

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

黒川 眞行・久保田 清
鈴木 寛一・江坂 宗春

広島大学生物生産学部
1987年8月25日 受 理

Studies on the Energy Absorbed in Liquid Samples during Microwave Heating

Masayuki KUROKAWA, Kiyoshi KUBOTA, Kanichi SUZUKI
and Muneharu ESAKA

Faculty of Applied Biological Science, Hiroshima University, Fukuyama

(Figs. 1-11)

前報^{1,2)}において、電子レンジを用いたジャガイモのクッキング実験を行って、加熱時間の進行に伴うジャガイモの温度変化とクッキング速度式の設定に関する研究を行った結果について報告した。

マイクロ波加熱を行う場合、試料の種類、大きさ、形状などによってエネルギー吸収効率が異ってくるため、工業装置を設計するためには供給エネルギー量と試料の温度上昇との関係を調べる研究が必要となる。

これまでに、各種液状試料について、試料温度の変化を測定した報告³⁾とか、でんぷん食品を用いて、加熱における温度分布の測定^{4,5)}とか水分蒸発量を測定した報告⁶⁾など興味深い研究報告がみられ、また、各種試料に対する比誘電率の値の報告^{7,8,9)}などがあるが、定量的な考察を行ったものは僅少¹⁰⁾である。

本研究では、電子レンジを使用し、被加熱物として液状試料を用いて、容器の形状、試料の量などを変える実験と、エネルギー吸収量などを変える実験とを行って、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。

実 験 方 法

1. 試料

液状試料として脱イオン水、サラダ油（日清製油k.k.製：内容表示 大豆油、なたね油）および流動パラフィン（軽質、半井化学薬品製）を用いた。

試料は、所定量を容器に入れ、恒温槽中で20°Cとして、各実験に供した。

2. 実験装置および実験方法

電子レンジは、松下電器製 NE-6330CHP 型 (2450 MHz) を使用した。試料台が、回転式となっていて、出力が 600 W, 240 W, 180 W と 3 段切り替えのできるものである。試料容器には、パイレックス製のピーカー、三角フラスコなどを使用した。保温材として、ポリウレタンフォーム（厚さ 3 cm）と発泡ポリスチレン板（厚さ 1 cm）を使用した。

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、熱電対を直接に入れて、容器と熱電対とを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 MODEL 8-2 型）を取りつけて測定した。試料の量が多い場合には、スターラーの回転子 (2.34 g) の熱容量による影響が無視できる結果となった。

熱 関 係 式

1. 単一容器中の試料加熱

試料が吸収した熱量は、試料本体の温度上昇以外に、試料蒸発のための熱量損失、容器など周辺体の加熱のための熱量損失、周辺への伝熱、対流、放射による伝熱損失を伴うことになる。試料本体と周辺体の加熱に関する項以外の項が無視できる条件下について、液状試料を容器に入れ、保温材2種によって保温して、電子レンジに入れて加熱を行った場合を例として、式を示すと次式のように表わされる。

$$\eta = (C_{ps}W_s + k_g C_{pg}W_g + k_{f1}C_{pf1}W_{f1} + k_{f2}C_{pf2}W_{f2}) (\Delta t / \Delta \theta) / P \quad (1)$$

$$Q = \eta P / W_s \quad (2)$$

ここで、 $P[W]$ は供給熱量、 $Q[W \cdot \text{kg}^{-1}]$ は吸収熱量、 $\eta [-]$ はエネルギー吸収効率、 $\Delta t[K]$ は加熱時間 $\Delta \theta[s]$ における温度上昇値、 $\Delta t / \Delta \theta[K \cdot s^{-1}]$ は温度上昇速度、 $W[\text{kg}]$ は試料の質量、 $C_p[J \cdot \text{kg}^{-1} \cdot K^{-1}]$ は比熱、 $k[-]$ は温度上昇分率である。また、添字 s, g, f は、それぞれ試料、容器、保温材を示す。

2. 保温材の加熱

ガラス容器は、熱伝導度が大きいため、試料に接しているところが瞬時に試料温度になっていると仮定できるが、保温材は、熱伝導度が小さいために、上昇温度が試料温度より低くなっていく。式(1)の温度上昇分率 k の値の推算方法が問題となる。

容器側は、容器と同様に試料温度に瞬時になっていて、外部側が室温温度から加熱されていくとして、次式で平均温度を概算することによって k の値を求めた。

簡単のため、一定温度の無限平板の表面が、瞬時に一定温度に変化するときに、内部温度が変化する状態を表わす誤差関数で表わされる解析解を使用する。正確には偏微分方程式を解く計算となるが、試料の温度上昇に関する熱量に比較して、保温材のそれは僅少であることから、容器側が瞬時に平均温度になるなど、いろいろと近似仮定をして解析解を使用する。

加熱時間の変化： $\theta = 0 \rightarrow \theta$ に対して、

試料温度： $t = t_{s0} \rightarrow t_s$

保温材 $\left\{ \begin{array}{l} \text{容器側} : t_{s0} \rightarrow t_s \\ \text{外部側} : t_{R0} \rightarrow t_R \end{array} \right.$

$$y = L / 2 \sqrt{\alpha_t \Delta \theta} \quad (3)$$

誤差関数の図表から、

$$Y = \frac{t_{sav} - t_R}{t_{sav} - t_{R0}} = \text{erf}(y) \quad (4)$$

$$t_R = t_{R0} + t_{sav}(1 - Y) \quad (5)$$

$$k_t = (t_t - t_{t0}) / (t_s - t_{s0}) \quad (6)$$

ただし、 $t_{sav} = (t_s + t_{s0}) / 2$

$$t_t = (t_s + t_R) / 2$$

$$t_{t0} = (t_{s0} + t_{R0}) / 2$$

$$\alpha_t = \lambda_t / (C_{pf} \cdot \rho_t)$$

ここで、 $L[m]$ は保温材の厚さ、 $\alpha [m^2 \cdot s^{-1}]$ は保温材の熱拡散率、 $\lambda [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$ は熱伝導度、 $\rho [kg \cdot m^{-3}]$ は密度である。また、添字 s, f, R, av, 0 は、それぞれ試料、保温材、外部側、平均値、初期値を示す。

3. 保温材伝熱による熱損失

保温材を通しての伝導伝熱による熱損失を、式(1)では考察していないが、保温材の厚さが不十分な場合などには問題となっていく。次の単純化したフーリエの法則によって表わして、近似計算を行った。

$$\Delta q / \Delta \theta = \lambda A \Delta T / L \quad (7)$$

ここで、 $\Delta q[W]$ は時間 $\Delta \theta$ における伝熱量、 $A[m^2]$ は伝熱面積、 $L[m]$ は伝熱距離、 $\Delta T[K]$ は温度差である。

この項が本実験条件下では無視できるという計算例を、500 cm³ のビーカーに温度 20°C の水 500 g を入れて、600 W で蒸発に伴う熱損失が無視できる 60°C まで加熱した場合 ($\Delta t / \Delta \theta = 0.225 K \cdot s^{-1}$) について示す。

側面を厚さ 3 cm ポリウレタンフォーム (f1), 底面を厚さ 1 cm のポリスチレン板 (f2) で保温した場合, 前者では $\Delta q=76.7 \text{ J}$, 後者では $\Delta q=17.6 \text{ J}$ となる。この間における水の加熱熱量は $\Delta q=WC_p\Delta t=3.38 \times 10^4 \text{ J}$ であり, これに対し, それぞれ 0.09%, 0.02% となり, 大変に僅少であることがわかる。参考までに, 前述の k の値を示すと, それぞれ $k_g=0.788$, $k_{f1}=0.570$, $k_{f2}=0.865$ となる。また, $\eta=0.830$, $Q=9.95 \times 10^2 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$ となる。

4. 試料の蒸発による熱損失

試料の蒸発に伴う熱損失を, 式(1)では考察していないが, 加熱温度を上昇させていくと問題となってくる。例えば, 式(1)において, 簡単のため, 容器など周辺体の加熱の項を省略して示すと, 次のような考察が必要となる。

$$\eta = [(C_{ps}W_s)(\Delta t/\Delta\theta) + \phi_s(\Delta W_s/\Delta\theta)]/P \quad (8)$$

ここで $\Delta W_s[\text{kg}]$ は, 試料の時間 $\Delta\theta$ における蒸発量, $\phi_s[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}]$ は, 蒸発潜熱である。

水は, 60°C を越えると温度上昇速度が低下することから, 蒸発に伴う熱損失の項が問題になると考えられ, 本報告では, 水を 60°C 以上に加熱する場合には, 上層として流動パラフィンを入れるなどして, この項が無視できる範囲で計算を行っている。

5. 二重容器中の試料加熱

フライングのモデルとして見立てて, 液状試料を大小 2 つの容器に入れて, 小容器を大容器の中に入れる実験を行った。熱関係式を示すと次式のように表わされる。

$$\eta_t = [K_1(\Delta t_1/\Delta\theta) + K_2(\Delta t_2/\Delta\theta)]/P \quad (9)$$

$$\text{ただし, } \Delta t_1 = t_1' - t_1, \Delta t_2 = t_2' - t_1$$

$$K_1 = C_{ps1}W_{s1} + k_{g1}C_{pg1}W_{g1}/2$$

$$K_2 = C_{ps2}W_{s2} + k_{g1}C_{pg1}W_{g1}/2 + k_{g2}C_{pg2}W_{g2} + k_l C_{pl}W_l$$

$$\left. \begin{aligned} t_1^* &= (UA\Delta T\Delta\theta + K_1 t_1')/K_1 \\ t_2^* &= (K_2 t_2' - UA\Delta T\Delta\theta)/K_2 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$$\text{ただし, } \Delta T = (t_1' - t_1)/2 - (t_2' + t_2)/2$$

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= K_1 \Delta t^*/\eta_t P \Delta\theta \\ x_2 &= K_2 \Delta t_2^*/\eta_t P \Delta\theta \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

$$\text{ただし, } \Delta t_1^* = t_1^* - t_1, \Delta t_2^* = t_2^* - t_2$$

$$\eta_1 = x_1 \eta_t, \eta_2 = x_2 \eta_t \quad (12)$$

$$Q_1 = \eta_1 P/W_{s1}, Q_2 = \eta_2 P/W_{s2} \quad (13)$$

$$Q_{av} = \eta_t P/(W_{s1} + W_{s2}) \quad (14)$$

ここで, $\eta_t[-]$ は全熱吸収効率, $Q_{av}[\text{W} \cdot \text{kg}^{-1}]$ は平均吸収熱量, $x[-]$ は吸収効率の分率, $U[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$ は両試料間の総括伝熱係数, $A[\text{m}^2]$ は伝熱面積, $t'[\text{K}]$ は測定される上昇温度値, $t^*[\text{K}]$ は両試料間に熱移動がないとしたときの上昇温度値である。また, 添字 1, 2 は, 小容器および大容器ならびにそれぞれの容器中試料を示す。

6. 二重容器試料間の伝熱

マイクロ波加熱の実験データを用いて, 式(10)に示される UA の値を求めることは, 複数のパラメータ計算に伴う誤差の影響を生じると考えられるため, 電熱器を用いた通常加熱によって求めるのがよいと考えられる。

特大容器内に所定温度の液状試料 (s2) を入れて温度が一定になる条件として, その中に 20°C の液状試料 (s1) を入れた小容器を入れて温度変化を測定して, UA の値を求めた。この場合の熱関係式を示すと次式のように表わされる。加熱時間変化 $\theta=0 \rightarrow \theta$ に対して試料温度 $t_1=t_{10} \rightarrow t_1$, $t_2=t_{20}$ (一定)

$$C_{ps1}W_{s1}\Delta t_1 = UA\Delta T\Delta\theta \quad (15)$$

$$\text{ただし, } \Delta T = t_{20} - t_1$$

以上から,

$$UA = C_{ps1}W_{s1} \ln\left(\frac{t_{20} - t_{10}}{t_{20} - t_1}\right) / \theta \quad (16)$$

特大容器に 100°C のサラダ油を入れて、その中に 20°C の水 40 g を入れた 50 cm³ ビクノメータを入れて加熱した場合を例として示すと、 $UA=0.773 \text{ W}\cdot\text{K}^{-1}$ であった。大容器に入れた小容器の大きさ、形状とか試料などが変われば、 UA の値は変わり、同様にして上式で求めることができる値である。

実験結果と考察

1. 供給熱量による影響

試料容器の位置による影響があるという報告¹⁾があり、先ず試料容器を回転試料台の中央に置いた場合と、回転式試料台の端に置いた場合との比較をする実験を行った。

容器として 500 cm³ のピーカーを用い、温度 20°C の水を 500 g 入れて、供給熱量 $P=600 \text{ W}$ で加熱する実験で比較を行った。側面を厚さ 3 cm ポリウレタンフォームで、底面を厚さ 1 cm の発泡ポリスチレン板で保温した。蒸発に伴う熱損失が無視できる 60°C までの実験データから $\Delta t/\Delta\theta$ の値を求め、式(1)、(2)を用いて η および Q の値を求めた。

試料容器を中央に置いた場合は、 $\eta=0.830$ 、 $Q=8.30\times 10^2 \text{ W}\cdot\text{kg}^{-1}$ となり、端に置いた場合は、 $\eta=0.756$ 、 $Q=7.56\times 10^2 \text{ W}\cdot\text{kg}^{-1}$ となった。吸収熱量が、端に置く場合には中央に置く場合の 91.1% になっている。以下の実験では、容器を中央に置いて実験を行っていくことにした。

供給熱量による影響を調べる実験を、容器として 500 cm³ のピーカーを用い、温度 20°C の 2 種類の液状試料を 438 cm³ (水 431 g, サラダ油 400 g) を入れて行った。

ここで用いた試料の量は、後で示す大小容器を用いた実験に合わせた値としている。

供給熱量 P を 600 W, 240 W, 180 W と変えて行った。側面をポリウレタンフォームで、底面を発泡ポリスチレン板で保温した。供給熱量を変えての試料温度の変化を求めた結果を Fig. 1 に示す。

Fig. 1 において、マイクロ波のエネルギー吸収効率の水がサラダ油よりも大きいと考えられるのに、同じ供給熱量において温度上昇速度がサラダ油が水よりも大きいのは、比熱の値が大きく異なるためと考えられる。

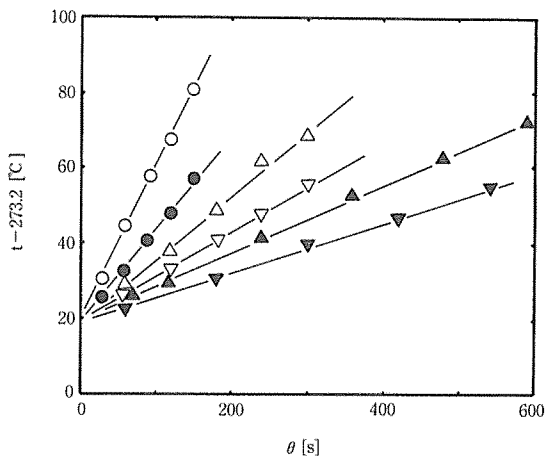


Fig. 1 Relations between the sample temperature $t-273.2$ and the heating time θ .

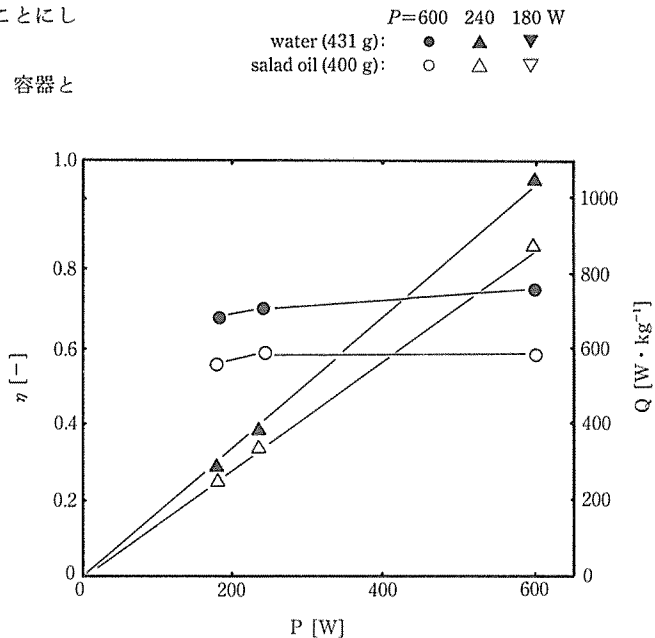


Fig. 2 Relations between the absorbed efficiency η , the absorbed energy Q and the heating power P .

蒸発に伴う熱損失が無視できるまでの実験データから $\Delta t/\Delta\theta$ の値を求め、式(1)、(2)を用いて η および Q の値を求めた結果を Fig. 2 に示す。180 W の η の値が、600 W, 240 W の値に比較して僅かに小さくなっているが、保温材の補正の精度などを考えると、ほぼ一定として取り扱えるものと考えられる。

2. 試料の量による影響

試料の量による影響を調べる実験を、容器として 200, 100, 50, 30, 20 cm³ 三角フラスコを用い、これらの容器の首の細いところにかかるように、それぞれ 240, 140, 60, 35, 20 g の温度 20°C の水 (s1) を入れ、首のところに水の蒸発を防ぐために流動パラフィン (s2) をそれぞれ 3, 2, 1, 1, 1 cm³ を入れたものを試料として供した。供給熱量 $P=600$ W とし、水が少ない場合、60°C 以上まで蒸発を防いで加熱ができるようにするため、Fig. 3 に示すように三角フラスコの首のところに流動パラフィンを入れる方法をとった。側面をポリウレタンフォームで、底面を発泡ポリスチレン板で保温した。

試料の量を変えて試料温度の変化を求めた結果の一部を Fig. 4 に示す。

Fig. 4 から $\Delta t/\Delta\theta$ の値を求め、式(1)、(2)を用い η および Q の値を求めた結果を Fig. 5 に示す。

流動パラフィンは、 η の値を求めた結果、水の約10分の1 (10.4%) となり、使用量も少ないことから、簡単のため、吸熱体にならないで水の温度と同じになるとして計算を行った。

試料の量が 100 g 以下になると η の値が小さくなり、また、 Q が著しく大きくなっている。これは電磁波密度が増してくることに関係する結果と考えられる。試料に急激な温度上昇を与えたいときには、エネルギー吸収効率が低下することにはなるが試料の量を少なくしていけばよいことがわかる。

3. 試料容器の形状の影響

試料容器の形状の違いによる影響を調べる実験を、500 cm³ ビーカー、市販角コップ (底辺 6.2 cm, 高さ

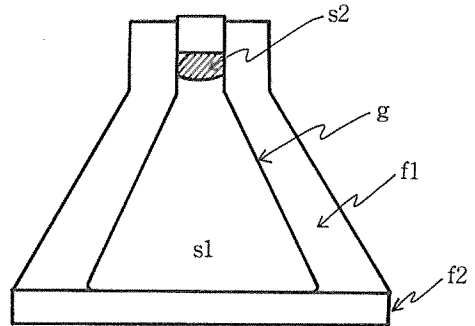


Fig. 3 Samples in one vessel.

- g : glass vessel (erlenmeyer ets.)
- s1 : water,
- s2 : liquid paraffin,
- f1 : polyurethane foam,
- f2 : polystyrene foam

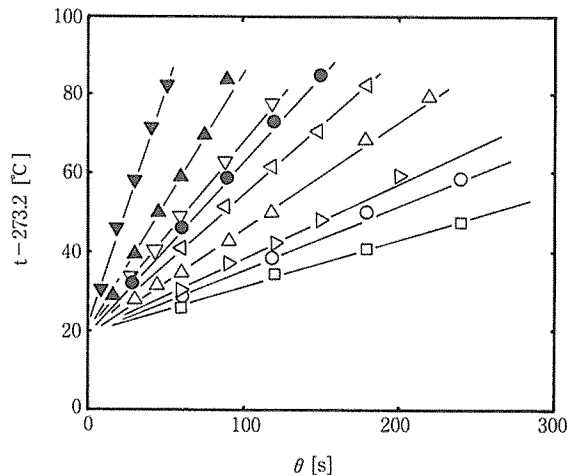


Fig. 4 Relations between the sample temperature $t-273.2$ and the heating time θ .

	$W_0=0.24$	0.14	0.06 kg
$P=600$ W:	●	▲	▼
240 W:	○	△	▽
180 W:	□	▷	◁

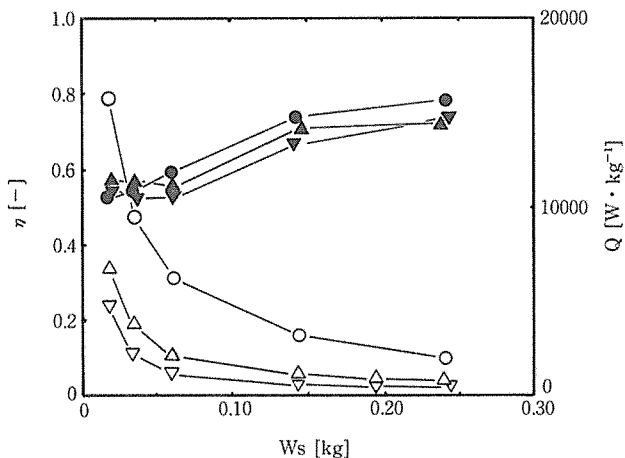


Fig. 5 Relations between the absorbed efficiency η , the absorbed energy Q and the sample mass W_s .

$P=600 \quad 240 \quad 180 \text{ W}$
 $\eta \text{ vs. } W_{s1}$: $\bullet \quad \blacktriangle \quad \blacktriangledown$
 $Q \text{ vs. } W_{s1}$: $\circ \quad \triangle \quad \nabla$

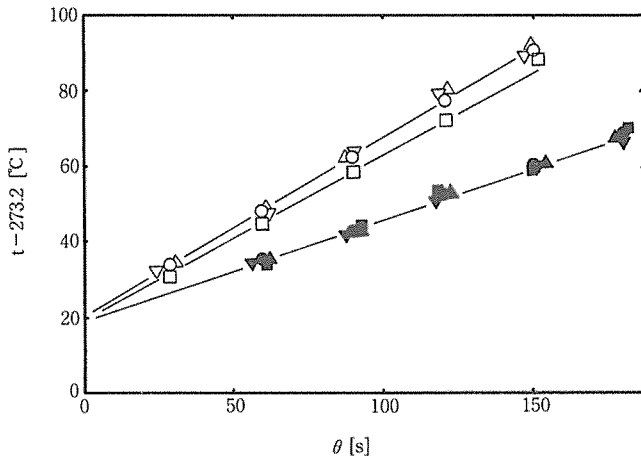


Fig. 6 Relations between the sample temperature $t-273.2$ and the heating time θ .

beaker square round erlenmeyer
vessel flask
water (394 g): $\bullet \quad \blacksquare \quad \blacktriangle \quad \blacktriangledown$
salad oil (365 g): $\circ \quad \square \quad \triangle \quad \nabla$

13.5 cm), 300 cm³ 丸底フラスコ (首切りおとし), 500 cm³ 三角フラスコ (首切りおとし) を用い, これらの容器にそれぞれ温度 20°C の各種の液状試料 400 cm³ (水: 394 g, サラダ油: 365 g) を入れ, 供給熱量 $P=600 \text{ W}$ で行った。ここで用いた液量は, 用いた丸底フラスコの首のところの液量に合わせた値としている。側面をポリウレタンフォームで, 底面を発泡ポリスチレン板で保温した。試料温度の変化を Fig. 6 に示す。

蒸発に伴う熱損失が無視できるまでの実験データから $\Delta t/\Delta \theta$ の値を求め, 式(1), (2)を用いて η および Q の値を求めた結果を Fig. 7 に示す。

水とサラダ油では, 熱効率とか半減深度が異なり, 同じになるとは考えられないのではあるが, 両者に共

通した大差がみられないこと、また、保温材を伴う補正の精度などを考えると、容器の形状の違いは実験データのばらつき以上としては、みられないと考えられる。

試料容器の形状の違いによる影響を調べる実験を、アクリル板およびアクリル円筒で、5種の角柱容器(底辺×高さ: 3×15, 4×8, 5×6, 6×5, 7×4 cm)と5種の円柱容器(直径×高さ: 3×16, 5×6, 7×5, 8×4, 10×3 cm)とを作製し、これらの容器にそれぞれ温度 20°C の 100 cm³ (98.5 g) の水を入れ、供給熱量 $P=180$ W で行った。側面をポリウレタンフォームで、底面を発泡ポリスチレン板で保温した。

蒸発に伴う熱損失が無視できる実験データから $\Delta t/\Delta\theta$ の値を求め、式(1)、(2)を用い η および Q の値を求めた結果を、横軸を液の高さ H [m] として表して、Fig. 8 に示す。

液の高さによってエネルギー吸収効率が異なるという報告⁶⁾があるが、本実験では、角柱、円柱容器共に高さによる影響がみられない結果となっている。この実験は、液量が少なく保温材を伴う補正の影響が大きくなっていることが考えられ、液の高さの影響があるとしたら僅かで、実験データのばらつき内であると考えられる。

4. 試料の相互関係による影響

マイクロ波加熱に対して興味があることから、試料として水とサラダ油とを用い、大小の容器として、500 cm³ ビーカーと 50 cm³ ピクノメータを用い、それぞれに試料を 438 cm³ (油で 400 g, 水で 431 g)、40.5 cm³ (水で 40 g, 油で 36.5 g) を用いて、相互関係の影響を調べる実験を試みた。小容器をフライング原料のモデルとして想定したものである。

小容器を大容器中に入れた場合の両容器の関係を Fig. 9 に示す。

Fig. 9 に示す実験の場合には、試料によって吸収される熱量の一部が容器と保温材に吸収されていくことを考慮する以外に、小容器の試料と大容器の試料の温度上昇速度が異なることにより、両者間の生ずる熱移動を考慮することが必要となる。全エネルギー吸収効率 η_1 を求めると同時に、前述の計算方法に従って、

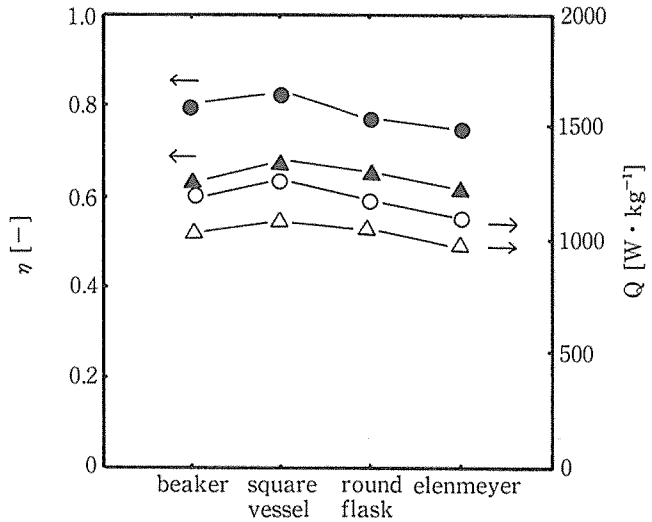


Fig. 7 Relations between the absorbed efficiency η , the absorbed energy Q and the various vessel shapes.

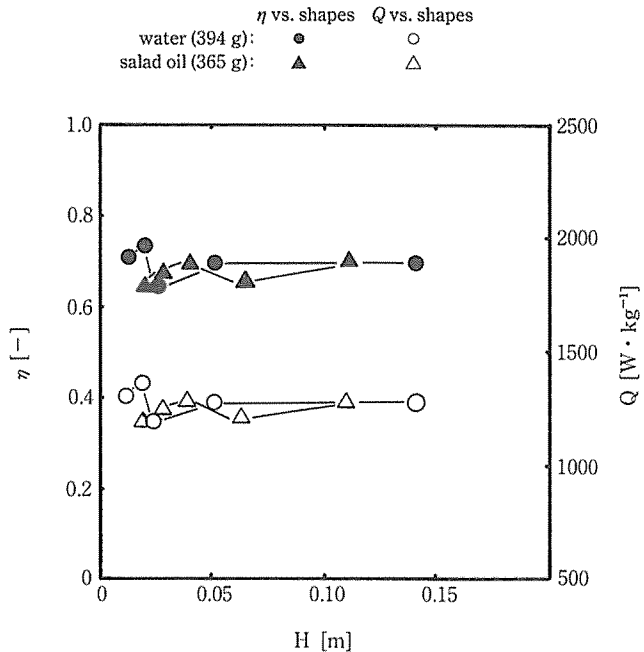


Fig. 8 Relations between the absorbed efficiency, the absorbed energy Q and the sample height H .

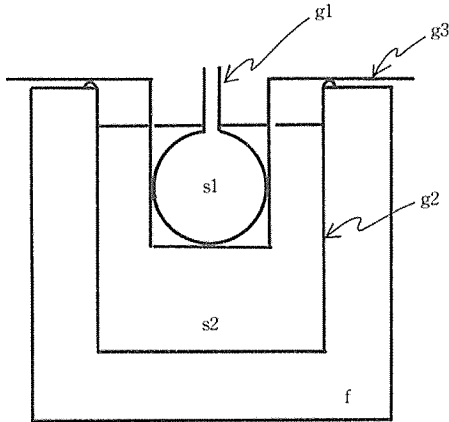


Fig. 9 Samples in two vessels.

- g1 : small vessel (50 cm³ pycnometer),
- g2 : large vessel (500 cm³ beaker),
- g3 : glass rod support,
- s1 : sample (40.5 cm³), 40 g water etc.,
- s2 : sample (438 cm³), 400 g salad oil etc.,
- f : polyurethane foam

マイクロ波加熱のない条件下で UA の値を求めておき、両容器間の熱移動がないとしたときの上昇温度値 t^* を求めて、小容器と大容器の中の試料の吸収熱量 θ_1 と θ_2 を求める計算を行った。小容器 (s1) と大容器 (s2) の試料を空、水、サラダ油として組み合わせる実験を行った。また、参考として、回転試料台の両端に分けて置く実験も行った。

試料の関係を変えて、試料温度の変化を求めた結果の一部を Fig. 10 に示す。

Fig. 10 から、小容器に水を入れたものを大容器に油を入れた中に入れると、油の吸収効率が低下しても、内部の水の吸収効率が低下しないで加熱するという興味深い結果が得られていることがわかる。フライング操作を効率よく進めることができるという結果になっている。

試料の組み合わせを変えた実験から得られた全エネルギー吸収効率 η_t と、小容器と大容器中の試料の吸収熱量 Q_1 と Q_2 とを求めた結果を、お互いに比較して Fig. 11 に示す。

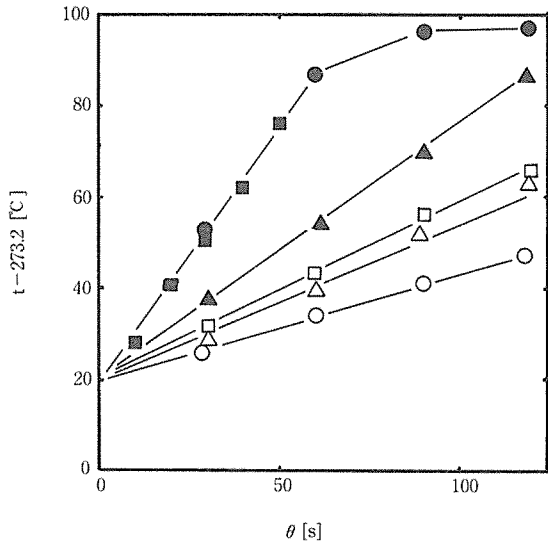


Fig. 10 Relations between the sample temperature $t-273.2$ and the heating time θ .

- | | | | | |
|-----|---------|---------|----------|-----------|
| | s1 only | s2 only | s1 in s2 | s1 and s2 |
| s1: | ■ | — | ● | ▲ |
| s2: | — | □ | ○ | △ |
- where, s1: water (40 g) in small vessel
s2: salad oil (400 g) in large vessel

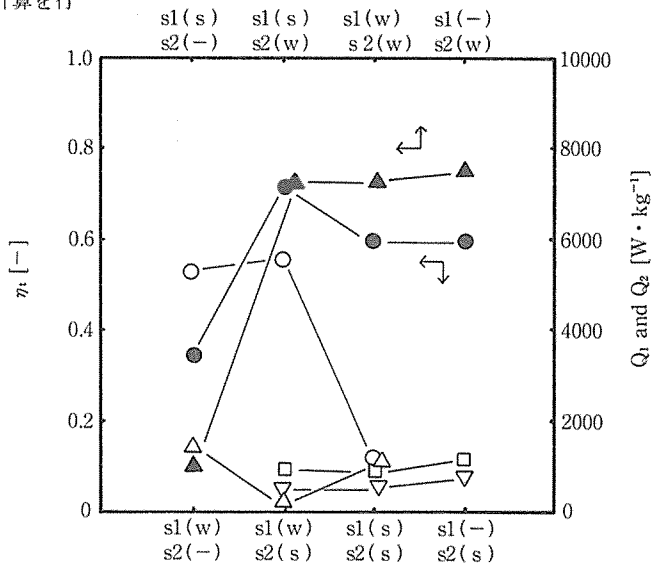


Fig. 11 Relations between the total absorbed efficiency η_t , the absorbed energy Q_1, Q_2 and the two vessels contained water and/or salad oil.

- η_t vs. upper and under vessels: ▲ ●
- Q_1 and Q_2 vs. upper vessels: △ ▽
- Q_1 and Q_2 vs. under vessels: □ ▢
- where, s1 and s2: small and large vessels
- (s) and (w): water and salad oil

Fig. 11 から小容器と大容器に共に同じ試料を入れた時に、小容器の Q の値が大容器のそれに比較して水では1.3倍、油で1.5倍大きい値となっていて、大容器の中心近くが過大に加熱されていることがわかる。

小容器に水を入れたものを、大容器に油を入れた中に入れる時に、このような効果もあると考えられるが、水が集中的な加熱を受ける結果は、これ以上の差異となって現れていることがわかる。

なお、本研究は、昭和62年10月10日の姫路市における化学工学第20回秋季大会において報告したものである。

要 約

前報^{1,2)}において、ジャガイモ薄片のマイクロ波加熱クッキング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きた。

各種のマイクロ波加熱装置を設計するためには、マイクロ波加熱をした食品の吸収エネルギーと温度上昇の測定が必要となってくる。

本研究では、電子レンジを用いて、液状試料のマイクロ波加熱における温度上昇の値を測定し、吸収効率の値を簡単な熱関係式を設定することによって計算する研究を行った。

小容器に水を入れたものを、大容器に油を入れた中に入れる時に、油の吸収効率が低下しても、内部の水の吸収効率は低下しないで加熱できるという興味深い結果が得られることがわかった。この結果は、食品のマイクロ波加熱によるフライング操作が効率よく行えることを示唆している。

主な使用記号

A	: 伝熱面積 [m^2]
C_p	: 試料, 容器の比熱 [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]
k	: 温度上昇分率 [—]
L	: 保温材の厚さ [m]
P	: 供給熱量 [W]
Q	: 試料の吸収熱量 [$\text{W}\cdot\text{kg}^{-1}$]
q	: 伝熱量, 吸収熱量 [W]
t	: 試料, 容器の温度 [K]
x	: 吸収効率の分率 [—]
U	: 総括伝熱係数 [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}$]
W	: 試料, 容器の質量 [kg]
α	: 熱拡散率 [$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$]
η	: 試料のエネルギー吸収効率 [—]
θ	: 加熱時間 [s]
λ	: 熱伝導度 [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]
ρ	: 密度 [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
ϕ	: 試料の蒸発潜熱 [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$]
ΔT	: 温度差 [K]
Δt	: 温度上昇値 [K]
ΔW	: 試料の蒸発量 [kg]
添字	
av	: 平均値, θ : 初期値, R: 外部側,
s	: 試料, t: 全試料, f: 保温材, g: 容器

文 献

- 1) 黒川眞行, 荒木英稀, 久保田清, 鈴木寛一, 江坂宗春: 化学工学協会第52年会前刷, 422 (1987)
- 2) KUBOTA, K., Araki, H., Suzuki, K. and Esaka, M.: *J. Fac. Appl. Biol. Sci., Hiroshima Univ.*, 25, 1-9 (1986)
- 3) 露木英男, 首藤 醇: 食品工業, 12(22), 97-103 (1969)
- 4) 中沢文子, 高橋淳子, 高田昌子: 家政誌, 37(6), 447-451 (1986)
- 5) 中沢文子, 高橋淳子, 高田昌子, 杉本賢治, 岩淵康司: 家政誌, 37(11), 941-947 (1986)
- 6) 中沢文子, 高橋淳子, 高田昌子, 小畑恵子: 家政誌, 38(3), 177-181 (1987)
- 7) 露木英男, 首藤 醇: 食品のマイクロ波加熱, 建帛社 (1974)
- 8) 肥後温子: 電子レンジ, マイクロ波食品利用ハンドブック, 日本経済新聞社 (1987)
- 9) MUDGETT, R. E.: *Food Tech.*, 36(2), 109-115 (1982)
- 10) Taoukis, P., Davis, E. A., Davis, H. T., Gordo, J. and Talmon Y.: *J. Food Sci.*, 52(2), 455-463 (1987)
- 11) 渡辺 渉, 小林 晃, 石塚郁郎, 竹村邦夫: 日食工誌, 10(1), 19-23 (1963)

SUMMARY

In previous papers^{1, 2)}, we have studied the cooking-rate equations on the microwave heated cooking of potato slices.

In order to design various microwave heating apparatuses, it is necessary to measure the absorbed energy and the increased temperature of microwave heated foodstuffs.

In this paper, the values of the increased temperature of liquid samples during microwave heating in an electronic range were observed, and the values of the absorption efficiency were calculated by using a simple energy equation formed by authors.

The temperature of water in a small vessel in a large vessel contained salad oil was measured. The value was very large same as a small vessel contained water was set up only in the electronic range. This phenomena observed are very interesting for the microwave frying of foodstuffs.