

## マイクロ波による食品の均一加熱に関する研究

橋本 修<sup>†</sup> 須賀 良介<sup>††a)</sup>

A Study on Uniform Heating of Foods by Using Microwave

Osamu HASHIMOTO<sup>†</sup> and Ryosuke SUGA<sup>††a)</sup>

あらまし 近年、品質劣化を抑えた栄養価の高い食品の生産のため、短時間での加熱殺菌処理が望まれており、マイクロ波加熱による短時間加熱処理が期待されている。しかし、マイクロ波により粘度の高い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むらが生じ、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。本論文では、マイクロ波を用いた高粘度・固形食品の均一加熱を目的とし、三つの均一加熱手法を提案するとともに、その有効性について述べる。

キーワード マイクロ波加熱, 均一加熱, 加熱殺菌, 高粘度食品, 加熱むら

## 1. ま え が き

マイクロ波は携帯電話をはじめとする無線通信技術やレーダ等、幅広い分野において、なくてはならないものであることはよく知られている。加えて、マイクロ波は効率的かつクリーンな加熱を行うエネルギーとして、工業、医療、化学等あらゆる分野で応用されている。中でも食品工業では、乾燥した環境において加熱が可能であるため清潔であり、また短時間での加熱が可能であることから、家庭においても電子レンジとして普及している [1], [2]。

加熱殺菌の分野では、従来から用いられている外部の熱源によって食品を加熱する伝熱加熱手法と比較し、マイクロ波加熱では食品内部において発熱が生じるために対流伝熱が生じにくい高粘度・固形食品の加熱に適している点 [3] や、伝熱媒体を必要としない等のメリットを有することから、短時間殺菌の実現が可能となり、高品質及び栄養価の高い食品の製造が可能となる。しかし、従来からのマイクロ波加熱における技術課題として、食品内部において局所加熱や未加熱部分

が生じる加熱むらの問題 [4], [5] が存在し、加熱殺菌において局所加熱部分は過度の温度上昇による品質劣化、そして未加熱部分は殺菌不良となる。また、被加熱物質において、コーヒー飲料等の低粘度食品では従来の伝熱加熱手法を用いても食品内部における対流によって、加熱むらが緩和される傾向にあるが、ゼリーに代表される高粘度・固形食品では、対流伝熱による加熱が困難で、伝熱加熱手法を用いた場合、周辺部からの伝導伝熱により温度こう配が大きくなり、均一かつ短時間での加熱殺菌処理が困難であることから、マイクロ波による均一短時間加熱殺菌が望まれている。

従来のマイクロ波加熱に関する研究としては、食品内部の電界分布及び温度分布を把握することを目的とした研究 [6] ~ [9] が報告されている。また、電磁波を均一に照射することを目的とした研究として、家庭用電子レンジに代表される多重モード空洞共振器内部に配置された被加熱物質を均一に加熱するための電磁波制御パネル [10] の開発や、生体への電磁波の影響 (SAR: Specific Absorption Rate) を評価する目的で、電磁波の均一暴露装置の開発 [11] が行われている。しかし、電磁界及び温度分布の把握や、家庭用電子レンジのように比較的小さい筐体に対しての検討にとどまっている。均一暴露装置の開発においては、入力電力が加熱殺菌の場合と比較し小さいことや、SAR 評価の観点から温度まで検討されていない。

また、粘度の低い食品は、従来手法である外部熱源による対流伝熱加熱によって低品質劣化殺菌が実現さ

<sup>†</sup> 青山学院大学理工学部, 相模原市

College of Science and Engineering, Aoyama Gakuin University, 5-10-1 Fuchinobe, Sagami-hara-shi, 229-8558 Japan

<sup>††</sup> 東京工業大学理工学研究科, 東京都

Department of Electrical and Electronics Engineering, Tokyo Institute of Technology, 2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo, 152-8552 Japan

a) E-mail: suga@antenna.ee.titech.ac.jp

れているが、高粘度・固形食品に対してははまだ確立されておらず、筆者の知る限り、マイクロ波による高粘度・固形食品の均一な加熱の実現についての報告例は非常に少ない。

そこで本論文では、高粘度食品を模擬した溶液モデルを用い、マイクロ波加熱を用いた短時間及び均一な加熱により、高粘度・固形食品に対して品質・栄養劣化の低い加熱殺菌の実現を目的とした。

## 2. 誘電体の配置による均一加熱 [12] ~ [14]

本手法は、食品端部における局所加熱の低減による均一加熱手法である。具体的には、二重構造の容器を用い食品周囲に蒸留水を配置することで食品内部の定在波を制御し、局所加熱を緩和することにより食品内部における温度分布の均一化を図る。

### 2.1 解析モデル

図 1 に試作した工業用電子レンジの並列 Finite Difference Time Domain-Heat Transfer Equation 法 (FDTD-HTE 法) 解析モデルを示す。テフロン製の食品容器をステンレス製容器内部に配置し、更に 4 本の銅の円柱棒で吊下げたエポキシ板の上部へ配置している。

溶液モデル、エポキシ板、テフロン及び金属の材料定数を表 1 に、溶液モデルに用いた熱定数を表 2 に示す。溶液モデルは、高粘度・固形食品を模擬したものであり、組成は蒸留水 93%、澱粉 7% である。

また、図 2 に水膜配置用の二重構造テフロン製容器 (テフロン厚 1 mm) を示す。内部容器には高粘度食品を模擬した溶液モデル、外部容器及び内部容器の間には蒸留水を充填している。この解析モデルにおける上部の導波管から 600 W、2.45 GHz の TE<sub>10</sub> モードを

励振し、テスト機内部の電磁界が定常状態における、溶液モデル内部の温度分布を計算した。蒸留水の複素比誘電率は、室温を考慮し 25°C における同軸プローブ法による測定値である。なお、被加熱物質表面に対し、室温を考慮して等温境界条件 (25°C) を用い、初期温度は 25°C とした。

### 2.2 解析結果

図 3 に水膜を配置しない場合の、溶液モデル表面が

表 1 解析に用いた材料定数  
Table 1 Material constant for analysis.

溶液モデル	$\epsilon_r = 73.2 - j11.1$
蒸留水	$\epsilon_r = 76.4 - j6.7$
カップ	$\epsilon_r = 3.5 - j0.001$
エポキシ板	$\epsilon_r = 2.08 - j0.001$
テフロン	$\epsilon_r = 2.08 - j0.01$
銅 [S/m]	$\sigma = 5.7 \times 10^7$

表 2 溶液モデルの熱定数  
Table 2 Thermal constants of solution model.

密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	1162.7
比熱 [J/K/kg]	4184
熱伝導率 [W/m/K]	0.753

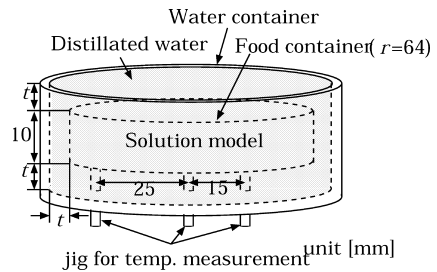


図 2 溶液モデル及び蒸留水配置用二重容器  
Fig. 2 Double container filled with solution model and distilled water.

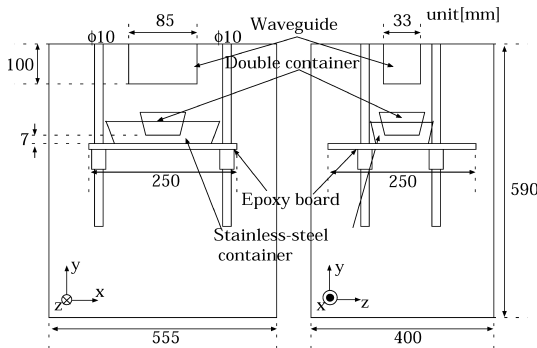


図 1 解析モデル (フルモデル)  
Fig. 1 Analytical model (Full model).

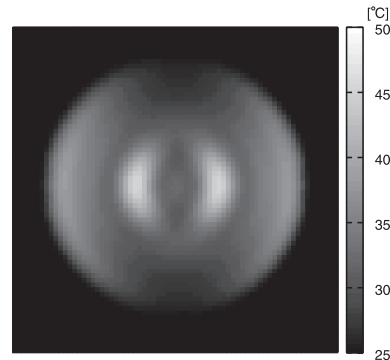


図 3 水膜非配置時の温度分布  
Fig. 3 Temperature distribution (without water).

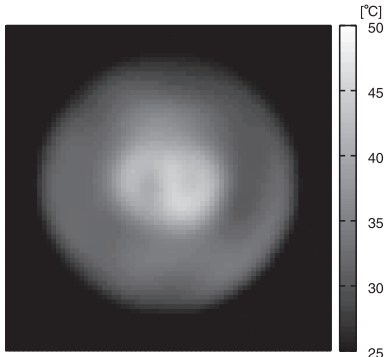


図 4 水膜 2 mm 配置時の温度分布  
Fig. 4 Temperature distribution ( $t = 2$  mm).

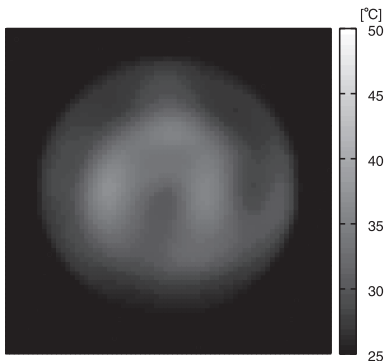


図 5 水膜 4 mm 配置時の温度分布  
Fig. 5 Temperature distribution ( $t = 4$  mm).

ら深さ方向に 5 mm の面における温度分布の解析結果を示す．図 3 からカップ左右端部及び中央の 2 箇所における温度上昇が確認でき，最高 50°C 程度まで昇温していることが確認できる．

次に図 4，図 5 に，それぞれ厚さ 2 mm 及び 4 mm の水膜を配置した場合の深さ方向に 5 mm の面における温度分布の解析結果を示す．図 4 から水膜を配置することにより，左右端部における加熱の緩和や，カップ中心が加熱されていることが確認できる．また，図 5 から厚さ 4 mm の水膜を配置した場合では，全体的に温度が低下する傾向を確認できる．これは水膜厚みを 4 mm としたことにより，境界における反射や水膜内部における損失が増加し，溶液モデル内部における消費電力が低下したためである．

また，温度分布のヒストグラムにより均一加熱に対する定量的な評価を行った．本論文におけるヒストグラムとは各温度帯域ごとに被加熱物質を構成するセル数をカウントしたものであり，ヒストグラムの幅の減

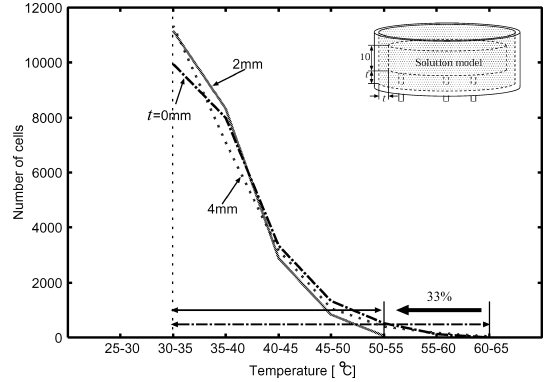


図 6 温度のヒストグラム  
Fig. 6 Histogram of temperature inside of the solution model.

少は均一加熱の指標となる．図 6 に水膜を 0～4 mm と変化させたときの，被加熱物質の内部温度のヒストグラムを示す．この結果，厚さ 2 mm の水膜を配置することにより，40°C 以上の領域が減少し，30～40°C の領域の増加が確認でき，高温部分が抑制されることによってヒストグラムの幅が 33%狭くなっており，33%の加熱むらが改善されていることが分かる．

また，水膜の厚みを 2 mm から 4 mm と変化させた結果，40°C 以上の領域が増加し，35～40°C の領域は減少することから，水膜は 2 mm の方がより均一に加熱がされており，水膜の厚みには溶液モデルを配置する容器の形状により，最適な値があると考えられる．

### 3. 蒸気とマイクロ波の併用均一加熱 [15]

本手法は，本溶液モデルが温度上昇に伴い複素比誘電率が低下することを利用した均一加熱手法である．すなわち，マイクロ波加熱の前処理として，蒸気による加熱を行い，2 工程による均一加熱を行う．この複素比誘電率の低下は，本溶液モデルが 90%以上が蒸留水から構成されていることから図 7 に示すように，蒸留水の温度変化に対する誘電率変化に依存していると考えられ，多くの食品へ応用が可能であると考えられる．後述するように含水率の高い食品全般に対して有効であると考えられるため，より汎用性の高い均一加熱手法である．

蒸気加熱のみで加熱殺菌を行った場合の溶液モデル内部の温度変化を図 8 に示す．外部熱源による伝導伝熱のため，外部ほど高温になっていることが確認できる．この結果から，本溶液モデルを蒸気加熱によって

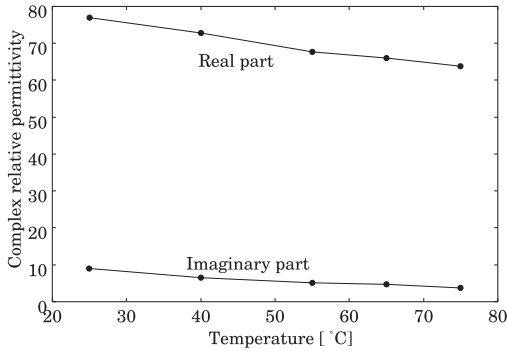
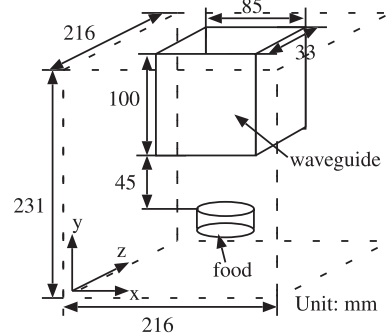
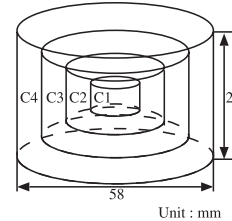


図 7 蒸留水の温度変化に対する複素比誘電率変化の測定結果  
 Fig. 7 Measured complex permittivity of distilled water result from temperature change.



(a) 全体図



(b) 食品の層近似モデル

図 9 解析モデル  
 Fig. 9 Analytical model.

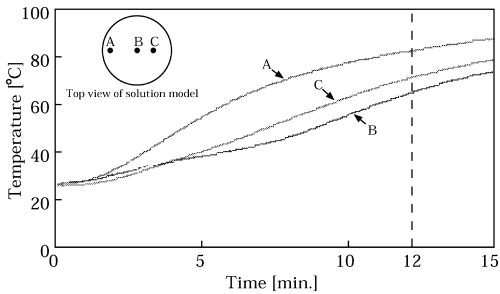


図 8 蒸気を用いた外部加熱による溶液モデル内部の温度変化の測定結果  
 Fig. 8 Measured temperature change inside of the solution model by using steam heating.

表 3 溶液モデルの初期条件

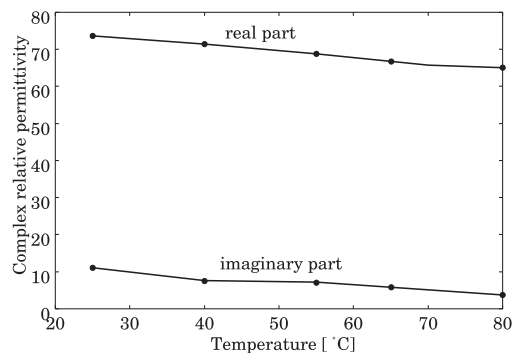
Table 3 Initial condition of solution model.

	半径 (mm)	高さ (mm)	温度 (°C)	複素比誘電率
C1	5	7	27.4	73.1 - j10.0
C2	15	11	35.0	72.0 - j9.3
C3	25	17	53.8	69.3 - j7.5
C4	29	25	65.0	67.7 - j6.4

酸性食品の殺菌に最低必要な 70°C 程度まで昇温させるには、約 12 分の加熱時間が必要であることを定量的に確認できる。そこで、提案する蒸気とマイクロ波の併用加熱では、均一加熱を行うと同時に、加熱時間を蒸気加熱のみの場合すなわち 12 分以内に加熱殺菌を達成することを目的とした。

### 3.1 解析モデル

図 9 に FDTD-HTE 法による解析モデルを示す。本解析モデルは、文献 [16] において提案した近似短時間解析手法を用いている。本解析は蒸気加熱を行った円柱形状の溶液モデルに対し、マイクロ波による加熱を行うことを想定した温度分布解析である。したがって、蒸気加熱後の食品内部の温度測定結果をもとに、溶液モデルを中心を同じくする 4 層の円柱形温度層 (C1 ~ C4) と近似し、各層に表 3 に示す初期条件、すなわち蒸気加熱後の溶液内部における温度測定値を与えた。また、本溶液モデルの蒸気加熱前の初期温度は 25°C である。

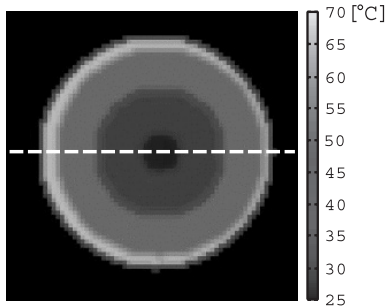


$$\epsilon_r' = -0.1428t + 77.074 \text{ (実部)}$$

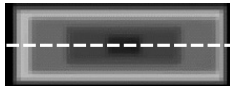
$$\epsilon_r'' = -0.0975t + 12.757 \text{ (虚部)}$$

t : 温度

図 10 溶液モデルの温度変化に対する複素比誘電率変化  
 Fig. 10 Complex permittivity of solution model result from temperature change.

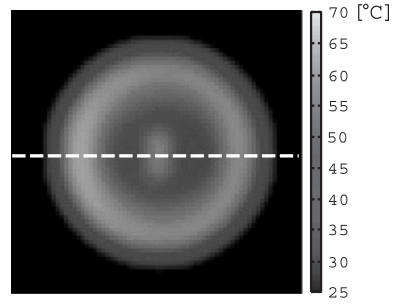


上面図  
Top view



側面図  
Side view

(i) Steam heating (5 min.)



上面図  
Top view

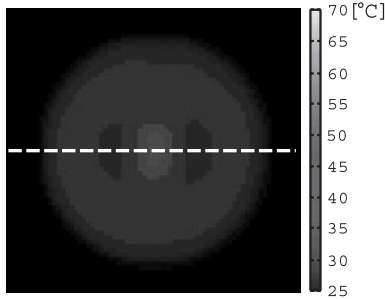


側面図  
Side view

(iii) Steam heating (5 min.) + Microwave heating (1 min.)

図 11 蒸気及びマイクロ波併用加熱後の温度分布

Fig. 11 Temperature distribution inside of solution model by using steam and microwave heating.



上面図  
Top view



側面図  
Side view

(ii) Microwave heating (1 min.)

解析空間の境界には  $Mur$  1 次吸収境界条件を適用した。そして、溶液モデルには前章と同様の溶液モデルを選択し、図 10 に示す測定値から得られた実験式に従い、溶液モデルを構成する各セルにおける温度に対し逐次変化させている。

### 3.2 解析結果

図 11 にそれぞれ蒸気加熱 5 分、マイクロ波加熱 1 分、及び蒸気加熱 5 分とマイクロ波加熱 1 分の併用加熱による温度分布の解析結果を示す。それぞれ図中における白点線はそれぞれ上下の図の対応位置を示している。(i) 蒸気加熱のみの場合は温度分布解析において入力した初期値であり、蒸気加熱によって周囲部分

のみが加熱されている様子を視覚的に確認することができる。(ii) マイクロ波を 1 分間照射した場合では中心部分のみ温度が約  $40^{\circ}\text{C}$  程度まで上昇していることが定量的に確認でき、局所加熱が生じている。(iii) 併用加熱の場合では、それぞれの加熱手法によって食品内部を選択的に加熱している様子が確認できる。また、食品中心部分についてマイクロ波のみの加熱と比較すると、併用加熱を用いた方が温度が高くなっていることから、マイクロ波を照射する前段階として蒸気加熱を行うことで、温度上昇による食品の周囲部分の複素比誘電率が低下し、マイクロ波が溶液モデルの中心においてより吸収されていると考えられる。

また、図 12 に蒸気加熱及び併用加熱による温度のヒストグラムを示す。蒸気加熱では表面積の広い溶液周辺部から加熱を行うため、高温箇所が多く存在することが確認できる。そして、蒸気加熱及び併用加熱を比較すると約 11% の加熱むら改善が可能であることを明らかとし、更に本提案手法により蒸気加熱では 12 分を要する加熱殺菌が、蒸気加熱 5 分及びマイクロ波加熱 1 分、すなわち 2 工程により 6 分間と蒸気加熱の半分の時間で達成できることを示した。

### 4. 円偏波による均一加熱 [17]

本手法は、円偏波を励振として用いた加熱むら低減

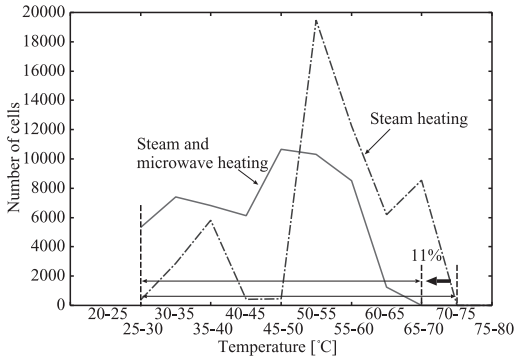


図 12 溶液モデル内部における温度分布のヒストグラム  
Fig. 12 Histogram of temperature inside of the solution model.

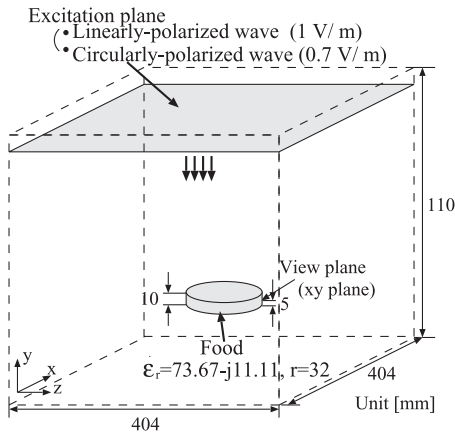


図 13 解析モデル (円偏波及び直線偏波の吸収電力分布比較)  
Fig. 13 Analytical model (Comparison of absorbed power distribution between circular polarization and linear polarization).

手法である。吸収電力分布の解析により、従来から用いられている直線偏波との比較を行い、円偏波の均一加熱への有効性について検討した。

#### 4.1 解析モデル

はじめに、円偏波を用いた食品の加熱殺菌の加熱特性を、直線偏波を用いて加熱した場合と比較を行った。

図 13 に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、前述の円柱形状の溶液モデル (半径 32 mm, 高さ 10 mm) を一つ配置したものである。解析領域における上面から直線偏波及び円偏波を励振した。それぞれの偏波において照射電力が等しくなるよう直線偏波 1 V/m 及び円偏波 0.7 V/m とし、

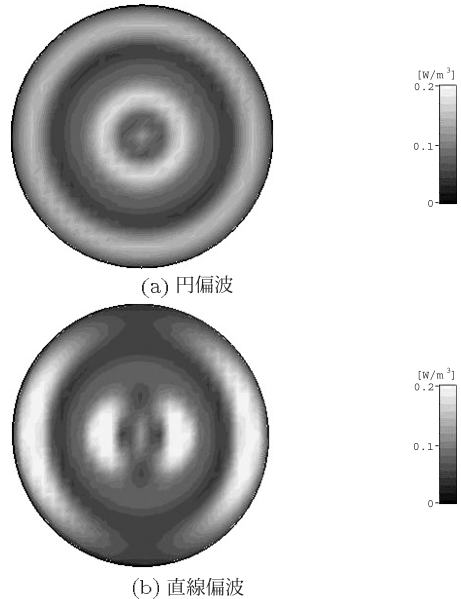


図 14 中央面 (高さ 5 mm) における吸収電力分布  
Fig. 14 Absorbed power distribution in center plane (5 mm in height).

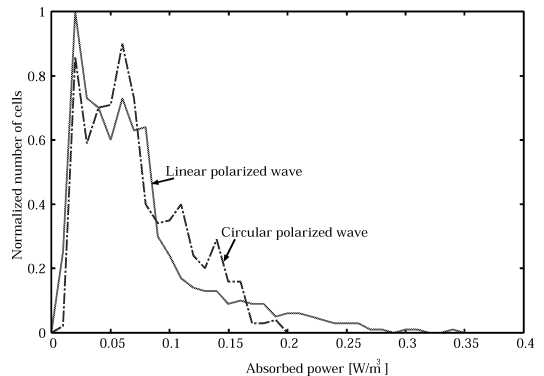


図 15 円偏波・直線偏波を用いた場合の吸収電力分布のヒストグラム  
Fig. 15 Histogram of absorbed power.

周波数 2.45 GHz の CW 波を食品に照射し、食品内部の吸収電力分布を算出した。

#### 4.2 解析結果

図 14 に円偏波・直線偏波をそれぞれ照射した場合の食品内部  $y$  方向の中央面 ( $xz$  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及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。

図 15 に食品を一つ配置し直線及び円偏波を照射し

た場合の、食品内部の吸収電力を  $0.01 \text{ W/m}^3$  帯域ごとにカウントすることで作成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る。またヒストグラムにおいて吸収電力の高い領域に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。

同図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、局所的な加熱がなされていることが分かる。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は、 $0.2 \text{ W/m}^3$  以上の高吸収電力の帯域が低減されており、約 43% の加熱むら改善が確認できる。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。

## 5. む す び

本論文では、高粘度・固形食品のマイクロ波による均一短時間加熱を目的として、上述した三つの均一加熱手法を提案しその有効性について述べた。

その結果、水膜の配置による均一加熱では、配置する水膜の厚みによって食品内部の電磁界分布を制御できることを示した。更に、2 mm の水膜配置時においては 33% の加熱むら改善が可能であることを示した。

次に、蒸気とマイクロ波の併用均一加熱手法では、含水率の高い食品の複素比誘電率が温度上昇に伴い低下することを利用し、蒸気加熱後にマイクロ波加熱を行うことで、より均一加熱を実現可能であることを示した。また、蒸気加熱 5 分及びマイクロ波加熱を 1 分行うことで、蒸気加熱のみの場合と比較して 11% の加熱むら改善が可能であり、更に加熱時間は半減した。

最後に、円偏波を用いた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及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% の加熱むら改善を確認した。

謝辞 本研究は、文部科学省ハイテク・リサーチ・センター整備事業の一環として行われた。

また、試料製作に御協力頂いた大和製罐（株）の高富哲也氏、伊集院太一氏に感謝致します。

## 文 献

- [1] 柴田長吉郎, 工業用マイクロ波応用技術, 電気書院, 1986.  
 [2] マイクロ波応用技術研究会 (編), 初歩から学ぶマイクロ

波応用技術, 工業調査会, 2004.

- [3] 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, vol.5, no.4, pp.235-241, Dec. 2004.  
 [4] 毛塚 敦, 橋本 修, 牧田 実, “FDTD 法を用いた電子レンジの加熱ムラ解析に関する一検討,” 信学論 (C-I), vol.J81-C-I, no.9, pp.566-568, Sept. 1998.  
 [5] 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, vol.20, pp.73-80, 1999.  
 [6] N. Sakai, C. Wang, S. Toba, and M. Watanabe, “An analysis of temperature distributions in microwave heating of foods with non-uniform dielectric properties,” J. Chem. Eng. Japan, vol.37, no.7, pp.858-862, 2004.  
 [7] 渡邊慎也, 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むらに関する検討,” 信学論 (C), vol.J88-C, no.12, pp.1149-1158, Dec. 2005.  
 [8] 田中史彦, 菅原晃美, 岩崎浩一, 守田和夫, “サツマイモのマイクロ波加熱過程シミュレーションとデンプン糊化,” 農業生産技術管理学会誌, vol.13, no.2, pp.80-85, 2006.  
 [9] 須賀良介, 高富哲也, 伊集院太一, 橋本 修, 渡辺敦夫, “マイクロ波を用いた食品の均一加熱殺菌に関する基礎検討,” 日本食品工学会誌, vol.7, no.1, pp.25-30, 2006.  
 [10] 二川佳央, 染谷大輔, “多重モード空洞共振器内部に置かれた被加熱体の発熱分布シミュレーションと実験的評価,” 信学技報, MW2000-101, 2000.  
 [11] T. Iyama, H. Ebara, Y. Tarusawa, and S. Uebayashi, “Large scale in vitro experiment system for 2 GHz exposure,” Bioelectromagnetics, vol.25, pp.599-606, 2004.  
 [12] R. Suga, T. Ijuin, O. Hashimoto, and T. Takatomi, “Analytical study on uneven heating relaxation of food inside industrial microwave oven by means of water film,” Microw. Opt. Technol. Lett., vol.49, no.3, pp.518-521, 2007.  
 [13] 須賀良介, 橋本 修, 伊集院太一, 高富哲也, “誘電体配置による食品のマイクロ波均一加熱,” 日本食品工学会誌, vol.9, no.4, pp.311-315, 2008.  
 [14] 須賀良介, 橋本 修, 伊集院太一, 高富哲也, “マイクロ波による固形・高粘度食品の均一加熱に関する検討,” 電学論 (C), vol.128, no.8, pp.1271-1276, 2008.  
 [15] 伊集院太一, 須賀良介, 橋本 修, 高富哲也, “蒸気とマイクロ波の併用による食品の均一加熱に関する実験的検討,” 信学論 (C), vol.J91-C, no.7, pp.390-391, July 2008.  
 [16] 須賀良介, 橋本 修, 伊集院太一, 高富哲也, “工業用電子レンジ庫内に配置された食品内部における吸収電力分布の短時間解析,” 信学論 (C), vol.91-C, no.3, pp.229-230, March 2008.  
 [17] 須賀良介, 橋本 修, 伊集院太一, 高富哲也, “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,” 日本食品工学会誌, vol.8, no.4, pp.281-285, 2007.

(平成 21 年 7 月 13 日受付)



橋本 修 (正員)

昭 51 電通大・電気通信・応用電子卒。昭 53 同大学院修士課程了。同年(株)東芝入社。昭 56 防衛庁入庁。昭 61 東工大大学院博士課程了。平 3 青学大助教授。平 6~7 イリノイ大客員研究員。平 9 青学大教授。工博。環境電磁工学, 生体電磁工学, マイクロ波・ミリ波計測に関する研究に従事。平 2 防衛論文賞, 平 15 エレクトロニクス実装学会論文賞, 平 18 本会第 9 回エレクトロニクスソサイエティ賞等各受賞。主な著書に, 「高周波領域における材料定数測定法」(森北出版)他 25 件。発表論文 317 国際会議発表 148。映像情報メディア学会, エレクトロニクス実装学会, 建築学会, 電気学会, 日本航空宇宙学会, IEEE 各会員。



須賀 良介 (正員)

平 14 青学大・理工・電卒。平 16 同大学院修士課程了。平 20 同大学院博士課程了。同年 4 月東工大産学官連携研究員。現在, ミリ波アンテナ・実装に関する研究に従事。IEEE 会員。