

高粘度食品の高温短時間マイクロ波
連続殺菌技術開発のための基礎研究

高 富 哲 也

新潟大学大学院自然科学研究科

材料生産開発科学専攻

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

The growing interest of consumers in high quality and healthy foods products in recent years indicates that ready-to-serve high viscous food products with solid contents ("solid foods") that undergoes a high temperature short time thermal sterilization process will become products of greater consumption in the future. This study relates to manufacture of a high quality solid food product by using microwaves and sterilizing a solid food adequately in a short period of time after it is packed and sealed in a heat-resistant and pressure-resistant plastic container of either PET or PP material.

We have devised a process for thermally treating a solid product in a small heat- and pressure- resistant container in transit on a conveyor by means of plural units of small microwave generators, each having different heating characteristics. The present basic study has been aimed at demonstrating the concept of such device for high temperature short time continuous thermal sterilization that is low-cost and easy-to-maintain and superior in giving uniform thermal effects to solid foods.

We discuss major causes and show countermeasures for elimination of the edge effects, i.e., localized heating of peripheral portions of a solid food, that are found when a stationary model solution is heated by means of a single microwave generator. Among the major ingredients of a solid

food, we picked up three components, i.e., NaCl, lipid and protein and concluded from the experiments with model solutions of the respective components that the edge effects are caused mainly by existence of NaCl. In terms of minimizing the edge effects, we demonstrated that, when a model solution is jacketed by a layer of distilled water, the water behaves as if it is an edge portion or a peripheral portion of the solution so that the edge effects to the solution is reduced, and that a layer of distilled water in the layer thickness of 2 mm shows optimum results.

Continuous heating of solid foods by microwaves discusses an experiment using four units of small 600 W microwave generators and an experimental device that enables continuous heating of a model solution with NaCl moving on a conveyor. Based on the experiment, we propose a guideline of designing a continuous sterilization device for commercial applications. The experiment showed that continuous heating of the solution in transit by plural microwave generators each having different heating characteristics from a relatively small microwave irradiation distance of 45 mm was effective in minimizing the edge effects and ensuring uniform thermal distribution in the solution.

In short, the present basic study shows that we can uniformly heat a packaged solid food by means of a continuous heating method using plural units of microwave generators in conjunction with a distilled water immersing method. Different heating characteristics of each generator and exposure to changing electric fields while the food is in transit on a conveyor contribute to uniform thermal dispersion. The proposed method has advantages from the standpoints of manufacturing operation

and equipment installation. For example, a microwave generator, when it fails, can readily be replaced with a new one to quickly restore original operating condition. The equipment is not costly.

Through the above basic study, we have established the basic technique for a high temperature short time microwave continuous sterilization of solid and highly viscous food products. We have completed designing of a small pressure vessel that is available for thermal sterilization at a temperature of 100 °C or over, and will plan further sterilization tests with different kinds of solid foods.

高粘度食品の高温短時間マイクロ波 連続殺菌技術開発のための基礎研究（要旨）

固形食品を中心とした流動性の乏しい高粘度食品（以下固形食品）の加熱殺菌には、長時間を要するため栄養成分の損失や食品品質の低下が著しい。しかし、高温短時間殺菌処理により、上記問題が解決できるため、製品の消費拡大が期待できる。そこで、開発が進む耐熱性・耐圧性に優れたPETおよびPP材等のプラスチック容器に固形食品を充填・密封したのち、マイクロ波により、直接固形食品内部を短時間で殺菌処理し、高品質な固形食品を殺菌・製造することを考えた。

すなわち従来のレトルト殺菌法は、容器へ充填密封した大量の固形食品に対し、外部から熱伝導を利用して加熱・殺菌するため、食品中心部の殺菌に時間がかかり、部位によっては過剰な加熱となり、食品品質を低下させてしまう場合があるからである。

本研究では、安価ではあるが加熱特性にばらつきのある民生用小型マイクロ波発振器を複数台使用すること、および固形食品が少量収納可能な小型耐熱・耐圧容器を使用し、固形食品を移動させながら加熱処理することで、低コストと高メンテナンス性、および温度均一性に優れた固形食品の高温短時間連続殺菌装置の設計指針を示すことを目的とした。

第1章「緒論」では、固形食品の加熱殺菌に関し、食品の殺菌技術の歴史を述べ、レトルト殺菌技術開発の変遷と問題点を示した。さらに、既往のマイクロ波殺菌技術の研究における問題点を整理するとともに、その解決策を示し、マイクロ波に着目した根拠をまとめ、本研究における高温短時間連続殺菌のポイントを述べた。また、主なターゲットとして選定したツナおよびスイートコーンなどの固形食品市場における位置付けと将来展望および、高温

短時間殺菌の重要性を述べた。

第2章「固形食品のマイクロ波静置加熱」では、固形食品をモデル化した溶液を1台のマイクロ波発振器で加熱し、モデル溶液の周辺部（エッジ）が過熱されるエッジ効果の主な要因とその対策方法を示した。まず、固形食品に含まれる主な成分のうち、3種類（NaCl と脂質およびたんぱく質）を選び、それらを添加したモデル溶液の加熱結果から、エッジ効果の主な原因はNaClであることを示した。

マイクロ波の照射距離の検討では、NaCl 含有のモデル溶液の温度ばらつきがもっとも小さいこと、および 100℃ への到達時間が比較的長く、内部の熱伝導が期待できることから 45 mm を最適照射距離として設定した。エッジ効果低減対策は、モデル溶液を蒸留水の浸漬層で覆う方法（以下、蒸留水浸漬法）を用いた。この方法を用いると、エッジを蒸留水が代用することとなり、エッジ効果が低減されることを示した。さらに、エッジ効果低減とエネルギー効率の面から、蒸留水の厚さは 2 mm が最適であることを示した。

第3章「固形食品のマイクロ波連続加熱」では、600 W ×4 台の民生用小型マイクロ波発振器を使用し、NaCl 添加モデル溶液を移動させながら連続加熱が可能な装置を試作した。この装置の実験から、実製造を考慮した連続殺菌装置の設計指針を示した。

まず、照射距離 45 mm の比較的近距離における連続加熱では、モデル溶液を移動させることで、複数のマイクロ波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ることを示した。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。エッジ効果低減として、モデル溶液に対して第2章で開発した蒸留水浸漬法を併用することで、温度はさらに均一化することを示した。

つまり、蒸留水浸漬法は、モデル溶液のエッジ効果低減に効果があり、また、複数の民生用小型マイクロ波発振器を使用して連続加熱することは、発振器の異なる加熱特性と、移動することによる電界分布の変化により固形食品内部の均一加熱が可能であった。さらに、このシステムでは個別の発振器に動作不良が生じた場合は、該当する小型マイクロ波発振器の交換による短時間の復旧が可能であること、および装置の低コスト化など、作業上および設備上のメリットがあると考えられる。

これらの研究結果により、固形および高粘度食品の高温短時間マイクロ波連続殺菌の基礎的技術を確立することができた。今後は、本研究をもとに、種々の固形食品におけるマイクロ波による連続高温短時間殺菌を実現することで、「おいしく、食感があり、安全」な食品を供給できる連続殺菌システムの工業的な実用化を推進する計画である。

目次

第1章 緒論

1.1 食品の殺菌について

- 1.1.1 食品の殺菌の歴史……………4
- 1.1.2 食品の微生物制御技術……………4
- 1.1.3 殺菌条件からみた食品の分類……………5
- 1.1.4 レトルト殺菌の特徴……………8
- 1.1.5 高温短時間殺菌の優位性……………10

1.2 マイクロ波加熱技術

- 1.2.1 加熱技術としてのマイクロ波発展の経緯……………12
- 1.2.2 マイクロ波加熱原理……………15
- 1.2.3 既往のマイクロ波加熱技術……………17
- 1.2.4 マイクロ波加熱の問題点……………18
- 1.2.5 小型マイクロ波発振器の優位性……………18

1.3 固形食品

- 1.3.1 固形食品の市場……………20
- 1.3.2 ツナ製品の製造技術と期待される製造方法……………20

1.4 研究の目的……………24

第2章 固形および高粘度食品のマイクロ波加熱

2.1 緒言……………26

2.2 実験方法

2.2.1 モデル溶液……………26

2.2.2 実験装置および特性

2.2.2.1 マイクロ波加熱装置……………27

2.2.2.2	モデル溶液設置位置の調整	32
2.2.3	カップとステンレス容器	
2.2.3.1	モデル溶液を充填するプラスチックカップ	32
2.2.3.2	カップを収容するステンレス製容器	32
2.2.4	誘電率測定	34
2.2.5	温度測定	
2.2.5.1	温度測定装置	34
2.2.5.2	モデル溶液加熱特性の評価方法	35
2.2.6	エッジ効果低減対策	35
2.3	結果および考察	
2.3.1	モデル溶液の吸収特性	38
2.3.2	モデル溶液の加熱特性	38
2.3.3	照射距離と 100℃到達時間	43
2.3.4	モデル溶液 1 および 4b の昇温曲線	46
2.3.5	均一加熱を目的とした改良方法	46
2.4	結論	52
第 3 章 移動するモデル溶液のマイクロ波連続加熱		
3.1	緒言	54
3.2	実験方法	
3.2.1	モデル溶液	55
3.2.2	カップとステンレス容器	56
3.2.3	連続マイクロ波加熱装置	56
3.2.4	静置加熱実験	59
3.2.4.1	温度測定器	59
3.2.4.2	マイクロ波発振器の特性	59

3.2.5	連続加熱実験	
3.2.5.1	導波管の配向特性実験	60
3.2.5.2	移動中の温度測定方法	60
3.2.5.3	移動速度	62
3.2.6	エッジ効果低減対策	62
3.3	結果および考察	
3.3.1	装置特性	
3.3.1.1	ステンレス容器	62
3.3.1.2	静置加熱におけるマイクロ波発振器の特性	64
3.3.1.3	連続加熱における導波管の配向特性	68
3.3.2	新規に開発した連続加熱装置の特性	71
3.3.3	エッジ効果低減対策	75
3.4	結論	75
第4章	総括	75
	記号	83
	謝辞	85
	参考文献	86

第 1 章 緒論

1.1 食品の殺菌について

1.1.1 食品の殺菌の歴史

食品の殺菌は、1804 年にフランスのニコラ・アッペールが、ガラス瓶入り食品を加熱し、保存することに成功^{1,2)}したのがはじまりとされている。その後、1810 年にイギリスでブリキ容器が使用され、1897 年からは現在の二重巻き締め構造のサニタリー缶が使用されるようになったが、まだ 100℃以下のいわゆる低温殺菌³⁾程度の処理であった。

加圧しながら 100℃以上の高い温度で殺菌⁴⁾する方法は、1917 年にフランスで開発されたレトルト殺菌機によって行われ、すでに使用されていた生産性および密封性に優れた金属缶に適応され、急速に広まった。

その後 1950 年代になって積層フィルムを袋状に製袋し、食品を充填するパウチ包装⁵⁾が現れ、1969 年にアポロ 11 号に積み込まれて注目されるようになった。

100℃以上の高温殺菌が必要なのは、pH4.6 以上の低酸性食品において、食中毒を起こす微生物のひとつが *Clostridium botulinum* であり、100℃以下では強い耐熱性をもつためである。したがって Esty and Meyer が 1922 年に報告したこの芽胞菌の殺菌条件⁶⁾が商業的殺菌の基礎となっている。

1.1.2 食品の微生物制御技術

食品産業で利用される微生物の制御技術⁷⁾を、物理・化学・生物的处理に分類して Table 1.1 に示した。加熱・非加熱殺菌および静菌・制菌は、なんらかのエネルギーを加えるか、化学物質を添加して、微生物を死滅あるいは制御するものである。

Table 1.1 食品の変敗防止のための微生物制御技術

	加熱殺菌	被加熱殺菌	除菌	静菌・制菌
物理的	<ul style="list-style-type: none"> ・熱水（常圧・加圧） ・蒸気（常圧・加圧） ・火炎 ・乾熱 ・マイクロ波・高周波 ・オーミック加熱 ・放射熱（赤外線）加熱 	<ul style="list-style-type: none"> ・紫外線 ・放射線（γ線・X線・電子線） ・ソフトライト（1 MeV 未満の低エネルギー電子線）による殺菌 ・高圧（1,000 気圧以上） ・光パルス（実質は紫外線と熱） ・パルス電圧処理 ・電気化学的処理 	<ul style="list-style-type: none"> ・水洗・洗浄 ・無菌化濾過 ・遠心分離・沈降 	<ul style="list-style-type: none"> ・冷凍・凍結 ・水分活性調整 ・乾燥 ・浸透圧（塩蔵・糖造） ・真空 ・ガス置換 ・炭酸ガス
化学的		<ul style="list-style-type: none"> ・殺菌剤 <ul style="list-style-type: none"> ・水溶液・・・塩素剤・ヨウ素剤・過酸化水素・電解水・逆性石鹼 ・ガス・オゾン・過酸化水素 ・プラズマ ・抗菌剤・抗カビ剤 <ul style="list-style-type: none"> 銀ゼオライト・酸化チタン光触媒・ヒノキオール・アルリソシアネート 	<ul style="list-style-type: none"> ・界面活性剤 	<ul style="list-style-type: none"> ・pH 調整（酢酸・乳酸） ・保存料 ・脱酸素剤 ・エタノール
生物化学・生物的		<ul style="list-style-type: none"> ・リゾチーム（溶菌） 		<ul style="list-style-type: none"> ・菌叢利用（納豆・ヨーグルト等） ・抗生物質

「無菌化濾過技術によるフレッシュ食品の製造」 渡辺 敦夫

一般に容器に密封された食品は、保存性を高めるため加熱殺菌⁸⁾が行われている。そのなかでも缶詰やパウチ包装容器などは、120℃／4分間と同等以上の殺菌を行うが、商業的無菌状態とした製品を製造するための主な殺菌法は、熱水あるいは蒸気を利用したレトルトであり、充填・密封後の容器に対して外部から加熱し、熱伝導作用で食品内部まで殺菌する。

容積の大きい食品において、熱伝導作用は内部まで加熱するための時間を要し、結果的に食品を劣化させる場合がある。おいしい食品を提供するには高温短時間殺菌が有効であることが知られているが、現在では液体の一部の食品で行われているにとどまっている。

この液体食品については、充填する直前に熱交換器などを用いて高温短時間殺菌を行い、クリーンルーム内で微生物に汚染されることなく充填・密封する無菌充填法⁹⁾も開発されている。（後述）

1.1.3 殺菌条件からみた食品の分類

容器に充填・密封され、我々が日常利用する食品を、その形態で大別すると、食感を有する固形食品、液体の占める割合が少ない高粘度食品、および中粘度から低粘度までの非常に広範囲にわたる液体食品（飲料など）に分けられる。

食品の形態別殺菌装置を Table 1.2 に示す。固形の容器入り製品としては、ツナやスイートコーン缶詰めなどの魚肉・野菜および味噌などの流動性の乏しい高粘度食品あるいは固形食品、液体としては、低粘度のスープおよびコーヒーやお茶などの飲料がある。

食品は、保存性を確保するため製造時に殺菌・除菌あるいは静菌処理を行う。食品の水分活性による分類もあるが、ここでは日本の食品衛生法による食品の水素イオン濃度（以下 pH）別に必要な殺菌条件で分類¹⁰⁾すると、

Table 1.2 食品の形態別殺菌装置

	酸性度	形態	主な 加熱殺菌装置	高温短時間殺菌 ・充填方法例
食品	低酸性	固形	・レトルト	
		液体	・レトルト	プレート熱交換器 +無菌充填 チューブ熱交換器 +無菌充填
	酸性	固形	・低温殺菌装置	
		液体	・プレート 熱交換器 ・チューブ 熱交換器 ・低温殺菌装置	プレート熱交換器 +無菌充填 チューブ熱交換器 +無菌充填

pH4.6 未満の酸性食品では、約 80 から 95℃の殺菌ののち、そのまま容器へ充填する熱間充填、PH4.6 以上の中酸性、低酸性食品¹¹⁾では、充填・密封後、120℃で 4 分間と同等以上の殺菌効果をもつ加圧・加熱レトルト殺菌となる。特に容器包装詰加圧加熱殺菌食品の製造基準においては「pH5.5 を超え、水分活性が 0.94 を超えるものは、その中心部を 120℃で 4 分間加熱する方法またはこれと同等以上の効力を有する方法で殺菌」するよう定めている。

多くの食品は低酸性であり、液体食品ではプレートあるいはチューブ（後述）などの熱交換器を利用し、高温短時間殺菌も行われているが、固形食品についてはレトルト殺菌が一般的に利用されており、高温短時間殺菌による高品質な製造法の開発が望まれている。

1.1.4 レトルト殺菌の特徴

レトルト殺菌法¹²⁾は、容器に充填・密封した後、加圧・加熱殺菌するので、充填・密封までの微生物汚染を最終段階で殺菌することが可能となり、高い安全性¹³⁾が得られる。また、大型のレトルト殺菌装置¹⁴⁾を使用すれば、一度に大量の製品を処理できるメリットもある。今日まで、多くの包装容器の殺菌に用いられてきたことで、レトルト殺菌法の信頼性は高く¹⁵⁾、世界に普及している。

代表的なレトルト殺菌機の写真を Fig. 1.1 に示した。

これは横型レトルト装置であり、容器を整列・積載したバスケットと呼ばれる台車とともに装置内へ挿入・密閉する。その後、内部を加圧し、蒸気あるいは熱水で加圧・加熱殺菌した後、加圧状態のまま蒸気あるいは熱水を冷却水と置換する。充分食品を冷却した後、圧力を大気圧へ戻して製品を取り出し、バスケットとともに排出されるものである。

包装容器の加熱・殺菌には、製品の形状にもよるが、通常 1 時間から 2 時

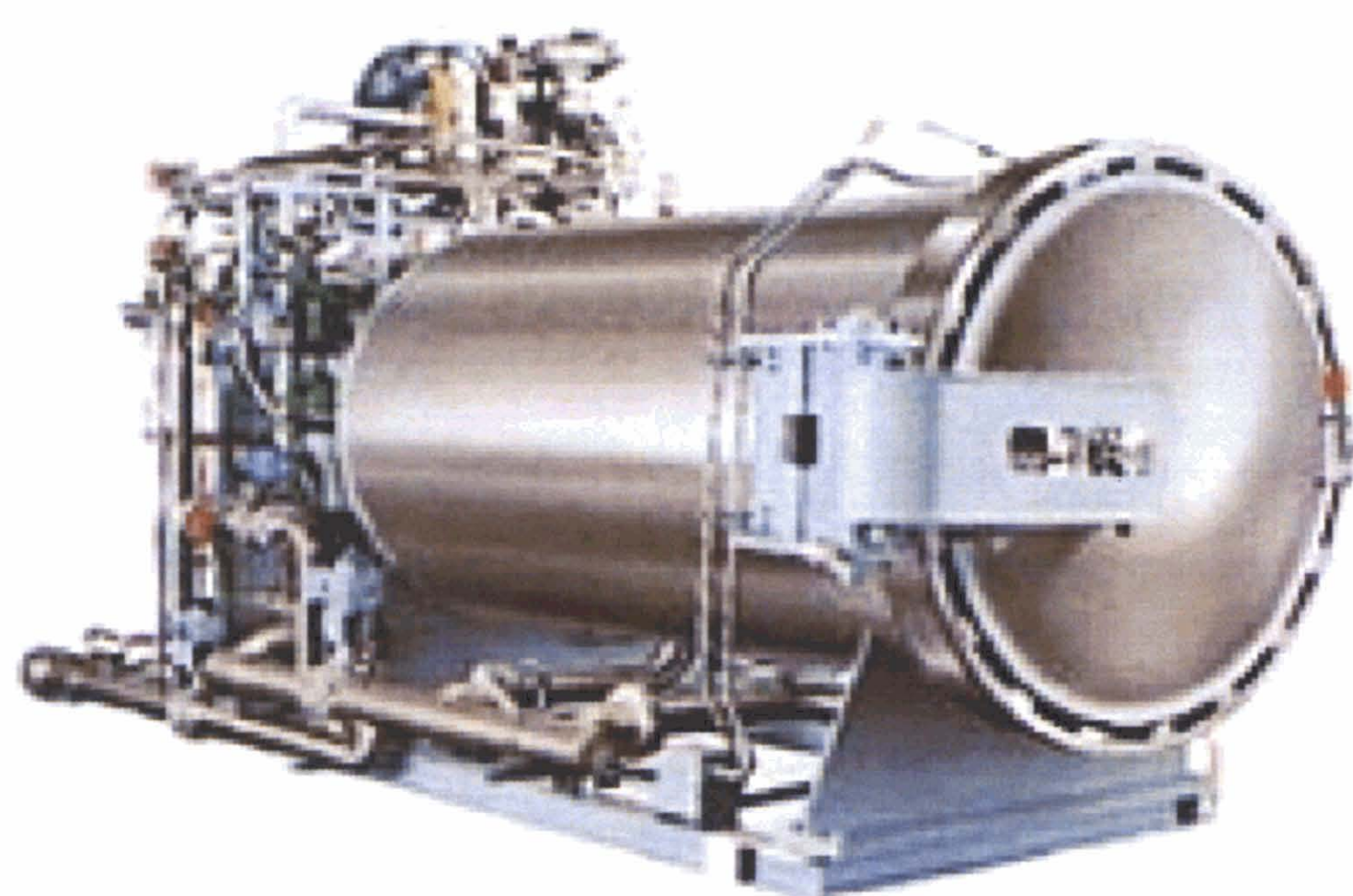


Fig. 1.1 レトルト殺菌装置（日阪製作所製）

間を要しており、バッチ式の殺菌処理のため、殺菌終了後に装置の不具合などで殺菌不足が発生した場合は、製品の大きな損失となる。

容器形状に着目すると、金属缶に充填・密封された食品の場合、金属缶外部からの熱伝導により中心部まで加熱するため、時間がかかり、そのため食品の一部が過剰加熱となり、品質を劣化させる場合があった。その点レトルト処理が可能なパウチ包装は、食品を充填・密封する機能に加え、扁平形状であるため外部から食品中心部への熱伝導も比較的早く、より高品質の食品が製造できることから関心が高まっていった。

ただし、パウチ袋製品のほとんどは、液体あるいは小さい固形食品を少量含む低粘度スープなどが主流であり、含有する固形食品に外部からの熱を効率よく伝えるには、低粘度の液体による熱伝導と対流伝熱、あるいはパウチ包装自体を回転させ、食品を攪拌するなどの対流作用を必要とした。

1.1.5 高温短時間殺菌の優位性

レトルト殺菌法は、高い安全性を確保しているが、より高品質¹⁶⁾な食品が求められるようになった近年では、従来のレトルト殺菌と同等の殺菌効果を持ちながら、さらに高温で短時間の処理(Fig. 1.2 参照)により、食品の味・香り・食感に優れた高品質な製品を狙った高温短時間殺菌（HTST 殺菌）¹⁷⁾が研究されている。

図に示すように、従来の食品の殺菌は安全を考慮して、充分すぎる時間をかけて処理を行う。この殺菌処理と同等の効果を得ながら、高品質な製品を製造するためには、さらに食品内部温度を高温とし、時間を短縮することで可能となる。

しかし、固形食品を中心とした流動性の乏しい高粘度食品では、中心部への熱伝導が遅く、レトルト殺菌法で高品質な製品を製造することはいまだに

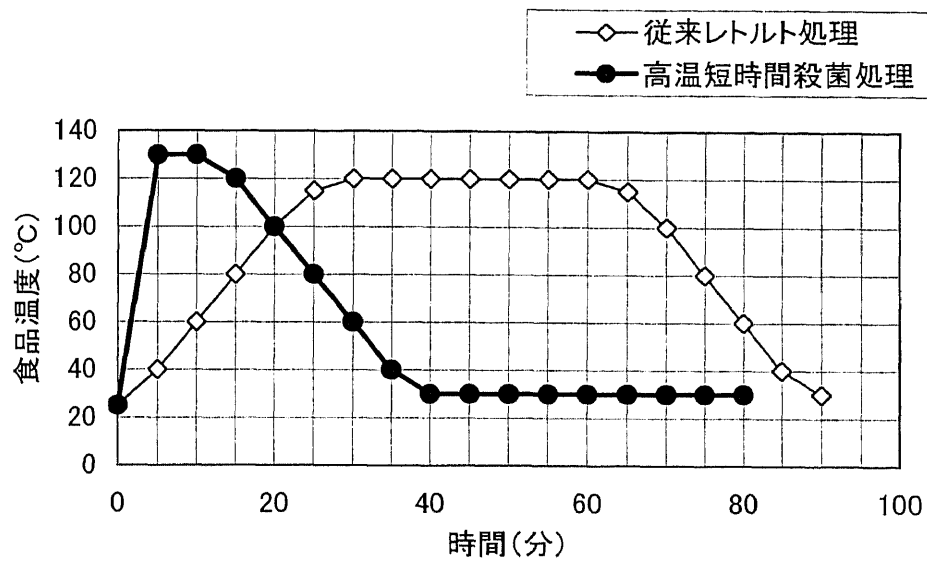


Fig. 1.2 高温短時間殺菌処理の温度特性

難しい。

これらの問題点を解決するため、最近では、充填・密封前に食品を直接高温短時間殺菌し、高度に微生物混入をコントロールしたクリーンルーム内で、殺菌済の容器へ無菌的に充填・密封する無菌充填法が開発されている。Table 1.3 に主な高温短時間殺菌方法を示す。

小さい固形食品を含む低粘度食品の殺菌にはチューブ殺菌法やカキトリ殺菌法があるが、固形食品では送液と攪拌および充填が困難なこと、および無菌充填ライン自体の設備コスト、ランニングコスト等が高価であるため、ほとんど普及していないのが現状である。

つまり容器に密封したまま固形食品を加熱殺菌する方法は、依然としてレトルト殺菌法しかなく、高品質な製品を製造するためには、設備およびランニングコストを抑えた新しい高温短時間殺菌方法が必要である。

1.2 マイクロ波加熱技術

1.2.1 加熱技術としてのマイクロ波発展の経緯

電磁波の分類を Fig. 1.3 に示した。電磁波の広い周波数帯域の中で、マイクロ波の周波数¹⁸⁾は 1 GHz (1×10^9 Hz) 付近から数百 GHz の領域に分布しており、その波長は数十 cm から十分の一 cm に及んでいるためセンチ波と呼ばれることもある。

人類の電磁波利用の歴史は、長波を活用した通信から始まり、中波や短波通信へと移行した。第二次世界大戦前後にはマイクロ波帯を利用したレーダーが実用化され、現在では携帯電話で利用される 1 GHz 付近も含めて、さらに短波長の利用も盛んになっている。

終戦とともにレーダーの需要が縮小する中、食品の加熱^{19・20)}にマイクロ波が利用できる²¹⁾ことを考案した米国のスペンサー博士によって加熱器が開

Table 1.3 高温短時間殺菌方法の比較表

殺菌方法		殺菌原理	対象食品
直接式	インジェクション式	食品に直接，蒸気を吹き込んで殺菌	低粘度食品 高粘度食品
	インフュージョン式	蒸気中に食品を注入して殺菌	中粘度食品 粉末食品
	ジュール式	食品に通電し，ジュール発熱で殺菌	中粘度食品
間接式	プレート式	プレート間に蒸気または食品を通して熱交換して殺菌	低粘度食品
	チューブ式	チューブの中に加熱水または蒸気を通し，食品を間接的に殺菌	低粘度食品 中粘度食品
	カキトリ式	2重円筒構造の外層に蒸気，内層に食品を通し，内層表面をかき取りながら殺菌	高粘度食品 固液混合食品

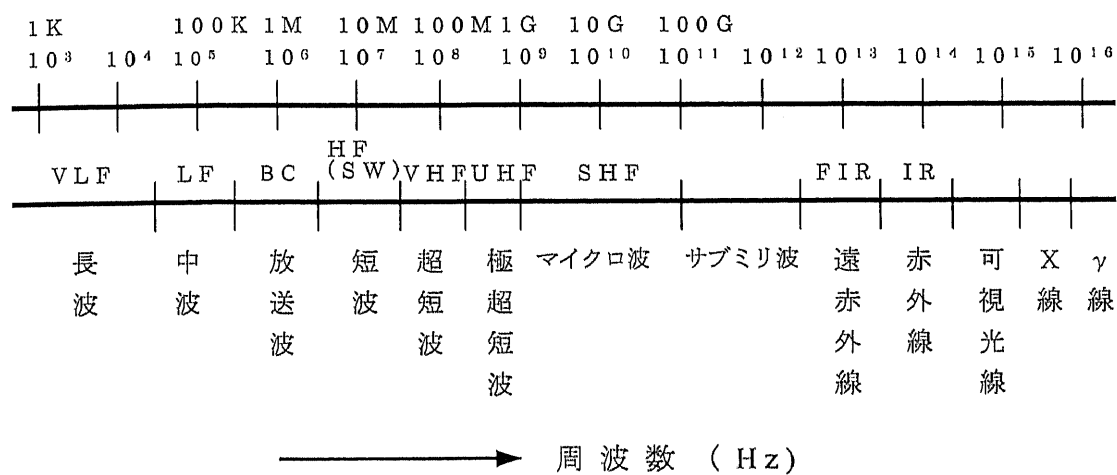


Fig. 1.3 電磁波の分類

発された。

一般的に加熱に利用される周波数は、915 MHz²²⁾および 2450 MHz であるが、現在の日本では、電波法、取り扱いの容易さ、漏洩対策の簡便さ、加熱速度の速さ、低コストおよび普及率の高さなどから 2450 MHz が主流である。

1.2.2 マイクロ波加熱原理

食品、ゴムおよび木材等の誘電体^{23・24)}内部においては、Fig. 1.4(a)に示すように+のイオンと、その近傍に束縛された-の電子が対をなしており、全体としては電界ゼロの状態となっている。この内部に(b)のように強い電界が与えられると、イオンと電子の対が電界の方向に整列し、この電界が(c)のように逆になるとイオンと電子の対も逆の配列に変わる。このようにして分子内の双極子の振動が起こることで、内部摩擦により熱が発生^{25・26)}する。

このとき誘電体で発生する毎時、単位体積あたりの熱量 Q は

$$Q = 2.1 \cdot 10^{-1} \cdot f \cdot \nu^2 \cdot \varepsilon \cdot \tan \delta \times 10^{-8} \quad [\text{cal}] \quad (1.1)$$

で表される²⁷⁾。ここで、 f 、 ν 、 ε 、および $\tan \delta$ はそれぞれ周波数、電界強度、比誘電率、および誘電正接である。式からわかるように、発生する熱量はマイクロ波の周波数と誘電損失係数(以下損失係数) $\varepsilon \cdot \tan \delta$ に比例する。

次に、マイクロ波が誘電体へ侵入すると、吸収され強度が弱くなっていく。マイクロ波の電界強度が 1/2 に減衰する浸透深さを半減深度 D といい、次の式で表される。

$$D \text{ (mm)} \cong (3.32 \times 10^{10}) / (f \cdot \sqrt{\varepsilon} \cdot \tan \delta) \quad (1.2)$$

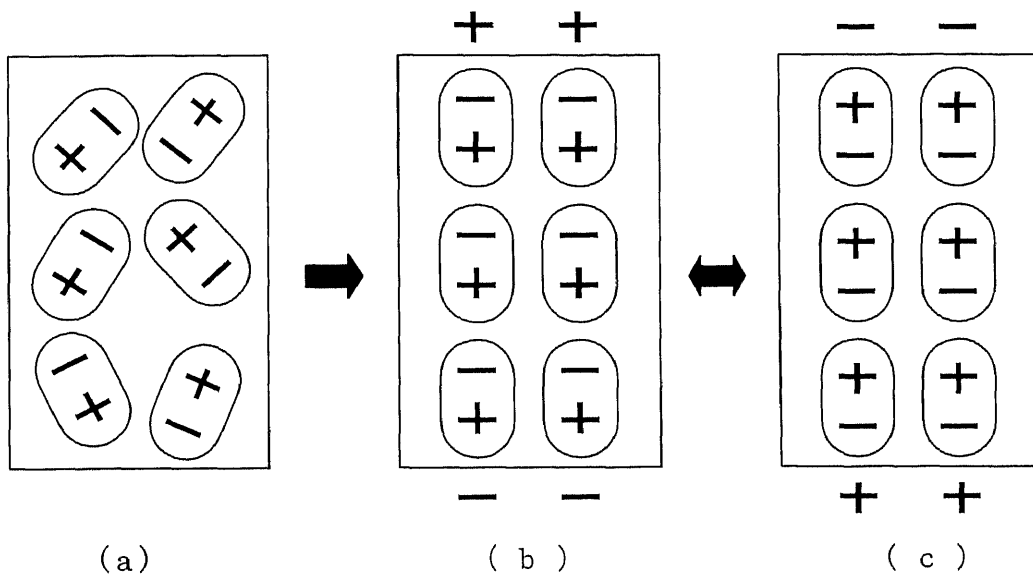


Fig. 1.4 マイクロ波の加熱原理

浸透深さは周波数と $\sqrt{\varepsilon} \cdot \tan \delta$ に反比例する。つまり、周波数が高いほど食品表面でマイクロ波が熱に変わり、内部に届かない。したがって、米国などで利用されている周波数 915 MHz では、大型の冷凍食品の解凍などに利用されている。

1.2.3 既往のマイクロ波加熱技術

マイクロ波による物質の加熱原理は、物質が誘電体である場合、内部の分子が交番磁界内で交互に分極し、その損失係数に従って摩擦熱が発生する。これは自己発熱であり、従来のレトルト加熱とは、大きく異なる点^{28・31)}である。

食品内部から加熱されるマイクロ波加熱は、温度上昇³²⁾が早く、蒸気等の加熱源が不要で、加熱のコントロールは電氣的な制御で行われる。

マイクロ波の加熱技術は、広くゴムの加硫、木材の乾燥³³⁾あるいは食品のブランチング^{34・35)}および解凍^{36・38)}など、加熱対象物が誘電体であり、加熱時の温度の均一性を必要としないものや、比較的低温度の処理に利用されてきた。

鈴木実³⁹⁾らは、和菓子やかまぼこの殺菌効果、冷凍食品の解凍⁴⁰⁾、パンの焼成などについてマイクロ波の有効性⁴¹⁾を報告した。

中北宏⁴²⁾らは、マイクロ波の照射が不均一であり、マイクロ波による殺虫方法を実用化するには均一加熱が必要であると報告している。

M.H. Lau⁴³⁾らは、たんぱく質添加のモデル溶液を周波数 915 MHz のマイクロ波で加熱すると、温度ムラ^{44・45)}が抑制できるとした。しかし、2450 MHz と比較して加熱時間が長くなることと、国内では 915 MHz のマイクロ波発振器が特殊であり、高価であること、および物質への透過力が強く、マイクロ波の漏洩が懸念される。

1.2.4 マイクロ波加熱の問題点

1.1.5 項でも述べたように、食品の殺菌において、充填・密封した容器のまま内容物を高温短時間殺菌できることは、無菌の環境下で充填する無菌充填法とは異なり、経済的にも有利な点が多いなどの理由で、戦後から研究が行われてきた⁴⁶⁾。

河野通紀⁴⁷⁾は、パウチ袋に充填・密封した食品を連続加熱する装置を開発し、その殺菌効果を検討している。これは、パウチ袋に脱気孔を加工し、予備加熱時に充分食品からの蒸気を抜き去った後シールする。その後、100℃以上の殺菌を行う工程であるが、パウチ袋の破裂、温度の不均一および設備のメンテナンスコストが高いなどが考えられる。

日本でも大塚食品株式会社で、パウチ入りカレー⁴⁸⁾等を大型の加圧容器に収容し、大出力のマイクロ波発振器で加熱殺菌する製造設備が稼働しているが、設備コストが高額になるなどの細かい改良余地はあると推察される。

1.2.5 小型マイクロ波発振器の優位性

前述の各マイクロ波加熱技術には、比較的大型で出力も数kWから数十kWの高価な発振器を使用している。一方、小型マイクロ波発振器を内蔵した家庭用電子レンジは、1961年に国産第1号が登場して以来、1980年代から急速に普及し、1993年には国内出荷台数が2,766千台、世帯普及率が84.3%(Table 1.4 参照)となり、2003年では国内出荷台数が3,566千台、世帯普及率が96.5%に達し、ほとんどの家庭に保有されるほど普及している。(国内出荷台数：日本電機工業会、世帯普及率：内閣府・消費動向調査)

全家庭の96%以上が保有するようになると、小型マイクロ波発振器のコストは著しく低下したため、この安価で十分な供給能力がある発振器を複数台

Table 1.4 電子レンジの国内出荷台数と世帯普及率

年 度	国 内 出 荷 台 数 (千 台)	世 帯 普 及 率 (%)
2 0 0 3	3 , 5 6 6	9 6 . 5
1 9 9 8	3 , 4 6 5	9 3 . 3
1 9 9 3	2 , 7 6 6	8 4 . 3

出 典 : 日 本 電 機 工 業 会 (国 内 出 荷 台 数)

内 閣 府 ・ 消 費 動 向 調 査 (世 帯 普 及 率)

使用した加熱装置を使用し、連続殺菌装置を設計することは装置全体のコストダウンとメンテナンスを容易にする効果があると考えられる。

1.3 固形食品

1.3.1 固形食品の市場

わが国の固形食品市場では、戦前から魚肉缶詰がおもに輸出用として生産されていた。しかし、味付けあるいは油漬けの商品が増加し一般家庭の消費が伸びるにつれて国内消費量も増加した。Table 1.5 に缶・びん詰国内消費量を示した。2002 年の統計では、缶・びん詰めのまぐろ（以下ツナ）およびかつおの消費量は 88,000 t となり、固形食品の中ではもっとも多く、次いでスイートコーンとなっている。

さらに、Table 1.6 に示すように、世界の缶詰の生産量では、ツナ・かつおが 1,244,000 t、スイートコーンが 1,085,000 t と、第 2、第 3 位となっており、最近市場で目にするだけのこや卵などのパウチ容器入り製品と比較しても圧倒的に多く、大きな市場を形成している。これらの食品は、ももなどの果実と異なり、レトルト殺菌を必要とするもので、缶詰容器の形態で製品化されることが多い。

1.3.2 ツナ製品の製造技術と期待される製造方法

Fig. 1.6 に一例として、ツナ缶詰の製造フロー図を示す。

遠洋で捕れたマグロは船上で急速冷凍され、日本へ輸送される。製造工場では、解凍、不要部分の除去、蒸煮、身割、選別、切断、容器への肉詰め、調味液添加、密封、レトルト殺菌および冷却して製品となる。これは金属缶の製造フローだが、パウチ袋製品でもほぼ同様の工程である。

1.3.1 項でも述べたように、ツナやかつお、およびスイートコーンなどの固

Table 1.5 缶・びん詰国内消費量

H14(2002)

順位	食品名	重量(t)
1	まぐろ・かつお	88,000
2	スイートコーン	77,000
3	みかん	71,000

$$\text{国内消費量} = \text{国内生産量} - \text{輸出量} + \text{輸入量}$$

出典 社団法人日本缶詰協会「缶詰時報」

Table 1.6 世界の缶詰生産量

H13(2001)

順位	食品名	重量(t)
1	もも	1,276,000
2	まぐろ・かつお	1,244,000
3	スイートコーン	1,085,000
4	パイナップル	786,000

出典 社団法人日本缶詰協会「缶詰時報」

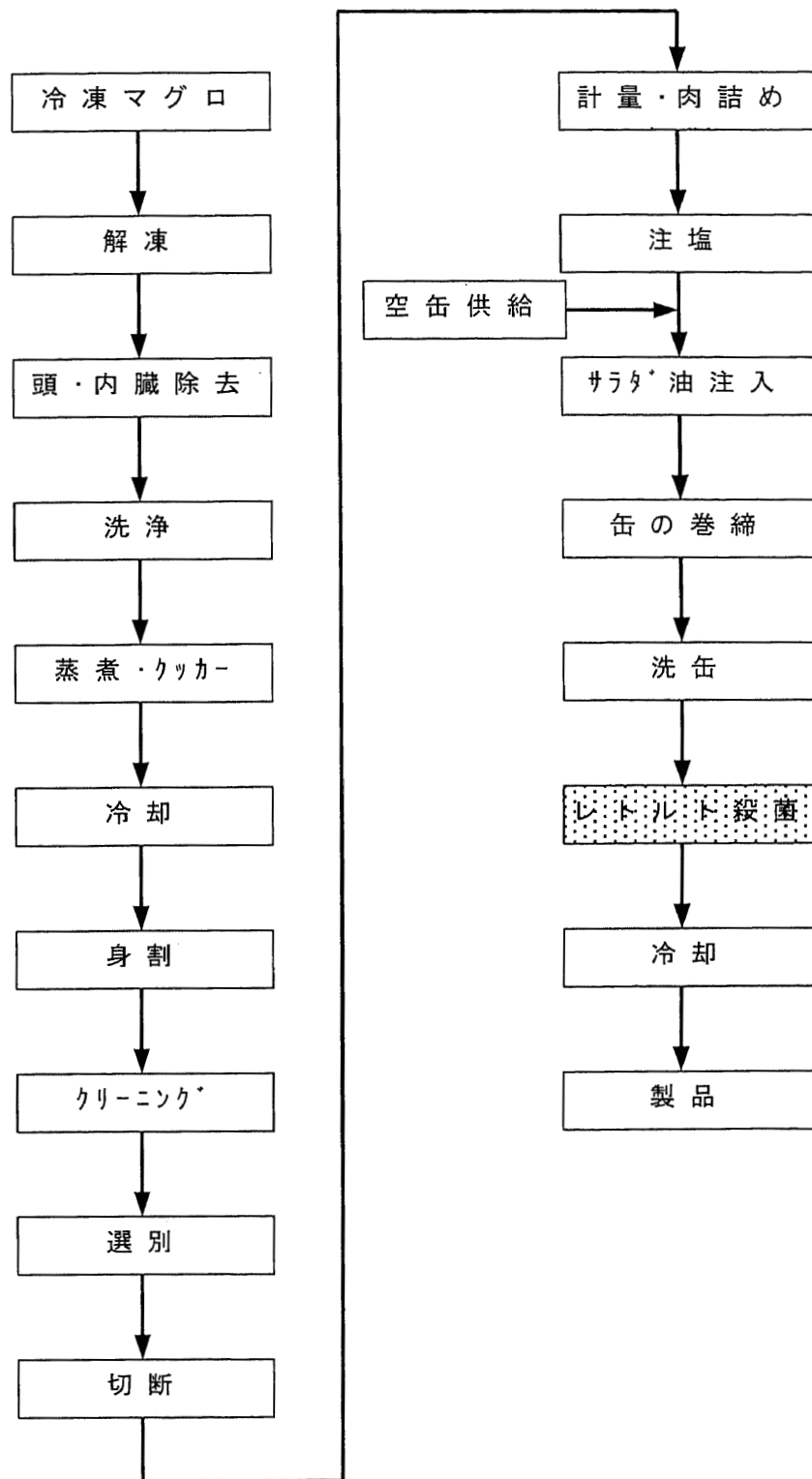


Fig. 1.6 ツナ缶詰（油漬け）の製造フロー図

（缶びん詰・レトルト食品事典）

形食品は大きな市場であるが、近年の消費量は順調に伸びているとはいえず、従来の製品よりも、食品の高品質化と高級化が求められている。

その対策として、ツナでは、本来の風味を生かした製品、あるいはわさびやカレーの香りを添加し、良好なフレーバーを持つ製品を製造すること、スイートコーンでは、ほどよい食感とあざやかな色などが高温短時間殺菌によって提供することが可能となれば消費拡大につながり、従来製品との差別化ができると考えられる。

1.4 研究の目的

一般に、マイクロ波加熱では、固形食品の周辺部が過剰に加熱されるエッジ効果により、殺菌状態にばらつきがでるなどの問題が考えられる。

そのエッジ効果を低減させる対策として、加熱特性にばらつきのある市販の民生用小型マイクロ波発振器を複数台使用し、固形食品を移動させながら連続加熱することで、温度の不均一を低減できると考えた。

また、小型マイクロ波発振器を複数台使用することで低コスト化を計り、たとえ1台が動作不良となった場合も、該当する小型マイクロ波発振器を良品と交換するだけで迅速な対応が可能となるなどの、時間的・費用的メリットがあると考えた。

さらに、容器に密封した固形食品を100℃以上で殺菌するための加圧設備は、従来技術であるレトルト殺菌のような、大量の固形食品を大容量の密閉タンクに収納して加圧・加熱する方法ではなく、1個から数個の固形食品を収納し、上面がテフロン製の小型圧力容器とすることで装置の簡略化を考えた。これにより、大型の耐圧タンクが不要となり、設備も小型化が期待できるうえに、トラブルが発生した場合には、被害を最小限にとどめることができると考えた。

これらの技術検討を行うことで、開発が進む耐熱性・耐圧性に優れたPETおよびPP材等のプラスチック容器に固形食品を充填・密封したのち、マイクロ波により、直接固形食品内部を短時間で加熱し、高品質な固形食品を製造する装置の設計指針を示すことを目的とした。

第2章 固形および高粘度食品のマイクロ波加熱

2.1 緒言

容器へ充填密封した固形食品の殺菌はレトルト⁴⁹⁻⁵¹⁾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、食品の品質を低下させてしまう。

一方、食品の高温短時間殺菌は、現在も過剰加熱や温度ムラなどの問題点が多く、その解決がもっとも期待されている技術である。

低粘度食品であれば無菌充填法⁵²⁾による製造が可能であるが、無菌環境の維持・管理は複雑であり、対象の食品も限られたものであるうえ、固形食品にいたっては、無菌的に充填・密封する技術が確立されていない。

そこで、今までレトルト殺菌法では高品質⁵³⁻⁵⁵⁾な製造が困難であったツナ、スイートコーン、風味付けかまぼこ、およびみそなどの固形食品を中心とした流動性⁵⁶⁾の乏しい高粘度食品の充填・密封後の高温短時間殺菌を検討した。

充填密封したのち、食品を直接加熱できるマイクロ波⁵⁷⁻⁵⁹⁾により高温短時間殺菌する場合、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⁶⁰⁾がでることなどの問題が考えられる。

そこで本章では、固形食品へのマイクロ波殺菌の適応性⁶¹⁻⁶²⁾を検討する意味から味付けツナ成分を所定量添加したモデル溶液を使用し、100℃までの加熱による基礎研究を行った⁶³⁾。

2.2 実験方法

2.2.1 モデル溶液

固形食品のサンプルとしてツナを例にとるが、実験の都合上、データの再

現性と試料のばらつきを考慮し、ツナを構成する成分⁶⁴⁾を所定量添加して作製したモデル溶液を使い加熱実験を行った。

蒸留水にデンプンを 7.0% 添加してモデル溶液 1 とし、他のモデル溶液はモデル溶液 1 に Table 2.1 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、ツナ製品の成分組成（タンパク質 4.75%，脂質 10.0%，NaCl 1.0%）を考慮して設定した。

添加剤の製品名および製造者を Table 2.2 に示す。

2.2.2 実験装置および特性

2.2.2.1 マイクロ波加熱装置

Fig. 2.1 に示すように、周波数 2450 MHz⁶⁵⁾：600 W 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。

Fig. 2.2 に外観写真を示した。ドアを開け、チャンバー内部のテーブルにステンレス容器に収容したプラスチックカップを配置し、ドアを閉めた後、所定の出力でマイクロ波を発振してモデル溶液を加熱した。

チャンバーは、ステンレス製小型圧力容器（後述、以下小型圧力容器）が設置可能な寸法とした。この小型圧力容器は、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

Table 2.1 モデル溶液の分類

モデル 溶液記号	添加物	濃度 (%)
1		
2a	たんぱく質	1.0
2b	たんぱく質	4.75
3a	脂質	1.0
3b	脂質	10.0
4a	NaCl	0.3
4b	NaCl	1.0
5	たんぱく質	4.75
	脂質	10.0
	NaCl	1.0

デンプン濃度はすべて 7.0%.

Table 2.2 モデル溶液の添加剤製品名と製造者

添加物	製品名	製造者
デンプン	ファリネックス L C F	松谷化学工業(株)
たんぱく質	Organic soybean milk (Solid soybean10%)	名古屋製酪(株)
脂質	N ネオパウダー M S	日本油脂(株)
NaCl	塩化ナトリウム	和光純薬工業(株)

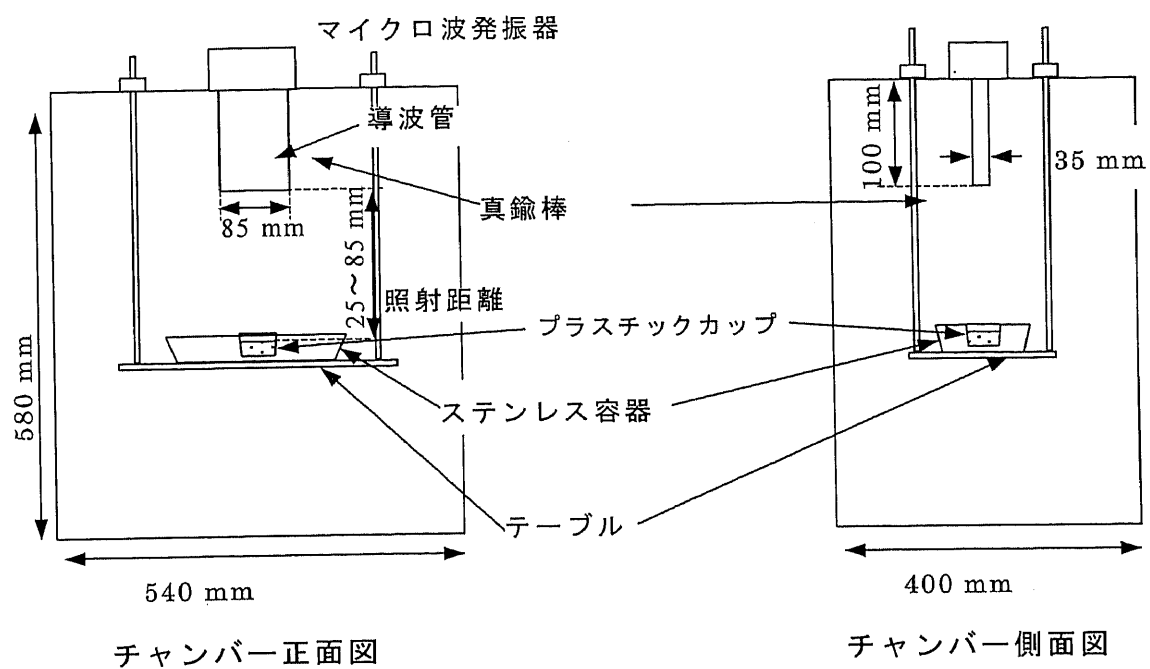
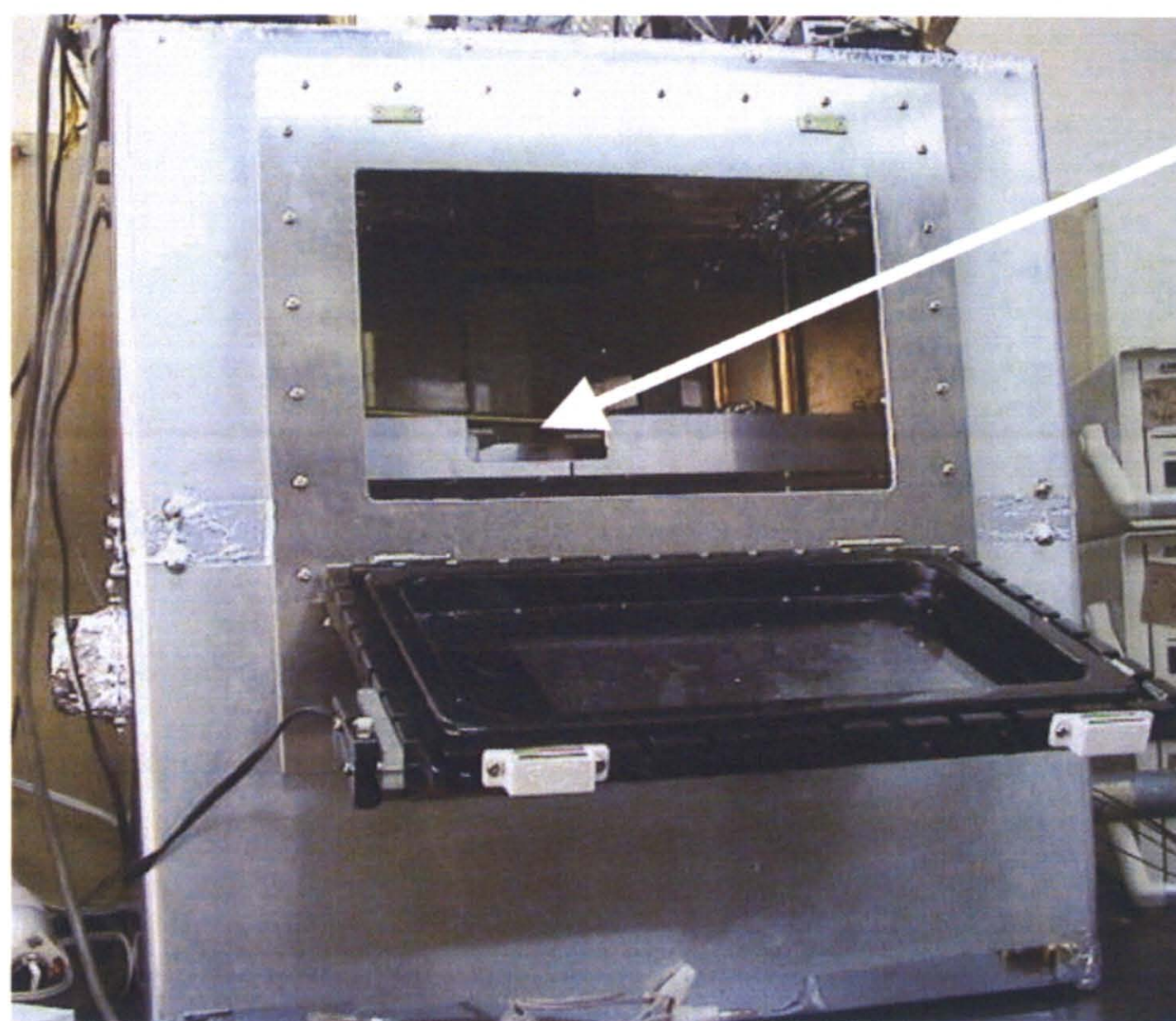


Fig. 2.1 マイクロ波加熱装置



モデル食品
配置位置

Fig. 2.2 試作したマイクロ波加熱装置（写真）

35 mm とした．（プラスチックカップ，ステンレス製容器は 2.2.3 に後述する）

2.2.2.2 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 L_i ）は 25 ～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 L_i 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（空气中）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．

2.2.3 カップとステンレス容器

2.2.3.1 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（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. 2.3）．

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^{66・67)}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．

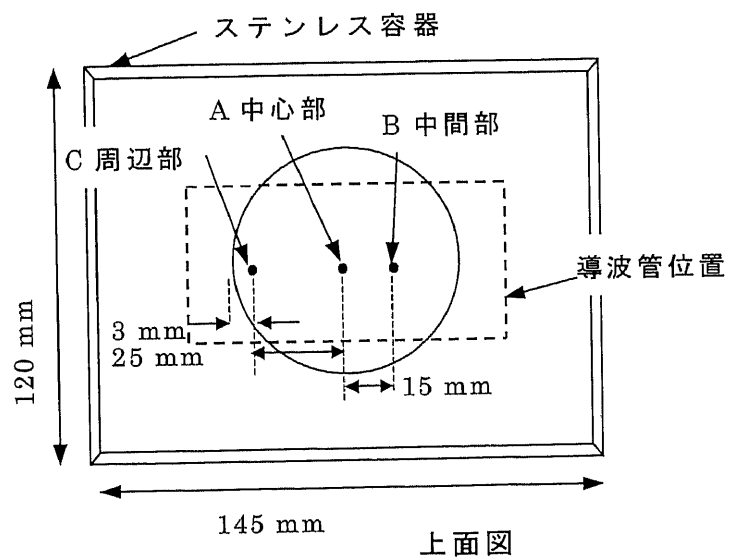
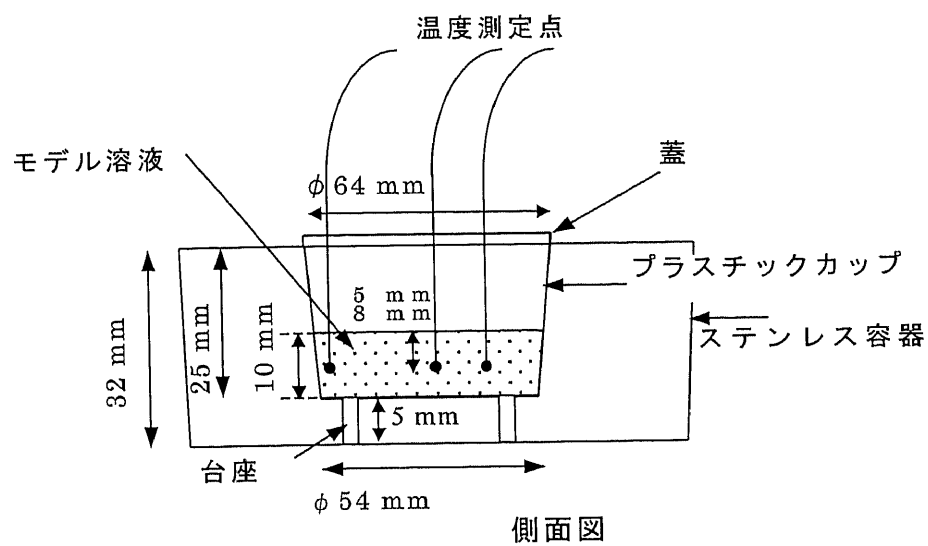


Fig. 2.3 モデル溶液と温度計の位置

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。このステンレス容器の耐圧能力については 3.3.1.1 項で詳細を述べる。

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. 2.3）

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。

2.2.4 誘電率測定

モデル溶液の誘電率 ϵ ⁶⁸⁻⁶⁹⁾ は、25℃に調整したモデル溶液をビーカーに 300cc 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。

2.2.5 温度測定

2.2.5.1 温度測定装置

加熱中の食品の内部温度を測定 ⁷⁰⁻⁷¹⁾ するため、光ファイバー温度計（安立計器製 FL-2000：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. 2.4 にプラスチックカップと温度計の写真を示した. 写真に示す感温部をモデル溶液へ挿入し, マイクロ波に影響されることなく, 温度を測定する. 測定原理は, 光源から光ファイバーを経由して感温部の蛍光物質にパルス光をあて, 戻ってくる蛍光輝度の緩和時間が温度に依存することを利用したものである.

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 ($23 \pm 1^\circ\text{C}$) に調整した後, 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°C に到達した時点で加熱を止め, 他 2 点の温度を測定した.

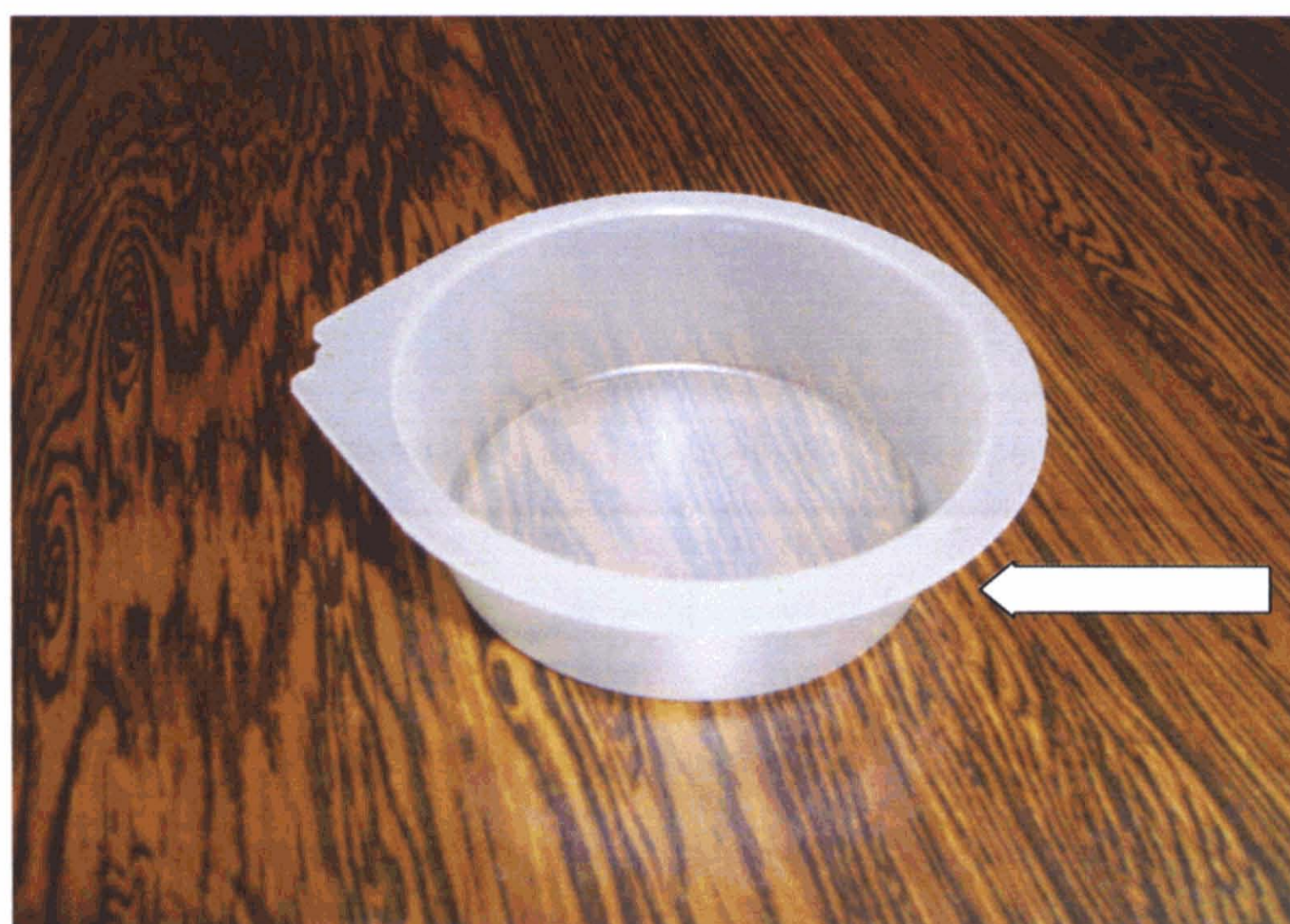
100°C 到達時間 (以下到達時間) は, ステンレス容器の使用時・未使用時とも, 照射距離を 25 ~ 85 mm まで 10 mm 間隔で変化させ, 測定した.

2.2.6 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蒸留水浸漬法を用いた⁷²⁾. Fig. 2.5 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收容し, 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.



容量：70cc

プラスチックカップ



温度計
安立計器製 FL-2000

感温部

Fig. 2.4 プラスチックカップと温度計

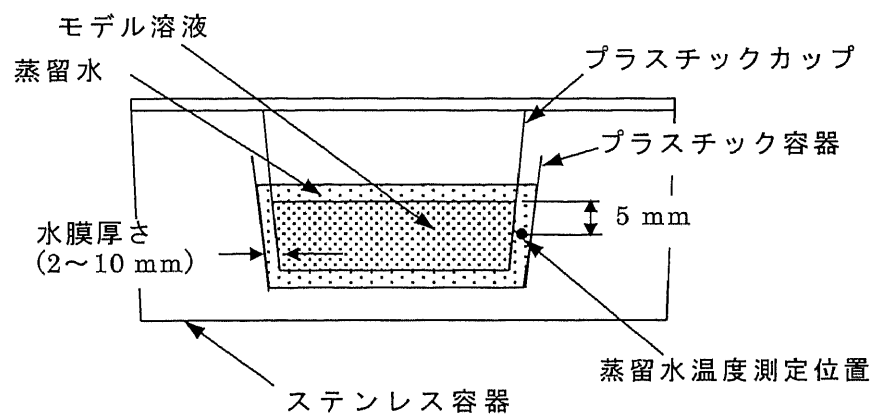


Fig. 2.5 エッジ効果低減対策

2.3 結果および考察

2.3.1 モデル溶液の吸収特性

Table 2.3 に各モデル溶液の誘電率 ε , 損失係数 ($\varepsilon \times \tan \delta$) 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, (1.2)式で示したように電界密度が $1/2$ に減衰する半減深度 D ^{73・74)}は,

$$D \text{ (mm)} \div (3.32 \times 10^{10}) / (f \cdot \sqrt{\varepsilon} \cdot \tan \delta)$$

で表される. この式に文献⁷⁵⁾から得られた蒸留水と NaCl 溶液の ε および $\tan \delta$ を代入すると, 半減深度は, それぞれ約 13 mm と約 5 mm となる.

ここで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, 理論値と実測値がほぼ一致した.

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, モデル溶液周辺部で熱に変換されやすくなることがわかる.

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.

2.3.2 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. 2.6 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,

Table 2.3 モデル溶液の誘電率・損失係数

および半減深度(計算値)

モデル 溶液記号	誘電率	損失係数	半減深度 (mm)
1	73.67	11.11	10.468
2 b	66.71	11.89	9.309
3 b	57.42	9.97	10.300
4 b	71.05	21.11	5.411
5	51.06	18.38	5.268

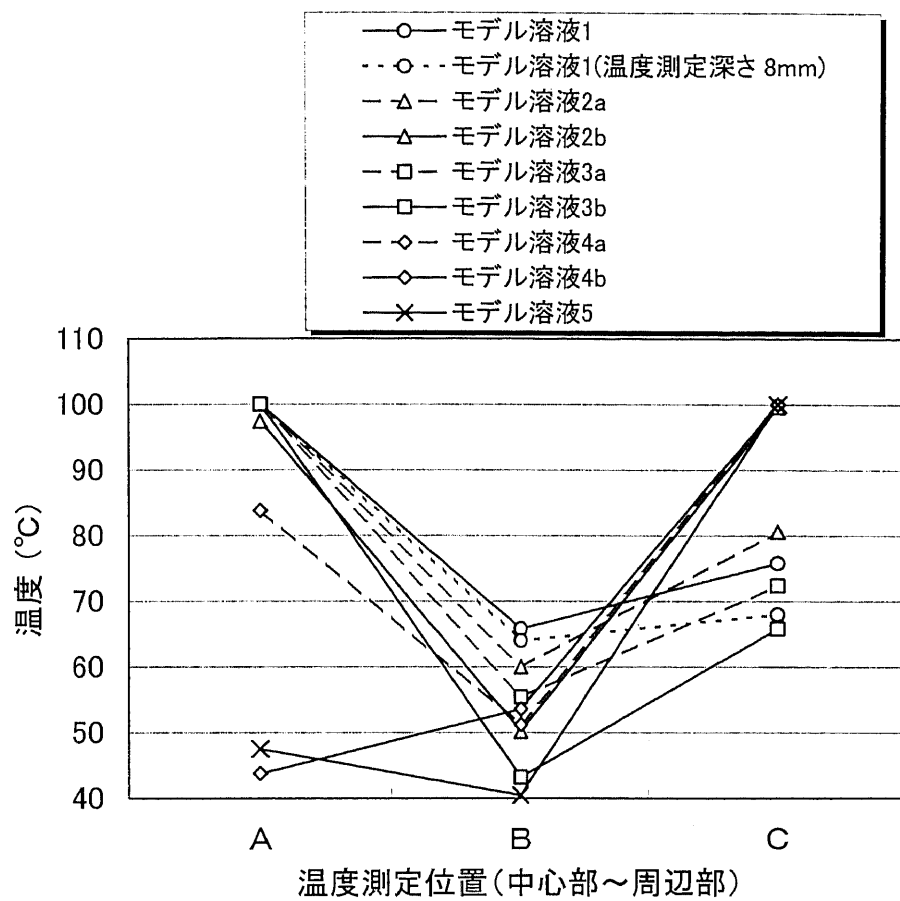


Fig. 2.6 モデル溶液別到達温度

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 2.3 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 点の温度が高い傾向であった。

四宮らは、市販の電子レンジを使用して、北海道または長崎県産男爵イモを加熱し、温度ムラと加熱パターンの画像解析を報告⁷⁶⁾している。

その報告によると 3 台の電子レンジ(500 W あるいは 650 W)で 100 g あるいは 180 g に調整した男爵イモをそれぞれ加熱すると、3 台の電子レンジに共通してその中心部から温度が上昇し、質量 100 g より一回り大きい 180 g では、中心部の加熱速度が 3 倍程度大きくなったと述べている。

このことは、本実験のモデル溶液 1 がタンパク、脂質、NaCl を含有しない 7.0%デンプン溶液であり、男爵イモの成分と近似できるが、その加熱結果はモデル溶液の中心部が速く加熱される結果と同様であり、再現されている。

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。

従って、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。

さらに、ステンレス容器使用時・未使用時の加熱特性を Fig. 2.7 に示す。

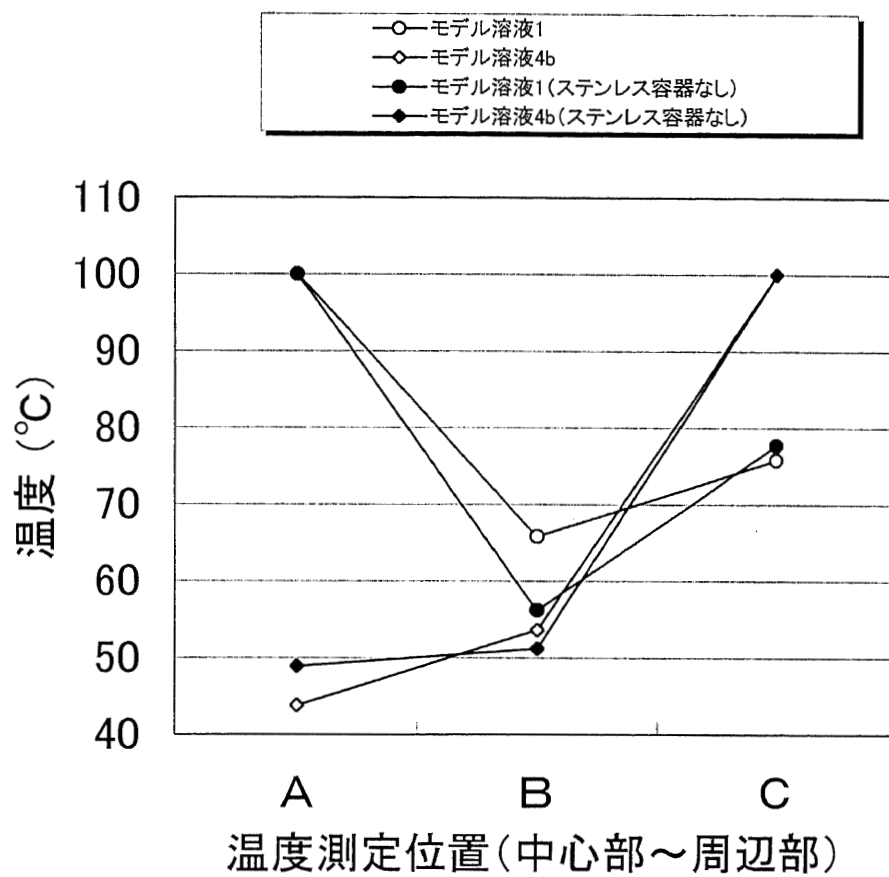


Fig. 2.7 ステンレス容器の加熱特性への影響

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対し、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。

2.3.3 照射距離と 100℃到達時間

Fig. 2.8 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は、最小で約 5 秒、最大で約 14 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： $\lambda \approx 120 \text{ mm}$ の 1/4 に相当する 30 mm 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 30 mm 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. 2.9 に、照射距離と 100℃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事と、熱伝導を期待する意味から、比較的到達時間の遅い 45 mm を照射距離条件として設定した。

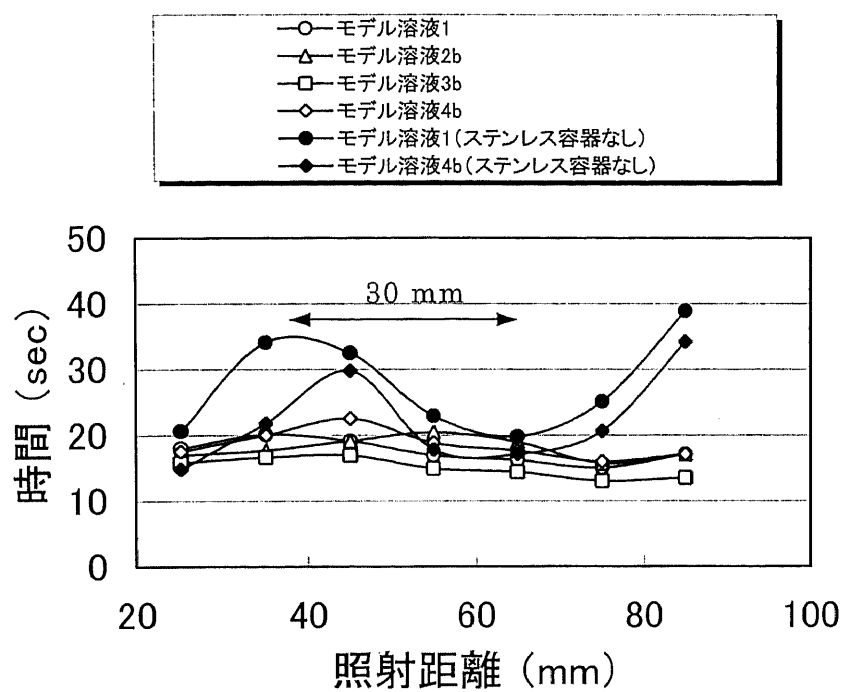


Fig. 2.8 照射距離と100℃到達時間

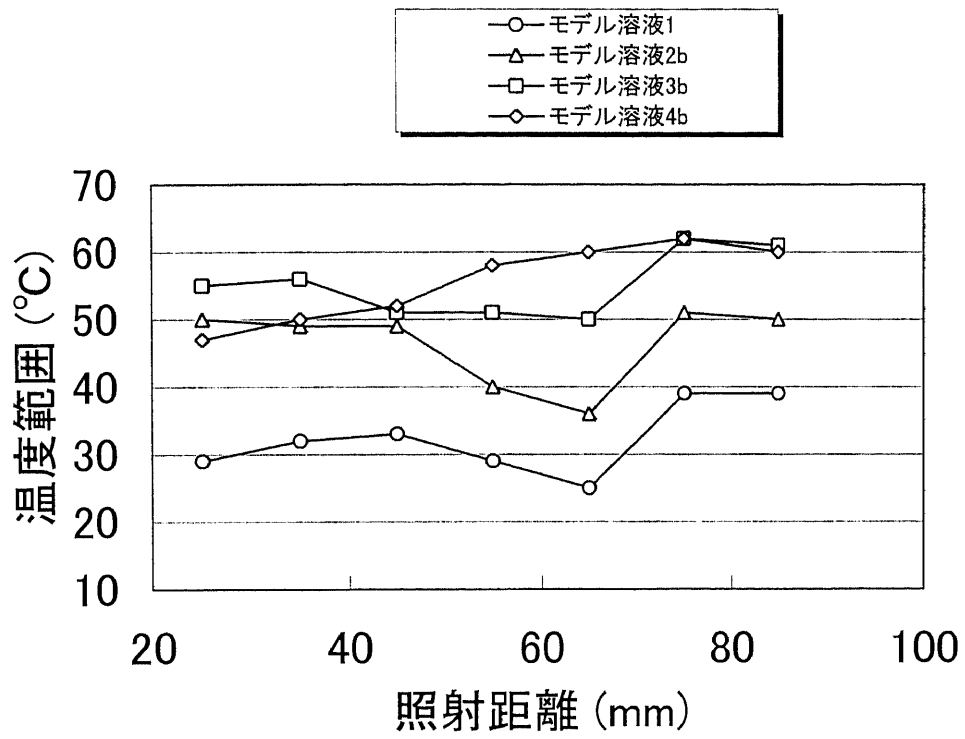


Fig. 2.9 照射距離と温度範囲（バラツキ）

2.3.4 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. 2.10 および Fig. 2.11 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 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⁷⁾.

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.

2.3.5 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. 実際の製造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.

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. 2.12), 到達時間は平均 25 秒 ($n=5$ 回) であった (Fig. 2.13).

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 2.4 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.

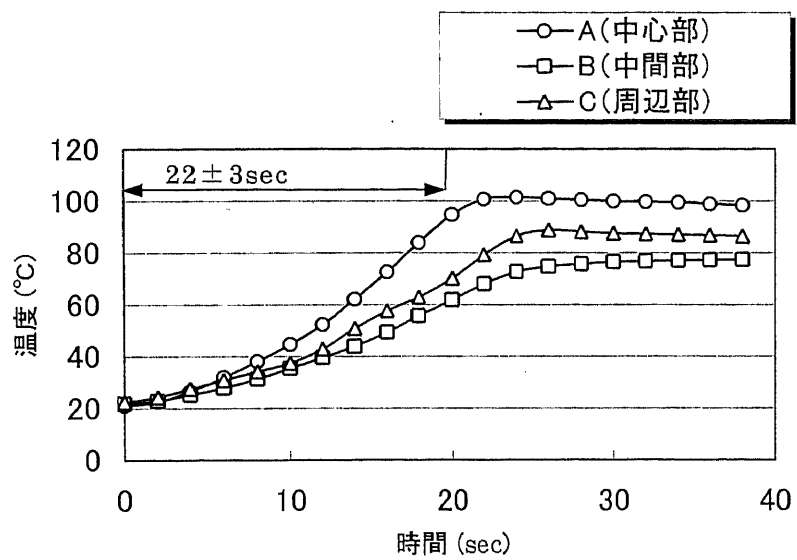


Fig. 2.10 モデル溶液 1 の加熱特性

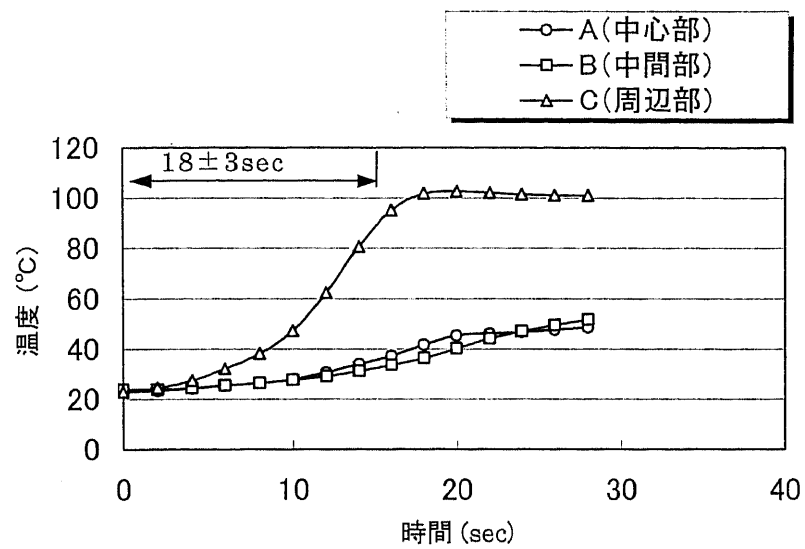


Fig. 2.11 モデル溶液 4b の加熱特性

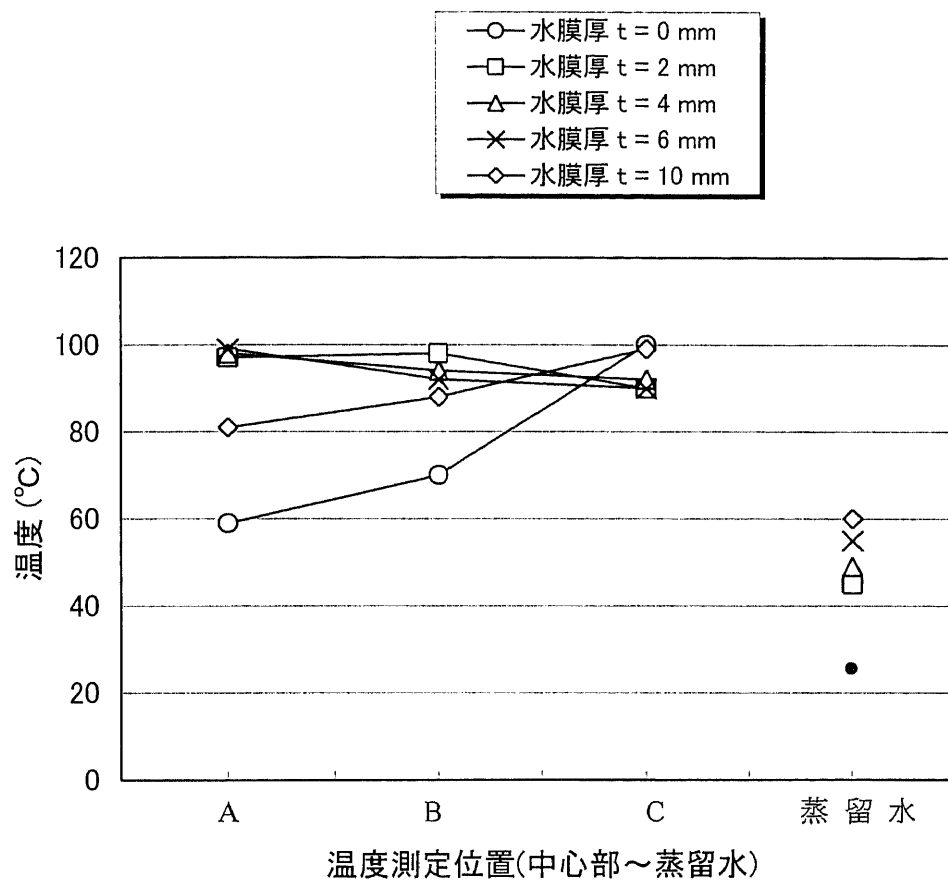


Fig. 2.12 水膜厚さの効果
 ● 蒸留水の初期温度

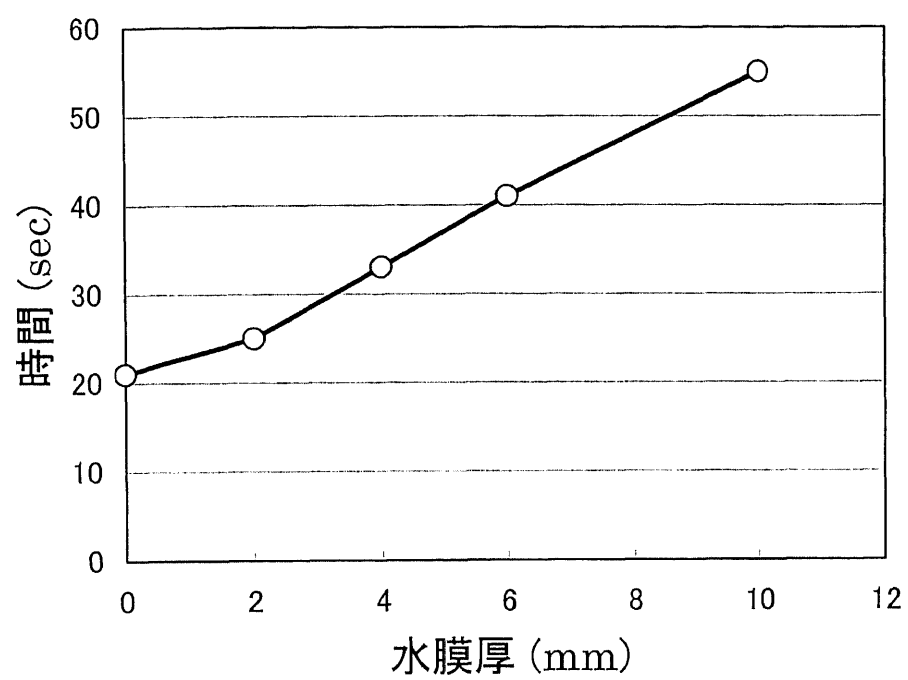


Fig. 2.13 水膜厚さと100°C到達時間

Table 2.4 水膜厚さと蒸留水の消費エネルギー
(モデル溶液 4b)

水膜厚さ (mm)	質量 (g)	消費エネルギー (cal)
2.0	17.7	389.6
4.0	39.1	1016.1
6.0	64.4	2061.8
10.0	128.2	4744.9
モデル溶液 4b	30.0	3000.0

これは蒸留水の損失係数($\varepsilon \cdot \tan \delta$)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事を示している。

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事で解決できる。⁷⁸⁾

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。

2.4 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には、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蒸留水浸漬法を用いた。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。

これらの結果から、静置したモデル溶液をマイクロ波で加熱する場合の、温度不均一の主な要因と、そのひとつの解決方法が得られた。

第3章 移動するモデル溶液のマイクロ波連続加熱

3.1 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。飲料などの液体食品では、いくつかの加熱方法から最適な熱交換器を選定し、高温短時間殺菌を行うシステムがあり、製品化されている。ところが、固形食品では高温短時間殺菌処理を商業的に実施した例は一部の製品に限られており、生産性を考慮したシステム開発が望まれている。

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⁷⁹⁻⁸⁰⁾へ充填・密封した後、直接食品を加熱⁸¹⁻⁸²⁾できるマイクロ波加熱に着目して、高温短時間連続殺菌処理⁸³⁾を考えた。

第2章⁸⁴⁾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⁸⁵⁾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ひとつとして、周囲を蒸留水⁸⁶⁾に浸漬させる方法を示した。

実製造を考慮すると、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⁸⁷⁻⁸⁸⁾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の特性および導波管の配向と考え、移動⁸⁹⁾するモデル溶液の上方から、複数のマイクロ波発振器で個別に照射・加熱する連続加熱装置⁹⁰⁾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、第 2 章の結果から照射距離 L_i を 45 mm とし、静置したモデル溶液における、各マイクロ波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。

3.2 実験方法

3.2.1 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⁹¹⁾。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⁹²⁾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、第 2 章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．

3.2.2 カップとステンレス容器

モデル溶液 30 g を充填するカップおよびステンレス容器は，第 2 章と同仕様とした．

3.2.3 連続マイクロ波加熱装置

Fig. 3.1 に本実験で製作した連続マイクロ波加熱装置と，その中心部拡大図 A を示すとともに，外観写真を Fig. 3.2 に示した．前回と同仕様のマイクロ波発振器（松下電子工業製：出力 600 W）を 4 台使用した．

マイクロ波発振器は，幅 1200 mm×奥行き 650 mm 高さ×500 mm のアルミ製チャンバーの上部に設置し，カップ移動方向の上流から No.1～No.4 の順に配置した．

マイクロ波発振器に接続した縦 35 mm×横 85 mm の導波管は，チャンバー内へ 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．

第 2 章の結果より，モデル溶液の液面と導波管先端までの照射距離 L_i 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．

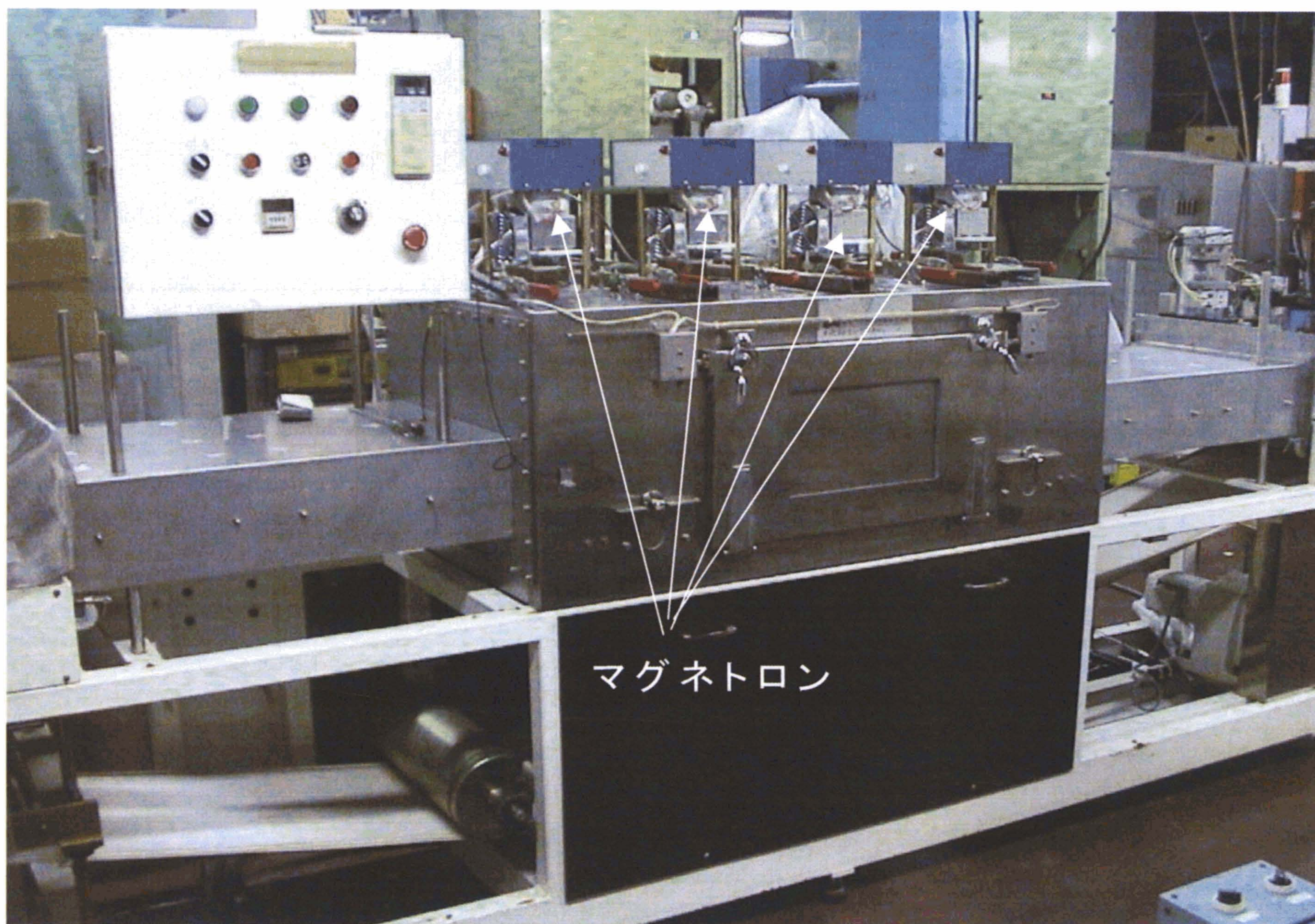


Fig. 3.2 マイクロ波連続加熱装置（写真）

3.2.4 静置加熱実験

実験は、モデル溶液 1 および 2 を使用し、コンベアベルトを停止させて行った。

3.2.4.1 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。

3.2.4.2 マイクロ波発振器の特性

前報では、1 台のマイクロ波発振器を使用し、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ーとマイクロ波発振器を 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、マイクロ波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 台のマイクロ波発振器に対して各 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。

3.2.5 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。

3.2.5.1 導波管の配向特性実験

照射距離を 45 mm として連続加熱する場合、導波管の配向⁹³⁾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. 3.3）。

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⁹⁴⁾。また、深さ 5 mm 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。

3.2.5.2 移動中の温度測定方法

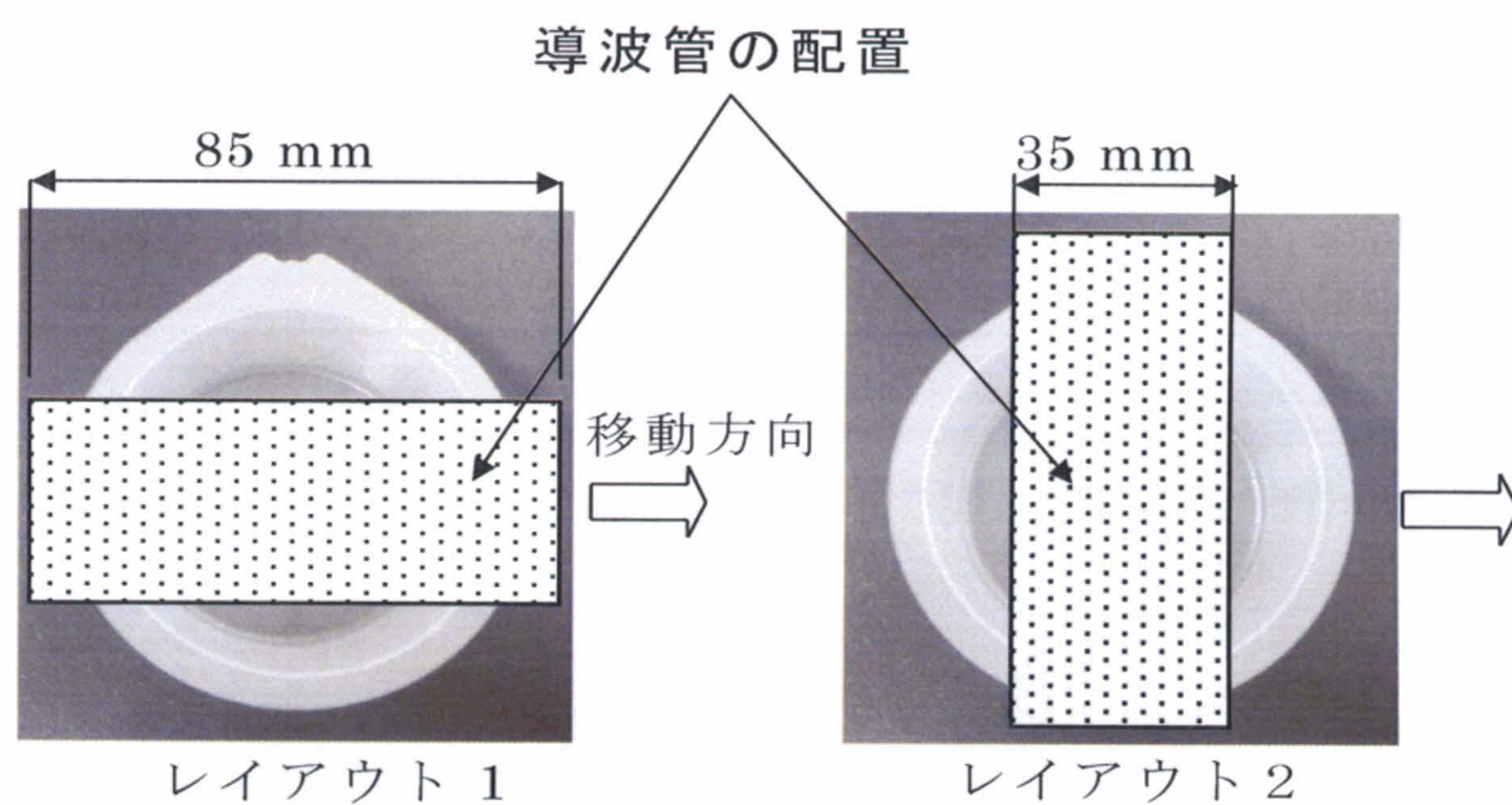
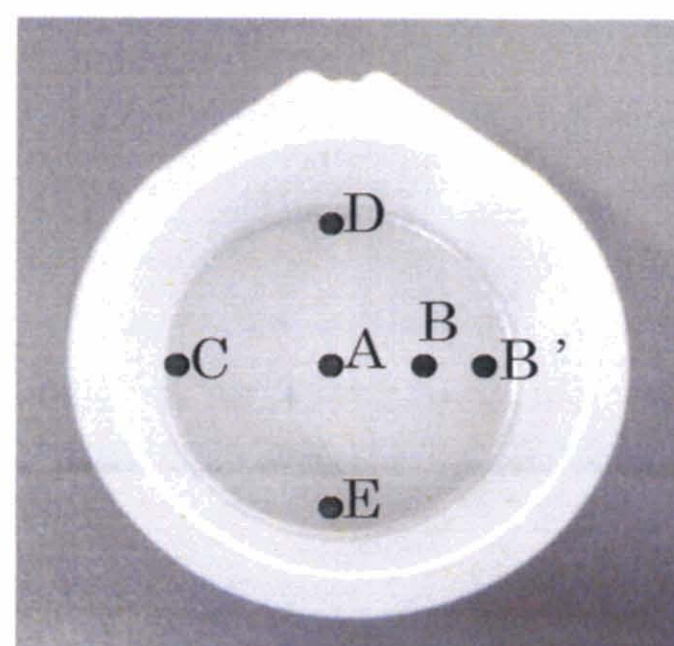
連続加熱中のモデル溶液 3 の内部温度測定は、先端に感温部がある光ファイバー温度計（安立計器製：FL-2000）3 台で行い⁹⁵⁾、温度をデータレコーダ（横河電機製：AR-1100）に記録した。

測定点は、第 2 章同様、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 5 mm とした。（Fig. 3.1）

光ファイバー温度計の感温部は、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、ファイバーケーブルは、コンベアベルトにテフロンテープで固定した。

移動中は、光ファイバー温度計の感温部に負荷がかかることで温度測定位

プラスチックカップと温度測定位置



上面図

Fig. 3.3 プラスチックカップと温度測定位置および導波管の配置

置がずれないように、移動速度に同調してファイバーケーブルを手で送った。

3.2.5.3 移動速度

移動速度は 1.5, 2.25 および 3.0 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ 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。

3.2.6 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、第 2 章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、3.2.5.2 項同様に光ファイバー温度計を 3 台使用し、連続して測定した。

3.3 結果および考察

3.3.1 装置特性

3.3.1.1 ステンレス容器

第 2 章同様、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を想定したステンレス容器を使用した。

ここで、最大耐圧の設定について検討した。本実験で使用するプラスチックカップは、内容積 V_c が 70 ml であり、その内部に 30 ml の純水を充填して密封し、外部から蒸気で徐々に加熱し、130℃に到達した場合のカップ内

部の圧力を求めた。

カップは圧力がかかると変形することが考えられるが，ここでは変形を考慮せず，充填時の純水の温度を 20℃とし，初期内圧を 0 MPa として計算した。

密封したカップ容器の $t^{\circ}\text{C}$ における内圧 $P_{(t)}$ は， $t^{\circ}\text{C}$ における空気分圧を $Pa_{(t)}$ ， $t^{\circ}\text{C}$ における水蒸気圧を $Pv_{(t)}$ とすると

$$P_{(t)} = Pa_{(t)} + Pv_{(t)} \quad (3.1)$$

で表される．($Pv_{(t)}$ は温度により決まる)

プラスチック容器内のエアール量 $Va_{(t)}$ は， $t^{\circ}\text{C}$ における容器内のエアール層の容積を $Vh_{(t)}$ ，純水の体積 $Vl_{(t)}$ ，純水へのエアールの溶解度 $Sa_{(t)}$ とすると，

$$Va_{(t)} = Pa_{(t)} \times (Vh_{(t)} + Vl_{(t)} \times Sa_{(t)} \times (273+t) \times 273^{-1}) \quad (3.2)$$

ここで，溶解度は無視できる程度なので $Sa=0$ として，20℃におけるエアール量を求めると

$$Va_{(20)} = Pa_{(20)} \times Vh_{(20)} \quad (3.3)$$

$$Va_{(t)} \times (273+t)^{-1} = Va_{(20)} \times (273+20)^{-1} \text{ なので，(3.2)，(3.3) より，}$$

$$Pa_{(t)} = Pa_{(20)} \times Vh_{(20)} \times Vh_{(t)}^{-1} \times (273+t) \times 293^{-1} \quad (3.4)$$

20℃におけるエアール分圧は(3.1)より，

$$Pa_{(20)} = P_{(20)} - Pv_{(20)} = 1 - Pv_{(20)} = 1 \quad (3.5)$$

20℃におけるエアール層の容積 $Vh_{(20)}$ は，プラスチックカップの内容容積 $Vc_{(20)}$ と純水の体積の差であるから，

$$Vh_{(20)} = Vc_{(20)} - Vl_{(20)} \quad (3.6)$$

20℃における純水の体積を 1 とし， $t^{\circ}\text{C}$ の膨張係数を $M_{(t)}$ とすると

$$Vh_{(t)} = Vc_{(t)} - M_{(t)} \times Vl_{(20)} \quad (3.7)$$

(3.1)，(3.4)，(3.5)，(3.6)，(3.7) より，

$$P_{a(t)} = \frac{V_{c(20)} - V_{l(20)}}{V_{c(t)} - M_{(t)} \times V_{l(20)}} \times \frac{273+t}{293} \quad (3.8)$$

となり、エア層の容積変化分がエアー分圧の変化となる。ここで、 $t=130^{\circ}\text{C}$ とすると、プラスチックカップ容器内部の圧力 $P_{(t)}$ は、約 0.15 MPa であり、最大 0.4 MPa の耐圧能力があれば、容器を破裂させることなく、保持可能である。

3.3.1.2 静置加熱におけるマイクロ波発振器の特性

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 3.1 に示した。

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、マイクロ波発振器 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 台のマイクロ波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、各マイクロ波発振器で $0 \sim 3.0^{\circ}\text{C}$ 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 $^{\circ}\text{C}$ 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 L_i 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

Table 3.1 各マイクロ波発振器の加熱特性

マイクロ 波発振器 番号	$\Delta T_1 (^\circ\text{C})$				$\Delta T_2 (^\circ\text{C})$	$\Delta T_1 - \Delta T_2$ ($^\circ\text{C}$)
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 : 1 個加熱時の上昇温度

ΔT_2 : 4 個加熱時の上昇温度

ら観察し、写真に記録した結果を Fig. 3.4 の上段に 1 個加熱，下段に 4 個加熱として示した。

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，マイクロ波発振器 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。

これらの写真に示すようなモデル溶液の温度均一性確認方法として，酒井らが液晶を使用した手法を報告⁹⁶⁾している。

その手法は，円柱形のモデル内の中心を通る面に，厚さ 5 mm の液晶板を挿入する。モデルがマイクロ波で加熱されると，温度上昇にともなって液晶の色が変化する。色は，45℃付近で赤色，その後緑色，そして 60℃以上では青色に変化することで，温度の均一性を評価した。われわれの実験はヨウ素のデンプン反応を利用した方法であり，ヨウ素が溶解あるいは分散するモデル溶液には，液晶を使用することなく広く利用できることから，温度の分布を視覚的に評価するには有効であると考えられる。

また，同じく酒井らは，円筒形の上面から見て左半分に寒天，右半分に 1%NaCl を溶解した寒天の試料を用いて，マイクロ波加熱した場合の試料表面温度を赤外放射温度計で評価⁹⁷⁾している。

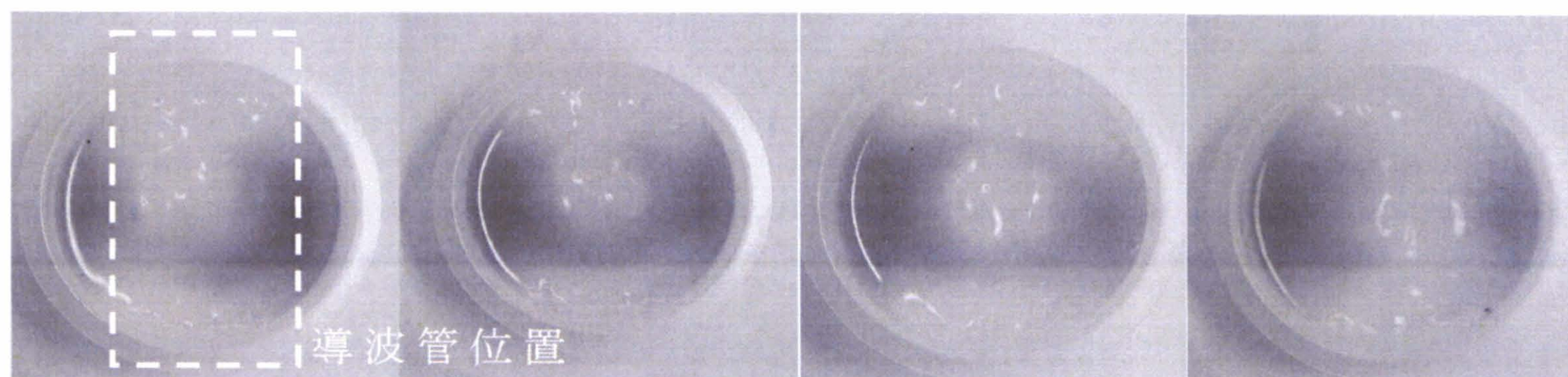
その結果，周辺部の左半分は温度が 50 から 55℃であったが，1.0%NaCl 添加の右半分は 60 から 65℃と，温度が高くなっている。これは，われわれ

マイクロ波発振器番号
No.1

No.2

No.3

No.4



1 個加熱

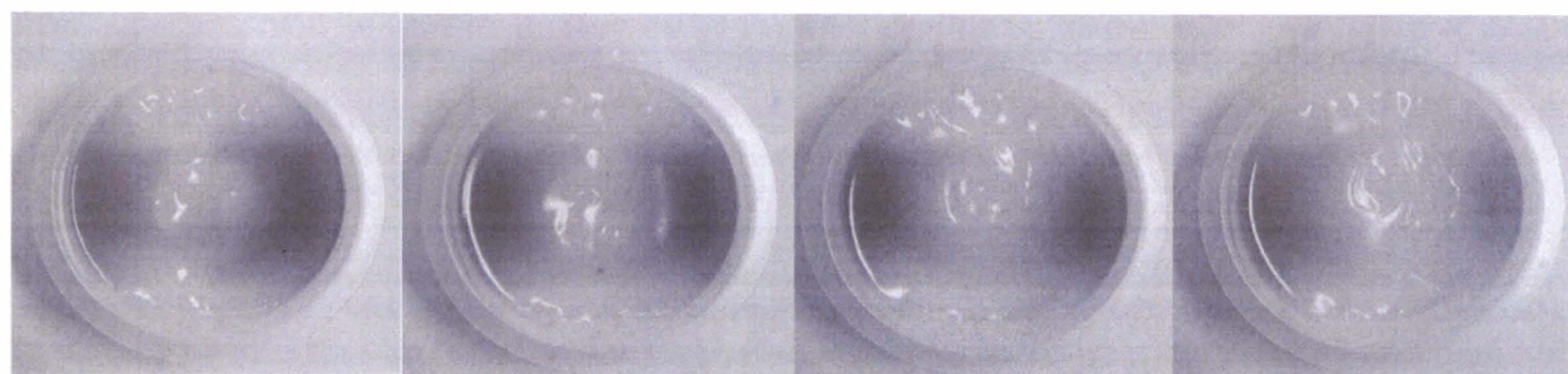


Fig. 3.4 各マイクロ波発振器の加熱特性

の実験にもあるように、NaCl のため、マイクロ波の半減深度が浅くなり、モデル周辺部が高温になる結果と同様であり、精度良く再現された。

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⁹⁸⁾できると考えたからである。

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。

3.3.1.3 連続加熱における導波管の配向特性

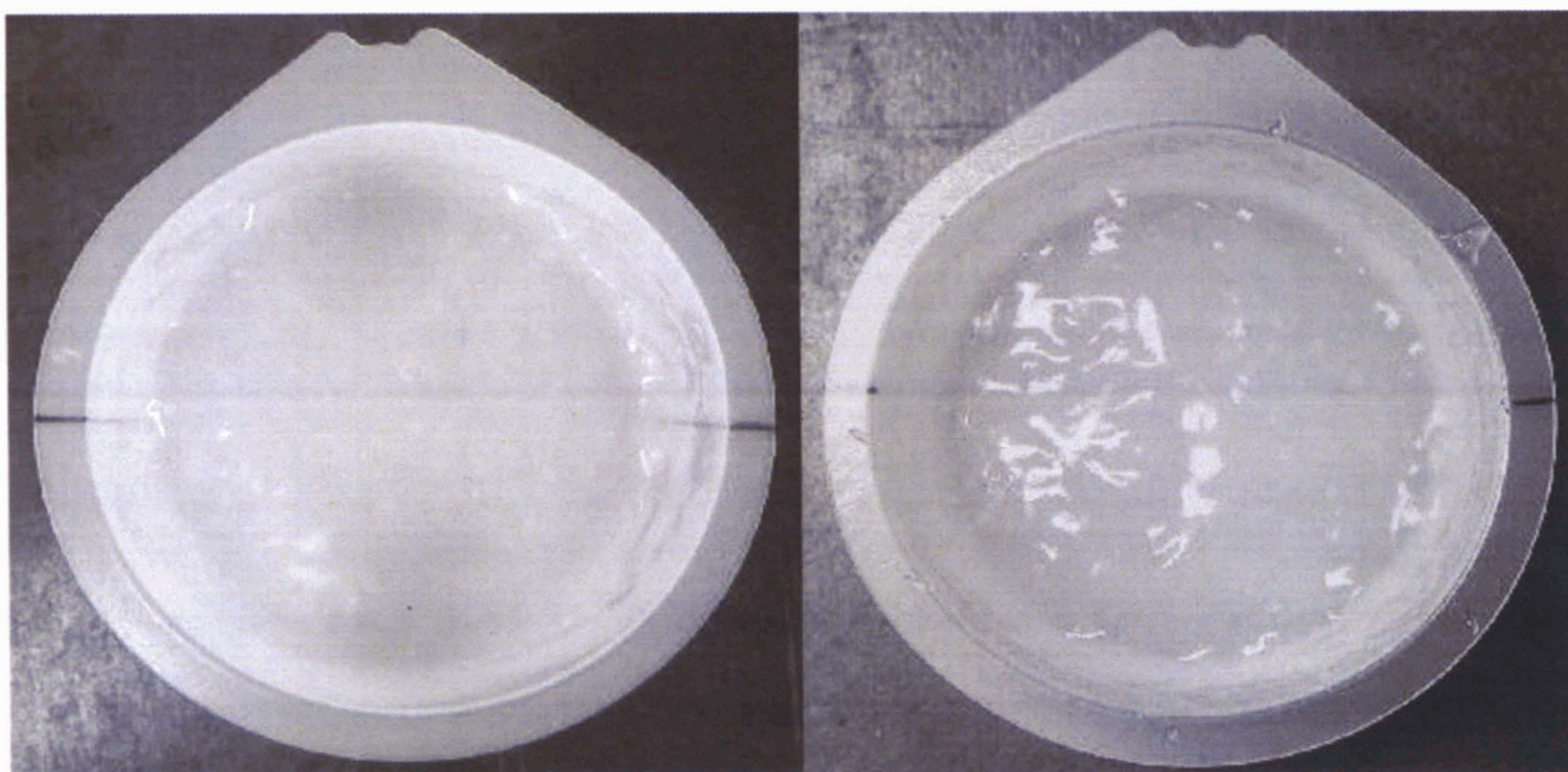
モデル溶液 2 を使用し、導波管⁹⁹⁾の配向をレイアウト 1 (平行) またはレイアウト 2 (直交) として連続加熱した直後の温度の均一性を確認し、写真に記録した結果を Fig. 3.5 に示した。

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. 3.6 にマイクロ波発振器の配向と加熱温度結果を示した。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.



レイアウト 1

レイアウト 2

Fig. 3.5 導波管配向と移動加熱結果

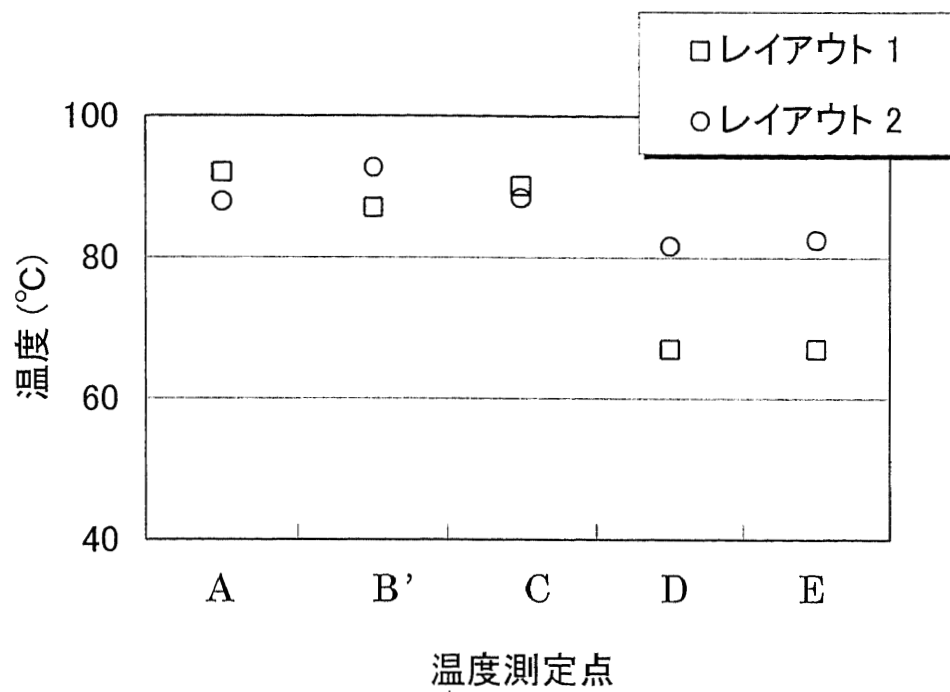


Fig. 3.6 導波管配向別温度

3.5 の結果と一致していた。

これは、カップの直径が $\phi 64 \text{ mm}$ 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。

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¹⁰⁰⁾。

モデル溶液が、コンベアベルト上を移動しながら加熱される場合、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。

3.3.2 新規に開発した連続加熱装置の特性

実製造を考慮すると、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ー温度計が 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。

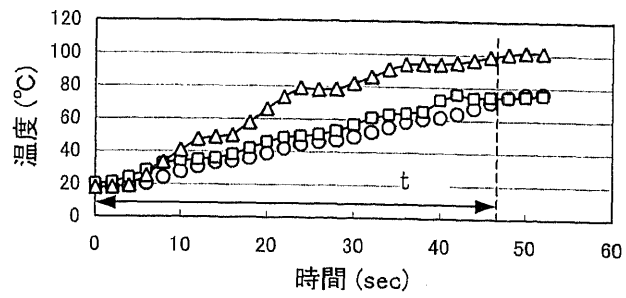
各移動速度のモデル溶液の加熱特性を Fig. 3.7 に示す。各移動速度とも、マイクロ波の照射と同時に 3 点の温度が上昇し、エッジ部 (C 点) の温度が高い傾向であった。

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 (25~80°C) であり、ほとんど温度に依存¹⁰¹⁾しないためと考えられる。

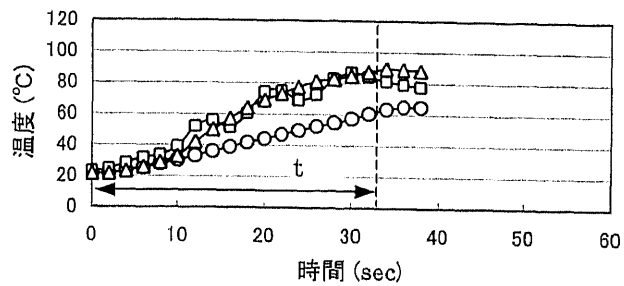
移動速度 $1.5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ において、特にエッジ部 (C 点) の温度上昇が速く、導波管直下付近で加熱され、導波管と導波管の間では緩やかな加熱特性となった。

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、

移動速度: 1.5 m/min



移動速度: 2.25 m/min



移動速度: 3.0 m/min

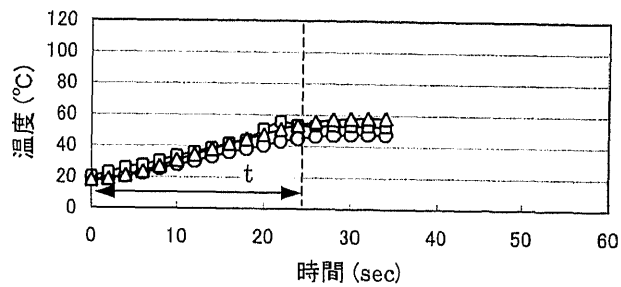


Fig. 3.7 移動速度と加熱特性曲線

○: A(中心部)

□: B(中間部)

△: C(周辺部)

t : 加熱時間

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 $3.0 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 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 3.2 に示した。

加熱開始から 24 秒後の 3 点の平均温度は、各速度とも $50 \sim 60^\circ\text{C}$ (Fig. 3.7 参照)であるが、その温度差は、移動速度 $3.0 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ において最も小さい値を示した。

これは、移動速度 $1.5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ では、主に No.1 と No.2 のマイクロ波発振器から照射・加熱されるのに対し、 $3.0 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ の場合は、異なる加熱特性をもつ 4 台のマイクロ波発振器から加熱されるためと考えられる。つまり、各マイクロ波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 ¹⁰²⁾まで加熱するためには、マイクロ波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 $3.0 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 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 E_1 は 3210cal となる。同様に、移動速度 $3.0 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 時の到達温度約 50°C におけるエネルギー E_2 は 810cal となり、その比率 R は式(3.9)を使うと、約 3.96 倍となる。

$$4.18 \times E_1 / E_2 = R \quad (3.9)$$

Table 3.2 移動速度と 24 秒間加熱後の 3 点の温度差

移動速度 ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	3 点の温度差 ($^{\circ}\text{C}$)
1.5	31.7
2.25	26.3
3.0	12.7

したがって、

$$3.96 \times 4 \text{ 台} = 15.84 \text{ 台}$$

となり、試算では 16 台のマイクロ波発振器が必要となると考えられる。

複数の小型マイクロ波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、およびメンテナンス時は、予備のマイクロ波発振器と交換するだけで早急な対応が可能なことなどを考慮すると、有効な設計指標である。

3.3.3 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. 3.8 に示した。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 $1.5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ における 100°C 到達時の温度差は、 10°C 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。

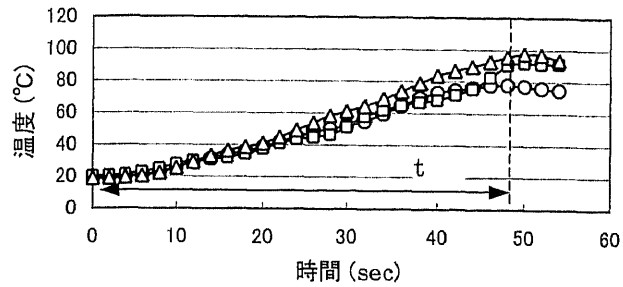
移動速度 2.25 あるいは $3.0 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ では、さらに温度差は縮小したことから、精度の高い温度管理を必要とする殺菌処理においては有効な条件である。

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。

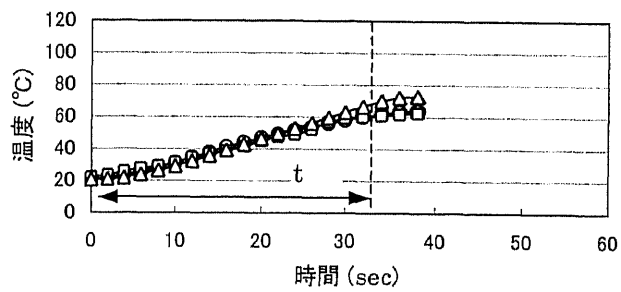
3.4 結論

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

移動速度: 1.5 m/min



移動速度: 2.25 m/min



移動速度: 3.0 m/min

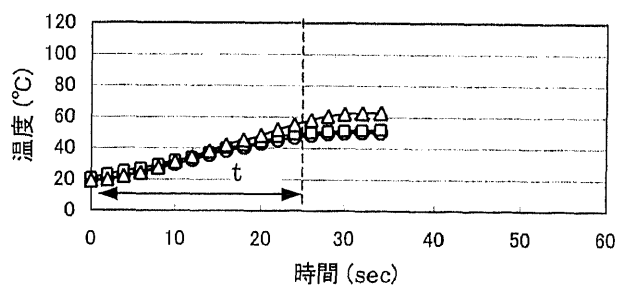


Fig. 3.8 蒸留水浸漬法における移動速度と加熱特性曲線

○: A (中心部)
 □: B (中間部)
 △: C (周辺部)
 t : 加熱時間

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 台のマイクロ波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、個々のマイクロ波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)第 2 章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、連続加熱においても有効であり、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。

これらの結果より、マイクロ波による連続殺菌装置における基本的な設計指針を示すことができた。

第 4 章 総括

マイクロ波を食品の加熱殺菌に利用する場合、数多くの利点がある。すなわち、マイクロ波は食品の内部まで深く浸透し、急速に加熱するため高温短時間処理の可能性がある。従来技術であるレトルト殺菌では得られなかった食品本来の味・香り・食感等の良好な製品が期待できる。

さらに、食品の中心部までの殺菌処理が短時間で行えるので、食品の栄養成分をほとんど損なうことなく、最近の健康食ブームにも対応できる。

今後、わが国は少子高齢化社会となることが確実視されており、飽食の時代を生きてきた高齢者は『おいしくて健康に配慮した食品』を求め、子供には『安全で栄養バランスの良い食品』が求められると思われる。

なかでも、高タンパク低脂肪のツナ製品は、古くから世界で食されており、わが国でも歴史は古い。また、スイートコーンに代表される野菜類を中心とした製品は、健康食ブームにより、消費が拡大している。それら食品の品質を高め、さらに拡販することをひとつの目的として、マイクロ波による連続殺菌装置の開発を進め、その設計・開発指針を示すことを目的とした。

第 1 章「緒論」では、食品の殺菌技術のうち、低温殺菌技術の発見からレトルト殺菌技術開発への変遷をレビューし、なかでも固形食品の加熱殺菌に関し、従来技術であるレトルト殺菌技術の問題点を示した。

さらに、電磁波の定義におけるマイクロ波の位置付けをレビューし、その利用技術の歴史、食品の殺菌以外への応用技術も含めた産業上の技術の特徴を示した。また、民生用電子レンジの普及率が高いことから、そのマイクロ波発振器が低コストで利用可能であることを示した。

固形食品の高温短時間殺菌には、マイクロ波を使用した連続殺菌装置が有効であることを示し、既往の研究での問題点を整理するとともに、本研究における高温短時間連続殺菌技術のポイントを示した。

また、ツナおよびスイートコーンに代表される固形食品の市場および製造方法を示した。

第2章「固形および高粘度食品のマイクロ波加熱」では、ターゲットのひとつとして選定したツナの成分を分析し、添加剤により調整したモデル溶液を使用し、プラスチックカップに30 g 充填した状態でマイクロ波を照射して加熱した。その結果から次の3点の知見を得た。

- ・1%濃度の NaCl を含有するモデル溶液では、周辺部が過熱されるエッジ効果が大きいことを確認した。この現象は、マイクロ波の浸透深さである半減深度から説明できる。つまり NaCl を含有すると半減深度が浅くなり、表面付近（周辺部）でマイクロ波が吸収され、熱に変換される。したがって、被加熱物の誘電率測定によってエッジ効果が推測でき、加熱の均一性を予測できる。
- ・マイクロ波の照射距離は、至近距離の場合、マイクロ波の 1/4 波長毎に加熱速度が早くなる距離がある。さらに離れるとその傾向は低下する。本実験では、NaCl 含有のモデル溶液の温度ばらつきがもっとも小さいことおよび、100℃への到達時間が比較的長く、内部の熱伝導が期待できることから 45 mm を最適照射距離として設定した。
- ・エッジ効果低減対策として、モデル溶液を蒸留水の浸漬層で覆うことで、モデル溶液のエッジ（周辺部）を水が代用することとなり、エッジ効果を低減できる。本実験結果から、蒸留水自身の温度上昇を抑制しながら内部温度のばらつきを低減するには、エネルギー効率の面からも 2 mm が最適であることを示した。

第3章「移動するモデル溶液の連続マイクロ波加熱」では、照射距離 45 mm の比較的近距離における連続加熱においてモデル溶液を移動させることと、複数のマイクロ波発振器の異なる加熱特性のため、電界分布が変化すること

でエッジ効果が低減され、内部温度の均一化に有効であることを示した。

- ・ 照射距離が 45 mm の比較的近距離の場合、モデル溶液を移動させながら複数のマイクロ波発振器で照射する連続加熱では、各マイクロ波発振器の電界分布が異なる特性をもっており、モデル溶液の内部の電界分布も異なるため、エッジ効果が低減される。
- ・ 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、電界分布の高い領域を通過することで温度分布が均一化されることがわかった。
- ・ エッジ効果低減対策として開発したモデル溶液の周囲に水膜を形成する蒸留水浸漬法により、さらに温度の均一化に効果があることを確認した。この研究の場合、蒸留水浸漬法は、浸漬層を 2 mm とする条件が有効であった。

まとめると、容器に密封された固形食品の連続殺菌装置において、

- 1) 電界分布の異なる小型のマイクロ波発振器を複数使用すること
- 2) 短い照射距離(45 mm)で、移動しながらマイクロ波を照射すること
- 3) 蒸留水の浸漬層を設けること

などの方法を用いることで、エッジ効果低減に有効であることを明らかにした。また、小型マイクロ波発振器を使用すれば、設備の低コスト化、およびトラブル時やメンテナンス時の速やかな復旧が可能などの産業上の効果も踏まえ、マイクロ波連続殺菌装置の実機設計指針を示すことができた。

これらの研究成果により、固形および高粘度食品の高温短時間マイクロ波連続殺菌における基礎的技術を確立することができた

今後は本研究をもとに、Fig. 4.1 に示すような小型加圧容器を利用し、種々の固形食品のマイクロ波による連続高温短時間殺菌を実現することで、「おい

しく、食感があり、安全」な食品を供給できる連続殺菌システムの工業的な実用化を推進する計画である。

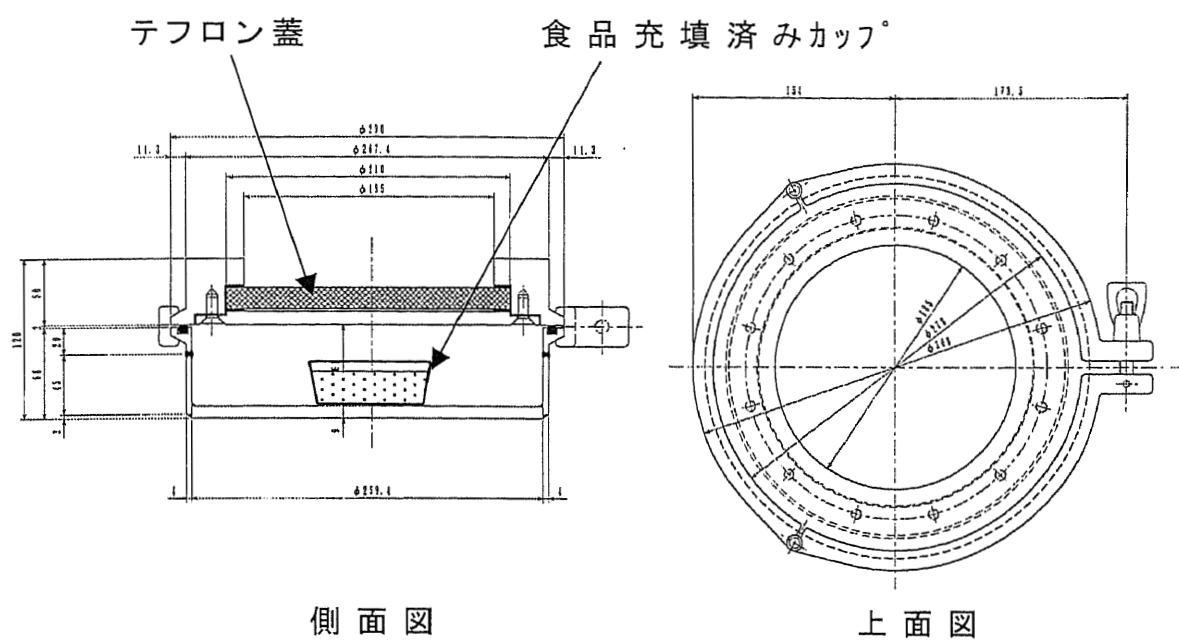


Fig. 4.1 小型圧力容器（ステンレス）構想図

記号

E_1	:消費エネルギー（純水を 23℃から 130℃へ加熱時), [cal]
E_2	:消費エネルギー（純水を 23℃から 50℃へ加熱時), [cal]
D	:半減深度, [mm]
f	:周波数, [Hz]
L_i	:照射距離, [mm]
$M_{(t)}$:純水の膨張係数, [－]
$P_{(t)}$:容器の内圧, [MPa]
$P_{a(t)}$:空気分圧, [MPa]
$P_{v(t)}$:水蒸気圧, [MPa]
pH	:水素イオン濃度, [－]
Q	:熱量, [cal]
R	:消費エネルギー比率
$S_{a(t)}$:純水へのエアの溶解度, [－]
T	:絶対温度（モデル溶液温度), [K]
ΔT	:上昇温度, [K]
t	:摂氏温度, [℃]
t	:重量, [ton]
$V_{a(t)}$:容器内全エア量, [l]
$V_{C(t)}$:容器の全容積, [l]
$V_{h(t)}$:容器内エア量, [l]
$V_{l(t)}$:内容物の体積, [l]
ε	:比誘電率, [－]
$\tan \delta$:誘電正接, [－]

$\varepsilon \times \tan \delta$: 誘電損失係数, [－]

ν : 電界強度, [V/m]

λ : マイクロ波の波長, [cm]

謝辞

本研究に対して御懇篤な指導をいただきました新潟大学大学院自然科学研究科教授渡辺敦夫博士に厚くお礼申し上げます。

実験の取り纏めにおいて種々ご指導頂いた，新潟大学工学部化学システム工学科助教授伊東章博士，新潟大学農学部応用生物化学科助教授城斗志夫博士，新潟大学工学部機能材料工学科教授谷口正之博士，新潟大学工学部機能材料工学科助教授田中孝明博士に厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 社団法人日本缶詰協会, 「レトルト食品を知る」, (丸善), (1996)
- 2) 戸塚英夫, マーケット創出の決着力を持つパッケージングを求めて安全と安心を確立する食品マーケット密封容器詰め食品の加熱殺菌を支える周辺技術と理論豊かな社会を支えてきた先人の知恵の技術, Packpia, 48(1), 26-31(2004)
- 3) 市原伸一, 他, 「食品の包装・缶びん詰」, (光琳書院), (1963)
- 4) 横山埋雄, 食品の静菌・除菌・殺菌システムとその周辺技術, 食品と容器, 33(10), 555-562(1992)
- 5) 森光國・他, 「缶詰食品 第5版」, (日本缶詰協会), (1991)
- 6) 谷川英一, 元広輝重, 秋場稔, 「缶詰製造学」, (恒星社厚生閣), (1969)
- 7) 渡辺敦夫; 無菌化濾過技術によるフレッシュ食品の製造, 食品と開発, 39(11), 45-47(2004)
- 8) 矢野俊正; “食品工学・生物化学工学”, 丸善, (1999)
- 9) 市川雅也; 食品の無菌包装の近況 プレパウチ式無菌充填包装機, ジャパンフードサイエンス, 43(11), 72-78(2004)
- 10) 田中, 缶詰協会報, 381, (1989)
- 11) Juan A Canumir, Jose E Celis, Johannes de Bruijn, Lesli V Vidal ; Pasteurization of Apple Juice by Using Microwave, Lebensm Wiss Technol, 35(5), 389-392(2002)
- 12) 藤原忠; レトルト殺菌技術の最近の動向と展望, フードパッケージング, 34(2), 44-50(1990)
- 13) 五領田俊雄; 20世紀から21世紀を見るレトルト包装殺菌技術における菌制御, Packpia, 47(1), 86-90(2003)
- 14) 稲垣長典, 「缶びん詰・レトルト食品事典」, (日本缶詰協会), (1984)
- 15) 森光国; かん詰製造技術の現状と将来技術の調査報告IVレトルト食品,

- 缶詰時報, 62(12), 1176-1183(1983)
- 16) 中村八郎 ; 食品のマイクロ波殺菌についてー加工食品の高級志向と食品衛生上の問題, New Food Industry, 28(11), 11-20(1986)
- 17) 食品設備・機器事典編集委員会, 「食品設備・機器事典」, (産業調査会事典出版センター), (2002)
- 18) 橋本修, 川崎繁男, 「新しい電波工学」, (培風館), (1998)
- 19) 渡辺敦夫, 清水賢 ; 食品加工における電磁波の利用, 化学技術誌 MOL, 26(3), 36-38(1988)
- 20) 柴田長吉郎 ; 電磁波加熱の原理と応用, 生産と電気, 38(3), 3-7(1986)
- 21) 柴田長吉郎, 「工業用マイクロ波応用技術」, (電気書院), (1986)
- 22) 中川善博 ; マイクロ波殺菌, 防菌防ばい, 16(3), 131-135(1988)
- 23) 須賀良介, 渡辺慎也, 橋本修, 高富哲也 ; 温度変化に対する食品の複素誘電率測定, 電子情報通信学会大会講演論文集, 2004(1), 414(2004)
- 24) 村中恒男 ; マイクロ波加熱応用…塗装業界への応用例, 工業塗装, (170), 64-73(2001)
- 25) 露木英男 ; 食品加工技術 (その1) マイクロ波, 電気評論, 75(10), 1096-1102(1990)
- 26) 渋谷祥子 ; “食品加工の科学”, 朝倉書店, (1996)
- 27) 山下榮吉, 「電子・情報基礎シリーズ3 応用電磁波工学」, (近代科学社), (1992)
- 28) 岩本純一 ; マイクロ波による加熱殺菌と食品包装, 包装技術, 22(10), 734-738(1984)
- 29) 露木英男 ; マイクロ波の食品工業への利用技術, 食品と開発, 23(1), 68-72(1988)
- 30) 肥後温子 ; 食品のマイクロ波加熱について (続), New Food Industry,

27(7), 42-52(1985)

- 31) 飯淵貞明；加熱調理Ⅱ－加熱すると熱はどのように伝わり，温度はどのように上昇するか，調理科学，20(2)，104-110(1987)
- 32) 広島由佳理，藤井寛也，上田智子，高木智子，後藤佳代，佐藤誠吾；微生物殺菌におけるマイクロ波照射効果，化学工業，53(10)，760-765(2002)
- 33) 板谷義紀；マイクロ波による成形体乾燥と内部応力生成機構，日本食品工学会，2002年秋季講演会予稿集，(2002)
- 34) 山崎邦雄，熊林義晃，清水秀樹，河野慎一；紛体食品素材の殺菌技術の研究開発，北海道立食品加工技術センター事業報告，(15)，55-56(1996)
- 35) PUESCHNER H.A；Microwave continuous Floe Heater for Koagulation, Pasteurization and Sterilization in Food Processing, Conducta Studien, 33(5/6), 188-189, 192-195(1989)
- 36) 日本電熱協会，「エレクトロヒート応用ハンドブック」，(オーム社)，(1990)
- 37) NEIL H MERMELSTEIN；Microwave Processing of Food, FOOD TECHNOLOGY, 53(7), 114-116(1999)
- 38) 荻野宏泰，小西孝；最近の高周波解凍法について，New Food Industry, 24(7), 25-33(1982)
- 39) 鈴木実，阿部重春，宮川孝夫，山口聡，マイクロ波を利用した食品製造技術の開発と実用化，日本食品保蔵科学学会誌，25(1)，327-337(1999)
- 40) 小笹晃夫，「食品産業における電子利用技術の展開」高周波誘導加熱を利用した食品の加熱加工技術の開発，食品産業電子利用技術研究組合，265-275
- 41) 肥後温子；マイクロ波の特殊加熱効果の食品への応用，化学工学シンポジウムコース，16，87-92(1988)

- 42) 中北宏, 井村治, 鍋谷浩志, 渡辺敦夫, 渡辺正造, 竹生新治郎, マイクロ波の殺虫効果と米の品質への影響, 日本食品工業学会誌, 36(4), 267-273(1989)
- 43) M.H. Lau, J. Tang, I.A. Taub, T.C.S. Yang, C.G. Edwards, F.L. Younce, MICROWAVE HEATING UNIFORMITY OF FOODS DURING 915MHz MICROWAVE STERILIZATION PROCESS, Microwave Power Symposium(33rd), 78-81(1998)
- 44) 渡辺慎也, 角田陽一, 橋本修; 電子レンジ庫内に置かれた被加熱物質の解凍ムラ解析の基礎検討, 電子情報通信学会技術研究報告, 104(383), 57-61(2004)
- 45) 平光隆幸, 長田正史; 電子レンジの均一加熱技術の開発 (被加熱物への下部集中加熱方式), 電機, (613), 20-21(1999)
- 46) ASHIM K.DATTA, P MICHEL DAVIDSON; Microwave and Radio Frequency, JOURNAL OF FOOD SCIENCE, 65, 32-41(2000)
- 47) 河野通紀, マイクロ波による食品の高温短時間殺菌システムについて, 肉の科学, 25(2), 183-190(1984)
- 48) 小林光, 小松一郎, 渡辺正徳, 大門哲; マイクロ波加熱の食品への応用, マイクロ波効果・応用シンポジウム講演要旨集, 44-45(2001)
- 49) 野中順三九; "新版水産食品学", 恒星社厚生閣, 1976, 251-253
- 50) 三浦洋; "最新・ソフトドリンクス", 光琳, 2003, 727-735
- 51) 清水潮, 横山理雄; "レトルト食品の基礎と応用", 幸書房, 1995
- 52) 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)

- 53) 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)
- 54) RYYNAENEN S ; The Electromagnetic Properties of Food Materials :A Review of The Basic Principles, J FOOD ENG, 26(4), 409-429(1995)
- 55) GUISE W ; Sterilization for Food Safety, Package Technol Depth, 61(683), 3-7(1990)
- 56) 横山埋雄, 河口克己, 「食品包装での殺菌の科学」, (日本包装学会), (2004)
- 57) 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)
- 58) 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)
- 59) 三浦靖 ; 最近の食品加工技術と装置－3－加熱, 科学装置, 38(9), 100-107(1996)
- 60) 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)
- 61) 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)
- 62) 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)
- 63) 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)
- 64) T.KUDORA , F.R.VAN DE VOORT , G.S.V.RAGHAVAN , H.S.RAMASWAMY ; Heating Characteristics of MILK Constituents in a Microwave Pasteurization System, JOURNAL OF FOOD SCIENCE, 56(4), 931-934(1991)

- 65) 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)
- 66) 柴田長吉郎 ; マイクロ波殺菌の特性と利用技術, 食品と科学, 31(5), 103-106(1989)
- 67) 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)
- 68) 佐藤誠吾 ; マイクロ波照射の殺菌機構とその応用, バイオサイエンスとインダストリー, 57(5), 313-316(1999)
- 69) 松本好太, 橋本修 ; 電子レンジ庫内に配置された擬似負荷の形状・誘電率の変化に対する加熱効率に関する検討, 電子情報通信学会論文誌 C, 87(12), 1345-1145(2004)
- 70) 鈴木一之, 本杉正義, 鈴木敏博 ; かつお節加工工程へのマイクロ波の利用, 静岡県工業技術センター研究報告, (34), 81-84(1989)
- 71) 渡邊良三, 菊池基和, 石川茂光, 尾辻純一, 清瀧兼司, 松本繁 ; マイクロ波加熱時の容器内試料の温度履歴の計測, 化学工学会論文集, 21(4), 835-838(1995)
- 72) 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)
- 73) 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)
- 74) 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).
- 75) 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
- 76) 四宮陽子, 中町敦子 ; 3 種類の電子レンジの加熱むらの測定と加熱パタ

- ーの画像解析, 日本食品工学会誌, 4(2), 61-68 (2003)
- 77) 小谷ミ子, 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)
- 78) James Giese; Advances in Microwave Food Processing. Food Technology, 46(9), 118-123(1992)
- 79) 江川洋介; 新容器「Kpcan」の開発とその利用分野, ジャパンフードサイエンス, 32(3), 82-91(1993)
- 80) 杉本信博, 松原弘明; ボイル, レトルト向け易開封性包材「DIFAREN E3700T E3800T, 大日本インキ化学工業技術レビュー, (7), 74-75(2001)
- 81) MAGNUS SUNDBERG; Semi-Automated Design of Microwave Application for Sterilization of Packed Foods, Microwave(Theory and application in Materials Processing 4), 233-240(1997)
- 82) JUDY RICE; Shelf-stable pizza(Microwave pasteurization of sealed packages protects product at room temperature, FOOD PROCESSING, 47(9), 76-77(1986)
- 83) WILFRIED SCHLEGEL; Commercial Pasteurization and Sterilization of Food Products Using Microwave Technology, FOOD TECHNOLOGY, 46(12), 62-63(1992)
- 84) 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(4), 235-241(2004)
- 85) 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)
- 86) 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)

- 87) Thomas E. Szeplenski ; Trends In Food Preservation Technology,
FOODPLAS CONFERENCE (7th), 46-59(1990)
- 88) Kevin P. Self, Dean Burfoot, Thimothy J Wilkins, Stephen J James ;
MICROWAVE PASTEURIZATION OF PRE-PACKED SLICED HAM,
Conference On Engineering Innovation In The Food Industry ,
33-44(1990)
- 89) 塩川 俊一 ; マイクロ波を利用した食品の殺菌, 包装技術, 32(11),
1088-1092(1994)
- 90) On-line Measurements In Microwave ; MICKERSHEIM K.A, TAPPI J,
73(3), 223-229(1990)
- 91) 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)
- 92) 南條初五郎 ; “化学大事典”, 共立出版, 1962, 288-289
- 93) 毛塚敦, 松本好太, 橋本修, 牧田実 ; 電子レンジ側壁に設けられた導波
管の取り付け位置に対する加熱ムラ解析, 電子情報通信学会論文誌 B,
85(11), 1995-1998(2002)
- 94) 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)
- 95) Robert Y. Ofoli, Vaneer Komolprasert ; On the thermal modeling of
foods in electromagnetic fields, Journal of Food Processing and
Preservation, 12(3), 219-241, (1988)
- 96) Noboru SAKAI, Yudong CHENG, Humihiko SHIMODA ; Effect of
Incident Power Intensity on Temperature Distribution in Microwave
Heated Food, JOURNAL OF CHEMICAL ENGINEERING OF JAPAN,
36(12), 1432-1439(2003)

- 97) Noboru SAKAI, Cong Wang, Shigeru TOBA, Manabu WATANABE ;
An Analysis of Temperature Distribution in Microwave Heating of
Foods with Non-Uniform Dielectric Properties , JOURNAL OF
CHEMICAL ENGINEERING OF JAPAN, 37(7), 858-862(2004)
- 98) Noboru SAKAI, Jian Wen Tang, Chang Min Liu and Manabu
Watanabe ; Predicting Temperature during the Thermal Processing of
Canned High-Viscosity Liquid Food, Food Sci. Technol. Res., 10(1),
79-85(2004)
- 99) 青木和夫, 服部賢, 綿貫順也, 横山忠司 ; 矩形導波管を用いたマイクロ
波による水の加熱, 日本機械学会熱工学部門講演会講演論文集, 1997,
186-187(1997)
- 100) 橋本修, 川崎繁男 ; “新しい電波光学”, 培風館, 1998, 135-139
- 101) D. Guan, M. Cheng, Y. Wang, J. Tang ; Dielectric Properties Of
Mashed Potatos Relevant To Microwave and Radio-frequency
Pasteurization and Sterilization Processes , JURNAL FOOD
SCIENCE, 69(1), 30-37(2004)
- 102) 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)