

## 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

久保田 清・大前 千佳・姫 徳 衡・羽倉 義雄

広島大学生物生産学部, 東広島市724

1992年4月7日受付

**要 旨** 各種のマイクロ波加熱装置の設計, 操作計算を行っていくためには, クッキング, 乾燥などの速度の測定を行って, 速度式の設定を行っていくことが必要となる。前報(久保田ら, 1988; 久保田ら, 1990; 呂ら, 1990)では, ジャガイモなどのマイクロ波加熱によるクッキングならびに乾燥速度式の設定に関する研究を行ってきた。

食品の加熱における温度上昇に伴う褐変化とかフレーバー変化は商品価値を低下させる。減圧操作をすると温度上昇を抑制することができると考えられる。本報告では, ジャガイモのマイクロ波減圧乾燥特性の測定とモデル化に関する研究を行った。簡便な経験的速度式を使つての総括的な乾燥速度式ならびに見掛け密度ならびに体積と乾燥率に関する関係式を得ることができた。

キーワード: 乾燥, 食品, マイクロ波

### 緒 言

食品のマイクロ波加熱処理する各種装置の最適化設計, 操作計算を進めていくためには, クッキング, 乾燥などの加熱処理速度の測定と, 加工処理速度式の設定に関する研究を進めていくことが必要となる。

食品は, 乾燥を行った場合, 水分量の変化以外に, 表面硬化, 膨化が起こるなどとして, 複雑な形状変化, 表面積変化をするため, 実験データの取り扱いが複雑となり, そのため速度論的研究いわゆる化学工学的見地にたつての研究が僅少である。また, マイクロ波加熱は装置を加熱しないで食品だけを内部から加熱して迅速加熱ができ, 制御が容易であるなどの特徴がありながら, 速度論的研究が少ないのは, 試料温度が急上昇をし, 試料内部に過熱むらを生じ, 温度分布測定が困難であるなどのためと考えられる。筆者らによるクッキング (KUBOTA *et al.*, 1986; 久保田ら, 1988), 乾燥 (久保田ら, 1990; 呂ら, 1990) に関する研究を除くと皆無といつても過言ではない。

食品では, 製品の価値と合わせて品質が重要となり, 食品の乾燥のために各種の減圧乾燥機が工業的に利用されてきている。マイクロ波加熱乾燥においても減圧乾燥装置が利用され始めてきている。本研究では, ジャガイモを試料として, マイクロ波加熱による減圧乾燥を行つて乾燥特性を調べる研究を行った。乾燥の進行に伴つて体積ならびに密度の変化が段階的に起こる興味深い結果が得られ, モデル化に関する研究をおこなつた。簡便な経験的速度式を使つての総括的な乾燥速度式ならびに見掛け密度, 体積と乾燥率に関する関係式を得ることができた。

### 実 験 方 法

**試 料** 市販のジャガイモを用い, コルクボーラとカッターで直径1.0 cm, 長さ1.0 cm の円柱状にしたものを試料として供した。投入量を6個として行つた。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。実験装置を Fig. 1 に示す。電子レンジ側壁板に直径13 mm の小穴をあけて, ガラス管 (外径10 mm, 内径8 mm) を通せるようにした。回転皿を取り出して, 試料を入れる耐熱減圧用容器を入れた。電子レンジ炊飯器と市販されているハリオ製ライスクッカー XRC-1 型のプラスチック製の蓋を

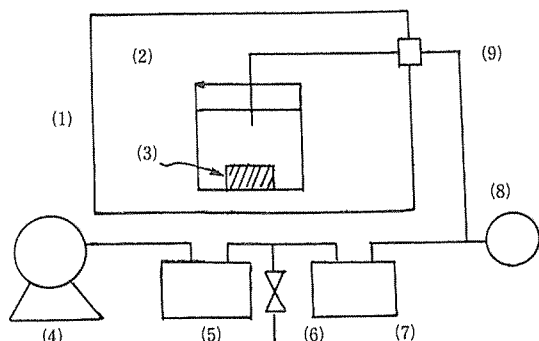


Fig. 1 Schematic diagram of simple convenient microwave heating vacuum drying instrument

- (1) microwave oven, (2) sample vessel, (3) sample, (4) vacuum pump, (5) dryer bottle, (6) pressure control valve, (7) buffer bottle, (8) pressure gauge, (9) glass tube and seal with aluminum tape

シリコンゴム栓の蓋に取り替えて使用した。シリコンゴム栓の蓋にガラス管を取りつけ、電子レンジの外の減圧用ポンプと連結して減圧できるようにした。ポンプはイワキ製 AP-450A 型 (270 W, 最大50 l/min) を使用した。圧力は、圧力調節バルブを使って調節をしブルドン管式圧力計により測定した。ガラス管と壁板の接合部分には、アルミ箔テープ (米国スリーニム製 Scotch アルミテープ NA-50 型) をしっかりと重ねて幅広く貼りつけた。電子レンジの改造に伴って電磁波漏れが起こっていない確認は、HOLADAY 製の電波漏れ量測定器 HI-1501 型により行った。

重量変化の測定 試料は耐熱減圧用容器の底に濾紙を2枚入れ、その上に6個を並べて置いて乾燥に供した。マイクロ波加熱を所定時間行った後、試料を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。

密度変化の測定 試料の密度は、広口比重ビンを用いて測定した。見掛け密度は、試料表面にワ

セリンを薄く塗って測定した。除気密度は、試料を破碎して気体を除いて測定した。除気の種類は、金板で叩きつぶす程度で行った。ミクロのところまでの除気には至っていない測定として行っている。

### 乾燥率と乾燥速度式

乾燥率の設定 試料の重量変化の測定から乾燥率を次式により表わす。

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

ここで、 $w_0$ [g],  $w_D$ [g] は、試料の初期重量および絶対乾燥重量、また、 $w$ [g] および  $x$ [-] は、時間  $\theta$  [min] における試料の重量および乾燥率である。

乾燥速度式 マイクロ波加熱による乾燥は、試料温度が変化する処理操作となり、温度の経時的変化が速く、測定困難であるなどのため、詳細な速度論的解析が困難である。ここでは簡単な総括的な速度式の設定による比較を目的として、マイクロ波加熱のクッキング速度式としても使用 (久保田ほか, 1988) してきた次に示す汎用的な経験的速度式 (久保田ほか, 1979) の適用を試みる。

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

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

ここで、 $k$ ,  $h$ ,  $n$ ,  $m$  および  $\alpha$  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  $\theta$  [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。

### 密度および体積変化式

密度、体積変化モデル 試料が固相、水相および気相よりなると仮定すると次式により表わされる。見掛け体積は、水相が蒸発して減少し、気相が生成して増加して変化をするとしている。

$$w = w_S + w_H + w_A = w_S + w_H = w_D + w_H \quad (4)$$

$$v = v_S + v_H + v_A \quad (5)$$

$$\rho = w/v, \quad \rho_S = w_S/v_S = w_D/v_S, \quad \rho_H = w_H/v_H, \quad \rho_A = w_A/v_A \quad (6) \sim (9)$$

ここで、 $w$ [g],  $v$ [cm<sup>3</sup>],  $\rho$ [g/cm<sup>3</sup>] は、試料の重量、体積、密度である。添字 S, H, A は、固相、水相および液相を示す。添字がない場合が、いわゆる見掛けの重量、体積、密度である。

密度、体積変化式 式 (4) ~ 式 (9) によるモデルを仮定すると、見掛け密度と体積は、試料の重量を独

立変数として次式のように表わされる。

$$\rho = \rho_S \cdot \rho_H \cdot w / [(\rho_H - \rho_S)w_D + \rho_S \cdot w + \rho_S \cdot \rho_H \cdot v_A] \quad (10)$$

$$v = [(\rho_H - \rho_S)w_D / (\rho_S \cdot \rho_H)] + w / \rho_H + v_A \quad (11)$$

また、式(10)および式(11)は、式(1)を使って試料の乾燥率を独立変数として表わすと次式となる。

$$\rho = [\rho_S \cdot \rho_H \cdot w_D - \rho_S \cdot \rho_H (w_0 - w_D)x] / [(\rho_H - \rho_S)w_D + \rho_S \cdot w_0 - \rho_S (w_0 - w_D)x + \rho_S \cdot \rho_H \cdot v_A] \quad (12)$$

$$v = [(\rho_H - \rho_S)w_D / (\rho_S \cdot \rho_H) + w_0 / \rho_H] - [(w_0 - w_D) / \rho_H]x + v_A \quad (13)$$

これまでに熱風乾燥における総括的な速度式の設定において、表面積変化式を乾燥率を独立変数として表わすモデルの検討(久保田ら, 1981; 松本ら, 1982)を行ってきた。そこで表面積を初期表面積を基準として無次元化表示したが、ここでも同様に密度および体積を初期値を基準として無次元化表示するのが良いと考えられる。気相の体積を表わす場合に気相の初期体積が僅少で基準とし難いと考えられることから、ここでは、無次元化表示をしないで試料の1個当たりの見掛け体積として表わすことにしている。

実験結果と考察

**乾燥速度式の設定** 直径1 cm, 長さ1 cm, の円柱状のジャガイモ(約0.86 g)を耐熱減圧用容器に6個を入れて加熱出力180 Wとして、乾燥圧力を760, 460, 410, 360 mmHgと変える実験を行った結果を Fig. 2 に示す。常圧よりも減圧にした方が乾燥速度が僅かに大きくなっている。べき乗型曲線になっていることから、乾燥速度式として式(2)を適用してパラメータを非線形最小二乗法により求めた。Table 1 に結果を示す。 $n$ の値が1.3から1.9になったことから、 $k$ の値を比較するため $n=1.5$ と2.0と仮定して計算を行った。Table 1 にこの場合の結果も合わせて示す。 $n=1.5$ と仮定した $k$ の値の比較から、乾燥圧力を常圧760 mmHg から減圧460~360 mmHg に300~400 mmHg 低下させて乾燥速度が30%位大

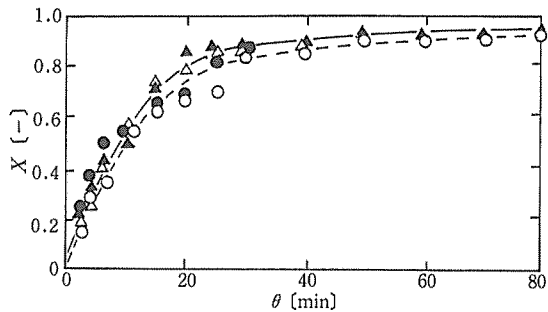


Fig. 2 Relations among the drying-ratio  $x[-]$  and the time  $\theta[\text{min}]$ .

Sample: cylindrical potato (diameter:1cm, length:1cm, weight:0.86g), Number of sample: 6 samples, Pressure: 760, 460, 410, 360 mmHg [○▲△●]

Table 1 Calculated values of the parameter  $k[\text{min}^{-1}]$  and  $n[-]$

Sample: cylindrical potato (diameter:1.0 cm, length:1.0 cm)  
6 samples, Microwave output power:180 W

pressure[mmHg]	$k[\text{min}^{-1}]$	$n[-]$	$\sigma[-]$
760	0.0928	1.679	0.0261
460	0.1069	1.446	0.0381
410	0.0960	1.392	0.0343
360	0.1406	1.892	0.0338

where,  $\sigma[-]$ : standard deviation

assume:  $n=1.5$

assume:  $n=2.0$

pressure[mmHg]	$k[\text{min}^{-1}]$	$\sigma[-]$	$k[\text{min}^{-1}]$	$\sigma[-]$
760	0.0833	0.0296	0.1125	0.0345
460	0.1105	0.0383	0.1517	0.0548
410	0.1022	0.0354	0.1382	0.0567
360	0.1090	0.0442	0.1511	0.0345

きくなっていることがわかる。減圧460~360 mmHg において変えた差圧が100 mmHg と狭かったためこの間の差圧の違いの影響がみられなく、影響があったとしても実験データのばらつき以内であるということがわかる。

蒸発した水蒸気の一部が容器周辺に水滴になって付着したことから、加熱出力を小さくするとか、容器を大きくするとか、減圧配管の管径と減圧用ポンプの能力を大きくすると、減圧差が僅かでも少し影響がみられることになるのではないかと考えられる。これまでの研究(姫ら, 1992など)によると、マイクロ波加熱による加熱効率は含水量と関係づけて表わされるが、体積が分割されていくと小さくなる結果を得ていて、水滴となり分散している水は加熱されにくい状態になっていて問題ないと考えられる。

**密度, 体積変化式の設定** 見掛け密度の測定を行った結果を乾燥率と関係づけて Fig. 3 に示す。見掛け密度が、乾燥率が0.6位まで一定となり、0.6以上になると直線的に減少するという興味深い結果が得られている。2本の直線を実験式として示すと次式のようになる。

$$\text{見掛け密度安定期間: } x=0\sim 0.6 \quad \rho=1.096 \text{ g/cm}^3 \quad (14)$$

$$\text{見掛け密度減少期間: } x=0.6\sim 1 \quad \rho=2.468-2.244x \text{ [g/cm}^3] \quad (15)$$

また、見掛け体積を求めた結果を乾燥率と関係づけて Fig. 4 に示す。見掛け体積が、乾燥率が0.6位まで直線的に減少し、0.6以上になると一定するという結果になっている。2本の直線を実験式として示すと次式のようになる。

$$\text{見掛け体積減少期間: } x=0\sim 0.6 \quad v=0.783-0.698x \text{ [cm}^3] \quad (16)$$

$$\text{見掛け体積一定期間: } x=0.6\sim 1 \quad v=0.394 \text{ cm}^3 \quad (17)$$

以上から、乾燥率が0.6以上になると表面収縮が止まり、試料内部の水分の蒸発に伴って多孔質化していると考えられる。

通風乾燥において、試料の表面積が乾燥率に対して直線的に変化して(久保田ら, 1981; 松本ら, 1982), 表面収縮が連続的であった結果と比較すると Fig. 4 の結果は特異的な乾燥特性を示していて興味深い結果である。通風乾燥では、水蒸気移動が拡散的に起こって、表面が少しずつ乾燥して、少しずつ収縮して、少しずつ気相が生成していると考えられたのに対して、この度のマイクロ波加熱の乾燥では収縮の現象がこれとは異なっていると考えられる。マイクロ波加熱の乾燥では、水蒸気移動が拡散的でなく、水蒸気が内部に発生して全圧差を生じて吹き出して起こっていて、乾燥率が0.6位までは表面が十分に湿っていて収縮をしやすく気相も生成しないできて、0.6以上になると吹き出す水蒸気量が減少して表面硬化して収縮が止まり気相が生成しはじめるのではないかと考えられる。イカの熱風乾燥を温度70℃, 湿度15%で行って密度, 体積変化式を求めている報告(RAHMAN *et al.*, 1990)があるが、これによると体積変化は乾燥率に対して2本の直線にならなく曲線になっている。また、即席めんの具の膨化乾燥卵は、含水量を少なくした試料に内部温度が100℃以上になるようなマイクロ波加熱を行って製造(荒木, 1987)されているが、この場合は、乾燥初期に大きな密度, 体積変化をし気相の生成が起こっている。以上から、乾燥特性は、試料の種類, 含水量とか、加熱方法, 加熱出力などの違いによって変わってくるものと考えられる。

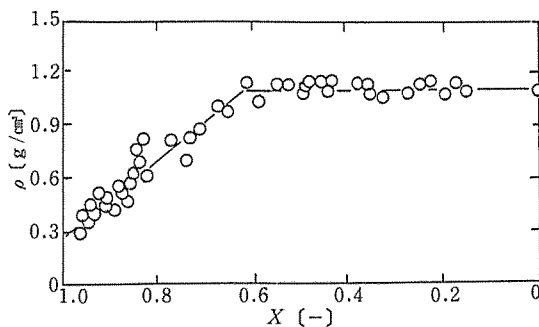


Fig. 3 Relations among the appearance density  $\rho$ [g/cm<sup>3</sup>] and the drying-ratio  $x$ [-].

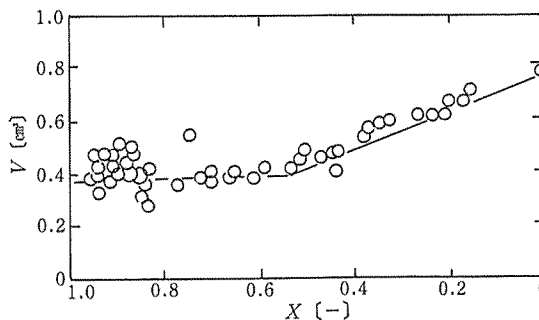


Fig. 4 Relations among the appearance volume  $v$ [cm<sup>3</sup>] and the drying-ratio  $x$ [-].

密度、体積変化モデルを仮定して求めた式(12)と式(14)との比較の結果、乾燥率が0.6以下では、気相の生成がなく、式(12)の分母の第4項が無視でき、分子と分母とが乾燥率の1次式となり、その傾向が相似して、密度が一定になっていると考えられる。また、式(12)と式(15)との比較の結果、乾燥率が0.6以上では、気相の生成が起こり、式(12)の分母の第4項が無視できなくなり、分母の第3項と第4項とが相殺されて分母が一定となり、分子の傾向に相似して、密度が乾燥率の1次式になっていると考えられる。また、同様に考えて、式(13)と式(16)の比較の結果、乾燥率0.6以下では、式(13)の第3項が無視でき、体積が乾燥率の1次式になっていると考えられ、式(13)と式(17)との比較の結果、乾燥率0.6以上では、式(13)の第2項と第3項とが相殺されて、体積が一定になっていると考えられる。

気相体積変化式 固相成分の密度の測定を行った結果を乾燥率と関係づけて Fig. 5 に示す。除気密度の測定を水中で行ったので水相が相殺されるため、固相成分の密度と合致することになった。乾燥率が大きいところで測定値の一部がばらついてはいるが、これは試料が少なくなるなどして測定が困難になったことによる。ほぼ一定になるといえることがわかる。試料の重量と除気密度から求めた除気体積を乾燥率と関係づけて Fig. 6 に示す。除気体積は、見掛け体積から気相の体積を除いた固相と水相の体積となる。次式のようになる。

$$v_s + v_H = 0.810 - 0.777x \quad [\text{cm}^3] \quad (18)$$

以上の結果から、気相の体積変化式を求めると次式のようになる。Fig. 7 に示すような結果になる。

見掛け密度安定期間： $x=0\sim 0.6$

$$v_A = -0.027 + 0.079x \approx 0.05 \text{ cm}^3 \quad (19)$$

見掛け密度減少期間： $x=0.6\sim 1$

$$v_A = -0.446 + 0.777x \quad [\text{cm}^3] \quad (20)$$

Fig. 7 において、乾燥率がゼロのところで気相の体積が僅かに負になっているが、これは測定誤差の影響によるためである。

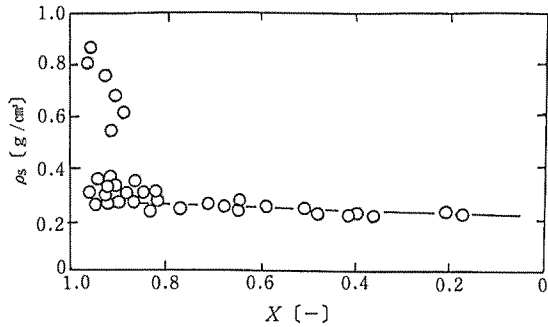


Fig. 5 Relations among the solid component density  $\rho$ [g/cm<sup>3</sup>] and the drying-ratio  $x$ [-].

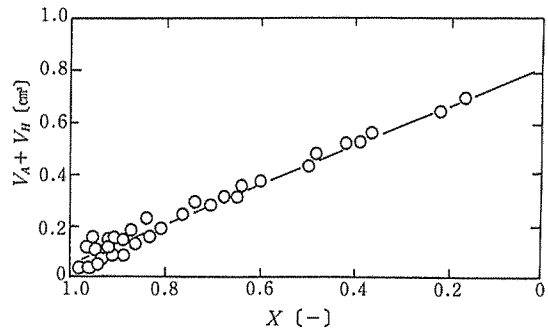


Fig. 6 Relations among the solid and water component volume  $v_s + v_H$  [cm<sup>3</sup>] and the drying-ratio  $x$ [-].

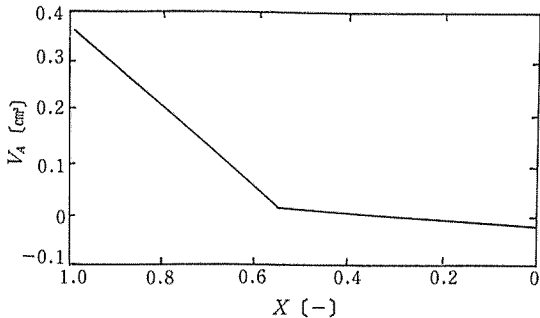


Fig. 7 Relations among the gas component volume  $v_A$ [cm<sup>3</sup>] and the drying-ratio  $x$ [-].

## 結 言

ジャガイモのマイクロ波減圧乾燥における乾燥特性の研究を行った。簡便な経験的速度式を使って総括的な乾燥速度式を表わし、速度パラメータの比較をした。減圧によって乾燥速度が大きくなる結果が得られた。密度、体積変化モデルを仮定して密度、体積変化式を求め実験結果と比較検討を行った。見掛け密度一定期間と見掛け密度減少期間に大別して実験結果が表わされた。得られた密度、体積変化式は、試料の種類、含水量とか、加熱方法、加熱出力などが違って乾燥特性が異なってきた場合にも有用になる結果であると考え

られる。

謝辞 本研究は、平成4年4月4日の堺市（大阪府立大学）における化学工学第57年会上において報告したものである。本研究の一部は、文部省科学研究費補助金の総合研究（A）：代表者：土井悦四郎（1991年）、また一部は、東和食品研究振興会の援助（1991年）を受けたものである。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	$w$ : 試料の重量 [g]
$k$ : 式(2)のパラメータ	$x$ : 試料の乾燥率 [-]
$m$ : 式(3)のパラメータ	$\alpha$ : 式(3)のパラメータ
$n$ : 式(2)のパラメータ	$\theta$ : 乾燥時間 [min]
$v$ : 試料の体積 [cm <sup>3</sup> ]	$\rho$ : 試料の密度 [g/cm <sup>3</sup> ]

添字 : o, D : 初期値, 絶乾値 ; S, H, A : 固相, 水相, 気相

### 引用文献

- 荒木英之, 1987, マイクロ波の束縛加熱利用. 食品機械装置, 24 (1) : 45-56.
- 姫 徳 衡・久保田清・羽倉義雄, 1992, 食品のマイクロ波加熱乾燥における過加熱防止に関する研究. 広島大学生物生産学部紀要, 投稿中.
- 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・松本俊也・鈴木寛一・保坂秀明, 1981, 各種形状のジャガイモの総括的乾燥速度式. 日食工誌, 28 : 491-495.
- KUBOTA, K., ARAKI, H., SUZUKI, K. and ESAKA, M., 1986, Studies on the Cooking-rate Equations by Microwave Heated Cooking of Potato Slices. *J. Fac. Appl. Biol. Sci., Hiroshima Univ.*, 25:1-9.
- 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.
- 松本俊也・久保田清・鈴木寛一・保坂秀明, 1982, 根菜類食品の乾燥収縮式と燥速度式. 日食工誌, 29 : 238-244.
- RAHMAN, Md. and POTLURI, P. L., 1990, Shrinkage and Density of Squid Flesh during Air Drying. *J. Food Eng.*, 12:133-143.
- 呂 聯通・久保田清・鈴木寛一・岡崎 尚・山下洋右, 1990, 食品のマイクロ波過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.

## Studies on Microwave Vacuum Drying Phenomena and Models of Potato

Kiyoshi, KUBOTA, Chika OMAE, De Heng Ji  
and Yoshio HAGURA

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

In order to design various microwave heating apparatuses, it is necessary to measure the transforming rate such as cooking, drying rate and so on, and establish the transforming rate equation. In previous papers (KUBOTA *et al.*, 1988; KUBOTA *et al.*, 1990; RU *et al.*, 1990), we have studied the transforming rate equations of microwave heated cooking and drying of potato and so on. The browning phenomena, flavor change and so on according the temperature rises of food decrease the commercially value. The vacuum operation is useful to decrease the temperature rises. In this paper, we studied the rate equation and the drying phenomena of microwave vacuum drying of potato.

**Key words:** drying, food, microwave