

単層大豆の乾燥特性*

村田 敏**・河野俊夫**・榎本敏夫**

要 旨

大豆(品種タマホマレ)約100gを35%に調湿し, 温度30~60°Cと相対湿度20~70%(RH)の範囲で乾燥試験を72h行った。サンプル受けは, 直径150mmで底に目開き寸法5mmのメッシュを取り付けてあり, 流量は10m³/hに設定した。

自由含水比を対数目盛にとり時間に対してプロットしたところ, 漸近直線の切片は0.69に近いことがわかった。

このことから, 無限円筒モデルを大豆の乾燥モデルとして適用した結果, 測定値とモデルは極めてよく一致した(含水率の実測値と計算値の差の標準偏差 S. D. <0.12%d. b.)。

これらの測定データに無限円筒モデルの解を最小自乗法で当てはめて算出した乾燥速度係数 K_2 を Arrhenius 型の式に当てはめた結果, 次の式が得られた。

$$K_2 = 482.48 \cdot \exp\left(-\frac{2583.6}{T}\right) \text{ (1/h)}$$

標準偏差 $1.19 \times 10^{-3} \text{ (1/h)}$

Drying Characteristics of Soybeans*

Satoshi MURATA**, Toshio KAWANO**, ENOMOTO**

Abstract

Samples of about 100g of soybeans, variety "TAMAHOMARE", were conditioned to 35% moisture content (w. b.) and single layer drying tests were made for 72 hours at 30, 40, 50 and 60°C and humidity in the range of 20 to 70 percent (RH). The sample pan section was 150mm in diameter with a 5mm opening screen replacing the bottom and air flow rate set at 10m³/h (0.157m/s).

Having plotted the free moisture ratios on the semilogarithmic paper versus drying time, the intercept of asymptotic straight line of the curvature became to 0.69.

For this reason, an infinite cylinder model was presented and quite good agreement was obtained between the experimental results and the model predictions.

The drying rate coefficients K_2 (1/h) estimated from those experimental data were resolved into Arrhenius type equation as follows:

$$K_2 = 482.48 \cdot \exp\left(-\frac{2583.6}{T}\right)$$

Standard deviation $1.19 \times 10^{-3} \text{ (1/h)}$

[Keyword] rewetted soybeans, single-layer drying, cylinder model, drying simulation, Arrhenius type equation

I 緒 言

大豆は粳や麦類に比べて乾燥のデータの蓄積が少なく, 未知な点が多^{1)~4)}。

* 平成2年4月 第49回農業機械学会年次大会(宮崎大学)にて講演

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

特に、基本的な乾燥特性の研究においては、外国においても精密な測定と解析の例はほとんどないと言ってよい。

本研究では、一般の含水率範囲を含んで更に広い乾燥特性を測定するために通常の収穫時含水率よりかなり高い35%w.b.程度の高含水率に調湿した吸水大豆を供試材料として、通風乾燥試験によりほぼ平衡含水率までの単層乾燥特性を精密測定して、拡散理論により解析を行い、吸水大豆の乾燥特性モデルを明かにし、更に、モデルによる計算値を最小自乗法によって当てはめた乾燥速度係数と平衡含水率等の大豆の基本特性を明かにしたもので、その結果について報告する。

II 測定方法

1. 供試材料と含水率の調整

供試材料の大豆(品種:タマホマレ)は、昭和61年度に福岡県筑後市農業試験場で収穫後、屋内に拡げて12%w.b.程度まで自然乾燥させた後、本研究の測定で供試する平成元年5月まで、庫内温度5℃の冷蔵庫に入れて保蔵しておいたものを使用した。保蔵期間が長かったにもかかわらず大豆には、裂皮などの外部損傷を生じた被害粒はなかった。

含水率の調整は、現在の含水率を測定した後、これを35%w.b.にするに必要な水を、大豆を入れた密封容器に計量して加え、低温(5℃)で5日間置くことにより行い、乾燥試験の際には、充分室内温度にならしてから供試した。これは、急激な水分増加による外部的傷害の発生と、呼吸や微生物の活動による大豆品質の劣化を抑制するためである。また、含水率の測定方法については、現在までのところ、国内での標準測定法が示されていないため¹⁾⁵⁾、10g粒-130℃-3時間法により行った。

2. 測定装置と測定

図1は通風乾燥試験装置の概略を示す。風量は図中のロータメータを見ながら10m³/hに設定した。測定1回に供試する大豆は約100g(300粒)で、これを高さ30mm程度の塩化ビニール製円筒の底に径150mm、目開き寸法5mmの網を取り付けた試料受けの上に単層状態に広げて乾燥部に載せ、表1のような乾燥条件のもとで通風乾燥試

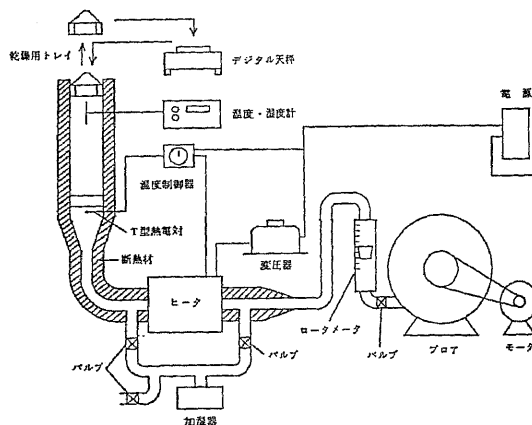


図1 通風乾燥試験装置の概略

Fig. 1 Schematic diagram of apparatus for drying tests

表1 乾燥条件

Table 1 Drying condition

温度 (°C)	相対湿度 (%)					
	20	30	40	50	60	70
30				○	○	○
40				○	○	○
50	○	○	○			
60	○	○				
空塔風速	0.157 (m/s)					

験を行い、重量変化を一定時間ごとに測定して、含水率が約12%w.b.以下に達したと判断された段階(時間的には52h, 72h, 76h, 78h)で絶乾し、水分を算出した。

乾燥中の重量変化の測定は、測定開始から一定時間(0~108minまでは5minごと、それ以降は210, 240, 270, 300, 330, 360, 720, 2160, 3120min)経過ごとに試料受けを取り出して、感量0.01gのデジタル天秤(Mettler PC2000)で秤量し、再び乾燥部へ戻すという操作を繰り返して行った。

III 測定結果及び考察

1. モデルによる解析について

大豆は他の禾穀類に比べると粒径が大きいいため、収穫直後の粒子内は一様でない水分分布となっていることが予測される。

また含水率により粒子の形状が楕円体(高含水

率)から球形(低含水率)へと変化する特性を持っている上、乾燥による収縮によってしわや裂皮などの外的傷害を生じるため、乾燥処理には米麦類以上に配慮すべき要因が多い。

このように境界の変動する場合には、厳密には収縮を伴う3次元の拡散方程式を解析することが必要であるが、乾燥中の大豆変形特性の情報はなく、変形も個体差の大きいことが予測されるため、現状では粒子全体平均としての乾燥特性から、最も近い乾燥モデルを設定することによって、乾燥特性の予測を行う他はないと考えられる。

そこで、本研究では、充分に吸水させて低温下で含水率をならし、粒内含水率の均一化を図った高含水率大豆についての乾燥特性を明かにした。

乾燥工学上、穀物の乾燥モデルの決定は基本的に重要であるにもかかわらず、その決定方法については意外と検討されていない。そこで、本研究で得られた吸水大豆の測定結果の解析を行うとともに、乾燥モデル決定の重要性についても若干述べる。詳しくは、村田(1982)⁷⁾の文献を参照されたい。

2. 大豆の乾燥モデル

図2は、測定結果から得られた乾燥温度ごとの代表的な乾燥速度特性曲線である。

乾燥速度は乾燥終了含水率まで曲線的に減少しており、乾燥期間は減率乾燥第2段に属している。

図3は、30℃、50% (相対湿度)における大豆の自由含水比の経時変化を示したものである。図中には平板モデル、球モデル、円筒モデルの漸近

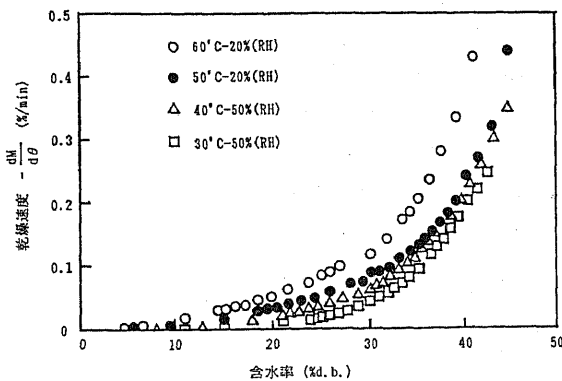


図2 大豆の乾燥速度特性曲線

Fig. 2 The drying-rate curves of soybeans

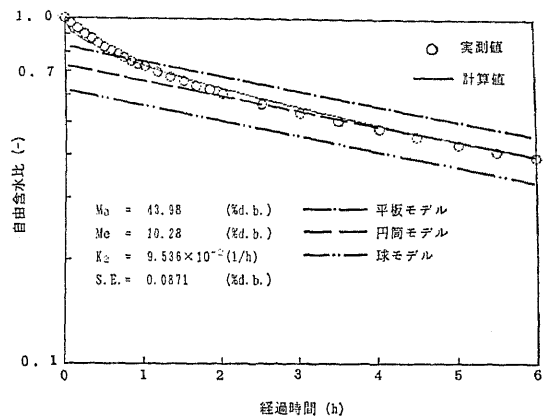


図3 円筒モデルによる計算値と比較した大豆の乾燥特性 (30℃-50% R.H.)

Fig. 3 Drying characteristics of soybeans comparing observed with calculated values by infinite cylinder model (30℃-50% R.H.)

直線の計算値が記入してあるが、円筒モデルが一致していることがわかる。どのような拡散モデルにおいても拡散係数(乾燥速度係数に比例)を調整することによって、この直線の勾配を一致させることが出来るが、モデルによって、切片の値が確定しているの、このように他のモデルでは一致させることは出来ない。この切片の値は球が0.6079(6/π²), 円筒が0.6917(4/β₁² Appendix 参照), 平板が0.8105(8/π²)である。明かに実測値の切片は円筒の0.6917に極めて近いことが観測される。図4~6についても同様で、円筒モデルによって当てはめた曲線は漸近直線部を含めて全域に亘って極めてよく一致した。このことは次節で説明するように、数値的にも検証される。

さて、円筒モデルに対する拡散方程式の解は、初期に含水率は一律でM₀であること(初期条件)および表面の含水率が平衡含水率にMe等しく(境界条件)一定であるとする条件のもとに、自由含水比 M' (= (M-Me)/(M₀-Me)) とフーリエ数 Fo (= D·θ/R²) の関係式として次式で示される⁸⁾。

Foの大きい時

$$M' = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{\alpha_n^2} \exp(-\alpha_n^2 Fo) \tag{1}$$

ただし、α_nは0次のベッセル関数の方程式

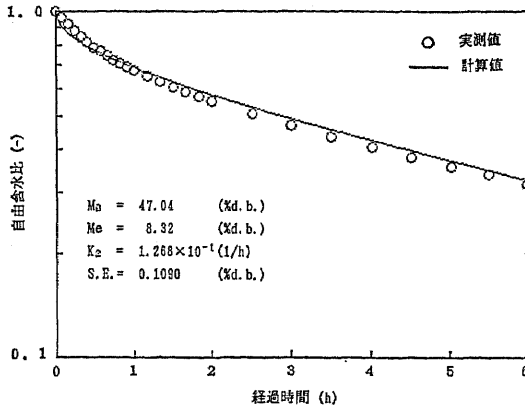


図4 円筒モデルによる計算値と比較した大豆の乾燥特性 (40°C-50% R.H.)
 Fig. 4 Drying characteristics of soybeans comparing observed with calculated values by infinite cylinder model(40°C-50 R.H.)

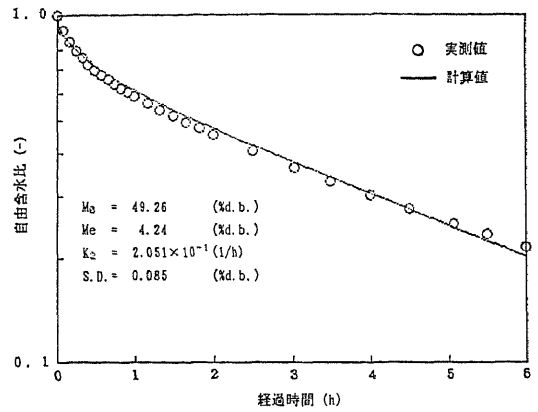


図6 円筒モデルによる計算値と比較した大豆の乾燥特性 (60°C-20% R.H.)
 Fig. 6 Drying characteristics of soybeans comparing observed with calculated values by infinite cylinder model (60°C-20% R.H.)

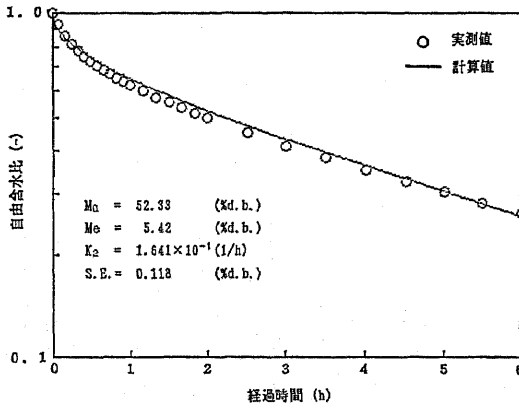


図5 円筒モデルによる計算値と比較した大豆の乾燥特性 (50°C-20%R.H.)
 Fig. 5 Drying characteristics of soybeans comparing observed with calculated values by infinite cylinder model (50°C-20% R.H.)

であるから

$$Fo = K_2 \theta / \alpha_1^2 \tag{5}$$

で計算される。この式(5)によって、乾燥速度係数から式(1)と式(3)が計算される。

図3～6にパーソナルコンピュータ (NEC PC-9801VM2) を利用して 30～60°Cにおける大豆の乾燥特性の実測値に式(1)と式(3)を利用して無限円筒の拡散方程式を当てはめた結果を示す。図中に記入した乾燥速度係数 K_2 と平衡含水率 Me の値は、この最小自乗推定による当てはめの結果得られたものである。いずれにおいても含水率の推定値と実測値の差の標準偏差 S.D. は、図中に記入してあるように 0.12% d. b. 以下であり、きわめて高い適合性を持つ。

この最小自乗推定の実際については Appendix を参照されたい。

このように、計算結果である実線は測定値と極めてよく一致しており、実用上十分な精度で大豆の乾燥特性を表現出来た。

3. 乾燥速度係数

乾燥速度係数は一般に次の Arrhenius 型の実験式に従うことが、多くの研究者らによって種々の穀物について確認されている。

$$K_2 = d \exp\left(-\frac{f}{T}\right) \tag{6}$$

図7は、各温度において乾燥特性を円筒モデル

$$J_0(\alpha_n) = 0 \tag{2}$$

の絶対値において小さい方から n 番目の解。

Fo の小さい時

$$M' = 1 - \frac{4}{\pi^{1/2}} Fo^{1/2} + Fo + \frac{1}{3\pi^{1/2}} Fo^{3/2} + \dots \tag{3}$$

また、 Fo の計算上必要な拡散係数 D は、測定により得られる乾燥速度係数 K_2 が

$$K_2 = D\alpha_1^2 / R^2 \tag{4}$$

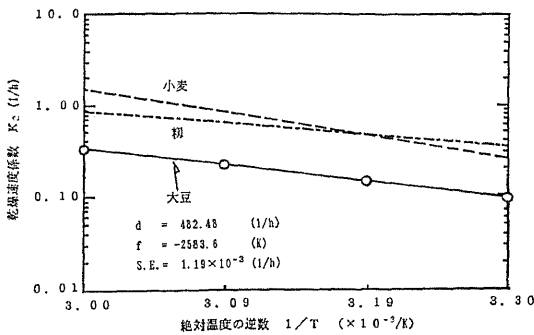


図7 大豆の乾燥速度定数に関するアレニウス型プロット

Fig. 7 Arrhenius type plots of drying constant against the reciprocal of temperature for soybeans

で適合させ、その結果得られた乾燥速度係数をこの Arrhenius 式に最小自乗法であてはめたものであるが、今回の大豆についてもよく適合することがわかる。同図に描いた他の禾穀類、小麦や粳に比べると大豆の乾燥速度係数は数値的に1オーダー小さく、乾燥処理にかなりの時間を要することがわかる。これは式(4)からわかるように主として大豆の径の大きいことに由来する。測定値に対する実験式(6)の標準偏差 S. D. は極めて小さく適合性の高いことを示している。

最小二乗法によって求められたパラメータは次のとおりである。

$$d = 482.48(1/h) \quad f = 2583.6(K) \\ S. D. = 1.19 \times 10^{-3}(1/h)$$

図中には、文献⁷⁾から引用した小麦と粳の値を示しているが、大豆の乾燥速度係数が1桁小さいが、これは式(4)からわかるように主に粒径の違いによるものである。いずれにしても、収穫から仕上げ乾燥まで相当な時間を要することがわかる。

IV 結 論

大豆の諸特性の中で、主に乾燥特性について測定・解析を行った結果、次のことが明らかとなった。

1) 吸水大豆の含水率-乾燥速度曲線(乾燥速度特性曲線)は35%w. b. (54%d. b.)の高含水率から平衡含水率までの広範囲に亘って、下に凹の曲線を示して減少する傾向を示し、乾燥期間は減乾燥率第2段にある。

2) 自由含水比を対数にとった吸水大豆の経時曲線は、その後期の直線部の切片が円筒モデルの0.69に極めて近いことが観察された。このことは吸水大豆の乾燥モデルとして円筒モデルが適切であることを示すものである。これは円筒モデルによる最小自乗シミュレーションの標準偏差が極めて小さい(<0.12%d. b.)ことから数値的に確認された。

3) 乾燥速度係数 K_2 に関する Arrhenius 型の実験式は吸水大豆にもよく適合し、次式を得た。

$$K_2 = 482.48 \cdot \exp\left(\frac{2583.6}{T}\right) \quad (1/h) \\ = 1.19 \times 10^{-3}(1/h)$$

V 記号 (Nomenclature)

- D : 拡散係数 (Diffusivity, m^2/h)
- d : 式(6)のパラメータ (A parameter of eq. (6), 1/h)
- Fo : フーリエ数 (Fourier number, $-$) = $D \cdot \theta / R^2$
- f : 式(6)のパラメータ (A parameter of eq. (6), K)
- K_2 : 乾燥速度係数 (Drying constant, 1/h)
- M : 含水率 (Moisture content, (% , d. b.))
- M_0 : 初期含水率 (Initial moisture content % , d. b.)
- Me : 平衡含水率 (Equilibrium moisture content % , d. b.)
- M' : 自由含水比 (Moisture ratio, $-$) = $(M - Me) / (M_0 - Me)$
- R : 円筒半径 (Radius of cylinder, m)
- T : 絶対温度 (Absolute Temperature, K)
- α_n : 方程式(8)の根 (Roots of eq. (8), $-$)
- θ : 時間 (Time, h)

APPENDIX

$$M' = \frac{M - Me}{M_0 - Me} = G(K_2, t)$$

として、最小自乗法の当てはめに使った式は次式である。

$K_2 t > 0.5$ では、級数第1項の指数の時間 t の係数の絶対値が K であるから

$$G(K_2, t) = \sum_{i=1}^6 \frac{1}{\alpha_{i2}} \exp\left(-K_2 \frac{\alpha_i^2}{\alpha_1^2} t\right)$$

$K_2 t < 0.5$ では $Fo = K_2 t / \alpha_1^2$ として

$$G(K_2, t) = 1 - (4Fo^{1/2} - \pi^{1/2}Fo - Fo^{3/2}/3) / \pi^{1/2}$$

ただし

$$\alpha_i : J_0(\alpha) = 0 \text{ の } i \text{ 番目の根で } \alpha_1 = 2.4048, \alpha_2 = 5.5201, \alpha_3 = 8.653, \alpha_4 = 11.7915, \alpha_5 = 14.9309, \alpha_6 = 18.0711$$

これらの式を使って、次の自乗和Sを最小にするように、 K_2 と Me を決定した。

$$S = \sum_{j=1}^N (M(J) - Me - (M_0 - Me)G(K_2, t))^2 \cdot W(J)$$

この重み $W(J)$ は乾燥後期の特性を重視して、観測の時間 $t(J)$ から

$$WS = \sum_{j=1}^N t(J) \quad W(J) = t(J) / WS$$

とした。

具体的には

$$\frac{\partial S}{\partial Me} = 0 \quad \frac{\partial S}{\partial K} = 0$$

を Me と K_2 について解く。これは非線形の方程式である。数値解の詳細は省略する。 K_2 につい

ては 10^{-18} (1/hr), Me については 10^{-14} 以上の精度で解を求めた。

参考文献

- 1) 東条 衛, 岡村太成: 大豆の乾燥特性について(第1報), 農業機械学会誌, 28(4), 227-231, 1953
- 2) 東条 衛, 岡村太成: 大豆の乾燥特性について(第2報), 農業機械学会誌, 26(1), 13-18, 1954
- 3) 東条 衛, 岡村太成: 大豆の乾燥特性について(第3報), 農業機械学会誌, 29(4), 209-213, 1954
- 4) 大黒正道, 沢村宣志, 佐々木豊: 高水分大豆の品質保持乾燥技術に関する研究(第1報), 第50回農業機械学会年次大会講演要旨, 337-338, 1991
- 5) 農業機械学会: 穀物の水分測定方法の基準, 1975
- 6) A. A. C. C.: Storage of Cereal Grains and their Products, 1974
- 7) 村田 敏: 穀物の特性と乾燥速度の予測, 農業機械学会誌, 44(3), 517-523, 1982
- 8) CRANK, J.: The Mathematics of Diffusion, OXFORD UNIVERSITY PRESS, 73-74, 1975
- 5) 村田 敏, 田川彰男, 石橋真人: 穀物水分蒸発潜熱の計算について, 農機誌, 50(3), 85-93, 1988
(原稿受理平成3年8月13日・質問期限平成5年3月31日)

コメント

[読者のコメント]

大豆の形状は明かに無限円筒より、球に近いと考えられますが、なぜ、乾燥モデルとして無限円筒モデルが適用されるのですか。球モデルにはどのような問題点が考えられますか。

[コメントに対する著者の見解]

大豆といえば、球というのが常識ですが、それは乾燥が終了した段階であって、湿った大豆は細長くて一般的には楕円体と考えてよいと思います。また子葉となる胚乳部が2つに別れており組織的には球対称ではありません。また、吸水速度(物理的には乾燥と同じ経路と機構をとると見てよい)が部位によって異なることが観測されています*。

一様で均質な物質から成る場合には、外見状の球は特性状にも球と一致するはずですが、そうでないことがわかっている場合には球にこだわる必要は無いし、に逆球にこだわるとう近似的悪いシミュレーションとなります。肝要なのは、どのようなモデルが乾燥特性をうまく表現出来るかという事です。

本文にもありますように、自由含水比を対数軸に、時間を実数軸にとった乾燥曲線は初期を除いて直線になることが知られています。したがって、大部分の領域であるこの直線部が一致しなければ、乾燥モデルは成功したとは言えません。

ご存じのように直線は勾配と切片が一致することが必要です。どのようなモデルでも、勿論球モデルでも、勾配は拡散係数(または乾燥速度係数 K_2) の値を調整することによって合わせる事が出来ます。しかし、切片の値は球では0.6079、円筒では0.6917、平板では0.8105に決っておりますから、この実測値のように切片部が0.69に極めて近い場合に切片が0.6079に決まっている球近似によっては、直線部が一致することは理論的には有り得ないのです。15%程度の誤差を生じます。

一方円筒モデルでは、初期の曲線部を含めて、実測と計算値の偏差がすべて0.12% d. b. 以内という高い一致を見ました。吸水大豆(おそらく収穫時大豆においても)円筒モデルが適切であると主張する所以です。