

## 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

呂 聯通・久保田 清・鈴木 寛一

広島大学生物生産学部, 東広島市 724

1990年10月27日 受付

**要 旨** 前報(久保田ら, 1990, 呂ら, 1990)において, 簡便なマイクロ波加熱乾燥装置の試作を行い, 大きさ, 形状を変えたジャガイモなどを例として, 簡単な乾燥速度式の設定に関する研究を行った。その結果, 温度上昇の原因で発生する褐変化がジャガイモの大きさの増加に伴って増加し, 局部的に発生した。

本研究では, ジャガイモのマイクロ波加熱乾燥における試料の大きさ, 形状と褐変化の関係に関する研究を行った。その結果, 試料の最大長さ, 厚さを減少させることによって褐変化を減少させることがわかった。

### 実 験 方 法

**試料** 市販のジャガイモを試料として用いた。初期温度と初期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。円柱状の場合はコルクボーラで, 直方体の場合にはカッターで各種形状に整形して試料とした。含水量は, 115°C の絶乾重量により求めた。

**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。試料はテフロン糸を張った試料台(久保田ら, 1990)を用い, 重ならないように並べて置いた。この試料台は, 回転皿の上に置いて, 加熱出力 240 W で加熱した。三角フラスコ 200 cc に水を入れて測定した加熱出力は 187 W であった。測定した 187 W は, 試料の重量が少ないので試料に対しては変わると考えられる。検定する水の量を少なくすると精度良い測定が困難なので上記の量とした。ジャガイモの重量に同じにしても含水率, 大きさ, 形状の違いで加熱効率は変わってくると考えられる。試料は, 大きさ, 形状の比較のため, 重量が約 50 g になるように個数を変えて設定して統一した。

**重量変化の測定** マイクロ波加熱を所定時間行った後, 試料を試料台ごと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。試料は, 秤量後, 再びマイクロ波加熱を続けるという方法による。2.5分毎と5.0分毎とを比較して差がみられなく, 2.5分毎で測定を行った。0.5分毎と1分毎とした測定では, 速度の低下がみられた。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いため同一試料を用いて出し入れする方法で行った。室温は, 23~25°C であった。

### 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(久保田ら, 1990, 呂ら, 1990)により表わす。

$$G = (g_0 - g) / (g_0 - g_e) \quad (1)$$

ここで,  $g$ [g] および  $G$ [-] は時間  $S$ [min] における重量および乾燥率である。添字  $o$  および  $e$  は, 初期および最終値を示す。

**恒率乾燥速度式** 恒率乾燥期間に対する乾燥速度式を, 前報(呂ら, 1990)で示した次式を用いて表わす。

$$G = J + KS \quad (2)$$

ここで,  $J$  および  $K$  は, 実験から求めることになるパラメータである。例えば, 円柱状試料で同一直径で長さを変えて比較をするなどする時に,  $(g_0 - g_e)$  の値が一定でなく  $K$  の値が変動する。前報で示した方法により,  $(g_0 - g_e)$  の値の違いによる影響をなくする補正を行って補正值  $K_0$  を求めた。

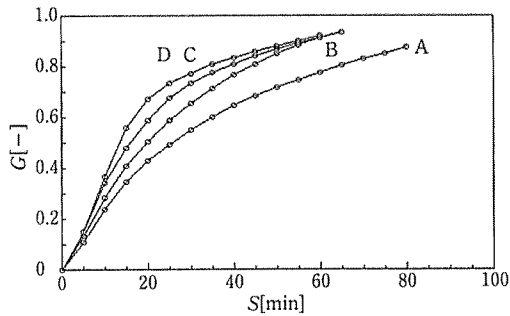


Fig. 1. Relations among the drying-ratio  $G[-]$  and the time  $S[\text{min}]$ .

Sample: potato ( $2l_x=1.0$  cm, samples),  $g_0=50$  g,  $P_w=187$  W,  $2l_z=A, B, C, D: 1.0, 2.0, 3.0, 4.0$  cm.

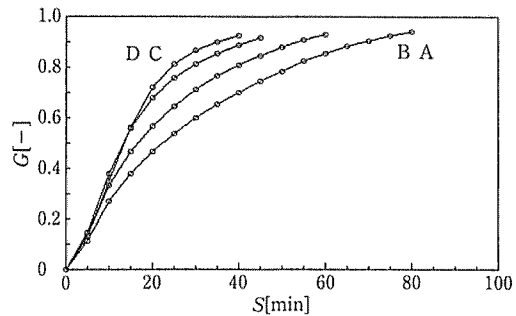


Fig. 2. Relations among the drying-ratio  $G[-]$  and the time  $S[\text{min}]$ .

Sample: potato ( $2l_x \times 2l_y=1.0 \times 1.0$  cm, samples),  $g_0=50$  g,  $P_w=187$  W,  $2l_z=A, B, C, D: 1.0, 2.0, 3.0, 6.0$  cm.

Table 1. Calculated values of the parameter  $K_0 \times 10^2 [\text{min}^{-1}]$  in Eq. (2).

Sample: potato ( $2l_x=1.0$  cm,  $2l_z[\text{cm}]$ , samples),  $g_0=50$  g,  $P_w=187$  W

$2l_z$	1.0	2.0	3.0	4.0
$K_0 \times 10^2$	4.438	4.915	5.717	6.984

Sample: potato ( $2l_x \times 2l_y=1.0 \times 1.0$  cm,  $2l_z[\text{cm}]$ , samples),  $g_0=50$  g,  $P_w=187$  W

$2l_z$	1.0	2.0	3.0	4.0	6.0
$K_0 \times 10^2$	4.489	5.612	7.099	7.614	8.390

Sample: potato ( $2l_x \times 2l_y=0.5 \times 0.5$  cm,  $2l_z[\text{cm}]$ , samples),  $g_0=50$  g,  $P_w=187$  W

$2l_z$	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
$K_0 \times 10^2$	2.204	2.262	3.038	3.365	4.669
$2l_z$	3.5	4.5	5.0	6.0	
$K_0 \times 10^2$	5.614	7.030	6.932	7.446	

は 12.2 cm である。褐変化が起こると、含水率が小さく蒸発潜熱による温度降下が小さくなり、比熱が小さくなり、伝熱速度が小さくなると考えられる。そのため褐変化の境界面は褐変化が拡大する方向に移動していくと考えられる。

**正方角柱状試料** 一辺  $2l_x=1.0$  cm,  $2l_y=1.0$  cm の正方角柱状試料で長さ  $2l_z$  を 1.0~6.0 cm と変える実験を行った。実験結果の一部を Fig. 2 に示し、 $K_0$  の値を Table 1 に一覧して示す。試料の長さの増加に伴って、円柱状試料と同様に  $K_0$  の値が大きくなっている。長さ 1.0 cm の場合には褐変化がみられなかったが、長さが 2.0 cm 以上になると、両端を 1 cm 弱ほど残して中央部分が褐変化をした。この場合も前述のような定在波の発生が考えられる。

次いで一辺の大きさの違いの影響を調べるために一辺  $2l_x=0.5$  cm,  $2l_y=0.5$  cm の正方角柱状試料で長さ  $2l_z$  を 1.0~6.0 cm と変える実験を行った。実験結果の一部を Fig. 3 に示し、 $K_0$  の値を Table 1 に一覧して示す。試料の長さの増加に伴って、前と同様に  $K_0$  の値が大きくなっている。乾燥率 90% における褐変化の現象を測定した結果を Table 2 に一覧して示す。長さが 1.0 cm の場合には褐変化がみられなかつ

## 実験結果と考察

**円柱状試料** 直径  $2l_x=1.0$  cm の円柱状試料で長さ  $2l_z$  を 1.0~4.0 cm と変えて実験を行った。実験結果を Fig. 1 に示し、式(2)を適用して得られる  $K$  の値の補正值  $K_0$  を Table 1 に一覧して示す。試料の長さの増加に従って  $K_0$  の値が大きくなっている。長さが 2 cm 以上になると、両端を 1 cm 弱ほど残して中央部分が褐変化をしていくことから、波長以上の長さの方向に対して、両端を節とする波が発生し、それが一部定在波になっているのではないかと考えられる。100°C の水中での波長は 1.64 mm, 定在波の波長は 0.82 cm である。乾燥をしていくと、波長は空気中での値に変わっていくと考えられる。空気中での波長

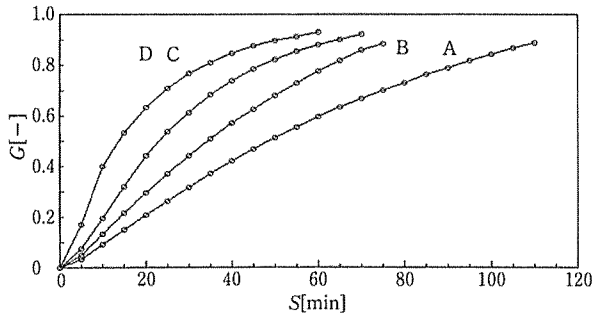


Fig. 3. Relations among the drying-ratio  $G[-]$  and the time  $S[\text{min}]$ .

Sample: potato ( $2l_x \times 2l_y = 0.5 \times 0.5$  cm, samples),  $g_0 = 50$  g,  $P_w = 187$  W,  $2l_z = A, B, C, D: 1.0, 2.0, 3.0, 5.0$  cm.

Table 2. Browning on microwave heated drying.

Sample: potato ( $2l_x \times 2l_y = 0.5 \times 0.5$  cm,  $2l_z[\text{cm}]$ , samples),  $g_0$  [g],  $P_w = 187$  W

$2l_z$	$g_0$	$N_0$	$N_B$	$S_B \times 60$	$G_B$
1.0	50.5	151	0	—	—
1.5	50.7	108	25	34	0.75
2.0	50.3	85	50	19	0.53
2.5	50.4	68	100	19	0.58
3.0	50.9	63	100	9	0.38
3.5	50.2	50	100	7	0.35
4.5	50.4	44	100	5	0.35
5.0	50.6	41	100	5	0.35
6.0	50.6	33	100	5	0.35

Where,  $N_0[-]$ : number of samples,  $N_B[\%]$ : percentage of browning samples at  $G_B = 0.90$ ,  $S_B[\text{min}]$ ,  $G_B[-]$ : browning started time and drying ratio

結果を得た。また、前報 (呂ら, 1990) において、長さと同幅とを一定として、厚さを変える実験を行って、乾燥速度が  $4.0 \times 3.0 \times 0.5$  cm,  $4.0 \times 3.0 \times 0.15$  cm,  $4.0 \times 3.0 \times 0.1$  cm において変わらない結果を得た。これら両者の結果から、直方板状試料では、長さと同幅の大きさが定在波の発生に関係して、乾燥速度を速くしている、厚さは 1.0 cm 程度以下では速度にほとんど関係しないと考えられる。前報 (呂ら, 1990) において、厚さ  $2l_x$  を 0.5 cm と一定にして、長さ  $2l_z$  と幅  $2l_y$  を 2.0~6.0 cm と変えて  $K_0$  の値を求めてきている。上述の円柱状試料、正方角柱状試料の結果と合わせて、 $K_0$  の値を Fig. 4 に一覧して示す。

直方板状試料の場合には、2 cm 以上になると、四隅を 1 cm 弱ほど残して中央部分が褐変化していくことから、試料に定在波が長さと同幅の方向に発生していると考えられる。一辺 2 cm 位の時には十字状での褐変化が観察される。一辺 3 cm 以上になると、四隅の部分の全体に対する割合が少なくなり、 $K_0$  の値が大差なくなり  $0.07 \sim 0.08 \text{ min}^{-1}$  となっている。

板状試料の場合は、円柱状、角柱状試料と比較して、表面積が大きいので、これらよりも乾燥速度を大きくして褐変化させないで乾燥できる条件が得られると考えられる。直方体状試料において、1個あたりの重量を同じにして、長さ、幅、厚さを変えて乾燥率90%における褐変化の現象を測定した結果を Table 3 に示す。 $K$  の値も合わせて示す。

Table 3 より、長さと同幅の方向に定在波が発生するような大きさの長さと同幅をもった試料でも、厚さを薄

たが、1.5 cm 以上になると褐変化が起ころははじめ、2.5 cm 以上になると100%が褐変化を起す結果になっている。一辺が 2.0 cm 以上になると乾燥速度は速くなっていき褐変化をし、1.0 cm 以下では速度は遅くなるが褐変化をしない。食品では、品質的な損傷を与える条件下は好ましくない。

以上から、直径 1.0 cm 以下の円柱状ならびに一辺 1.0 cm 以下の角柱状試料において、褐変化を起こさせないで乾燥させる条件は、長さ方向に定在波を発生させない長さ 1.0 cm 以下ということになる。Table 1 の  $K_0$  の値から考えると、 $2l_z \times 2l_y \times 2l_x$  が  $1.0 \times 1.0 \times 1.0$  cm の方が、 $0.5 \times 0.5 \times 1.0$  cm よりも良いという結果になる。秋永ら (1986) が立方体状のジャガイモで加熱調理を行って、一辺が 2 cm 以上になると不均一加熱いわゆる加熱むらが起こり、クッキング速度が一辺 2.0, 1.0, 3.0, 4.0 cm の順に大きくなったと報告をしているが、以上の本研究結果の考察から、これらの結果を説明することができる。直方板状試料 既報 (久保田ら, 1990) において、直方体板状試料に対して、試料の重量を一定にして、形状を変える実験を行った。乾燥速度が  $3.4 \times 3.4 \times 0.3$  cm,  $1.5 \times 1.5 \times 1.5$  cm,  $2.7 \times 2.7 \times 0.5$  cm の順に大きくなる結果を得た。

くすることによって褐変化の防止が可能であると考えられる。長さを一定にして、幅と厚さを変えて乾燥率90%における褐変化の現象を測定した結果を Table 4 に示す。 $K$  の値も合わせて示す。これに対応する実験結果を Fig. 5 に示す。

Table 3 および4より、長さと同幅とが、2.0 cm まででは、厚さが 0.25 cm あたりから、また、2.5 cm 以上では、厚さが 0.15 cm あたりから褐変化が減少しはじめ、厚さが 0.1 cm になると褐変化の防止が可能であることがわかる。製品の形状が問題にならない場合には、褐変化しない薄い厚さ 0.1 cm 程度の板状試料の方が、前述の褐変化しない立方体状試料 1.0×1.0×1.0 cm のものと比較して、乾燥速度が大きく好ましいと考えられる。長さと同幅の方向に定在波を発生して吸収熱量が大きくなっているが、厚さが著しく薄いために、試料の中心温度が褐変化温度に達していないためと考えられる。Fig. 5 より、恒率乾燥期間の速度への厚さの影響はほとんどみられないが、速度上昇期間が短縮して速くなっている。

Table 4 より、褐変化の防止に対して表面積を増加させると良いと考えられる。そこで試料に切り刻みを入れると効果があるのではないかと考えられ、以下の実験を行った。正方板状の  $2l_x \times 2l_y \times 2l_z = 0.5 \times 4.0 \times 4.0$  cm のA試料 ( $A_{10} = N_0 \times 40.0$  cm<sup>2</sup>) と、これの表裏面に長さ方向に深さ 1.2 mm の切り刻みを28筋入れたB試料 ( $A_{10} = N_0 \times 93.8$  cm<sup>2</sup>) と、これに更に幅方向に切り刻みを5筋入れたC試料 ( $A_{10} = N_0 \times 103.2$  cm<sup>2</sup>) とを比較する実験を行った。試料A, B, Cに対して、 $K$  の値は、0.08004, 0.08428, 0.08671 min<sup>-1</sup>, また、 $K_0$  の値は、0.07662, 0.08805, 0.08653 min<sup>-1</sup> になった。実験結果を Fig. 6 に示す。試料B, Cが、試料Aに比較して乾燥の後半で速くなっている。これは、切り刻み口が開いてきて表面積を大きくしたためと考えられる。また試料Aは、厚さが 0.5 cm で薄くないので褐変化をしたが、試料BおよびCでは褐変化を起さなかった。乾燥の進行に伴って切り刻み口が開いて表面積が大きくなって、厚さ 0.1 cm の薄くした試料と同様な効果が得られたためと考えられる。切り刻み口を増した試料Cが、試料Bよりも僅かに遅くなっているが、これは表面での定在波の発生が減少したためと考えられる。

以上から、褐変化の防止は、試料の温度を褐変化する温度に上げないようにすることが必要と考えられる。前報(呂ら, 1990)で示した関係式によると、本研究で検討した試料の大きさ、形状以外に、加熱出力、表面温度なども影響してくると思われる。これらについては、赤星ら(1990)による研究があり参考にな

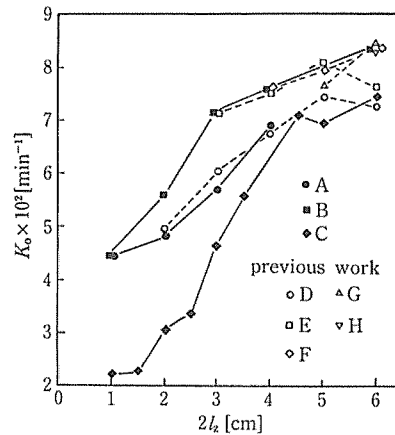


Fig. 4. Relations among the parameter  $K_0 \times 10^2$  [min<sup>-1</sup>] and the length  $2l_z$  [cm].

Sample: potato  $g_0 = 50$  g,  $P_w = 187$  W, A:  $2l_x = 1.0$  cm, B, C:  $2l_x \times 2l_y = 1.0 \times 1.0$ ,  $0.5 \times 0.5$  cm, D, E, F, G, H:  $2l_x \times 2l_y = 0.5 \times 2.0$ ,  $0.5 \times 3.0$ ,  $0.5 \times 4.0$ ,  $0.5 \times 5.0$ ,  $0.5 \times 6.0$  cm.

Table 3. Browning and the calculated values of parameter  $K_0 \times 10^2$  [min] in Eq. (2).

Sample: potato ( $2l_x$  [cm],  $2l_y$  [cm],  $2l_z$  [cm], samples),  $g_0$  [g],  $P_w = 187$  W

$2l_z$	$2l_y$	$2l_x$	$g_0$	$N_B$	$K_0 \times 10^2$
1.0	1.0	1.0	50.8	0	4.673
4.0	0.5	0.5	50.9	100	5.690
4.0	1.0	0.25	51.3	100	6.125
2.0	2.0	0.25	50.4	45	5.495
2.0	1.0	0.5	50.5	100	5.228
4.0	2.5	0.1	49.9	0	7.845

Where,  $N_B$  [%]: percentage of browning samples at  $G_B = 0.90$

Table 4. Browning and the calculated values of parameter  $K_o \times 10^2$  [min] in Eq. (2).

Sample: potato ( $2l_x$  [cm],  $2l_y$  [cm],  $2l_z=4.0$  cm, samples),  $g_o$  [g],  $P_w=187$  W

$2l_y$	$2l_x$	$g_o$	$N_o$	$A_{to}$	$N_B$	$K_o \times 10^2$
1.0	0.5	50.3	23	299	100	5.956
2.0	0.5	52.0	12	264	100	6.809
3.0	0.5	52.2	8	248	100	7.615
4.0	0.5	50.8	6	240	100	8.004
2.5	0.15	51.8	31	680	52	7.301
2.5	0.10	50.1	56	980	0	7.845

Where,  $A_{to}$  [cm<sup>2</sup>): total surface area of samples,  $N_B$  [%]: percentage of browning samples at  $G_B=0.90$

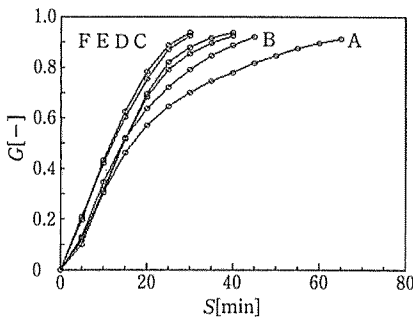


Fig. 5. Relations among the drying-ratio  $G[-]$  and the time  $S$  [min].

Sample: potato ( $2l_x$  [cm],  $2l_y$  [cm],  $2l_z=4.0$  cm, samples),  $g_o=50$  g,  $P_w=187$  W,  $2l_x \times 2l_y=A, B, C, D, E, F: 0.5 \times 1.0, 0.5 \times 2.0, 0.5 \times 3.0, 0.5 \times 4.0, 0.15 \times 2.5, 0.10 \times 2.5$  cm.

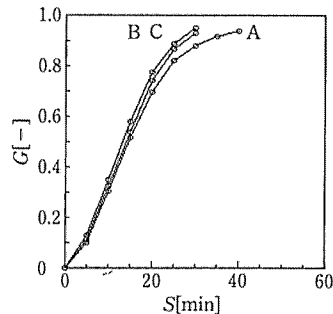


Fig. 6. Relations among the drying-ratio  $G[-]$  and the time  $S$  [min].

Sample: potato ( $2l_x \times 2l_y \times 2l_z=4.0 \times 4.0 \times 0.5$  cm, samples),  $g_o=A, B, C: 50.8, 55.0, 51.8$  g,  $P_w=187$  W, Cutter ditch (depth 1.2 mm at double surface); A: nothing, B: length side 28 ditch, C: length  $\times$  width side 28  $\times$  5 ditch.

る。円板状の直径 4.0 cm, 厚さ 0.5 cm のジャガイモを 130 g (20個) を, 加熱出力 150 W, 通風空気温度 30°C (0.8 m/s) として, 品温を 31~42°C になるようにするのが良い(乾燥時間2.5時間)と報告をしている。

本研究結果によると, 前報 (呂ら, 1990) で示した関係式は, 試料の大きさ, 形状による定在波の発生の有無とか, 含水率の変化に伴う吸収効率の変化などを考慮しないと使用できないことがわかり, マイクロ波加熱に関する定量的な解析が大変困難であることが示唆された。また, 加熱むら防止には, 加熱出力, 試料投入量, 通風空気温度などの影響を調べる研究 (赤星ら, 1990) と合わせて, 試料の大きさ, 形状を変える研究を進めることが必要であることが示唆された。

### 結 言

食品のマイクロ波加熱乾燥をする場合, 乾燥速度の大小よりも褐変化など加熱むらの発生が問題となる。一辺 1 cm 以下の角柱状試料ならびに直径 1 cm 以下の円柱状試料においては, 長さを 1 cm 以下にすると褐変化が起らなく, 立方体 1.0  $\times$  1.0  $\times$  1.0 cm (円柱状の場合は, 直径 1 cm, 長さ 1 cm) のものが乾燥速度が大きくて良いという結果を得た。長さが 2 cm 以上になると長さ方向に定在波が発生して乾燥速度が大きくなるが, 両端 0.8 cm 程度を残し, 褐変化が進行して好ましくない結果になった。一辺が 2 cm 以上の板

状試料では、2 cm 以上の方向に定在波が発生して乾燥速度が大きくなるが、四隅 0.8 cm 程度を残し、褐変化が進行して好ましくない結果になった。厚さを 0.2 cm 程度にすると褐変化を少なくでき、0.1 cm 程度にすると褐変化が起こらなくできる結果を得た。前述の立方体のものよりも乾燥速度が大きくなる結果を得た。また、厚さ 0.5 cm のものに切り刻みを入れても褐変化が起らない結果を得た。

なお、本研究の一部は、平成 2 年 10 月 13 日の金沢市（金沢大学）における化学工学会第 23 回秋季大会において報告したものである。大変に地味な研究であるが、興味を持って頂ける方のご支援を期待している。

### 使 用 記 号

$A_{10}$ : 全試料の初期表面積 [cm <sup>2</sup> ]	$2l_z, 2l_y, 2l_x$
$G$ : 式(1)で定義する乾燥率 [-]	: 試料の長さ, 幅, 厚さ [cm]
$g$ : 試料の重量 [g]	$N_0$ : 試料の初期本数
$J, K$ : 式(2)のパラメータ [-], [min <sup>-1</sup> ]	$P_w$ : 加熱出力 [W]
$K_0$ : $K$ の値の補正值 (呂ら, 1990) [min <sup>-1</sup> ]	$S$ : 加熱時間 [min]
$2l_r$ : 試料の半径 [cm]	添字 :
	o : 初期値, e : 最終値, b : 褐変化

### 引 用 文 献

- 赤星亮一・又重英一, 1990, マイクロ波を利用した馬鈴薯の通風乾燥. 日食工誌, 37 : 581-588.
- 秋永優子・香西みどり・畑江敬子・島田淳子, 1986, 電子レンジ調理におけるジャガイモの軟化に及ぼす調理条件の影響. 家政学雑誌, 37 : 955-960.
- 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, 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, 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 : 投稿中.

## Studies among the Sample Size and the Browning on Microwave Heated Drying of Potato

Liang Tong Lu, Kiyoshi KUBOTA and Kanichi SUZUKI

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

In a previous paper (KUBOTA *et al.*, 1990, LU *et al.*, 1990), we have studied a convenient microwave heated drying instrument, and studied the simple drying-rate equations of potato and so on by using the some shapes of samples. And then, we observed that the browning according the temperature rises increased by increasing in size of potato samples, and the browning depended on the location.

In this paper, we studied the relations among the size and shape and the browning on microwave heated drying of potato, and we could decrease the browning according the temperature rises by gradually reducing the maximum length and the thickness.