0.652	958.9
	(5) 110.3	0.99	0.018	0.490	0.673	791.8
	(6) 91.9	0.83	0.018	0.504	0.700	686.3
III-3-(1)	568.6	2.07	0.018	0.202	0.224	1317.7
	(2) 284.3	1.72	0.018	0.336	0.410	1206.0
	(3) 189.5	1.45	0.018	0.424	0.550	1078.5
	(4) 142.1	1.24	0.018	0.483	0.660	970.6
	(5) 113.7	1.08	0.018	0.527	0.747	878.9
	(6) 94.8	0.93	0.018	0.547	0.790	774.6
III-4-(1)	751.7	1.90	0.0125	0.202	0.223	1573.5
	(2) 375.9	1.68	0.0125	0.358	0.440	1552.3
	(3) 250.6	1.38	0.0125	0.440	0.580	1364.2
	(4) 187.9	1.08	0.0125	0.460	0.615	1084.9
	(5) 150.3	0.90	0.0125	0.476	0.645	910.2
	(6) 125.3	0.76	0.0125	0.485	0.663	779.7
III-5-(1)	642.2	1.88	0.0125	0.227	0.225	1799.3
	(2) 321.1	1.59	0.0125	0.395	0.501	1767.5
	(3) 214.1	1.30	0.0125	0.486	0.664	1561.7
	(4) 160.6	1.05	0.0125	0.525	0.745	1314.2
	(5) 128.4	0.88	0.0125	0.545	0.785	1107.8
	(6) 107.0	0.75	0.0125	0.561	0.820	964.3

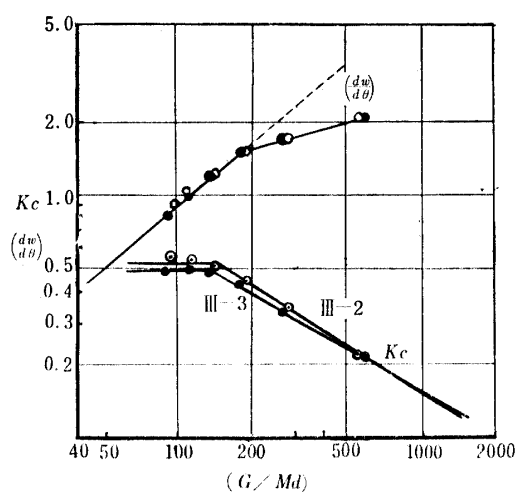


Fig. 9-17. Comparison between the dyed rushes and undyed ones about K_c and $(dw/d\theta)_c$.

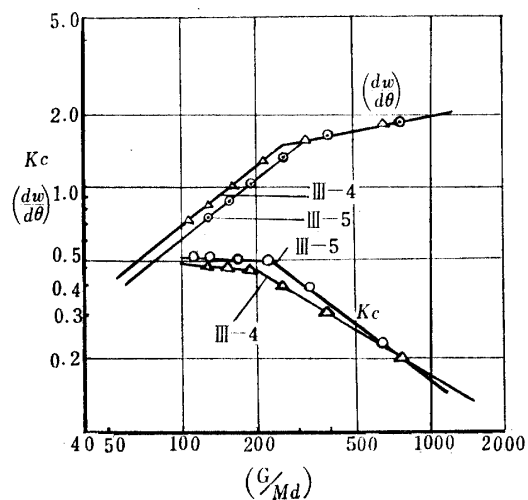


Fig. 9-18. Comparison between the lower-part and the upper-part of the dyed rushes about K_c and $(dw/d\theta)_c$.

以上の結果、 (G/M_d) が 300 以上の場合、両者の差異はほとんどないが、300 以下になると、葉先の乾燥速度が速くなり、その差は恒率期間においては、その速度差は次のようである。

$$\left(\frac{dw}{d\theta}\right)_{c-L} - \left(\frac{dw}{d\theta}\right)_{c-R} = 0.0016(G/M_d)^{0.82} \quad \dots(9-14)$$

〔実験 IV〕 生干し（一日干し）状態からの乾燥

天日乾燥を行なって、含水率 30% 程度になったイ草について、高温熱風で仕上げ乾燥を行なう場合の各堆積量、送風量、熱風温度と乾燥速度との関係について、特に乾燥速度の遅い根元部について検討した。

1. 実験装置、および乾燥条件

実験装置は実験 III と同様の装置を使用し、最高堆積高さ、約 0.5 m でその間を 10 区分して行なった。乾燥条件の大略は Tab. 9-9 のようである。

2. 実験結果

各 (G/M_d) ごとの平均含水比の時間的变化、および堆積層ごとの乾量基準含水率の時間的变化は Tab. 9-10 のようである。

3. 実験結果の考察

生干し状態の生イ草は、一般に 20%~30% より 10%~14% 程度まで急速に乾燥する必要がある。したがって横ずみの場合、平均の含水率の変化とともに各 G/M_d ごとの上、下層の乾燥程度差が問題となる。

(1) 乾燥仕上り時における (G/M_d) と乾燥較差

生干し状態から乾燥する場合、下層含水率が 10% になった時における上層含水率との水分較差 (ΔW) をプロットした結果は、Fig. 9-19 のようで熱風温度 70°C~90°C の間では、 (G/M_d) と、 ΔW との間には次の近似関係がある。

$$\Delta W = 336.7(G/M_d)^{0.79}(\%) \quad \dots(9-15)$$

(2) 生干し状態からの乾燥速度

この実験の範囲内では、その乾燥特性は、乾燥初期

Tab. 9-9. Drying conditions under the finishing-drying of the dyed rushes.

Test No.	drying section	heated air condition				sample weight		G (kg/hr)	initial moisture content (%)
		t (°C)	t _w (°C)	H (kg/kg)	H _w (kg/kg)	M _w (kg)	M _d (kg)		
IV-1	lowerpart (30cm)	70	45.0	0.0140	0.065	0.2×10	0.16×10	92.04	20
IV-2	"	80	48.5	0.0140	0.079	0.2×10	0.16×10	92.04	20
IV-3	"	90	50.5	0.0140	0.087	0.2×10	0.14×10	92.04	30

Tab. 9-10. Relationship between moisture content (W_d) and drying time (θ) at the each bed under the finishing-drying of the dyed rushes.

Test No.	drying time hr-min	positions of the bed (height from the base)					
		0~5 cm	5~10cm	15~20cm	25~30cm	35~40cm	45~50cm
IV-1	1-00	4.90	6.16	8.11	10.01	11.23	12.49
	2-00	0.60	1.83	3.09	4.93	6.16	8.11
IV-2	1-00	3.75	4.93	7.41	9.29	10.62	12.40
	1-30	1.21	2.46	3.73	5.60	6.84	8.70
IV-3	0-50	3.42	4.71	6.38	8.70	9.89	11.73

Tab. 9-11. Experimental values of the moisture content in each G/M_d (=ratio of air-quantity to dry sample weight).

Test No.	drying time hr-min	ratio of air-quantity to dry sample weight					
		575.3	287.6	143.8	95.9	71.9	57.2
IV-1	1-00	4.9%	6.16	8.11	10.01	11.23	12.49
	2-00	0.60	1.83	3.09	4.93	6.16	8.11
IV-2	1-00	3.73	4.93	7.41	9.29	10.62	12.4
	1-30	1.21	2.46	3.73	5.60	6.84	8.70
IV-3	G/M_d	657.4	328.7	164.4	109.6	82.2	65.7
	0-50	3.42	4.71	6.38	8.70	9.89	11.73

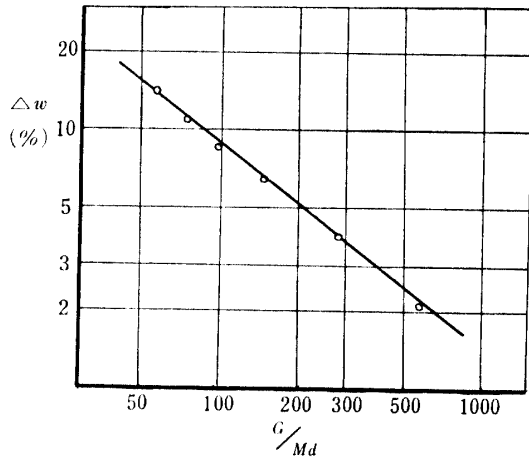


Fig. 9-19. Relationship between the moisture content range (Δw) and G/Md in the case of ventilation drying of the dyed rushes.

から減率乾燥の1段, 2段の形式をとり, その減率1段の過程における, 乾量基準含水率と乾燥時間との間には, $\log(F_1/F) = k_d \theta$ の関係があり,

$$\begin{aligned} 70^\circ\text{C} \text{ では, } k_d &\approx 0.37(G/M_d)^{0.19} \\ 80^\circ\text{C} \text{ では, } k_d &\approx 0.39(G/M_d)^{0.19} \\ 90^\circ\text{C} \text{ では, } k_d &\approx 0.40(G/M_d)^{0.19} \end{aligned} \quad \dots(9-16)$$

で表わされる。したがって含水率 F における乾燥速度, および F_1 から F_2 まで乾燥するに要する所要時間は,

70°C の場合

$$\begin{aligned} \left(\frac{dw}{d\theta}\right)_a &\approx k_{d1} F = 0.37(G/M_d)^{0.19} F \\ (\theta) &\approx \frac{1}{k_{d1}} \log \frac{F_1}{F_2} = \frac{\log(F_1/F_2)}{0.37(G/M_d)^{0.19}} \end{aligned} \quad \dots(9-17)$$

80°C の場合

$$\begin{aligned} \left(\frac{dw}{d\theta}\right)_a &= k_{d2} F = 0.39(G/M_d)^{0.19} F \\ (\theta) &= \frac{1}{k_{d2}} \log \left(\frac{F_1}{F_2}\right) = \frac{\log(F_1/F_2)}{0.39(G/M_d)^{0.19}} \end{aligned} \quad \dots(9-18)$$

90°C の場合

$$\begin{aligned} \left(\frac{dw}{d\theta}\right)_a &= k_{d3} F = 0.40(G/M_d)^{0.19} F \\ (\theta) &= \frac{1}{k_{d3}} \log \left(\frac{F_1}{F_2}\right) = \frac{\log(F_1/F_2)}{0.40(G/M_d)^{0.19}} \end{aligned} \quad \dots(9-19)$$

〔実験V〕 たてずみ状態からの乾燥

イ草は根元部が比較的乾きにくく, 先端になるにつれて乾燥速度は早い。この特性を利用して, 熱風入口に根元部を, 出口に先端部がなるように, 送風方向と

イ草が平行になるようにして, 乾燥する場合が考えられる。この実験では, この様なたてずみ状態における通気乾燥について検討した。

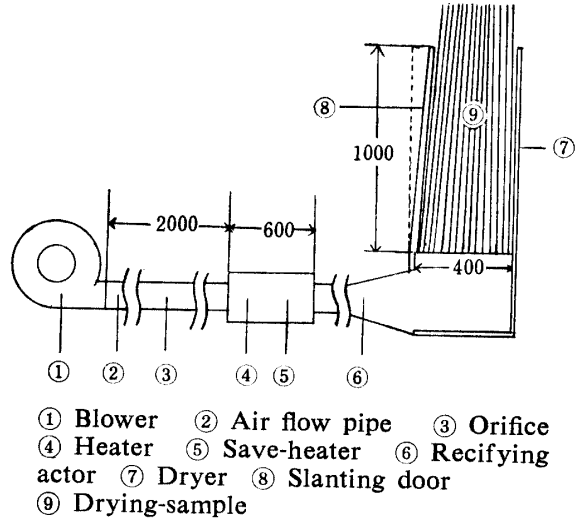


Fig. 9-20. Apparatus for the standing-up ventilation-drying of the dyed rushes.

実験装置は Fig. 9-20 に示すように, コントロールされた熱風はイ草に平行に通気するようにし, 乾燥箱は床面積 0.12 m^2 , 側枠 1.0 m である。また, たてずみの場合は葉先部のしめる面積がせまいので, 傾斜扉をもうけ, 通気の均一化をはかった。

1. 泥染め直後のイ草からの乾燥

(1) 乾燥条件

実験時における乾燥条件は, Tab. 9-12 のようである。

(2) 実験結果

茎, 上, 中, 下部ごとの含水率の経時変化を測定した結果, Fig. 9-21~Fig. 9-23 のようである。

(3) 実験結果の考察

(i) 乾燥速度および乾燥所要時間

たてずみ状態からの通気乾燥を行なう場合, 乾燥の極く初期をのぞいて, 各部位とも乾燥速度は含水率に比例して減少し, その乾燥特性曲線はいわゆる減率一段の形式となる。

したがって実験結果から, 各試験における減率乾燥速度勾配 k_d を求めた結果は Tab. 9-13 のようになる。

イ草の乾燥時期における, 屋間の外気条件は平均して 30°C , 湿度 $60\% \sim 70\%$ 附近であるので, たてずみ状態での通気乾燥における, 任意の含水率 F における乾燥速度は, 根部を主として考えれば,

Tab. 9-12. Drying conditions in the case of drying of the standing-up rushes.

Test No.	drying sample			heat air conditions				G (kg/hr)
	treatment	M_w (kg)	W_w (%)	t (°C)	t_w (°C)	H (kg/kg)	H_w (kg/kg)	
V-1	deyed	9.0	80.0	65.0	31.8	0.016	0.032	185.0
V-2	"	12.5	73.0	75.0	32.8	0.016	0.034	185.0
V-3	"	14.1	79.0	85.0	34.5	0.016	0.037	185.0

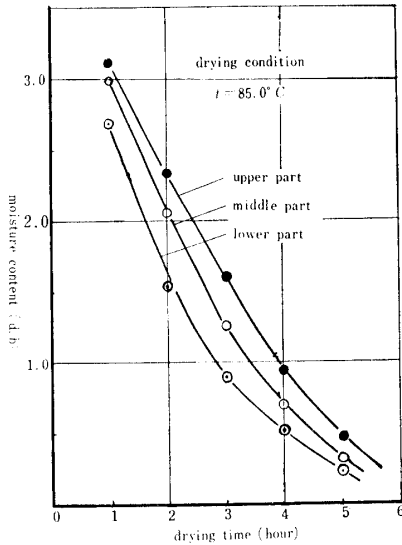


Fig. 9-21. Heat-air temperature : 85°C.

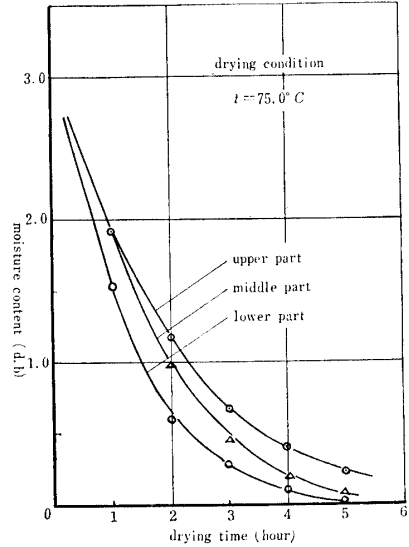


Fig. 9-22. Heat-air temperature : 75°C.

Fig. 9-21.~Fig. 9-23. Moisture content vs. drying time curves of each part in the case of the standing-up-ventilation-drying.

$$\begin{aligned}
 t=65^\circ\text{C} \text{ の場合 } \left(\frac{dw}{d\theta} \right)_d &= 0.241F \\
 t=75^\circ\text{C} \text{ の場合 } \left(\frac{dw}{d\theta} \right)_d &= 0.334F \\
 t=85^\circ\text{C} \text{ の場合 } \left(\frac{dw}{d\theta} \right)_d &= 0.350F \quad \dots(9-20)
 \end{aligned}$$

で近似的にあらわされる。

また含水率 (乾量基準) W_1 から W_2 まで乾燥するに要する時間は、

$$\begin{aligned}
 t=65^\circ\text{C} \text{ の場合 } \theta &= \frac{1}{0.241} \log \left(\frac{W_1}{W_2} \right) (\text{hr}) \\
 t=75^\circ\text{C} \text{ の場合 } \theta &= \frac{1}{0.334} \log \left(\frac{W_1}{W_2} \right) (\text{hr})
 \end{aligned}$$

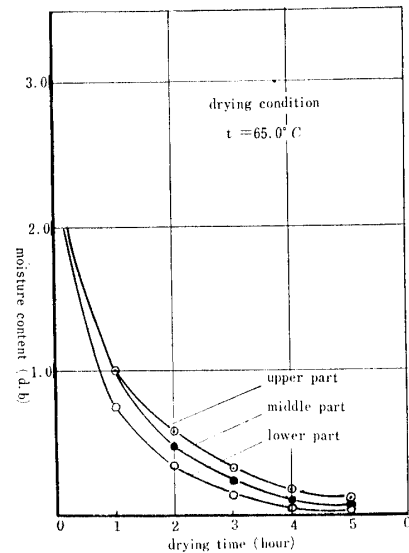


Fig. 9-23. Heat-air temperature : 65°C.

Tab. 9-13. Experimental values of the gradient of decreasing-rate-drying-speed (k_d) in the case of each drying condition on the standing-up rushes.

Test No.	heat-air condition		G (kg/hr)	k_d		
	t (°C)	t_w (°C)		upper part	middle part	lower part
V-1	65	27.5	185.0	0.183	0.219	0.241
V-2	75	29.0	185.0	0.232	0.293	0.334
V-3	85	32.0	185.0	0.256	0.310	0.350

$$t=80^{\circ}\text{C} \text{ の場合 } \theta = \frac{1}{0.350} \log\left(\frac{W_1}{W_2}\right) (\text{hr}) \quad \dots(9-21)$$

で近似的に計算出来る。

(ii) 根元と先端部の水分較差

実験時の乾燥条件下で、乾燥後 θ 時間後の根元および葉先の水分較差は、

$$t=65^{\circ}\text{C} \text{ では、 } \log\left(\frac{W_2}{W_1}\right) = 0.028 + 0.059 \theta$$

$$t=75^{\circ}\text{C} \text{ では、 } \log\left(\frac{W_2}{W_1}\right) = 0.252 + 0.064 \theta$$

$$t=85^{\circ}\text{C} \text{ では、 } \log\left(\frac{W_2}{W_1}\right) = 0.049 + 0.089 \theta \quad \dots(9-22)$$

で表わされる。この結果、同一の G/M_d においても、水分較差は横ずみ状態に較べ少い。

(iii) たてずみにおける問題点

実験的には比較的良好に乾燥出来たが、実用的段階において均一に熱風が通過することおよび、結束をゆるめ均一に積み込む、操作が問題である。

2. 生干し状態からの乾燥

天日、および熱風乾燥において生干し (一日干し) 程度まで乾燥したものを、仕上げ乾燥する場合、一般に葉先に較べ根元部の水分が多いため、この部分の乾

燥が必要である。この点、たてずみの場合は根元部の乾燥が促進されるので、一つの乾燥方法として検討する必要がある。

(1) 乾燥条件

天日乾燥で一日乾燥したイ草について、たてずみ状態で乾燥を行なったが、実験時における乾燥条件は Tab. 9-14 に示す。

(2) 実験結果

各部の含水率の時間的变化は Tab. 9-15 のようである。

(3) 実験結果の考察

生干しからの乾燥の場合、根元部についてみれば、10% まで乾かすに要する所要時間は $t=90^{\circ}\text{C}$ で 20 分、 85°C で 40 分、 75°C で 55 分となり、そのときにおける葉先は、それぞれ 75°C で 50 分、 85°C で 40 分、 90°C で 18 分、程度になり上部過乾が少なくなる。

第2節 熱風乾燥とイ草の品質について

熱風でイ草を乾燥した場合、その温度および乾燥速度がイ草の性状に及ぼす変化を主として物理的面から計測して、天日乾燥と比較するとともに、泥染めの場合と非泥染めの場合についてそれぞれ検討した。

1. 試験方法

(1) 測定項目および測定法

Tab. 9-14. Drying conditions under the finishing-drying of the dyed rushes.

Test No.	sample			heat-air condition				G (kg/hr)
	treatment	M_w (kg)	W_w (%)	t ($^{\circ}\text{C}$)	t_w ($^{\circ}\text{C}$)	H (k/kg)	H_w (kg/kg)	
V-4	drying in the sun (dyed)	4.1	28.8	65.0	31.8	0.016	0.032	140.5
V-5		5.3	28.8	75.0	32.8	0.016	0.034	140.5
V-6		5.3	28.8	85.0	34.5	0.016	0.037	140.5
V-7		5.3	28.8	90.0	35.0	0.016	0.038	140.5

Tab. 9-15. Relationship between moisture content and drying time in the case of each drying condition. (the standing up-rushes)

Test No.	t ($^{\circ}\text{C}$)	(θ) (hr-min)	measuring position		
			upper part	middle part	lower part
V-4	65	0-00	14.0	14.3	16.6
		1-00	7.6	8.0	7.3
		2-00	6.6	7.0	6.8
V-5	75	0-00	18.0	27.0	28.8
		0-30	13.8	12.4	12.3
		1-00	11.0	10.0	8.2
V-6	85	0-00	20.0	26.0	28.8
		1-00	4.7	4.5	6.1
V-7	90	0-00	20.0	26.0	28.8
		0-50	4.7	2.6	4.2

Tab. 9-16. Relationship between the physical properties of the rushes and the drying methods.

dry-treatments	cross-section area (mm) ²	strain (kg)	strain per 1(mm) ²	coefficient of expansion	cross-section area (mm) ²	the solidity	the elastic force	buckling strength
heat-air-drying (dyed)	0.85~0.90 M=0.875	5.0	5.8	1.03	0.80~0.90 M=0.850	89.6	54.5	44.0
	0.90~1.00 M=0.952	4.9	5.1	0.90	0.90~1.00 M=0.956	91.7	54.0	52.8
	1.00< M=1.035	5.5	5.3	0.87	1.00< M=1.057	95.0	61.1	66.4
sun-drying (dyed)	0.85~0.90 M=0.864	5.0	5.8	0.88	0.80~0.90 M=0.853	95.4	65.9	58.7
	0.90~1.00 M=0.949	5.7	6.0	1.02	0.90~1.00 M=0.945	93.4	59.7	55.9
	1.00< M=1.020	5.4	5.3	1.04	1.00< M=1.031	92.8	54.6	63.0
heat-air and sun-drying (dyed)	0.85~0.90 M=0.874	5.3	6.1	1.09	0.80~0.90 M=0.857	93.2	55.3	51.8
	0.90~1.00 M=0.946	5.4	5.7	1.05	0.90~1.00 M=0.963	91.8	52.2	55.5
	1.00< M=1.043	5.7	5.5	1.07	1.00< M=1.030	93.1	52.9	57.9
drying to maximum with heat-air	0.85~0.90 M=0.848	4.7	5.5	0.98	0.80~0.90 M=0.865	86.3	44.6	41.9
	0.90~1.00 M=0.949	4.6	5.0	0.83	0.90~1.00 M=0.952	90.6	49.9	49.0
	1.00< M=1.038	5.0	4.8	0.90	1.00< M=1.033	89.1	50.8	51.5
heat-air-drying (un-dyed)	0.85~0.90 M=0.875	5.5	6.3	1.08	0.80~0.90 M=0.844	92.6	54.1	47.8
	0.90~1.00 M=0.953	5.4	5.6	1.00	0.90~1.00 M=0.939	91.9	51.9	50.3
	1.00< M=0.882	5.6	5.5	1.00	1.00< M=1.039	93.3	56.7	66.5
sun-drying (un-dyed)	0.85~0.90 M=0.882	4.8	5.4	0.97	0.80~0.90 M=0.863	92.5	51.3	50.2
	0.90~1.00 M=0.954	5.6	5.8	1.01	0.90~1.00 M=0.948	91.6	51.8	53.6
	1.00< M=1.037	5.2	5.0	0.94	1.00< M=1.004	95.2	48.3	68.0

抗張力、伸長度、硬度、弾力、挫折抵抗力について測定した。測定位置は、イ草茎の根元より、30 cm~60 cm 間のものを使用した。

(2) 供試イ草の処理方法

(A) 熱風乾燥—熱風温度 75°C で、上干し程度(含水率 10%)まで乾燥したもの(泥染めイ草)

(B) 熱風乾燥絶乾—熱風温度 75°C で含水率 0 まで絶乾したもの(泥染めイ草)

(C) 熱風、天日併用—熱風乾燥(75°C)で上干の程度(含水率 20%~15%)まで乾燥し以後天日乾燥したもの(泥染めイ草)

(D) 天日乾燥—天日で上干し程度まで乾燥したもの(泥染めイ草)

(E) 熱風乾燥非泥染め—非泥染めイ草をAの方法で乾燥したもの。

(F) 天日乾燥非泥染め—非泥染めイ草をDの方法で乾燥したもの。

2. 実験結果

(1) イ草の物理的性状の比較

上記のように処理したイ草について、抗張力、伸長度、硬度、弾力、挫折抵抗力を測定した結果は、Tab. 9-16 のようである。

(2) 挫折部位に亀裂を生ずる時の含水率

泥染めしない乾茎の下部より 15 cm~60 cm について、10%~13% 程度の含水率から乾燥し、順次挫折程度を調査し、亀裂の生じたときの含水率を測定した。挫折角度は 90°、茎の太さは 1.0 mm~1.5 mm で供試品種はさざなみを使用した。

3. 実験結果の考察

(1) 乾燥方法とイ草の物理性

熱風絶乾したものは、他の乾燥処理したものに較べ抗張力、伸長度、挫折抵抗力、弾力が一様に減退している。その他の熱風乾燥、天日乾燥およびその併用においては差異は、認められないが、7.0%~6.0% (湿

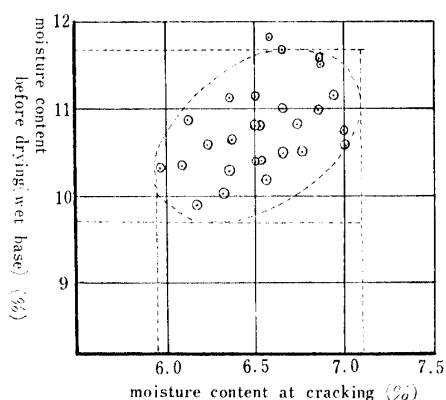


Fig. 9-24. Moisture content at cracking of the rushes.

量基準含水率) 以下に乾燥すると、挫折部位に亀裂を生じ、品質を阻害するので、それ以下の過乾は、さけるべきである。

(2) 泥染めと非泥染めイ草とその物理性

泥染め、および非泥染めイ草の物理性状については、有意的差異は認められない。

(3) 乾燥方法とイ草の色沢、臭味

熱風で急速乾燥を行なうと、天日乾燥にくらべ多少緑度が多い。その程度は乾燥速度に比例する。95°C~100°Cの熱風では、イ草茎の褐変色が認められるがその原因については、未検討である。またこの程度の高温では、イ草のねじれ(特に先端部)が生じ品質度が低下するので、乾燥には不適と言える。

第3節 イ草の通気貯蔵乾燥とイ草の貯蔵性

刈取り作業が機械化された場合、あるいは一時に大量のイ草が乾燥場にもちこまれた場合、乾燥機の処理量がこれに追いつかず、一時的貯蔵をせざるを得ない場合が考えられる。

この時期におけるイ草は極めて変質劣化しやすいため、何等かの方法でこれを防止する必要がある。この試験では泥染め直後のイ草に常温の風を送りこんだ場合、これが品質劣化の防止に対する効果と、附随的に

生ずる乾燥効果について、検討するとともに、あわせて収穫時におけるイ草の貯蔵性について検討した。

1. イ草の通気貯蔵乾燥について

堆積された泥染めイ草に常温の空気を大量に送りこんで、品質の劣化を防止するとともに貯蔵中の乾燥効果を検討する。

(1) 実験装置および実験方法

実験装置は通気乾燥機を用い、たてずみの場合は Fig. 9-25 に、横ずみの場合は Fig. 9-26 に示す。堆積方法は、たてずみの場合は小束にしたものを、結束をゆるめ、これを順次たてに積みこんだ。横ずみの場合は同様に結束をゆるめ、これを交互に堆積した。通風時間は、たてずみ延24時間、36時間、横ずみ36時間である。

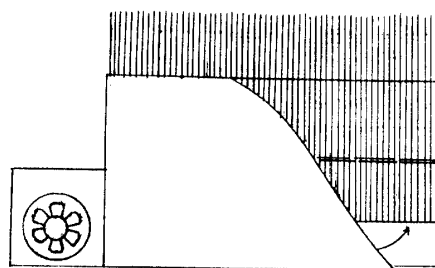


Fig. 9-25. Apparatus for the standing-up ventilation-storage-drying of the dyed-rushes.

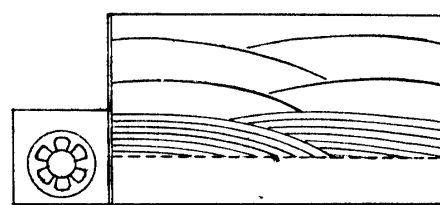


Fig. 9-26. Apparatus for the laying down ventilation-storage-drying of the dyed-rushes.

通風時における乾燥条件は Tab. 9-17 のようである。

Tab. 9-17. Ventilation and preservation conditions in the dyed rushes.

Test No.	accumulating methods	the sample weight (kg)	ventilating time (hr-min)	air quantity (kg/hr)	floor area (m)×(m)	air conditions					
						temperature (°C)			humidity (%)		
						max.	min.	mean	max.	min.	mean
1	standing up	84.6	36-00	3750	0.45×1.22	35.0	24.6	29.2	88.0	47.0	63.2
2	"	50.5	25-00	3750	0.45×1.22	34.0	28.0	30.5	80.0	51.0	65.3
3	laying down	25.0	36-00	3750	0.45×1.22	34.2	24.2	28.6	94.0	47.0	62.8

notes : Initial moisture content : test No. 1 ; 75.6% (wet base)
 test No. 2 ; 74.0% (")
 test No. 3 ; 72.0% (")

Tab. 9-18. Effects of the natural-air-ventilation to the rushes qualities.

Test No.	methods of solidity accumulation	ventilating time (hour)	qualities				
			resistance strain	solidity	elastic force	color	push-matt quality
1	standing-up	36	5.0~5.8	85~86	47~51	quite a good	40
2	"	24	4.3~4.7	85~88	40~48	good	35
3	lay-down	24	4.7~4.8	87~88	52~58	inferior good	33

notes : measuring section, inside and outside of a bunch.

Tab. 9-19. Relationship between moisture content (wet base) and drying time (hr) in the case of each accumulating method.

Test No.	drying time (hr-min)	outside of a bunch			inside of a bunch		
		upper part	middle part	lower part	upper part	middle part	lower part
1	0-00	75.6	75.6	75.6	75.6	75.6	75.6
	3-00	64.1	69.4	70.7	72.6	67.1	75.6
	9-00	52.6	65.5	65.5	58.6	65.6	66.6
	24-00	45.6	50.9	51.4	53.7	63.4	63.6
	30-00	30.5	35.0	35.4	45.7	40.9	53.1
	36-00	14.4	18.0	21.1	21.0	24.8	24.8
2	0-00	74.0	74.0	74.0	74.0	74.0	74.0
	5-00	49.0	56.0	62.0	64.0	67.0	68.0
	10-00	43.0	50.0	56.0	64.0	66.0	67.0
	15-00	34.0	43.0	50.0	61.0	63.0	66.0
	25-00	30.0	38.0	47.0	55.0	57.0	60.0
3	0-00	72.0	72.0	72.0	72.0	72.0	—
	6-00	57.5	63.0	65.0	56.0	63.0	—
	12-00	50.5	57.0	62.0	50.0	59.0	—
	24-00	38.0	50.0	57.0	43.0	53.0	—

2. 実験結果

(1) 常温通気貯蔵がイ草の品質におよぼす影響

常温通気において、堆積方法や、その通気時間の程度がイ草の品質におよぼす影響について調査した結果は、Tab. 9-18 のようである。

(2) 常温通気期間におけるイ草の乾燥程度

各堆積方法ごとの通気時間と、含水率の変化を束の中心部、外側について測定した結果は Tab. 9-19 のようである。

3. 考察

(1) 常温通気とイ草の貯蔵性

通気貯蔵期間中におけるイ草繊維の脆性化は時間が長くなれば、促進され、この実験では 24 時間以後の貯蔵は脆性化する。また束の内、外により変質の差が大で、不完全通気は逆効果である。

(2) 堆積方法とイ草の貯蔵性

全般にたてずみが横ずみに比べ、貯蔵性が高い、原因として横ずみは最も変質しやすい、下、中部えの通気にむらが出来やすく、また下層と上層との乾燥較差が大きいからと考えられる。

(3) 常温通気における乾燥程度

平均乾燥速度は横ずみの場合 1.0 [%/hr)、たてずみの場合 1.05 [%/hr) とたてずみの場合が幾分早い。

第4節 含水率とイ草の貯蔵性

刈取って泥染めしたイ草は、普通ただちに天日乾燥を行なうが、天候不順の場合、束状態にして一時的収納を行ない、天候の回復を待つ場合が多くある。また熱風乾燥を行なう場合でも前記のように能率の関係から、一時的貯蔵を行なう必要がある。

この試験では種々の乾燥程度で放置した場合の保存性について検討した。

1. 貯蔵方法および保存条件

泥染め直後の生イ草を、ある時間天日乾燥しそれを収納庫内に束にして収納し、24 時間および 48 時間放置したものにつき、再び天日乾燥を行なって品質を調査した。実験時における環境条件、および貯蔵方法は Tab. 9-20 のようである。

2. 実験結果、および考察

貯蔵方法と、イ草品質を調査した結果は Tab. 9-21 のようである。

Tab. 9-20. Methods of storage.

Test No.	storing time (hr)	drying time (hr)	air conditions				moisture content w. b (%)		
			the open air		in storage room		after drying	after storing	moisture difference
			t (°C)	R (%)	t (°C)	R (%)			
1	24	1	30.5	63.5	24.0~30.5	63.5~76.0	62.3	64.1	+1.8
2	24	2	30.5	63.5	24.0~30.5	63.5~76.0	51.0	51.6	+0.6
3	24	3	30.5	63.5	24.0~30.5	63.5~76.0	41.3	39.4	-0.9
4	24	4	30.5	63.5	24.0~30.5	63.5~76.0	34.0	32.3	-1.7
5	48	1	31.0	62.5	22.0~32.0	60.0~75.0	57.5	64.3	+6.8
6	48	2	31.0	62.5	22.0~32.0	60.0~75.0	46.2	42.2	-4.0
7	48	3	31.0	62.5	22.0~32.0	60.0~75.0	34.7	36.2	+1.5
8	48	4	31.0	62.5	22.0~32.0	60.0~75.0	21.0	22.4	+1.4

notes : Initial moisture content=72.0%

Tab. 9-21. Relationship between rushes qualities and each storing method.

Test No.	moisture content in storage	storing time (hr-min)	strain	solidity	elastic force	color	qualities
1	62.3	24-00	3.48	90	56	+4	39
2	51.0	24-00	5.60	92	58	+4	40
3	41.3	24-00	5.82	92	66	+4	40
4	34.0	24-00	6.13	93	61	+5	43
5	57.5	48-00	5.34	89	52	+2	35
6	46.2	48-00	6.24	91	57	+2	38
7	34.7	48-00	6.11	92	59	+3	42
8	21.0	48-00	5.76	93	61	+3	45
standerd	—	—	5.88	92	60	+5	45

Tab. 9-22. Drying conditions in the sun-drying of the dyed rushes.

Test No.	natural-air-temp (°C)			relative humidity (%)			insolation value (cal/cm ²)
	max.	min.	mean	max.	min.	mean	
1, 5	34.2	28.5	31.0	60.0	74.3	65.6	335.8
2, 6, 9, 13	34.5	28.7	31.2	52.0	74.0	61.0	364.7
3, 7, 10, 14	33.0	28.0	30.5	58.0	74.0	62.3	296.8
4, 8, 11, 15	34.5	28.5	31.3	55.0	71.0	59.2	345.8
12, 16	33.4	28.9	30.8	56.0	68.0	59.0	299.2

その結果、高水分イ草ほど保存性悪く、放置時間は24時間以上においては、品質は急激に低下する。

第5節 イ草の天日乾燥に関する調査

イ草の熱風乾燥と比較するため、泥染め、非泥染めイ草について、天日乾燥を行なって、その能率を調査した。天日乾燥は好天候の場合で約二日かかり、初日の含水率20%~30%まで乾燥するのを「生干し」、二日目の仕上げ乾燥を「上干し」と称し、更に根干しを行なっている。

1. 天日乾燥における乾燥条件

天日乾燥の時刻は午前9時より15時まで、期間は7月20日から7月24日で、その時における乾燥条件はTab. 9-22 のようである。

2. 天日乾燥における含水率の時間的变化

天日乾燥での含水率の時間的变化は、生干しでは、Fig. 9-27, Fig. 9-28, 上げ干しでは Fig. 9-29, Fig. 9-30 のようである。

3. 考 察

(1) 泥染め、非泥染めイ草の乾燥速度の比較

生干し状態で泥染め、および非泥染めイ草について同一条件で天日乾燥を行なったものについての平均乾燥速度を比較してみると、Tab. 9-23 のようになり、泥染めが非泥染めに比較して平均1.8(%/hr)、乾燥が速い。原因として附着泥のため輻射熱の吸収が大きいたことが考えられる。

(2) 天日乾燥における平均乾燥速度

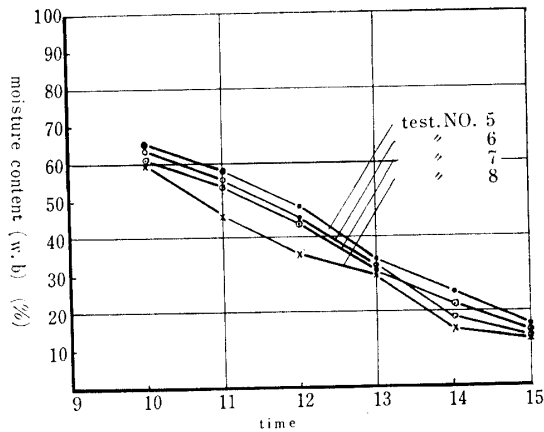


Fig. 9-27. Test No. 5~8, drying of the dyed rushes from high moisture.

Fig. 9-27.~Fig. 9-30. Drying curves (moisture vs. drying time) in the sun-drying of the rushes.

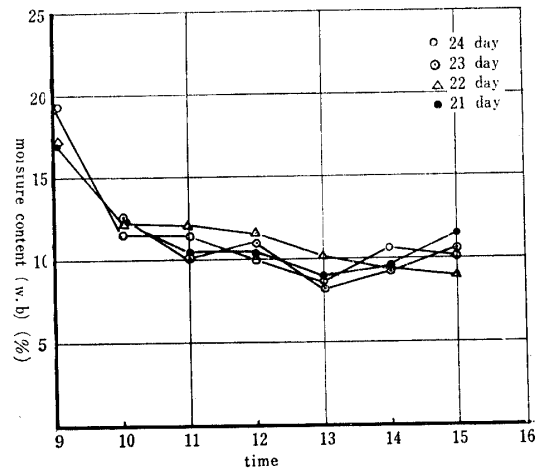


Fig. 9-29. The finishing drying of the dyed rushes.

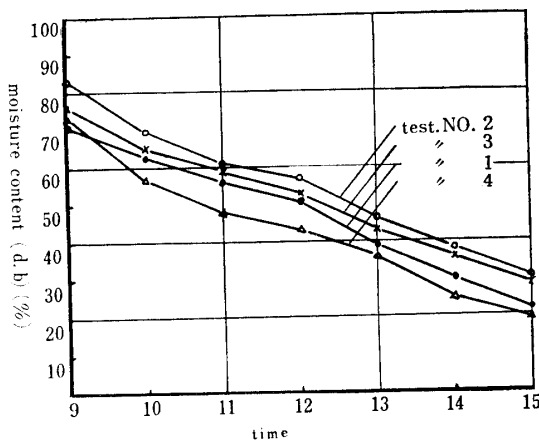


Fig. 9-28. Test No. 1~4, drying of the dyed rushes from high moisture.

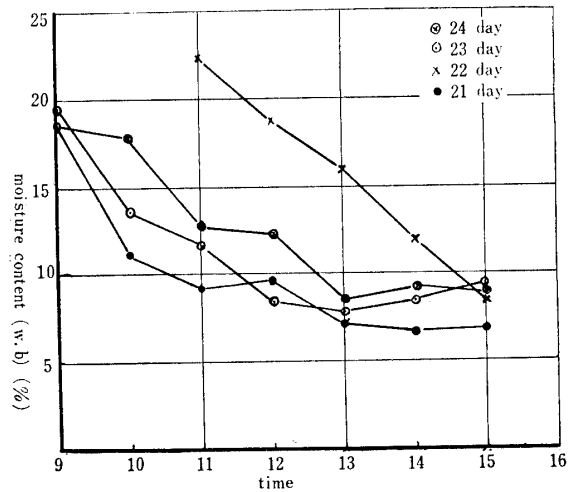


Fig. 9-30. The finishing drying of the undyed rushes.

Tab. 9-23. Comparison between the dyed rushes and undyed rushes about mean-drying-speed.

treatment	drying day			
	20	21	22	23
dyed	10.0	9.4	9.6	9.5
un-dyed	8.2	8.4	7.3	7.3
difference	1.8	1.0	2.2	2.2

Tab. 9-24. Equilibrium moisture content of the dyed-rushes (Temp. 25°C)

relative humidity (%)	90	80	70	60
equilibrium moisture content (%)	12.90	11.78	9.95	9.16

泥染めイ草の天日乾燥は普通生干しの場合、最良のコンディションで平均毎時9.6%前後と見做される。

(3) イ草の平衡含水率

25°Cにおいて各相対湿度とイ草の平衡含水率を調査した結果は Tab. 9-24 のようである。したがって上干しにおいても含水率は 10% 以下に乾燥する必要

はない。

第6節 摘 要

1. 泥染イ草の厚層通気乾燥における恒率乾燥速度 $(dw/d\theta)_c$ および係数 k_c は、次式で求められる。

$G/M_d < 170 \text{ kg/kg-hr}$ の場合

$$\begin{aligned} \left(\frac{dw}{d\theta}\right)_c &= k_{c1} \left(\frac{G}{M_d}\right) (H_w - H) \\ &\approx 0.7 \left(\frac{G}{M_d}\right) (H_w - H) \\ &= 0.7 \left(\frac{G}{M_d}\right) \left(\frac{C_H}{r_m}\right) (t - t_w) \end{aligned}$$

$G/M_d > 170 \text{ kg/kg-hr}$ の場合

$$\begin{aligned} \left(\frac{dw}{d\theta}\right)_c &= k_{c2} \left(\frac{G}{M_d}\right) (H_w - H) \\ &= 13.0 \left(\frac{G}{M_d}\right)^{0.38} (H_w - H) \\ &= 13.0 \left(\frac{G}{M_d}\right)^{0.38} \left(\frac{C_H}{r_m}\right) (t - t_w) \end{aligned}$$

2. 同上の条件における減率乾燥速度は、 G/M_d が 120~150 以上では、 $(dw/d\theta)_d = k_d F$ として求められるが (k_d については、Fig. 9-10 参照)、 G/M_d が 120~150 以下の場合、減率期間における乾燥特性曲線は上方に凸形となり、減率乾燥速度は、ある乾燥条件下での恒率、減率乾燥速度をそれぞれ ϕ_{c1} 、 ϕ_{d1} とすれば、 $\phi_d = \phi_{d1}(\phi_c/\phi_{c1})$ により求められる。

3. 横づみによる厚層通気の場合、その上、下層の水分較差 (ΔW) は、熱風温度による影響は少く、(G/M_d) の影響が大である。一般近似式として G/M_d が 70~400 の範囲では次式を得た。

$$\Delta W \approx 11208 (G/M_d)^{-1.27}$$

4. 厚層通気乾燥において泥染め、非泥染めイ草について乾燥速度を比較するため k_c を比較した結果は次のようである。

$(G/M_d) > 140 (\text{kg/kg-hr})$ では

$$\frac{k_{c1}(\text{泥染})}{k_{c2}(\text{非泥染})} = \frac{10.8 (G/M_d)^{-0.61}}{14.3 (G/M_d)^{-0.66}}$$

$(G/M_d) < 140 (\text{kg/kg-hr})$ では

$$\frac{k_{c1}(\text{泥染})}{k_{c2}(\text{非泥染})} = \frac{0.50}{0.52}$$

したがって、非泥染めがわずかに早い程度であるが、その差は僅小である。

5. 厚層通気乾燥において、イ草の根元、先端部の乾燥速度を比較した結果、ほとんど差異がなく、根元の乾燥が遅れるのは、初期水分含量が葉先に較べ高いからと思われる。

6. 生干し (一日干し) 状態からの乾燥は恒率期間ではなく、 $70^\circ\text{C} \sim 90^\circ\text{C}$ の高温状態での減率乾燥速度勾配 k_d は、実験より $0.37 (G/M_d)^{0.19} \sim 0.40 (G/M_d)^{0.19}$ となった。含水率 F における減率乾燥速度 $(dw/d\theta)_d$ は 70°C では $(dw/d\theta)_d = 0.37 (G/M_d)^{0.19} F$ で、 80°C では $0.39 (G/M_d)^{0.19} F$ 、 90°C では $0.40 (G/M_d)^{0.19} F$ で求められる。

7. たてずみ状態での通気乾燥は乾燥初期から減率乾燥となり、その乾燥速度勾配 k_d は、 $t = 65^\circ\text{C} \sim 85^\circ\text{C}$ において $0.24 \sim 0.35$ の範囲内にある。根元部と先端部の水分較差は比較的少なく、低温熱風より高温熱風の方が幾分多い。

8. 乾燥方法とイ草の物理的性質について調査した結果、次のことが判明した。

(A) 乾燥による過乾はイ草の抗張力、挫折抵抗力、弾力等に悪影響があるが、それ以外では天日乾燥に比して差異は認められない。

(B) 泥染め、非泥染めイ草を比較してその物理的性状に差異はない。

(C) 急速なる乾燥はイ草の緑度を増し、 $90^\circ\text{C} \sim 100^\circ\text{C}$ 以上の熱風乾燥はイ草の品質を悪くする。

9. 一時的に泥染めイ草を貯蔵するため、常温空気を送り込んでその貯蔵性、乾燥性を調査した結果、通気貯蔵時間が 24 時間以上になればイ草繊維の脆性化ははじまる。また常温通気による平均乾燥速度は毎時 1% 程度である。また泥染め後のイ草を室内に放置した場合、24 時間以上になれば品質劣化する。

10. イ草の天日乾燥を調査した結果、最良の条件において平均乾燥速度は毎時 9.6% であり、泥染めイ草は非泥染めイ草に較べ、平均 1.8 (%/hr) 乾燥速度がはやい。

第10章 牧草の熱風乾燥に関する研究

一特に通気乾燥に関する基礎実験一

Studies on the drying methods of the pasture with heat-air.

(Fundamental experiments on the deep-bed ventilation-drying.)

目 次

第1節 厚層通気乾燥の能率に関する基礎実験

1. はしがき
2. 実験方法および乾燥条件
3. 実験結果および考察
 - (1) 厚層通気乾燥における平均含水率の時間的变化、および乾燥特性曲線
 - (2) 恒率乾燥期間における乾燥速度

Tab. 10-1. Drying conditions in the case of the deep-bed ventilation-drying of the pastures.

Test No.	sample pastures	heat-air condition				air quantity (kg/hr)	initial moisture content		sample weight (kg)	
		t (°C)	t_w (°C)	H (kg/kg)	H_w (kg/kg)		wet base (%)	dry base (ratio)	total	dry
X-1	milk veches	40±0.5	25.1	0.0134	0.0204	158.4	81.1	4.30	0.8×6	0.151×6
X-2	"	60±0.5	29.8	0.0140	0.0275	158.4	83.3	5.00	0.8×6	0.134×6
X-3	"	80±0.5	34.0	0.0146	0.0343	158.4	80.8	4.20	0.8×6	0.154×6
X-4	radino clover	40±0.5	25.9	0.0156	0.0213	172.8	79.5	3.88	0.8×6	0.164×6
X-5	"	60±0.5	30.9	0.0154	0.0286	172.8	83.6	5.10	0.8×6	0.131×6
X-6	"	80±0.5	33.2	0.0126	0.0324	172.8	86.8	6.58	0.8×6	0.106×6

notes : drying floor area : 0.09m²
accumulated-height : 0.6m

- (3) 牧草類における h_a, k_a, N_t
 (4) 減率乾燥期間における乾燥速度
 (5) 厚層通気乾燥における乾燥所要時間
 第2節 厚層通気乾燥における上下層, 水分較差に関する基礎実験

1. はしがき
 2. 実験方法および乾燥条件
 3. 実験結果および考察
 (1) 各堆積高さごとの乾燥速度
 (2) 上, 下層水分較差の近似計算法

第1節 厚層通気乾燥の能率に関する基礎実験

I. はしがき

現在牧草の人工乾燥を行う場合, 静置式乾燥機を使用して熱風乾燥を行う場合が最も多い. この実験では堆積量, 送風量, 熱風温度が乾燥速度におよぼす影響を検討し, あわせて牧草類の乾燥能率, ドライヤー設計の基礎資料をうるために行った.

II. 実験方法, および乾燥条件

実験装置は第9章第1節のイ草の厚層通気乾燥に使用したものをそのまま使用した.

供試材料はレンゲ, ラジノクローバーで熱風温度は40°C~80°Cにコントロールし, 各堆積高さごとの乾燥速度を測定した. 実験時における乾燥条件は Tab. 10-1 のようである.

III. 実験結果, 並びに考察

1. 厚層通気乾燥における平均含水率の時間的变化並びに乾燥特性曲線

前記乾燥条件における含水率の時間的变化を求めた結果は Fig. 10-1~Fig. 10-6 に示す.

以上の結果より, 各熱風温度 ($t-t_w$), (H_w-H) ごとの, 含水率対乾燥速度曲線, および風量乾重量比 (G/M_d) ごとの含水率対乾燥速度曲線を求めた結果は Fig. 10-7~Fig. 10-11 のようである.

以上の結果, レンゲ, クローバの厚層通気における

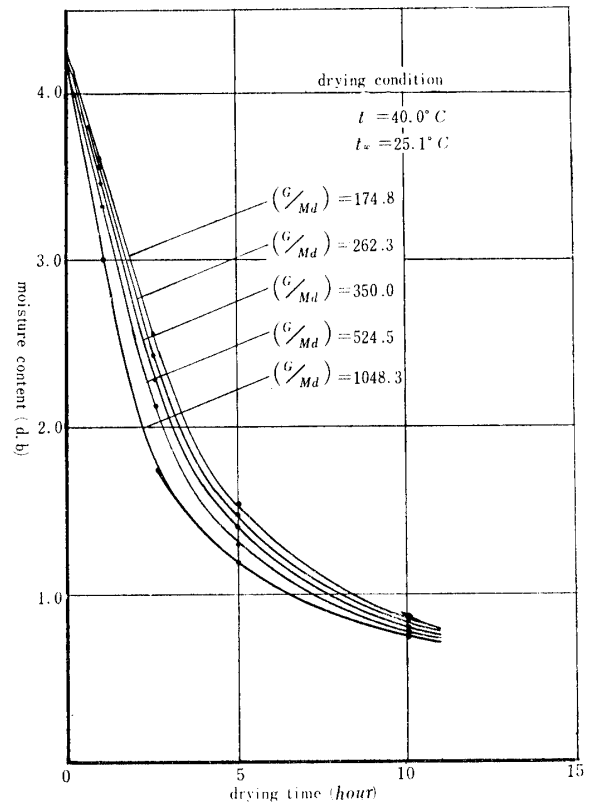


Fig. 10-1. Milk vetches, heat-air temp. : 40°C.

Fig. 10-1. ~Fig. 10-6. The experimental drying curves (moisture vs. drying time) in each G/M_d in the case of the ventilation drying of the pastures.

乾燥特性曲線は乾燥条件により形態が異なる.

すなわち (G/M_d) が大である場合, 乾燥初期から減率1段の形式をとり, 乾燥速度は含水率に比例して減少し, $G/M_d > 1000$ の場合, 含水率 w_0 における減率乾燥速度は近似的に, (10-1)*, (10-2) 式であらわされる.

* 農産物の熱風乾燥法に関する第1報, 第2章, 第5節, 第7節参照

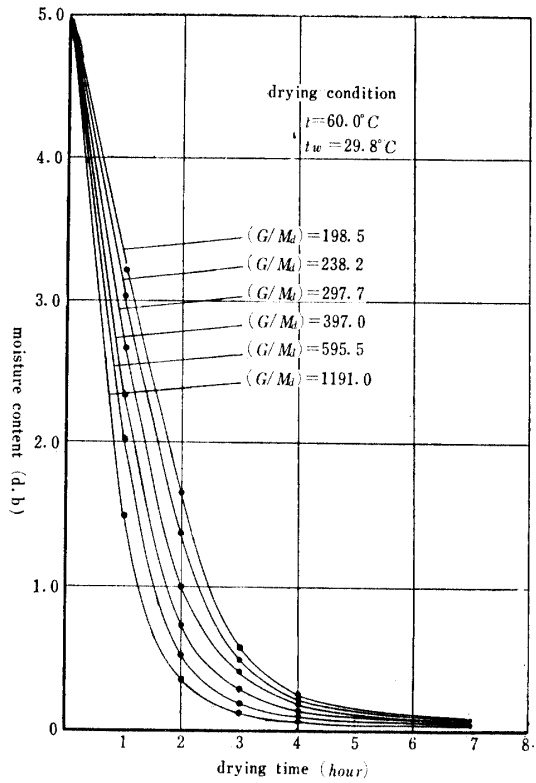


Fig. 10-2. Milk vetches, heat-air temp. : $60^{\circ}C$.

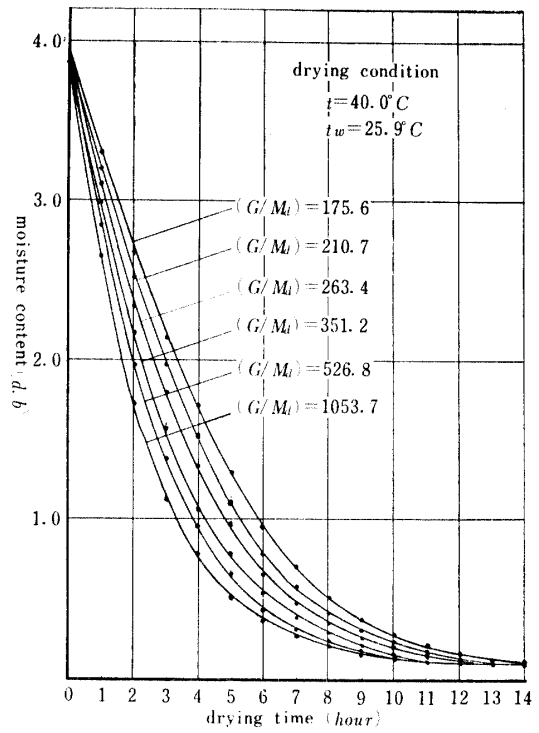


Fig. 10-4. Radino clovers, heat-air temp. : $40^{\circ}C$.

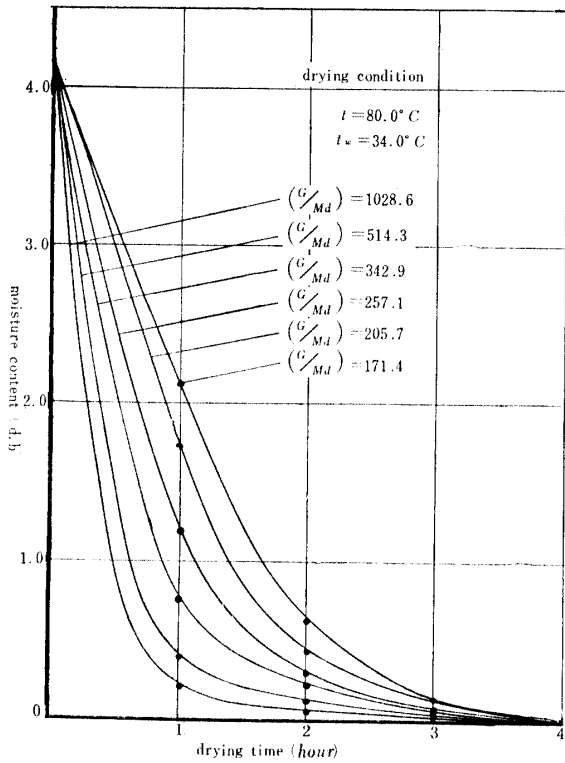


Fig. 10-3. Milk vetches, heat-air temp. : $80^{\circ}C$.

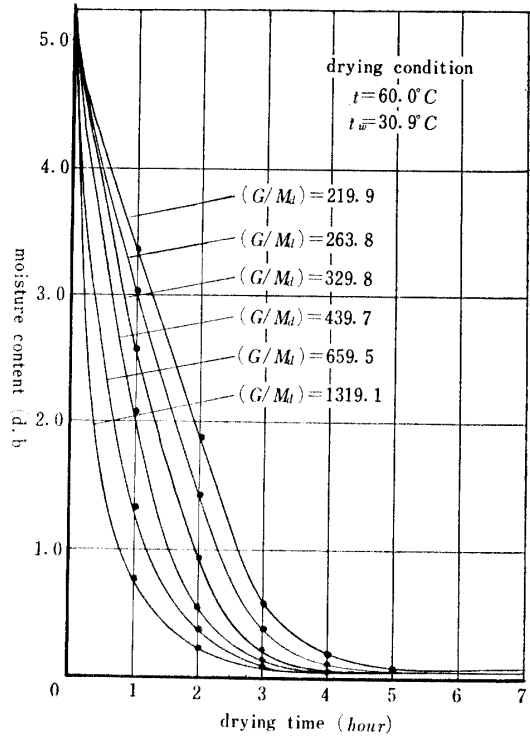


Fig. 10-5. Radino clovers, heat-air temp. : $60^{\circ}C$.

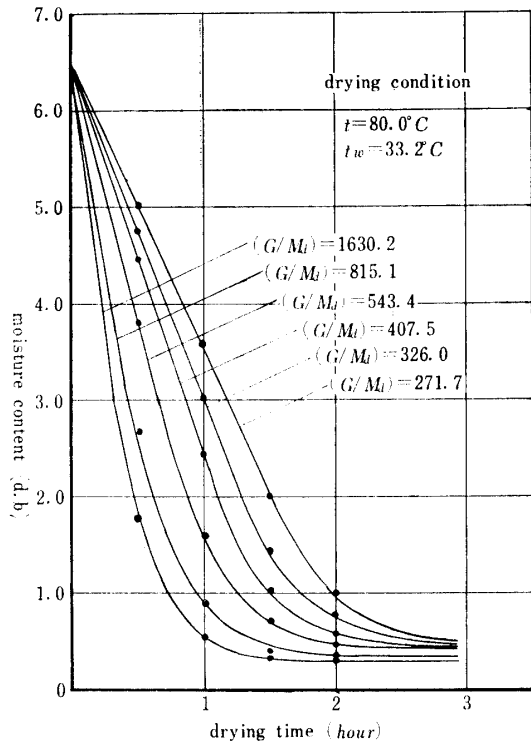


Fig. 10-6. Radino clovers, heat-air temp.: 80°C.

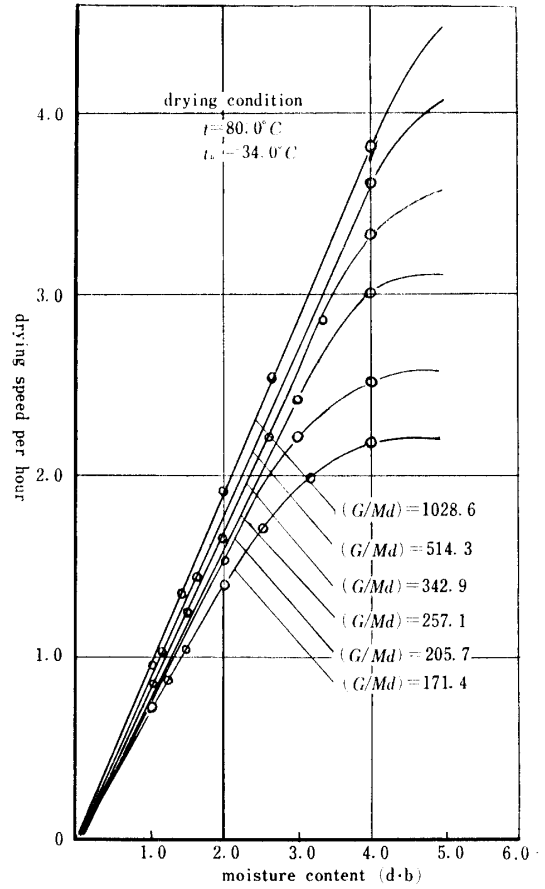


Fig. 10-8. Milk vetches, heat-air temp.: 80°C.

Fig. 10-8.~Fig. 10. Drying characteristic curves of the pastures in each G/M_d .

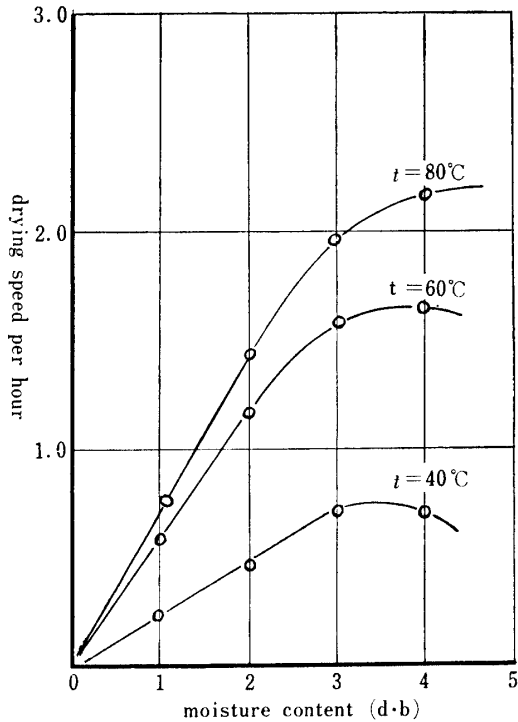


Fig. 10-7. Drying characteristic curves of the milk vetches in each heat-air temperature.

レンゲの場合

$$\left(\frac{dw}{d\theta}\right)_a = K_{a1}w_0 = 6.4(t-t_w)^{1.48}w_0 \times 10^{-3} \quad \dots(10-1)$$

クローバーの場合

$$\left(\frac{dw}{d\theta}\right)_a = K_{a2}w_0 = 1.8(t-t_w)^{1.20}w_0 \times 10^{-2} \quad (10-2)$$

実的には乾燥は $(G/M_d) < 300 \sim 500 (kg/kg-hr)$ で実施されるが, $(G/M_d) < 300 (kg/kg-hr)$ の条件下では, 乾燥初期に恒率乾燥期間が存在する. (G/M_d) が更に減少すれば, Fig. 10-7, Fig. 10-11 に示すように, その乾燥特性曲線は上方に凸の形式に移行する. そして (G/M_d) が少になれば, 仮限界含水率も低下する.

2. 恒率乾燥期間における乾燥速度

恒率期間の乾燥条件と乾燥速度 (ϕ_c) との関係プロットすれば, レンゲでは Fig. 10-12, クローバーでは Fig. 10-13 のようになる.

すなわち,

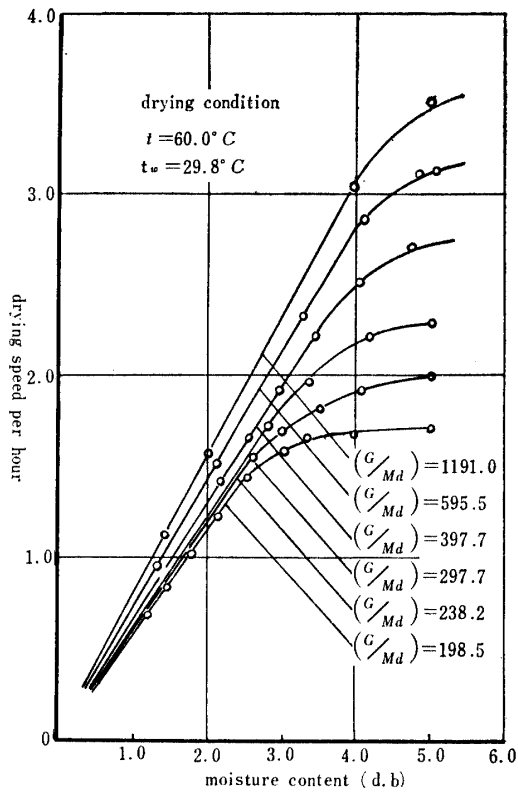


Fig. 10-9. Milk vetches, heat-air temp. : $60^{\circ}C$.

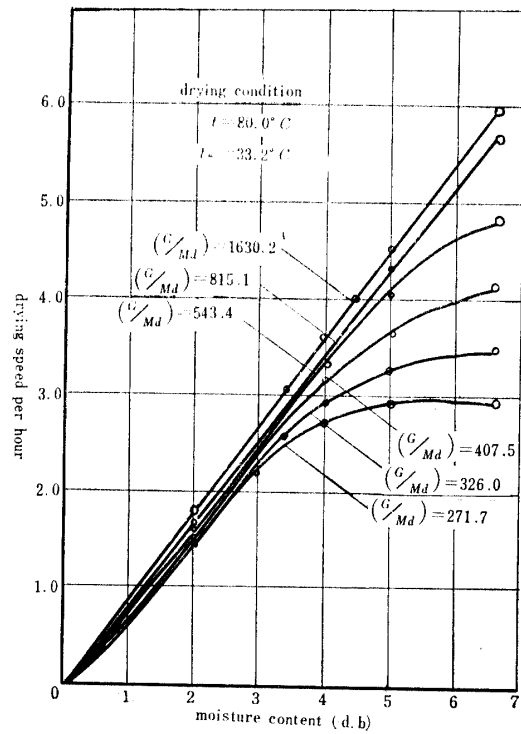


Fig. 10-10 (B). Radino clovers, heat-air temp. : $80^{\circ}C$.

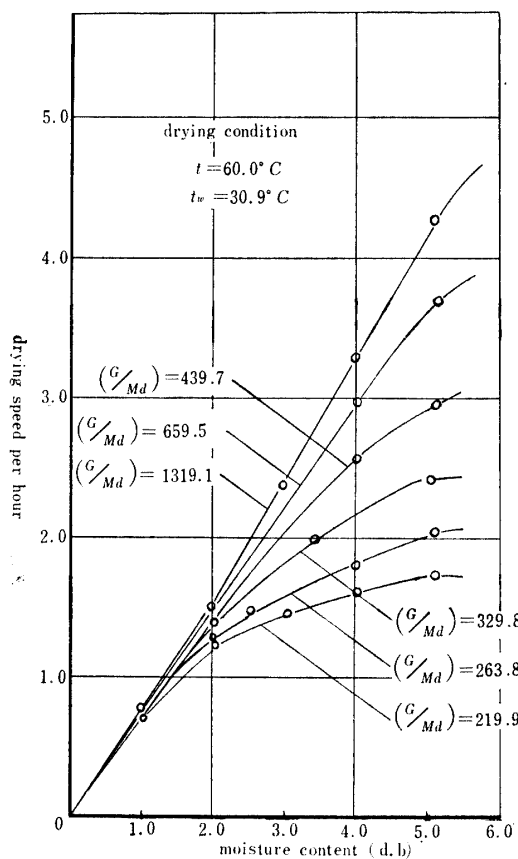


Fig. 10-10 (A). Radino clovers, heat-air temp. : $60^{\circ}C$.

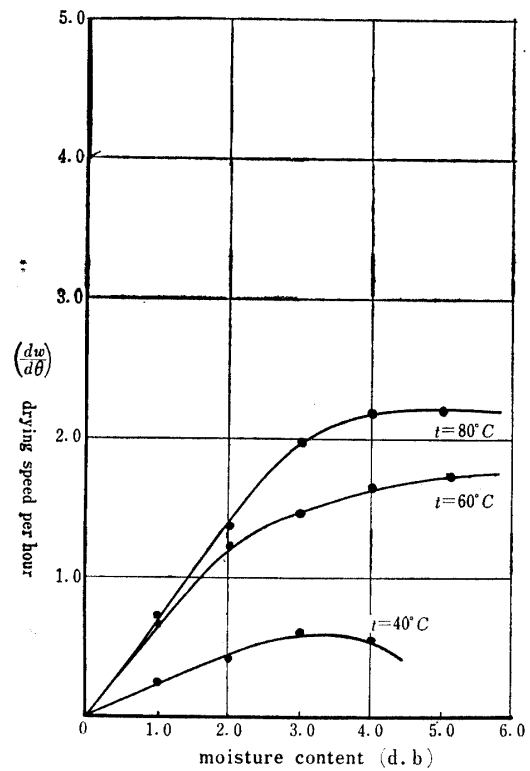


Fig. 10-11. Drying characteristic curves of the radino clovers in each heat-air temperature.

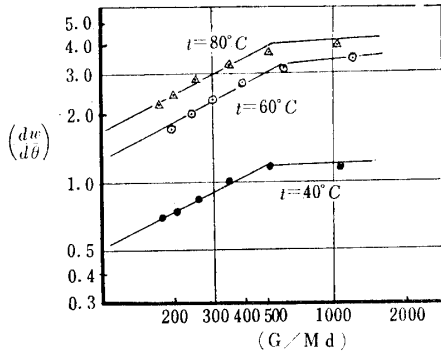


Fig. 10-12. Milk vetches.

Fig. 10-12.~Fig. 10-13. Relationship between G/M_d and $(dw/d\theta)_c$ in each heat-air temperature in the case of the ventilation drying of the pastures.

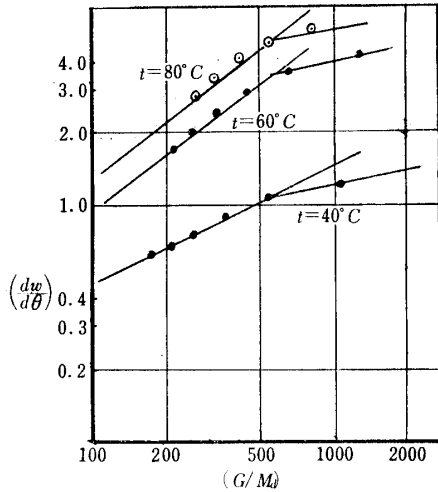


Fig. 10-13. Radino clouers.

レンゲでは

$(G/M_d) < 500 (kg/kg-hr)$ の場合

$t=40^\circ C, (t-t_w)=14.9^\circ C$ では

$$\phi_c \approx 4.325 \left(\frac{G}{M_d} \right)^{0.53} \times 10^{-3}$$

$t=60^\circ C, (t-t_w)=30.2^\circ C$ では

$$\phi_c \approx 10.56 \left(\frac{G}{M_d} \right)^{0.83} \times 10^{-3}$$

$t=80^\circ C, (t-t_w)=46.0^\circ C$ では

$$\phi_c \approx 14.85 \left(\frac{G}{M_d} \right)^{0.53} \times 10^{-3}$$

...(10-3)

$(G/M_d) > 500 (kg/kg-hr)$ の場合

$t=40^\circ C, (t-t_w)=14.9^\circ C$ では $\phi_c \approx 1.20$

$t=60^\circ C, (t-t_w)=30.2^\circ C$ では $\phi_c \approx 3.40$

$t=80^\circ C, (t-t_w)=46.0^\circ C$ では $\phi_c \approx 4.00$

...(10-4)

クローバーでは

$(G/M_d) < 550 (kg/kg-hr)$ の場合

$t=40^\circ C, (t-t_w)=14.1^\circ C$ では

$$\phi_c = 4.87 (G/M_d)^{0.492} \times 10^{-3}$$

$t=60^\circ C, (t-t_w)=29.1^\circ C$ では

$$\phi_c = 2.73 (G/M_d)^{0.771} \times 10^{-2}$$

$t=80^\circ C, (t-t_w)=46.8^\circ C$ では

$$\phi_c = 3.11 (G/M_d)^{0.810} \times 10^{-2}$$

...(10-5)

したがって恒率乾燥速度係数 k_c と (G/M_d) との関係を実験結果よりプロットすれば、クローバーでは Fig.10-14, レンゲでは Fig. 10-15 のようになり次式で与えられる。

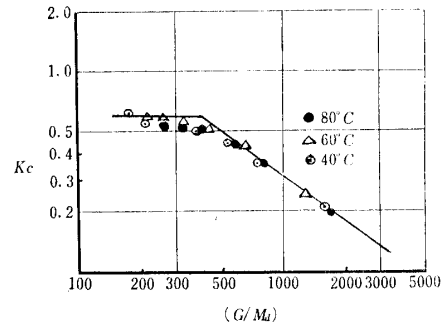


Fig. 10-14. Radino clover

Fig. 10-14.~Fig.10-15. Relationship between k_c and G/M_d in each heat-air temperature in the case of the ventilation drying of the pasture.

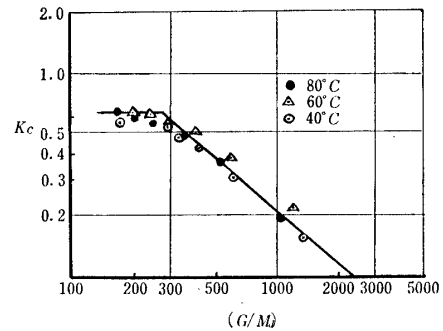


Fig. 10-15. Milk vetches

レンゲの場合

$\frac{G}{M_d} > 270 (kg/kg-hr)$ では

$$k_c = 80.3 (G/M_d)^{-0.86} \quad \dots(10-6)$$

$\frac{G}{M_d} < 270 (kg/kg-hr)$ では $k_c \approx 0.63$

...(10-7)

クローバーの場合

$\frac{G}{M_d} > 380 (kg/kg-hr)$ では

$$k_c = 50.1 (G/M_d)^{-0.745} \quad \dots(10-8)$$

$$\frac{G}{M_d} < 380(\text{kg/kg-hr}) \text{ では } k_c \doteq 0.60 \dots (10-9)$$

すなわち与えられた乾燥条件のうち、送風量 (G), 無水材料重量 (M_d), 送風入口における熱風条件 ($t-t_w$), (H_w-H) が既知である場合、次式で恒率乾燥速度の近似計算を行なうことが出来る。

レンゲにおいては

$$\frac{G}{M_d} > 270(\text{kg/kg-hr}) \text{ では}$$

$$\left(\frac{dw}{d\theta}\right)_c \doteq 80.3 \left(\frac{G}{M_d}\right)^{0.14} (H_w-H) \dots (10-11)$$

$$\frac{G}{M_d} < 270(\text{kg/kg-hr}) \text{ では}$$

$$\left(\frac{dw}{d\theta}\right)_c \doteq 0.63 \frac{G}{M_d} (H_w-H)$$

$$= 0.63 \frac{G}{M_d} \cdot \frac{C_H}{\gamma_m} (t-t_w) \dots (10-10)$$

クローバーにおいては

$$\frac{G}{M_d} > 380(\text{kg/kg-hr}) \text{ では}$$

$$\left(\frac{dw}{d\theta}\right)_c \doteq 50.1 \left(\frac{G}{M_d}\right)^{0.255} (H_w-H) \dots (10-12)$$

$$\frac{G}{M_d} < 380(\text{kg/kg-hr}) \text{ では}$$

$$\left(\frac{dw}{d\theta}\right)_c \doteq 0.60 \left(\frac{G}{M_d}\right) (H_w-H) \dots (10-13)$$

3. 牧草類の通気乾燥における熱容量係数 (h_a), 物質移動係数 (k_a), および移動単位数 (N_l)

前記第8章で詳述したように、乾燥能率の近似算定や乾燥装置の設計を行う場合、 h_a , k_a , N_l , などを既知しておくことが必要である。レンゲおよびクローバーの熱風乾燥の実験より、これ等を求めた結果は、Fig. 10-16, Fig. 10-17 のようで、レンゲの場合 1 m^3 当り送風量 $G(\text{kg/hr-m}^3)$ と h_a , k_a の間には

$$G < 450(\text{kg/hr-m}^3) \text{ では } h_a \doteq 1.11 G^{0.82}$$

$$k_a \doteq 4.63 G^{0.82} \dots (10-14)$$

$$G > 450(\text{kg/hr-m}^3) \text{ では } h_a \doteq 1100, k_a \doteq 4583$$

クローバーの場合

$$G < 650(\text{kg/hr-m}^3) \text{ では } h_a \doteq 0.972 G^{0.82}$$

$$k_a \doteq 4.05 G^{0.82} \dots (10-15)$$

$G > 650(\text{kg/hr-m}^3)$ では $h_a \doteq 1300, k_a \doteq 5417$ の関係がある。

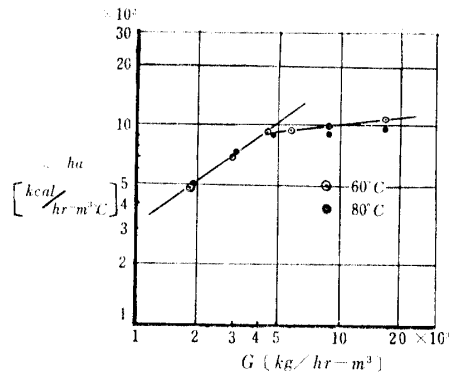


Fig. 10-16. Milk vetches.

Fig. 10-16.~Fig. 10-17. Relationship between h_a (Kcal/hr-m^3) and G (kg/hr-m^3) in the case of the ventilation drying.

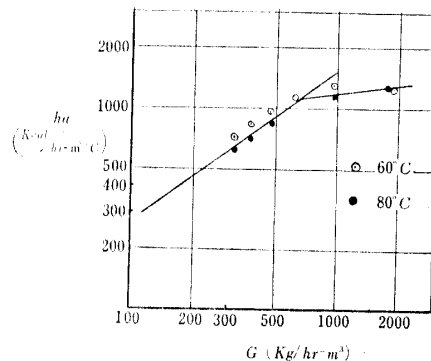


Fig. 10-17. Radino clovers.

4. 減率乾燥期間

Fig. 10-7~Fig. 10-11 のようにレンゲ、クローバーの減率期間における乾燥特性曲線は、 (G/M_d) が大きい場合には、減率乾燥速度 (ϕ_a) は含水率に比例して減少するが、 (G/M_d) が小になるにつれ、その $\phi_a \sim W$ 曲線は上方に凸の形式に移行する。また Fig. 10-7~Fig. 10-10 に示すように、一般に (G/M_d) が同一であれば、限界含水率も略一定と見做される。以上のことから、 (G/M_d) が等しく熱風温度 (t_1) における恒率、減率乾燥速度を ϕ_{c1} , ϕ_{d1} とし、熱風温度 (t_2) におけるそれを ϕ_{c2} , ϕ_{d2} とすれば次の関係が経験的に知られており実験結果も近似的にこれと一致する。

$$\frac{\phi_{c1}}{\phi_{d2}} = \frac{\phi_{c2}}{\phi_{d1}} \quad \therefore \phi_{d1} = \phi_{d2} \frac{\phi_{c1}}{\phi_{c2}}$$

なお、減率乾燥期間において、その乾燥特性曲線が近似的に直線であると見做した場合の仮減率乾燥速度勾配 (k_a') と $(t-t_w)$ との間には、各 G/M_d ごとに次の近似関係がある。

レンゲの場合

$$\begin{aligned} G/M_d &= 1000(\text{kg/kg-hr}) \\ k_d &\doteq 2.06(t-t_w) \times 10^{-2} \\ G/M_d &= 500(\text{kg/kg-hr}) \\ k_d &\doteq 1.90(t-t_w) \times 10^{-2} \\ G/M_d &= 200(\text{kg/kg-hr}) \\ k_d &\doteq 1.56(t-t_w) \times 10^{-2} \quad \dots(10-16) \end{aligned}$$

クローバーの場合

$$\begin{aligned} G/M_d &= 1000(\text{kg/kg-hr}) \\ k_d &\doteq 2.08(t-t_w) \times 10^{-2} \\ G/M_d &= 500(\text{kg/kg-hr}) \\ k_d &\doteq 1.98(t-t_w) \times 10^{-2} \\ G/M_d &= 200(\text{kg/kg-hr}) \\ k_d &\doteq 1.84(t-t_w) \times 10^{-2} \quad \dots(10-17) \end{aligned}$$

また (G/M_d) が異った場合における限界含水率 W_c と (G/M_d) との関係プロットすれば Fig. 10-18 のようで、 W_c と (G/M_d) との間には次の関係がある。

$$W_c = 0.47 + 1.55 \log(G/M_d) \quad \dots(10-18)$$

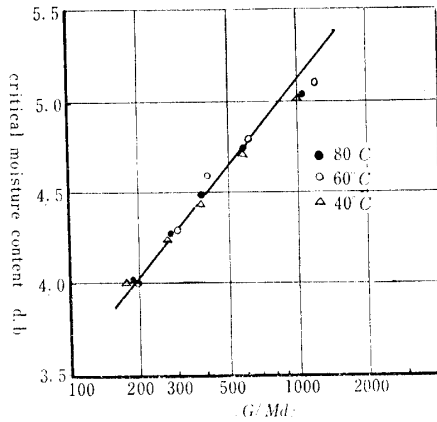


Fig. 10-18. Relationship between critical moisture content (dry base) and G/M_d in the case of deep-bed ventilation drying of the milk vetches.

以上の結果、乾燥条件が t_1 , G_1 , M_d でその時の乾燥特性曲線が実験により既知である場合、任意の乾燥条件、 t_2 , G_2 , M_{d2} におけるレンゲの乾燥特性曲線は次式により算定した恒率乾燥速度 ϕ_{c2} 、限界含水率 W_{c2} 、減率乾燥速度 ϕ_{d2} を知ることにより求められる。

$$\begin{aligned} \phi_{c2} &= 80.3 \left(\frac{G_2}{M_{d2}} \right)^{0.14} (H_w - H_2) \\ W_{c2} &= 0.47 + 1.55 \log(G/M_d) \\ \phi_{d2} &= \phi_{d1} \left(\frac{G_2/M_{d2}}{G_1/M_{d1}} \right)^{0.14} \frac{(H_w - H_2)}{(H_w - H_1)} \end{aligned}$$

5. 厚層通気乾燥における乾燥所要時間

(1) 恒率乾燥期間

初期含水比 (乾量基準) W_1 、限界含水比 W_c とすれば W_1 から W_c まで乾燥するに要する所要時間 (θ_c) は (10-17), (10-18) 式の関係を利用して近似的に (10-19), (10-20) 式で算定出来る。

レンゲの場合

$$\begin{aligned} \theta_c(\text{hr}) &= \frac{W_1 - W_c}{\phi_c} = \frac{W_1 - W_c}{80.3(G/M_d)(H_w - H)} \\ &= \frac{W_1 - \{0.47 + 1.55 \log(G/M_d)\}}{80.3(G/M_d)(H_w - H)} \\ &= \frac{W_1 - \{0.47 + 1.55 \log(G/M_d)\}}{80.3(G/M_d)^{0.14}(t-t_w)C_H/r_m} \quad \dots(10-19) \end{aligned}$$

クローバーの場合

$$\begin{aligned} \theta_c(\text{hr}) &= \frac{W_1 - W_c}{\phi_c} = \frac{W_1 - W_c}{50.1(G/M_d)(H_w - H)} \\ &= \frac{W_1 - W_c}{50.1(G/M_d)^{0.255}(t-t_w)C_H/r_m} \quad \dots(10-20) \end{aligned}$$

(2) 減率乾燥期間

W_c から W_2 まで乾燥するに要する時間 (θ_d) を求めるため、その乾燥条件における乾燥特性曲線を 4 において述べた方法によって求め、各含水率における $(dw/d\theta)_d$ を求めれば、 θ_d は (10-21) 式で算定出来る。

$$\theta_d = \int_{w_c}^{w_2} \left(-\frac{d\theta}{dw} \right)_d dw \quad \dots(10-21)$$

なお近似計算として減率期間において、乾燥速度が含水率に比例するものとすれば、減率乾燥期間が含水比 W_c から W_2 まで乾燥するに要する所要時間 (θ_d) は (10-22) 式で求められる。

$$\begin{aligned} \theta_d &\doteq \frac{W_c \log \frac{W_c}{W_2}}{\phi_c} \quad \dots(10-22) \\ &\doteq \frac{\{0.47 - 1.55 \log(G/M_d)\}}{80.3(G/M_d)(H_w - H)} \log \frac{W_c}{W_2} \quad (\text{レンゲの場合}) \end{aligned}$$

第2節 厚層通気乾燥における上下層の水分較差に関する基礎実験

1. はしがき

静置式乾燥機を使用して牧草を乾燥する場合、下層は風量乾重比が極めて大なる場合の乾燥速度で乾燥するが、上層は所謂不定常乾燥となり、乾燥速度が緩慢となり、上下層間に水分較差が生ずる。この水分較差は送風量、堆積量、熱風温度および乾燥材料に影響されるため、かなり複雑である。

Tab. 10-2. Drying conditions.

Test No.	sample grass	heat-air condition		air quantity (kg/hr)	initial moisture content	sample weight (kg)
		t (°C)	t _w (°C)			
7	milk vech	40.5	26.3	160.0	78.0	0.8×6
8	"	60.5	29.8	158.4	80.5	0.8×6
9	"	80.5	34.8	162.3	80.5	0.8×6
10	radino clover	40.5	26.6	170.5	78.5	0.8×6
11	"	60.5	30.2	182.2	79.3	0.8×6
12	"	80.5	34.2	173.5	80.5	0.8×6

notes : drying area : 0.09m²
accumulated height : 0.05m

この実験では、水分較差とそれに関する諸要素との影響について検討した。

2. 実験方法および乾燥条件

実験装置は前と同様のものを使用し、各堆積層ごとの含水率の変化を追跡した。水分較差の測定は下層、上層とも厚さ 5 cm の層の平均含水率で行なった。乾燥条件は Tab. 10-2 のようである。

3. 実験結果および考察

(1) 各堆積高さごとの含水率の時間的变化

各堆積高さごとの含水率の時間的变化は、Fig. 10-19, Fig. 10-20, Fig. 10-21, Fig. 10-22, Fig. 10-23, Fig. 10-24 のようである。

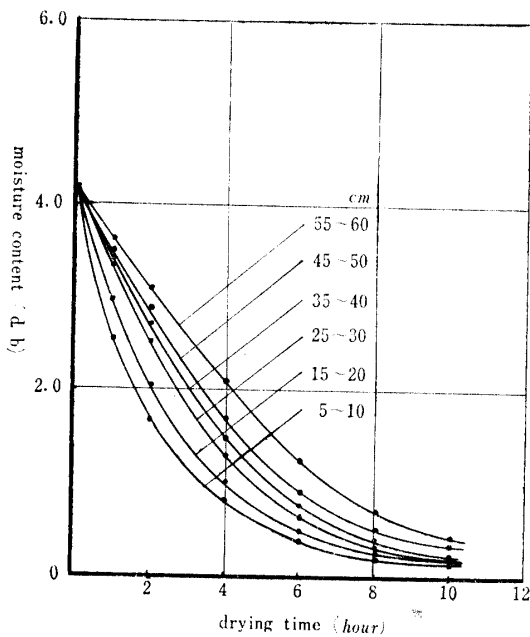


Fig. 10-19. Milk vetches, heat-air temp. : 40°C.

Fig. 10-19.~Fig. 10-24. The drying curves (moisture vs. drying time) in each bed in the case of the ventilation drying of the pastures.

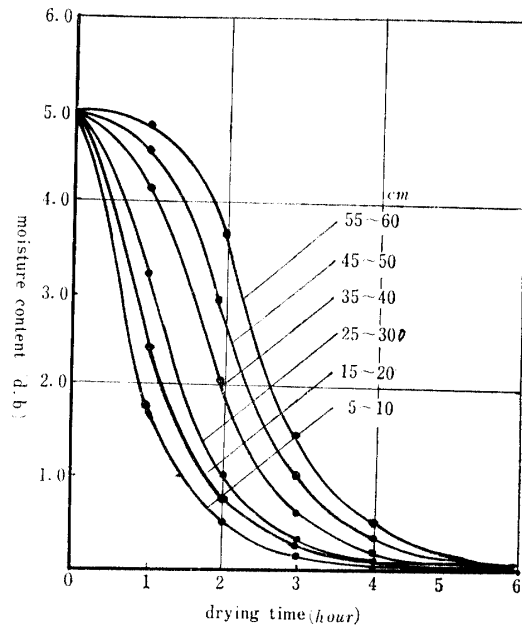


Fig. 10-20. Milk vetches, heat-air temp. : 60°C.

この結果下層含水比が 0.25 の場合における上層含水比との水分較差 ΔW(%) と、風量乾重比 (G/M_a) との関係をクローバーについてプロットした結果は Fig. 10-25 のようである。

すなわち ΔW=α(G/M_a)ⁿ なる一般式にて表わされ、α, n は熱風温度 (t-t_w) および、下層含水率によって変化するものと考えられる。

(2) 厚層通気乾燥における水分較差の近似算定法

乾燥機に出入する熱風および材料の諸元を Fig. 10-26 のように表わす。すなわち、

H_a : 入口空気の絶対湿度 (kg/kg)

H₁, H_m : 乾燥初期および平均含水比 W_m の場合の排気絶対湿度 (kg/kg)

W_a, W_m : 乾燥前および乾燥時の平均含水比 (乾量基準)

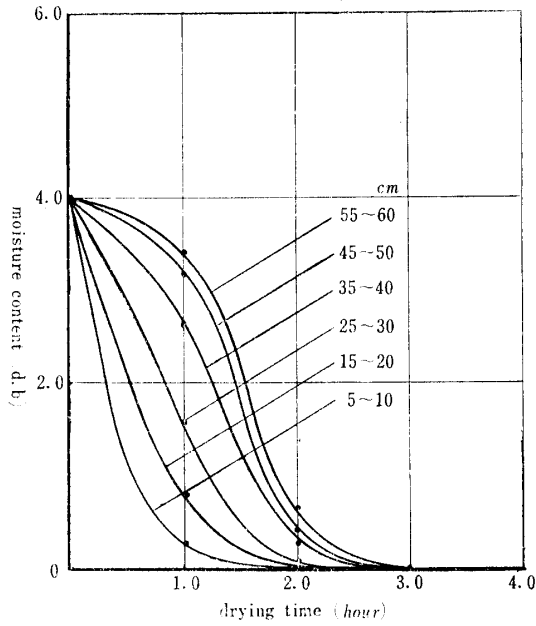


Fig. 10-21. Milk vetches, heat-air temp. : 80°C.

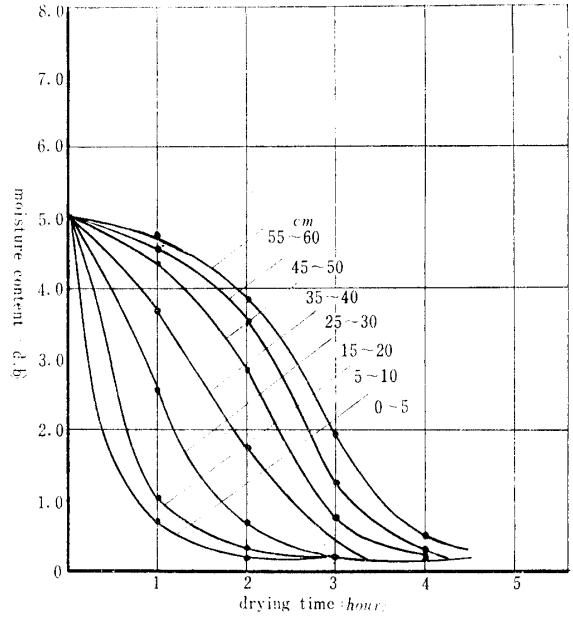


Fig. 10-23. Radino clovers, heat-air temp. : 60°C.

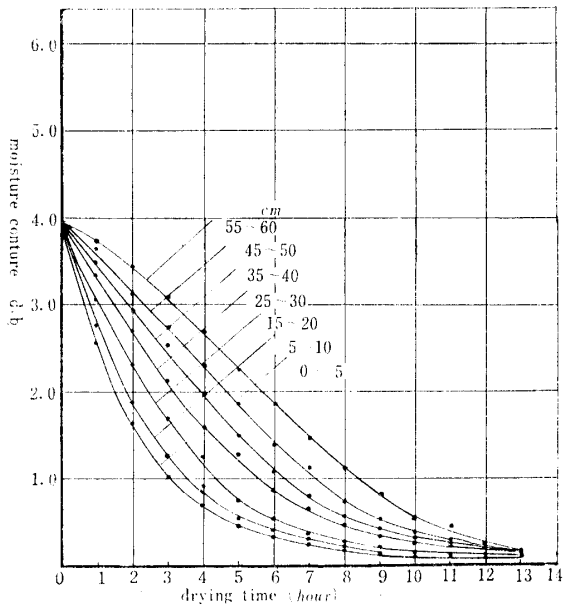


Fig. 10-22. Radino clovers, heat-air temp. : 40°C.

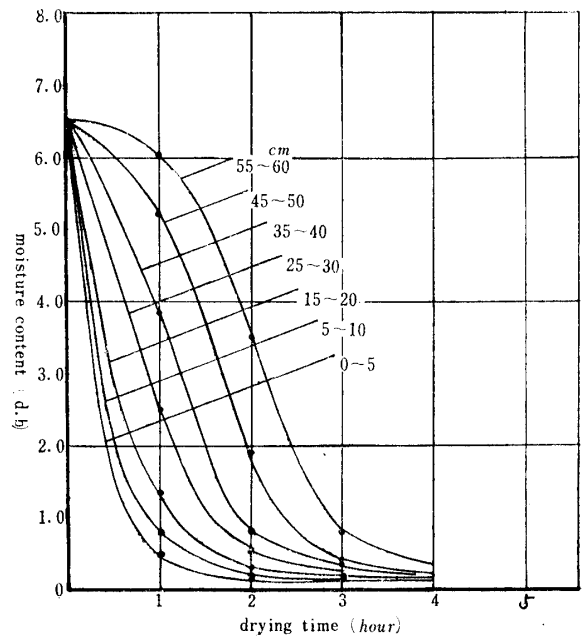


Fig. 10-24. Radino clovers, heat-air temp. : 80°C.

G : 送風量 (kg/kg)

W_1, W_2 : 乾燥終了時の下層および上層の含水比

Fig. 10-26 において上層部の微小断面層にあたる空気条件は近似的に排気空気と同様と見做す。乾燥初期は一般に恒率乾燥期間と見做されるので、層全体としての乾燥速度 $(dw/d\theta)_c$ は

$$\left(\frac{dw}{d\theta}\right)_c = k_c \frac{G}{M_d} (H_w - H_a) = \frac{G}{M_d} (H_1 - H_a) \quad \dots(10-23)$$

k_c : 恒率乾燥速度係数

したがって (10-23) 式より初期排気湿度 H_1 は次式で求められる。

$$H_1 = k_c (H_w - H_a) + H_a = k_c H_w + H_a (1 - k_c) \quad \dots(10-24)$$

次に層全体の平均含水比 W_m における排気湿度を H_m 、その時の乾燥速度を $(dw/d\theta)_d$ とすれば、 H_m は (10-25) 式で算定出来る。

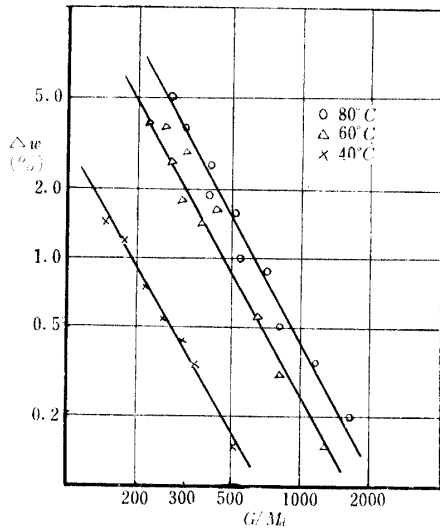


Fig. 10-25. Relationship between the moisture content range (Δw) and G/M_a in the case of the ventilation drying of the radino clovers.

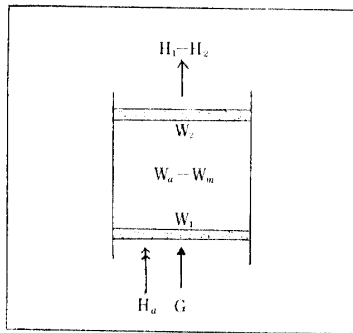


Fig. 10-26.

$$G(H_m - H_a) = M_d \left(\frac{dw}{d\theta} \right)_a \approx M_d, k_d, W_m$$

k_d : 減率乾燥速度勾配

$$H_m = \frac{M_d}{G} k_d, W_m, H_a \quad \dots(10-25)$$

すなわち下層は $(H_w - H_a)$ なる湿度推進力をもつ熱風により定常乾燥をうけるが、上層は恒率期間においては乾燥せず、減率期間にはいり乾燥が始まり、その乾燥推進力は $(H_w - H_1) \sim (H_w - H_m)$ の不定常乾燥となる。全層の平均含水比 W_a から W_c まで乾燥するに要する恒率乾燥期間の所要時間 (θ_c) は

$$\theta_c = \frac{W_a - W_c}{\phi_c} \approx \frac{W_a - W_c}{k_c(G/M_d)(H_w - H_a)} \text{ (hr)} \quad \dots(10-26)$$

全層の平均含水比 W_c から任意の含水比 W_m まで乾燥するに要する減率乾燥期間の所要時間 (θ_a) は、

$$\theta_a = \frac{W_c}{k_c(G/M_d)(H_w - H_a)} \log \frac{W_c}{W_m} \text{ (hr)} \quad \dots(10-27)$$

熱風条件 $(H_w - H_a)$ の条件下で θ 時間後における下層含水比 W_1 は (10-24) 式より

$$\log \frac{W_a}{W_1} = k_d \theta = \alpha (H_w - H_a)^n \theta$$

$$\therefore W_1 = \frac{W_a}{e^{\alpha(H_w - H_a)^n \theta}} \quad \dots(10-28)$$

また上層では熱風条件は $(H_w - H_1)$ より $(H_w - H_m)$ まで不定常に変化するが、平均含水比 W_m における排気湿度を H_m とすれば、前と同様に上層含水率 W_2 は (10-29) 式で求められる。

$$W_2 = \frac{W_a}{e^{\alpha(H_w - H_m)^n \theta d}} \quad \dots(10-29)$$

したがって全層として恒率乾燥期間で平均含水比 W_{m1} における上下層の水分較差 (ΔW_{m1}) は

$$\Delta W_{m1} = W_a - W_1 = W_a (1 - e^{-\alpha(H_w - H_a)^n \theta d}) \quad \dots(10-30)$$

また全層とし減率期間で平均含水比 W_{m2} における上、下層の水分較差 (ΔW_{m2}) は次式で表わされる。

$$\Delta W_{m2} = W_a (e^{-\alpha(H_w - H_a)^n \theta} - e^{-\alpha(H_w - H_m)^n \theta d})$$

$$(\theta = \theta_c + \theta_a) \quad \dots(10-31)$$

で表わされる。

(3) レンゲ、クローバーにおける上層、下層の水分較差の近似計算

前記、レンゲ、クローバーにおける実験を (2) において展開した水分較差の近似算定式に適用してみる。

(A) レンゲの場合

風量乾重比 $G/M_d < 270 \text{ (kg/kg-hr)}$ の場合

$$H_1 = 0.63 H_w + 0.37 H_a \text{ (kg/kg)}$$

$$H_m = \frac{0.63(H_w - H_a)W_m + H_a}{W_c} \text{ (kg/kg)}$$

$$W_c = 3.0 \sim 2.9$$

$$\theta_d = \frac{W_c}{0.63(G/M_d)(H_w - H_a)} \log \frac{W_c}{W_m} \text{ (hr)}$$

$$\theta_c = \frac{W_a - W_c}{0.63(G/M_d)(H_w - H_a)}$$

風量乾重比 $(G/M_d) > 270 \text{ (kg/kg-hr)}$ の場合

$$H_1 = 80.3(G/M_d)^{-0.86}(H_w - H_a) + H_a \text{ (kg/kg)}$$

$$H_m = 80.3(G/M_d)^{0.14}(H_w - H_a) \left(\frac{M_d}{G} \right) \left(\frac{W_m}{W_c} \right) + H_a \text{ (kg/kg)}$$

$$\theta_d = \frac{W_c}{80.3(G/M_d)^{0.14}(H_w - H_a)} \log \frac{W_c}{W_m} \text{ (hr)}$$

$$W_c = 3.0 \sim 4.0$$

$$\theta_c = \frac{(W_a - W_c)}{80.3(G/M_d)^{0.14}(H_w - H_a)}$$

したがって下層および上層の θ_d および $(\theta_c + \theta_d)$ 時間後における乾量基準含水比は

$$W_1 = \frac{W_a}{e^{621.8(H_w - H_a)1.48\theta}} \dots \theta \text{ 時間後の下層含水比}$$

$$W_2 = \frac{W_a}{e^{621.8(H_w - H_a)1.48\theta d}} \dots (\theta_c + \theta_d) \text{ 時間後における上層含水比}$$

(B) クローバーの場合

風量乾重比 $G/M_d < 380 \text{ (kg/kg-hr)}$ の場合

$$H_1 = 0.60 H_w + 0.4 H_a \text{ (kg/kg)}$$

$$H_m = \frac{0.60(H_w - H_a)W_m + H_a}{W_c} \text{ (kg/kg)} \quad W_c = 3.0 \sim 3.1$$

$$\theta_d = \frac{W_c}{0.60(G/M_d)(H_w - H_a)} \log \frac{W_c}{W_m} \text{ (hr)}$$

$$\theta_c = \frac{(W_a - W_c)}{0.60(G/M_d)(H_w - H_a)} \text{ (hr)}$$

風量乾重比 $G/M_d > 380 \text{ (kg/kg-hr)}$ の場合

$$H_1 = 50.1(G/M_d)^{-0.75}(H_w - H_a) + H_a \text{ (kg/kg)}$$

$$H_m = 50.1(G/M_d)^{0.25}(H_w - H_a) \left(\frac{M_d}{G}\right) \left(\frac{W_m}{W_c}\right) + H_a \text{ (kg/kg)}$$

$$\theta_d = 50.1(G/M_d)^{0.25}(H_w - H_a) \log \frac{W_c}{W_m} \text{ (hr)}$$

$$\theta_c = 50.1(G/M_d)^{0.25}(H_w - H_a) \text{ (hr)}$$

したがって下層および上層の $\theta_d(\theta_c + \theta_d)$ 時間後における乾量基準含水比は、

$$W_1 = \frac{W_a}{e^{208.7(H_w - H_a)1.20\theta}} \text{ (hr)} \dots \theta \text{ 時間後の下層の含水比}$$

$$W_2 = \frac{W_a}{e^{208.7(H_w - H_a)1.20\theta d}} \text{ (hr)} \dots (\theta_c + \theta_d) \text{ 時間後の上層の含水比}$$

上記計算により計算された上層、下層の含水比の時間的変化と、実験により求めたものとを、レンゲについて比較した結果は Fig. 10-27 のようである。なお乾燥条件は 2 節 Test No. 8 について比較したものである。

摘 要

(1) 厚層通気乾燥の場合の牧草類の乾燥特性曲線は乾燥条件により、乾燥速度が含水比に比例して減少する場合と、その $dw/d\theta \sim W$ 曲線が上方に凸の場合とがある。 $G/M_d < 300$ 以下では乾燥初期における恒率乾燥期間が認められ、 G/M_d が少なくなれば限界含水比も低下する。

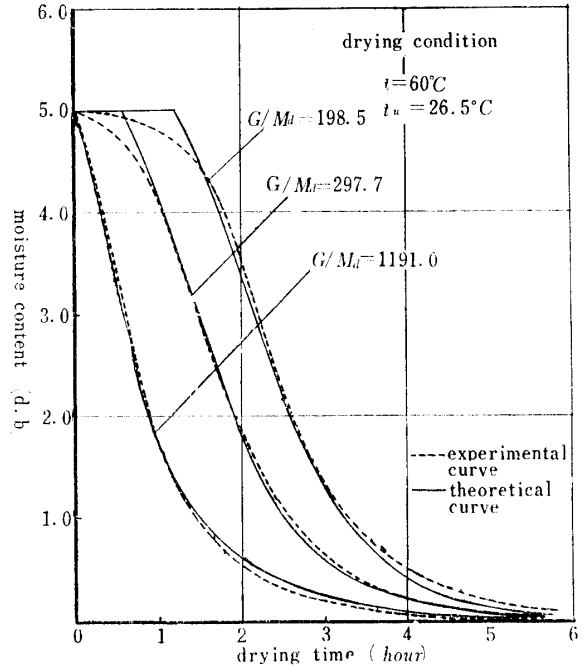


Fig. 10-27. Comparison between the theoretical drying curves and the experimental ones in each G/M_d of the ventilation drying of the milk vetches.

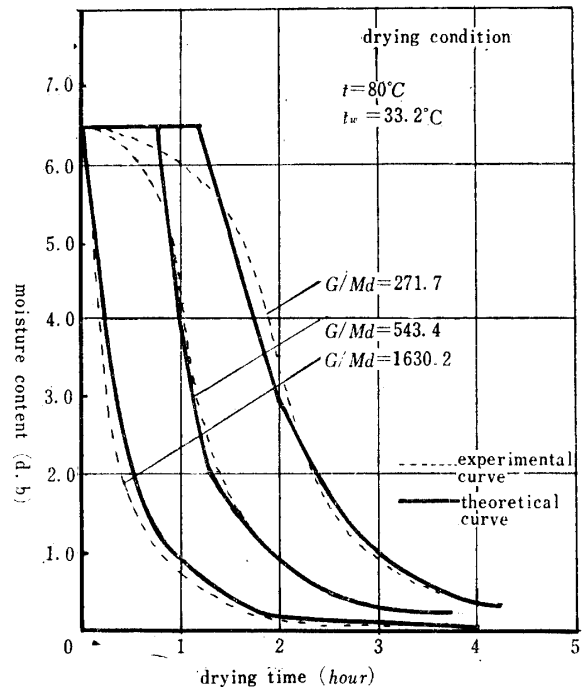


Fig. 10-28. Comparison between the theoretical drying curves and the experimental ones in each G/M_d of the ventilation drying of the radino clovers.

(2) 恒率乾燥速度 k_c と、 G/M_d との間には次の関係がある。

レンゲの場合

$$G/M_d > 270 \quad k_c = 80.3(G/M_d)^{-0.86}$$

$$G/M_d < 270 \quad k_c = 0.63$$

クローバーの場合

$$G/M_d > 380 \quad k_c = 50.1(G/M_d)^{-0.745}$$

$$G/M_d < 380 \quad k_c = 0.60$$

(3) 熱容量係数 (h_a), 物質移動係数 (k_a) と送風量 $G(\text{kg/hr})$ との間には次の関係がある。

レンゲ

$$G < 450(\text{kg/hr-m}^3) \quad h_a = 1.11G^{0.82} \quad k_a = 4.63G^{0.82}$$

$$G > 450(\text{kg/hr-m}^3) \quad h_a = 1100 \quad k_a = 4583$$

クローバー

$$G < 650(\text{kg/hr-m}^3) \quad h_a = 0.972G^{0.82} \quad k_a = 4.05G^{0.82}$$

$$G > 650(\text{kg/hr-m}^3) \quad h_a = 1300 \quad k_a = 5417$$

(4) G/M_d が小なる場合, 任意の乾燥条件における減率乾燥速度は実験による乾燥特性曲線を用いて, 次式の関係で求められる。

$$\phi_{d1} = \phi_{d2} \frac{\phi_{c1}}{\phi_{c2}}$$

G/M_d が大なるとき, および近似的に求める場合には減率乾燥速度勾配 k_d を用いて算定する。 G/M_d が一定の場合, k_d と $(t-t_w)$ の間には, $k_d = \alpha(H_w - H)$ なる関係があり, G/M_d が 1000~200 の場合, α は $2.08 \sim 1.56 \times 10^{-2}$ である。

(5) 厚層通気乾燥における上層および下層の水分較差を求める理論式を導いた。

(6) 上記理論式により, 牧草の厚層通気乾燥において, θ 時間後の下層および上層の含水比 W_1, W_2 はそれぞれ次式で求められる。

$$W_1 = \frac{W_a}{e^{\alpha(H_w - H_a)\theta}} = \frac{W_a}{e^{621.8(H_w - H_a)1.48\theta}} \quad (\text{レンゲ})$$

$$W_1 = \frac{W_a}{e^{208.7(H_w - H_a)1.20\theta}} \quad (\text{クローバー})$$

$$W_2 = \frac{W_a}{e^{\alpha(H_w - H_m)n\theta d}} = \frac{W_a}{e^{621.8(H_w - H_m)1.48\theta d}} \quad (\text{レンゲ})$$

$$W_2 = \frac{W_a}{e^{208.7(H_w - H_m)1.20\theta d}} \quad (\text{クローバー})$$

第11章 農産物の厚層通気乾燥における乾燥熱効率

Studies on the thermal efficiency of deep-bed ventilation drying on the respective farm products.

I. はしがき

静置式乾燥機で農産物を乾燥する場合, その乾燥経

費算定のため, 乾燥熱効率を知る必要がある。特にこの型式の乾燥機では乾燥期間中における熱効率の変動がはげしく, 乾燥の進行とともに熱効率が減少し, 乾燥中における平均熱効率を把握しにくい。

この実験では, その乾燥熱効率が乾燥時間, 乾燥程度, 送風量, 堆積量, および熱風条件によりうける影響を理論的, 実験的面より考察検討する。

II. 乾燥熱効率の定義

乾燥熱効率については従来, 主として次の二つの定義がなされている。

$$(1) \text{ 熱効率} = \frac{\text{水分の蒸発潜熱} + \text{材料に与えた顕熱}}{\text{空気を外気温度から所定の空気にするに要する熱量}}$$

$$(2) \text{ 熱効率} = \frac{\text{水分の蒸発潜熱} + \text{材料に与えた顕熱}}{(\text{燃料消費量}) \times \text{単位重量発熱量}}$$

しかし本章においては実用的, 経済的利用を考慮して乾燥熱効率 (η) を次のように定義した。

$$\eta = \frac{R \cdot r_m}{G \cdot C_H (t_1 - t_0)} \quad \dots(11-1)$$

R : 毎時蒸発水分量 (kg/hr)

r_m : 材料温度における蒸発潜熱 (Kcal/kg)

G : 質量風量 (kg/hr)

C_H : 湿り空気比熱 (Kcal/kg-wet-air)

t_1 : 熱風温度 ($^{\circ}\text{C}$)

t_0 : 加熱前外気温度 ($^{\circ}\text{C}$)

III. 通気乾燥における熱効率の理論近似算定式

静置通風乾燥機においては, その蒸発水分量は恒率乾燥期間においては略一定となるが減率乾燥期間においては, 乾燥の進行とともに低下する。したがってこれを恒率, 減率期間に分けて考える。

1. 恒率乾燥期間における乾燥熱効率

恒率乾燥期間における毎時蒸発水分量 $R_c(\text{kg/hr})$ は, 厚層通気乾燥の場合近似的に次式で表わされる。

$$R_c = M_d \left(-\frac{dw}{d\theta} \right)_c = k_c \cdot G(t_1 - t_w) \frac{C_H}{r_m} \quad \dots(11-2)$$

M_d : 無水材料重量 (kg)

k_c : 恒率乾燥速度係数

したがってこの期間中における乾燥熱効率は (11-1) 式の定義にしたがって次式で表わされる。

$$\eta_c = \frac{R_c \times r_m}{G \cdot C_H (t_1 - t_0)} = k_c \frac{(t_1 - t_w)}{(t_1 - t_0)} \quad \dots(11-3)$$

すなわち, 各農産物の恒率乾燥速度係数 k_c , および熱風, 外気条件が既知であれば η_c は算定出来る (k_c については Tab. 11-1 に記載)。

2. 減率期間における乾燥熱効率 (η_d)

本論文1報, 2報の結果および他の実験結果から, 一般に厚層通気乾燥の場合, 減率期間ではその乾燥速度は堆積層全体の乾量基準含水比に比例して減少する場合が多い. またその減率期間の乾燥特性曲線が上方に凸の場合でも, 実用的範囲では近似的に直線と見做される場合が多い.

したがって減率期間の平均含水比 W_a における単位時間蒸発水分量 $R_d(\text{kg/hr})$ は次式で表わされる.

$$R_d = M_d \left(-\frac{dw}{d\theta} \right)_a = M_d \cdot k_a \cdot W_a = M_d \frac{\phi_c}{W_c} W_a \quad \dots(11-4)$$

k_a : 減率乾燥速度勾配

W_c : 限界含水比 (乾量基準)

ϕ_c : 恒率乾燥速度 $= (-dw/d\theta)_c$

また含水比 W_c から W_a までの所要乾燥時間 θ_a は $\theta_a = W_c / \phi_c \log W_c / W_a$ なるゆえ, W_a は次式で表わされる.

$$W_a = \frac{W_c}{e^{k_d \cdot \theta_a}} = \frac{W_c}{e^{\phi_c / W_c \cdot \theta_a}} \quad \dots(11-5)$$

(11-4), (11-5) 式より

$$R_d = \frac{M_d \cdot \phi_c}{e^{\phi_c / W_c \cdot \theta_a}} = \frac{R_c}{e^{k_d \cdot \theta_a}} \quad \dots(11-6)$$

したがって減率乾燥期間において, 乾燥時間 $\theta_a(\text{hr})$ で含水比 W_a になった場合における乾燥熱効率 η_a は (11-7) 式で求められる.

$$\eta_a = \frac{R_d \cdot r_m}{G \cdot C_H (t_1 - t_0)} = k_c \frac{(t_1 - t_w)}{(t_1 - t_0)} e^{-k_d \cdot \theta_a} \\ = \eta_c \cdot e^{-k_d \cdot \theta_a} = \eta_c \frac{W_d}{W_c} \quad \dots(11-7)$$

$$\therefore e^{-k_d \cdot \theta_a} = \frac{W_d}{W_c}$$

減率期間において, 乾燥時間 $\theta_a(\text{hr})$ の間における平均乾燥熱効率 (η_{a-m}) は (11-8) 式で求められる.

$$\eta_{a-m} = \frac{\eta_c}{\theta_a} \int_0^{\theta_a} e^{-k_d \cdot \theta} d\theta = \frac{\eta_c}{\theta_a \cdot k_d} (1 - e^{-k_d \cdot \theta_a}) \\ = \eta_c \frac{(1 - W_d / W_c)}{\log(W_c / W_a)} \quad \dots(11-8)$$

$$\therefore \theta_a = \frac{1}{k_d} \log \frac{W_c}{W_a}$$

したがって熱風条件, 外気条件の他の減率乾燥速度勾配 k_a , および限界含水比 W_c が既知であれば, η_a , η_{a-m} を求めることができる.

3. 全体としての平均乾燥熱効率

含水率 W_1 から W_2 まで乾燥する場合における限界含水比以後の平均乾燥熱効率 (η_m) は (11-6),

(11-7), (11-8) 式より (11-9) 式であたえられる.

$$\eta_m = \frac{\eta_c \cdot \theta_c + \eta_{a-m} \theta_a}{(\theta_c + \theta_a)} = \eta_c \frac{\left\{ \theta_c + \frac{(W_c - W_2)}{W_c \log(W_c / W_2)} \theta_a \right\}}{(\theta_c + \theta_a)} \\ = \eta_c \frac{(W_1 - W_2)}{\{(W_1 - W_c) + W_c \log(W_c / W_2)\}} \quad \dots(11-9)$$

すなわち, 厚層通気乾燥で乾燥速度が平均含水率に比例して減少する場合, 恒率期間における熱効率は (11-3) 式で, 減率期間における任意の乾燥時間, あるいは含水比における乾燥熱効率は (11-7) 式で, 減率期間における任意の乾燥時間, あるいは任意の含水比までの平均熱効率は (11-8) 式で, 全体としての平均熱効率は (11-9) 式で算定出来る.

III. 各農産物の厚層通気乾燥における乾燥熱効率の算定および実験との比較

1. 各農産物における恒率乾燥速度係数 k_c , 減率乾燥速度勾配 k_a , および限界含水比 W_c の実験値

III節でのべた近似算定式において, 恒率乾燥期間の乾燥熱効率の算定では, 熱風条件の他に恒率乾燥速度係数 k_c を各農産物について知る必要があり, 減率期間における算定式では, 厚層通気乾燥における減率乾燥速度勾配 k_a , および限界含水比 W_c を知る必要がある.

恒率乾燥速度係数 k_c , 減率乾燥速度勾配 k_a , 限界含水比 W_c については本論文, および第1報のそれぞれの章で実験結果を記載したが, その夫々を要約してみると Tab. 11-1, Tab. 11-2, Tab. 11-3 のようになる.

2. 牧草類における乾燥熱効率の算定例と実験結果との比較

静置式通気乾燥機を使用して, 牧草の熱風乾燥を行なった場合の熱効率について, 近似計算を行なった場合の計算方法およびそれによる結果と, 実験における結果を比較する.

乾燥条件とし, 熱風温度 t_1 , H_1 , その温度を t_0 , 送風量を $G(\text{kg/hr})$, 無水材料重量 M_d が既知の場合, レンゲおよびクローバーにおける乾燥熱効率は次のようである.

(1) 恒率乾燥期間における熱効率

適用範囲, レンゲ $G/M_d < 270$, クローバー $G/M_d < 380$

$$\text{レンゲ} \quad \eta_c = 0.63 \frac{t_1 - t_w}{t_1 - t_0}$$

Tab. 11-1. The coefficients of constant-rate-drying-speed (k_c) in the case of the deep-bed ventilation-drying of the respective farm products.

farm product	range of heat-air temp. (°C)	range $G(kg/hr-m^3)$ or $G/M_d(kg/kg-hr)$	coefficient of constant-rate-drying speed.
unhulled rice	40~60	$G < 2700$ $G > 2700$	0.82 $597.4 G^{-0.84}$
wheat grain	40~60	$G < 2300$ $G > 2700$	0.78 $244.2 G^{-0.77}$
rush	40~90	$G/M_d < 120$ $G/M_d > 120$	0.70 $13.0 (G/M_d)^{-0.62}$
milk vech	40~80	$G/M_d > 270$ $G/M_d < 270$	$80.3 (G/M_d)^{-0.86}$ 0.63
radino clover	40~80	$G/M_d > 380$ $G/M_d < 380$	$50.1 (G/M_d)^{-0.75}$ 0.60
pyrethrum	40~70	$G/M_d < 200$	0.745

notes, G : air quantity per m^3

Tab. 11-2. The gradients of the decreasing-rate-drying-speed (k_d) in the case of the deep-bed ventilation drying of the respective farm products.

farm product	range of heat-air temp. (°C)	range $G(kg/hr-m^3)$ or $G/M_d(kg/kg-hr)$	Gradient of the decreasing rate-drying speed (k_d)
unhulled rice	30~60	$G = 3000$ $G = 2000$ $G = 1500$ $G = 1000$	$k_d \doteq 5.5(t-t_w)^{1.2} \times 10^{-3}$ $k_d \doteq 6.8(t-t_w)^{1.15} \times 10^{-3}$ $k_d \doteq 7.1(t-t_w)^{1.11} \times 10^{-3}$ $k_d \doteq 7.8(t-t_w)^{1.06} \times 10^{-3}$
wheat grain	40~60	$G/M_d = 1.10$	$\{34.0(H_w - H)^{1.46} + 0.054\} \{G/W - 0.24\}$
rush	40~90	$G/M_d = 1000$ $G/M_d = 500$ $G/M_d = 200$	$k_d \doteq 2.38(t-t_w) \times 10^{-2}$ $k_d \doteq 2.16(t-t_w) \times 10^{-2} + 1.0$ $k_d \doteq 1.94(t-t_w) \times 10^{-2} + 3.0$
milk vech	40~80	$G/M_d = 1000$ $G/M_d = 500$ $G/M_d = 200$	$k_d \doteq 2.06(t-t_w) \times 10^{-2}$ $k_d \doteq 1.90(t-t_w) \times 10^{-2}$ $k_d \doteq 1.56(t-t_w) \times 10^{-2}$
radino clover	40~80	$G/M_d = 1000$ $G/M_d = 500$ $G/M_d = 200$	$k_d \doteq 2.08(t-t_w) \times 10^{-2}$ $k_d \doteq 2.15(t-t_w) \times 10^{-2}$ $k_d \doteq 1.84(t-t_w) \times 10^{-2}$
pyrethrum	40~70	$G/M_d = 100 \sim 400$	$k_d \doteq \{0.203G/M_d + 6.4\} (t-t_w) \times 10^{-3}$

クローバー $\eta_c = 0.60 \frac{t_1 - t_w}{t_1 - t_0}$

レンゲ

初期含水比 W_1 から W_c まで乾燥するに要する所要時間 θ_c (hr) は,

$\eta_d = \frac{\eta_c}{e^{k_d \cdot (\theta - \theta_c)}}$... 乾燥時間 θ (hr) の時の熱効率

レンゲ $\theta_c = \frac{W_1 - 3.0}{0.63(G/M_d)(H_w - H_1)}$

$\eta_d = \frac{W}{W_c} \eta_c = 0.63 \frac{t_1 - t_w}{t_1 - t_0} \cdot \frac{W}{3.0}$... 含水比 W のときの熱効率

クローバー $\theta_c = \frac{W_1 - 0.29}{0.60(G/M_d)(H_w - H_1)}$

(註) $k_d = \frac{0.63(G/M_d)(H_w - H_1)}{3.0}$

(2) 減率期間における乾燥時間 θ (hr) または、その時の含水比 W における乾燥熱効率

クローバー

$\eta_d = \frac{\eta_c}{e^{k_d \cdot 2(\theta - \theta_c)}}$... 乾燥時間 θ (hr) の時の熱効率

Tab. 11-3. The critical moisture contents in the case of the deep-bed ventilation-drying on the respective farm products.

farm product	range of heat-air temp. (°C)	range G/M_d (kg/hr-m ³) or G/M_d (kg/kg-hr)	Critical moisture content (d. b) (%)
unhulled rice	30	$G/M_d=2.8\sim 5.7$	$W_c=22.2\sim 27.2$
	40	$G/M_d=2.8\sim 5.7$	$W_c=19.0\sim 26.2$
	50	$G/M_d=2.8\sim 5.7$	$W_c=17.0\sim 23.8$
	60	$G/M_d=2.8\sim 5.7$	$W_c=16.0\sim 22.0$
wheat grain	40	$G/M_d=1.3\sim 2.7$	$W_c=20.2\sim 18.5$
	50	$G/M_d=1.3\sim 2.7$	$W_c=18.5\sim 16.9$
	60	$G/M_d=1.3\sim 2.7$	$W_c=17.2\sim 18.2$
rush	40~90	$G/M_d=368\sim 73.6$	$W_c=1.5\sim 2.0$
pyrethrum	40~70	$G/M_d=11.9$	$W_c=3.0\sim 2.4$
milk vech	40~80	$G/M_d=200\sim 500$	$W_c=3.0\sim 4.0$
radino clover	40~80	$G/M_d=200\sim 500$	$W_c=2.8\sim 4.0$

Tab. 11-4. Drying condition

Drying sample	heat-air temp.		open air temp. t_0 (°C)	G/M_d
	t (°C)	t_w (°C)		
milk-veches and radino clovers	40	22.0	20	270
	60	26.5	20	270
	80	31.0	20	270

$$\eta_d = \frac{W}{W_c} \eta = 0.60 \frac{t-t_w}{t_1-t_0} \cdot \frac{W}{3.0} \dots \text{含水比 } W \text{ のとき}$$

の熱効率

(註) $k_{d2} = \frac{0.60(G/M_d)(H_w-H_1)}{2.9}$

- (3) 減率期間において θ_a (hr) までの間、および含水比 W_c から W_2 まで (時間 θ_a における含水比) までの平均熱効率 (η_{d-m})

$$\eta_{d-m} = \frac{\eta_c}{\theta_a \cdot k_{d1}} (1 - e^{-k_{d1} \theta_a}) \dots \theta_a \text{ (hr) までの平均熱効率}$$

レンゲ $k_{d1} = \frac{0.63(G/M_d)(H_w-H_1)}{3.0}$

クローバー $k_{d2} = 0.60(G/M_d)(H_w-H_1)$

$$\eta_{d-m} = \eta_c \cdot \frac{W_c - W_2}{W_c \log W_c / W_2} \dots W_c \text{ から } W_2 \text{ までの平均熱効率}$$

- (4) 含水比 W_1 から W_2 まで乾燥する場合の平均熱効率

レンゲ

$$\eta_{-m} = 0.63 \frac{W_1 - W_2}{((W_1 - 3.0) + 3.0 \log (3.0/W_2))}$$

クローバー

$$\eta_{-m} = 0.60 \frac{W_1 - W_2}{((W_1 - 2.9) + 2.9 \log 2.9/W_2)}$$

以上の計算方法によりレンゲ、クローバーについて Tab. 11-4 の条件において乾燥した場合の平均乾燥熱効率と含水比 (乾量基準) との関係性を求めた結果は Fig. 11-1, Fig. 11-2 のようである。

また乾燥条件が Tab. 10-1 の Test No. X-1, X-2, X-3 の場合における乾燥熱効率の時間的变化について、実験による場合と、理論式より算定した場

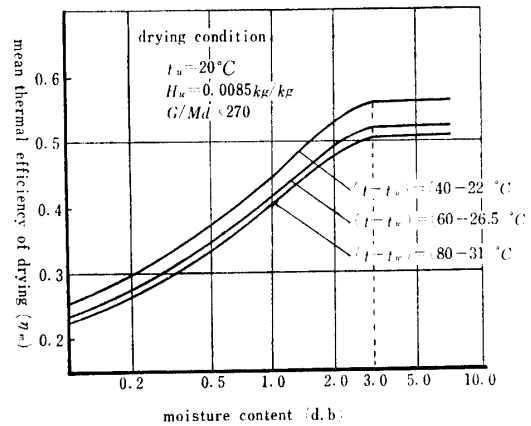


Fig. 11-1. Relationship between the theoretical mean thermal efficiency of the drying and the moisture content (d. b) in the case of the ventilation drying of the milk vetches.

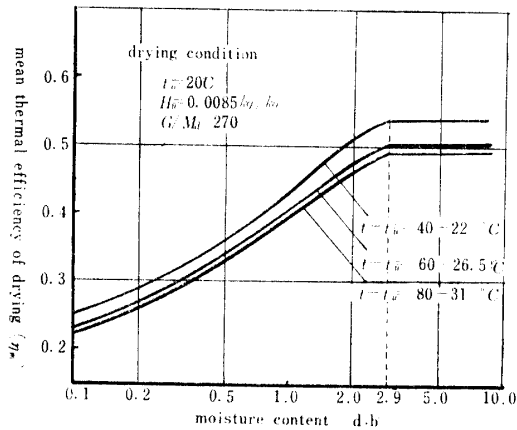


Fig. 11-2. Relationship between the theoretical mean thermal efficiency of the drying and the moisture content (d. b) in the case of the ventilation drying of the radino clovers.

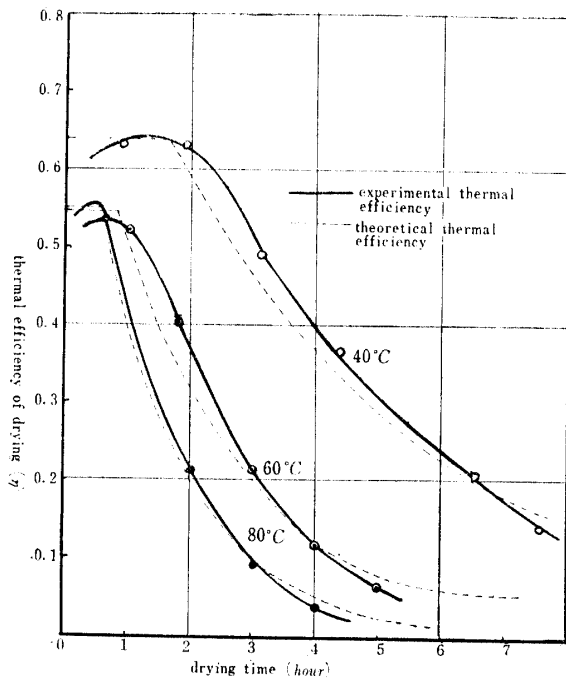


Fig. 11-3. Comparison between the theoretical thermal efficiency curves and experimental ones in the case of the deep-bed ventilation drying of the milk vetches.

合を比較した結果は Fig. 11-3 のようである。

この結果、実験と理論値との誤差は僅かであり、実用的段階で前述計算式は使用出来る。

IV. 摘要

1. 恒率期間における熱効率 (η_c), 減率期間熱効率 (η_d), 全体としての平均熱効率 η_m は次式で算定出来る。

$$\eta_c = k_c \frac{t_1 - t_w}{t_1 - t_0}$$

$$\eta_d = \eta_c e^{-k_d \cdot d} = \frac{W_d}{W_c} \cdot \eta_c$$

$$\eta_m = \eta_c \frac{(W_1 - W_2)}{(W_1 - W_c) + W_c \log W_c / W_2}$$

2. 上記算定に必要な厚層通気における恒率乾燥速度係数 k_c , 減率乾燥速度勾配 k_d , 限界含水比 W_c について、それぞれの農産物における実験値を記載した (Tab. 11-1, 2, 3 参照)。

3. 全体としての平均乾燥熱効率は η_c により規定されるか、 k_c および $t_1 - t_w / t_1 - t_0$ が大なるほど熱効率は高い。一般に高温熱風においては、 $t_1 - t_w / t_1 - t_0$ による差異は少なくなる。

文 献

- 1) BEASLEY, E. O. and J. W. DICKENS : *Agr. Eng.*, Aug., 434~436 (1964)
- 2) BROWN, D. A. : *J. A. E. R.*, 7(4), 288~290 (1962)
- 3) BROOKER, D. B. : *Trans. A. S. A. E.*, 1, 72~77 (1961)
- 4) DAY, C. L. : *Trans. A. S. A. E.*, 6, 199~201 (1963)
- 5) HALL, G. E. : *Agr. Eng.*, 45(4), 198~207 (1964)
- 6) 藤田重文・他 : 化学工学 (III) 乾燥, 302~349 (1964)
- 7) 亀井三郎 : 化学機械の理論と計算 (1959)
- 8) 桐栄良三 : 化学工学, 28(6), 458~467 (1964)
- 9) 桐栄良三 : 日本機械学会誌, 65(523), 1473~1479 (1962)
- 10) MOTTHEUS, J. : *J. A. E. R.*, 7(1), 21~26 (1962)
- 11) PABIS, S. and S. H. HENDERSON : *J. A. E. R.*, 7(1), 21~26 (1962)
- 12) SCHAPER, L. A., G. W. ISSACS and A. C. DALE : *Trans. A.S.A.E.*, 4(2), 140~141 (1961)
- 13) 田原迫昭爾 : 鹿児島大学学術報告, 第17号, 307~390 (1966)
- 14) 田原迫昭爾 : 広島農試業務報告, 115~125 (1960); 101~106 (1961)
- 15) 内田俊一・他 : 化学工学, 401~403, 447~480, 481~550 (1962)
- 16) WANG, J. K. and C. W. HALL : *Trans. A. S. A. E.*, 4(1), 33~36 (1961)
- 17) WARNER, M. G. R. and D. A. BROWN : *J. A. E. R.*, 7(4), 359~366 (1962)
- 18) 渡辺鉄四郎・清栄浩 : 農業機械学会誌, 12(3~4), 11~20 (1951)

第 12 章 要 約

1959 年から実施した農産物の熱風乾燥法に関する研究の中、第 2 報においては、次の 5 項目の研究についての研究結果を記載した。

- I. 並行流連続乾燥方式による糶乾燥の基礎的研究.
- II. 通気流連続乾燥方式による穀類乾燥の基礎的研究.
- III. イ草の熱風乾燥法に関する研究.
- IV. 牧草の熱風乾燥法に関する研究.
- V. 農産物の厚層通気乾燥における乾燥熱効率.

各項目ごとに研究結果を要約すれば、次のようである。

I. 並行流連続乾燥方式による糶乾燥の基礎的研究

(1) 並行流乾燥における各乾燥条件下での乾燥特性曲線を実験で求め、その結果より、物質移動係数 (k)、熱移動係数 (h)、恒率乾燥速度 (ϕ_c)、減率乾燥速度係数 (k_a) を求める一般式を導き出した (k は 7-9, h は 7-10, ϕ_c は 7-11, 7-12, k_a は 7-18, 7-19 の各式を参照)。

(2) 定常および不定常並行流乾燥において、任意の乾燥条件下での乾燥能率算定の一般近似式を得た (定常流については、7-20, 7-21, 7-22 式, 不定常流については、向流では 7-25, 並流では 7-26 の各式を参照)。

(3) 並行流乾燥における減率乾燥期間の乾燥速度は、実用的含水比内においては含水比に比例して減少し、その限界含水率は、20%~23% である。

II. 通気連続乾燥方式による穀類乾燥の基礎的研究

(1) 厚層通気乾燥における各乾燥条件下での乾燥特性曲線を実験で求め、その結果より、任意の乾燥条件下における恒率乾燥速度係数 (k_c)、減率乾燥速度勾配 (k_a)、を算定する一般式を導き出した (k_c については 8-19, 8-20 式, k_a については 8-23 式を参照)。

(2) 穀類 (糶, 麦) の通気連続乾燥における乾燥能率, および乾燥機容積設計のために必要な熱容量係数 (h_a)、物質移動容量係数 (k_a)、移動単位数 (N_f) を求める一般式を導き出した (N_f については 8-17, k_a , h_a については 8-18 式参照)。

(3) 不定常流下における連続通気乾燥の能率を、任意に設定された乾燥条件下で求める方法を検討した。

III. イ草の熱風乾燥に関する研究

(1) 泥染イ草を各乾燥条件下で厚層通気乾燥し、その乾燥特性曲線を求めた。その結果、任意の乾燥条件下における恒率乾燥速度および係数 (ϕ_c , k_c)、減率乾燥速度勾配 (k_a)、乾燥所要時間 (θ) を算定出来る一般近似式を得た (k_c については 9-1, ϕ_c は 9-2, θ は 9-3, k_a は 9-4 式を参照)。

(2) 各堆積方法が異なった場合における、乾燥速度や乾燥むらについて比較検討した。

(3) 乾燥の方法がイ草の物理的性質におよぼす影響について検討した。

(4) 泥染めイ草と非泥染めイ草について、熱風、天日乾燥の場合の乾燥速度について比較検討した。

(5) 常温通気が生イ草の一時的貯蔵におよぼす効果について試験した。

IV. 牧草の熱風乾燥法に関する研究

(1) 牧草 (レンゲ, クローバー) を各乾燥条件下で厚層通気乾燥し、その乾燥特性曲線を求めた。その結果、任意の乾燥条件下における恒率乾燥速度および係数 (ϕ_c , k_c)、減率乾燥速度勾配 (k_a)、限界含水比 (W_c) を算定する一般近似式を導いた (k_c については 10-6, 10-7, 10-8, 10-9, ϕ_c は 10-10, 10-11, 10-12, 10-13, k_a は 10-16, 10-17, W_c は 10-18 式を参照)。

(2) レンゲ, クローバーの厚層通気乾燥を行う場合の熱移動容量係数 (h_a)、物質移動容量係数 (k_a) と送風量との関係を明かにした (関係式については 10-14, 10-15 式を参照)。

(3) レンゲ, クローバーの任意の条件での厚層通気乾燥における乾燥所要時間についての近似算定式を導いた (10-19, 10-20, 10-21 式参照)。

(4) 上記厚層通気乾燥における上層, 下層の水分むらを算定する近似算定法をみちびき、この算定法による値と、実験により測定された値とを比較検討した。

V. 農産物の厚層通気乾燥における乾燥熱効率

(1) 厚層通気乾燥の場合、任意の乾燥条件下における乾燥熱効率 (η) の算定式を導き出した (恒率期間の熱効率 η_c については 11-3 式, 減率期間の任意の含水比における熱効率 η_a については 11-7 式, 減率期間全体の平均熱効率 η_{m-a} については 11-8 式, 全体としての平均熱効率 η_m については 11-9 式を参照)。

(2) 上述の熱効率算定に必要な各農産物における恒率乾燥速度係数 (k_c)、減率乾燥速度勾配 (k_a) および限界含水比 (W_c) をまとめて記載した。

(3) 平均乾燥熱効率は恒率乾燥速度係数 (k_c) と、加熱温度によって左右されることが判明した。

Summary

The following five items on the drying of farm products by heat-air were reported in this second paper published in accordance with the results obtained by the studies which have been executed since 1959 :

1. The continuous-drying of the unhulled rices by the parallel-current method.
2. The ventilation-continuous-drying of the crops.
3. The heat-air drying of the rushes.
4. The heat-air drying of the pastures.
5. The thermal efficiencies of the deep-bed-ventilation-drying on the respective farm products.

The summarized results obtained of the items are as follows :

1. The continuous-drying of the unhulled rices by parallel-current.
 - (1) The drying-characteristic-curves of the parallel-current-drying under the various drying conditions were ascertained experimentally, and, then, according to the begotten curves under the given drying conditions, approximation formulas were conducted concerning the following values : the constant-rate-drying-speed (ϕ_c), the decreasing-rate-drying-speed (ϕ_d), the mass transfer coefficient (k), the film coefficient of heat-transfer (h) and the critical moisture content (W_c).
 - (2) Under the given drying conditions the approximation formulas calculating, in the parallel-steady-flow-drying as well as in the parallel-unsteady-flow-drying, the drying-efficiencies were conducted.
 - (3) The drying-speed, during the decreasing-rate-drying term in the parallel-current-drying, decreases, provided that it is within the practical moisture ratio, in right proportion to the moisture ratio, its critical moisture content being 20%~23%.
2. The ventilation-continuous-drying of the crops.
 - (1) The drying characteristic curves of the deep-bed ventilation-drying under the various conditions were researched experimentally, with the conduction, made under the facultative drying conditions, of the experimental formulas calculating the coefficient of the constant-rate-drying-speed (k_c) and the gradient of the decreasing-rate-drying-speed (k_d).
 - (2) A conduction was made on the approximation formulas concerning the values necessary for the calculation of the drying-efficiency and for the designing of the drying machines in the execution of the ventilation-continuous-drying of crops ; namely, the capacity coefficient of heat transfer (h_a), the capacity coefficient of mass transfer (k_a) and the number of the transfer units N_t .
 - (3) The calculation of the possible drying-efficiency in the execution of the ventilation-continuous-drying under the unsteady-flow was carried out through the facultative drying conditions.
3. The heat-air drying of the rushes.
 - (1) The drying characteristic curves in the ventilation-drying of the dyed rushes were researched experimentally under the various drying conditions, with the conduction of the approximation formulas concerning the following values : namely, the coefficient of the constant-rate-drying-speed (k_c), the gradient of the decreasing-rate-drying-speed (k_d) and the drying time (θ).
 - (2) When the accumulation method was not identical, comparative examination was carried out on the drying speed and the unevenness of the drying degrees.
 - (3) The examinations were made on the effects of the respective methods on to the physical properties of the rushes.
 - (4) Comparative examinations were made on the drying speed of the dyed rushes and the undyed rushes between the heat-air-drying and the sun-drying.
 - (5) The effects of the natural-air ventilation-drying on to the temporary storage of the dyed rushes were examined.
4. The heat-air drying of the pastures.
 - (1) Concerning the milk veches and radino clovers used as the samples, the drying characteristic curves of the deep-bed-ventilation-drying under the various drying conditions were researched experimentally, with the conduction of the respective approximation formula calculating the coefficient of the constant-rate-drying-speed (k_c), the gradient of the dec-

- reasing-rate-drying-speed (k_d) and the critical water content (W_c).
- (2) In case of the ventilation-drying of the pastures clarification was made on the relationships between the capacity coefficient of heat transfer (k_a), the capacity coefficient of mass transfer (k_m) and the air quantity, employed.
 - (3) In case of the deep-bed ventilation-drying of the pastures, conduction was made, under facultative condition, of the approximation formula for the calculation of the drying time.
 - (4) In case of the ventilation-drying, a theoretical formula to calculate the moisture content range was found, with the comparative examination executed between the theoretical values and the experimental ones.
5. The thermal efficiencies of the deep-bed ventilation-drying on the respective farm products.
- (1) Under the various drying conditions, with the conduction of the theoretical formula calculating the thermal efficiencies of drying, the following experimental values of the respective farm products necessary for the calculation of the thermal efficiencies of drying were ascertained; namely, the coefficient of the constant-rate-drying-speed (k_c), the gradient of the decreasing-rate-drying-speed (k_d), the critical moisture content (W_c).
 - (3) It was ascertained that the mean thermal efficiency of the deep-bed ventilation-drying was dependent on the coefficient of the constant-rate-drying-speed (k_c) and the temperature of the added heat.