

切断甘藷を連続乾燥する場合の乾燥能率の計算

田原迫 昭 爾

(農業機械第2研究室)

昭和58年8月10日 受理

Calculation of the Drying Efficiency in the Continuous Drying of the Specimens Cut out of Sweet Potatoes

Shōji TAHARAZAKO

(Laboratory of Agricultural Machinery I)

結 言

甘藷を乾燥し、保存性を増し、輸送を容易にし、工業原料や飼料等として長期にわたる供給を可能にする

ことは、生産量の多い南九州としては重要なことである。

この研究は、切断甘藷を大量に連続乾燥する場合の基礎的資料を得るために行ったもので、能率的、経済

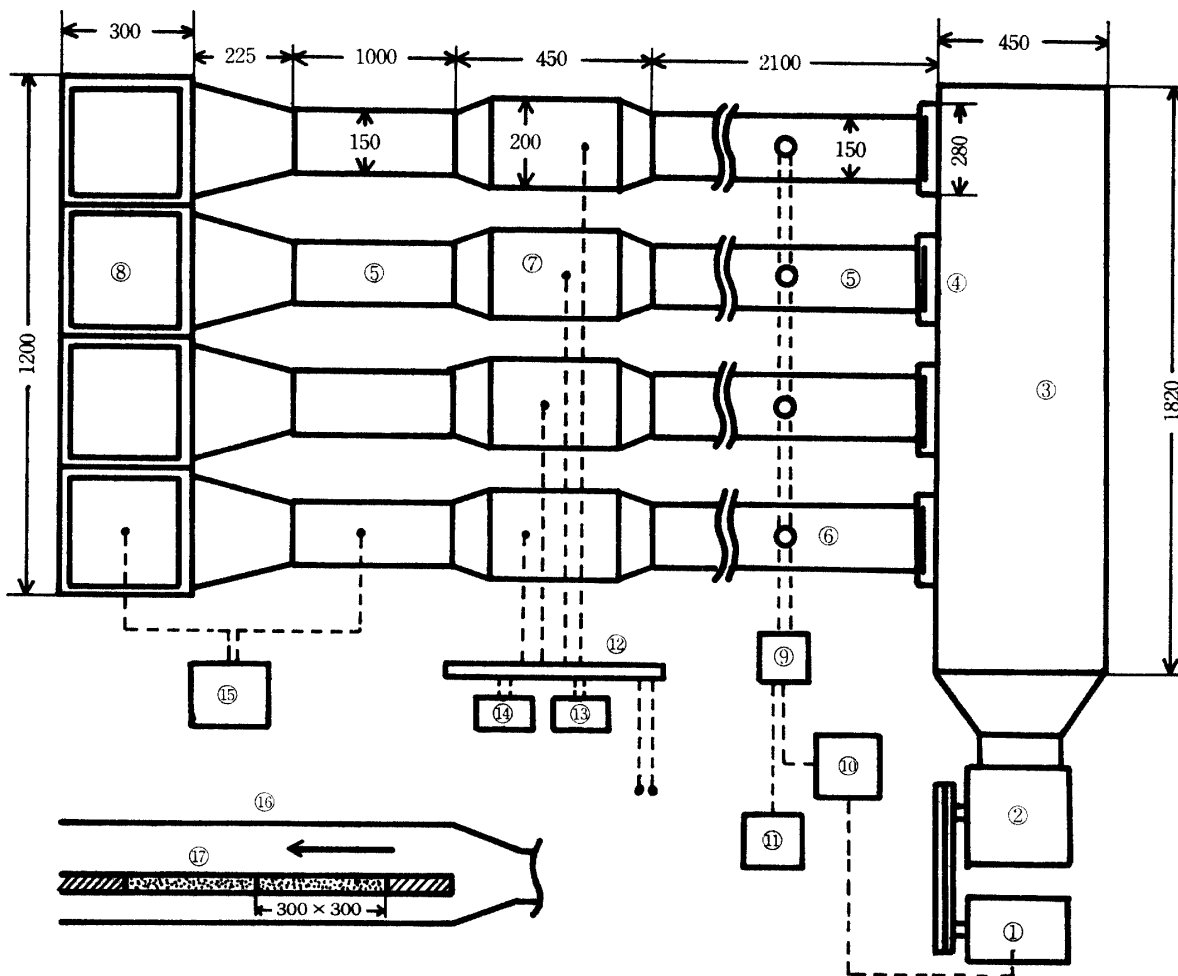


Fig. 1. Diagrammatic section of apparatus.

- ① V.S. motor. ② Turbo fan. ③ Air chamber. ④ Opening and shutting plate. ⑤ Air duct.
- ⑥ Pitot tube. ⑦ Electric heater. ⑧ Bin. ⑨ Differential pressure transmitter. ⑩ Control equipment of air quantity. ⑪ Recorder. ⑫ Switch board. ⑬ Voltmeter. ⑭ Ammeter.
- ⑮ Temperature recorder. ⑯ Bin in case of the parallel blow. ⑰ Materials for drying.

的乾燥法について検討する。

実験装置

実験装置の概要は Fig.1 に示す。外気条件や風量を均一にするため乾燥装置は4連とし、風胴③にとりつけられた風量調節シャッター④で各乾燥部への風量を調節、均一にする。ダクト⑤に取りつけたピトー管⑥により、流量を測定するとともに、流量の変動は微差圧変換器⑦および風量調整装置⑧を通じて変速モーター⑨に作動する。加熱部⑦で設定温度に加温された熱風は乾燥室⑩で材料を乾燥するが、乾燥は通気、並行流の二通りで行った。乾燥箱は通気流では30cm×30cm×5cm、並行流では30cm×30cm×3cmで、その中に切断甘藷を充填した。

乾燥条件

甘藷の切断方法は、線切り3通り、輪切り3通りで、熱風温度はおのおの40°C、50°C、60°C、70°Cの4段階で、乾燥方法は通気、並行流の2通りで実施した。それぞれの乾燥条件は Table 1 のようである⁵⁾。

実験結果と考察

1. 各熱風条件下における乾燥特性

Test No. 1~No. 9 までの各切断形状ごとの乾燥特性曲線は、Fig. 2~Fig. 4 のようであった。乾量基準含水比 (W) 対乾燥速度 ($dw/d\theta$) の特性曲線は線切りでは並行流、通気流とも上方に凸の傾向を示し、輪切りでは、薄い場合は上方に凸、厚くなれば凹の傾向を示した。これは薄い切断の場合は毛管水蒸発が顕著で

Table 1. Drying conditions in case of the cut-sweet potatoes

Test No.	Drift of blow	Cutting form	Dimensions of form (mm)	Heat-air temperature (°C)	Ambient air temperature (°C)			Initial moisture content (d.b)	Sample weight (kg)	Area of dry bed (m ²)
					dry bulb	wet bulb	absolute humidity			
1	Parallel-blow	Slenderly-cut	5×1×50	40~70	18.5	14.0	8.0×10 ⁻³	1.90	0.15	0.09
2			5×5×50	40~70	19.0	15.0	9.0×10 ⁻³	1.90	0.15	0.09
3			3×3×50	40~70	14.5	11.0	6.7×10 ⁻³	1.90	0.15	0.09
4	Ventilation-blow	Slenderly-cut	5×1×50	40~70	19.5	14.0	7.6×10 ⁻³	2.27	0.20	0.09
5			5×5×50	40~70	19.5	14.0	7.6×10 ⁻³	2.27	0.20	0.09
6			3×3×50	40~70	19.5	14.0	7.6×10 ⁻³	2.27	0.20	0.09
7	Parallel-blow	Round-cut (thickness)	2.5	40~70	13.0	10.5	7.0×10 ⁻³	1.67	0.15	0.09
8			5.0	40~70	15.5	11.0	6.3×10 ⁻³	1.67	0.15	0.09
9			7.5	40~70	15.5	11.0	6.3×10 ⁻³	1.67	0.15	0.09

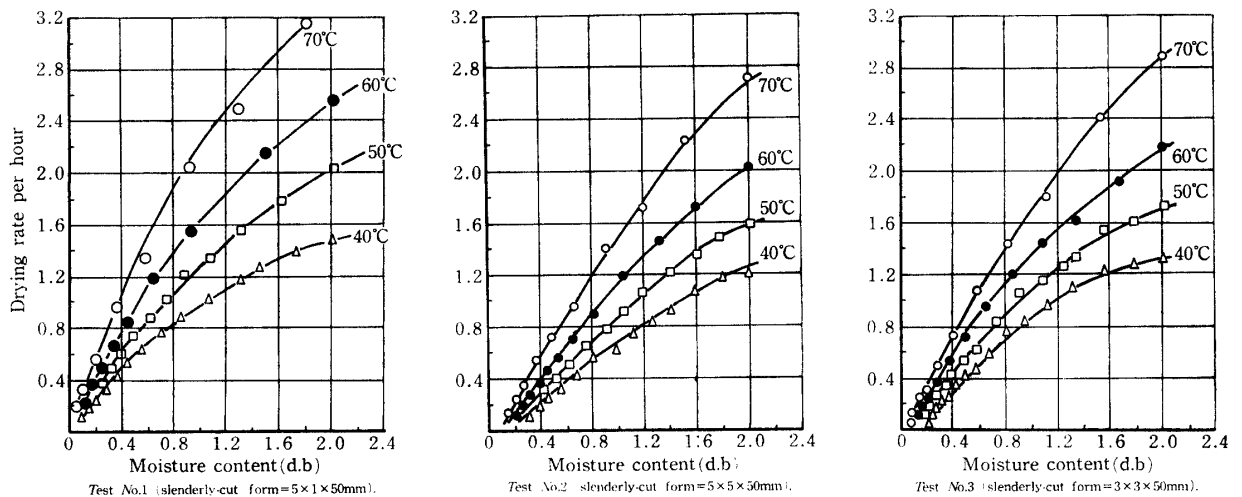


Fig. 2. Drying characteristic curves of the slenderly-cut sweet potatoes under the parallel-blow.

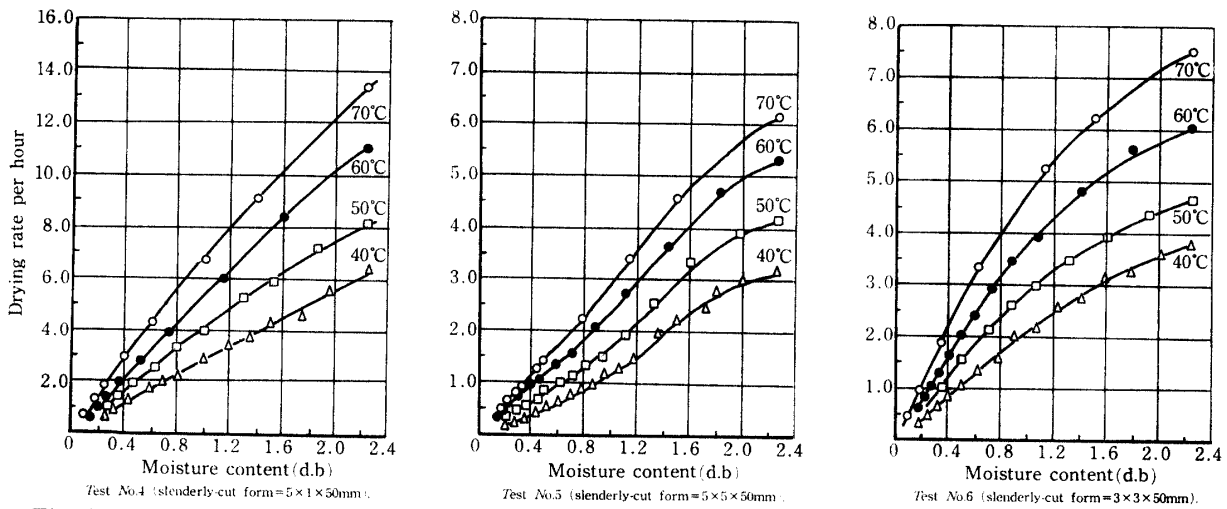


Fig. 3. Drying characteristic curves of the slenderly-cut sweet potatoes under the ventilation blow.

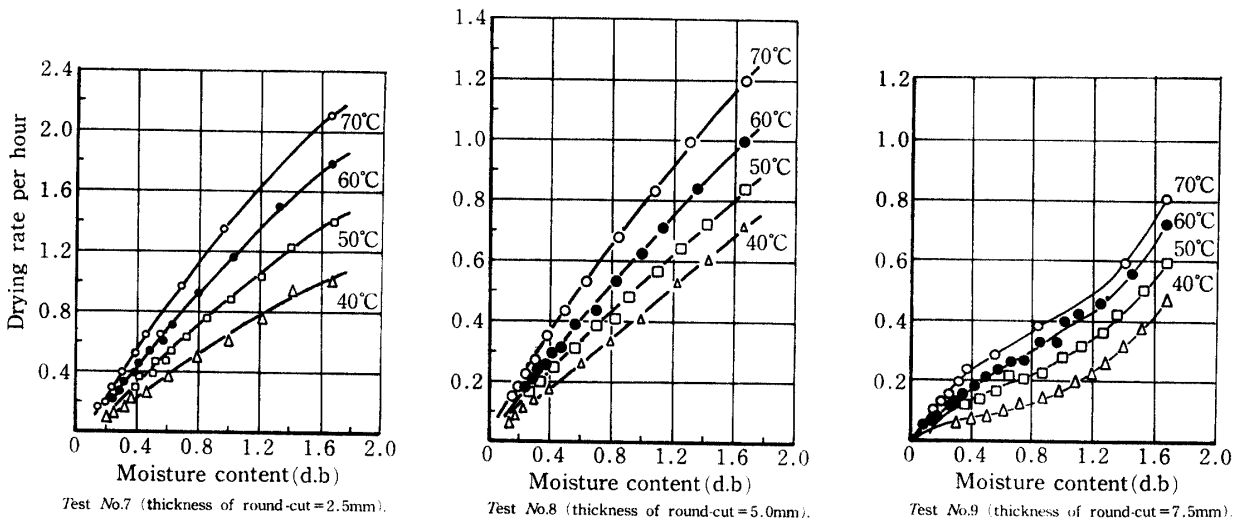


Fig. 4. Drying characteristic curves of the round-cut sweet potatoes under the parallel blow.

Table 2. Constant rate of drying (R_c), film coefficient of heat transfer (h_t) and film coefficient of mass transfer (K) in case of the drying of the slenderly-cut sweet potatoes under the ventilation blow

Dimensions of sample	$5 \times 1 \times 50$ (mm)				$5 \times 5 \times 50$ (mm)				$3 \times 3 \times 50$ (mm)			
	70.0	60.0	50.0	40.0	70.0	60.0	50.0	40.0	70.0	60.0	50.0	40.0
Heat-air temp. ($^{\circ}\text{C}$)	70.0	60.0	50.0	40.0	70.0	60.0	50.0	40.0	70.0	60.0	50.0	40.0
$(t-t_w)$ ($^{\circ}\text{C}$)	41.0	33.8	26.5	19.3	41.0	33.8	26.5	19.3	41.0	33.8	26.5	19.3
$(H_w-H) \times 10^3$ (kg/kg)	17.9	14.1	10.6	7.8	17.9	14.1	10.6	7.8	17.9	14.1	10.6	7.8
$(dw/de)_c$ ($\Delta w/h$)	13.40	11.00	8.50	6.40	6.15	5.30	4.15	3.35	7.51	6.98	4.61	3.75
R_c (kg/h- m^2)	9.11	7.48	5.78	4.35	4.18	3.60	2.82	2.28	5.11	4.13	3.13	2.55
K (kg/ $m^3h-\Delta H$)	508.9	530.5	526.4	557.7	237.5	255.3	266.0	292.3	285.4	292.9	295.3	326.9
h_t (kcal/ $m^2h-^{\circ}\text{C}$)	128.0	128.5	126.9	131.6	59.1	61.9	61.9	67.0	72.3	71.0	68.7	77.2
K-ave.	530.9				262.8				300.1			
h_t -ave.	128.8				62.5				72.3			

*1. Initial moisture content (d.b.)=2.27

*2. Sample weight=0.2 kg

あることを示している。恒率乾燥期間は測定間隔 10 分間でははっきり現われなかったが、乾燥初期の乾燥速度がこれに相当すると思われる。

2. 通気流下における線切り甘藷の乾燥速度および水分移動係数

(1) 恒率乾燥速度および水分移動係数

実験より求めた各切断形状ごとの恒率乾燥速度 (R_0), $(dw/d\theta)_c$, 物質移動係数 (k), 総括の熱移動係数 (h_t) の値は Table 2 のようである。

なお k , h_t の算定は、乾燥材料の受熱が対流伝熱のみにより行われ、材料表面温度は湿球温度にほぼ等しいとして次式で求めた²⁾。

$$R_c = \frac{M_d}{A} \left(- \frac{dw}{d\theta} \right)_c = k(H_w - H) = h_t(t - t_w)\gamma_w \quad (1)$$

すなわち乾燥材料の k および h_t が既知であれば、それぞれの熱風条件 ($H_w - H$), $(t - t_w)$ における恒率乾燥速度が算定できる。

R_c : 恒率乾燥速度 (kg-water/h-m^2).

$(dw/d\theta)_c$: 恒率乾燥速度 (dw/h), Constant rate of drying.

M_d : 無水材料重量 (kg), Weight of dry sample.

A : 乾燥面積 (m^2), Area of dry bed.

H, H_w : 絶対湿度および飽和絶対湿度 (kg/kg), Absolute humidity and saturated absolute humidity.

t, t_w : 乾球, 湿球温度 ($^{\circ}\text{C}$), Dry bulb and wet bulb temperature.

γ : 蒸発潜熱 (kcal/kg), Latent heat of evaporation.

k : 物質移動係数 ($\text{kg/h-m}^2\text{-}\Delta H$), Film coefficient of mass transfer.

h_t : 熱移動係数 ($\text{kcal/h-m}^2\text{-}^{\circ}\text{C}$), Film coefficient

of heat transfer.

(2) 減率期間における乾燥速度と水分との関係

減率期間における線切り甘藷は、Fig. 3 で明らかのように、乾燥速度の減少が含水比に比例せず、その曲線は上向きに凸の形になる。このような場合は、同一自由含水率における 2 種の乾燥条件の乾燥速度比は、それらの恒率乾燥速度比にほぼ等しいことは、従来から実験的に知られているが⁴⁾、今回の実験でも、この点は確認できた。

Fig. 5 は切断形状ごとに、各乾燥条件における R_d/R_c と F/F_c との関係プロットしたものである (F_c : 自由限界含水比, R_d : 自由含水比 F における減率乾燥速度)。すなわち、ある条件下における乾燥特性曲線を実験的に求めれば、それとは別の条件下における乾燥特性曲線は $R_d/R_c \sim F/F_c$ 線図と恒率乾燥速度算定式を利用して求めることができる²⁾。

3. 並行流下における線切りおよび輪切り甘藷の乾燥速度, 水分移動係数

(1) 恒率乾燥速度および水分移動係数

実験より求めた各切断形状ごとの恒率乾燥速度, 物質移動係数, 熱移動係数等の値は, Table 3, Table 4 のようである。

(2) 減率期間における乾燥速度と含水比との関係

並行流乾燥においても線切り甘藷は Fig. 2, Fig. 4 のようにその乾燥特性曲線は上向きに凸形になっている。しかし輪切りでは切断厚さが大きくなるにつれて、その曲線は複雑になり、S 字型の傾向になる。これは厚さが増すにつれて内部水分の表面への拡散が、表面蒸発に及ばなくなるものと思われる。任意の条件下における乾燥特性曲線を求めるため、 $R_d/R_c \sim F/F_c$ 線図を実験から求めた結果は Fig. 6, Fig. 7 に示す。

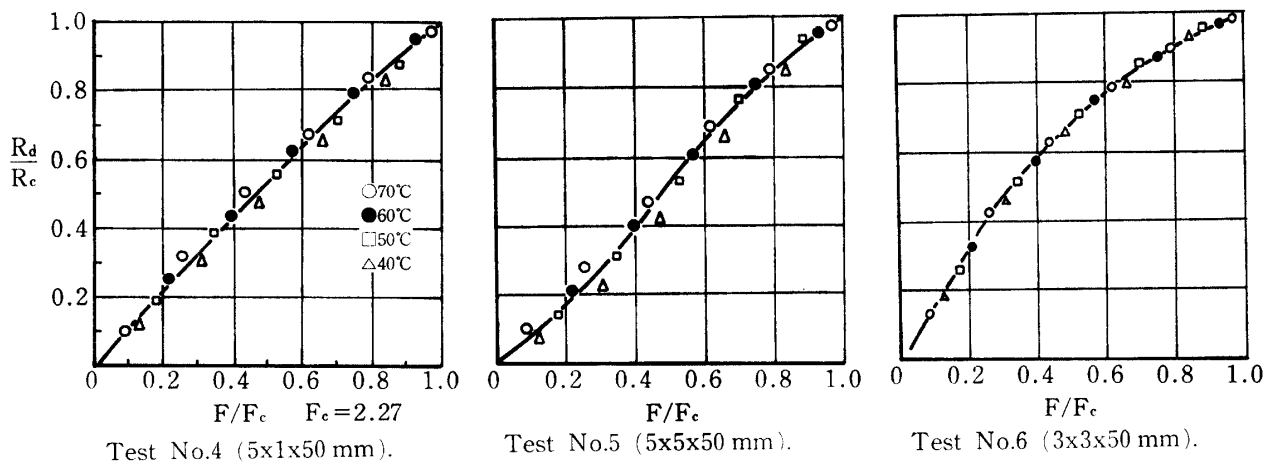


Fig. 5. Curve of R_d/R_c vs. F/F_c in the slender-cut sweet potatoes under the ventilation blow.

Table 3. Constant rate of drying (R_c), film coefficient of heat transfer (h_t) and film coefficient of mass transfer (K) in case of the drying of the slenderly-cut sweet potatoes under the parallel blow

Dimensions of sample	5 × 1 × 50 (mm)				5 × 5 × 50 (mm)				3 × 3 × 50 (mm)			
Heat-air temp. (°C)	70.0	60.0	50.0	40.0	70.0	60.0	50.0	40.0	70.0	60.0	50.0	40.0
($t-t_w$) (°C)	41.3	33.5	26.0	18.7	41.4	34.2	27.0	19.8	41.4	34.2	27.0	19.8
(H_w-H) × 10 ³ (kg/kg)	18.0	14.3	11.0	8.0	18.3	14.4	11.0	8.2	18.3	14.4	11.0	8.2
($dw/d\theta$) _c ($\Delta w/h$)	3.32	2.57	2.02	1.48	2.70	2.00	1.58	1.20	2.88	2.23	1.76	1.32
R_c (kg/h-m ²)	1.91	1.48	1.16	0.85	1.55	1.15	0.91	0.69	1.65	1.28	1.01	0.76
K (kg/m ² -h- ΔH)	106.1	103.5	105.5	106.3	84.7	79.9	82.7	84.1	90.2	88.9	91.8	92.7
h_t (kcal/m ² -h-°C)	26.8	25.7	26.0	26.5	21.7	19.5	19.6	20.4	23.1	21.7	21.8	22.4
K-ave.	105.4				82.9				90.9			
h_t -ave.	26.3				20.3				22.3			

Table 4. Constant rate of drying (R_c), film coefficient of heat transfer (h_t) and film coefficient of mass transfer (K) in case of the drying of the round-cut sweet potatoes under the parallel blow

Thickness	2.5 mm				5.0 mm				7.5 mm			
Heat-air temp. (°C)	70.0	60.0	50.0	40.0	70.0	60.0	50.0	40.0	70.0	60.0	50.0	40.0
($t-t_w$) (°C)	41.7	34.3	27.0	19.7	42.0	34.8	27.5	20.4	42.0	34.8	27.5	20.4
(H_w-H) × 10 ³ (kg/kg)	17.5	14.0	10.8	7.9	17.7	14.3	11.7	9.3	17.7	14.3	11.7	9.3
($dw/d\theta$) _c ($\Delta w/h$)	2.11	1.79	1.40	1.00	1.20	1.00	0.84	0.68	0.81	0.72	0.60	0.49
R_c (kg/h-m ²)	1.31	1.11	0.87	0.62	0.75	0.62	0.52	0.42	0.50	0.45	0.37	0.30
K (kg/m ² -h- ΔH)	74.9	79.3	80.6	78.5	42.4	43.4	44.4	45.2	28.2	31.5	33.0	32.3
h_t (kcal/m ² -h-°C)	18.2	18.8	18.7	18.4	10.4	10.4	11.0	12.2	6.9	7.5	7.8	8.5
K-ave.	78.3				43.8				31.25			
h_t -ave.	18.5				11.0				7.6			

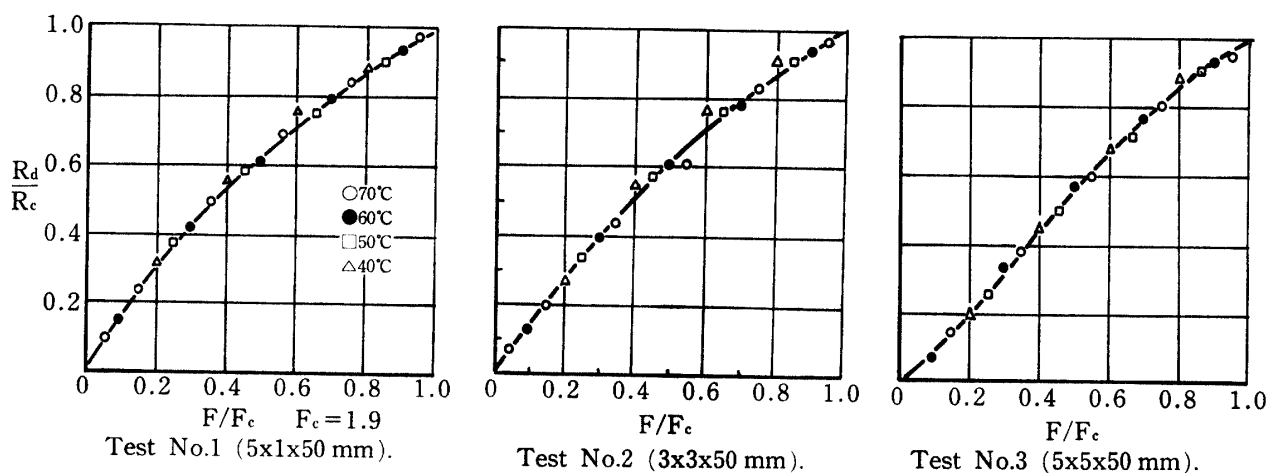


Fig. 6. Curve of R_d/R_c vs. F/F_c in the slenderly-cut sweet potatoes under the parallel blow.

4. 実験結果からの乾燥能率の算定

(1) 連続乾燥法における非定常乾燥特性曲線と乾燥所要時間の算定法

乾燥材料と熱風とが向流または並流で接触する連続

乾燥装置では、その位置によって乾燥条件が異なるので、非定常乾燥を受けることになる¹⁾。したがって任意の条件下での非定常の乾燥特性曲線を求め、それにより乾燥能率を算定する方法について検討する必要がある

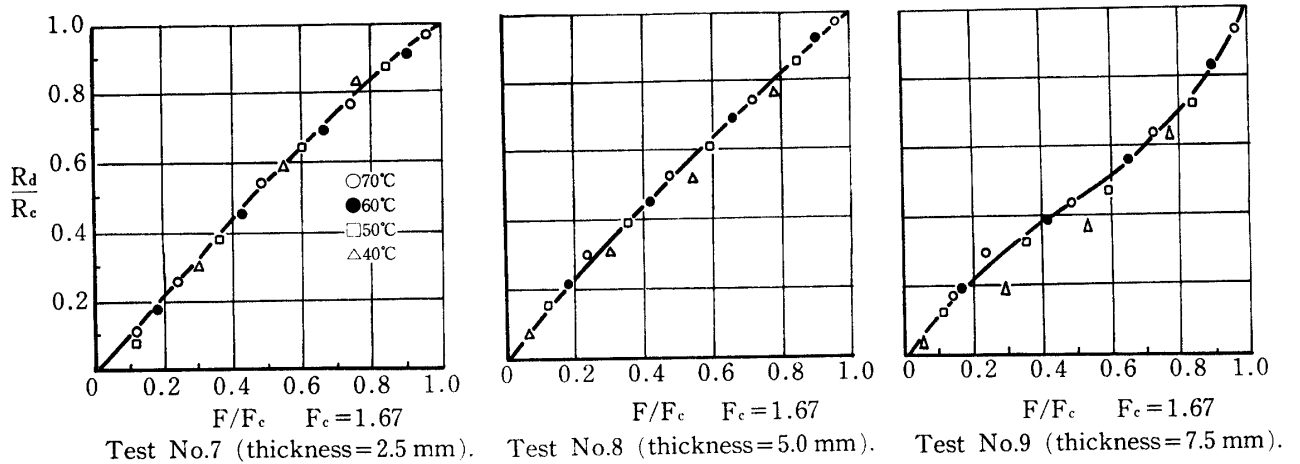


Fig. 7. Curve of R_d/R_c vs. F/F_c in the round-cut sweet potatoes under the parallel blow.

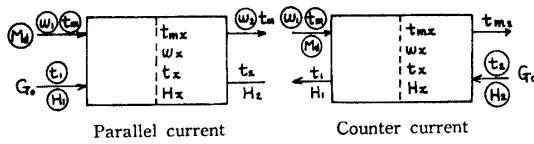


Fig. 8. Drying conditions.

ある。

切断甘藷の場合、その特性曲線からみて、恒率期間は非常に短いので、乾燥初期から減率期間とみて差

し支えない。また減率期間では、水分蒸発と材料加熱が同時に行われる期間であるが、熱風が材料を通過する場合は入口の空気条件 (t_1, H_1) から出口の空気条件 (t_2, H_2) を結ぶ曲線上を変化することになる³⁾。しかし近似として、この2点を結ぶ直線上を変化するとして構わない。減率期間での乾燥機に出入する熱風および材料についての条件は Fig. 8 のように表わす。この出口、入口における物質収支およびエンタルピー収支から (式 2, 式 3), t_2, H_2, G_0 を決定すること

Table 5. Calculated results under optical drying conditions on the cut sweet potatoes

Drying methods	Moisture content (w)	Heat-air temp. (t)	Absolute humidity (H)	$(t-t_w)$	$(dw/d\theta)_c$		
					A	B	C
Slenderly-cut and ventilation blow	2.27	70.0	0.006	42.3	13.76	6.68	7.72
	1.88	62.0	0.009	34.5	11.22	5.45	6.30
	1.48	54.0	0.012	26.5	8.62	4.18	4.84
	1.09	46.0	0.014	19.0	6.18	3.00	3.47
	0.70	38.0	0.017	11.5	3.74	1.82	2.10
	0.30	30.0	0.020	3.9	1.27	0.62	0.71
Slenderly-cut and parallel blow	1.90	70.0	0.006	42.3	3.33	2.57	2.82
	1.58	62.0	0.009	34.5	2.71	2.09	2.30
	1.26	54.0	0.012	26.5	2.08	1.61	1.77
	0.94	46.0	0.014	19.0	1.49	1.15	1.27
	0.62	38.0	0.017	11.5	0.90	0.70	0.77
	0.30	30.0	0.020	3.9	0.31	0.24	0.26
Round-cut and parallel blow	1.67	70.0	0.006	42.3	2.16	1.29	0.89
	1.40	62.0	0.009	34.5	1.76	1.05	0.72
	1.12	54.0	0.012	26.5	1.35	0.81	0.56
	0.85	46.0	0.014	19.0	0.97	0.58	0.40
	0.57	38.0	0.017	11.5	0.59	0.35	0.24
	0.30	30.0	0.020	3.9	0.30	0.12	0.08

A: $5 \times 1 \times 50$ mm or 2.5 mm B: $5 \times 5 \times 50$ mm or 5.0 mm C: $3 \times 3 \times 50$ mm or 7.5 mm

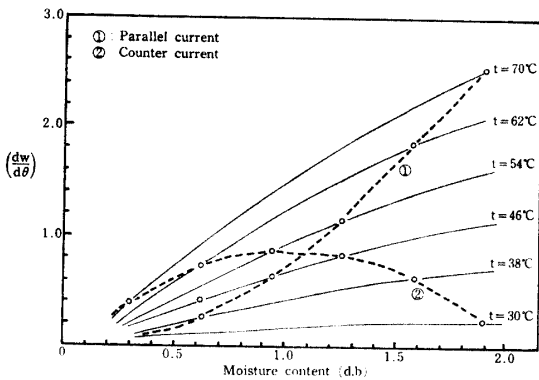


Fig. 9. Unsteady-state drying characteristic curves of cut sweet potatoes under the parallel blow (cutting form: 5 × 5 × 50 mm).

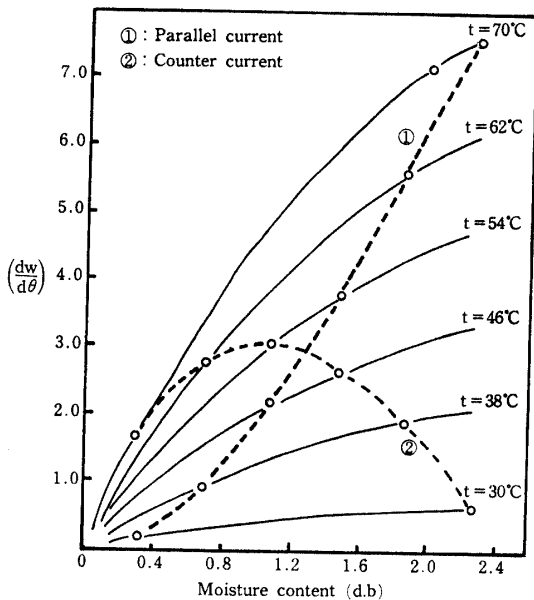


Fig. 10. Unsteady-state drying characteristic curves of cut sweet potatoes under the ventilation blow (cutting form: 3 × 3 × 50 mm).

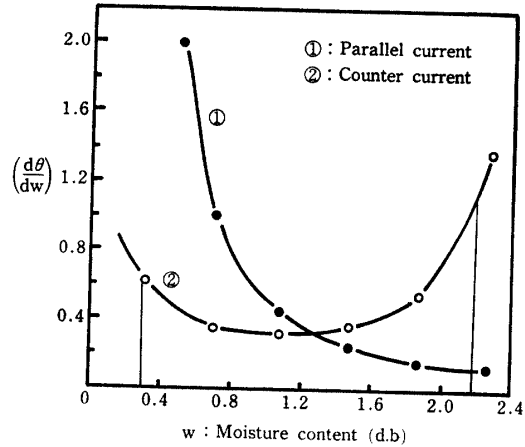


Fig. 11. Curve of $(d\theta/dw)$ vs. w in case of the ventilation blow (cutting form: 3 × 3 × 50 mm).

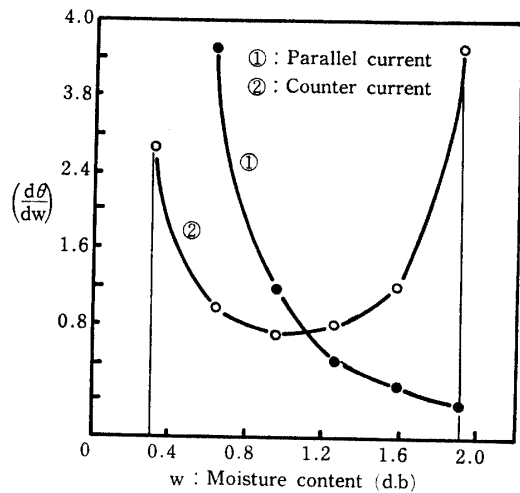


Fig. 12. Curves of $(d\theta/dw)$ vs. w in case of the parallel blow (cutting form: 5 × 5 × 50 mm).

ができる (材料温度 t_m は、それと接する空気温度 t_2 に等しいとする)^{2,4)}。

$$M_d(w_1 - w_2) = \pm G_0(H_1 - H_2) \quad (2)$$

$$G_0 i_1 + M_d(C + C_w W_1) t_{m1} = G_0 i_2 + M_d(C + C_w W_2) t_{m2} \quad (3)$$

W_1, W_2 : 入口, 出口における乾量基準含水比

G_0 : 質量風量 (kg/h)

C : 無水材料比熱 (kcal/kg·°C)

i : エンタルピー (kcal/kg·drygas)

C_w : 水の比熱 = 1 (kcal/kg·°C)

t_{m1}, t_{m2} : 入口, 出口における材料温度 (°C)

同様にして含水率 w_x になる断面における t_x, H_x

も求めることができる。

乾燥機内の減率期間における任意の含水率 w_x における空気条件 (t_x, H_x) が求まると、この条件における恒率乾燥速度は前述 (1) 式で求められ、また $R_d/R_c \sim F/F_c$ 線図を利用して特性曲線が得られる。この任意の断面 $x_1, x_2 \dots$ における定常乾燥特性曲線と、その時の含水比 $w_1, w_2 \dots$ とから連続乾燥機における非定常乾燥特性曲線を図示することができる。

また乾燥所要時間 (θ) は次式で算定する⁴⁾。

$$\theta = \int_{w_1}^{w_2} \left(\frac{d\theta}{dw} \right) dw \quad (4)$$

(2) 実験結果からの計算例

実験のデータを利用して、任意の乾燥条件下での

通気および並行流下における切断甘藷の非定常乾燥特性曲線および乾燥所要時間を算定する。

設定条件は、送入空気温度 70°C、絶対湿度 0.006 kg/kg、排出空気温度 30°C とし、通気流では線切り甘藷を、並行流では線切り、輪切り甘藷を乾量基準含水比 0.3 まで乾燥する。

上記計算方法で計算した結果は Table 5 のようである。

Table 5 のうち、例として (1) 通気流で線切り (3×3×50mm) および (2) 並行流で線切り (5×5×50mm) の甘藷について、その計算値をプロットしたのが Fig. 9, Fig. 10 である。各乾燥特性曲線と、その状態における水分の交点を点綴したのが非定常の乾燥特性曲線である。

($d\theta/dw$) と w との関係は、条件 (1) の場合は Fig. 11, 条件 (2) の場合は Fig. 12 のようになり、それぞれの乾燥所要時間 (θ) を実測すれば、(1) の通気流で向流乾燥の場合は、 $\theta=0.9$ 時間、(2) の並行流で向流乾燥の場合は、 $\theta=2.7$ 時間となる。また Fig. 11, 12 で明らかなように、並流乾燥は向流に比べ乾燥時間が長くなる。

要 約

この研究は、切断甘藷を連続乾燥する場合の能率計算を行うため、甘藷の切断形状と乾燥速度との関係について検討した。熱風温度の範囲は 70°C~40°C、乾燥方法は通気流と並行流の両方で、切断形状は、線切りと輪切りで実験した。その結果を要約すると次のようである。

1. 切断甘藷の乾燥特性曲線 (乾燥速度対含水比)

は上方に凸形から S 字型となり、減率乾燥速度は含水比に比例せず、複雑である。また恒率乾燥期間は非常に短い (Fig. 2~Fig. 4)。

2. 任意の乾燥条件下における恒率乾燥速度を求めるため、実験により物質移動係数 (k)、熱移動係数 (h_t) を求めた (Table 2)。

3. 減率期間における乾燥速度と含水比の関係を求めるために、乾燥速度比 (R_d/R_c) 対水分比 (F/F_c) の関係図表を作成した (Fig. 5~Fig. 7)。

4. 上記の (k)、(h_t) と (R_d/R_c)~(F/F_c) 線図から、任意の乾燥条件下における切断甘藷の乾燥特性曲線を計算によって求めた。

5. 以上の結果から、連続式乾燥装置 (通気、並行流) で切断甘藷の乾燥を行う場合、その水分や空気温度が計算され、乾燥能率も算定できる (Fig. 9~Fig. 12)。

文 献

- 1) Chein, K.S., Matthes, R.K., Verma, B.P.: Dimensional analysis of seed-moisture movement in deep-bed drying. Trans. ASAE, 277-281 (1971)
- 2) 藤田重文・東畑平一郎編: 化学工学, III. 乾燥. 東京化学同人, p.301-348 (1979)
- 3) Ingram, G.W.: Deep-bed drier simulation with intra-Particle moisture diffusion. J. agric. Engng. Res. 21, 263-272 (1976)
- 4) 亀井三郎編: 化学機械の理論と計算. 産業図書, p.369-394 (1982)
- 5) 田原昭爾: 農産物の熱風乾燥法に関する研究 (第1報). 鹿大農学術報告, No. 17, 326-328 (1966)

Summary

In this paper, examination was made on the relationship between the form of the specimens cut out of sweet potato and the drying rate, for the purpose of calculating the efficiency of the continuous drying of the specimens.

It was under the following conditions that the experiments were carried out; heating air temperature: 40°C~70°C, drying methods: ventilation-blowing and parallel blowing, cutting form: seldner cutting and round cutting.

The experimental results ascertained are as follows.

1. The drying characteristic curves of the cut specimens (drying rate *vs.* moisture contents) were apt to be upwardly convex, or S-shaped, and the constant drying rate period was quite short and the decreasing drying rate was unproportional to the moisture contents (Fig. 2).

2. For the estimation of the constant drying rate through various drying conditions, mass-transfer-coefficient (K) and heat-transfer-coefficient (h_t) were determined (Table 2).

3. In order to examine the relationship between the moisture contents and the drying rate in the period when the drying-rate was decreasing, a graph was obtained, showing the relationship between the drying-rate ratio (R_d/R_c) and the moisture-content ratio (F/F_c).

4. Making use of the above mentioned K , h_t and graphical figures showing (R_d/R_c) *vs.* (F/F_c), it was possible to simulate the drying-characteristic-curves of the cut specimens through the various drying conditions.

5. In the continuous drying of the specimens cut out of sweet potato, including both the ventilation blowing and parallel blowing, the results obtained above enabled us both to calculate the moisture and the temperature of air stream and to estimate the moisture-contents of the samples and the drying-efficiency.