

円柱状ジャガイモのマイクロ波加熱乾燥における 温度変化と乾燥速度に関する研究

姫 徳 衡・久保田 清
張 戈・羽倉 義雄

広島大学生物生産学部, 東広島市 724

1992年10月26日受付

要 旨 食品をマイクロ波乾燥する装置の設計を進めていくためには, 簡単な乾燥モデルに基づいた乾燥速度式を設定していくことが必要となる。前報(久保田ら, 1990, 呂ら, 1990-1, 1990-2, 久保田ら, 1992)において, 各種形状のジャガイモなどを例として, 常圧, 減圧下で簡単な乾燥モデルを使った簡便な乾燥速度式の設定に関する研究を行ってきた。

本研究では, 円板状ジャガイモを例として, マイクロ波加熱乾燥における温度変化を測定し, これまでの乾燥モデルの設定における仮定の妥当性を確かめ, 簡便な乾燥速度式の設定に関する考察を行った。

キーワード: 乾燥, 食品, マイクロ波

緒 言

食品をマイクロ波加熱乾燥する各種装置の最適設計, 操作計算を進めていくためには, 簡単な乾燥モデルに基づいた乾燥速度式を設定していくことが必要となる。前報(久保田ら, 1990, 呂ら, 1990-1, 1990-2, 久保田ら, 1992)において, 各種形状のジャガイモなどを例として, 常圧通風下, 無風下, 減圧下で簡単な乾燥モデルを使った簡便な乾燥速度式の設定に関する研究を行った。

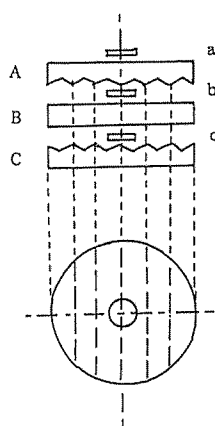
これまでの研究では, 試料の温度測定をする方法が困難であるとして乾燥モデル化を行っていて, 乾燥モデルの設定における試料温度が一定となる期間があるなどと仮定をして案じられてきていた。円柱状ジャガイモのマイクロ波加熱クッキングにおいて, 試料間にサーモラベルをはさんで温度測定する方法(久保田ら, 1988)を考案してきたが, この方法はマイクロ波加熱乾燥に対しては, 水蒸気が試料間を通過しにくいと考えられることで適用できないと考えられてきた。

本研究では, 円板状ジャガイモを例として, マイクロ波加熱乾燥における温度測定をする方法を考案して乾燥の進行に伴う試料の温度変化を測定することができた。これまでの乾燥モデルの設定における仮定の妥当性を確かめ, 簡単な乾燥速度式の設定についても併せて検討したので報告する。

実 験 方 法

試 料 市販のジャガイモ(北海道産メークイン)を用い, コルクボーラとカッターで直径 3.0 cm, 厚さ 0.5 cm の円板状にしたものを試料として供した。1枚の円板状ジャガイモを用いてサーモラベルを上下の表面に取りつけると放射による周辺温度の影響があると考えられるため, 円板状ジャガイモを3枚重ねて試料間にサーモラベルをはさんで温度測定する方法(久保田ら, 1988)を考案してきた。この方法は, マイクロ波加熱クッキングに対しては有用であるが, マイクロ波加熱乾燥に対しては水蒸気が試料間を通過しにくいということで適用できないと考えてきた。

本研究では, Fig. 1 に示すように重量変化を測定しない上下2枚の円板状ジャガイモ A と C の内側表



A, B, C: disc potato samples,
(diameter: 3.0 cm, thickness: 0.5 cm),
where, A, C: cutted inner surfaces,
B: weighed as main sample.
a, b, c: thermolabels, where average
value of a and b: used for main
sample B

Fig. 1 Samples used microwave heated drying.

て、試料の内部温度に近い温度測定を試みることを目的として、直径をサーモラベルより十分大きく 3 cm とし、厚さを薄く 0.5 cm とした。

絶乾重量は、115°C、24時間加熱をして測定した。

実験装置 市販の松下電器産業製NE-6330 型 (2450 MHz, 加熱出力 600, 240, 180 W, 回転皿つき) の電子レンジを使用した。前報において、試料の大きさに対して表面積が大きい試料でなかったためか、空気の送風なしおよび空気温度 40~60°C の送風 300/min ありの実験を行って、実験データのばらつき内で影響がみられないとか (久保田ら, 1990), 周辺圧力を 760~360 mmHg の範囲で変えた実験を行って、圧力差の影響が僅少である (久保田ら, 1992) などの結果が得られてきた。以上の結果を参考にして、本研究では通風なしで実験を行った。

試料は、前報 (久保田ら, 1990) で図示をしたテフロン糸を張った試料台 (アクリル円筒製, 直径 15 cm, 高さ 10 cm) の上に置いた。試料を回転皿の中心に置くくと局部的に強い不安定なマイクロ波の照射を受けることから、試料を中心部からずらして置いて回転するようにした。加熱出力は 180 W とした。加熱効率は脱イオン水 240 cc を三角フラスコに入れて求めた結果によると 0.788 であった。

温度変化の測定 Fig. 1 に示すように 3 枚のサーモラベル (日油技研工業製, 不可逆, 5°C 刻み) a, b, c を 3 個の円板状ジャガイモ A, B, C の上部表面に置いて温度変化の測定をした。マイクロ波加熱のクッキング実験 (久保田ら, 1988) では、3 個重ねの試料を乾燥させないようにサラララップで弱く包んだが、本研究は乾燥実験であるため、水蒸気が放出できるように解放の状態電子レンジに投入した。重量変化の測定の対象とする円板状ジャガイモ B の温度をサーモラベル b と c の平均値とした。試料の初期温度は 20°C とした。

重量変化の測定 マイクロ波加熱を所定時間行った後、試料を試料台毎に電子レンジから取り出し、直ちに天秤を用いて重量変化の測定を行った。試料の褐変変化を写真で撮影したため、同一試料を出し入れしながら所定時間の重量変化の測定を行えなく、各所定時間毎に新しい試料を供した。個体差の変動が大きく試料

面に水蒸気が移動できる三角形の切れ目をカッターでつける方法を考案した。乾燥の進行に伴う重量変化の測定の対象を上下 2 枚の円板状ジャガイモ A と C に挟まれた中央の円板状ジャガイモ B とした。

これまでに試料の大きさ, 形状, 投入量, 加熱出力, 空気温度, 湿度, 流速, 圧力などを変える実験を行って, これらの影響を調べる研究を行ってきた。その結果, 乾燥速度が加熱出力によって大きく影響され, 試料の大きさ, 形状, 含水率, 投入量によっても変わる結果が得られてきた (久保田ら, 1990, 呂ら, 1990-2)。また, 一辺 1 cm 以下の角柱状ならびに直径 1 cm 以下の円柱状試料においては, 長さを 1 cm 以下にすると褐変変化が起こらなく, 乾燥速度は長さ 1 cm のものが大きくてよいという結果, ならびに, 一辺 2 cm 以上の場合には厚さ 0.2 cm 程度にしないと褐変変化を少なくできないが, 厚さ 0.5 cm の場合でも切り刻みを入れると褐変変化が起こらないという結果が得られてきた (呂ら, 1990-2)。以上の結果を参考にして

の重量と乾燥時間の関係で図示すると大きくばらついたため、絶乾重量を用いて後述する式 (1) で乾燥率を求め、乾燥率と乾燥時間の関係で実験データを示すことにした。

乾燥率と乾燥速度式

乾燥率 試料の重量変化の測定から乾燥率を次式により表す。

$$x = (w_0 - w) / (w_0 - w_D) \tag{1}$$

ここで、 w_0 [g], w_D [g] は、試料の初期重量および絶乾重量、また、 w [g] および x [-] は時間 θ [min] における試料の重量および乾燥率である。

乾燥速度式 マイクロ波加熱のクッキング (久保田ら, 1988), 乾燥 (久保田ら, 1990, 1992) において使用してきた次に示す汎用的な経験的速度式 (Kubota et al., 1979) の適用を試みる。

$$dx/d\theta = k(1-x)^n \tag{2}$$

$$dx/d\theta = h(1-x)^m(x+\alpha) \tag{3}$$

ここで、 k, h, n, m および α が実験データから求めることになるパラメータである。乾燥率 x [-] と乾燥時間 θ [min] との関係が単調なべき乗型曲線に対しては式 (2) が、また、S 字型曲線に対しては式 (3) が利用できる。

実験結果と考察

試料の温度変化 試料の温度変化を Fig. 1 で示す方法を採用して測定した結果を Fig. 2 に示す。試料の上部のサーモラベル a は、放射の影響で温度が低いが、試料の中間部にはさんだサーモラベル b と c は近い値を示した。

試料の中間部の温度が乾燥時間 2 分前あたりから 100°C を数度越えた定常状態になっているということは、試料内部で大気圧以上になり 100°C 以上の水蒸気を発生して試料の中間部に噴き出しているのではないかと考えられる。また、Fig. 1 において温度が定常値から大きくなり始める乾燥時間が 10 分あたりから局所的な褐変が発生した。これは、試料の水分含量が少なくなり、熱伝導度が低下し局所的に温度が

110~120°C になっていくことによるためと考えられる。

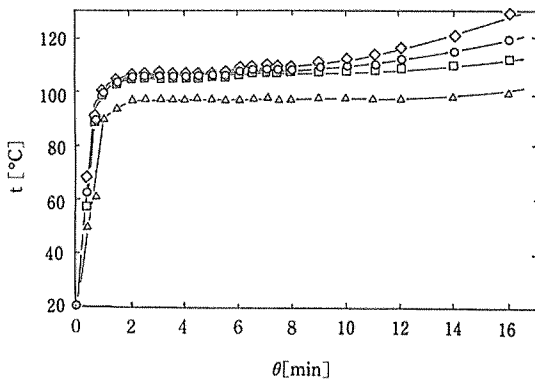


Fig.2 Relations among the temperature t [°C] and the drying time θ [min].

Sample: discus potato (diameter: 3.0 cm, thickness: 0.5 cm),

Microwave output power: 180 W for three samples A, B, C,

Key for the labels a, b, c and (b+c) /2: Δ \square \diamond \circ

Lines for the experimental values: —

乾燥速度式の設定 試料の重量変化を測定し、式 (1) を用いて得られた乾燥率変化を求めた結果を Fig. 3 に示す。試料が初期温度から定常の温度になるまで乾燥速度が小さくなるため S 字型曲線になっている。上部の試料 A の乾燥速度が小さいのは、Fig. 2 からわかるように試料の上部表面温度が放射の影響で低くなっているためと考えられる。中間部の試料 B が外気との接触部分が上下部の試料 A と C と比較して小さいのに乾燥速度が大きいのは、試料の温度が上下部の試料よりも高くなっているためと考えられる。また、下部の試料 C の乾燥速度が上部の試料 A と比較して大きくなっているのは、試料の下部の下面の方が上部の上面よりも水蒸気が表面にこもりやすく外部表面温度が大きくなっているためと考えられる。乾燥速度が水蒸気を充満させて表面にこもらせ

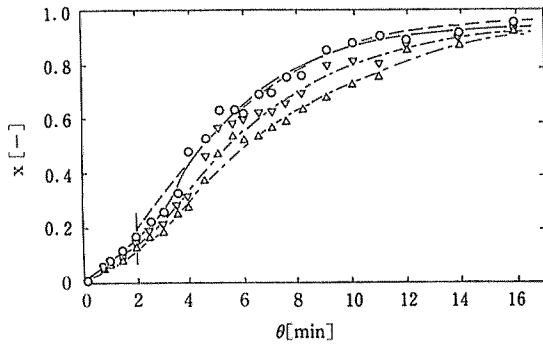


Fig. 3 Relations among the drying-ratio x [-] and the drying time θ [min].

Sample and Microwave output power: same to Fig. 1.,

Key for the experimental values of samples A, B, C: \triangle \circ ∇

Lines for the experimental values of samples A, C: — — —

Lines for the calculated values of sample B: where, for Eq.(2), $\theta > 2$ min: - - - - -
for Eq.(3), $\theta > 0$ min: ———

でもほとんど変化しない結果が得られた(久保田ら, 1990-2)が, これと類似した結果になっていると考えられる。

乾燥初期からの実験データ x と θ の関係に対して, 乾燥速度式として式 (3) を適用してパラメータを求めた。中間部の試料 B に対する計算結果を Table 1 に示す。曲線の形状を示すパラメータ m と α を簡単な値に設定して計算した結果も合わせて示した。

本研究では, 試料の厚さを一定にしているが, 既往の研究(久保田ら, 1990-2)によると, 試料の厚さが大きくなると, 初期の温度上昇に時間がかかるため, S 字型の形状が著しくなることがわかっている。また, 水蒸気を充満させて試料の温度上昇を速くするか減圧にして定常になる温度を低下させる場合には S 字型の形状を小さくすることができることもわかっている(久保田ら, 1990-2)。S 字型の形状を小さくするには, 初期温度を高くするとよい。

また, 既往の研究(呂ら, 1990-1, 1990-2)

Table 1 Calculated values of the parameter h [min^{-1}], m [-] and α [-] of Eq. (3) for sample B ($\theta > 0$ min)

Sample: discus potato (diameter: 3.0 cm, thickness: 0.5 cm),
Microwave output power: 180 W for three samples

Calculation Run	h [min^{-1}]	m [-]	α [-]	σ [-]
1st	0.712	1.64	0.0641	0.0330
2nd	0.599	(1.50)	0.0899	0.0335
3rd	0.576	(1.50)	(0.010)	0.0337
4th	0.268	(1.00)	0.320	0.0414
5th	0.204	(1.00)	(0.50)	0.0346

where, σ [-]: standard deviation, values of (): given constant

で, 乾燥速度式を, 速度上昇期間, 恒率乾燥期間, 減率乾燥期間に分けて示す方法についても述べてきた。試料の大きさ, 形状, 含水率, 投入量, 加熱出力から加熱効率が推算できるようになれば, 試料の温度が定常になるまでの時間が推算でき, 式 (3) の α の値とか, 速度上昇期間の推算ができるようになるものと考えられる。

乾燥時間 2 分以上で試料の温度がほぼ定常になっていると取り扱えるので, この期間の実験データ x と θ の関係に対して, 乾燥速度式として式 (2) を適用しパラメータを求めた。中間部の試料 B に対する結果を Table 2 に示す。既往の結果と比較がしやすいように曲線の形状を示すパラメータ n を簡単な値に設定した結果も合わせて示す。

本研究では, 試料の厚さを一定にしているが, 既往の研究(久保田ら, 1990-2)によると, 試料の厚さが大きくなると, n の値が小さくなることがわかっている。試料の厚さが大きくなると乾燥初期に水分移動が

Table 2 Calculated values of the parameter k [min^{-1}] and n [-] of Eq. (2) for sample B ($\theta > 2$ min)

Sample and Microwave output power: same to Table 1

Calculation Run	k [min^{-1}]	n [-]	σ [-]
1st	0.211	0.921	0.0470
2nd	0.168	(0.5)	0.0610
3rd	0.221	(1.0)	0.0475
4th	0.289	(1.5)	0.0659

その間にサーモラベルを入れることによって測定した。中間部の試料の温度変化と重量変化の測定をした。中間部の試料からの水蒸気が抵抗なく出るように上下部の試料の内部側表面に三角形の切れ目を入れる考案をした。試料温度が一定する期間に対してべき数型速度式を適用して簡便な乾燥速度式の設定を行った。

謝辞 本研究は、平成4年11月5日の名古屋市（名古屋大学）における第19回食品の物性に関するシンポジウムにおいて報告したものである。本研究の一部は、文部省科学研究補助金の総合研究(A)：代表者土井悦四郎の援助（1991年、1992年）をうけたものである。付記させて頂いて謝意を表す。

使用記号

h : 式(3) のパラメータ	k : 式(2) のパラメータ	m : 式(3) のパラメータ
n : 式(2) のパラメータ	w : 試料の重量 [g]	x : 試料の乾燥率 [-]
α : 式(3) のパラメータ	θ : 乾燥時間 [min]	添字 o, D : 初期値, 絶対値

引用文献

- KUBOTA, K., 1979, Determination of the Empirical Rate Equation for the Chemical and Physical Transformations of Foods. *J. Fac. Appl. Biol. Sci., Hiroshima Univ.*, 18: 11-30.
- 久保田清・黒川真行・鈴木寛一・江坂宗春, 1988, 円柱状ジャガイモのマイクロ波加熱におけるクッキング速度式の設定に関する研究。日食工誌, 35: 78-82.
- 久保田清・呂 聯通・山下洋右・岡崎 尚・望月博範・鈴木寛一・江坂宗春, 1990, マイクロ波加熱乾燥装置の試作とジャガイモ乾燥に関する研究。広島大学生物生産学部紀要, 29: 51-62.
- 呂 聯通・久保田清・鈴木寛一・岡崎尚・山下洋右, 1990-1, 食品のマイクロ波加熱乾燥速度式に関する研究。広島大学生物生産学部紀要, 29: 145-157.
- 呂 聯通・久保田清・鈴木寛一, 1990-2, ジャガイモのマイクロ波加熱乾燥における試料形状と褐変化に関する研究。広島大学生物生産学部紀要, 29: 159-164.
- 久保田清・大前千佳・姫 徳衛・羽倉義雄, 1992, ジャガイモのマイクロ波減圧乾燥特性とモデル化に関する研究。広島大学生物生産学部紀要, 31: 37-43.

困難になり乾燥速度が小さくなり、また、乾燥後期では試料内に熱がこもりやすくなり乾燥速度が大きくなって n の値が小さくなると考えられる。試料の大きさ、形状、含水量、投入量、加熱出力から加熱効率が推算でき、試料内部の温度分布が推算できるようになれば、式(2)の n の値なども推算できるようになるものと考えられる。

結 言

円板状ジャガイモのマイクロ波加熱乾燥における温度変化と乾燥速度式に関する研究をおこなった。試料の温度変化を、円板状試料を3枚重ねて、

Studies among the Temperature and Drying-rate on Microwave Heated Drying of Discus Potato

De Hang Ji, Kiyoshi KUBOTA,
Ge ZHANG and Yoshio HAGURA

*Faculty of Applied Biological Science, Hiroshima University
Higashi-Hiroshima 724 Japan*

In order to design various microwave heated drying apparatuses, we must take drying-rate equations which are based on simple drying models. In previous papers (KUBOTA et al., 1990, LU *et al.*, 1990-1, 1990-2, KUBOTA *et al.*, 1992), we have studied the simple drying models and the simple drying-rate equations by using the some shapes of potato and so on for air flow type, no flow type and vacuum type drying.

However, we could not measure the sample temperature for microwave heated drying by using the previous method which used for microwave heated cooking, because the steam transfer through the intervale of disucous samples was difficult.

In this paper, we studied the measureing method of the sample temperature for microwave heated drying, and studied the relations among the temperature and the drying-rate on microwave heated drying of discus potato.

Key words: drying, food, microwave