

◇◇◇◇ 原著論文 ◇◇◇◇

固形および高粘度食品の高温短時間 マイクロ波殺菌のための基礎研究

高富哲也^{1,†}, 伊東 章², 城 斗志夫², 渡辺敦夫²

¹大和製罐株式会社, ²新潟大学大学院

Basic Study for Ultra High Temperature Short Time Sterilization with Microwave for Solid Foods and Viscous Foods

Tetsuya TAKATOMI^{1,†}, Akira ITO², Toshio JOH² and Atsuo WATANABE²

¹Central Lab, Daiwa Can Company 5-5-1 nishihashimoto, sagamihara, kanagawa 229-1183, japan
²Niigata University 8050 2nomati, igarasi, niigata, niigata 950-2181, japan

This study is the manufacturing methods of solid foods (a seasoning of fish sausage, tuna and jam) on good color and flavor with high temperature and short time sterilization by microwave heating. We investigated the cause of the inner temperature difference inside model solutions instead of solid foods. A heating test conducted on the model solutions revealed that the major cause of the inner temperature difference was NaCl. So, it is necessary to heat the inside of food with uniform heating for the sterilization of solid foods. We obtained an effective method of reducing the temperature difference within. It was possible to reduce the edge effect on solid foods by dipping in distilled water. The reason is distilled water behaved edge of solid foods. For half-depth of microwave was enough distance in distilled water, it did not make the heating efficiency of foods decrease remarkably. In future, we want to proceed with further research on the sterilization technology of solid food with model examination by continuous heating, and reducing the edge effect on the temperature change of solid foods.

Key words: Microwave heating, Temperature difference Ultra high temperature and short time, NaCl Edge effect

1. 緒 言

容器へ充填密封した固形食品の殺菌はレトルト[1-3]や低温殺菌処理により、容器外部からの熱伝導を利用して行われてきた。しかしこの方法では、食品中心部の殺菌に時間がかかり、食品品質を低下させてしまう。

この問題の解決法として、殺菌後、冷却し、無菌充填する方法が開発され、小さな固形物を含むスープの製造において実用化[4]されている。しかし、本方法は設備費が高く運転コストも高いため、特殊な食品に生産が限られており汎用性の高い技術となっていない。

近年の健康食ブームと食品の高品質化[5]の動きから、風味付けかまぼこ、味付けツナ、味噌、ジャムなどの固形食品を中心とした流動性の乏しい高粘性食品（以下固形食品）の消費拡大が期待できる。

そこで、我々は固形食品を充填密封したのち、マイクロ波[6-7]により高温短時間殺菌することで高品質な食品を製造することを考えた。

すなわち、最近は耐熱性・耐圧性に優れたプラスチック容器が開発されてきており、PETおよびPP材等は高温・高圧下でも食品容器としての機能を保持している。

しかし、通常のマイクロ波加熱であると加熱チャンバー内の電界分布の不均一性により個々の固形食品の殺菌状態にばらつき[8]がでることなどの問題が考えられる。

そこで本研究は、固形食品のマイクロ波殺菌の適応性[9-10]を検討する意味からモデル溶液を用い、100℃までの加熱による基礎研究を行った[11]。

本研究の結果を踏まえて、今後、連続殺菌システムを構築するとともに、種々の固形食品におけるマイクロ波特性および殺菌の研究を進める予定である。

2. 実験方法

2.1 モデル溶液

蒸留水にデンプンを7.0%添加してモデル溶液1とし、

(受付 2004 年 4 月 20 日, 受理 2004 年 8 月 31 日)

1 〒 229-1183 神奈川県相模原市西橋本 5-5-1

2 〒 950-2181 新潟県新潟市五十嵐 2 の町 8050 番地

† Tel: 042-773-3571, Fax: 042-774-7084, E-mail: t-takatomi@mail.daiwa-can.co.jp

Table 1 Constituents of model solutions.

Model Number	Constituents	Concentration (%)
1		
2a	Protein	1.0
2b	Protein	4.75
3a	Lipid	1.0
3b	Lipid	10.0
4a	NaCl	0.3
4b	NaCl	1.0
5	Protein	4.75
	Lipid	10.0
	NaCl	1.0

Starch was soluble in every model solutions. Its concentration was 7.0%.

Table 2 Product name and Manufacture.

Constituents	Product name	Manufacture
Starch	FARINEX LCF	Matsutani chemical industry Co.,Ltd.
Protein	Organic soybean milk (Solid soybean10%)	Nagoya Seiraku Co.
Lipid	N neopowder MS	NOF corporation
NaCl	Sodium chloride	Wako Pure Chemical Industries, Ltd.

他のモデル溶液はモデル溶液1にTable1の成分組成表に示した添加剤を加えて所定濃度とし、各モデル溶液とも攪拌しながら60～80℃に加熱溶解したのち、室温まで冷却して作成した。

モデル溶液5は目標の一つとして想定されるツナ製品の成分組成(タンパク質4.75%, 脂質10.0%, NaCl1.0%)を考慮して設定した。添加剤の製品名および会社名をTable2に示す。

2.2 実験装置および特性

2.2.1 マイクロ波加熱装置

Fig. 1に示すように、周波数2450 MHz[12]: 600Wのマイクロ波発振器(マグネトロン)1台を、反射波調整用チューナーに接続し、高さ580 mm × 幅540 mm × 奥行400 mmのアルミ製チャンバーへ装着した加熱装置を用いた。

チャンバーは、ステンレス製小型压力容器(後述、以下小型压力容器)が設置可能な寸法とした。この小型压力容器は、将来、連続殺菌システムとして想定している装置において、被加熱物を100℃以上に加熱するための加圧用密閉容器である。

導波管は、可能なかぎりマイクロ波を分散させないままモデル溶液へ照射するようにチャンバー内部100 mmまで延ばし、開口部は幅85 mm × 奥行35 mmとした(プラスチックカップ、ステンレス製容器は2.3に後述する)。

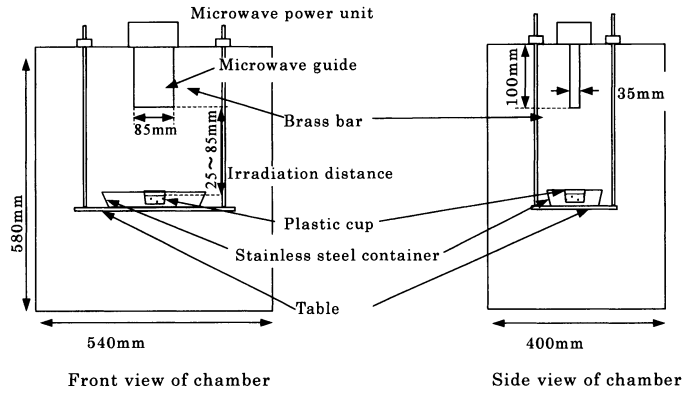


Fig. 1 Microwave heating device.

2.2.2 モデル溶液設置位置の調整

導波管先端からモデル溶液液面までの距離(以下照射距離)は25 mm～85 mmとした。カップを収容したステンレス製容器(後述)を設置するテフロン製テーブルはチャンバー天面からチャンバー内部へ貫通した直径10 mmの真ちゅう製丸棒4本(以下上下調節棒)で固定した。照射距離は上下調節棒を任意の位置でボルト固定することにより調整できる。

最小照射距離を25 mmとしたのは、装置製作上の都合により、25 mm以下では導波管先端がステンレス製容器と接触するためである。また、最大85 mmとしたのは、マイクロ波の半波長が約60 mm(空気中)であり、定在波を考慮すると十分な距離であると考えたからである。

2.3 カップとステンレス容器

2.3.1 モデル溶液を充填するプラスチックカップ

モデル溶液30.0 gを充填するプラスチックカップ

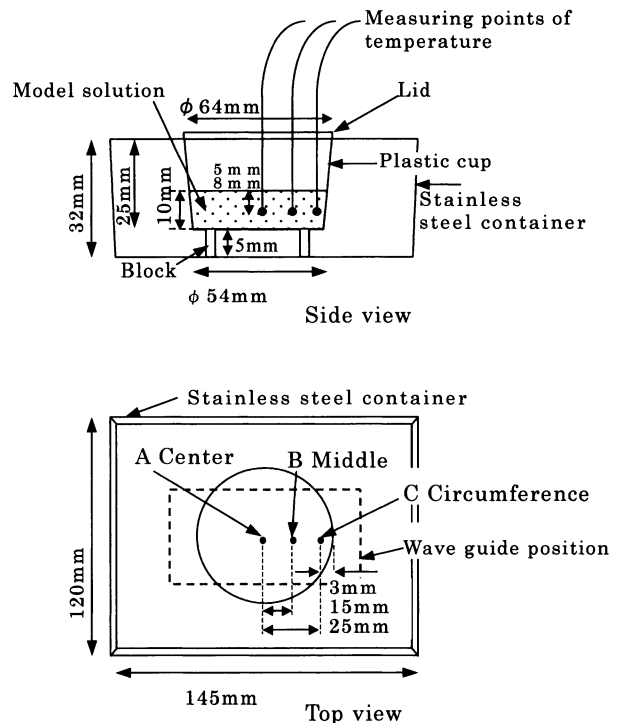


Fig. 2 Position of model solutions and sensor of temperature. A-C: Position of sensor

(以下カップ)は、外面：ポリプロピレン／内面：ポリエチレン製で、上面の直径は64 mm、下面の直径は54 mm、高さは25 mmとし、導波管開口部とカップの中心が一致するように配置した (Fig. 2)。

2.3.2 カップを収容するステンレス製容器

将来、100℃以上で加圧加熱殺菌する場合、モデル溶液を加圧する必要がある。そこで、耐熱・耐圧およびサニタリー性を考慮して、小型圧力容器内部へカップを収容および密封し、加圧することを考えた。

容器の耐圧仕様は、加熱時の圧力にも耐えられるように最大0.4 MPaの設定とした。材質は、マイクロ波の加熱効率と反射の影響を考慮すると、全面がテフロン製の加圧容器も考えられるが、耐圧容器として認められていないことから、テフロン製の蓋を有するステンレス製とした。

ただし、本実験では100℃以下の加熱テストであり、加圧しないことから、縦145 mm × 横120 mm × 高さ32 mm × 厚さ0.5 mmのステンレス製容器 (以下ステンレス容器) を小型圧力容器と想定して使用した (Fig. 2)。

モデル溶液を充填したカップは、ステンレス容器底部への伝熱を防止するため、高さ5 mmのテフロン製台座の上に配置した。

2.4 誘電率測定

モデル溶液の誘電率 ϵ は、25℃に調整したモデル溶液をビーカーに300 cc程度入れ、測定用の同軸プローブ (HEWLETT PACKARD 製 85070B) を接触させ、ネットワークアナライザ (Agilent Technologies 製 E8364A) で測定した。

2.5 温度測定

2.5.1 温度測定装置

加熱中の食品の内部温度を測定するため、光ファイバー温度計 (安立計器製 FL-1000 : プローブ径 ϕ 1.0 mm、精度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 、応答速度 0.25 秒) を3台使用した。温度はデータレコーダ (横河電機製 AR-1100 : 最速温度取り込み速度 100 kHz) に記録した。

測定点はカップ内モデル溶液の中心部 A 点と、中間部 B 点 (中心部から 15 mm)、周辺部 C 点 (中心部から 25 mm : 側面から 3 mm) の3点で、モデル溶液液面から深さ 5 mm とした。ただし、モデル溶液 1 では、ステンレス容器の影響を調査するため、深さ 8 mm (モデル溶液底面) においても測定した (Fig. 2)。

2.5.2 モデル溶液加熱特性の評価方法

モデル溶液を室温 ($23 \pm 1^\circ\text{C}$) に調整したのち、加熱を開始した。上記 A, B, C の温度測定点はデータレコーダへ記録した。3点のうち1点が100℃に到達した時点で加熱を止め、他2点の温度を測定した。

100℃到達時間 (以下到達時間) は、ステンレス容器

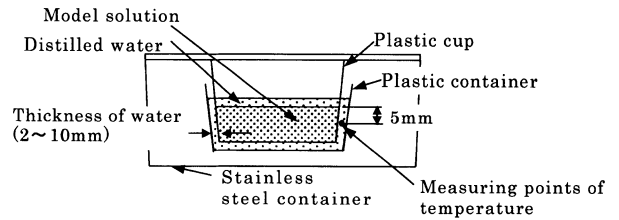


Fig. 3 Reducing method of edge effect.

の使用時・未使用時とも、照射距離を 25 mm ~ 85 mm まで 10 mm 間隔で変化させ、測定した。

2.6 エッジ効果低減対策

NaCl を含む食品の場合、エッジ効果により周辺部の昇温が速くなると考えられるため、この現象を防止する目的で以下の方法を用いた [13]。Fig. 3 に示すように、モデル溶液を充填したカップにテフロン製の蓋をして、蒸留水が入ったやや大きいプラスチック製容器に収容し、浸漬させた。

プラスチック製容器は、上下面および側面とも蒸留水の厚さが 2, 4, 6, 10 mm となるよう 4 種類使用した。

蒸留水温度は、加熱直後に攪拌し、直ちに測定した。

3. 結果および考察

3.1 モデル溶液の吸収特性

Table 3 に各モデル溶液の誘電率 ϵ 、損失係数 ($\epsilon \times \tan \delta$) およびそれらから算出した半減深度 D (後述) を示した。

マイクロ波が物質に浸透する場合、その電力密度が表面の 1/2 に減衰する深さを半減深度 D といい次の式で表される [14,15]。

$$D \text{ (mm)} \approx (3.32 \times 10^{10}) / (f \cdot \sqrt{\epsilon} \cdot \tan \delta) \quad (1)$$

この式へ、文献 [16] から得られた蒸留水と NaCl 溶液の ϵ および $\tan \delta$ を代入した結果、半減深度は、それぞれ約 13 mm と約 5 mm であった。

また、測定値から計算によって得られたモデル溶液 1 および 4b の半減深度は、約 10.5 mm と約 5.5 mm であり、ほぼ一致した。

モデル溶液 1 に対し、モデル溶液 4b では、損失係数が約 2 倍、半減深度は約 1/2 となり、モデル溶液周辺

Table 3 Dielectric constant, Dielectric loss factor and Calculated Half depth of each model solutions.

Model Number	Dielectric constant	Dielectric loss factor	Half depth (mm)
1	73.67	11.11	10.468
2b	66.71	11.89	9.309
3b	57.42	9.97	10.300
4b	71.05	21.11	5.411
5	51.06	18.38	5.268

部で熱に変換されやすくなることわかる。

また、脂質（モデル溶液 3b）は半減深度にほとんど影響しないが、タンパク（モデル溶液 2b）は約 1 mm 浅くなっている。モデル溶液 3b の損失係数がモデル溶液 1 と比較して小さいのに半減深度もやや浅くなっているのは誘電率が小さいためと考えられる。

味付けツナを想定したモデル溶液 5 では、1.0% NaCl の添加が、大きく誘電率と半減深度に影響している。

3.2 モデル溶液の加熱特性

各添加剤別の照射距離 45 mm（後述）における温度特性を Fig. 4 に示す。NaCl 添加のモデル溶液 4a は、モデル溶液 1 と比較して、C 点の温度が高く、他の測定点との温度差が大きい。

NaCl 濃度を増加させたモデル溶液 4b では、さらに C 点の昇温が速くなり、100℃到達時における A 点の温度が低くなっている。

モデル溶液 1 の C 点では、深さ 5 mm よりも底面付近の 8 mm における温度が約 8℃低くなっている。これは、モデル液表面からの放熱のためと考えられる。

モデル溶液 2a, 2b, 3a, 3b はモデル溶液 1 の加熱特性に近似している。ただし、Table 3 の結果にもあるが、半減深度がやや浅い 2a, 2b が 3a, 3b よりも C 点の温度が高い。

また、モデル溶液 5 は NaCl 添加のモデル溶液 4a, 4b に近い特性を示した。つまり A 点および B 点よりも C 点の昇温が速く、食品中の加熱温度を不均一にさせる要因のひとつは NaCl 濃度と考えられる。

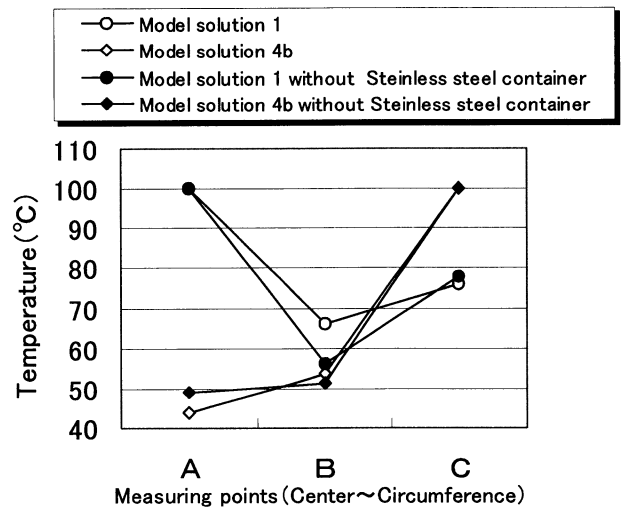


Fig. 5 Temperature change of model solutions at each measuring points without stainless steel container.

したがって、実際の味付けツナを殺菌する場合は内部殺菌が不十分となることが想定され、この点に特に注意する必要がある。今後は種々の固形食品の加熱特性について追求することとする。

また、ステンレス容器使用時・未使用時の加熱特性を Fig. 5 に示す。モデル溶液 1 および 4b とも、各測定点で最大約 10℃の温度差がみられたが、NaCl 添加により C 点が高温となる傾向は変わらなかった。

ここで、モデル溶液に 7.0%濃度のデンプン溶液をベースとしたのは、ツナを想定した場合、6.0%では粘度が足りず、8.0%ではツナと比較して硬くなること、温度センサが挿入しやすいことおよび粘度をもたせることで熱の対流効果を抑制できると考えたからである。

3.3 照射距離と 100℃到達時間

Fig. 6 に示すように、各モデル溶液は、照射距離を変化させると到達時間が変化し、モデル溶液 1 におけるステンレス容器使用時および未使用時の到達時間の差

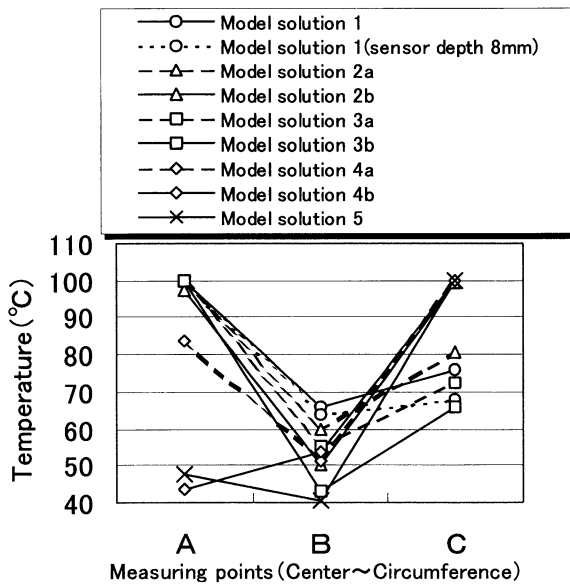


Fig. 4 Temperature change of model solutions at each measuring points.

- A: Temperature of Center position
- B: Temperature of Middle position
- C: Temperature of Circumference position

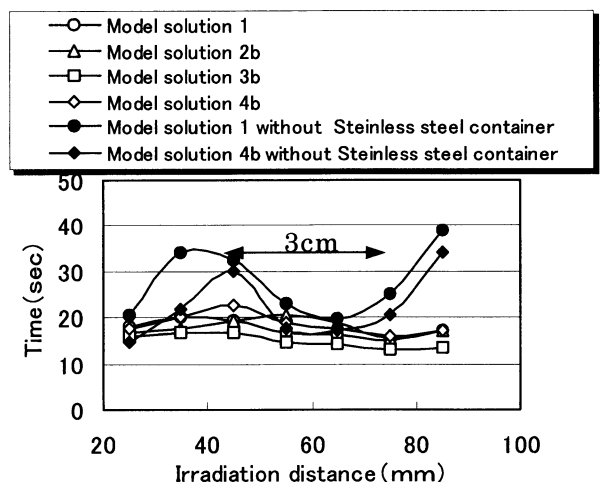


Fig. 6 Irradiation distance and time of attainment to 100℃.

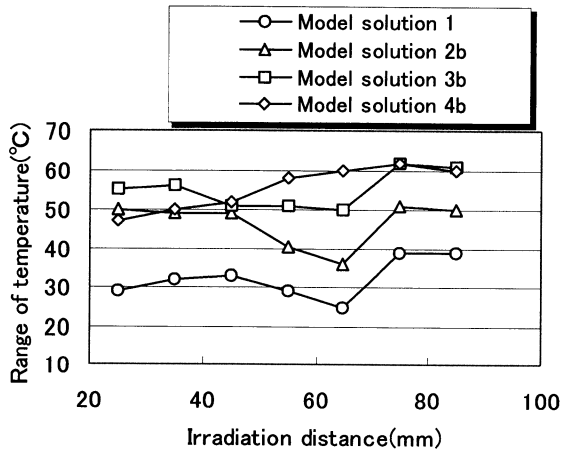


Fig. 7 Irradiation distance and range of temperature among A, B and C.

は、約 14 秒と約 5 秒であった。

また、ステンレス容器未使用時では、マイクロ波の波長： $\lambda \approx 12$ cm の 1/4 に相当する 3 cm 毎に到達時間が短くなる距離がある。これは、導波管からの至近距離における電界分布が、約 3 cm 間隔で強弱を繰り返すためであり、ステンレス容器を使用すると内部で反射・分散し、その傾向が小さくなると思われる。

さらに照射距離を離すとマイクロ波が分散してしまい、マイクロ波電界分布の傾向は弱まるものと考えられる。

Fig. 7 に、照射距離と 100 °C 到達時の A, B および C 点間の最大温度差を示す。モデル溶液 1, 2b では、65 mm で温度差が減少したが、モデル溶液 4b では 45 mm 以上における温度差が増加する傾向にある。

ここで、NaCl 添加のモデル溶液 4b の温度差が比較的小さいことと、熱伝導を期待する意味から、比較的到達時間の遅い 45mm を照射距離条件として設定した。

3.4 モデル溶液 1 および 4b の昇温曲線

モデル溶液 1 および 4b の照射距離 45 mm における昇温曲線結果を Fig. 8 および Fig. 9 に示した。

どちらも 2 次曲線となり、モデル溶液 1 の到達時間は

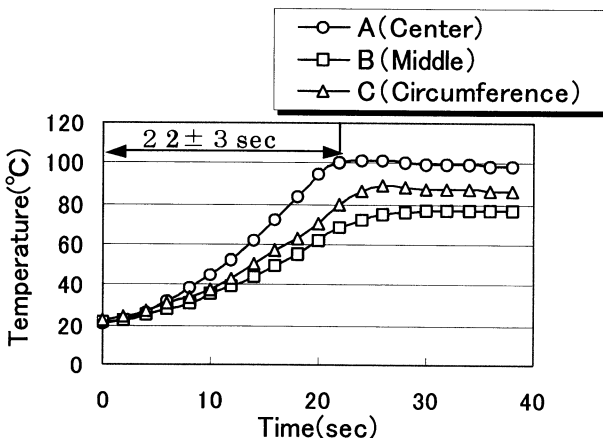


Fig. 8 Temperature change of model solution 1 (starch).

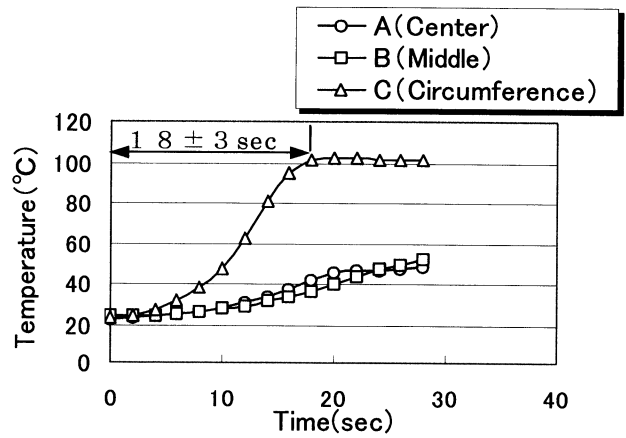


Fig. 9 Temperature change of model solution 4b (NaCl).

22 ± 3 秒で A 点の温度上昇がもっとも速かった。B 点が加熱終了後も昇温しているのは周囲からの伝熱と考えられる [17]。

モデル溶液 4b の到達時間は、18 ± 3 秒で周辺部 C 点の温度上昇がもっとも速かった。ただし、A 点と B 点は昇温が遅く、C 点が 100 °C へ到達した時点でその温度差が 53 °C 程度であった。

また、図示しないが、照射距離 45 mm 以外でも同様の昇温曲線を示した。

3.5 均一加熱を目的とした改良方法

食品の周辺部が速く加熱される現象は NaCl に起因すると考えられ、その加熱集中を抑制する目的でモデル溶液の入ったカップを蒸留水へ浸漬させ、蒸留水温度も測定しながら照射距離 45 mm で加熱テストした。実際の生産ラインでは容器は密封シールされているので蒸留水に浸漬するだけでよい。

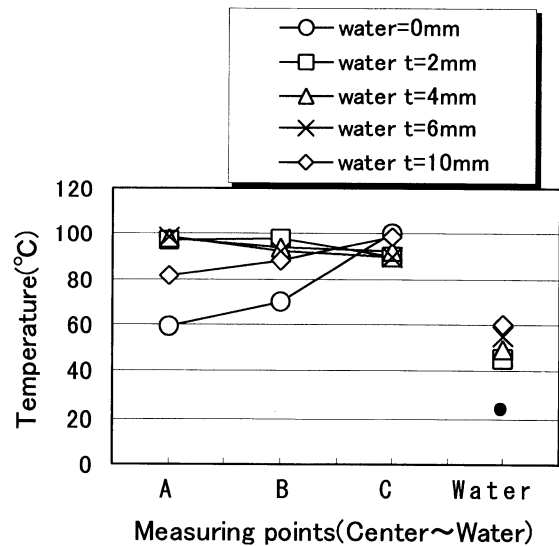


Fig. 10 Effect on temperature change at each thicknesses of distilled water.

● Initial temperature of water

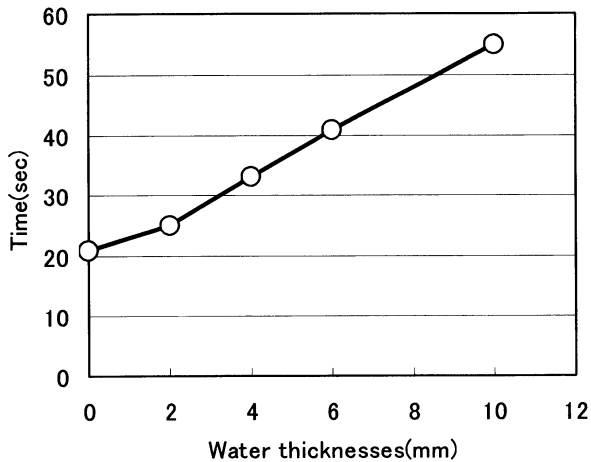


Fig. 11 Effect on the time to attain to 100°C of model solutions at each thicknesses of distilled water.

Table 4 Consumed calorie of distilled water at each thickness in model solution 4b.

Water thickness (mm)	Weight (g)	Calorie (cal)
2.0	17.7	389.6
4.0	39.1	1016.1
6.0	64.4	2061.8
8.0	128.2	4744.9

モデル溶液 4b の場合, 周囲に 2 mm 厚さの蒸留水を配置した状態では温度のばらつきが低減され, A, B, C 点で 10 °C 程度の差であり (Fig. 10), 到達時間は平均 25 秒 ($n = 5$ 回) であった (Fig. 11).

また, 蒸留水の厚さを 10 mm とすると到達時間が平均 55 秒 ($n = 5$ 回) と長くなり, 温度差も約 20 °C と大きくなった.

蒸留水がマイクロ波によって消費する熱量を Table 4 に示した. 30 g のモデル溶液 4b を 100 °C まで加熱する場合, 3000 (cal) となるが, 2 mm 厚さの蒸留水では温度上昇は約 22 °C で約 389.6 (cal), 10 mm 厚さでは温度上昇が約 37 °C で, 消費する熱量は約 4744.9 (cal) であった.

これは蒸留水の損失係数 ($\epsilon \times \tan \delta$) が, モデル溶液 4b と比較して充分小さいことにより, 蒸留水のマイクロ波吸収が少ないことを示している.

一方, 蒸留水の温度が低いためにカップ表面内側の殺菌不足が予測されるが, 初期温度を高くすることで解決できる.

2 mm 厚さの蒸留水の消費する熱量は, 10 mm 厚さの約 8.2% であり, エネルギーロスが小さくなること, および 1 mm 厚さでは実験の都合上, 配置困難なことから, 今回は 2 mm 厚さをテスト条件とした.

4. 結 論

食品のマイクロ波加熱による高温短時間殺菌を行う場合, 急速加熱が期待される反面, 内部温度が不均一となり, 品質面で大きな問題が懸念される. 内部温度を不均一にする原因とその対策について, 固形食品を想定したモデル溶液の実験結果から以下の結論を得た.

1) モデル溶液に 1.0% NaCl を添加することで, マイクロ波の損失係数が約 2 倍, 半減深度は約 1/2 となる.

2) 至近距離の場合, 照射距離約 1/4 波長ごとに到達時間が短くなる距離が存在する. ただし, 照射距離を離すとマイクロ波は分散し, その傾向は弱くなると考えられる.

3) 食品中の成分組成であるタンパク, 脂質, NaCl のうち, 温度を不均一にさせる大きな要因は NaCl であった. NaCl を含有すると損失係数が大きく, 半減深度が浅いため, エッジ効果として周辺部から加熱されるものと考えられる.

4) エッジ効果低減対策は, モデル溶液を蒸留水へ浸漬させて, モデル溶液の周辺部 (エッジ) を蒸留水に代用させることである. カップへ充填したモデル溶液は上下面および側面を 2 mm 厚さの蒸留水に浸漬することで温度の不均一性低減に効果があった.

これら結果をふまえて, 今後, 連続殺菌システムを構築するとともに, 種々の固形食品におけるマイクロ波特性および殺菌 [18] の研究を進める予定である.

NOMENCLATURE

f	: Frequency, Hz
ϵ	: Dielectric constant, F/m
$\tan \delta$: Dielectric loss tangent
$\epsilon \times \tan \delta$: Dielectric loss factor
D	: Half depth, m

引用文献

- 野中順三九; “新版水産食品学”, 恒星社厚生閣, 1976, 251-253.
- 三浦 洋; “最新・ソフトドリンクス”, 光琳, 2003, 727-735.
- 清水 潮, 横山理雄; “レトルト食品の基礎と応用”, 幸書房, 1995.
- 早川喜郎; 野菜加工品の無菌充填技術について. 食品と開発, **38** (8), 7-9 (2003).
- 中川善博, 河村雄二; 固形物マイクロ波殺菌装置による食品の殺菌, 包装技術, **23** (12), 1102-1104 (1985).
- 佐藤誠吾; マイクロ波殺菌の特徴とその応用. 食品と容器, **44** (11), 652-657 (1999).

- 7) 矢野俊博；マイクロ波・紫外線併用殺菌機の特性，食品工業，**10** (30)，16-20 (1999)。
- 8) 渡辺昭信，行方みゆき；家庭用電子レンジによる食品の加熱ムラと殺菌効果に関する研究，国際学院埼玉短大研究紀要，**20**，73-80 (1999)。
- 9) 林 正利，島崎保家，鎌田信一，柿市徳英；マッシュポテトのマイクロ波加熱殺菌効果に及ぼす食塩濃度の影響，日本公衆衛生雑誌，**38** (6)，431-437 (1991)。
- 10) 横田 進，平田直毅，田中重利，大橋籐五郎；生そう菜類の殺菌技術の開発，食品産業センター技術研究報告，**15**，67-81 (1989)。
- 11) 露木英男；マイクロ波加熱による食品の殺菌と保存，日本食品工業学会誌，**30** (1)，55-62 (1983)。
- 12) 柴田長吉郎，秋岡哲夫，木戸 保，羽田英夫；食品の調理・殺菌へのマイクロ波の応用，食品産業センター技術研究報告，**2**，85-95 (1978)。
- 13) 江崎光雄，下田忠久；マイクロ波の局部加熱緩和効果，日本食品工学会誌，**4** (2)，39-46 (2003)。
- 14) 佐藤誠吾；次世代の食品製造・加工技術・マイクロ波による食品の製造加工技術，科学装置，**39** (3)，42-47 (1997)。
- 15) 石原正和；食品のマイクロ波殺菌，月刊フードケミカル，**8** (7)，49-59 (1992)。
- 16) 門屋 卓，横山理雄；“電子レンジ食品応用ハンドブック”，サイエンスフォーラム，1988，110-111。
- 17) 小谷スミ子，阿部敏也，三間 孝；家庭用電子レンジによる食品の殺菌，食品衛生学雑誌，**36** (4)，477-481 (1995)。
- 18) James Giese; Advances in Microwave Food Processing. Food Technology, **46** (9), 118-123 (1992)。

要 旨

本研究は，固形食品の高温短時間殺菌処理による色調やフレーバーの改善効果と，消費拡大が期待される風味付き魚肉ソーセージ，かまぼこ，味付けツナ，ジャムなどの固形食品を中心とした流動性の乏しい食品（以下固形食品）の製造を目的とした。ここでは成分調整したモデル溶液を使用し，食品内部の温度を不均一にさせる原因の解明とその対策について研究を行い，以下の結果を得た。

モデル溶液の加熱テスト結果より，食品内部温度を不均一にする要因のひとつはNaClであることを確認した。食品の殺菌においては，内部の均一な殺菌温度が必須であり，その対策として有効な方法はエッジ効果を軽減することである。

つまり，食品を充填包装密封し，その周囲を蒸留水の厚さが2 mmとなるように浸漬させ，見かけ上の食品の周辺部（エッジ部）を蒸留水が代用することによってエッジ効果を低減させることが可能であった。

また，その蒸留水の半減深度は充分深いため，食品の加熱効率を著しく低下させるものではなかった。この結果をふまえて，今後は連続殺菌システムを構築するとともに，種々の固形食品におけるマイクロ波特性および殺菌の研究を進める予定である。