

ソバの乾燥特性の測定*

村田 敏**・河野俊夫**・小出章二**・田川彰男***

要 旨

ソバの乾燥装置の設計に必要な基本的物性の測定と解析を行った。すなわち

(1) 放湿過程・吸湿過程の平衡含水率すなわちヒステリシス及び蒸発潜熱が測定され、実験式のパラメータが決定された。

(2) 密度及び熱膨張係数、水分膨張係数が測定され、実験式のパラメータが決定された。

(3) 拡散係数の局所的な水分への依存性を考慮することにより乾燥シミュレーションに関する一つの試みがなされた。

Measurement of Drying Characteristics of Buckwheat

Satoshi MURATA**, Toshio KAWANO**

Shouji KOIDE**, Akio TAGAWA***

Abstract

The fundamental physical properties of buckwheat required to design drying equipment were measured and analyzed as follows :

(1) The equilibrium moisture content for desorption process, the hysteresis and the heat of moisture vaporization were measured, and the parameters of the empirical formulae were determined.

(2) The densities and the coefficient of the thermal and hygroscopic expansion were measured, and the parameters of the empirical formulae were determined.

(3) An attempt of drying simulation was made by considering the local moisture dependence on the diffusion coefficient.

[Keyword] drying, buckwheat, heat of vaporization, thermal expansion, hygroscopic expansion, diffusivity

I 緒 言

ソバは、日本を代表する庶民的食品の一つであるが、その生産量は、主食である米や小麦などに比べて圧倒的に少なく、したがって、大量乾燥処理に必要な乾燥工学的測定は行われることがなかった。しかし、ここ数年、低カロリー食品として

見直されるようになり¹⁾、又転換作物として国内生産の増加が見込まれるようになった。我々は、このような時代の要請に応じ、基本的物性さえも把握されていない、このソバについて、その製造工程中特に、品質保持の鍵となる乾燥処理において必要とされる乾燥特性・熱特性を測定し、有益な結果が得られたので、ここにその結果を報告する。

直接測定した項目は、以下の3つである。

- (1) 密閉容器内における飽和塩溶液による乾燥過程・吸湿過程の平衡含水率の測定
- (2) トルエンを使用した液体置換法による

* 平成元年4月農業機械学会年次大会にて講演

** 九州大学農学部 (〒810 福岡市東区箱崎6-10-1 TEL 092-641-1101) Faculty of Agriculture, Kyushu Univ., Fukuoka, 812 Japan

*** 東京農業大学 (〒093 網走市八坂196番地 TEL 0152-48-2116) Tokyo Univ. of Agriculture Abashiri, 093 Japan

密度測定

(3) 通風乾燥による含水率の経時変化の測定

(1)の測定からは、その乾燥過程のデータよりソバ含有水分の蒸発潜熱を算出した。また、兩過程の平衡含水率データからは、乾燥時の水分むらの解消に限界を与えている平衡含水率差の温度依存性を示す実験式を得た。(2)の測定では、得られた密度より、乾量基準の比容積を求め、その温度・含水率に対する関係式のパラメータを決定し、この式を基にソバ内部の応力を解析する上で必要な熱膨張係数・水分膨張係数の算出を行った。(3)の測定からは、乾燥定数の温度依存性を示す Arrhenius 型の実験式のパラメータを求めたほか、ソバ内部の含水率分布に対応した拡散係数の分布を考慮して、それを平板モデルによる非線形の問題として取り上げ、簡単な差分法により乾燥シミュレーションを行った。

II 測定方法

1. 供試材料 供試材料のソバには、1987年度産の宮崎大粒を採用した、収穫場所は鹿児島県鹿屋市で、収穫時の含水率は湿量基準で約20%と、やや高水分となっていたため、天日にて約15%まで乾燥させた後、庫内温度約5℃の冷蔵庫に入れて測定期間中の品質保持に努めた。また、水分の調整は、現状よりも高含水率のものについては水分を加えることにより、低含水率のものについては、60℃で飽和するよう計量して作られた水酸化ナトリウムの飽和塩溶液を入れたデシケータ内で乾燥させ、この含水率の変化をデジタル米麦水分計(ケット科学研究所P B-1D)によって確認しながら行った。なお、含水率の測定はすべて10g粒-135℃-24時間法に従って行った。

2. 飽和塩溶液による平衡含水率の測定 我々はさきに5種類の穀物の平衡含水率をこの方法により測定し、又それらより求めた蒸発潜熱について報告した²⁾が、今回も同様な方法で測定した。その概要は次の通りである。

供試材料のソバは、測定の前にあらかじめ高水分側は湿量基準で約35%に、また低水分側は約5%になるよう調温した。測定は、表1に示すような40通りの温度・湿度条件下で約30日間行い、一定時間ごとの試料重量を感量0.1mgの精密天秤で

表1 いろいろな飽和塩溶液に対する平衡相対湿度
Table 1 Equilibrium relative humidity for various saturated salt solutions

飽和温 °C	20	30	40	50	60
NaCl	75.6	75.2	75.0	74.9	74.9
NaNO ₃	—	73.0	71.0	68.9	67.5
NaBr	59.3	56.2	54.0	49.7	49.9
K ₂ CO ₃	44.1	43.8	43.4	42.8	—
MgCl ₂	33.1	32.4	31.6	30.6	—
CH ₃ COOK	23.2	21.6	19.7	19.5	—
LiCl	11.1	11.1	11.1	11.1	10.9
NaOH	7.0	6.8	6.5	5.8	4.6

* 単位 (%、R. H.)

—は調査中

表2 条件(密度測定温度と含水率)

Table 2 Conditions(Temperature and measurements of density measurement)

含水率 (%、w. b.)	0, 10, 15, 20, 25, 30, 35
温度 (°C)	20, 30, 40, 50, 60

* 組合せ 7×5=35 (通り)

秤量し、一日の重量の変化がこの感量以下となった時点をもって平衡含水率と見なした。また、この測定は乾燥過程と吸湿過程の両方について同時に行った。

3. 液体置換法による密度測定 この項についても我々は先の別論文で5種類の穀物について同様の測定を行い、熱膨張係数・水分膨張係数を求めている³⁾。今回も同様な方法で測定した。その概要は次の通りである。

置換媒体には、前回と同様トルエンを採用した。測定は、一回あたりの試料重量を約10gとし、表2に示すような35通りの温度・含水率の組合せについて行った。表中、設定含水率が0%のものがあるが、これは10g粒-135℃-24時間法による絶乾物を指し、ソバ膨潤の基準として設定したものである。測定中、特にウォータ・バス内にピクノメータを浸している間、揮発性によるトルエンの消散が考えられるが、これについては、同温度のトルエンを注ぎ足すことにより対処し、また、秤量は感量0.1mgのデジタル天秤(Mettler PK 300HC)を使用することにより瞬間的に測定することができた。密度の計算は、次式により算出した。

$$\rho_s = \frac{W_s}{(W_t + W_s) - W_{st}} \times \rho_t \quad (1)$$

ただし、 ρ_t については文献値⁴⁾を利用した。

表3 通風乾燥条件
Table 3 Drying Conditions

初期含水率35(% w.b.) 風量10000(ℓ/hr)の条件において

	30°C	40°C	50°C	60°C
70 (% RH)	○			
50 (% RH)	○			
40 (% RH)	○	○		
30 (% RH)		▲	○	
25 (% RH)				○
20 (% RH)			○	○
15 (% RH)				○

▲40°C-30 (% RH) については、次の5種類の測定を行った

風 量	初期含水率
10000 (ℓ/hr)	35 (% w.b)
15000 (ℓ/hr)	35 (% w.b)
5000 (ℓ/hr)	35 (% w.b)
10000 (ℓ/hr)	30 (% w.b)
10000 (ℓ/hr)	25 (% w.b)

4. 乾燥特性の測定 測定は、一回の試料重量を約50gとし、これを厚さ3mm、内直径150mm、高さ20mmの塩化ビニール製の円形パイプの一方の面に格子幅3mmの金網を接着して作った試料受けに単層状態に広げて乾燥部に載せ、表3のような測定条件で一定時間ごとの試料重量を感量0.01gのデジタル天秤(Mettler PC-2000)ですばやく秤量した。

III 測定結果及び考察

1. ソバ含有水分の蒸発潜熱

(1) 蒸発潜熱の計算法 前回²⁾、蒸発潜熱の計算方法として一般的であったOthmer法の精度上の問題点及びStrohmanとYoegerの提案した蒸発潜熱比の表現式の矛盾点などについて詳しく論じたので、今回は詳細な説明は省略する。要するに次のClausius-Clapeyronの式を厳密に計算することによって、平衡含水率式から蒸発潜熱を求めた。

$$Q_{st} = T(V_g - V_l) \left(\frac{\partial P_{st}}{\partial T} \right) \quad (2)$$

なお、(2)式のうち穀物内水分の水蒸気分圧 P_{st} は $P_{st} = h \cdot P_s$ (3)

で与えられ、飽和蒸気圧 P_s は実用国際状態式(1967)³⁾より温度が決まれば求まる。また、相对湿度の計算には、平衡含水率と温度との間に様々な式が提案されているが、今回も適合性の高い次のChen-Clayton式を採用した。

表4 式とパラメータ対応表
Table 4 Values of the parameters and the corresponding equations

式の番号	パラメータ
(4)	$f_1 = 2.8992 \times 10^5$ $f_2 = 7.0220 \times 10^{-5}$ $g_1 = -1.8370$ $g_2 = 1.3633$ $SD = 2.6046 \times 10^{-1}$
(5)	$a_1 = 2.7584 \times 10^{34}$ $a_2 = 1.0036 \times 10^6$ $b_1 = -1.2433 \times 10^1$ $b_2 = -2.1164$ $c = -1.7050 \times 10^{-1}$ $SD = 2.4230 \times 10^{-1}$
(6)	$a_1 = -5.700 \times 10^{-2}$ $a_2 = 1.785 \times 10^1$ $SD = 1.340 \times 10^{-1}$
(8)	$a = 2.1913 \times 10^{-8}$ $b = -2.9172 \times 10^{-7}$ $c = 9.4369 \times 10^{-5}$ $d = 1.1075 \times 10^{-4}$ $e = 7.9813 \times 10^{-3}$ $f = -1.3044 \times 10^{-1}$ $SD = 1.4978 \times 10^{-2}$
(13)	$d_1 = 2.896 \times 10^6$ $d_2 = 1.191 \times 10^6$ $f_1 = f_2 = 4.813 \times 10^3$

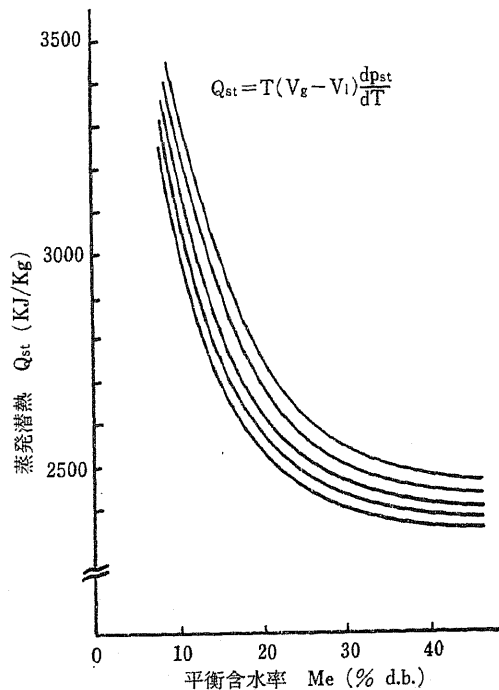


図1 ソバの蒸発潜熱

Fig. 1 Latent heat of vaporization of the moisture in the buckwheat kernel

$$h = \exp\{-f_1 T^{g_1} \exp(-f_2 T^{g_2} M_e)\} \quad (4)$$

適合性については、前回と同様に標準偏差にして0.261と非常に良好であった。なお、得られたパラメータを表4に示す。

(2) ソバ含有水分の蒸発潜熱 図1は(1)の計算法に従って計算したソバの蒸発潜熱である。蒸発潜熱は他の穀物²⁾と同様、平衡含水率の低下と共に指数関数的に上昇し、例えば50°Cの場合、平衡含水率が10%になると純水の約1.21倍にもなって

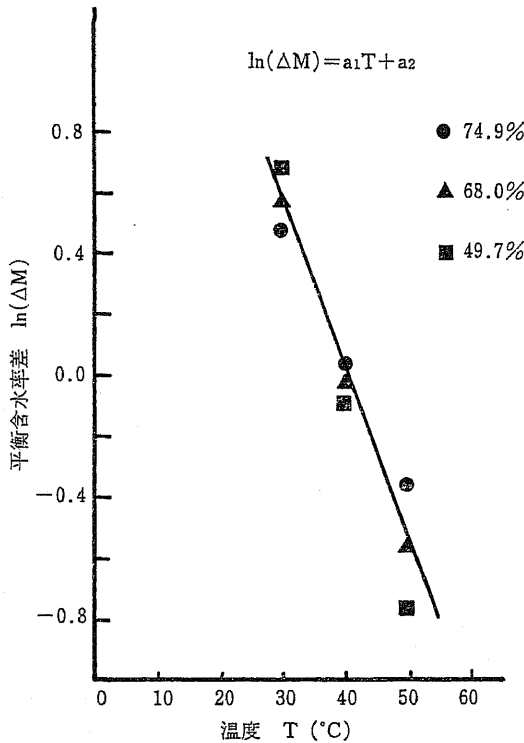


図2 平衡含水率差の温度依存性

Fig. 2 Temperature dependency of differences in equilibrium moisture content between sorption and desorption process

いる。また、40%以上ではどの温度においてもほぼ、対応する純水の蒸発潜熱に等しくなる。

なお、この結果は、次式にきわめてよく適合した ($\sigma=0.2423$)。

$$Q_{st} = Q_s [1 + \exp\{-a_1 T^b \exp(-a_2 T^b M_e^c)\}] \quad (5)$$

なお、得られたパラメータを表4に示す。

(3) 平衡含水率差(ヒステリシス)の温度依存性 平衡含水率差は乾燥時の水分むらの解消に限界を与えることで知られており、乾燥過程と吸湿過程における履歴現象の理論的説明については、多くの説が提案されている⁷⁾⁸⁾が、そのいずれも実測値を十分説明できる程度までには至っていない。今回は実用的な面で必要な平衡含水率差の温度依存性に関する実験式についてのみ報告する。図2はその平衡含水率差の対数を縦軸に、温度を横軸にとってプロットした図である。実線は最小二乗法により次式に当てはめた結果である。

$$\ln(\Delta M) = a_1 T_2 + a_2 \quad (6)$$

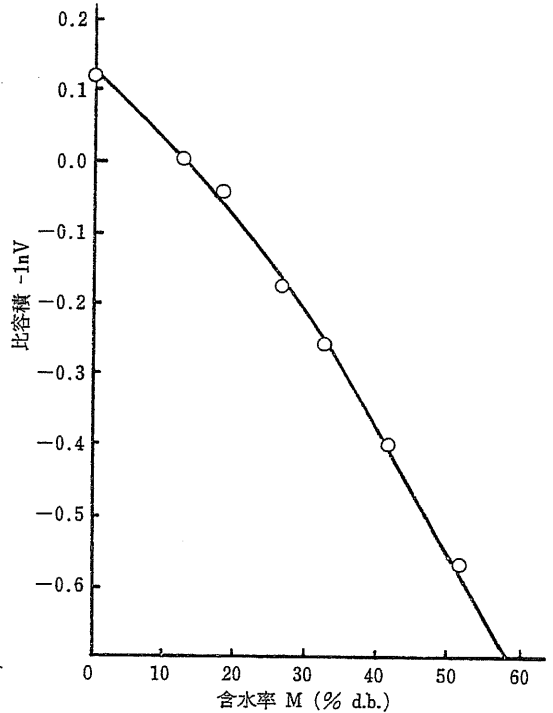


図3 ソバの比容積と含水率の関係

Fig. 3 Relationships between specific volume of buckwheat and its moisture content

なお、得られたパラメータを表4に示す。

図のように平衡含水率差は温度依存性が高く、特に低温においてその影響が大きくなる傾向があることが分かる。

2. 熱膨張係数・水分膨張係数の算出

(1) 比容積の温度・含水率との関係 測定によって得られたソバの密度は、湿量基準の比容積であるため次式を用いて乾燥基準の比容積に換算した。

$$V = \frac{1}{\rho_w(1-M/100)} \quad (7)$$

比容積と温度・含水率との関係には他の穀物同様次式を仮定して当てはめた。

$$\ln V = (aM^2 + bM + c)T + (dM^2 + eM + f) \quad (8)$$

この結果は図3に示すようにきわめて適合性は高いが、表4に示すようにd, e, fに比べ、a, b, cの値がかなり小さいことから比容積の温度依存性の低いことが分かる。

(2) ソバの熱膨張係数, 水分膨張係数 熱膨張係数・水分膨張係数の定義は次の2式で表され

る。

$$\text{熱膨張係数 } \alpha = \frac{\partial}{\partial T}(\ln V) \quad (9)$$

$$\text{水分膨張係数 } \beta = \frac{\partial}{\partial M}(\ln V) \quad (10)$$

したがって、先ほどの比容積の関係式(8)より各々次のようになる。

図4に熱膨張係数、図5に水分膨張係数をこれら2式より計算した結果を示す。熱膨張係数は、含水率の増加と共に二次関数的に下向きに凸の変化をしているが、これは米や大豆と同じ傾向である³⁾。また、水分膨張係数は熱膨張係数に比べてかなり大きな値をとり、かつ含水率に対して直線的に上昇し、温度により傾きが大きく変化することからもソバ体積変化の主たる要因がその含有水分にあることが結論づけられる。

3. 乾燥特性の測定

(1) 乾燥定数の温度依存性 乾燥を特徴づける乾燥定数は、次に示す Arrhenius 式に従うことがよく知られている。ソバについても図6に示すようによく適合した。

($\times 10^{-4}$)

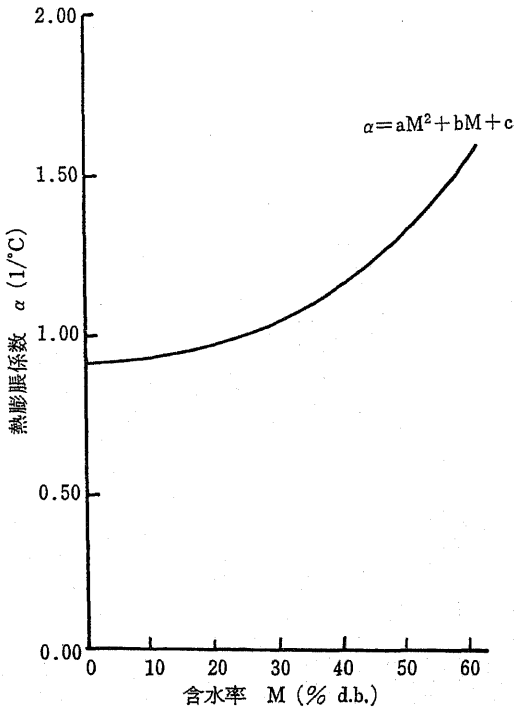


図4 ソバの熱膨張係数と含水率の関係
Fig. 4 Relationships between coefficient of thermal expansion for buckwheat kernels and its moisture content

$$K = d \exp\left(-\frac{f}{T}\right) \quad (13)$$

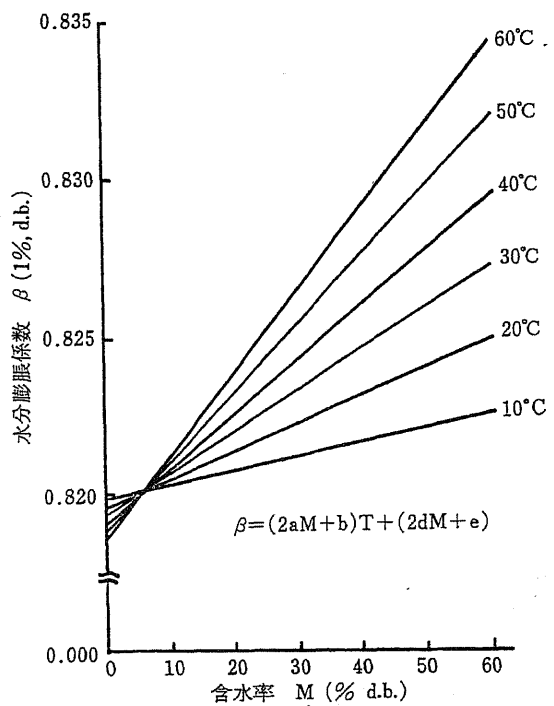


図5 ソバの水分膨張係数と含水率の関係
Fig. 5 Relationships between coefficient of hygroscopic expansion for buckwheat and its moisture content

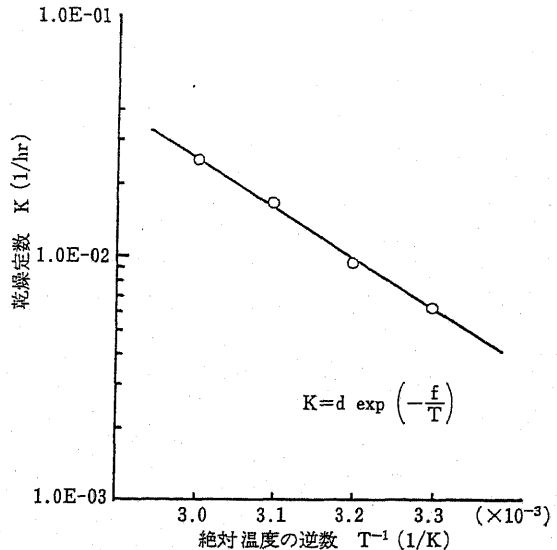


図6 乾燥定数の温度依存性 (アレニウスプロット)
Fig. 6 Temperature dependency of drying constant(Arrhenius-plot)

なお、表4にそのパラメータを示す。

(2) 差分法による乾燥シミュレーション 今回行ったソバの乾燥特性の測定では、40℃以上の高温条件において、相対含水率の変化図上で相対含水率が0.15前後を境に、フーリエ級数解の第一項である直線部より外れ、第二の直線部の出現が認められた。この事実は、これまでの拡散係数を温度のみの関数として取り扱ってきた線形の拡散方程式では、説明できないことであり、拡散係数の含水率依存性を考慮すべきこと、したがって穀物内部の含水率分布に対応した拡散係数の分布を持つ非線形の問題として取り扱うべきことを示している。相対含水率の変化図上で第一直線部の切片の大きさがほぼ0.8であったことから、平板モデルを仮定し、次の一次元の非線形拡散問題をクラック・ニコルソン法により解くことにより、乾燥シミュレーションを行った。ただし、拡散係数には、含水率に対する次の段階型関数を仮定している

$$D = \frac{4K_1}{\pi^2} (M_{Local} < M_b)$$

$$D = \frac{4K_2}{\pi^2} (M_{Local} \leq M_b) \quad (14)$$

ただし、境界値 $M_b = 10.7(\%d.b.)$

から、線形のプログラムを手直しすることによって簡単に行うことができた。なお、シミュレーションの際必要となる(14)式の乾燥定数 K_1 , K_2 には相対含水率の変化図上に現れた第一直線部と第二直線部の傾きからそれぞれの求めた(13)式のパラメータ d_1 , f_1 と d_2 , f_2 を使用した。

一次元の非線形拡散方程式

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial M}{\partial x} \right) \quad (15)$$

$$\text{初期条件 } t=0, M=M_0, 0 \leq x \leq 1 \quad (16)$$

$$\text{境界条件 } t>0, M=M_e, x=1 \quad (17)$$

$$\frac{\partial M}{\partial x} = 0, x=0 \quad (18)$$

クラック・ニコルソン法による差分式は、

$$\frac{M_{i,j} - M_{i,j-1}}{k} = \frac{1}{2} \{f_j + f_{j-1}\} \quad (19)$$

$$f_j = \frac{1}{h^2} \{D_{i+1/2,j}(M_{i+1,j} - M_{i,j}) - D_{i-1/2,j}(M_{i,j} - M_{i-1,j})\} \quad (20)$$

ただし、 i : 位置 h : 位置の格子幅

j : 時間 k : 時間の格子幅

$R = \frac{k}{h^2}$ とし、含水率による拡散係数の変動

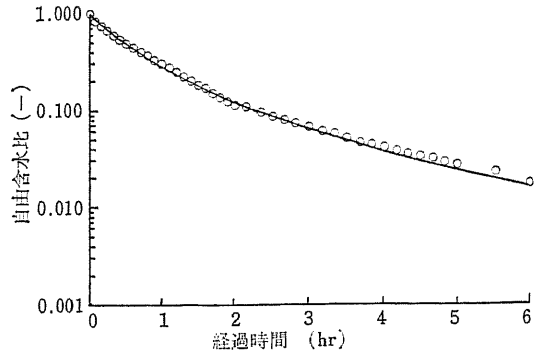


図7 拡散係数変動モデルによる乾燥シミュレーション

Fig. 7 Drying simulation by diffusion coefficient variation model

が、 j 時間と $j-1$ 時刻において小さいことを考慮して式を整理すると

$$\begin{aligned} & -RD_{i-1/2,j-1}M_{i-1,j} + (2+RD_{i-1/2,j-1} \\ & + RD_{i+1/2,j-1})M_{i,j} - RD_{i+1/2,j-1}M_{i+1,j} \\ & = RD_{i-1/2,j-1}M_{i-1,j-1} + (2-RD_{i-1/2,j-1} \\ & - RD_{i+1/2,j-1})M_{i,j-1} + RD_{i+1/2,j-1}M_{i+1,j-1} \end{aligned} \quad (21)$$

$i=1$ のとき

$$\begin{aligned} (\text{左辺}) & = -RD_{-1/2}M_0 + (2RD_{-1/2} + RD_{3/2})M_1 \\ & - RD_{3/2}M_2 \end{aligned}$$

第2境界条件(18)より $D_{-1/2} = D_{3/2}$ であるから

$$(\text{左辺}) = 2(1+RD_{3/2})M_1 - 2RD_{3/2}M_2$$

$$\therefore (1+RD_{3/2,j-1})M_{1,j} - RD_{3/2,j-1}M_{2,j}$$

$$= (1-RD_{3/2,j-1}) + RD_{3/2,j-1}M_{2,j-1}$$

ただし $D_{3/2} = D \left\{ \frac{(M_1 + M_2)}{2} \right\}$ であるので、これを D_{M1}, D_{M2} と表記すると

$$\begin{aligned} & (1+RD_{M1,M2})M_1 - RD_{M1,M2}M_2 \\ & = (1-RD_{M1,M2}) + RD_{M1,M2}M_2 \end{aligned} \quad (22)$$

図7にパーソナルコンピュータ(NEC PC9801 VM2)を利用し、50℃における差分法による乾燥シミュレーションを行った結果を示す($K_1 = 0.9849$, $K_2 = 0.4051$)。図は6分割モデルによるものであるが、計算値は初期において、フーリエ解と一致し、全体にわたって測定値ともよく一致した。これは乾燥定数の変化の見られる遷移域もよく表現できている。従来のようにも、粒子全体の拡散係数がある含水率より一様に変化したと仮定するならば、この遷移域は折れ線で示され、実測値と一致しないことが証明される。この計算で用いた拡散係数の含水率依存性は前述したよう

に階段関数で示されるが、その含水率の境界値は、最適値の当てはめによって決定した。なお、風速の影響及び初期含水率の相違による影響は認められなかった。

IV 摘 要

ソバの基礎特性を測定し、解析した結果、以下のことが得られた。

1. 広範な温・湿度において適用し得ることが知られている Chen-Clayton の式の適合性の良さが、ソバに対しても確認された。
2. Chen-Clayton の式を利用することにより、ソバの蒸発潜熱を熱力学の基礎方程式である Clausius-Clapeyron の式より直接求め、簡易計算式に当てはめたところ両者はよく一致し、実用性が確認された。
3. 飽和塩溶液を利用した静的測法による乾燥過程と吸湿過程の平衡含水率より、両過程の平衡含水率差の温度依存性を示す実験式を求めた。
4. 測定により得られた比容積の温度・含水率との関係式を利用して、熱膨張係数・水分膨張係数をその定義より求めた。また、両膨張係数を比較したところ、水分膨張係数は熱膨張係数よりかなり大きく、ソバの容積変化の主たる要因が、その含有水分にあることが分かった。
5. 通風乾燥法により乾燥特性を測定し、乾燥定数の温度依存性を示す Arrhenius 型の実験式のパラメータを決定した。
6. 相対含水率の経時変化図において乾燥定数に変動のあることが分かり、これを平板モデルによる非線形の問題として捉え、ソバ内部の含水率分布に対応した拡散係数の分布を考慮して、クランク・ニコルソンによる乾燥シミュレーションを試みた結果、計算値と測定値はよく一致し、6分割程度の差分法によっても実用上は十分であることが確認できた。

V 記号 (Nomenclature)

- h : 相対湿度 (Relative humidity %)
 M : 乾量基準含水率 (Dry basis moisture content, %, d. b.)
 M_{Local} : 局所含水率 (Local moisture content, %, d. b.)

- P_s : 飽和蒸気圧 (Vapor pressure, Pa)
 P_{st} : 穀物内水分の水蒸気分圧 (Vapor pressure in the kernel, Pa)
 Q_{st} : 穀物内水分の蒸発潜熱 (Latent heat of moisture vaporization in the kernel, kJ/kg)
 T : 絶対温度 (Absolute temperature, °K)
 V : 乾量基準の比容積 (Dry basis specific volume, m³/kg, dry matter)
 V_g : Tにおける水蒸気の比容積 (Specific volume of vapor at T, m³/kg)
 V_l : Tにおける液状水の比容積 (Specific volume of liquid water at T, m³/kg)
 W_s : 試料の質量 (Mass of sample, g)
 W_{st} : 試料とトルエンでピクノメータを満たしたときの質量 (Mass of pycnometer filled with sample and toluene, g)
 W_t : ピクノメータをトルエンのみで満たしたときの質量 (Mass of pycnometer filled with toluene, g)
 ΔM : 平衡含水率差 (Equilibrium moisture content difference by hysteresis, %, d. b.)
 ρ_s : ソバの密度 (Density of buckheat kernels, g/cm³)
 ρ_t : トルエンの密度 (Density of toluene, g/cm³)
 ρ_w : 湿量基準含水率 (Wet basis moisture content, %, w. b.)

参 考 文 献

- 1) 神尾正義：「そば」の嗜好性について，食品と科学，30 (8)，119，(1988)
- 2) 村田 敏，田川彰男，石橋真人：穀物水分 蒸発潜熱の計算式について，農機誌，50(3)，85—93，(1988)
- 3) 村田 敏，田川彰男，石橋真人：穀物の熱および水分による体積変化，農機誌，49(5)，435—442，(1987)
- 4) 化学工学協会編：物性定数第5集，丸善，76，(1967)
- 5) 日本機械学会：1980 SI 日本機械学会蒸気表，(1980)
- 6) S. W. Pixon and R. W. Howe：The suitability of various linear transformations to present the sigmoid relationship of humidity and moisture content, Journal of stored product research, 19 (1), 1—18, (1983)
- 7) James W. McBain：An explanation of hysteresis in the hydration and dehydration of gels
- 8) James H. Young and G. L. Nelson：Theory of hysteresis between sorption and desorption isotherm in biological materials, Trans. of the ASAE, 260—263, (1967)

(原稿受理平成元年4月27日・質問期限平成2年7月31日)