

◇◇◇◇ 原著論文 ◇◇◇◇

固形および高粘度食品の連続処理における 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 新潟大学大学院自然科学研究科

Basic Study for High Temperature and Short Time Sterilization by Continuous Microwave Heating for Solid Foods or High Viscous Foods

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

¹ Central Lab, Daiwa Can Company, 5-5-1 Nishihashimoto, Sagami-hara-shi, kanagawa 229-1183, Japan

² Niigata University, 8050 2-no-cho, Igarasi, Niigata-shi, niigata 950-2181, Japan

This report of basic study will discuss a technique of heating solid foods or high viscous foods in transit on a conveyor for possible commercial applications. By using model solutions with adjusted ingredients, we have found that: 1) Continuous radiation against the model solutions in transit from plural units of microwave generators with different heating characteristics at a relatively short irradiation distance of 45mm causes dispersion of edge effects and is effective for uniform temperature within the solutions. 2) Scanning a top surface of the model solutions by wave guides is effective for uniform temperature within the solutions as they are exposed to electric fields of relatively high intensity. 3) With a distilled water immersing method, a 2mm thick water jacket is an optimum condition for minimizing the edge effects. This indicates that use of the distilled water immersing method is effective in continuous high temperature short time sterilization of foods that call for highly accurate thermal control. On the basis of these results, we will plan designing a system of continuous sterilization of solid foods at temperature of 100 degrees Celsius and over, and continue basic studying behavior of microwaves and microwave sterilization with various solid foods.

Key words: Solid foods, high viscous food, continuous microwave heating, high temperature and short time, edge effect, wave guide

1. 緒 言

近年の食品の高品質化および健康食ブームにより、容器へ充填密封した固形および高粘度食品（以下固形食品）では、高温短時間殺菌処理を行った高品質製品の消費拡大が期待できる。従来の殺菌方法では、レトルトあるいは低温殺菌処理のように、容器外部からの熱伝導を利用する加熱方法であり、食品の中心部まで十分に加熱・殺菌するため処理時間が長くなり、品質を劣化させる場合もあった。

そこで我々は、PETおよびPP材等の高分子樹脂からなるプラスチック容器へ充填・密封した後、直接食

品を加熱できるマイクロ波加熱に着目して、高温短時間殺菌処理を考えた。

前報 [1] において、固形食品を想定したモデル溶液の静置状態におけるマイクロ波加熱では、部分的に過剰加熱されてしまうエッジ効果 [2,3] があり、その主な要因が NaCl であること、およびその低減対策の1つとして、周囲を蒸留水に浸漬させる方法を報告した [4]。

実生産を考慮すると、次のステップでは、食品を移動させながら連続加熱処理する方法が考えられるが、これは1980年代頃から研究され、装置の開発事例 [5,6] もある。しかし、依然としてエッジ効果による温度不均一の問題を抱えており、製造機として安定した生産を行うには至っていないのが現状である。

我々は、その問題点を、固形食品への照射距離とマイクロ波発振器（以下 MW 発振器）の特性および導波管の配向とを考え、移動するモデル溶液の上方から、複

(受付 2005 年 4 月 4 日, 受理 2005 年 6 月 2 日)

〒 229-1183 神奈川県相模原市西橋本 5-5-1

〒 950-2181 新潟県新潟市五十嵐 2 の町 8050 番地

数の MW 発振器で個別に照射・加熱する連続加熱装置の設計指標を示すことを目的として、以下の実験を行った。

最初に、前報の結果から照射距離を 45 mm とし、静置したモデル溶液における、各 MW 発振器の加熱特性を調査した。次に、モデル溶液を移動させることで、導波管とモデル溶液の相対位置の変化にともなって電界分布が変化し、エッジ効果が軽減できると考え、連続加熱特性を評価した。最後に、連続加熱と蒸留水へ浸漬する方法を併用した場合の効果を確認する基礎的実験を行った。

本研究結果から、食品を連続加熱処理する装置の基本設計指針を示し、そのメカニズムの一端を解明することができたので、以下に報告する。

2. 実験方法

2.1 モデル溶液

本実験には 3 種類のモデル溶液を使用した。

モデル溶液 1 は、蒸留水に 1.0% NaCl を添加し、攪拌して平均温度を測定できるように低粘度とした。

モデル溶液 2 は、蒸留水をベースとし、1.0% NaCl と 0.2% ヨウ素および 7.0% デンプンを添加して、高粘度とした [7]。また、モデル溶液 2 は、連続加熱実験 (2.5 項で説明) で使用するモデル溶液 3 (後述) に、ヨウ素を添加したもので、攪拌しながら 60 ~ 80℃ に加熱溶解したのち、NaCl とヨウ素を添加し、室温まで冷却して作製した。ヨウ素を添加したのは、加熱前に茶褐色であったモデル溶液が、60 ~ 70℃ 以上に加熱されることで、ヨウ素でんぷん反応により透明に変化する [8] ことを利用し、色で温度分布を確認するためである。

モデル溶液 3 は、前報同様実際の固形食品を想定し、蒸留水をベースとした 7.0% デンプン溶液に 1.0% NaCl を添加して高粘度とした。

各モデル溶液は、空調室で初期温度を $23 \pm 1^\circ\text{C}$ に調整した。

2.2 カップとステンレス容器

モデル溶液 30 g を充填するカップは、ポリプロピレン製で、上面の直径は 64 mm、下面の直径は 54 mm、高さ 25 mm とし、蓋も同材質で作製した (Fig. 1)。

また、前報同様カップを収容する容器として、縦 120 mm × 横 145 mm × 高さ 32 mm で、厚さ 0.5 mm のステンレス製容器 (以下ステンレス容器) を使用した。このステンレス容器については詳細を 3.1.1 項で説明する。

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。

2.3 連続マイクロ波加熱装置

Fig. 2 に本実験で作製した連続マイクロ波加熱装置と、その中心部拡大図 A を示す。前回と同仕様の MW 発振器 (松下電子工業製: 出力 600 W) を 4 台使用した。MW 発振器は、幅 1200 mm × 奥行き 650 mm 高さ × 500 mm のアルミ製チャンバの上部に設置し、カップ移動方向の上流から No.1 ~ No.4 の順に配置した。MW 発振器に接続した縦 35 mm × 横 85 mm の導波管は、チャンバ内へ 170 mm 挿入し、移動方向に対して長辺側が平行または直交となるように、300 mm 間隔で設置した。

前報の結果より、モデル溶液の液面と導波管先端までの距離 (以下照射距離) は、コンベアベルトとステンレス容器の間にテフロン台を設置して調整し、45 mm とした。

コンベアベルト上のカップは、マイクロ波を外部へ漏洩させないために設けたフィルターゾーンを通過し、加熱ゾーンへ入る。続いて、各導波管から照射されるマイクロ波により、移動しながら順次加熱された後、再びフィルターゾーンを通過して外部へ取り出される。移動速度は、実験装置の都合上、最小 $1.5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ および最大 $3.0 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ とした。

2.4 静置加熱実験

実験は、モデル溶液 1 および 2 を使用し、コンベア

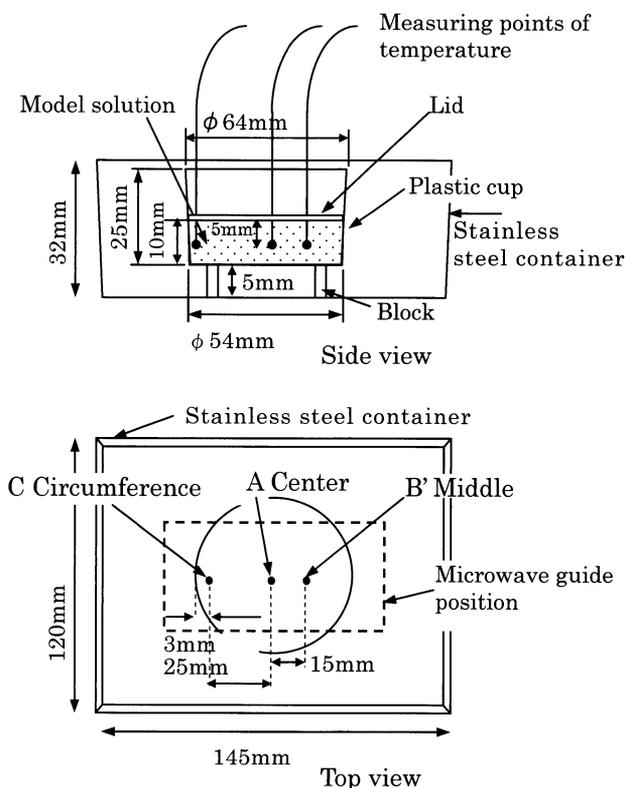


Fig. 1 Cup, stainless steel container and position of thermometer

ベルトを停止させて行った。

2.4.1 温度測定器

加熱終了直後のモデル溶液の温度は、K型熱電対式デジタル温度計(横河電機製:TX1002)とプローブ(同:90021, シースタイプ液中高速応答型)を使用し、モデル溶液にプローブを挿入して測定した。

2.4.2 MW 発振器の特性

前報では、1台のMW発振器を使用し、静置したモデル溶液の加熱特性を検討した。本実験では、容積の大きいチャンバとMW発振器を4台使用しているため、個々の特性に差があると考え、加熱特性を調査した。

初期温度を $23 \pm 1^\circ\text{C}$ に調整したモデル溶液1あるいは2を、MW発振器に接続した導波管の直下で静置加熱した。実験は、モデル溶液を1個だけ加熱する条件(以下1個加熱)と4台のMW発振器に対して各1個で合計4個加熱する条件(以下4個加熱)とし、4台を同時に発振させながら15秒間加熱した。このとき、導波管の配向はレイアウト2(2.5.1項で説明)とした。

モデル溶液1の加熱終了直後の温度は、デジタル温

度計を挿入し、攪拌しながら平均温度を迅速に読取り、記録した。

モデル溶液2では、加熱終了直後の色を目視で確認するとともに写真に記録し、温度の均一性を評価した。

2.5 連続加熱実験

実験は、モデル溶液2あるいは3を使用し、移動しながら加熱(以下連続加熱)した。

2.5.1 導波管の配向特性実験

照射距離を45mmとして連続加熱する場合、導波管の配向によりマイクロ波の照射位置が変化し、温度分布に影響があると考え、カップの移動方向に対する導波管の配向を平行(レイアウト1)または直交(レイアウト2)の2方向で実験した(Fig. 3)。

モデル溶液2を使用し、移動速度 $1.5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ における加熱終了直後の色を確認するとともに写真に記録し、温度の均一性を評価した[9]。また、深さ5mmにおける中心部A点、進行方向の前後のB点とC点、左右のD点およびE点の加熱終了直後の各温度は、デジタル温度計をすばやく挿入して測定した。

2.5.2 移動中の温度測定方法と移動速度

連続加熱中のモデル溶液3の内部温度測定は、先端に感温部がある光ファイバ温度計(安立計器製:FL-1000)3台で行い[10]、温度をデータレコーダ(横河電機製:AR-1100)に記録した。

測定点は、前報同様であるが、モデル溶液の中心部A点、中間部B'点および周辺部C点の3点で、液面から深さ5mmとした(Fig. 1)。光ファイバ温度計の感

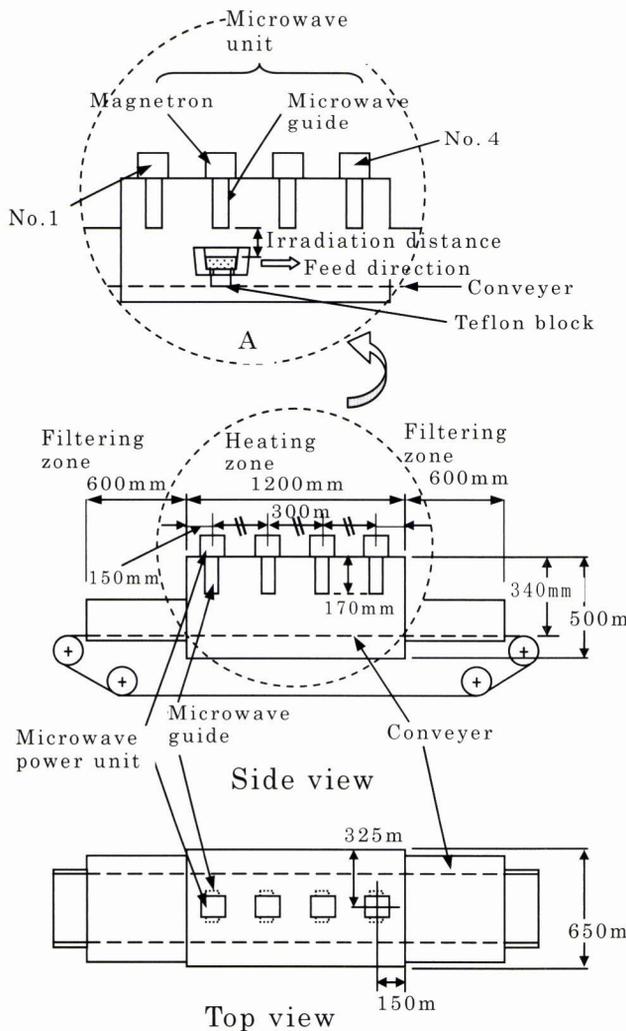


Fig. 2 Conveyor system of Microwave heating device

Plastic cup and position of thermometer

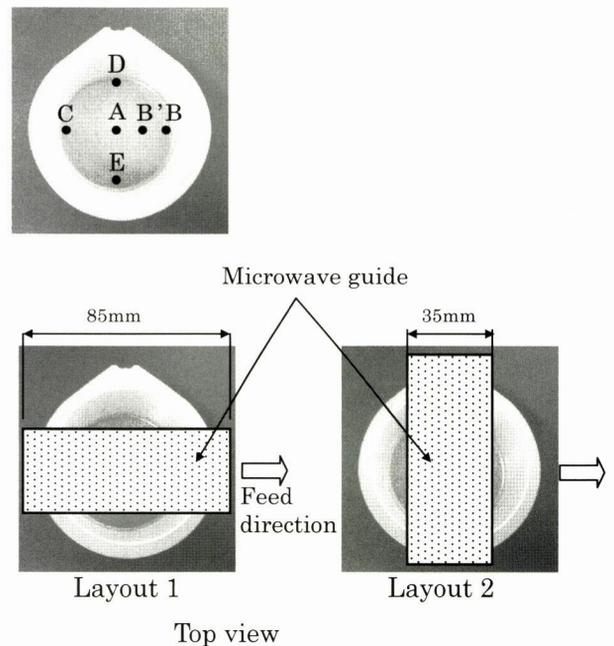


Fig. 3 Position of thermometer and layout of microwave guide

温部は、マイクロ波の吸収を無視できるテフロン製の蓋に貫通させて固定し、ファイバケーブルは、コンベアベルトにテフロンテープで固定した。移動中は、光ファイバ温度計の感温部に負荷がかかることで温度測定位置がずれないように、移動速度に同調してファイバケーブルを手で送った。

2.5.3 移動速度

移動速度は1.5, 2.25および3.0 m・min⁻¹の3条件とし、移動中のモデル溶液3のA, B'およびC点の温度を連続して測定した。

2.6 エッジ効果低減対策

NaClを含むモデル溶液3を連続加熱する場合、エッジ効果を低減させる目的で、前報[1]から得られた次の方法を併用した。

蓋をしたテフロン製のカップを、蒸留水が入ったやや大きいプラスチック製容器に收容し、浸漬した。プラスチック製容器は、カップの上下面および側面とも蒸留水の厚さが2 mmとなる容器を使用した。

連続加熱中のモデル溶液3の温度は、2.5.2項同様に光ファイバ温度計を3台使用し、連続して測定した。

3. 結果および考察

3.1 装置特性

3.1.1 ステンレス容器

殺菌は、100℃以上の高温で加圧加熱を行うため、数個のモデル溶液を收容可能で、耐熱性および加熱時の最大圧力0.4 MPaに耐えられるステンレス製加圧容器の使用を考えた。

マイクロ波の透過効率を考慮すると、効率の高いテフロンを全面に使用した加圧容器が考えられる。しかし、本報では上方から照射するマイクロ波をステンレス容器内面で反射し、下面からモデル溶液を効率よく照射・加熱できると考えたこと、および全面がテフロン製では耐圧容器として認められていないことなどを考慮し、テフロン製の蓋を有するステンレス製容器とした。ただし、本実験では100℃以下の加熱実験であり、

加圧しないことから、材質を考慮して前述のステンレス容器を使用した。

3.1.2 静置加熱におけるMW発振器の特性

モデル溶液1を使用し、1個加熱および4個加熱時の加熱前後の温度差(ΔT_1 , ΔT_2)を測定した結果をTable 1に示す。

この実験でデンプンを添加しないモデル溶液1を使用したのは、加熱中に熱の対流を発生させ、加熱終了後の攪拌を容易にし、平均温度をデジタル温度計で迅速に測定するためである。

1個加熱、4個加熱結果とも、MW発振器No.1およびNo.2直下のモデル溶液より、No.3およびNo.4の方がやや ΔT が大きくなった。これは試作した加熱チャンバーの特性であり、4台のMW発振器の電界分布が同一ではないためと考えられる。

また、1個加熱と4個加熱の ΔT の差 $\Delta T_1 - \Delta T_2$ は、各MW発振器で0~3.0℃であり、4台が同時に発振しているにもかかわらず、1個加熱の ΔT は数℃大きいだけであった。

ΔT の差が小さいのは、前報の結果より、温度の均一化に効果のあった照射距離が45 mmと比較的近距離であったため、導波管直下のモデル溶液を集中的に加熱すること、および隣り合う導波管の間隔が300 mmであることから、周囲から浸入するマイクロ波の影響が小さいためと考えられる。

次に、静置加熱したモデル溶液2の温度の均一性を確認するため、上方から観察し、写真に記録した結果をFig. 4の上段に1個加熱、下段に4個加熱として示す。モデル溶液の中心と上下部分は透明となり、60~70℃まで充分加熱されていた。しかし、左右部分は、加熱が進まず、やや茶褐色(写真では黒色)になった。これは、カップに充填したモデル溶液の左右部分が、導波管の短辺側(35 mm)の外側となり、電界密度が小さいためと考えられる。

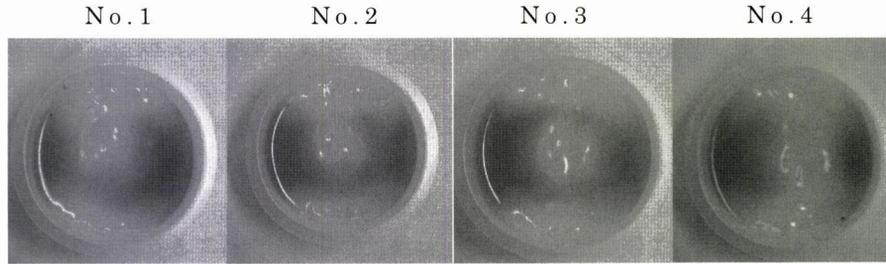
1個加熱および4個加熱の場合とも、MW発振器No.2およびNo.3が左右対称に加熱されているのに対し、No.1は入口側、No.4は出口側の透明部の面積が広く、加熱が進んでいた。これは、加熱チャンバー内の

Table 1 $\Delta T(K)$: Rise temperature for 15 seconds heating

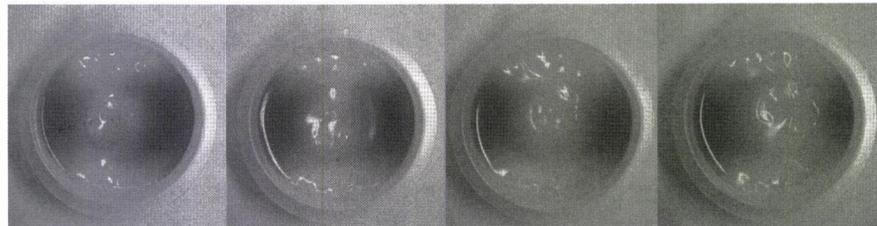
Number of MW heating unit	$\Delta T_1(K)$			$\Delta T_2(K)$	$\Delta T_1 - \Delta T_2(K)$	
No.1	48.4			48.4	0	
No.2		48.5		46.5	2.0	
No.3			52.4	49.4	3.0	
No.4				51.0	49.2	1.8

ΔT_1 : Heating one model solution at each time ΔT_2 : Heating four model solutions at the same time

Number of MW heating unit



Heating one model solution at each time



Heating four model solutions at the same time

Fig. 4 Pictures of heated model solution with iodine

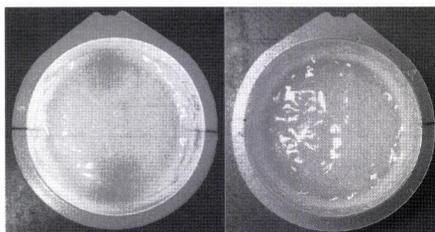
出入口側の壁面に反射したマイクロ波が、モデル溶液へ集中し、高温になったためと考えられる。

ここで、7.0%濃度のデンプン溶液をベースとしたのは、高温短時間殺菌により市場拡大が期待できる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 [11]。

また、モデル溶液に添加したヨウ素およびデンプンの各濃度では、損失係数に顕著な変化がみられなかった。

3.1.3 連続加熱における導波管の配向特性

モデル溶液2を使用し、導波管の配向をレイアウト1（平行）またはレイアウト2（直交）として連続加熱した直後の温度の均一性を確認し、写真に記録した結果を Fig.5 に示す。レイアウト1ではモデル溶液の上下部分が黒く、到達温度が低かった。一方、レイアウト2では、全面が透明となり、60～70℃まで充分加熱されていることがわかった。レイアウト1は、モデル溶液が移動しても、導波管が中央部を集中して加熱する配向となり、上下部分を充分加熱できなかったためと考



Layout 1 Layout 2

Fig. 5 Pictures of heated model solutions

えられる。一方、レイアウト2は、モデル溶液が時間とともに移動することによって、マイクロ波がモデル溶液の全上面を走査することになり、加熱部が分散されるため、全体が透明になっていると考えられる。

次に、Fig. 6 に MW 発振器の配向と加熱温度結果を示す。初期温度を $23 \pm 1^\circ\text{C}$ に調整したモデル溶液2の加熱終了直後の温度を比較すると、A、BおよびC点で温度がほぼ 90°C に到達していた。しかし、DおよびE点では低く、レイアウト1では約 67°C 、レイアウト2では約 83°C であり、Fig.5の結果と一致していた。これは、カップの直径が 64 mm に対し、導波管の中心部から離れるほど電界密度が低くなるためと考えられる [12]。このことは、カップの直径に対して十分な長さを持つ導波管の設計を検討することで、さらに温度を均一化できる可能性があると考えられる [13]。

モデル溶液が、コンベアベルト上を移動しながら加

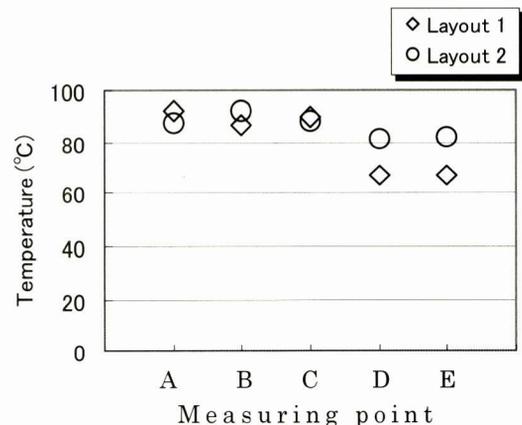


Fig. 6 Direction of microwave guide and Temperature

熱される場合、内部温度を均一にするためには、導波管の配向をモデル溶液の移動方向と直交させて、モデル溶液の全上面を走査するレイアウト 2 が有効であった。

3.2 新規に開発した連続加熱装置の特性

実生産を考慮すると、モデル溶液は、連続した複数個の処理を行うことが考えられるが、1個加熱と4個加熱で加熱特性に大きな差が認められなかったこと、また、実験の都合上光ファイバ温度計が3台であること、実験条件が煩雑になること、および再現性を考慮して、1個のモデル溶液を連続加熱することとした。

各移動速度のモデル溶液の加熱特性を Fig.7 に示す。各移動速度とも、マイクロ波の照射と同時に3点の温度が上昇し、エッジ部 (C点) の温度が高い傾向であった。温度は時間とともに直線的に上昇しているが、これは 1% NaCl 添加のモデル溶液の損失係数 $\epsilon \cdot \tan \delta$ が、21.10 ~ 22.04 (25°C ~ 80°C) であり、ほとんど温度に依存しないためと考えられる [14]。

移動速度 1.5 m·min⁻¹ において、特にエッジ部 (C点) の温度上昇が速く、導波管直下付近で加熱され、導波管と導波管の間では緩やかな加熱特性となった。

これは、導波管からの照射距離が短いため、導波管直下で電界密度が高く、マイクロ波がモデル溶液へ直接照射されていることと、導波管間では電界密度が低いため、加熱よりも高温部から低温部への熱拡散による温度の均一化傾向が表れているためと考えられる。

ここで、加熱ゾーンのチャンバー長さ 1200 mm では、移動速度 3.0 m·min⁻¹ の場合、加熱時間が 24 秒となることに着目し、各速度における加熱開始から 24 秒後の各温度測定点 A, B' および C 点の温度差 (最大温度 - 最低温度) を計算し、Table 2 に示す。

加熱開始から 24 秒後の 3 点の平均温度は、各速度とも 50 ~ 60°C (Fig. 7 参照) であるが、その温度差は、

移動速度 3.0 m·min⁻¹ において最も小さい値を示した。

これは、移動速度 1.5 m·min⁻¹ では、主に No.1 と No.2 の MW 発振器から照射・加熱されるのに対し、3.0 m·min⁻¹ の場合は、異なる加熱特性をもつ 4 台の MW 発振器から加熱されるためと考えられる。つまり、各 MW 発振器の異なる電界分布領域を、短い照射距離で順に 4 回照射・加熱されること、および導波管間では熱拡散効果が期待できるからである。

ただし、移動速度を増加させると、トータルの加熱時間が短縮されることになるので、本実験機で 130°C まで加熱するためには、MW 発振器の増設が必要となる。ここで、加熱による温度上昇を直線と考えて 3.0 m·min⁻¹ 時に必要となる台数を試算した。

30 g のモデル溶液を、初期温度 23°C から 130°C まで加熱するエネルギーは 3210 cal となる。同様に、移動速度 3.0 m·min⁻¹ 時の到達温度約 50°C におけるエネルギーは 810 cal となり、その比率は式 (1) のように、約 3.96 倍となる。

$$3210/810(\text{cal}) = 3.96 \quad (1)$$

したがって、 $3.96 \times 4 \text{台} = 15.84 \text{台}$ となり、試算では 16 台の MW 発振器が必要となると考えられる。

複数の小型 MW 発振器を使うことは、コストが安価なこと、および個々の加熱特性が異なることで、加熱温度のばらつきが抑制されること、およびメンテナン

Table 2 Difference of temperature after 24 seconds heating at each Velocity

Velocity (m·min ⁻¹)	Difference of Temperature (K)
1.5	31.7
2.25	26.3
3.0	12.7

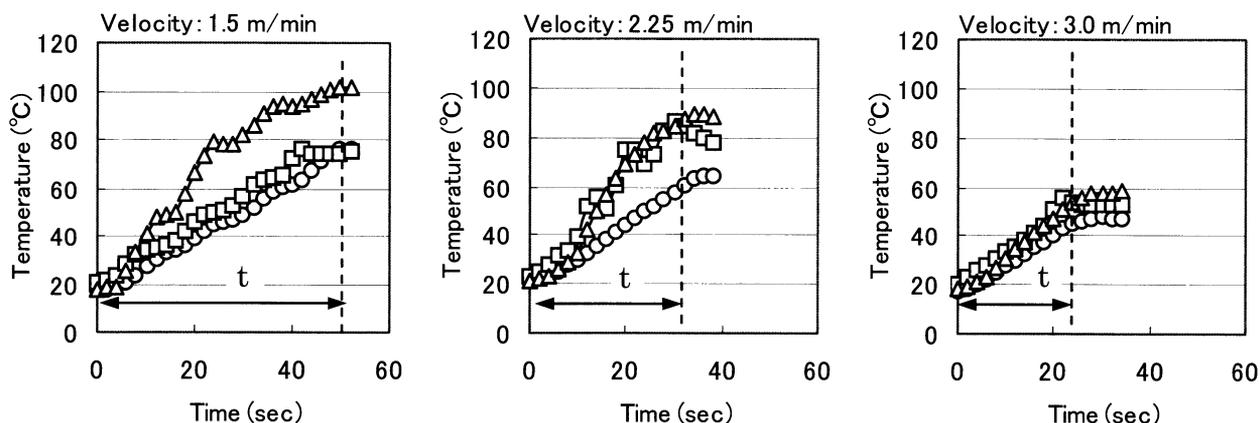


Fig. 7 Temperature curve of heating model solution at each velocity. ○ : A(Center), □ : B'(Middle), △ : C(Circumference), t : Heating time

ス時は、予備の MW 発振器と交換するだけで早急な対応が可能などなどを考慮すると、有効な設計指標である。

3.3 エッジ効果低減対策

前報同様、水膜厚さ 2 mm となるようにカップを蒸留水に浸漬して加熱した結果を Fig.8 に示す。いずれの移動速度においても効果は顕著に現れ、温度差は減少した。移動速度 1.5 m・min⁻¹ における 100℃ 到達時の温度差は、10℃ 以下であった。これは、蒸留水に浸漬することで、エッジ効果による C 点の急激な温度上昇が抑制されるためと考えられる。移動速度 2.25 あるいは 3.0 m・min⁻¹ では、さらに温度差は縮小したことから、精度の高い温度管理を必要とする殺菌処理においては有効な条件である。

また、図示しないが、水膜厚さ 6 mm における実験結果では、C 点の温度上昇が最も遅くなり、エッジ効果を過剰に抑制した結果となった。水膜を厚くすることは、かえって温度差を拡大してしまう恐れがあるばかりか、エネルギーのロスも増加するため、効果的な手段ではなかった。

4. 結 論

本研究において、固形食品を想定した高粘度のモデル溶液による連続マイクロ波加熱実験から、以下に述べる装置の設計指標を得た。

- 1) 照射距離 45 mm の比較的近距离における 4 台の MW 発振器による連続加熱では、コンベアベルト上をモデル溶液が移動することで、個々の MW 発振器の異なる加熱特性のため、エッジ効果が低減され、内部温度の均一化に効果があった。
- 2) マイクロ波を照射する導波管は、モデル溶液の全上面を走査する配向に設置することで、比較的高密度の電界領域を通過することになり、温度の均一化に効果があった。
- 3) 前報から得られたエッジ効果低減のための蒸留水浸漬手法は、水の膜厚を 2 mm とする条件が好適であった。

これは、高精度な温度管理を必要とする食品の連続高温短時間殺菌において、必要に応じて蒸留水に浸漬する手法が、実製造に有効であることを示している。

これらの結果をふまえ、今後は 100℃ 以上 [15] の高温における固形食品の連続殺菌システムを設計するとともに、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。

NOMENCLATURE

- ΔT : Rise temperature
- ϵ : Dielectric constant, F/m
- $\tan \delta$: Dielectric loss tangent
- $\epsilon \times \tan \delta$: Dielectric loss factor

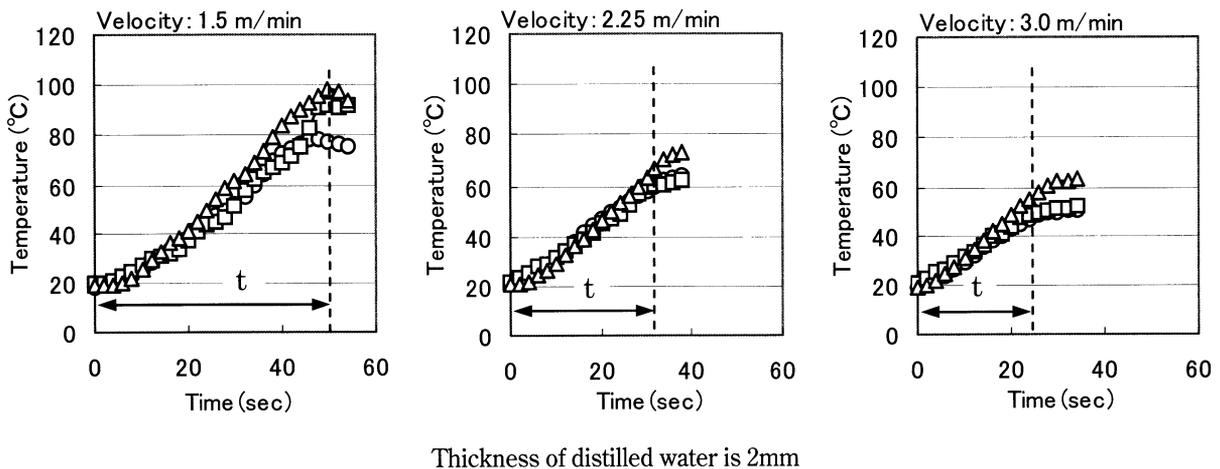


Fig. 8 Temperature curve of heated model solution at each velocity within distilled water. ○ : A(Center), □ : B' (Middle), △ : C(Circumference), t : Heating time

引用文献

要 旨

- [1] 高富哲也, 伊東章, 城斗志夫, 渡辺敦夫; 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, 日本食品工学会誌, **5**, 235-241 (2004)
- [2] 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)
- [3] 長谷川宏, 藤城克久, 久保恒夫; マイクロ波の殺菌利用に関する各種の実験, 食品の包装, **6** (1), 83-89 (1974)
- [4] 佐藤正之; 食品の殺菌の工学的扱い, 化学工学シンポジウム, **27**, 90-93 (1991)
- [5] T. E. Szeplenski; Trends In Food Preservation Technology, FOODPLAS CONFERENCE (7th), 46-59 (1990)
- [6] K. P. Self, D. Burfoot, T. J. Wilkins, S. J. James; MICROWAVE PASTEURIZATION OF PRE-PACKED SLICED HAM, Conference On Engineering Innovation In The Food Industry, 33-44 (1990)
- [7] 早川喜郎; マイクロ波による新規高品質殺菌システム開発, 食品産業センター技術研究報告, **27**, 57-61 (2001)
- [8] 南條初五郎; “化学大事典”, 共立出版, 1962, 288-289
- [9] 酒井昇, 松尾完, 程裕東, 半澤保; マイクロ波加熱時の擬似食品内温度分布の可視可と定量化, 日本食品科学工学会誌, **43** (2), 136-140 (1996)
- [10] R. Y. Ofoli, V. Komolprasert; On the thermal modeling of foods in electromagnetic fields, J. Food Processing and Preservation, **12** (3), 219-241 (1988)
- [11] N. Sakai, J. W. Tang, C. M. Liu, M. Watanabe; Predicting Temperature during the Thermal Processing of Canned High-Viscosity Liquid Food, Food Sci. Technol. Res., **10** (1), 79-85 (2004)
- [12] 柴田長吉郎; “工業用マイクロ波応用技術”, 電気書院, 1993, 33-39
- [13] 橋本修, 川崎繁男; “新しい電波光学”, 培風館, 1998, 135-139
- [14] D. Guan, M. Cheng, Y. Wang, J. Tang; Dielectric Properties Of Mashed Potatos Relevant To Microwave and Radio-frequency Pasteurization and Sterilization Processes, J. Food Sci. **69** (1), 30-37 (2004)
- [15] 小黒友勝, 小倉利夫, 久我真澄, 古滝芳雄, 森池徹; 加圧及びマイクロ波加熱を使用した食品の高速加熱殺菌技術の開発, 食品産業センター技術研究報告, 29, 435-464 (2002)

前報では, 静置した固形および高粘度食品のマイクロ波加熱処理における, 均一加熱の一つの手法を報告した. 本報では, その研究をさらに進め, 工業的実生産を考慮した連続加熱装置の設計指針を示すことを目的とした.

従来の加熱技術では, 温度不均一の問題が残されているが, MW 発振器を複数台設置し, 短い照射距離で, 移動させながら加熱することで, 固形食品内部のマイクロ波の電界分布が分散され, 均一加熱に有効である事が判明した.

ここでは成分調整したモデル溶液を使用し, 移動中の内部温度を均一にさせる方法として以下の知見を得た.

- 1) 照射距離 45 mm の比較的近距离における連続加熱では, モデル溶液を移動させながら加熱することで, 複数の MW 発振器の異なる加熱特性のため, エッジ効果が低減され, 内部温度の均一化に効果があった.
- 2) マイクロ波を照射する導波管は, モデル溶液の全上面を走査する配向に設置することで, 比較的高密度の電界領域を通過することになり, 温度の均一化に効果があった.
- 3) エッジ効果低減のための蒸留水浸漬手法は, 水の膜厚を 2 mm とする条件が好適であった.

これは, 精度の高い温度管理を必要とする食品の連続高温短時間殺菌において, 必要に応じて蒸留水に浸漬する手法が, 実製造に有効であることを示している.

これらの連続加熱装置の設計指針をふまえ, 今後は 100℃ 以上の高温における固形食品の連続殺菌システムを設計するとともに, 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.