◇◇◇◇ 原著論文 ◇◇◇◇

工業用電子レンジ庫内に配置された食品の円偏波を用いた加熱ムラ低減

須賀良介^{1,†}, 橋本 修¹, 伊集院太一², 高富哲也²

¹ 青山学院大学, ² 大和製罐株式会社総合研究所

Reduction of Uneven Heating of a Food in an Industrial Microwave Oven by Means of Circular Polarized Wave

Ryosuke SUGA¹, Osamu HASHIMOTO¹, Taichi IJUN² and Tetsuya TAKATOMI²

¹*Aoyama Gakuin University, 5-10-1 Fuchinobe, Sagamihara, Kanagawa 229-8558 Japan*

²*Daiwa Can Company, 5-5-1 nishihashimoto, sagamihara, Kanagawa 229-1183 Japan*

In the case of sterilizing foods by heating in the industrial microwave oven, uneven heating is occurred inside heated foods. It is problem that unheated part occurs shortage of sterilization and overheated part occurs deterioration of foods. In this report, we focus attention on circular polarized wave and linear polarized wave. First, each polarized wave irradiated the food, and absorbed power distribution inside of food is calculated. We examined validity of circular polarized wave for uniform heating. Next, we used circular polarized wave generator and cylindrical chassis for actual use, absorbed power distribution inside of the food is examined. Moreover absorbed power distribution inside of the food which was arranged in cylindrical chassis with rectangular waveguide for continuous heating is examined, too. As a result, local heating is reduced, and 43% uniform heating is brought to realization by using circular polarized wave than using linear polarized wave. And, in the case of using the chassis for actual use, circular polarized wave is valid for uniform heating of foods as with basic study.

Keywords: Circular polarized wave, Microwave heating, Uniform heating, Absorbed power

1. 緒 言

工業用電子レンジの使用目的の1つとして、食品工場における食品の高温短時間での連続加熱殺菌が挙げられる [1]。しかし、加熱庫内に配置した食品に加熱ムラが生じ、加熱不足部分における殺菌不良や過加熱による食品の劣化が問題となっている [2]。このような問題に対して、従来家庭用電子レンジの加熱ムラ問題に関しては、Maxwell 方程式および熱伝導方程式を時間・空間で差分化した熱・電磁界連成解析手法である FDTD-HTE (Finite Difference Time Domain -Heat Transfer Equation) 法による被加熱物質の温度分布解

析の検討が行われており [3]、解析の有効性が示されている。

我々はこの種の問題に対する並列 FDTD 法のこの種の問題への有効性 [4] や、水膜を食品周囲へ配置することによる加熱ムラ低減手法 [5] を提案している。しかし、食品の加熱殺菌の見地から殺菌に水を用いるのは好ましくないなどの問題があった。

そこで本論文では、乾燥した環境における加熱殺菌および加熱装置の簡略化のためマイクロ波のみによる食品の均一加熱を目的とし、円偏波を励振として用いた加熱ムラ低減手法を提案した。そして、従来から用いられている直線偏波との比較を行うための基礎検討を行った。また、実用を考慮した検討、すなわち円偏波発生器および円筒型の加熱庫単体を用いた場合における吸収電力分布について検討した。

(受付 2007 年 8 月 20 日, 受理 2007 年 10 月 9 日)

1 〒 229-8558 神奈川県相模原市淵野辺 5-10-1

2 〒 229-1183 神奈川県相模原市西橋本 5-5-1

† Fax: 042-759-6298, Email: suga@ee.aoyama.ac.jp

2. 円偏波および直線偏波の比較

はじめに, 円偏波を用いて食品の加熱を行う場合の特性を直線偏波を用いて加熱した場合と比較するための基礎検討を行った.

Fig. 1 に本研究で用いた有限積分法の解析モデルを示す. 本解析モデルは解析領域の周囲 6 面を PML 吸収境界条件で囲い, その中央に, 円柱形状の食品 $\epsilon_r = 73.67 - j11.11$, 半径 32 mm, 高さ 10 mm) を 1 つ配置したものである. 本食品はゼリーのような高粘度・固体食品を模擬した溶液モデルである. 解析領域における上面から励振として直線偏波および円偏波の照射電力が等しくなるよう直線偏波 1 V/m および円偏波 0.7 V/m, 周波数 2.45 GHz の CW 波を照射し, 食品内部の吸収電力分布を算出した. また, 吸収電力分布のヒストグラムを作成することにより均一加熱に関して定量的な評価を行った.

吸収電力 P は解析空間内の電磁界が収束した状態において, 次式を用いることにより計算した.

$$P = \frac{\omega \epsilon_r'' \epsilon_0}{T} \int_t^{t+T} \int_V E^2 dV dt \quad (1)$$

ここで, T : 時間周期, t : 任意時間, ω : 角周波数, ϵ'' : 複素比誘電率虚部, ϵ_0 : 真空の誘電率, E : 電界, V : 単位体積である.

Fig. 2 に円偏波・直線偏波をそれぞれ照射した場合の食品内部 z 方向の中央面 (xy 平面) における吸収電力分布を示す. 同図から確認できるように, 直線偏波では左右端部および中央に半月状の局所加熱部位が 4 箇所生じる. しかし円偏波を用いることで周方向に均一な加熱分布が得られていることを確認できる.

Fig. 3 に食品を 1 つ配置し直線および円偏波を照射した場合の吸収電力のヒストグラムを示す. 本解析は解析空間を小さな微小直方体 (セル) に分割すなわち差

Fig. 1 Analytical model.

Fig. 2 Absorbed power distribution in the central plane.

分法を用いて解析している. その中で食品を構成する各セルにおける吸収電力を 0.01 W/m^3 帯域ごとにカウントし, セル数の最大値にて正規化したヒストグラムを示す. 本ヒストグラムは横軸の帯域が狭いほど, 均一に加熱されていると評価でき, また吸収電力の高い部分に小さく分布している場合は局所加熱が生じていると読み取ることができる. また, 吸収電力の高い部分に分布している程, 加熱効率が高いことを示している.

Fig. 3 から直線偏波では吸収電力の高い帯域に微小ながら分布していることが確認でき, 局所的な加熱がされていることがわかる. このように微小領域における局所的な加熱が生じる場合, その部位では過加熱による品質劣化等が生じていることが予想される. しかし, 直線偏波と比較して円偏波を照射した場合では, 0.2 W/m^3 以上の高吸収電力の帯域が低減され, 約 43% 程度吸収電力の帯域幅が減少している. すなわち 43% の加熱ムラ改善を確認した. これは直線偏波では局所に集中していた電力が円偏波を用いることにより周方向に平均化されるためであると考えられる.

Fig. 3 Histogram of absorbed power distribution inside the food by using circular and linear polarized wave.

3. 加熱殺菌用電子レンジの実用化

3.1 加熱庫単体の場合

まず、加熱庫単体における加熱特性について検討を行った。Fig. 4 に用いた加熱庫単体の概観図を、そして Fig. 5 に連続加熱システムにおける筐体の 1 つに着目した解析モデルを示す。本モデルは食品を内部に配置した直径 300 mm、高さ 300 mm の円筒型筐体の上部に、円偏波発生器を配置し、円偏波発生器の上面から高周波を入力する構成となっている。円偏波発生器は直径 100 mm、高さ 225 mm の円筒導波管内部に 8 本のビスを 2 本ずつ対向させたものを 4 箇所に配置したものである。これらのビスの寸法や配置間隔は Fig. 5 に示す通りである。入力電界の方向をビスに対して $\pi/4$ の角度に向けることで、円偏波発生器内の電磁波はビスに並行および垂直方向の二波に分解される。そして電磁波が 8 つのビスを通過することにより二波間に $\pi/2$ の

Fig. 5 Analytical model (Single chassis).

位相差を生じ、円偏波発生器を通過後の合成波は円偏波となる。また、食品は基礎検討同様ゼリーのような固形・高粘度食品を想定したものであり、上面の直径は 63 mm、底面の直径は 57 mm とし、Fig. 1 同様複素比誘電率は $\epsilon_r = 73.67 - j11.11$ である。この食品を無負荷状態の筐体内に生じる定在波が腹となる底面から 70 mm の位置に配置した。そして、円偏波発生器の上部から 2.45 GHz、1 V/m を励振し、食品内部における吸収電力分布を有限積分法にて算出した。

Fig. 6 に吸収電力分布の解析結果を示す。Fig. 6 から本円偏波発生器および円筒型筐体を用いることにより、

Fig. 4 Image of the chassis.

Fig. 6 Absorbed power distribution by using circular polarized wave generator.

Fig. 2 における自由空間内において円偏波を照射した場合同様、周方向に平均化された吸収電力分布が得られることを定性的に確認した。

3.2 連続加熱を考慮した場合

Fig. 7 に食品を通過させるための方形導波管を筐体単体に接続した検討モデルの概観図を、Fig. 8 に解析モデルを示す。円筒筐体は上記のモデル同様であり、その両端に開口 80 mm×80 mm の方形導波管が接続されている。無限長の方形導波管を想定するため、導波管開口には PML を配置している。本モデルにおいても上述した解析方法と同様に食品内部の吸収電力分布を算出した。

また、導波管上部にはチョーク構造を配置、非配置

Fig. 7 Image of the chassis with rectangular waveguide.

Fig. 8 Analytical model of the Chassis with rectangular waveguide.

時（ストレートの導波管）の 2 通りについて食品内部における吸収電力分布解析を行った。本チョークは 2.45 GHz において整合するように設計し、チョーク幅 27 mm、チョーク深さ 110 mm である。Fig. 9 にその透過特性を示す。

チョーク構造を有する導波管単体の場合 2.45 GHz において -30 dB 程度の減衰量を得ることができることを確認している。

Fig. 9 Transmission characteristics of choke structure.

Fig. 10 に Fig. 6 の結果、すなわち加熱庫単体の場合の吸収電力分布を 100% としたときのチョーク配置前後における吸収電力分布の変化率を示す。チョーク未配置の場合方形導波管が接続された方向において吸収電力が約 140% と高くなっていること、また上下方向において約 40% と吸収電力の低下が確認できる。しかし、チョークを配置することにより、導波管接続方向（z 方向）の吸収電力の上昇、上下方向における吸収電力の低下を抑制し、全体として 100% に近づく傾向や、全方向に均一な吸収電力分布が得られていることを定量的に確認することができた。このことから連続加熱のために方形導波管を接続する場合、導波管にチョーク構造を設けることが、食品内部の吸収電力分布変化を低減するために有用であることを明らかにした。

4. 結 論

本研究では、食品の電磁波を用いた加熱殺菌手法として円偏波を用いることによる均一加熱手法を提案した。その結果、自由空間中に配置された食品に対して直線偏波および円偏波を照射した場合、直線偏波で確認された局所加熱は、円偏波では改善され約 43% の加熱ムラ改善を確認した。

次に実用を考慮した、円筒型の筐体を用いた加熱庫

Fig. 10 Improvement of absorbed power distribution inside the food by means of choke structure.

単体モデル内における食品内部の吸収電力分布について検討を行った。その結果、自由空間における基礎検討同様、周方向に平均化された吸収電力分布が得られた。さらに連続加熱のために方形導波管を円筒筐体へ接続したモデルにおいて、方形導波管を接続することで加熱庫内の電磁界が乱れ吸収電力分布が40~60%程度変化し、加熱ムラを生じる問題を確認した。しかし、方形導波管に-30 dB程度の減衰量が得られるチョーク構造を設けることで、方形導波管の接続による吸収電力分布への影響を低減することが可能であることを明らかにした。

引用文献

- [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] 渡邊慎也, 橋本 修, 牧田 実; “FDTD-HTE 法を用いた電子レンジ庫内におかれた被加熱物質の温度分布解析”, 電子情報通信学会論文誌 (B), J84-B, 1103-1106 (2001).
- [4] 須賀良介, 高富哲也, 伊集院太一, 橋本 修, 渡邊慎也, 渡辺 敦夫, “マイクロ波を用いた食品の均一殺菌に関する基礎検討-並列FDTD法を用いた解析の有効性について-”, 電子情報通信学会技術研究報告, MW2005-28 (2005).
- [5] R. Suga, T. Ijuin, O. Hashimoto, T. Takatomi, S. Watanabe, “Analytical Study on Uneven Heating Relaxation of Food Inside Industrial Microwave Oven by Means of Water Film”, Microwave and Optical Technology Letters, **49**, 518-521, 2007.

要 旨

工業用電子レンジにより食品の加熱殺菌を行う場合、加熱庫内に配置した食品に加熱ムラが生じ、加熱不足における殺菌不良や過加熱による食品の劣化が問題となっている。

本研究では、まず基礎検討として自由空間に配置した食品に円偏波を照射した場合の食品内部の吸収電力分布を算出し、直線偏波を用いた場合の吸収電力分布と比較しすることにより、円偏波の有効性について議論した。

次に実用を考慮し、円偏波発生器および円筒型の加熱庫を用いた場合の吸収電力分布について検討した。さらに連続加熱のための食品移動用方形導波管を円筒型の筐体に接続したモデルにおける食品内部の吸収電力分布についても検討を行った。

その結果、基礎検討から円偏波を用いることで直線偏波と比較し局所加熱が抑制され、約43%の加熱ムラが低減可能であり、より均一な加熱を実現できることを定量的に確認した。そして実用を考慮し、筐体を用いた場合においても基礎検討同様円偏波が均一加熱に有効であることを明らかにした。