

マイクロ波加熱におけるエネルギー 吸収効率の測定に関する研究

久保田 清・于 秀 法・津島 和美・奥谷 紀男
田村 由紀・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 前報において、マイクロ波加熱による高含水率の浸漬米の製造¹⁾、デンプン性食品の殺菌²⁾、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^{3,4)}に関する研究を行った結果について報告した。各種マイクロ波加熱の装置設計を進めていくためには、エネルギー吸収効率ならびにマイクロ波加熱における食品の温度上昇の測定に関する研究を進めていくことが必要となる。これまでに、マイクロ波加熱における回分型容器内の液状試料のエネルギー吸収効率に関する研究⁵⁾を行ってきた。

本研究では、電子レンジを使用し、回分型容器内の固体状試料については重量減少測定、また、流通容器内の液状試料については温度上昇測定を行って、簡単な熱収支式を用いて、エネルギー吸収効率を求める研究を行った。電子レンジ内の固体状試料のエネルギー吸収効率は、マイクロ波加熱による重量変化の測定によって求めることができ、試料の供給含水量によって変わった。

電子レンジ内に流通型容器を取りつけて液状試料を流通させた場合のエネルギー吸収効率は、電子レンジへの流入出口における温度変化の測定によって求めることができた。流通型容器内の液状試料のエネルギー吸収効率は回分型容器内のそれと同じように大きな値となった。本研究で得られた結果は、食品のクッキング、乾燥などのような各種のマイクロ波加熱処理装置を設計する場合に有用となる。

緒 言

食品のマイクロ波加熱は、内部発熱によって加熱時間が短い、装置を加熱しないで加熱ができるなどの特徴がある。家庭用の電子レンジが普及して、成書など^{6,7)}も出されているが、家政学的な研究が多く、工業的な利用となると、発砲乾燥卵の製造⁸⁾、お茶とかポテトチップス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、装置内に電磁波分布⁹⁾、試料内に加熱むら^{10,11)}を生じることが問題となり、その防止策を検討するために必要となる食品の温度上昇、エネルギー吸収効率の測定に関する研究など基礎的な定量的な研究報告が皆無であると言って過言でないためと考えられる。電子レンジの加熱出力表示がプラス15%、マイナス10%である¹²⁾とか言われていることから考えて、マイクロ波加熱に関する基礎的な定量的な研究は困難なものと考えられる。

前報では、市販の電子レンジを使用して、回分型容器内での液状試料のエネルギー吸収効率に関する研究⁵⁾を行ってきた。液状試料として、誘電率が異なる水とサラダ油とを用いた。水だけ、油だけを入れる場合、投入量がある程度より多くなると、エネルギー吸収効率に大差がなくなるが、両者を同時に入れると水が選択加熱された。前報で得られた定量的成果は、マイクロ波加熱によるフライング装置の設計、操作を最適化して考えていくのに有用になるものと考えられる。

本研究では、市販の電子レンジを使用し、回分型容器内における固体状試料のエネルギー吸収効率に関する研究を行った結果について報告する。電子レンジ内での試料の位置とか試料の投入量などを変えて、重量

減少を測定してエネルギー吸収効率を求めた。

また、試料の加熱むら防止対策の一つとして、回分型を流通型にすると良いと考えられる。電子レンジ内に流通型容器を取りつけて、流通型容器内における液状試料のエネルギー吸収効率に関する研究を行った結果について報告する。液状試料の電子レンジの流入出口における温度差を測定して、エネルギー吸収効率を求めた。

実験方法

試料 固体状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プ多加水熟成めんを、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）、含水ポリウレタンフォーム（市販のポリウレタンフォームに脱イオン水を含水したもの）を使用した。茹でうどんは、1本当たり平均径大側 4 mm、径小側 2 mm、長さが 35 cm、平均重量は約 3 g、密度は 1.106 g/cm³ であった。含水量は、115°C、2時間30分の絶乾重量測定により求めた結果、70.1%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て、0.8116 cal/g・°C とした。予備実験では、小麦粉どう（鳥越製粉製小麦粉無漂白白鳥400部に対して脱イオン水220部を加水したもの）、浸漬米（広島県経済連製パールライス宝を 50°C の水道水に1時間浸漬したもの）、炊飯米（浸漬米400部に対して水道水380部を加えて自動炊飯器で22分炊飯したもの）も使用した。

含水ポリウレタンフォームに使用したポリウレタンフォームは、市販の厚さ 5 および 10 mm のものを直径18および 25 cm の円板状に製形したものを使用した。比熱は、成書に示される物性値を参考にして 0.37 cal/g・°C とした。

液状試料として、脱イオン水、砂糖水、食塩水を使用した。砂糖は、三井製糖製スプーン印上白糖、食塩は、日本たばこ産業製食塩（塩化ナトリウム99%以上）を使用し、それぞれ脱イオン水に溶解して、所定濃度 5、10および15重量%の砂糖水、食塩水とした。

実験装置 固体状試料に対する予備実験では、東芝製 ER-245 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。通風有無の影響を調べるために、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。エアーポンプ（イワキ製、AP-220 型、37 W、最大 18 l/min）から空気を送り、回転皿上の試料に円錐形通風口を通して通風ができるようにした。電子レンジの改造に伴って電磁波漏れが起っていない確認は、HOLADAY 社製の電波流量測定器 HI-1501 型（船井電機^(株)の弘中泰雅氏紹介パンフレットで購入）により行った。更に、十分な安全をとるため、装置前部に可動できるステンレス網張り板を取り付けた。

固体状試料に対する本実験では、加熱出力が3段切り替えができる松下電気産業製 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。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0.849, 0.812, 0.788であった。回転皿（直径 31 cm）の上に家庭用アルミ箔（昭和アルミニウム製、厚さ 15 μm）を敷き、その上に試料高さを変えるために発砲ポリスチレン板（厚さ 13 mm/1枚、直径 24 cm）を重ね、その上にテフロン板（厚さ 3 mm、直径 24 cm）を置き、試料台とした。試料台には、試料を20本までしか重ならないように並べることができないため、30本、60本の場合には、蒸発水が抜ける間隔を置いて、2段、3段とした。一般に電子レンジでは、回転皿上を分散加熱する型と中心部を局所加熱する型とがある¹²⁾ と言われているが、茹でうどんを中央部と周辺部とに置いて重量変化の測定を行って比較した結果、1～2%の差で大小関係を得られなく、中心部を局所加熱する型でない判断された。含水ポリウレタンフォームに対しては試料下部からの蒸発水分が放出されやすいようにテフロン棒をスダレ状に並べた試料台も使用した。

液状試料の実験では、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。装置の概要を Fig. 1 に示す。弱モードは、12秒 ON、18秒 OFF の断続型になっていて 200 W 相当であった。試料管には、両端シリコン栓付きのガラス管（管内径 2.17, 2.60, 3.58, 4.56 cm でいずれも

長さ 10 cm ; ゴム栓が入って試料部分長さは、5.50, 8.65, 7.20, 6.70 cm で、測定容積 20.2, 45.9, 72.5, 109.4 cc : 試料管 A, B, C, D とする) ならびに蚊取り線香状に巻いたシリコンチューブ (管外径 1.0, 1.8 cm, 内径 0.7, 1.2 cm, 長さ 53.7, 19.2 cm で、測定容積 204, 212 cc : 試料管 E, F とする) を使用した。これらは、回転皿を除いて発砲ポリスチレン板上に置いた。試料管 E, F に対しては、後で述べる固体状試料の実験結果を参考にして、試料管が床板から 3 cm 程度になるように発砲ポリスチレン板を厚さ 2.35 cm とした。いずれの試料管も接続管とシリコンチューブ (外径 11 mm, 内径 8 mm) を用いて接続した。試料管以外の装置内部分は、マイクロ波エネルギーの照射が起らないようにアルミ箔テープ (米国スリーエム社製, Scotch アルミテープ NA-50 型) を巻いた。試料管 A~D 使用の場合、ポンプの容量の関係で、500 W とすると沸騰が起るため弱モードとした。また、装置内部分の接続管、試料管をポリウレタンフォーム (厚さ 1 cm) で保温した。

液状試料は、下部に活栓の付いた 5 l ポリタンクで調整して、電子レンジ内の試料管に送るようにした。試料温度は、投げ込みヒーター (八光電気製, 300 W), マグネット式温度調節器 (新日本計測製, MS-09 型), トランジスターリレー (柴田化学器機工業製), マグネティックスターラー (井内盛栄堂製, HS-3 型) を用いて所定温度とした。試料は、流量可変式ローラーポンプ (古江サイエンス製, RP-VT 型) を使用して、試料管に流入出した。ポンプの表示目盛を一定にさせて実験を行って、流量は、出口試料をメスシリンダーで受けとることによって検量して求めた。

電子レンジの壁板に小穴をあけてガラス管を通して、空気を流通する場合には、マイクに波漏れが起らなかったが、ガラス管に水を流通すると漏れが発生した。アルミ箔テープを、壁板とガラス管の接合部分にしっかりと重ねて幅広く巻きつけることによって漏れ防止ができた。更に安全をとるため、装置前部に可動できるステンレス網張り板を取りつけた。

重量変化の測定 固体状試料を回分型で加熱する場合の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、直ちに試料台と共に天秤で重量測定を行うことにより行った。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-照射修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。この補正を行わないと、測定条件によっては、加熱効率が 10% 位大きくなる場合もあり、固体状試料の重量変化測定の実験を進める上で重要な知見が得られたものと考えられる。

温度変化の測定 液状試料を三角フラスコなどに入れて回分型で加熱した場合の試料の温度変化の測定は、前報⁵⁾と同様にして行った。マイクロ波加熱を所定時間行った試料は、電子レンジから取り出し、直ちに温度測定を行った。温度測定には、市販のアルメル・クロメル熱電対 (ステンレス保護管径 1 mm) を用い、記録計 (横河電機製, 3056-22 型) を使用した。容器中の試料の量が少ない場合には、熱電対の先にビニールテープ小片を貼りつけて、容器内で手で振らせることによって平均温度を測定し、また、試料の量が多い場合には、試料容器の底部にマグネティックスターラー (東洋製作所製, 8-2 型) を取りつけて測定した。また、液状試料を流通型試料容器で加熱する場合の試料温度は、電子レンジ入口および出口部分の接続

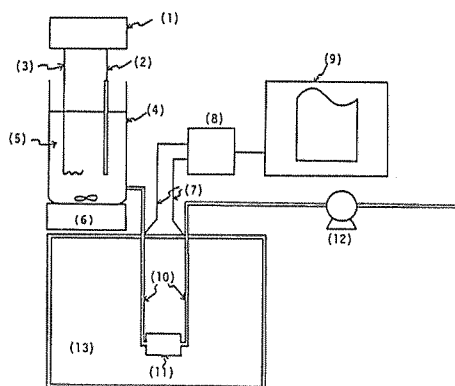


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

(1) transistor relay, (2) thermo-regulator, (3) heater, (4) sample tank, (5) sample, (6) magnetic stirrer, (7) thermocouple, (8) ice box, (9) voltage recorder, (10) joint tube, (11) sample tube, (12) rotary pump, (13) microwave oven

管にT字型管を取りつけて、アルメル・クロメル熱電対を挿入して、自動記録により行った。弱モードの場合は、出口温度が正弦波的となるため、平均値を求めて出口温度とした。

熱 関 係 式

回分容器内の試料加熱 試料が吸収した熱量は、材料本体の温度上昇以外に、試料中の水分蒸発のための熱量損失、容器と保温材の加熱のための熱量損失、周辺への伝導、対流、放射による電熱損失を伴うことになる。試料を回分容器内に入れて電子レンジ内で加熱を行った場合の熱収支式は次式のように表わされる。

$$Q_i = Q_s + Q_g + Q_r$$

$$= \eta_s P / W_s + \eta_g P / W_g + \eta_r P / W_r \quad (1)$$

$$Q_s W_s + Q_g W_g + Q_r W_r$$

$$= (Cp_s W_s + k_g Cp_g W_g + k_r Cp_r W_r) (d\theta/d\theta) + \phi_s (dW_s/d\theta) + UA (T - T_r) \quad (2)$$

ここで、 $P[W]$ は供給熱量いわゆる電子レンジの加熱出力、 $Q[W \cdot kg^{-1}]$ は試料など単位質量当たりの吸収熱量いわゆる内部発熱量、 $\eta[-]$ は試料などのエネルギー吸収効率、 $W[kg]$ と $Cp[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$ は、試料などの質量と比熱、 $\phi_s[J \cdot kg^{-1}]$ は水の蒸発潜熱、 $T[K]$ 、 $\theta[s]$ 、 $k[-]$ は、それぞれ試料などの温度、加熱時間、温度上昇分率⁹⁾、 $A[m^2]$ と $U[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$ は、容器の表面積と総括伝熱係数である。また、添字 t, s, g, f, r は、それぞれ全体積、試料、容器、保温材、容器周辺を示す。本実験では、試料に比較して、容器、保温材の誘電率が小さく、質量も僅かであることから、 $Q_g \approx 0$ 、 $Q_r \approx 0$ として考えることができる。

流通型容器内の試料加熱 試料が密閉されて水分蒸発が起らない状態で容器内を流通している定常状態を考えると、試料が吸収する熱量は、試料本体の温度上昇以外には周辺への伝導、対流、放射による伝熱損失だけとなる。この場合の熱収支式は次式のように表わされる。

$$Q_s W_s = Cp W_s (\Delta T / \Delta \theta) + UA (T - T_r) \quad (3)$$

$$\Delta T = T_o - T_i, \quad \Delta \theta = V_s / v_s \quad (4), (5)$$

$$W_s = V_s \cdot \rho_s \quad (6)$$

ここで、 $\Delta T[K]$ と $\Delta \theta[s]$ は、試料管内の温度上昇と滞留時間、 $V_s[m^3]$ 、 $\rho_s[kg \cdot m^{-3}]$ 、 $v_s[m^3 \cdot s^{-1}]$ は、それぞれ試料管内の試料の体積、密度、体積流量である添字 o と i は、装置出口と入口を示す。式(3)の UA の値は、マイクロ波加熱を行なわない状態 $Q_s = 0$ として、加熱した試料を試料管内を流通し、試料の温度低下の値を測定し、簡便に求めることができる。 T_r は、簡単に室温として取り扱ってよいと考えられる。

実験結果と考察

固体状試料の褐変現象 食品などを電子レンジ内で加熱すると、装置内に電磁波分布⁹⁾、試料内に加熱むら^{7, 10, 11)}を生じることが報告されてきている。前報⁵⁾に示す液状試料の加熱では、平均温度の測定を行ってエネルギー吸収効率を求め、試料内の加熱むらを問題としなかった。対流混合をおこしにくいゲル状試料とか固体状試料を混合をしないで加熱する場合には、加熱むらが問題になってくる。本研究では、固体状試料を取り扱い、温度上昇、エネルギー吸収効率の測定を行うことを目的としているが、その前にこれらの問題点に関する知見を得るための予備実験を行った。

装置内の電磁波分布とか試料内の加熱むらを調べる方法として、次に示すような方法⁷⁾が考えられる。非可逆的な変色をするサーモラベル^{3, 4)}、蛍光灯ランプ、ネオンランプの点灯、ヨード染色デンプン糊化液の褪色、アドヘアノリの白濁、赤外線放射温度計、光ファイバーサーモメータの使用などが考えられるが、それぞれ一長一短がある。本研究では、デンプン系食品が局部的に加熱されていくと褐変化することから、褐変化を観察する簡便な方法を採用した。

加熱むら防止には、次に示すような方法が考えられる。試料の投入量、大きさ、形状、置き方、水分量、成分などを変える。移動、半転、攪拌、流動化、連続化などを試みる。試料容器の材質、大きさ、形状などを変えたり、反射、吸熱、発熱材の使用を試みる。加熱電力の変化、減圧、熱媒体の使用、通風加熱など

外部加熱方法との併用を試みる。ここでは、エネルギー吸収効率を求めるために必要な予備実験に限ることにした。

小麦粉どうなどを回転皿の上にクッキングシートなどを下敷材として置いて乾燥する実験を行って、試料の大きさ、形状、水分量、置き方、加熱電力の与え方などで褐変現象が異なってくる結果を得た。以下の研究を進めるのに参考となる次に列挙する知見が得られた。(1). 大きい小麦粉どうを1個置いた場合は、中心部から褐変し、次いで周辺に近い環状部が褐変した。(2). 小さい小麦粉どうを室温で僅かに水分を低下させて、それを数個置いた場合は、上記のものより褐変化が少なくなった。環状部に置いているものから、褐変し、各試料は中心部から褐変した。(3). 小麦粉どうの厚さを薄くするとか、表面積を同じにして、2個に分割するとか、環状にするとかして最大幅を小さくすると褐変化を少なくできた。(4). 加熱出力を断続するなどして低減するとか、通風を行うと褐変化を少なくできた。(5). 表面よりも裏面の方の褐変化が大きく、また割ってみると中心部の褐変が烈しかった。(6). アルミ箔を下敷材にすると乾燥が非常に起こりにくかった。(7). 浸漬米、乾燥米を散りばめて置く場合、不規則な位置から褐変が起こった。重なりが生じているところで褐変が起こった。(8). 茹でうどんを散りばめて置いた場合、1 cm 位の幅で長さ方向に褐変が起こった。両端の1 cm 位のところの乾燥が大変に起こりにくかった。100°C の水中での定在波の波長 0.82 cm と関係づけられ定在波が一部発生していると考えられる。

以上の予備実験から次のようなことが考えられる。液状試料について試料内で定在波が一部発生すると報告^{7,10,11)} されているが、固体状試料でも発生し、褐変化が起こる原因になる。試料が大きいと、蒸発水が飛散しにくく熱が放散しにくい個所で、局部的な温度上昇を生じて、褐変化の原因になる。金属の反射物の近くでエネルギー吸収が起こりにくい現象が発生する。

固体状試料のエネルギー吸収効率 固体状試料のエネルギー吸収効率を水分蒸発量から測定する実験を試みた。簡単のため、式(2)において、試料台とか空気中への放熱が無視できると仮定して次式を用いてエネルギー吸収効率を求めた。

$$\eta = (Cp_s W_{sf} \Delta T + \phi_s \Delta W_s) / P \Delta \theta \quad (7)$$

$$\text{ただし、} \Delta T = 373.2 - T_r \quad (8)$$

ここで、 T [K] と $\Delta \theta$ [s] は、試料が 100°C になるまでの温度上昇値と加熱時間、 W_{sf} [kg] は試料の初期重量、 ΔW_s [kg] は試料の重量変化で蒸発水分量に相当する。

まずは、試料台とか空気中への放熱が大きいと予想されるが、褐変化が起こりにくい茹でうどんを用いて実験を行った。上記の予備実験で問題になった金属の反射物の影響を調べることが必要である。そこで、回転皿にアルミ箔を敷いて、それを基準として高さを発砲ポリスチレン板を用いて変えて試料を置く実験を行った。試料台は、前述したテフロン板とした。加熱出力 600 W、茹でうどん10本、加熱時間3分として行って得られた吸収効率 η [-] と高さ h [cm] との関係を Fig. 2 に示す。加熱効率がアルミ箔から約3および9 cm のところで極大を示し、約6および12 cm のところで極小を示し、変動幅が10%位になっている。ここで得られた結果は、空気中での定在波の波長 6.1 cm と関係づけられ定在波が一部発生していると考えられる。また、Fig. 2 から金属の反射物がある場合には、試料を接近させていくと吸収効率が低下していくため、試料は3 cm 以上離して置かねばならないことがわかる。以下の実験では、3 cm 以上離して置くことにした。

次に、茹でうどんの投入量を10, 20, 40および60本と変え、加熱出力を600, 240および180 W と変えて吸収効率を求める実験を行った。試料中の水分の半分が蒸発するまでの時間に対して得られた吸収効率 η [-] と試料量 W_s [g] との関係を Fig. 3 に示す。試料量を60~180 g とした場合の効率が前述した脱イオン水 240 cc に対して得られた効率に近い結果になった。テフロン板は、耐熱性があり、付着しにくいということで使用したが、熱伝導が低く、蒸発水分を凝縮させにくいという利点があり役立つ結果となっている。また、加熱時間が短くて空気中への放熱も予想に反して大変に小さいと考えられる。茹でうどんに対しては、大胆な仮定をした式(7)が使用できることになる。

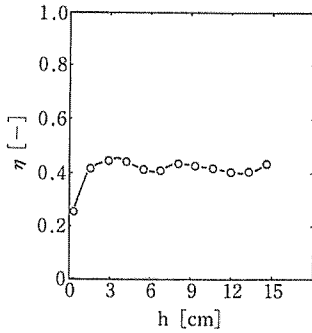


Fig. 2 Relations among the absorbed efficiency η [-] and the height of sample plate (polytetrafluoroethylene plate) from aluminium sheet h [cm]

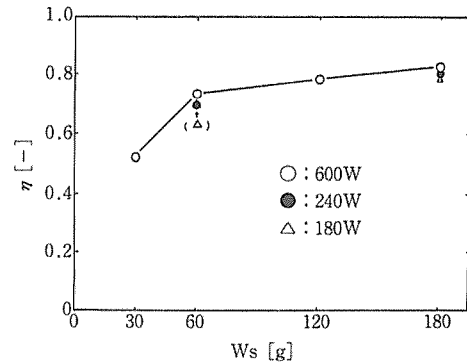


Fig. 3 Relations among the absorbed efficiency η [-] and the weight of cooked udon W_s [g]

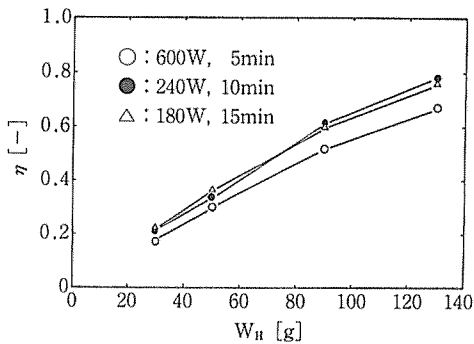


Fig. 4 Relations among the absorbed efficiency η [-] and the weight of water in polyurethane foam W_H [g]

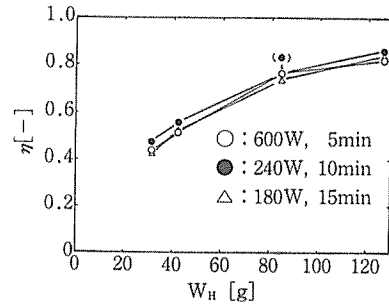


Fig. 5 Relations among the absorbed efficiency η [-] and the weight of water in cooked udon W_H [g]

茹でうどんは、幅が小さくマイクロ波を透過して吸収効率が小さくなるのではないかと予想したが、これにも反する結果となった。長さ方向に定在波を生じるなどして吸収効率が大きくなっているのではないかと考えられる。また、試料内部の水分移動は大変に速いと考えられる。水分移動は、外部加熱による乾燥のみられる含水率差による遅い拡散移動でなく、水蒸気圧差によって起っているのではないかと考えられる。更に、試料の量が同じ時には、加熱出力が大きいと吸収効率が低下すると予想したが、Fig. 3 によると本実験条件下ではほぼ同じになっている。これも興味深い結果である。

次に、試料内部の水分移動が律速にならないと予想される含水ポリウレタンフォームを用いて吸収効率を求める実験を行った。含水量を変えたポリウレタンフォーム（厚さ 10 mm, 直径 25 cm）に対して得られた吸収効率 η [-] と含水量 W_H [g] との関係を図 4 に示す。また、同じ実験条件下で行った茹でうどんに対する結果を図 5 に示す。Fig. 4 と Fig. 5 とを比較すると、含水ポリウレタンフォームに対する吸収効率の方が小さく予想に反する結果になっている。ポリウレタン内部に蒸発水が多く凝縮しているのではないかと考えて、厚さを 5 mm と薄く変えて実験を行った。吸収効率が僅かに大きくなったが、大差ない結果となった。

含水ポリウレタンフォームの裏のテフロン板上に凝縮水が生じていたことから、吸収効率が低下したと考えられ、テフロン板の試料台を前述したテフロン棒をスダレ状に並べた試料台に変えて実験を行った。得られた結果を図 6 に示す。水分量の多いところでは、茹でうどんに対する値にほぼ近い値になっている。

水分量が少ないところではいくらか低い値になっているが、ポリウレタン内部に蒸発水がいくらか凝縮をして、その影響が現れているのではないかと考えられる。

以上から、テフロン板上に置いた茹でうどんは、表面積が大きくて放熱が大きく吸収効率が小さくなると予想したが脱イオン水と同等の吸収効率が得られるという結果が得られた。試料の周辺から蒸発水が直ちに飛散して、熱損失が少なく、大きな試料よりも吸収効率が大きく測定でき、吸収効率を求める場合の固体状試料として有用であると考えられる。また、大きな試料を加熱する場合には、下部から蒸発水が飛散しやすい試料台を使用しないと、吸収効率が低下し、褐変化などの原因になり、好ましくないということがわかった。

液状試料のエネルギー吸収効率 液状試料のエネルギー吸収効率を製置入口と出口の温度差から測定する実験を行った。エネルギー吸収効率は式(1)と式(3)を用いて求めた。マイクロ波加熱を回分型容器で行う場合は、装置内の電磁波分布とか、試料内の加熱むらが発生する。攪拌混合が困難なペースト状のものなどでは、局部的に加熱温度が低い部分が生じるなどして、殺菌操作などの場合に問題となる。

マイクロ波を透過する耐熱材プラスチックなどを用いて流通型容器を製作し、ペースト状のものでもモノポンプ方式のようにして製作すると、装置内の電磁波分布の影響とか、試料内の加熱むらによる影響の心配がなくなると考えられる。また、加熱温度と処理時間の制御も簡単に試料の出口温度を測定することによって行うことができ、過加熱になるとか処理時間不十分というばらつきが起こる心配もなくなり有用な方式と考えられる。流通型容器を構築するために役立つ知見を得るために、容器の大きさ、形状がどのような影響をするかを調べることを目的として、液状試料を用いてエネルギー吸収効率を求める研究を行った。

まず、前述の試料管A, B, CおよびDを使用して、試料管の大きさ、形状の比較を試みた。試料には脱イオン水を用いた。初期温度は、マイクロ波加熱を行わないで、総括伝熱係数を求める場合には 60°C とし、また、加熱を行う場合には 20°C とした。本実験に使用した電子レンジ、試料管の位置を変えると吸収効率が大きく変わった。以下に示す比較実験の結果は、試料管を置く位置を一定させて行ったものである。弱モードで行った。

式(3)の熱損失の補正の項は、実験から総括伝熱係数 U と表面積 A の積 UA を求め、 A の値は不定としての取り扱いでも良い。参考までに、試料管と接続管の外部表面積を概算して U の値を求めた。その結果を Fig. 7 に示す。試料管B, CおよびDにおいてほぼ一定の値となっており得られている。試料管Aでは、試料管入口と出口との温度差が僅少となり精度良く UA が得られなかったため、試料管B, CおよびDで得られた U の値に試料管Aの A の値を掛けて UA の値を求めて用いた。試料管を変えて温度上昇 $\Delta T[\text{K}]$ と滞留時間 $\Delta \theta[\text{s}]$ との関係求めた結果を Fig. 8 に、吸収効率 $\eta[-]$ と滞留時間 $\Delta \theta[\text{s}]$ との関係を示す。また、各試料管に対して得られた試料管単位質量当たりの吸収エネルギー $\theta_s[\text{W}\cdot\text{kg}^{-1}]$ と吸収効率 $\eta[-]$ の平均値をそれぞれ求め、それらの結果と試料体積 $V_s[\text{m}^3]$ との関係を示す。Fig. 10 と Fig. 11 に示す。Fig. 10 によると、単位質量当たりの吸収エネルギー Q_s の値が、試料体積が少なくなると急激に大きくなっている。これが試料内部で多くの水蒸気を発生させて内部と外部の間に圧力を生じさせ、速い乾燥を起させる推進力になっているものと考えられる。また、膨化乾燥の原因になったり、褐変化の原因にもなってくると考えられる。Fig. 11 によると、吸収効率 η の値が、試料体積が少なくなると小さくなっている。試料管の違いによる変動は、定在波が一部発生して、試料管の長さとの違いによ

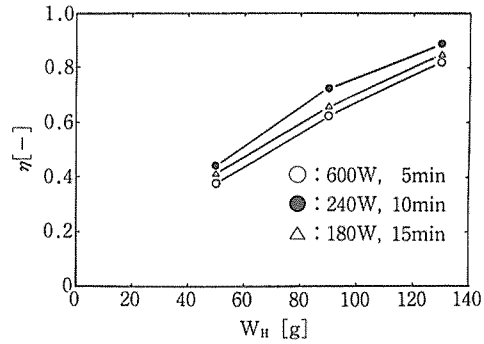


Fig. 6 Relations among the absorbed efficiency $\eta[-]$ and the weight of water in polyurethane foam $W_H[\text{g}]$ (sample table changed to rod pattern type of tetrafluorethylene)

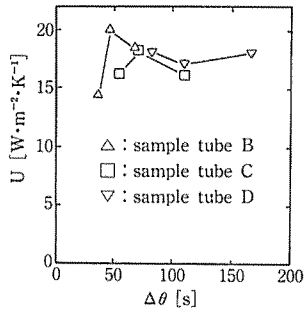


Fig. 7 Relations among the over-all coefficient of heat transfer U [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$] and the residence time $\Delta\theta$ [s]

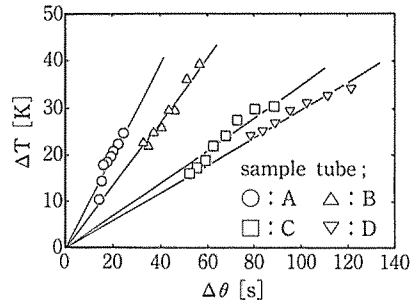


Fig. 8 Relations among the temperature rise ΔT [K] and the residence time $\Delta\theta$ [s]

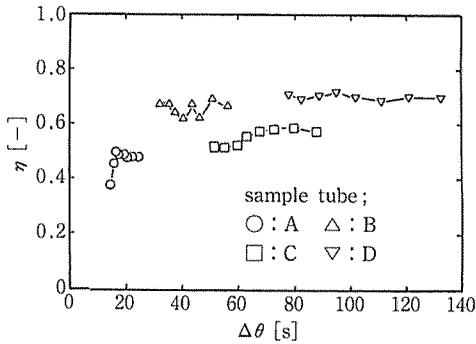


Fig. 9 Relations among the absorbed efficiency η [-] and the residence time of water $\Delta\theta$ [s]

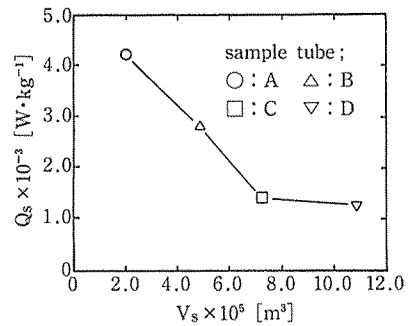


Fig. 10 Relations among the absorbed energy $Q_s \times 10^{-3}$ [$W \cdot kg^{-1}$] and the volume of water $V_s \times 10^5$ [m^3]

て、起こり易い場合と起こり難い場合とがあるためではないかと考えられる。

次に、試料管が細くなっていくとエネルギー吸収率がどのように変わるかに興味をもって、前述の試料管EとFとを使用して実験を行った。試料には脱イオン水、砂糖水、食塩水を使用した。加熱出力は500Wとし、初期温度は40°Cとした。本実験では、蚊取り線香状に巻いたシリコンチューブの試料管の上にポリウレタンフォームを置いた場合と置かない場合とで違いが得られなかったため、保温材の取り付けと熱損失の補正を行わなかった。シリコンチューブの熱伝導が小さいために簡便化できたと考えられる。内径1.2cmの試料管Fでは、試料管内部に気泡が発生したのが押し出されなくて出口温度が安定をしなかった。以下は、内径0.7cmの試料管Eを用いて行った実験結果である。管径を決める場合には、流速などとの関係を考えて適切な値を選ばないと問題を生じるという有用な知見である。

脱イオン水を例として、温度上昇 ΔT [K]と滞留時間 $\Delta\theta$ [s]との関係を求めた結果をFig. 12に、吸収効率 η [-]と滞留時間 $\Delta\theta$ [s]との関係をFig. 13に示す。Fig. 13で得られた η の値がFig. 9に示した

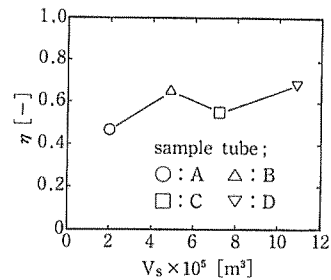


Fig. 11 Relations among the absorbed efficiency η [-] and the volume of water $V_s \times 10^5$ [m^3]

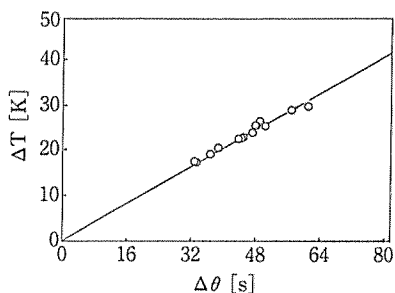


Fig. 12 Relations among the temperature rise ΔT [K] and the residence time of water $\Delta\theta$ [s]

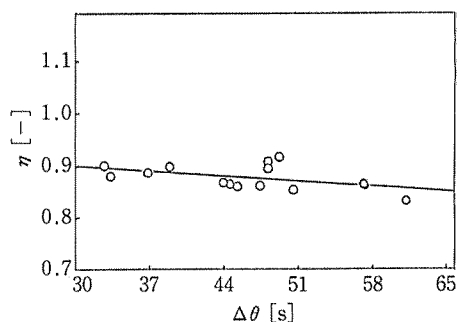


Fig. 13 Relations among the absorbed efficiency η [-] and the residence time of water $\Delta\theta$ [s]

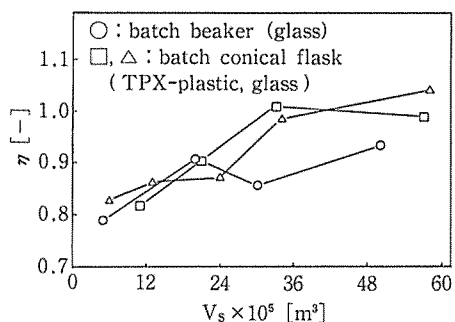


Fig. 14 Relations among the absorbed efficiency η [-] and the volume of water $V_s \times 10^5$ [m³]

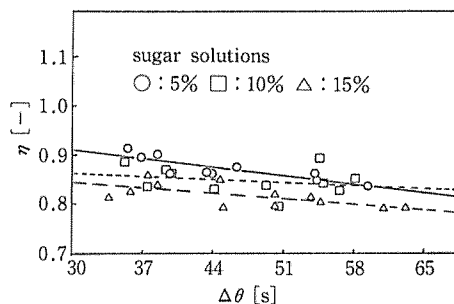


Fig. 15 Relations among the absorbed efficiency η [-] and the residence time of sugar solutions $\Delta\theta$ [s]

値よりも大きくなっているが、試料の量が多くなっているためと考えられる。参考までに、TPXプラスチックとガラスの三角フラスコとビーカーとを用いて試料体積 T_s [m³] を変えて η の値を求め、得られた結果を Fig. 14 に示す。試料容器への保温材の取り付けとか熱損失の補正を行っていない結果であるが、 η の値が1前後となっている。加熱出力表示が、 η の値が大きく表わされる電子レンジと考えられる。Fig. 13 によると、滞留時間が大きくなると η の値が小さく変わっているが、これは試料の流速を滞留時間が大きくなる方向に変えていて、試料温度が上昇して放熱による熱損失が大きくなったとか、また、マグネトロン

が連続使用で加熱をしていって効率低下を起こしたためと考えられる。電子レンジを使い続ける実験を試みて、 η の値が低下する結果を得た。滞留時間ゼロに外挿して η の値を読みとるのが望ましいと考えられる。

砂糖水と食塩水に対して得られた結果を、それぞれ Fig. 15 と Fig. 16 に示す。 η の値が砂糖水では濃度の増加に伴って低下し、食塩水では僅かに増加する結果になっている。参考までに、回分型容器 500 cc

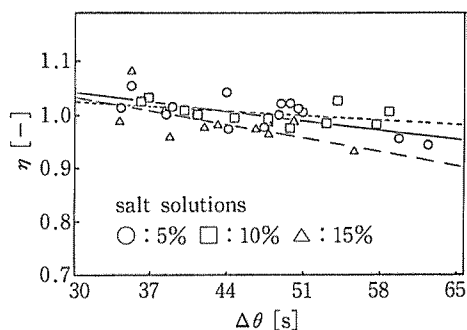


Fig. 16 Relations among the absorbed efficiency η [-] and the residence time of salt solutions $\Delta\theta$ [s]

で η の値を求める実験を行った。砂糖水では低下が僅かとなり、食塩水では逆にあって、僅かに低下する結果になった。この違いは、試料容器の大きさ、形状の違いによって試料の半減深度の違いの影響が生じた。定在波の発生の状況が違ったりするためと考えられる。

以上から、内径 0.7 cm のシリコンチューブを用いた試料管を使用すると、幅が小さくマイクロ波を透過して吸収効率が小さくなるのではないかと予想したが、大容量の回分型容器による結果と大差ない結果となった。蚊取り線香状に巻いているのが良いとか、また、前述の茹でうどんの時と同様に長さ方向に定在波を生じるなどして吸収効率が大きくなっているのではないかと考えられる。試料管の周辺からの熱損失が少なく、容器内での加熱むらが発生しなくて液状試料を用いる場合に有用な方法であると考えられる。

結 言

マイクロ波加熱におけるエネルギー吸収効率の測定法として、回分型容器と流通型容器を使用する方法が考えられる。回分型容器に対して液状試料を用いる場合は、前報⁵⁾で報告してきている。固体状試料を用いる場合は、テフロン板を試料台として茹でうどんのような小さい試料を用い、吸収効率を重量変化から求めることができた。大きい試料では、試料台下部からの蒸発水が凝結しない試料台を使用しなければならないことが示唆された。

また、流通型容器に対して液状試料を用いる場合は、内径 0.7 cm シリコンチューブを蚊取り線香状に巻いたものを用い、吸収効率を温度変化から求めることができた。試料容器内に加熱むらを生じない利点が考えられる。

電子レンジ内に試料を置く場合に、金属の反射板より 3 cm 以内では吸収効率が著しく低下するため、3 cm 以上を離して置くのが良いという貴重な知見が得られた。また、装置内と試料内に定在波が一部発生していると考えられた。膨化を起こさせたいとか、褐変を妨ぎたいとかしたい場合には、本研究で得られた基礎的成果を基として、更に研究を進めて、試料の置き方とか大きさ、形状をどのようにするのが良いのかなどを検討していくことが必要になると考えられる。

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) の援助ならびに中塾研究奨励会 (1988, 1989年) の援助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

A : 伝熱面積 [m ²]	U : 総括伝熱係数 [W·m ⁻² ·K ⁻¹]
Cp : 試料などの比熱 [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	V_s : 試料の体積 [m ³]
h : 金属の反射物からの高さ [cm]	v_s : 試料の体積流量 [m ³ ·s ⁻¹]
k : 温度上昇分率 [—]	w : 試料などの質量 [kg], [g]
P : 供給熱量 [W]	ΔT : 温度上昇値 [K]
Q : 試料などの吸収熱量 [W·kg ⁻¹]	$\Delta \theta$: 滞留時間 [s]
T : 試料の温度 [K]	η : 試料などのエネルギー吸収効率 [—]
θ : 加熱時間 [s]	ϕ : 水の蒸発潜熱 [J·kg ⁻¹]
ρ_s : 試料の密度 [kg·m ⁻³]	

添 字 :

t : 全体量 f : 保温材
s : 試料 r : 容器周辺
H : 水分 o : 出口
F : 初期値 i : 入口
g : 容器

引用文献

- 1) 久保田清・弘中和憲・細川嘉彦・鈴木寛一・江坂宗春, 1978, マイクロ波加熱処理米を用いた高含水率の浸漬米の製造に関する研究. 日食工誌, 25 : 641-644.
- 2) 江坂宗春・岡田貴代美・鈴木寛一・久保田清・川上英之, 1987, マイクロ波加熱によるデンプン性食品の殺菌. 日食工誌, 34 : 69-76.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 黒川眞行・久保田清・鈴木寛一・江坂宗春, 1987, マイクロ波加熱における液状試料のエネルギー吸収に関する研究. 広島大学生物生産学部紀要, 26 : 69-78.
- 6) 露木英男・首藤厚, 1974, 食品のマイクロ波加熱, 建帛社, 東京.
- 7) 肥後温子編, 1987, 電子レンジ・マイクロ波加熱食品利用ハンドブック, 日本工業新聞社, 東京.
- 8) 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.
- 9) 渡辺渉・小林晃, 1963, 電子調理機内の加熱分布について. 日食工誌, 10 : 19-23.
- 10) 中沢文子, 1987, 電子レンジによる食品の加熱と温度分布. 食品加工技術, 7 : 120-200, 302-307.
- 11) 肥後温子, 1989, 電子レンジ「こつ」の科学, 柴田書店, 東京.

Studies on the Energy Absorbed Efficiency during Microwave Heating

Kiyoshi KUBOTA, Shuho, U, Katsumi TSUSHIMA,
Norio OKUTANI, Yuki TAMURA, Masayuki KUROKAWA,
Kanichi SUZUKI and Muneharu ESAKA

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

In previous papers, we have studied the soaked rice of high level moisture through microwave-treatment¹⁾, the pasteurization of starchy foods²⁾, and the cooking-rate equations on the microwave heated cooking of potato^{3,4)}. In order to design various microwave heating apparatuses, it is necessary to measure the energy absorbed efficiency and the increased temperature of microwave heated foodstuffs. Therefore, we have studied the efficiency in liquid samples in batch vessel during microwave heating⁵⁾.

In this paper, the values of the decreased weight of solid samples in batch type vessel and of the increased temperature liquid samples in continuous type vessel during microwave heating in an electronic range were observed, and the values of the energy absorbed efficiency were calculated by using simple energy equations.

The energy absorbed efficiency of solid samples in the range was measured by observing the changed weight during microwave heating, and the values changed with the water content of samples. The energy absorbed efficiency of liquid samples contained in a flow type vessel through the electronic range was measured by observing the changed temperature during the inner and outer positions of the range. The values of energy absorbed efficiency of liquid samples in the flow type vessel were very large same as a batch type vessel contained samples in the range. These phenomena observed are very interesting for the design of the various microwave treatment apparatuses such as cooking, drying and so on of foodstuffs.