

## 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

久保田 清・呂 聯 通・山下 洋右・岡崎 尚  
望月 博範・黒川 眞行・鈴木 寛一・江坂 宗春

広島大学生物生産学部, 東広島市 724

1990年5月1日 受付

**要 旨** 各種マイクロ波加熱の装置設計を進めていくためには、クッキング、乾燥などの加工処理速度の測定と、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。前報<sup>1,2)</sup>において、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を行って報告した。本研究では、ジャガイモなどを例として、マイクロ波加熱における乾燥速度式の設定に関する研究を行った。

食品の乾燥速度の測定には、電子レンジを使用してきた。乾燥試料を、重量測定のために電子レンジから取り出してきた。本研究では、重量-時間の関係が自動記録で得られる改良を行ったマイクロ波加熱乾燥装置を製作した。

熱風流通の乾燥では、ジャガイモなどの乾燥速度を等温条件下の実験で得ることができた<sup>3,5)</sup>。マイクロ波加熱の乾燥では、非等温条件下の実験となり、速度式の設定が困難となる。熱電対を電子レンジ内に入れて試料温度を連続的に測定できなく、マイクロ波加熱の乾燥速度式に関する報告は皆無と言える。本研究では、簡便な経験速度式<sup>6,7)</sup>を使って乾燥速度式を設定する方法について研究を行った。

### 結 言

食品を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。本研究では、ジャガイモなどを例として、乾燥速度式の設定に関する研究を行った結果について報告する。

マイクロ波加熱を利用した家庭用の電子レンジが普及して、成書など<sup>8,9)</sup>も出され、各種装置が開発<sup>10)</sup>されているが、家政学的な研究が多く、工業的な利用となると、発泡乾燥卵の製造<sup>11)</sup>、お茶とかポテトチップの仕上げ乾燥などに利用されている程度で、普及していると言えるところまでに至っていない。

その理由の一つとして、試料の不均一加熱、褐変などが起こり、問題になるためと考えられる。これらを解決するために、通風<sup>12,13)</sup>とか、試料の混合<sup>14)</sup>、流動<sup>15)</sup>、減圧<sup>16)</sup>などの操作が行われてきている。もう一つの理由として、化学工学的研究いわゆる反応速度論的研究が筆者らによるクッキング速度式の設定に関する研究<sup>1,2)</sup>を除くと皆無と言って過言でないためと考えられる。

マイクロ波加熱で、速度論的研究が行われていない理由の一つとして、試料温度が急上昇をし、熱電対を入れると先端に電磁波が集中するアンテナ効果が問題になるなどして、試料内の温度分布測定が困難であることが考えられる。また、得られるデータが非等温データとなり解析が容易でないことがもう一つの原因として考えられる。

本研究では、簡便なる経験速度式<sup>6,7)</sup>を使って、乾燥速度式を設定する方法について研究を行った結果について報告する。また、熱風の通風などができ、重量-時間の関係が自動記録で得られる改良を行った加熱出力が可変のマイクロ波加熱乾燥装置を製作した結果について合わせて報告する。

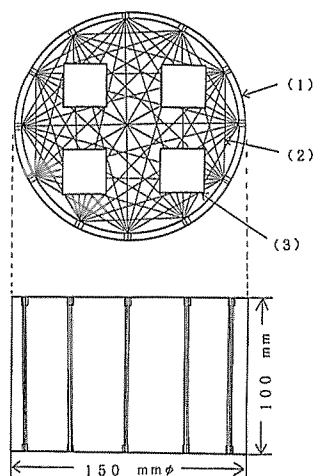
## 実験方法

**試料** 市販のジャガイモ（北海道産メークインを、初期温度と含水率を安定させる目的で 20°C の水浴中に 4 時間浸漬したものを、試料作製用として準備した。市販の電子レンジを用いた予備実験用試料には、これをカッターとコルクボーラとにより各種形状に整形して試料とした。乾燥速度の測定用試料は、コルクボーラで直径 3.4 cm の円柱状に整形し、厚さ 0.5, 1.0, 2.0 および 3.0 cm（平均重量 5.28, 9.91, 19.40 および 28.42 g）にしたものを試料とした。含水量は、115°C の絶乾重量測定により求めた結果、83.1% であった。比熱は、含水率から成書に示される推算式を使って求め、0.894 cal/g・°C とした。

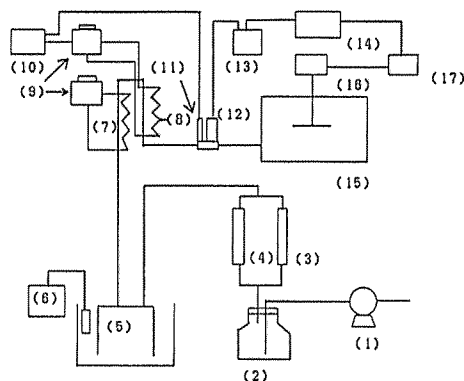
また、市販の電子レンジを用いて、乾燥速度の測定用試料として、茹でうどん（全国農業協同組合連合会製エコーブ多加水熟めんを、沸騰した湯中で 10 分茹で、3 分水道水冷却をして、5 分水切りをしたもの）も使用した。1 本当たり平均径大側 4 mm、径小側 2 mm、長さ 35 cm、平均重量は約 3 g、水分 70.2%、比熱 0.8116 cal/g・°C であった。

**実験装置** 試料の大きさ、形状などの影響を比較するために、ジャガイモを用いた乾燥実験を行ったが、これには、東芝製 ER-235 型（2450 MHz、加熱出力 500 W、回転皿付き）の電子レンジを使用した。試料は、下部からの蒸発水が凝結しないように Fig. 1 に示す試料台を製作して、回転皿の半面部の中心に置いた。試料台は、ポリアクリル製円筒を輪切りに切断した片面にテフロン糸を張ったものである。また、試料の乾燥の進行に伴って負荷が少なくなると、マグネトロンに良くないと聞かされていて、回転皿の試料台を置いた半面部の反対側の中心に、200 cc の三角フラスコに 20°C の水 240 g を入れたものをダミーとして置いた。長時間加熱を続けると沸騰が起るため 2 分毎に取り替えた。

試料の周辺条件の影響を比較するための実験には、東芝製 ER-234 型（2450 MHz、加熱出力 500 W、回



**Fig. 1** Sample holder used in microwave oven  
(1) polyacryl pipe, (2) Teflon thread, (3) sample



**Fig. 2** Schematic diagram of simple convenient microwave heating drying instrument

(1) pump, (2) buffer bottle, (3), (4) flow meter, (5) constant temperature water bath, (6) thermo heater unit and cooler unit, (7) main heater, (8) sub heater, (9) volt slider, (10) transistor relay, (11) thermoregulator, (12) thermocouple, (13) ice box, (14) voltage recorder, (15) microwave oven, (16) load cell, (17) strain amplifier

転皿付き)の電子レンジを使用した。通風、減圧操作ができるように、電子レンジ上部壁板に直径 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、試料が出し入れできて密閉できる枝管が付いているガラス製容器(内径 9 cm, 高さ 11 cm)を入れた。その中には、試料を突き刺して固定できる試料台を設置した。ガラス製容器の枝管を開放して蒸発水蒸気が中に充填して一部が漏れ出る場合、枝管をエアーポンプ(イワキ製 AP-450A 型, 270 W, 最大 50 l/min)に接続して空気を送る場合(一部から空気が抜けるようにする)、減圧する場合の比較実験が行なえるようにした。

円柱状ジャガイモを用いて乾燥速度を求める実験は、Fig. 2 に示す通風できるマイクロ波加熱乾燥装置を製作して行った。松下住設機器の好意により電磁波強度を広範囲に変えられる目盛(15から600)を取り付ける改良をして頂いた電子レンジ NEA-90 を使用した。試料の重量変化が自動測定できるようにした。電子レンジ上部壁板に糸を通すための小穴を4個あけた。この穴を使って試料を置くことができるポリアクリル製の枠型の試料台を吊した。また、側部壁板にもガラス管を通すための小穴をあけた。この穴を使ってエアーポンプ(イワキ製, 最大 34 l/min)からの空気が、試料の下部から円錐型通風口を通して通風ができるようにした。ガラス管と壁板の接合部分には、アルミ箔テープ(米国スリーエム社製 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 社製の電波漏洩量測定器 HI-1501 型により行った。更に、十分な安全をとるため、装置周辺部に可動できるステンレス鋼張り板を取りつけた。

加熱出力は脱イオン水 200 cc を三角フラスコに入れて求めた結果によると、目盛100, 200, 300, 400および600に対して、それぞれ48.4, 114.0, 178.2, 242.7および340.0 W であった。

試料取りつけ用の枠型の試料台は、ロードセル(日本電気三栄製 9E01 型, 最大重量 5 kg)に吊した。ロードセルからの信号は、歪ゲージ用アンプ(日本電気三栄製 6M62 型)を通してから記録計(横河電機製 3056-22型)に行き、試料の重量変化を自動記録することができる。

ポンプからの空気は、広口ガラス瓶を通して流量の均一化を行なって、ロータメータを通して調湿器に送った。ロータメータは、最大流量が 15 l/min と 30 l/min の2個(大阪フローメータ工業製)を取りつけ、流量の大きさによって切り替えできるようにした。調湿器は、ポンプからの空気を、一定温度にした恒温槽中の水と触れさせて飽和水蒸気になって出るように製作したものである。これにより空気を加湿または減湿して所定の湿度に設定できる。恒温槽には、攪拌羽根つきサーモユニット(大洋科学工業製ミランダ Jr 型)と投込式冷却機(大和電機製クールパイプ BD-11 型)を合わせて使用した。

調湿器からの空気は、導管部にリボンヒーターを巻いた部分で所定の温度に設定できるようにした。空気温度を調節するための温度測定は、電子レンジ入口部分にT字型管を取りつけて、マグネット式温度調節器(新日本計測製, MS-09 型)を用いて行った。これはトランジスターリレー(柴田化学機械工業製)を通してリボンヒーター用の電圧変換器に接続した。また、T字型管には、アルメル・クロメル熱電対を挿入して、空気温度を自動記録できるようにした。

茹でうどんを用いて乾燥速度を求める実験には、加熱出力が3段切り替えができる松下電器産業製 NE-6330 型(2450 MHz, 加熱出力 600, 240, 180 W, 回転皿付き)の電子レンジを使用した。加熱効率、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、0.849, 0.812, 0.788であった。試料は、テフロン板(厚さ 3 mm, 直径 24 cm)を試料台として、重ならないように並べて置いた。この試料台は、回転皿の上に置いた。試料台には、20本しか並べることができなかったため、40本, 60本の場合には、蒸発水が抜けられる間隔を置いて2段, 3段とした。本実験では、三角フラスコに水を入れたものをダミーとして置かなかった。

**重量変化の測定** 試料の大きさ、形状などの影響を比較するために行ったジャガイモを用いた乾燥実験における試料の重量変化の測定は、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、直ちに試料をポリ塩化ビニリデンフィルム(呉羽化学工業製クレラップ)に包んで重量を天秤で測定して行った。試料は、重量測定後に包みから出して、再びマイクロ波加熱を続けるという方法によった。特に条件を

示さない場合には、同一試料4個を網上に置いて1分毎に取り出して測定している。試料を所定時間毎に新しいもので取り替えると、個体差による変動が大きくなり、試料の大きさ、形状などの違いによる僅かな差を比較して試料を取り出す毎に、試料温度が低下し、また、ダミーの水を取り替えることによる影響もあり、乾燥速度の測定には好ましくない方法である。

試料の周辺条件の影響を比較するために行った実験では、ダミーの水を置かないで、また、試料の出し入れも行わない方法によった。円柱状ジャガイモを所定時間毎に変えて重量変化の測定を行った。個体差による変動が大きくなり、数回の実験を行って平均値を求めた。

通風できるマイクロ波加熱乾燥装置による乾燥速度の測定実験は、前述の円柱状ジャガイモを用いて行った。試料の中心軸に竹串(直径 2.6 mm, 長さ 18 cm)を突き通して、棒型の試料台に置いた。空気は、流量 30 l/min として、恒温槽 20°C で飽和温度にしたものを使用した。特に条件を示さない場合には、空気温度を 50°C としている。重量変化の測定は、前述のように自動記録により行った。

茹でうどんを用いた乾燥速度の測定実験における試料の重量変化の測定は、試料を所定時間毎に変えて取り出して行った。試料は、試料台のテフロン板と共に取り出して直ちに天秤で重量測定を行った。試料が、天秤に運ぶまでに温度低下し、顕熱が水分蒸発潜熱に使われて、重量測定値が小さくなるため、重量測定を、天秤上で3分間継続した。重量—照射時間終了後の時間の関係を図示して、時間ゼロに外挿する補正を行って測定値とした。

## 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。

$$x = (W_0 - W) / (W_0 - W_e) \quad (1)$$

ここで、 $W$ [g] および  $x$ [-] は、時間  $\theta$ [min] における重量および乾燥率である。添字  $0$  および  $e$  は、初期および平衡時の値を示す。マイクロ波乾燥では、水分がある限り乾燥が進行して絶乾に至ると考えられるため、115°C の絶乾重量測定により得られた重量を上式における平衡重量  $W_e$  の値とした。

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非等温実験となり、温度の経時的変化が速く、測定困難であることから、詳細な速度論的解析が困難である。本研究では、当面する実験データの総合的な速度式の表示を目的として、マイクロ波加熱のクッキング速度式としても使用<sup>1,2)</sup>してきた次に示す汎用的な経験的速度式<sup>6,7)</sup>の適用を試みる。

$$dx/d\theta = k_1(1-x)^n \quad (2)$$

$$dx/d\theta = k_2(1-x)^m(x+\alpha) \quad (3)$$

ここで、 $k_1$ ,  $k_2$ ,  $n$ ,  $m$  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字型曲線に対して式(3)が利用できる。

式(2)および式(3)における  $k_1$  および  $k_2$  は、温度で変わるためクッキング速度式で示した時のように試料の温度変化を測定して、温度関係式で表わすべきと考えられる。また、乾燥速度式では、更に、試料の水分量の減少に伴ってエネルギー吸収効率が変わってくるため、これの影響も考慮することが必要になると考えられ、大変複雑になってくる。

試料が温度上昇をする間は、水分蒸発が少なくなるため、乾燥曲線  $x$  と  $\theta$  の関係はS字型を示すと考えられる。第1段の乾燥速度式として、実験データ  $x$  と  $\theta$  の関係から式(3)の適用ができる。

熱風乾燥の実験<sup>3~5)</sup>では、試料を熱風の湿球温度の恒温水に入れて試料温度を上げておくことができ、乾燥時間も長いために試料温度の初期の立ち上がりを問題にしないで良かった。マイクロ波加熱では、試料を 100°C にすると変性をする事、乾燥時間が短かいために問題になってくる。本研究では、試料が 100°C になるまでは吸収した熱量が顕熱だけに使われ、その後は水の蒸発のための潜熱だけに使われると仮定する以下に示す計算手段を利用して第2段の乾燥速度式の設定を試みる。これは試料が 100°C に一定したとこ

ろでの乾燥速度式で、これから試料の大きさ、通風温度などの違いによる影響とか、乾燥機構を検討することができると思われる。

**エネルギー吸収効率** 試料量でエネルギー吸収効率が異なるため、先ず試料量とエネルギー吸収効率の関係を求めることが必要となる。マイクロ波加熱における熱関係式は次式によって表わされる。

$$Q_s = \eta P \quad (4)$$

$$Q_s = C p_s W_{s0} (\Delta T / \Delta \theta) + \phi_s (\Delta W_H / \Delta \theta) \quad (5)$$

$$\Delta T = 373.2 - T_r \quad (6)$$

ここで、 $P[W]$  は供給熱量いわゆる電子レンジの加熱出力、 $Q_s[W \cdot kg^{-1}]$  は試料の単位質量当たりの吸収熱量いわゆる内部発熱量、 $\eta[-]$  はエネルギー吸収効率、 $W_{s0}[kg]$  と  $C p_s[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$  は、試料の初期重量と比熱、 $\phi_s[J \cdot kg^{-1}]$  は水の蒸発潜熱を示す。 $\Delta T[K]$  と  $T_r[K]$  は、試料が  $100^\circ C$  になるまでの温度上昇値と室温、 $\Delta W_H[kg]$  は蒸発水分量で試料の重量変化に相当する。 $\Delta \theta[s]$  は加熱時間を示す。

式(4)のエネルギー吸収効率  $\eta$  の値は、試料の初期重量で変わると同時に乾燥の進行に伴って水分量が減少しても変わる値である。また、温度によっても変わる値である。簡単のため、各試料の初期重量に対して乾燥率  $x=0.5$  までを一定として取り扱って概算して求める。 $x$  の値が  $0.5$  になる時間  $(\Delta \theta)_{x=0.5}$  は、実験データがばらついており、実験データから直接に求めることが困難である。式(3)を用いて得られる第1段の乾燥速度式のパラメータを使って求めるのが便利である。式(3)による計算値と実験データが  $x$  の値が  $0.5$  あたりで最も良く重なることから妥当である。式(3)において  $m=1$  と仮定すると積分形が得られ、 $x=0.5$  を代入すると次式となり、これから  $(\Delta \theta)_{x=0.5}$  を求めることができる。

$$(\Delta \theta)_{x=0.5} = \{\ln[(0.5 + \alpha) / (1 - 0.5\alpha)]\} / (1 + \alpha) k_2 \quad (7)$$

また、 $x$  の値が  $0.5$  となる  $(\Delta W_H)_{x=0.5}$  は次式により求められる。

$$(\Delta W_H)_{x=0.5} = (W_{s0} - W_{sc}) / 2 \quad (8)$$

以上の式(4)～式(8)を用いて、 $\eta$  の値を求めることができる。

**乾燥速度式** 以上から得られた  $\eta$  の値を使って、試料が初期温度から  $100^\circ C$  になるまでの時間  $(\Delta \theta)_{T_s=373.2}$  を、吸収した熱量が顕熱だけに使われるとして次式により求めることができる。

$$(\Delta \theta)_{T_s=373.2} = C p_s W_{s0} (373.2 - T_r) / \eta P \quad (9)$$

試料の初期温度が  $100^\circ C$  になっていると、乾燥曲線は、S字型曲線にならなくべき乗型曲線に近くなると思われる。ここで得られた  $(\Delta \theta)_{T_s=373.2}$  の値を乾燥時間  $\theta$  から差し引くとべき乗型曲線の式(2)を用いて乾燥速度式を表わすことができると考えられる。実際には、吸収した熱量が顕熱だけでなく顕熱と潜熱とに使われながら  $100^\circ C$  になるため、実験データがこのべき乗型曲線に合致し始めるのは、 $(\Delta \theta)_{T_s=373.2}$  の2倍位の時間からになると考えられる。実験データ  $x$  と  $\theta$  の関係から、 $x$  と  $[\theta - (\Delta \theta)_{T_s=373.2}]$  の関係を求め、 $\theta > 2(\Delta \theta)_{T_s=373.2}$  の実験点を使って、第2段の乾燥速度式として式(2)の適用ができる。

## 実験結果と考察

**試料大きさ、形状と乾燥速度** 試料の大きさ、形状などを比較するために、各種大きさ、形状のジャガイモを用いた乾燥実験を、電子レンジを用いて行った。次に列挙する知見が得られた。特に説明がない限り、加熱出力  $500 W$  とし、試料は4個入れ、1分毎に取り出して測定した結果である。

(1) 角状と円板状のもので、質量を同じとして比較した。長さ、幅各々  $2.7 cm$ 、厚さ  $0.5 cm$  の角板状のものが直径  $3.0 cm$ 、厚さ  $0.5 cm$  の円板状のものよりも乾燥が速かった。

(2) 直方体状のもので、質量を同じとして表面積を変えた比較をした。長さ、幅各々  $3.4 cm$ 、厚さ  $0.3 cm$ ；長さ、幅各々  $1.5 cm$ 、厚さ  $1.5 cm$ ；長さ、幅各々  $2.7 cm$ 、厚さ  $0.5 cm$  の順に速かった。ここで、厚さ  $1.5 cm$  のものが厚さ  $0.5 cm$  のものより早くなり、表面積の大きい、厚さの小さい順の逆になっている。定在波の波長  $0.8 cm$  と関係しているのではないかと考えられる。通常の熱風乾燥では、乾燥速度が試料の表面積、厚さの違いによって大きく異なるが、マイクロ波乾燥では大差ないという結果になった。乾燥機構

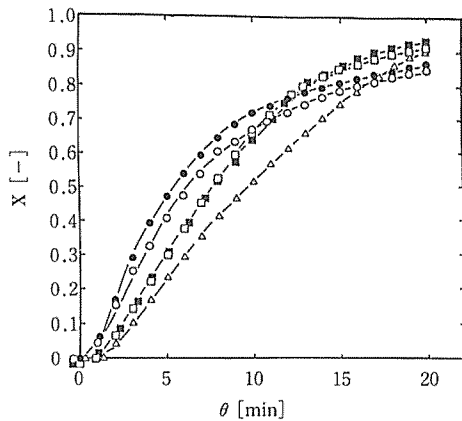
が水分拡散による機構と異なっていると考えられる。

(3) 円柱状のもので、質量を同じとして表面積を変え、(2)と同様の比較をした。直径 3.75 cm, 厚さ 0.3 cm; 直径 1.7 cm, 厚さ 1.6 cm; 直径 3.0 cm, 厚さ 0.5 cm の順に速くなり、(2)と同様な結果になった。

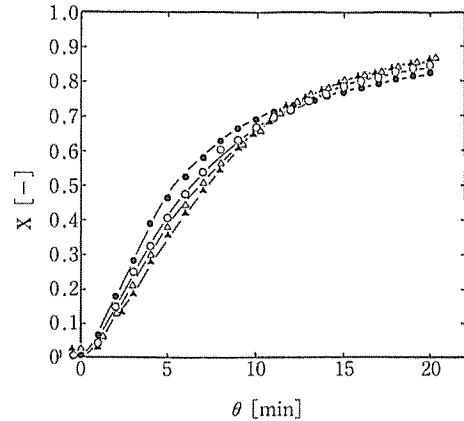
(4) 直方体状のもので、長さ、幅各々 2.7 cm を同じにして厚さを変えた(質量も変わる)比較をした。乾燥率  $x[-]$  と時間  $\theta[\text{min}]$  との関係を Fig. 3 に示す。試料の厚さが小さい投入量が少ないものほど乾燥が速くなっている傾向がみられるが、厚さ 1.0 cm の方が厚さ 0.5 cm のものより速くなり、逆になっている。(3), (4)の結果と同様になり、定在波が関係しているのではないかと考えられる。

(5) 直方体のもので、長さ、幅各々 1.5 cm を同じにして(4)と同様の比較をした。厚さ 1.0 cm の方が厚さ 0.5 cm のものより速くなり(4)の結果と同様になった。

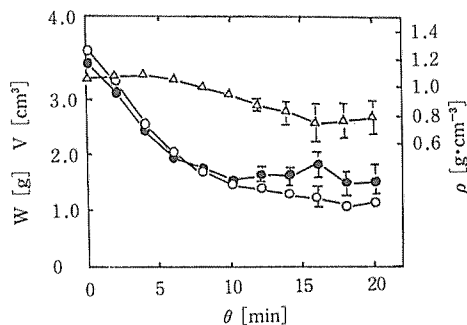
(6) 直方体状の長さ、幅各々 2.7 cm, 厚さ 0.5 cm のもので投入個数を変えた比較をした。Fig. 4 に示す。



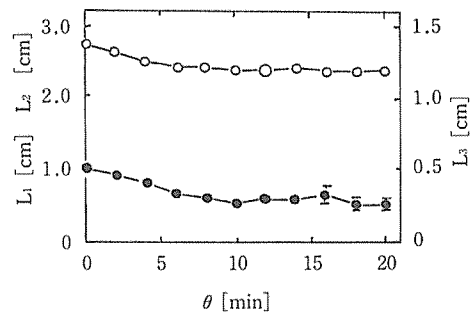
**Fig. 3** Relations among the drying ratio  $x[-]$  and the time  $\theta[\text{min}]$  of rectangular potato used microwave oven  
 $P=500 \text{ W}$ , Number of sample=4,  $L_1=L_2=2.7 \text{ cm}$ ,  $L_3=0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.7 \text{ cm}$ ;  $\circ, \bullet, \square, \blacksquare, \triangle$



**Fig. 4** Relations among the drying ratio  $x[-]$  and the time  $\theta[\text{min}]$  of slab potato used microwave oven  
 $P=500 \text{ W}$ ,  $L_1=L_2=2.7 \text{ cm}$ ,  $L_3=0.5 \text{ cm}$ , Number of sample=2, 4, 8, 12;  $\bullet, \circ, \blacktriangle, \triangle$



**Fig. 5** Relations among the weight  $W[\text{g}]$ , volume  $V[\text{cm}^3]$ , density  $\rho[\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}]$  and the time  $\theta[\text{min}]$  of slab potato used microwave oven  
 $P=500 \text{ W}$ , Number of sample=4,  $L_1=L_2=2.7 \text{ cm}$ ,  $L_3=0.5 \text{ cm}$ ,  $W[\text{g}]$ ,  $V[\text{cm}^3]$ ,  $\rho[\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}]$ ;  $\circ, \bullet, \triangle$



**Fig. 6** Relations among the length  $L_1[\text{cm}]$ , width  $L_2[\text{cm}]$ , thickness  $L_3[\text{cm}]$  and the time  $\theta[\text{min}]$  of slab potato used microwave oven  
 $P=500 \text{ W}$ , Number of sample=4,  $L_1=L_2=2.7 \text{ cm}$ ,  $L_3=0.5 \text{ cm}$ ,  $L_1$  and  $L_2$ ,  $L_3$ ;  $\circ, \bullet$

試料の投入量が少ないほど乾燥が速くなっている。乾燥が進行をしていくと、最初に速いものが遅くなるという(4)と同様な興味深い結果が得られている。原因の究明に至っていない。

(7) 直方体状の長さ、幅各々 2.7 cm、厚さ 0.5 cm のもので試料取り出し時間を変える比較をした。2分毎取り出しが1分毎よりも速い結果になったが、2分毎以上では大差ない結果になった。

(8) 直方体状の長さ、幅各々 2.7 cm、厚さ 0.5 cm のもので、試料取り出しを2分毎に行なって、重量  $W$ [g]、体積  $V$ [cm<sup>3</sup>]、密度  $\rho$ [g·cm<sup>-3</sup>]、長さ  $L_1$ [cm]、幅  $L_2$ [cm]、厚さ  $L_3$ [cm] と時間  $\theta$ [min] の関係を測定した。Fig. 5 および6に示す。密度と体積は、試料にワセリンを塗り、広口比重ビンに水を入れて測定した。また、厚さは、測定が困難なため、体積と長さ、幅とから算出して求めた。10分以降では、少しばらつきがみられている。個体によって褐変化の状況が変わるためである。密度は、後半になって低下しているが、これは膨化が起きているためである。長さ、幅の変化が10%位であるのに対して、厚さの変化は50%位になっている。

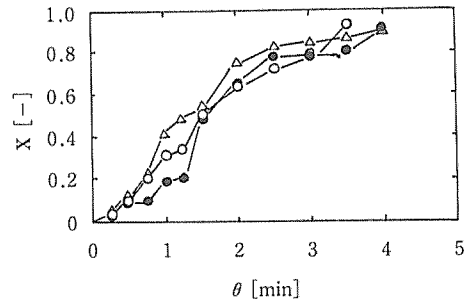
**周辺条件と乾燥速度** 試料の周辺条件の影響を比較するために、直径 3.5 cm、厚さ 3.0 cm の円柱状ジャガイモを用いた乾燥実験を、電子レンジを用いて行った。ガラス容器の枝管を開放して蒸発水蒸気を中に充填させた場合、枝管から室温の空気を送った場合、減圧 (550 mmHg) した場合の比較をした。乾燥率  $x$ [-] と時間  $\theta$ [min] との関係を Fig. 7 に示す。減圧の場合の乾燥速度が速く、褐変も起こらなくて良かった。試料温度が、褐変化を起こさない温度で、水の蒸発が起きていると考えられる。蒸発水蒸気を充填させた方が、空気を送った場合よりも、初期に速くなっているが、これは試料温度の上昇が速くなるためと考えられる。

通常の熱風乾燥では、周辺が飽和湿度になると乾燥が進行しないが、マイクロ波乾燥では、逆に試料温度を低下させない保温効果がみられる。乾燥機構が水分拡散による機構と異なっているためと考えられる。減圧によって速くなったことから、水蒸気発生によって周辺部との間に全圧差を生じて水蒸気移動が起きているものと考えられる。

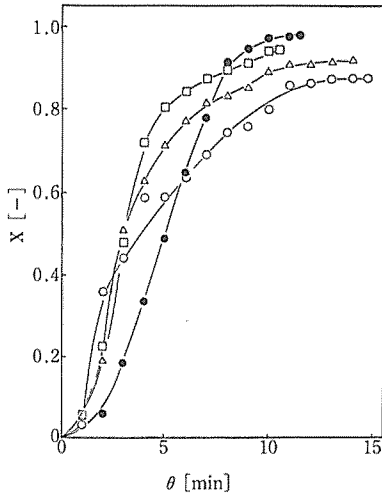
**ジャガイモの乾燥速度式** 通風できるマイクロ波加熱乾燥装置を使用して、直径 3.4 cm、厚さ0.5、1.0、2.0および3.0 cm の円柱状ジャガイモを用いて、乾燥速度を求める研究を行った。加熱出力目盛100, 200, 300, 400および600に対して、空気の送風なしおよび流量 30 l/min の送風で空気温度を40, 50および60°Cと変えて、乾燥率  $x$ [-] と時間  $\theta$ [min] との関係を求めた。加熱出力目盛300を例として、空気温度 50 °C、流量 30 l/min として、試料の厚さを変えて得られた結果を Fig. 8 に示す。また、試料厚さ 2.0 cm として、空気の送風なしおよび流量 30 l/min で空気温度を変えて得られた結果を Fig. 9 に示す。

Fig. 8 から、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か、S字型の形状が著しくなっている。初期の速度は、温度上昇に時間がかからない厚さが小さい試料の方が速いが、乾燥が進行をしていくと、最初に速いものが遅くなるという Fig. 4 でみられたと同様な興味深い結果が得られている。試料が大きくなると熱がこもりやすいとか、定在波が発生するためかと思われたが、Fig. 4 では試料の数が違うだけで大きさは同じとなっている。現状では原因が不明である。Fig. 9 から、空気の送風の有無とか熱風温度に関係ないことがわかる。Fig. 7 で考察したと同じことが原因として考えられる。

実験データ  $x$  と  $\theta$  の関係に対して、先ず、乾燥速度式として式(3)を適用してパラメータを求めた。 $m$  と  $\alpha$  の値は、大変にばらついて得られた。 $m=1.0$ 、 $\alpha=0.1$  と仮定した場合の結果を Table 1 に示す。加熱

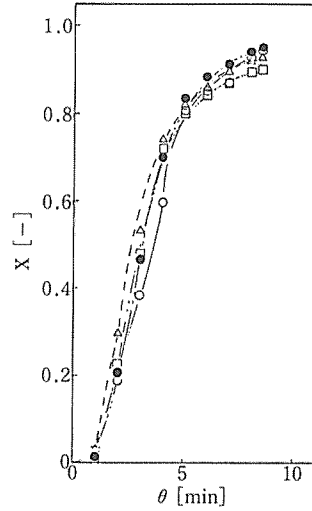


**Fig. 7** Relations among the drying ratio  $x$ [-] and the time  $\theta$ [min] of cylindrical potato used microwave oven  $P=500$  W, Number of sample=1,  $D=3.5$  cm,  $L_3=3.0$  cm, Room temperature saturated steam, air flow, vacuum (550 mmHg); ○, ●, △



**Fig. 8** Relations among the drying ratio  $x[-]$  and the time  $\theta[\text{min}]$  of cylindrical potato used microwave heating drying instrument

$P[-]=300$  ( $P=178.2$  W), Air flow= $30$   $l \cdot \text{min}^{-1}$ , Air temperature= $50^\circ\text{C}$ , Number of sample= $1$ ,  $D=3.4$  cm,  $L_3 = 0.5, 1.0, 2.0, 3.0$  cm;  $\circ, \triangle, \square, \bullet$



**Fig. 9** Relations among the drying ratio  $x[-]$  and the time  $\theta[\text{min}]$  of cylindrical potato used microwave heating drying instrument

$P[-]=300$  ( $P=178.2$  W), Number of sample= $1$ ,  $D=3.4$  cm,  $L_3=2.0$  cm, Air flow= $0$ , Air temperature (Air flow= $30$   $l \cdot \text{min}^{-1}$ )= $40, 50, 60^\circ\text{C}$ ;  $\circ, \triangle, \square, \bullet$

**Table 1** Calculated values of the parameter  $k_2[\text{min}^{-1}]$  for microwave drying of cylindrical potato

Assuming drying-rate equation: Eq. (3),  $m=1.0$ ,  $\alpha=0.1$

$P[-]$	Samp. A	Samp. B	Samp. C	Samp. D
600	—	1.144	1.173	0.802
400	—	0.531	0.809	0.565
300	0.538	0.598	0.688	0.464
200	0.475	0.354	0.392	0.276
100	0.247	0.186	0.175	0.104

$P[-]$ : indicated number ( $P[\text{W}]$ : power obtained from 200 cc water; 340.0, 242.7, 178.2, 114.0, 48.4 W, respectively)

Samp. A, B, C, D:  $W_{50}=5.28, 9.91, 19.40, 28.42$  g, respectively (diameter= $3.4$  cm, length= $0.5, 1.0, 2.0, 3.0$  cm)

**Table 2** Calculated values of the absorbed efficiency  $\eta[-]$  for microwave drying of cylindrical potato

$P[-]$	Samp. A	Samp. B	Samp. C	Samp. D
600	—	0.301	0.463	0.611
400	—	0.196	0.584	0.598
300	0.144	0.301	0.677	0.669
200	0.199	0.278	0.603	0.621
100	0.243	0.345	0.636	0.554

$\eta[-]$ : based the power obtained from 200 cc water

出力目盛400で小さくばらついている点があるが、試料の大きさに対して加熱出力が強すぎる点(計算値がない点)に近い点で、1回だけの実験結果のために生じたばらつきと考えられる。Table 1 で得られた  $k_2$  の値から、式(4)~式(8)を用いて、エネルギー吸収効率  $\eta$  の値を求めた結果を Table 2 に示す。 $\eta$  の値が、



試料の大きさが小さくなるに伴って小さくなっている。加熱出力にほとんど影響しないという興味深い結果になっている。

次に、 $x$  と  $\theta$  の関係から、式(9)を用いて  $x$  と  $[\theta - (\Delta\theta)_{T_s=273.2}]$  の関係を求め、 $\theta > 2(\Delta\theta)_{T_s=273.2}$  の実験点に、乾燥速度式として式(2)を適用してパラメータを求めた。 $n$  の値は、加熱出力に影響されなく、試料の大き気で変わって得られた。試料が大きくなると、1.5位から0.5以下に変わった。 $n=0.5$  と  $n=1.0$  と仮定した場合の結果を Table 3 に示す。 $k_1$  の値が、加熱出力の増加に伴って大きくなっている。試料が大きくなるに伴っては、僅かに小さくなっているにすぎない。

**茹でうどんの乾燥速度式** 電子レンジを使用して、茹でうどんを用いて、乾燥速度式を求める研究を行った。加熱出力と試料の数を変えて得られた乾燥率  $x[-]$  と時間  $\theta[\text{min}]$  との関係を図. 10 に示す。試料

**Table 3** Calculated values of the parameter  $k_1[\text{min}^{-1}]$  for microwave drying of cylindrical potato

Assuming drying-rate equation: Eq. (2),  $n=0.5$

$P[-]$	Samp. A	Samp. B	Samp. C	Samp. D
600	—	0.410	0.433	0.306
400	—	0.136	0.290	0.208
300	0.155	0.204	0.252	0.178
200	0.154	0.116	0.142	0.103
100	0.0922	0.0690	0.0635	0.0378

Assuming drying-rate equation: Eq. (2),  $n=1.0$

$P[-]$	Samp. A	Samp. B	Samp. C	Samp. D
600	—	0.554	0.589	0.413
400	—	0.182	0.391	0.288
300	0.217	0.279	0.348	0.248
200	0.203	0.162	0.201	0.139
100	0.127	0.0927	0.0870	0.0502

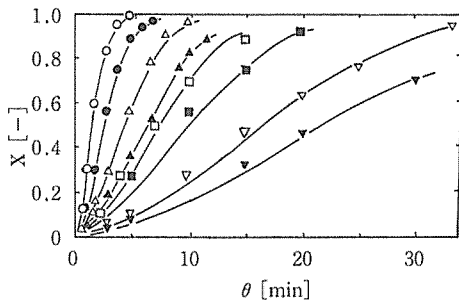
**Table 4** Calculated values of the parameter  $k_2[\text{min}^{-1}]$  for microwave drying of cooked udon

Assuming drying-rate equation: Eq. (3),  $m=1.0$ ,  $\alpha=0.1$

$P[W]$	Samp. A	Samp. B	Samp. C	Samp. D
600	1.351	0.816	0.504	0.355
240	—	0.307	—	0.136
180	—	0.230	—	0.101

$P[W]$ : indicated power ( $\eta[-]$ : absorbed efficiency obtained from 240 cc water; 0.849, 0.812, 0.788, respectively)

Samp. A, B, C, D:  $W_{so}=30, 60, 120, 180$  g, respectively (number of udon=10, 20, 40, 60)



**Fig. 10** Relations among the drying ratio  $x[-]$  and the time  $\theta[\text{min}]$  of cooked udon used microwave oven  
 $P=600$  W ( $W=30, 60, 120, 180$  g),  $P=240$  W ( $W=60, 180$  g),  $P=180$  W ( $W=60, 180$  g);  $\circ, \bullet, \triangle, \blacktriangle, \square, \nabla, \blacksquare, \blacktriangledown$

**Table 5** Calculated values of the absorbed efficiency  $\eta[-]$  for microwave drying of cooked udon

$P[W]$	Samp. A	Samp. B	Samp. C	Samp. D
600	0.525	0.634	0.784	0.834
240	—	0.596	—	0.801
180	—	0.597	—	0.785

$\eta[-]$ : based the power indicated in explanation

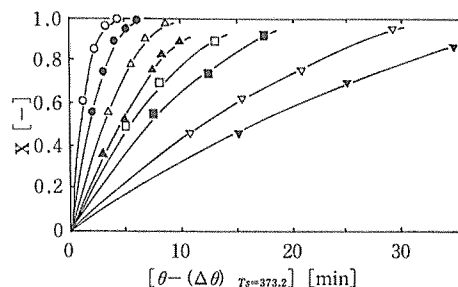
**Table 6** Calculated values of the parameter  $k_1$  [ $\text{min}^{-1}$ ] for microwave drying of cooked udon

Assuming drying-rate equation: Eq. (2),  $n=0.5$

$P$ [W]	Samp. A	Samp. B	Samp. C	Samp. D
600	0.484	0.304	0.187	0.127
240	—	0.107	—	0.0491
180	—	0.0810	—	0.0357

Assuming drying-rate equation: Eq. (2),  $n=1.0$

$P$ [W]	Samp. A	Samp. B	Samp. C	Samp. D
600	0.701	0.442	0.270	0.167
240	—	0.143	—	0.0657
180	—	0.112	—	0.0471



**Fig. 11** Relations among the drying ratio  $x$  [—] and the time  $[\theta - (\Delta\theta)_{T_s=373.2}]$  [min] of cooked udon used microwave oven  
 $P=600$  W ( $W=30, 60, 120, 180$  g),  
 $P=240$  W ( $W=60, 180$  g),  $P=180$  W ( $W=60, 180$  g);  $\circ, \bullet, \triangle, \blacktriangle, \square, \nabla, \blacksquare, \blacktriangledown$

の数が多くなると、S字型の形状が著しくなっている。この実験データに対して、先ず、乾燥速度式として式(3)を適用してパラメータを求めた。 $m=1.0, \alpha=0.1$ と仮定した場合の結果をTable 4に示す。計算値が一部ないのは、実験を省略したためである。Fig. 10に示す曲線は、Table 4に示すパラメータを用いた場合の計算結果である。Table 4で得られた $k_2$ の値から、式(4)～式(8)を用いて、 $\eta$ の値を求めた結果をTable 5に示す。

次に、式(9)を用いて、前述の方法に従って乾燥速度式として式(2)を適用してパラメータを求めた。 $n$ の値は、試料の数が多くなると0.5を前後して小さく変わった。 $n=0.5$ と $n=1.0$ と仮定した場合の結果をTable 6に示す。

Fig. 11は、実験データとTable 6に示す $n=0.5$ としたパラメータを用いた計算結果を比較して示したものである。 $k_1$ の値が、加熱出力の増加に伴って大きく、また、試料の数が多くなるに伴って小さくなっている。

## 結 言

マイクロ波加熱によるクッキング速度式の設定について、前報<sup>1,2)</sup>で報告した。本研究では、マイクロ波加熱による乾燥速度式の設定に関する研究を行った。先ず、基礎的な知見を得るために各種大きさ、形状のジャガイモを用いて、また、通風、減圧など周辺条件を変えて、マイクロ波乾燥の実験を電子レンジを用いて行った。通常の通風乾燥などにみられるような拡散によって水分移動が起こっているのではなく、水蒸気発生によって試料内部に周辺よりも高い全圧を生じて水分移動が起こっていると推察された。

通風でき、試料の重量が自動記録できるマイクロ波加熱乾燥装置を製作し、円柱状ジャガイモを用いて乾燥速度データを求める実験を行った。乾燥曲線は、乾燥初期に試料温度が上昇するため、S字型の形状を示した。

エネルギー吸収効率を求めて100°Cに到達する時間を計算し、100°Cになって乾燥が進行する領域に対して、べき型速度式を用いて乾燥速度式の設定を行った。茹でうどんの乾燥を電子レンジを用いて行って得られた乾燥速度データに対しても同様の乾燥速度式の設定を行った。速度定数は、試料の大きさよりも、加熱電力によって大きく変わる結果が得られた。

なお、本研究の一部は、平成元年7月14日の福岡市(九州大学)における第26回化学関係合同九州大会な

らびに平成2年4月6日の名古屋市（名古屋大学）における化学工学会第55年会上において報告したものである。

## 謝 辞

本研究の一部は、文部省科学研究費補助金の総合研究(A) (1987, 1988年)、特定研究 (1988年) の援助、ならびに中基研究奨励会の援助 (1988, 1989年) を受けたものである。また、本研究で改良した電子レンジの松下電器産業製 NE-6330 型は、松下住設機器㈱の好意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

$Cp_s$	: 試料の比熱 [ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ]	$x$	: 式(1)で示す乾燥率 [-]
$D$	: 試料の直径 [m], [cm]	$\alpha$	: 式(3)のパラメータ
$k_1, k_2, m, n$	: 式(2), (3)のパラメータ	$\Delta T, \Delta \theta$	: 温度上昇値 [K], 加熱時間 [s]
$L_1, L_2, L_3$	: 試料の長さ, 幅, 厚さ [m], [cm]	$\eta$	: エネルギー吸収効率 [-]
$P$	: 供給熱量, 加熱出力 [W]	$\theta$	: 加熱時間 [s], [min]
$Q_s$	: 試料の吸収熱量 [ $W \cdot kg^{-1}$ ]	$\rho$	: 試料の密度 [ $kg \cdot m^{-3}$ ], [ $g \cdot cm^{-3}$ ]
$T$	: 試料などの温度 [K]	$\phi$	: 水の蒸発潜熱 [ $J \cdot kg^{-1}$ ]
$V$	: 試料などの質量 [kg], [g]		

添 字 :

s : 試料	o : 初期値
H : 水分	e : 平衡値
r :	装置周辺

## 引用文献

- 1) KUBOTA, K., ARAKI, H., SUZUKI, K. and ESAKA, M., 1986, Study on the Cooking-rate Equations by Microwave Heated Cooking of Potato Slices. *J. Fac. Appl. Biol. Sci., Hiroshima Univ.*, 25:1-9.
- 2) 久保田清・黒川眞行・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.
- 3) 久保田清・松本俊也・鈴木寛一・長谷川勉・保坂秀明, 1981, ジャガイモの乾燥収縮式と速度式の設定に関する考察. *広島大学生物生産学部紀要*, 20:99-113.
- 4) 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乾燥速度式. *日食工誌*, 28:491-495.
- 5) 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乾燥速度式. *日食工誌*, 29:238-244.
- 6) 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.
- 7) KUBOTA, K., 1979, Inference of the Pseudo Transforming Mechanisms of Foods used a Simple Rate Equation. *J. Fac. Appl. Biol. Sci., Hiroshima Univ.*, 18:171-184.
- 8) 露木英男・首藤 厚, 1974, 食品のマイクロ波加熱, 建帛社, 東京.
- 9) 肥後温子編, 1987, 電子レンジ・マイクロ波食品利用ハンドブック, 日本工業新聞社, 東京.
- 10) 編集部, 1988, マイクス波応用機器. 食品と開発, 23(1):73-75.
- 11) 荒木英之, 1987, マイクロ波の末縛加熱利用. 食品機械装置, 24(1):45-56.
- 12) 赤星亮一・又重英一, 1982, マイクロ波を利用した食品モデル試料の通風乾燥とその機構について. *日食工誌*, 29:587-595.
- 13) 小島敏忠・葛見裕子, 1980, 熱風循環装置付き電子レンジを利用した食品乾燥法について. *Sanyo*

- Technical Review*, 18(2):121-127.
- 14) WADSWORTH, J. I. and KOLTUN, S. P., 1986, Physicochemical Properties and Cooking Quality of Microwave-Dried Rice. *Cereal Chem.*, 63:346-348.
  - 15) KUDRA, T., 1989, Dielectric Drying of Particulate Materials in a Fluidized State. *Drying Tech.* 17: 17-34.
  - 16) POMINSKI, J. and VINNETT, C. H., 1989, Production of Peanut Flour from Microwave Vacuum-Dried Peanuts. *J. Food Sci.*, 54:187-189.

## Studies on Simple Convenient Microwave Heated Drying Instrument and on Microwave Drying of Potato

Kiyoshi KUBOTA, Rentsu RO, Yousuke YAMASHITA,  
Takashi OKAZAKI, Hironori MOCHIZUKI, Masayuki KUROKAWA,  
Kanichi SUZUKI and Muneharu ESAKA

*Faculty of Applied 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 rates and so on, and establish the transforming rate equation. In previous papers<sup>1,2)</sup>, we have studied the cooking-rate equation by microwave heated cooking of potato slices. In this paper, we studied the drying-rate equation by microwave heated drying of potato and so on.

An electronic range has been used for measurement of the degree of drying of foodstuffs. The drying sample was quickly taken out from the range in order to measure the weight. Therefore, we designed in this study an improved instrument which the weight-time relationship of sample can be obtained continuously on the recorder.

The values of the drying-rate of the potato and so on for air flow type drying could be measured by means of the experimental method consisted constant temperature system<sup>3-5)</sup>. However, the experiments for microwave heated drying must be studied by the temperature unsteady-state system. The determination method of the rate equation is more difficult than the former one. The temperature of the sample can not be measured continuously, because the thermocouple can not be treated in the electronic range. Therefore, we can not see the report according to the drying-rate equation for microwave heated drying. In this paper, we studied the drying-rate equation by using the simple empirical rate equations that have been reported in a previous papers<sup>6,7)</sup>.