

千切大根の乾燥特性*

—収縮を伴うみかけの減率乾燥—

村田 敏**・小出章二**・宮内樹代史**

要 旨

高水分の農産物乾燥において、含水率の低下による収縮のために、乾燥機構は恒率乾燥期間であるにもかかわらず、見かけは減率乾燥を示す現象を説明する新たな乾燥方程式を提案した。この式は単位表面積当りの乾燥速度が一定である（恒率乾燥）ことと表面積が体積の $2/3$ 乗に比例する（相似収縮）という仮定のもとに導いた。なお、千切り大根において、その体積が含水率の1次式で与えられることが理論的にまた実験的に示された。

千切大根について種々の温度と湿度の条件のもとに乾燥速度を測定した。これらの結果はここで示した乾燥方程式によって計算した結果とよく一致した。さらに、種々の乾燥法による千切り大根への品質である大きさと色の変化の比較のために空気乾燥以外に窒素乾燥・減圧乾燥・天日乾燥を行った。品質上、もっとも良い結果が得られたのは減圧乾燥法であった。

〔キーワード〕 新しい乾燥方程式, 大根, 修正恒率乾燥, 体積収縮, 窒素乾燥, 減圧乾燥

Drying Characteristics of Sliced Radish*

—Apparent Falling Rate Drying by Shrinking—

Satoshi MURATA**, Shoji KOIDE**, Kiyoshi MIYAUCHI**

Abstract

For drying high moisture agricultural products, a new drying equation was proposed to account for the apparent falling rate drying phenomenon caused by the shrinkage accompanied with the moisture reduction. The equation was derived by the assumptions of constant drying rate per surface area of products and the reducing area proportional to the $2/3$ power of the volume. It was shown theoretically and experimentally that the volume of sliced radish varied as a linear function of moisture contents.

The drying rate of sliced radish were measured under the various conditions of temperature and humidity, and the results agreed well with the calculated values from the equation. Furthermore, various drying method of nitrogen drying, vacuum drying, and solar drying were also carried out for comparing the quality factor of size and color change during drying process. The best result, from the standpoint of the quality, was obtained by vacuum drying.

〔Keywords〕 a new drying equation, radish, modified constant rate drying, shrinkage in volume, nitrogen drying, vacuum drying

* 1992年4月第51回農業機械学会年次大会（東京農工大学）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 内6296）
Faculty of Agriculture, Kyushu University,
Higashi-ku, Fukuoka, 812 Japan

I 緒 言

乾燥装置および施設の設計には、一定の乾燥能力を満たすような乾燥空気の温湿度と風量を決定することが必要である。この乾燥能力は、対象となる農産物の乾燥速度に基づいて決定されるが、その乾燥速度の予測は、材料の乾燥機構が一般的乾燥特性曲線で示されるどの乾燥期間になっているかをみきわめることが重要である。

これまで、穀物の乾燥特性の研究例は数多くあり、その解析には減率乾燥理論が用いられ、その理論と測定された膨大な穀物の物性データを用いることにより、現在の乾燥施設での乾燥シミュレーションは、実用化の段階に達している。しかしながら、野菜や果実など高水分の農産物に関する乾燥特性の測定例¹⁾²⁾³⁾は非常に少なく、その乾燥特性の解析手法は確立されていないのが現状である。

本研究では、これに対し、千切大根の乾燥特性を観測することにより、新たな乾燥方程式を提案した。高水分の農産物の熱風乾燥機構はその大部分が恒率乾燥理論で説明できると推察されるが、観測結果は指数関数でない減率乾燥となった。これを説明するために表面積減少の式を導入した。

この計算式は、みかけの減率乾燥期間での乾燥曲線が簡単に予測できるので、野菜や果実などの予備乾燥装置の設計や操作の際、極めて有効な手法になると思われる。

また、特に品質変化の激しい千切り大根の乾燥における品質保持および形状保持を目的として、種々の乾燥法の比較を行った。現在、工業分野では空気以外のガスを用いた乾燥や真空乾燥・真空凍結乾燥が広く応用されているが、農産物乾燥では未だ常圧での空気乾燥が主流である。しかし農産物貯蔵においてCA貯蔵が浸透したように、同様の考え方で、乾燥中の雰囲気成分を調整したり、もしくは減圧下で低温で短時間に乾燥・凍結乾燥を行えば、乾燥に伴う酸化や呼吸作用が抑制され、品質は保持できるであろう。また品質保持が可能で、時間・コストに関しても低減できるならば、非常に実用性の高い乾燥法となり得る。

このために、まず小型乾燥装置を試作し、材料の酸化を防止するために酸素を含まないガス(こ

こでは窒素ガス)を用いて乾燥試験を行った。また、減圧乾燥法や天日乾燥法を適用して乾燥特性と乾燥後の品質を測定・評価したのでその結果について報告する。

II 収縮を伴う恒率乾燥機構について

恒率乾燥期間では、材料内の温度は一定に保たれ、乾燥は材料表面でおこっている²⁾。この恒率乾燥期間での乾燥速度を表す式は次式で示される。

$$\frac{dM_d}{d\theta} = -\alpha(t-t')S/W_d \quad (1)$$

式(1)は、恒率乾燥期間において乾燥速度は表面積の大きさに比例することを示す。

これより、本研究では、恒率乾燥期間における、乾燥に伴う材料の収縮を考慮して、新たな乾燥方程式を提案する。

表面積は含水率の減少に伴い減少するから、含水率の関数であるが、その関係式を求めるために、まず、試料の体積 V と含水率の関係式を求める。

高水分の農産物では、産物は水と固形物質から成るとすれば、直ちに次式が得られる。

$$V = \frac{W_d}{\rho_d} + \frac{W_w}{\rho_w} \quad (2)$$

ここで、含水率 M_d は

$$M_d = \frac{W_w}{W_d} \quad (3)$$

となるので、式(2)は式(3)より次式で表させる。

$$\begin{aligned} V &= W_d \left(\frac{1}{\rho_d} + \frac{M_d}{\rho_w} \right) \\ &= aM_d + b \end{aligned} \quad (4)$$

Kilpatrick³⁾は野菜の乾燥において恒率乾燥期間では水分の蒸発量と材料の体積減少量とを比較すると、これらは比例関係にあるとしている。また乾燥中の米粒において、その含水率と比容積との関係は一次関数式で近似できるという測定例⁴⁾があるが、これらの報告は、式(4)を裏付けるものである。

この研究でも、後述するように、大根について、含水率と体積の関係を測定し、含水率の高い千切り大根の乾燥範囲では、この関係が成立することを確かめた。

この式(4)でのパラメータ a 、 b は、乾燥中の体

積の含水率依存性を測定することにより、容易に求められる。

さて相似形の試料表面積 S は、代表長さ L の 2 乗に比例し、体積は L の 3 乗に比例するから、試料表面積は体積 $2/3$ の乗に比例する。したがって、

$$S = S_0(aM_d + b)^{2/3} / (aM_{d0} + b)^{2/3} \quad (5)$$

となるので、式(5)を式(1)に代入することにより、みかけの減率乾燥速度が、含水率を関数とした恒率乾燥速度式から求められる。

$$\frac{dM_d}{d\theta} = -\alpha S_0(t-t') \frac{(aM_d + b)^{2/3}}{(aM_{d0} + b)^{2/3}} / W_d \quad (6)$$

このことはみかけの減率乾燥期間では、その乾燥速度曲線が、一般的減率乾燥で見られるような上に凹となる曲線とは異なり、上に凸、すなわち $2/3$ 次曲線を描くことが式(6)より推察される。

さて、式(6)を積分し、解析する便宜上、次式のように書き改める。

$$\frac{dM_d}{d\theta} = -\beta(aM_d + b)^{2/3} \quad (7)$$

ただし

$$\beta = -\alpha \frac{S_0(t-t')}{(aM_{d0} + b)^{2/3}} / W_d \quad (8)$$

この式(7)を初期条件 (I. C.)

$$M_d = M_{d0}(\theta=0)$$

について積分すると、含水率 M_d に関して次式が得られる。

$$M_d = \frac{1}{a} \left\{ [(aM_{d0} + b)^{1/3} + \frac{1}{3}\gamma\theta]^3 - b \right\} \quad (9)$$

ただし

$$\gamma = a\beta \quad (10)$$

つまり、初期含水率 M_{d0} とパラメータ a , b の値により、恒率乾燥期間での含水率の経時変化の予測が可能である。

また、式(6)を時間 θ に関して積分すると、次式が得られる。

$$\theta = -\frac{3}{\gamma} [(aM_{d0} + b)^{1/3} - (aM_d + b)^{1/3}] \quad (11)$$

式(11)の計算式は簡便であり、これより実際の乾燥施設での、高水分農産物の恒率乾燥期間での乾

燥時間 θ が、初期含水率 M_{d0} および目標含水率 M_d とパラメータ a , b の代入により決定できる。

III 測定方法

1. 供試材料

供試材料には市販されている大根(青首)を用いた。測定に供試したサンプルのサイズは、乾燥特性の測定では縦・横・厚さが(40-15-1.5mm)となるように、乾燥法の違いによる品質への影響での測定では(45-16-2mm)となるように統一した。ここでサンプルは全て縦方向が長軸方向となるようにした。

2. 通風乾燥による乾燥特性の測定

著者らはさきに供試材料にソバを用いて、この方法により測定し、その乾燥特性について報告した⁴⁾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。

測定は、風量15000 (1/h)のもと20, 30, 40, 50, 60°Cと5段階の温度で行った。表1に千切り大根の乾燥条件を示す。測定は、千切り大根を単層状態に広げて乾燥部に載せ、試料重量を一定時間毎に電子天秤によってすばやく秤量した。なお30分間の試料重量の変化が0.01g以下となった時点で乾燥終了とした。

また、式(4)で示した体積の含水率依存性を調べるため、乾燥中の試料体積の変化に関しても測定を行った。ここで試料体積は、乾燥空気にあてながら、ノギスを用いて測定した。

3. 乾燥ガスの違いによる品質への影響

測定装置を図1に示す。測定は、試料を電子天秤に釣り下げた受け皿に載せ、一定温度に保った窒素ガスを流量3500 (1/h)で流し、試料受け皿の重量変化と下部の金網に載せた試料の温度変化を5分毎に測定した。この重量測定の際には、一

表1 乾燥条件

Table 1 Drying conditions

風温 (°C)	絶対湿度 (kg/kg ⁰)	乾燥時間 (min)	初期含水率 (%, d. b.)	平衡含水率 (%, d. b.)	t-t' (°C)
20	0.0084	360	2026	28.3	5.4
30	0.0062	180	1756	24.0	13.4
40	0.0085	120	1878	17.1	18.5
50	0.0084	110	2101	17.5	26.1
60	0.0080	90	2029	19.6	33.4

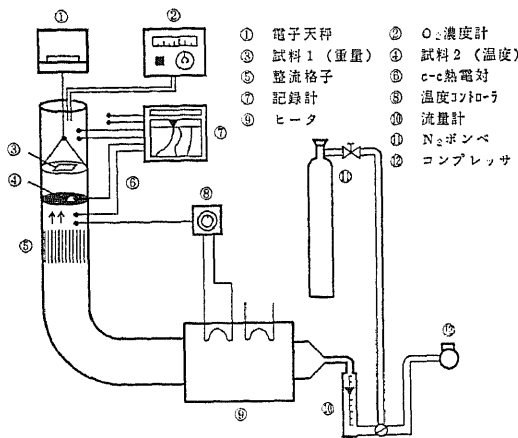


図1 測定装置の概略図

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

時的にガス流入を止めることにより、浮力による重量変化を防いだ。また、試料受け皿上部5cmでの乾湿球温度、酸素濃度、試料受け皿下部5cmでの乾球温度を測定し6打点記録計で記録した。さらに品質に関する影響を調べるため、乾燥前後の色彩の変化を色彩色差計(ミノルタ、CR-200)で測定し、乾燥前後の形状の変化についても測定した。

また、同様にして同装置で種々の風温における空気乾燥も行い、ガスの違いによる品質への影響について比較検討を行った。

4. 減圧乾燥と天日乾燥による品質への影響

図2に減圧乾燥装置を示す。減圧乾燥において高水分の大根では急激な減圧を行うと蒸発潜熱の影響を急激に受け試料は凍結してしまうので、今回は試料温度変化を確認しながら、実験開始直後

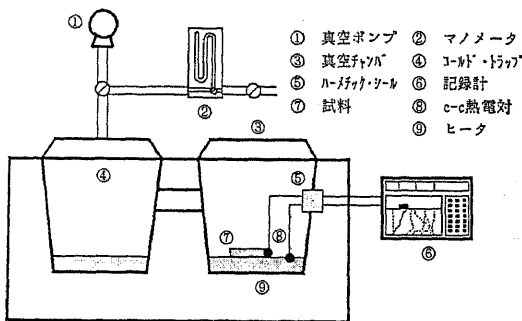


図2 減圧乾燥装置

Fig. 2 Experimental apparatus of vacuum drying

の減圧を緩やかに行い、以後チャンバ内圧力を5mmHgまで減圧し一定時間経過したのち乾燥を終了した。乾燥終了後は試料の重量を測定したのち、通風乾燥と同様に品質の変化に関しても測定を行った。

5. 絶乾方法

絶乾は測定終了後105°C-24h-0.008kg/kg'法で行った。

IV 測定結果および考察

1. 干切り大根の乾燥特性および恒率乾燥シミュレーション

図3に40°空気乾燥における試料体積の含水率依存性を示す。これを見ると、試料体積と含水率の関係は直線的に近似でき、その適合性も良好であることより、式(4)の理論式の妥当性が示された。

これより図3の測定値から最小乗法により式(4)における係数a, bを決定し、その値を式(7)に代入して得られた結果を図4に示す。図中○点は

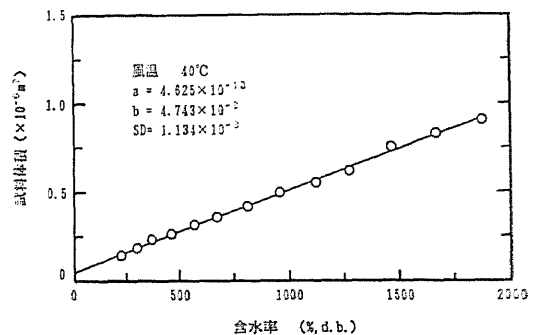


図3 試料体積の含水率依存性

Fig. 3 Moisture content dependency of material volume during drying

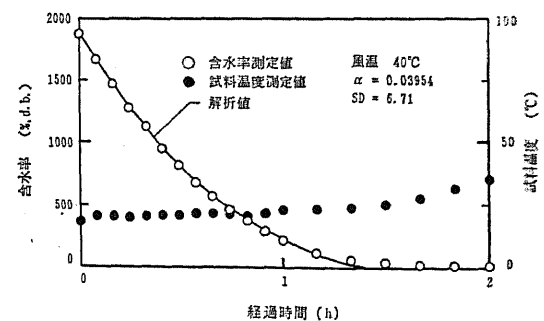


図4 式(7)によるシミュレーション

Fig. 4 Drying simulation by using eq. (7)

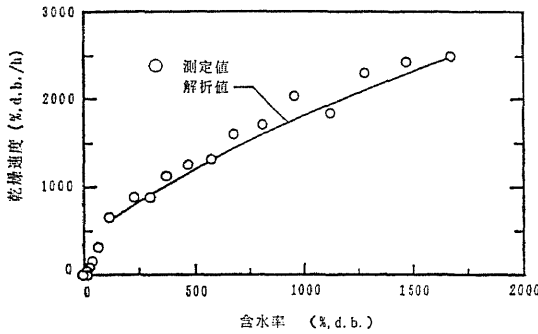


図5 乾燥速度の含水率依存性

Fig. 5 Moisture content dependency of drying rate

測定値であり、乾燥速度定数 α はこの測定データより最小自乗法により求めた値である。これを見ると測定値と解析値とは、ほぼ完全に一致していることが分かる。また図中では含水率が100%以下となると測定値は解析値より大きい値となるが、これは乾燥期間が恒率乾燥から減率乾燥へと移行したためと思われる。

また、図5に乾燥速度の含水率に対する依存性を示す。これを見ると、測定値(図中○点)が示す乾燥速度曲線は前述した通り、穀類などで見られる減率乾燥期間での乾燥速度曲線と大きく異なり、上に凸の形状を示している。図中実線は(6)式による計算結果であるが、解析解と測定値の一致は良好である。

ここでは40°Cの場合についてのみ言及したが、他の風温においても同様の結果が得られた。

表2、3に測定によって得られた乾燥特性パラメータ値を示す。これを見ると他の温度における空気乾燥の測定値と解析値とを比較しても、標準偏差は小さく、解析値と測定値との適合性は良好であることが分かる。

これら(6)、(10)、(11)式に示す計算式は非常に簡明

表2 式(4)のパラメータ値
Table 2 Values of parameters in eq.(4)

風温 (°C)	a (m ³ /%, d. b.)	b (m ³)	SD (m ³)
20	4.552×10 ⁻¹⁰	3.038×10 ⁻⁸	3.987×10 ⁻⁸
30	4.820×10 ⁻¹⁰	2.903×10 ⁻⁸	1.698×10 ⁻⁸
40	4.625×10 ⁻¹⁰	4.743×10 ⁻⁸	1.134×10 ⁻⁸
50	4.727×10 ⁻¹⁰	4.170×10 ⁻⁸	1.518×10 ⁻⁸
60	4.736×10 ⁻¹⁰	5.612×10 ⁻⁸	0.823×10 ⁻⁸

* 式(4)における a, b の最小自乗推定値から計算した V と実測値の標準偏差 (但し、ここでは恒率乾燥期間を 100%, d. b. 以上とする)

表3 式(7)のパラメータ値
Table 3 Values of parameters in eq.(7)

風温 (°C)	α (% d. b./°C/hr/m ²)	SD (% d. b.)
20	0.04218	31.07
30	0.03826	25.78
40	0.03954	6.71
50	0.04297	12.74
60	0.04200	18.83

* 式(7)における α の最小自乗推定値から計算した M_d と実測値の標準偏差 (但し、ここでは恒率乾燥期間を 100%, d. b. 以上とする)

であり、これからの野菜・果実などの高水分農産物の乾燥予測の際、非常に有益な基礎方程式となり得るものと考えられる。

2. 種々の乾燥法による千切り大根の品質への影響

表4に種々の乾燥法による品質への影響を示す。形状の変化を見てみると、全乾燥法において収縮・湾曲等がみられたが、減圧乾燥では収縮は小さく、湾曲についてもほとんどみられなかった。これらの測定において、仕上がり含水率をほぼ20%

表4 種々の乾燥法による品質の変化
Table 4 Effect of various drying methods on quality of sliced radish

乾燥法	乾燥後の形状 (mm)	色 差		乾燥時間 (min)	仕上含水率 (% d. b.)
		ΔL	Δa Δb		
空気乾燥(40°C)	25-10-1.2	13.8	0.1 9.2	180	20.5
(50°C)	20-11-1.6	12.0	0.3 8.2	180	17.2
(60°C)	20- 8-1.4	10.4	0.1 4.9	100	16.9
窒素乾燥(60°C)	22- 8-1.4	10.3	0.7 9.5	110	16.0
減圧乾燥	40-13-1.5	22.1	-0.2 1.5	120	20.8
天日乾燥	19- 6-1.5	12.6	0.9 10.4	(2day)	31.6

* 乾燥前の試料形状は、長さ45mm、幅16mm、厚さ2mm、重量1.4gを基準

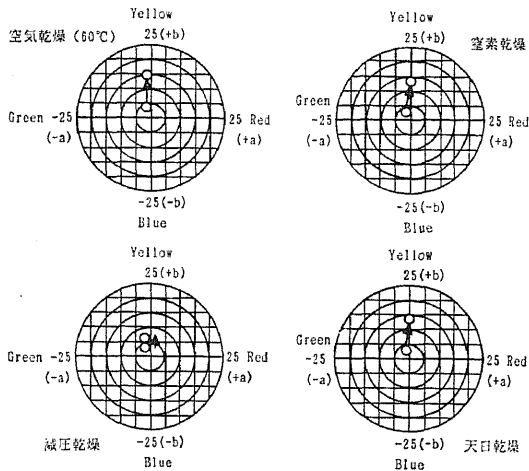


図6 乾燥法の違いによる色度変化への影響
Fig. 6 Effect of various drying methods on changes in surface color of sliced radish

前後と設定しているのは、含水率の相違による品質への影響を出来るだけ少なくするためである。さらに実際、市販されている千切り大根は水分が約22%となっているので、本測定で設定した仕上がり含水率は、商品実用上の面から、品質の影響を考察する上で、問題はないと考える。

また、図6に乾燥法の違いによる色度変化への影響を示す。これを見ると、全乾燥法において、乾燥後は千切り大根は白色から黄色方向(+b方向)に色彩が変化したのがわかる。また乾燥法の違いについては、空気乾燥と窒素乾燥とを比較すると、彩度の変化についてはそれほど差はみられなかったが、明度に関しては窒素乾燥のほうが良好(明度が低い)な結果を示した。

表4と図6の結果より、品質に関して一番良好な乾燥法は減圧乾燥であると思われる。これは減圧乾燥では短時間でしかも低温で乾燥ができることにより、乾燥に伴う酸化や呼吸等による品質への影響が低減された事によるものと考えられる。

V 結 論

本研究では供試材料に千切り大根を用い、恒率乾燥期間での乾燥特性を解明すべく、熱風乾燥させ、その乾燥特性を測定した。

また、千切り大根は品質が商品価値を大きく左右させることより、新乾燥法を見いだすため、窒素乾燥、減圧乾燥について測定を行い、その品質

変化について、通風乾燥と比較検討を行った。

これより、以下の知見が明らかとなった。

1) 本研究により、千切大根のみかけの減率乾燥の機構が単位表面積当りの恒率乾燥と乾燥に伴う表面積の縮小の組合せ機構であることを示し、乾燥方程式を導いた。

2) 空気乾燥による測定の結果、試料体積の含水率依存性が見いだされ、次式に示す理論式の妥当性が明らかとなった。

$$V = aM_d + b$$

3) 空気乾燥による測定値と、本研究で新たに導いた乾燥方程式の解析解の適合性は非常に良好であった。次式に示す方程式は、計算式が簡単であるため、高水分農産物の予備乾燥装置の設計や操作のための基礎方程式として、極めて簡便に利用できるものと思われる。

$$\frac{dM_d}{d\theta} = -\alpha S_0(t-t') \frac{(aM_d + b)^{2/3}}{(aM_{d0} + b)^{2/3}} / W_d$$

4) 種々の乾燥法により千切り大根を乾燥させた結果、減圧乾燥が形状の保持、色度の保持両方において秀でた結果を示した。

記号 (Nomenclature)

M_d : 乾量基準含水率 (Moisture content, %, d. b.)

M_{d0} : 初期含水率 (Initial moisture content, %, d. b.)

S : 試料の表面積 (Surface area of sample, m^2)

S_0 : 初期の試料の表面積 (Initial surface area of sample, m^2)

t : 乾燥空気の温度 (Temperature of dry air, $^{\circ}C$)

t' : 乾燥空気の湿球温度 (Wet-bulb temperature of dry air, $^{\circ}C$)

V : 試料の体積 (Volume of sample, m^3)

W_d : 試料の乾物質量 (Mass of dry matter, kg)

W_w : 試料水分の質量 (Mass of moisture in sample, kg)

α : 式(1)における乾燥係数 (Drying constant in eq. (1), %, d. b. $^{\circ}C^{-1}h^{-1}m^{-2}$)

θ : 時間 (Time, h)

ρ_d : 試料の乾物密度 (Density of dry matter,

kg/m³

ρ_w : 試料水分の密度 (Density of moisture in sample, kg/m³)

参 考 文 献

- 1) 林 節男：柿の乾燥速度特性，農機誌，51(6)，71—76，1989
- 2) 化学工学協会編：化学工学，積書店，165—166，1984
- 3) Kilpatrick, P.W. et al: Tunnel Dehydrators for Fruits and Vegetables, Advances in Food Rese-

arch, Vol. 6, 360, 1955

- 4) 村田 敏，河野俊夫，小出章二，田川彰男：ソバの乾燥特性の測定，農機誌，52(3)，61—67，1990
 - 5) 山口新吉，若林嘉一郎，細野八郎：米粒の含水率による容積変化特性，農機誌，39(2)，179—184，1977
 - 6) 山沢新吾，吉崎 繁，前川孝昭：農産物の乾燥に関する基礎的研究（第3報），農機誌，36(3)，417—425，1974
 - 7) 吉富 均：茶葉の乾燥特性（第4報），農機誌，50(2)，65—73，1988
- (原稿受理平成4年4月27日・質問期限平成5年9月30日)

コ メ ン ト

[読者のコメント]

一般に高含水率材料の恒率乾燥機構は材料表面が水膜でカバーされ，この水膜の蒸発で特徴づけられますが，千切大根の乾燥が恒率乾燥機構であることを裏づける何らかの実験的観察結果が得られたかご説明願います。

[コメントに対する著者の見解]

極めて高い水分で，殆ど水ばかりという初期含水率 1800~2000% d. b. (95% w. b.) の水分の産物の乾燥が，逆に恒率乾燥でないというのが常識外と考えられます。われわれは，常識外とは思いましたが，とにかく最初は，最小自乗法による，減率乾燥第一段，減率乾燥第二段の式の当てはめにあらゆる努力を払いました。しかし，全然適合

されることが出来なかったのです。

最終的に，やはり初心に戻って恒率乾燥と考えるべきであるとの結論に達したのです。これより，収縮に着目しました。体積については理論的にも，測定値からも，また，引用データからも，含水率の高いときには含水率の一次式で示されます。また，文中の証明からも明かなように，表面積は体積の2/3乗に比例します。これらは否定出来ない事実です。これと，単位表面積当りの蒸発量が一定であるという仮定のもとに導いた式の計算値は，図4に示すように，完全と言っていいほど実験値に一致しております。理論的に，この仮定が正しいという証拠と考えます。