

ジャガイモの乾燥収縮式と速度式の設定に関する考察

久保田清・松本俊也・鈴木寛一・長谷川勉・保坂秀明

広島大学生物生産学部
1981年8月26日 受理

Considerations on the Shrinkage and the Rate Equations in the Drying of Potatoes

Kiyoshi KUBOTA, Toshiya MATSUMOTO, Kanichi SUZUKI,
Tsutomu HASEGAWA and Hideaki HOSAKA

Faculty of Applied Biological Science, Hiroshima University, Fukuyama

(Figs. 1~4 ; Tables 1~5)

食品の乾燥は、表面収縮、組織構造の変化などを伴って複雑となり、恒率、減率第一、第二段の乾燥期間を区分して乾燥速度式を表わす一般的な方法¹⁾が適用できない場合が多い。

乾燥装置設計の工業的な目的に対しては、できるだけ簡単な乾燥モデルを設定し、全乾燥期間に適用できる乾燥速度式を設定するのがよいと考えられる。前報²⁾では、ジャガイモを例として、各種形状食品に対する簡単な総括的乾燥速度式の設定に関する研究を行ってきた。

本報告では、前報に引続きジャガイモを例として、既往の表面収縮の実験データ³⁾の解析と、簡単な乾燥モデルに基づく乾燥速度式⁴⁾の設定について考察を行った。

実験結果

乾燥収縮式の設定には、熱風式乾燥装置（乾燥部分はガス管製円筒、内径 10.5 cm、高さ 40 cm）を使用して、温度 40 °C、湿度 30 %、空気流速 58~71 cm/sec において得られた立方体状のジャガイモの乾燥収縮データ³⁾を用いる。使用した実験データを、Table 1 および Fig. 1 に示す。収縮データは写真撮影により求めたものである。

乾燥速度式の設定には、熱風式乾燥装置（乾燥部分は外部保温の亚克力製円筒、内径 11 cm、高さ 60 cm）を使用して、温度 64.0 °C、湿度 20.8 %、空気流速 25~27 cm/sec において得られた球、円柱、平板状のジャガイモの乾燥速度データ²⁾を用いる。使用した実験データを、Table 2 および Fig. 2~4 に示す。

乾燥収縮式

1. 乾燥率の定義

乾燥収縮式として、Kilpatrickら⁵⁾とSuzukiら⁶⁾による報告があるが、本報告では、次式で乾燥率 x [-] を定義して、乾燥収縮式を表示することにする。

$$x = (w_0 - w) / (w_0 - w_e) \quad (1)$$

ここで、 w [g] は、乾燥時間 θ [min] における試料の重さ、添字 0 および e は、初期および平衡状態を示す。 x は、乾燥の進行に伴って 0 から 1 に変化するように定義したものである。

Table 1. Samples and experimental conditions on the shrinkage experiments of potatoes

Samples	w_0 (g)	w_e (g)	w_d (g)	S_0 (cm ²)	S_e (cm ²)	V_0 (cm ³)	V_e (cm ³)	t (°C)	ϕ (%)	u (cm/sec)
D-1	1.59	0.359	0.236	7.72	4.25	1.461	0.596	40	30	58
D-2	1.73	0.518	0.336	7.97	4.79	1.531	0.714	40	30	71
D-3	1.55	0.396	0.264	8.00	3.85	1.541	0.515	40	30	71

where, Samples D: cubic.

t : air temperature, ϕ : air humidity,

u : air velocity.

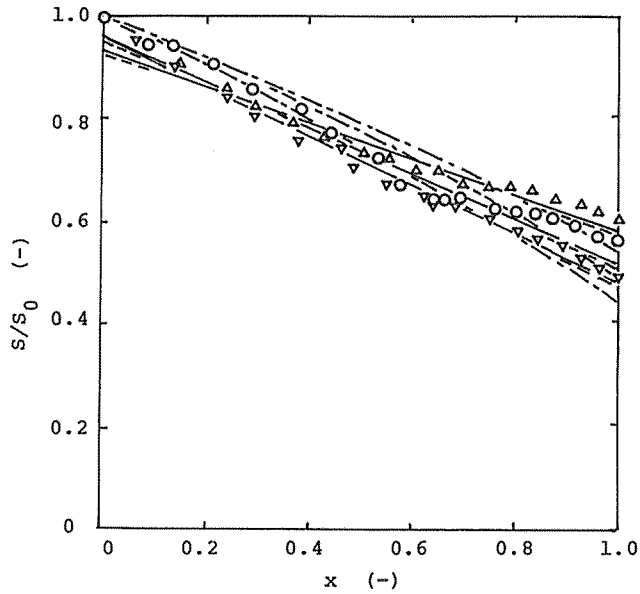


Fig. 1. Relation between the surface-area ratio S/S_0 and the drying ratio x on the drying of cubic potatoes.

Drying conditions:

air temp. = 40°C, humidity = 30%

air velocity = 58 ~ 71 cm/sec.

Samples : D-1, 2, 3 \circ Δ ∇

Calculated results:

Model A: ————— Model B, D, F, H: - · - · - · -

Model G: - - - - -

一般に、乾燥特性曲線は、絶乾基準の含水率 W [g-H₂O/g-D.M.] を式 (2) により定義し、 $dW/d\theta$ 対 W の関係として表わされてきている。この関係は、次式を用いて換算すれば得られる。

$$W = (w - w_d) / w_d \quad (2)$$

$$W = W_0 - (W_0 - W_e)x \quad (3)$$

$$dW/d\theta = (W_0 - W_e)dx/d\theta \quad (4)$$

ここで、 w_d は、絶乾重量である。

2. 簡単な定義による乾燥収縮式

乾燥収縮式 A : 表面積 S [cm²] が乾燥率 x に線形的に変化すると仮定する。

$$S = S_0(1 - x) + S_e x \quad (5)$$

$$S/S_0 = a(1 - x) + b \quad (6)$$

$$\text{ただし、} a = (S_0 - S_e)/S_0$$

$$b = S_e/S_0$$

乾燥収縮式 B : 体積 V [cm³] が乾燥率 x に線形的に変化すると仮定し、表面積と体積との間に式(8)の関係があると仮定する。式 (8) は、球、立方体状のときに成立する関係式である。円柱、平板状では複雑となり、簡単な関係式が得られない。

$$V = V_0(1 - x) + V_e x \quad (7)$$

$$S = V^{2/3} \quad (8)$$

Table 2. Samples and experimental conditions on the drying-rate experiments of potatoes.

Samples	w_0 (g)	w_e (g)	w_d (g)	D_0 (cm)	L_{10} (cm)	L_{20} (cm)	D_e (cm)
S-1	1.73	0.213	0.176	1.46	—	—	0.75
S-2	1.81	0.219	0.180	1.49	—	—	0.76
S-3	2.04	0.374	0.283	1.55	—	—	0.88
C-1	1.31	0.237	0.176	0.88	2.07	—	0.59
C-2	1.41	0.170	0.158	0.88	2.24	—	0.51
C-3	1.19	0.153	0.132	0.94	1.65	—	0.54
P-1	1.06	0.134	0.120	0.67	1.40	1.08	0.33
P-2	1.13	0.106	0.099	0.35	2.97	1.06	0.17
P-3	2.07	0.373	0.328	0.73	2.21	1.22	0.45
P-4	1.17	0.328	0.088	0.71	2.15	0.73	0.18

L_{1e} (cm)	L_{2e} (cm)	t (°C)	ϕ (%)	u (cm/sec)
—	—	64.0	20.8	26
—	—	64.0	20.8	25
—	—	64.0	20.8	27
1.32	—	64.0	20.8	25
1.58	—	64.0	20.8	26
1.19	—	64.0	20.8	25
1.09	0.70	64.0	20.8	27
2.04	0.61	64.0	20.8	26
1.71	0.91	64.0	20.8	27
1.79	0.59	64.0	20.8	27

where, Samples S, C and P : spherical, cylindrical and slab.

D : diameter or thickness, L_1 and L_2 : length and width.

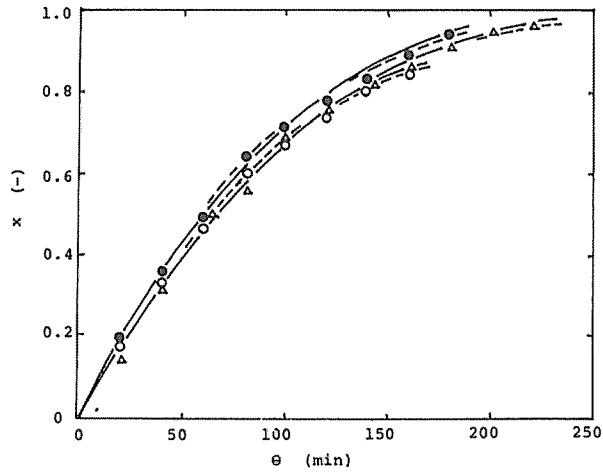


Fig. 2. Relation between the drying ratio x and the drying time θ on the drying of spherical potatoes

Drying conditions:

air temp. = 64.0°C, humidity = 20.8%

air velocity = 26 cm/sec

Samples: S-1, 2, 3 \circ \bullet Δ

Calculated results:

Drying-shell model (Eq. (22)) : ———

Uniform drying model (Eq. (21), $n=0.4$, S=Model G) :

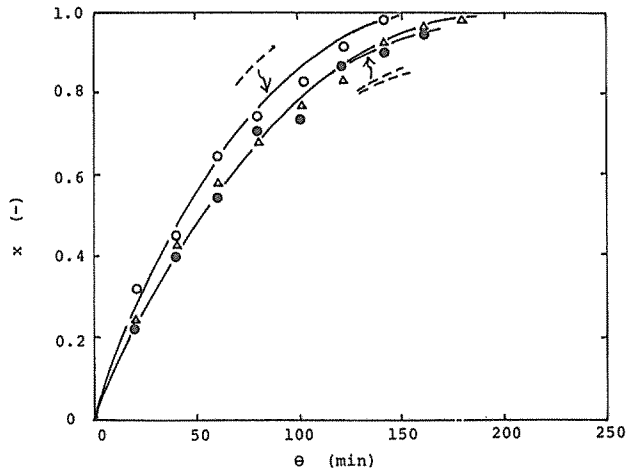


Fig. 3. Relation between the drying ratio x and the drying time θ on the drying of cylindrical potatoes

Drying conditions:

air temp. = 64.0°C, humidity = 20.8%

air velocity = 26 cm/sec

Samples: C-1, 2, 3 \circ \bullet Δ

Calculated results:

Drying-shell model (Eq. (25) used Eq. (35)) : ———

Uniform drying model (Eq. (21), $n=0.4$, S=Model G) :

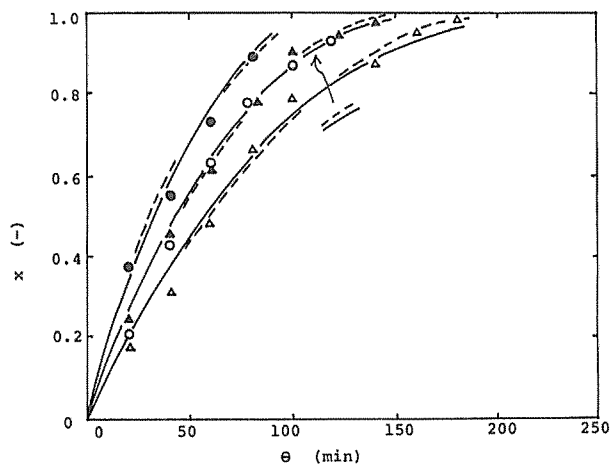


Fig. 4 Relation between the drying ratio x and the drying time θ on the drying of slab potatoes

Drying conditions:
 air temp. = 64.0°C, humidity = 20.8%
 air velocity = 26 cm/sec

Samples: P-1, 2, 3, 4 \circ \bullet \triangle \blacktriangle

Calculated results:
 Drying-shell model (Eq.(28) used Eq. (36)): ———
 Uniform drying model (Wq.(21), $n=0.4$, S=Model G): - - - - -

$$S/S_0 = [a(1-x) + b]^{2/3} \tag{9}$$

ただし、 $a = (V_0 - V_e) / V_0$
 $b = V_e / V_0$

乾燥収縮式C： 密度 ρ [g/cm³] が乾燥率 x に線形的に変化すると仮定し、式 (11) の関係があると仮定する。

$$\rho = \rho_0(1-x) + \rho_e x \tag{10}$$

$$S = (w/\rho) \tag{11}$$

$$S/S_0 = \{ [a(1-x) + b] / [(1-x) + c] \}^{2/3} \tag{12}$$

ただし、 $a = [(w_0 - w_e)\rho_0] / [w_0(\rho_0 - \rho_e)]$

$$b = w_e \rho_0 / [w_0(\rho_0 - \rho_e)]$$

$$c = \rho_0 \rho_e / [\rho_0(\rho_0 - \rho_e)]$$

既報⁷⁾において、均一乾燥モデルに基づく乾燥速度式として検討したのは、この乾燥収縮式を使用したものであった。

乾燥収縮式D： 乾燥収縮式Bにおいて、パラメータ a 、 b が、 V を用いて表わされているが、それを w を用いて表わされるとして仮定する。

$$S/S_0 = [a(1-x) + b]^{2/3} \tag{13}$$

ただし、 $a = (w_0 - w_e) / w_0$

$$b = w_e / w_0$$

3. 簡単なモデルによる乾燥収縮式

乾燥収縮式E： 試料が初期状態において、試料本体A（固体試料+平衡状態で放出されないで残っている水分+初期状態で存在する気泡）と平衡状態になるまでに放出する水分Hとからなり、平衡状態になると、試料本体Aと平衡状態になるまでに発生する気泡Bとからなり、収縮が水分の放出に伴って進

行する乾燥収縮モデルを仮定する。球，立方体状の試料に対し，次の関係式が得られる。

$$S/S_0 = \left\{ \left[\frac{(w_0 - w_e)}{\rho_H} \right] (1 - x) + w_e/\rho_e + w_B/\rho_B \right\} / \left[\frac{(w_0 - w_e)}{\rho_H + w_e/\rho_e} \right]^{2/3} \quad (14)$$

ここで，添字HおよびBは，放出する水分および発生する気泡を示す。式(14)において発生する気泡の体積に相当する項 $w_B/\rho_B = V_B$ [cm³] は測定が困難なものである。 a をパラメータとして， $V_B = ax$ として簡単に表わすことにする。

乾燥速度式F：式(14)において， V_B が無視できると仮定すると，次式のようになる。

$$S/S_0 = [a(1-x) + b]^{2/3} \quad (15)$$

$$\text{ただし， } a = [(w_0 - w_e) / \rho_H] / d$$

$$b = (w_e / \rho_e) / d$$

$$d = (w_0 - w_e) / \rho_H + w_e / \rho_e$$

既報⁶⁾において，均一乾燥モデルの乾燥収縮式として検討したのは，この式(15)である。

乾燥収縮式G：式(15)を次式のように変形してパラメータを1つとして表わす。これはKilpatrickら⁵⁾により報告されている乾燥収縮式である。

$$S/S_0 = [(W + a)/(W_0 + a)]^{2/3} \quad (16)$$

$$\text{ただし， } a = (W_e + 1) \rho_H / \rho_e - W_e$$

$$= w_e \rho_H / (w_d \rho_e) - w_e / w_d + 1$$

上式において，Kilpatrickらは a の値を0.8として与えている。

乾燥収縮式H：水分の放出が試料の周辺から殻状的に進行する乾燥収縮モデルを仮定する。簡単のため，水分が未放出の試料の芯の核状部分は初期状態に同じ水分を有し，また，水分が放出した殻状部分は平衡状態に同じ水分を有すると仮定する。球，立方体状の試料に対し，次の関係式が得られる。

球状の試料において，半径 R [cm] が式(17)で表わされる⁴⁾が，これからも次の関係式が得られる。

$$R = \{ R_e^3 + [1 - (R_e/R_0)^3] R_0^3 (1 - x) \}^{1/3} \quad (17)$$

$$S/S_0 = [a(1-x) + b]^{2/3} \quad (18)$$

$$\text{ただし， } a = 1 - w_e \rho_0 / (w_0 \rho_e)$$

$$= 1 - V_e / V_0$$

$$= 1 - (S_e / S_0)^{3/2}$$

$$b = w_e \rho_0 / (w_0 \rho_e)$$

$$= V_e / V_0 = (S_e / S_0)^{3/2}$$

これは，前項で示した式(9)と同じである。既報⁶⁾において，殻状乾燥モデルの乾燥収縮式として検討したのは，この式(18)である。

4. パラメータの算出方法

乾燥収縮式におけるパラメータの計算には，非線形最小二乗法⁸⁾を用い，デジタル計算機を使用した。計算機は，広島大学総合情報処理センターHITAC M-180を使用した。次に示す標準偏差 σ [-] を最小にするようにしてパラメータの計算を行った。

$$\sigma = \left\{ \sum_{i=1}^N [(S/S_0)_{obs} - (S/S_0)_{cal}]^2 / N \right\}^{0.5} \quad (19)$$

ここで， N は，データ数を，添字 obs, cal は，それぞれ測定値と計算値を示す。

乾燥速度式

1. 簡単な経験的乾燥速度式

簡単な乾燥速度式として，前報^{2,7)}に示した次に示す n 次速度式ならびに表面積 S を含む n 次速度式を用いる方法が考えられる。

$$dx/d\theta = k_n(1-x)^n \quad (20)$$

$$dx/d\theta = k_n S(1-x)^n \quad (21)$$

ここで、 k_n および n が、実験データから求めることになるパラメータである。式 (21) の S には、前節で乾燥収縮式として示した関係式が適用できる。

2. 簡単なモデルによる乾燥速度式

乾燥速度が、境膜、内部拡散速度のいずれかが律速となっているかなどを解明し、少しでも理論的な乾燥速度式を設定する方が、まったくの経験的速度式を用いるよりも幅広い条件下で利用できるものになるなどしてよい。また、得られるパラメータが物理的に意味のある値になるなどして、幅広く転用していけるものになるという利点もある。

簡単な半理論的速度式として、既報⁴⁾に示した次に示す殻状乾燥モデルに基づく乾燥速度式を用いる方法が考えられる。

球状の場合：

$$dx/d\theta = [4\pi r_c^2(C_c - C_g)/(w_0 - w_e)] / [(R - r_c)(r_c/R) / k_m + (r_c/R)^2 / h_m] \quad (22)$$

$$\text{ただし、 } r_c = (1-x)^{1/3} R_0 \quad (23)$$

$$R = \{R_e^3 + [1 - (R_e/R_0)^3] r_c^3\}^{1/3} \quad (24)$$

無限円柱状の場合：

$$dx/d\theta = [2\pi r_c L(C_c - C_g)/(w_0 - w_e)] / [r_c \ln(R/r_c) / k_m + (r_c/R) / h_m] \quad (25)$$

$$\text{ただし、 } r_c = (1-x)^{1/2} R_0 \quad (26)$$

$$R = \{R_e^2 + [1 - (R_e/R_0)^2] r_c^2\}^{1/2} \quad (27)$$

無限平板状の場合：

$$dx/d\theta = [2A(C_c - C_g)/(w_0 - w_e)] / [(X - x_c) / k_m + 1 / h_m] \quad (28)$$

$$\text{ただし、 } x_c = (1-x)X_0 \quad (29)$$

$$X = X_e + [1 - (X_e/X_0)] x_c \quad (30)$$

ここで、 R 、 L 、 X は、それぞれ試料の半径、長さ、半厚さ [cm]、 A は片表面積 [cm²]、 r_c 、 x_c は、未乾燥核の半径、半厚さ [cm]、 C_c および C_g は、それぞれ未乾燥核表面および試料周辺の境膜表面の水分濃度 [g-H₂O/cm³-void] である。

式 (22)、(25)、(28) において、試料表面における境膜内の水分の拡散速度に関するパラメータ h_m [cm³-void/cm²・min] と、殻状乾燥部分の水分の拡散速度に関するパラメータ k_m [cm³-void/cm・min] とが、実験データから求めることになるパラメータである。

3. パラメータの算出方法

乾燥速度式におけるパラメータの計算は、速度式を Runge-Kutta-Gill 法で数値積分し、非線形最小二乗法を用いる方法⁹⁾により行った。次に示す標準偏差 σ [-] を最小にするようにパラメータの計算を行った。

$$\sigma = \left[\sum_{i=1}^N (x_{obs} - x_{cal})_i^2 / N \right]^{0.5} \quad (31)$$

計算結果および考察

1. 乾燥収縮式の設定

乾燥収縮式 A~H のパラメータを、Fig. 1 に示す乾燥収縮比 S/S_0 対 x の関係の実験データから求める計算を行った結果を Table 3 に示す。乾燥収縮式 E 以外のものについて、パラメータ初期値は、各収縮式の下に示している関係式を用い、Table 1 に示す物性値から求めた値とした。乾燥収縮式 E については最終状態で気泡が 10% 生成すると仮定して $a = 0.1$ として初期値を与えた。乾燥収縮式 B、D、F および

Table 3. Parameters and standard deviations of the shrinkage equations of potatoes

Model A (Eq.(6)):

Samples	Initial values			Calculated values		
	<i>a</i>	<i>b</i>	σ	<i>a</i>	<i>b</i>	σ
D-1	0.450	0.550	0.044	0.445	0.522	0.032
D-2	0.399	0.601	0.044	0.353	0.584	0.021
D-3	0.519	0.481	0.027	0.490	0.476	0.018

Model B and H (Eq. (9) and (18)):

Samples	Initial values			Calculated values		
	<i>a</i>	<i>b</i>	σ	<i>a</i>	<i>b</i>	σ
D-1	0.592	0.408	0.055	0.556	0.370	0.036
D-2	0.534	0.466	0.052	0.449	0.442	0.024
D-3	0.666	0.334	0.041	0.608	0.318	0.023

Model C (Eq. (12)):

Samples	Initial values				Calculated values			
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	σ	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	σ
D-1	1.74	0.506	1.24	0.101	-2.49	-2.30	-6.00	0.032
D-2	1.95	0.833	1.79	0.084	-726	-714	-1610	0.024
D-3	3.16	1.081	3.24	0.064	184	96.1	302	0.023

Model D (Eq. (13)):

Samples	Initial values		
	<i>a</i>	<i>b</i>	σ
D-1	0.774	0.226	0.083
D-2	0.701	0.299	0.073
D-3	0.745	0.255	0.042

Model F (Eq. (15)):

Initial values		
<i>a</i>	<i>b</i>	σ
0.674	0.326	0.044
0.630	0.370	0.045
0.692	0.303	0.034

Model E (Eq. (14)):

Samples	Init. values		Calc. values	
	<i>a</i>	σ	<i>a</i>	σ
D-1	0.1	0.047	0.0355	0.043
D-2	0.1	0.042	0.0686	0.041
D-3	0.1	0.054	-0.00230	0.035

Model G (Eq. (16)):

Init. values		Calc. values	
<i>a</i>	σ	<i>a</i>	σ
2.00	0.044	2.23	0.043
1.58	0.045	1.93	0.041
1.45	0.036	1.34	0.035

where, Calculated values of Model D and F are same to Model B.

Hのパラメータ計算値が一致しているのは、収縮式の形を同じとしているためである。

Table 3|に示すパラメータ計算結果の標準偏差 σ の値の比較から、最も簡単な収縮式Aがよいという結果になっている。これは、モデル解析によっていないものであるが、パラメータ初期値に対する σ の値も小さいことと、パラメータ初期値と計算値とがよく一致するということからみて有用なものと考えられる。

次に σ の値が小さいのが収縮式Cとなっているが、これは、パラメータ計算値のばらつきからみて不適当と考えられる。パラメータ初期値に対する σ の値からみてもよくない結果となっている。パラメータ計算値のばらつきは、パラメータが多くなって相関しあっているものと考えられる。

次によいと考えられるのは、収縮式B, D, FおよびHである。収縮式BとHは、前述したように同一のものである。パラメータ初期値に対する σ の値からみると、気泡の生成を無視した均一乾燥モデルの収縮式Fが、また、パラメータ初期値と計算値との比較からは、殻状乾燥モデルの収縮式Hが僅かによいことになるが、本実験データのばらつきを考えると、両者の間には大差がないと考えられる。既報⁶⁾において、本実験条件に近い条件下において、各種の根菜類食品の収縮式を検討してきているが、そこでは、前者が乾燥初期においてよいが、全乾燥期間に対しては、後者がよいという結果を得ている。モデル解析によっていない収縮式Dは、パラメータ初期値からみてよくない結果になっている。

気泡の生成を無視した均一乾燥モデルの収縮式Fを変形し、パラメータを1つとして表わしたのが収縮式Gであるが、これは、パラメータ計算値の σ の値の比較からすると収縮式Fよりよくない結果になっている。

気泡の生成を考慮した均一乾燥モデルの収縮式Eのパラメータ計算値がゼロに近いことから、本実験データは、気泡の生成が無視できるものであることがわかる。気泡の生成が無視できない場合には、この収縮式Eが有用になると考えられる。

Fig. 1 に示す曲線は、各種乾燥収縮式による計算結果を実験データと比較して示したものである。Fig. 1 からわかるように、乾燥収縮率 S/S_0 の計算値が、収縮式Gでは乾燥開始時に1.0となるが、その他の収縮式では1.0となっていない。乾燥率 x を用いて表わした収縮式A, Bなどにおいて、乾燥開始時に S/S_0 の計算値が1.0になるようにパラメータの数を少なく変えて次式に示すように表わすことができる。

$$S/S_0 = -ax + 1 \quad (32)$$

$$\text{ただし, } a = 1 - S_e/S_0 \text{ (Model A)}$$

$$S/S_0 = (-ax + 1)^{2/3} \quad (33)$$

$$\text{ただし, } a = 1 - w_e \rho_0 / (w_0 \rho_e) \text{ (Model B and H)}$$

$$a = 1 - w_e / w_0 \text{ (Model D)}$$

$$a = 1 - \{(w_e / \rho_e) / [(w_0 - w_e) / \rho_H + w_e / \rho_e]\} \text{ (Model F)}$$

上式を用いてパラメータを計算する場合には、収縮式Fと収縮式Gとの比較からわかるように、乾燥初期でのずれは小さくなるが、全乾燥期間に対する標準偏差 σ の値は大きくなっていくと考えられる。

均一乾燥モデルである収縮式Fを含水率 W を用いて表わしたのが収縮式Gであるが、殻状乾燥モデルである収縮式Hも次式に示すように W を用いて表わすことができる。

$$S/S_0 = \{[(1-a)W + aW_0 - b] / (W_0 - b)\}^{2/3} \quad (34)$$

$$\text{ただし, } a = (W_e + 1)\rho_0 / [(W_0 + 1)\rho_e]$$

$$= w_e \rho_0 / (w_0 \rho_e)$$

$$b = W_e = (w_e - w_d) / w_d$$

この場合は、 W_0 以外の物性値だけをパラメータとして表わそうとすると、収縮式Gのようにパラメータを1つとしては表わすことができない。

食品には、天然物が多く、含水率に個体差があったり、試料内に部分的な差異があったり、また、含水率が大きくて保蔵中に変化を生じたりして、初期含水率 W_0 の値が大きくばらつくことが多い。パラメータを W_0 の関数として表わすとか、パラメータに W_0 を含めないようにしていくのが望ましいと考えられ

る。 ρ_0 は大きくばらつかない値であるのでパラメータに含めてよいと考えられる。

試料の成分とか組織構造などが一定している場合には、 W_0 は W_0 の影響をうけない値と考えられ、 W_0 が大きくなる場合には、恒率的な乾燥期間が長くなるなどして収縮曲線の形状が変わってくるものと考えられる。

2. 乾燥速度式の設定

簡単な総括的乾燥速度式 (20) および (21) のパラメータ k_n と n とを Fig. 2 ~ 4 に示す乾燥率 x 対 θ の関係の実験データから求める計算を、前報²⁾ において行ってきた。本報では、標準偏差 σ の値だけを Table 4 に参考として示す。

Table 4. Standard deviations of the drying-rate equations of potatoes²⁾

The values of standard deviations σ of Eq. (20) and (21) :

Samples	Eq.(20)		Eq.(21), Mod.A		Eq.(21), Mod.B or H		Eq.(21), Mod.C		Eq.(21), Mod.F or G	
	nth-order	$n=0.6$	nth-order	$n=0.3$	nth-order	$n=0.3$	nth-order	$n=0.6$	nth-order	$n=0.4$
S-1	0.017	0.026	0.018	0.018	0.018	0.018	0.018	0.022	0.018	0.022
S-2	0.017	0.022	0.018	0.021	0.018	0.018	0.017	0.018	0.018	0.019
S-3	0.015	0.018	0.020	0.020	0.018	0.018	0.015	0.016	0.018	0.018
C-1	0.031	0.031	0.026	0.026	0.027	0.027	0.031	0.031	0.028	0.028
C-2	0.016	0.017	0.017	0.017	0.017	0.017	0.016	0.016	0.017	0.017
C-3	0.019	0.019	0.017	0.018	0.017	0.018	0.019	0.019	0.017	0.018
P-1	0.024	0.028	0.030	0.034	0.029	0.034	0.024	0.028	0.028	0.029
P-2	0.039	0.043	0.035	0.036	0.036	0.037	0.039	0.043	0.037	0.041
P-3	0.032	0.034	0.035	0.036	0.035	0.035	0.032	0.042	0.035	0.039
P-4	0.014	0.018	0.019	0.025	0.018	0.030	0.014	0.019	0.017	0.020

乾燥速度式のパラメータの計算では、乾燥収縮式の中のパラメータを Table 2 に示す物性値から求め、パラメータの数の増加に伴うパラメータ相関による値のばらつきをさけるようにした。乾燥収縮式のパラメータは、各収縮式の下に示している関係式を用いて計算した。前項に示した検討結果からみて、乾燥収縮式を物性値から推定して使用してきたことによる問題点はなかったものと考えられる。

乾燥速度式の設定に関する前報²⁾ の研究においては、いずれの収縮式がよいかの結論を得るには至らなかった。本研究においては、立方体状の試料に対する収縮実験データを用いてではあるが、前項に示すような考察を加えることができた。

さらに、乾燥速度式 (21) の S に乾燥収縮式 D を入れる場合の計算が考えられるが、これは収縮式 D がモデル解析によっていないこと、収縮式 B と同じ形式で、これに比較して前項での結果がよくなかったことにより計算を省略する。収縮式 E を入れる場合についての計算は、本実験データでは気泡の生成が無視できたことにより省略する。収縮式 G を入れる場合の計算は、収縮式 F を入れる場合と同じとなる。

乾燥モデルが設定できなかつたり、恒率乾燥期間と減率乾燥期間に分けて速度式を設定する従来の方法が利用できなかつたりする場合、乾燥速度式 (20) と (21) とのいずれかを使用することになるが、その場合には、パラメータに理論的な意味を少しでも持たせるようにして表わした後者の方がよいと考えられる。

乾燥速度式 (21) において、乾燥が殻状乾燥モデルに近いと仮定できるときには収縮式 H を、また、均一乾燥モデルに近いと仮定できるときには収縮式 F がよいことになる。乾燥開始で S/S_0 の計算値が 1.0 になるように表わして使用する場合には、式 (33) を適用するとよい。

Table 4 の計算結果の標準偏差 σ の値を比較して大差ないこと、速度式 (21) に理論的な意味がとぼしいことから考えると、収縮式 A が、理論的な意味はないが簡単だけよいと考えられる。

簡単なモデルによる乾燥速度式 (22), (25), (28) のパラメータ h_m と k_m とを、Fig. 2 ~ 4 に示す乾燥率

Table 5. Parameters and standard deviations of the drying-rate equations of potatoes

Drying-shell model (Eq. (22), (25), (28)) :

Samples	Calc. A			Calc. B		
	h_m	k_m	σ	h_m	k_m	σ
S-1	175	17.5	0.018	175	17.5	0.018
S-2	184	28.5	0.018	184	28.5	0.018
S-3	158	31.9	0.017	158	31.9	0.017
C-1	227	26.0	0.024	224	52.5	0.024
C-2	190	22.7	0.017	192	40.4	0.018
C-3	198	26.8	0.017	200	47.4	0.017
P-1	375	29.8	0.043	325	82.3	0.036
P-2	547	6.85	0.024	364	14.6	0.028
P-3	318	28.1	0.048	273	60.1	0.042
P-4	527	14.0	0.038	454	22.7	0.033

where, Calc. A : L in Eq.(25) and A in Eq. (28) are constant, and equal to L_0 and A_0 , respectively.
Calc. B : they are not constant, and used Eq. (35) and (36).

x 対 θ の関係の実験データから求める計算を行った。その結果を、Table 5 に計算 A として示す。パラメータ初期値は、既報⁴⁾に示した方法により求めた。

乾燥速度式 (25) と (28) は、それぞれ試料の長さが一定とおける無限円柱状と、試料の片表面積が一定とおける無限平板状とに対する関係式である。本実験データは、Table 2 からわかるように、これらの値がかなり変化をし、速度式 (25) と (28) とをそのままで使用するのは好ましくないと考えられる。速度式 (25) と (28) に含まれる試料の長さ L と片表面積 A とは、それぞれ次式のように簡単に表わすのがよいと考えられる。

$$L = L_e + [1 - (L_e/L_0)](1-x)L_0 \tag{35}$$

$$A = \{A_e^2 + [1 - (A_e/A_0)]^2(1-x)A_0^2\}^{1/2} \tag{36}$$

乾燥速度式 (25) および (28) の L と A とを、それぞれ式 (35) と (36) で表わした場合のパラメータ h_m と k_m とを計算し、その結果を示したのが、Table 5 の計算 B である。

Table 4 と 5 との計算結果の標準偏差 σ の値を比較して大差ないことから、速度式 (20) および (21) と速度式 (22), (25) および (28) とのいずれがよいかの判断を致しかねるが、前述したように、殻状乾燥モデルに従うと仮定できるときには、パラメータに少しでも理論的な意味が得られるなどして後者の方がよいと考えられる。

Fig. 2~4 に示す曲線は、殻状乾燥モデルによる速度式 (22), (25) および (28) と、均一乾燥モデルによる収縮式 G とした速度式 (21) による計算結果を、実験データと比較して示したものである。

Table 5 に得られた試料表面における境膜内の水内の拡散速度に関するパラメータ h_m [cm³-void/cm²・min] は、恒率乾燥速度の実験データから得られる境膜伝熱係数 h_h と以下に示すような比較検討ができる値である。

恒率乾燥期間において、乾燥速度式は、次式のように表わされる。

$$-dw/d\theta = h_m S(C_s - C_g) \tag{37}$$

$$Q = (-dw/d\theta)\lambda = h_h S(t_d - t_s) \tag{38}$$

ここで、 C_s と C_g ならびに t_s と t_g は、それぞれ試料表面と流体本体における水分濃度 [g-H₂O/cm³-void] ならびに温度 [°C]、 Q は、伝熱速度 [cal/min]、 λ は、水の蒸発潜熱 [cal/g-H₂O] である。境膜物質移動係数 h_m [cm³-void/cm²・min] と境膜伝熱係数 h_h [cal/cm²・min・°C] とが、実験

データから求めることになるパラメータである。両者の間には、式 (37), (38) から次の関係が得られる。

$$h_h = h_m \lambda (C_s - C_g) / (t_g - t_s) \quad (38)$$

境界伝熱係数 h_h は、次式で表わされるという報告がある。

$$Nu = 2.0 + \alpha Re^{1/2} Pr^{1/3} \quad (39)$$

$$\text{ただし, } Nu = h_h D_e / k$$

$$Re = D_e u \rho / \mu$$

$$Pr = C_p \mu / k$$

ここで、 D_e は、試料の相当直径 [cm]、 ρ 、 μ 、 C_p 、 k および u は、それぞれ流体の密度 [g/cm³]、粘度 [g/cm²・min]、比熱 [cal/g・°C]、熱伝導度 [cal/cm²・min・°C] である。

試料の相当直径は、Pasternak^ら¹⁰⁾によると $D_p = (\text{試料の全表面積}) / (\text{流体流れ直角方向の試料の最大断面積部分の周辺長さ})$ として与えることができる。式 (39) の α は、実験データから求めることになるパラメータであるが、報告者によって僅かながら異なっている。Ranz^ら¹¹⁾、桐柴^ら¹²⁾、細川^ら¹³⁾、鈴木^ら¹⁴⁾ による値は、それぞれ $\alpha = 0.60, 0.65, 0.74, 0.89$ である。

本実験で使用した球、円柱、平板状の試料に対する h_h の値を、式 (39) から求めると、 $\alpha = 0.60 \sim 0.89$ に対して、それぞれ $0.026 \sim 0.036, 0.019 \sim 0.027, 0.019 \sim 0.027$ cal/cm²・min・°C となる。空気流速は、層流域であるが、乾燥筒の下部に分散板があり、流れは乱流に近いものになっていると考えられる。完全な層流域に戻っているとすると、試料を吊す中心部分の流速は、平均流速の2倍になる。流速が2倍になると仮定する場合は、それぞれ $0.035 \sim 0.049, 0.026 \sim 0.037, 0.026 \sim 0.027$ cal/cm²・min・°C となる。殻状乾燥モデルを仮定して得られた Table 5 の h_m の値から式 (38) を用いて得られる h_h の値は、それぞれ $0.050, 0.058, 0.101$ となる。乾燥初期における速度データから $-(dw/d\theta)$ の値を求めて式 (38) から h_h の値を求めると、それぞれ $0.039, 0.035, 0.029$ cal/cm²・min・°C となる。

殻状乾燥モデルを仮定して h_m と k_m を求めて得られた結果に基づいた h_h の値が、既往の関係式から求めた値、ならびに乾燥初期における速度データを用いる既往の方法から得られた値と比較して大きくなっている。この差異の原因は、乾燥モデルに近似的な仮定があることと、2つのパラメータ h_m と k_m の間に相関性を生ずるためと考えられる。

要 約

食品の乾燥速度式を設定する場合、乾燥特性が複雑となり、恒率乾燥期間と減率乾燥期間とに分けて速度式を設定する従来の方法¹⁾が、利用できなかつたりすることが多い。前報²⁾において、簡単な総括的乾燥速度式の設定に関する研究を行った。本報では、これに引続き、乾燥収縮式の設定に関する検討なども合わせ行つての研究をした。乾燥収縮式は、次式のように表わすのがよいという結果を得た。

簡単に表わす場合：

$$S/S_0 = a(1-x) + b = -a^*x + 1$$

$$a = (S_0 - S_e) / S_0$$

$$b = S_e / S_0$$

$$a^* = 1 - S_e / S_0$$

均一乾燥モデルによる場合：

$$S/S_0 = [a(1-x) + b]^{2/3} = (-a^*x + 1)^{2/3}$$

$$a = [(w_0 - w_e) / \rho_H] / d$$

$$b = (w_e / \rho_e) / d$$

$$d = (w_0 - w_e) / \rho_H + w_e / \rho_e$$

$$a^* = 1 - \{(w_e / \rho_e) / [(w_0 - w_e) / \rho_H + w_e / \rho_e]\}$$

殻状乾燥モデルによる場合：

$$S/S_0 = [a(1-x) + b]^{2/3} = (-a^*x + 1)^{2/3}$$

$$a = 1 - w_e \rho_0 / (w_0 \rho_e)$$

$$b = w_e \rho_0 / (w_0 \rho_e)$$

$$a^* = 1 - w_e \rho_0 / (w_0 \rho_e)$$

ここで、 S 、 w 、 ρ 、 x は、それぞれ試料の表面積〔 cm^2 〕、重さ〔 g 〕、密度〔 g/cm^3 〕、乾燥率〔 $-$ 〕である。添字 H 、 o 、 e は、水、初期、平衡状態を示す。2つのパラメータ a 、 b を含む収縮式を使用すると標準偏差が小さくなる。乾燥開始時における S/S_0 の値が正確に1.0になるようにするには、1つのパラメータ a を含む収縮式を用いる必要がある。

次に示す乾燥速度式²⁾を、収縮式のパラメータを物性値から推算して検討した。

$$dx/d\theta = k_n S(1-x)^n$$

ここで、 θ は、乾燥時間〔 min 〕、 S には、上記の収縮式を用いる。 k_n と n が、乾燥速度データから求めることになるパラメータである。また、既往⁴⁾の殻状乾燥モデルを仮定した乾燥速度式の設定に関する研究も行った。いずれの乾燥速度式を用いても大差ないという結果を得た。

主な使用記号

A : 試料の片表面積〔 cm^2 〕

a 、 b 、 c : 乾燥収縮式のパラメータ

C : 水分濃度〔 $\text{g-H}_2\text{O}/\text{cm}^3\text{-void}$ 〕

C_p : 流体の比熱〔 $\text{cal}/\text{g}\cdot^\circ\text{C}$ 〕

D : 試料の直径または厚さ〔 cm 〕

D_e : 試料の相当直径〔 cm 〕

h_h 、 h_m : 試料表面における境膜伝熱係数〔 $\text{cal}/\text{cm}^2\cdot\text{min}\cdot^\circ\text{C}$ 〕と境膜物質移動係数〔 $\text{cm}^3\text{-void}/\text{cm}^2\cdot\text{min}$ 〕

k : 流体の熱伝導度〔 $\text{cal}/\text{cm}\cdot\text{min}\cdot^\circ\text{C}$ 〕

k_m : 殻状乾燥部分の水分の拡散に関するパラメータ〔 $\text{cm}^3\text{-void}/\text{cm}\cdot\text{min}$ 〕

k_n 、 n : n 次速度式に基づく乾燥速度式のパラメータ

L : 試料の長さまたは幅〔 cm 〕

Q : 伝熱速度〔 cal/min 〕

R : 試料の半径〔 cm 〕

r_c : 未乾燥核の半径〔 cm 〕

S : 試料の表面積〔 cm^2 〕

t : 流体の温度〔 $^\circ\text{C}$ 〕

u : 流体の流速〔 cm/sec 〕

V : 試料の体積〔 cm^3 〕

W : 試料の含水率〔 $\text{g-H}_2\text{O}/\text{g-D.M.}$ 〕

w : 試料の重さ〔 g 〕

X : 試料の半厚さ〔 cm 〕

x : 試料の乾燥率〔 $-$ 〕

x_c : 未乾燥核の半厚さ〔 cm 〕

θ : 乾燥時間〔 min 〕

λ : 水の蒸発潜熱〔 $\text{cal}/\text{g-H}_2\text{O}$ 〕

μ : 流体の粘度〔 $\text{g}/\text{cm}\cdot\text{min}$ 〕

ρ : 試料または流体の密度〔 g/cm^3 〕

σ : 標準偏差〔 $-$ 〕

ϕ : 流体の湿度〔 $\%$ 〕

添字：

o, e, d : 初期, 平衡, 絶乾状態

g, s, c : 流体本体, 試料表面, 未乾燥核表面

H, B : 水分, 気泡

obs, cal : 測定値, 計算値

文 献

- 1) 化学工学協会編：化学工学便覧，第4版（丸善，東京），p.696（1978）.
- 2) 久保田清，松本俊也，鈴木寛一，保坂秀明：日食工誌，28，491（1981）.
- 3) 長谷川勉：広島大学水畜産学部卒業論文（1975）.
- 4) KUBOTA, K., SUZUKI, K., HOSAKA, H., HIROTA, R. and IHARA, K. : *J. Fac. Fish. Anim. Husb., Hiroshima Univ.*, 15, 1 (1976).
- 5) KILPATRICK, P.W., LOWE, E. and Van ARSDEL, W.B. : *Advances in Food Research* (Academic Press), 6, 360 (1955).
- 6) SUZUKI, K., KUBOTA, K., HASEGAWA, T. and HOSAKA, H. : *J. Food Sci.*, 41, 1189 (1976).
- 7) KUBOTA, K., SUZUKI, K., HOSAKA, H., HOSOKAWA, Y. and HIRONAKA, K. : *J. Fac. Fish. Anim. Husb., Hiroshima Univ.*, 16, 131 (1977).
- 8) 久保田清，鈴木寛一，保坂秀明：食品工業，20（16），60（1977）.
- 9) 久保田清：食品工業，22（12），73（1979）.
- 10) PASTRNAK, I.S. and GAUVIN, W.H. : *Can. J. Chem. Eng.*, 38, 35 (1960).
- 11) RANZ, W.E. and MARSHALL, Jr. W.R. : *Chem. Eng. Progr.*, 48(3), 141 (1952).
- 12) 桐栄良三，岡崎守男，久保田克之，大橋公司，片岡邦夫，水田浩二：化学工学，30，43（1966）.
- 13) 細川明，本橋罔司：農業機械学会誌，37，326（1975）.
- 14) SUZUKI, K., IHARA, K., KUBOTA, K. and HOSAKA, H. : *Nippon Shokuhin Kogyo Gakkaishi*, 24, 387 (1977).

SUMMARY

In previous paper²⁾, we have studied the over-all drying-rate equations of various-shaped potatoes. In this paper, we studied the shrinkage and the rate equations in the drying of potatoes.

The shrinkage and the drying-rate equations were postulated as follow.

$$dx/d\theta = k_n S (1-x)^n$$

For simple empirical type:

$$S/S_0 = -a^*x+1, \quad a^* = 1 - S_e/S_0$$

For uniform drying model:

$$S/S_0 = (-a^*x+1)^{2/3}$$

$$a^* = 1 - \{ (w_e/\rho_e) / \{ (w_0 - w_e)/\rho_H + w_e/\rho_e \} \}$$

For drying-shell model:

$$S/S_0 = (-a^*x + 1)^{2/3}, \quad a^* = 1 - w_e\rho_0 / (w_0\rho_e)$$

where, x : drying ratio (-), θ : drying time (min), S , w and ρ : sample area (cm²), weight(g) and density (g/cm³). Subscripts H, O and e : water, initial and equilibrium states.

The drying-rate equations based on the drying-shell model⁴⁾ were postulated too. These calculated results roughly agree with the observed values.