食品の誘電物性とマイクロ波加熱

誌名	日本食品工学会誌 = Japan journal of food engineering
ISSN	13457942
著者名	酒井,昇
発行元	日本食品工学会
巻/号	11巻1号
掲載ページ	p. 19-30
発行年月	2010年3月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council Secretariat

「日本食品工学会誌」, Vol. 11, No. 1, pp. 19 - 30, Mar. 2010

連載 食品の物性そして水 Ⅶ

◇◇◇ 解説 ◇◇◇

食品の誘電物性とマイクロ波加熱

酒 井 昇

東京海洋大学

Dielectric Properties of Food and Microwave Heating

Noboru SAKAI

Tokyo University of Marine Science and Technology, 4-5-7 Konan, Minato-ku, Tokyo 108-8477

The application of microwave heating to food processing, including microwave oven, have come into wide use because of their ability to heat and cook food quickly and conveniently. However, a problem that has arisen in microwave heating is uneven heating or non-uniform temperature distribution in the foods. To control the uneven heating, it is important to know the mechanism of heating and the role of the dielectric properties of food, because they determine the heat generation when the food is irradiated by the microwaves. First of all in this manuscript, the principle of the microwave heating and the role of water in the microwave heating are explained. Next, the influence of the water and salt content on the dielectric properties of food was described. Reduction of water content primarily changes the dielectric constant, whereas the addition of salt primarily changes the dielectric loss factor. Finally, the physical properties change according to the thawing of food was described. The thermal and dielectric properties of food vary with temperature in thawing process, and the great difference in dielectric properties between frozen state and thawed one can cause a problem in uniform thawing, that is known as runaway heating.

Keywords: Dielectric properties, Microwave heating, Temperature distribution, Heat transfer analysis

1. 緒 言

マイクロ波を利用した電子レンジは，ほぼ全世帯に普及し，今や無くてはならない加熱調理器具である．とくに，近年では加熱・解凍のみならず，電子レンジ用の炊飯容器，魚焼き容器，一般調理容器などが市販され，調理器具として注目されている．しかし，電子レンジは加熱むらが大きいために仕上がりが均一ではなく，消費者にとって不満が残る場合がある．この加熱むらが起こる原因として，以下の要因が考えられる．

(1) 加熱庫内の電界強度が不均一である [1].

電子レンジの中をマイクロ波がランダムに飛び交い，均一にエネルギーが分散しているイメージがあるが，電磁波として共振が起こるため，電界強度に強弱が生ずる．実際の電子レンジではターンテーブルを回転したり，フラットテーブルの下に設置された照射口を回転して，電界強度不均一の影響を緩和している．

(2) 食品（容器）の形状や大きさによってマイクロ波の集中が異なる [2].

食品容器が直方体形状の場合は角の部分にホットスポットが生じ，円筒形容器の場合は中心部が加熱されるなど，形状によって加熱の様子が変わる．さらに，同じ円筒形でも大きさによって，中心が加熱されるときと周辺部が加熱されるときがある．食品メーカーでは，新しい加工食品を開発する都度，均一に加熱されるように，形状や大きさを試行錯誤的に決めているのが現状である．

(3) 誘電物性が食品によって変わり，温度によっても変化する [3,4].

マイクロ波の加熱性を決めているのが誘電物性（誘電率，誘電損率）であり，この誘電物性が食品によって異なるために，加熱性にも違いが生じる．この誘電

（受付 2010 年 2 月 19 日，受理 2010 年 2 月 26 日）

〒108-8477 東京都港区港南4-5-7

† Fax: 03-5463-0622, E-mail: sakai@kaiyodai.ac.jp

物性に重要な役割を果たしているのが，食品中の水分である．とくに，水が凍結している場合と融解している場合で誘電物性が大きく異なるため，マイクロ波解凍では大きな問題を生じる．

本稿では，食品の誘電物性に着目し，マイクロ波加熱における水の役割とその加熱原理および温度分布形成について説明する．食品にマイクロ波を照射すると，減衰しながら浸透する．減衰したマイクロ波は熱エネルギーに変換されるが，そのときの発熱量は誘電物性に依存し，食品内部での発熱分布が決まる．さらに食品内部では熱伝導も生じるため，内部発熱を含む熱伝導方程式を解くことにより，加熱むら（温度分布）の予測が可能となる．

2. 誘電加熱の原理

水分を含む食品を電極にはさんで，直流電圧を印可すると，食品自体に電流が流れ食品の電気抵抗によって発熱する．このときの発熱量 Q [W] は，ジュールの法則およびオームの法則により次式で表される．

$$Q = I^2 R = \frac{E^2}{R} = \sigma \frac{S}{d} E^2 \qquad (1)$$

ここで，I [A] は電流，E [V] は印可電圧，R [Ω] は食品の抵抗，σ [S/m] は電気伝導度，S [m^2] は電極面積，d [m] は電極間距離である．したがって，食品の発熱量は電気伝導度に比例し，水以外の食品の単独成分の電気伝導度は小さいので，ジュール加熱においては水の存在が重要となる．また，電気伝導度は食塩を代表とした電解質の濃度によって大きく変化するため，塩分濃度も重要な因子である．

この電気抵抗を利用した加熱法はジュール加熱あるいは通電加熱とよばれ，食品の内部から加熱できるため，伝導伝熱を利用した従来の加熱法に比べて均一にかつ短時間で加熱できるという特徴をもつ．

実際の食品の加熱においては，直流電源を用いると電極の腐食などの問題が生じるため，多くの場合交流電源が使われる．食品が純粋な抵抗体と仮定できる場合，その発熱量は直流と同様に電気伝導度に比例する．

一方，直流電圧を印可したときに電流を流さないで電気分極を生ずる物質を誘電体といい，食品は誘電体としての性質ももつ．食品の多くは水を含んでおり，水分子は Fig. 1 に示すように，酸素原子と水素原子が非対称で結合している．酸素原子側はマイナスに水素原子側はプラスに帯電しているため，1つの分子としては双極子となっている．電圧が印加されない状態で，それぞれランダムの方向を向いていた食品中の水分子（双極子）は，Fig. 2 のように電極に電圧が印加されると，すべての水分子が一定方向に整列する．しかし，交流電源を用いると電圧は周期的にその極性が変わるので，電圧極性が反転するのに伴って，水分子の向きも反転する．その際，水分子の摩擦などによって電場の変化に対して電気分極が遅れをもつため，誘電体損が生じ電力が消費され発熱する．この誘電体損を利用した加熱が誘電加熱である．誘電体損による発熱量 Q_c は次式で表される [5]．

$$Q_c = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon' \tan\delta \frac{S}{d} V^2 = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon'' \frac{S}{d} V^2 \qquad (2)$$

ここで，f は周波数，ε_0 は真空中の誘電率，ε' は誘電率，ε'' は誘電損率，$\tan\delta$ は誘電正接である．なお，ε' は正確には比誘電率（誘電体の誘電率と真空の誘電率の比）であるが，多くの場合比誘電率を単に誘電率とよんでいるので，ここでも誘電率と記す．(2) 式からわかるとおり，誘電体損による発熱量は周波数と誘電損率に依存する．ジュール加熱で用いられる交流の周波数は低く，その周波数帯における誘電損率も小さいことから，ジュール加熱では多くの場合，誘電体損を考える必要はない．

より周波数の高い交流電界を用いる高周波加熱や電磁波を用いるマイクロ波加熱も誘電加熱の一種であり，加熱原理は同じである．周波数 1～100 MHz 程度の高周波を利用した加熱を高周波加熱と称し，周波数 300

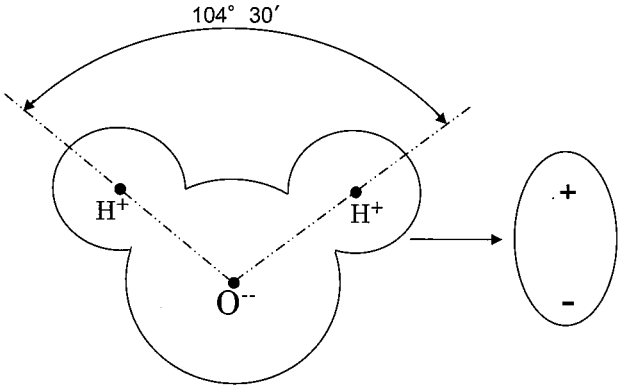

Fig. 1 Water molecule.

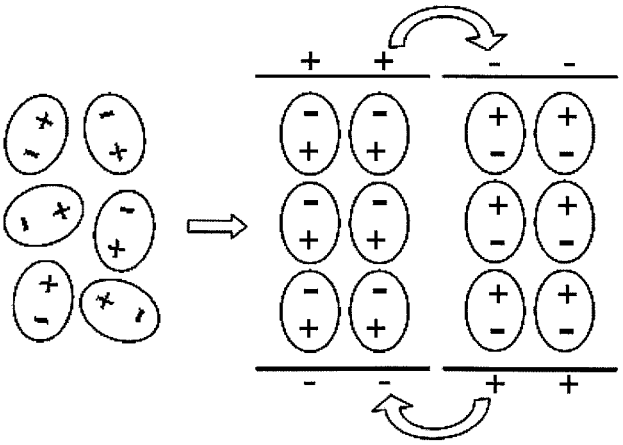

Fig. 2 Rotation of water molecule.

Table 1 ISM Band.

Frequency
13.56 MHz±6.78 kHz
27.12 MHz±162.72 kHz
40.68 MHz±20.34 kHz
2450 MHz±50 MHz
5800 MHz±75 MHz
24125 MHz±125 MHz

MHz～300 GHzのマイクロ波を利用する場合をマイクロ波加熱とよんでいる．以上の周波数は放送や通信に使われており，漏れ電磁界により受信妨害を与える可能性があるため，工業・科学・医療用に周波数が割り当てられている．Table 1に日本で割り当てられているISM (Industrial, Scientific and Medical Use) 周波数 [5] を示す．日本では割り当てられていないが，915 MHzなども南北アメリカなどでISM周波数として使用されている．

ジュール加熱と高周波加熱においては，電極を用いて電界が作られるが，マイクロ波加熱においては，マグネトロンで発生したマイクロ波が導波管を通って加熱庫に照射され，庫内で反射を繰り返しながら食品に照射される．食品に照射されたマイクロ波は一部反射し，一部入射する．入射したマイクロ波によって，電極で挟んだ時と同じように水分子は回転し，食品は発熱する．このときの発熱量は食品の誘電物性に依存する．しかし，マイクロ波自体は熱エネルギーに変換され，減衰するため，発熱量は単純に(2)式では表わされない．

3. 食品の誘電物性と加熱特性

3.1 誘電物性測定装置

誘電率の測定法としては，摂動法 [6]，プローブ測定法などがあるが，ここでは研究室で使用しているプローブ測定法を用いた測定装置 [7] について説明する．誘電率測定装置 (Hewlett Packard (現 Agilent Technologies) 製，HP85070B) の概略図をFig. 3に示す．このシステムは高温用プローブ，ネットワークアナライザ，コンピュータシステムから構成されている．測定できる周波数範囲はネットワークアナライザの性能によって決まり，使用している装置は200 MHz～13.5 GHzのものである．また，図のように恒温槽内で測定すると，マイナス温度から100℃以上まで測定可能である．

プローブ測定法は，摂動法に比べて測定精度は低いが，プローブを半固体や液体などに押し当てるか浸すことにより測定するため，測定は非常に簡便である．しかし，固体の場合はプローブと密着させる必要があり，装置の測定要求条件として，プローブを接触させたときに試料表面は100マイクロインチ (2.45×10^{-6} m)

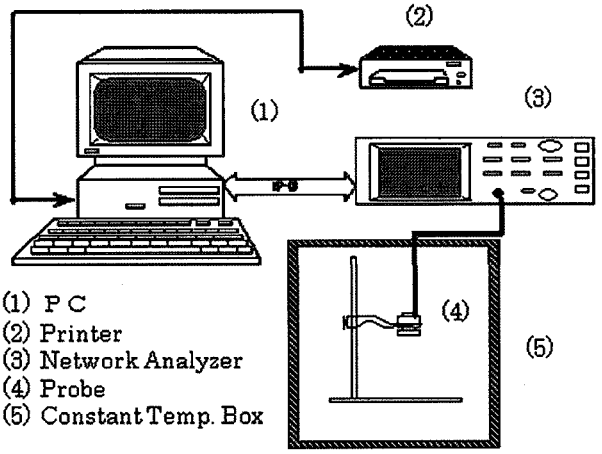

Fig. 3 Measurement system for dielectric properties.

よりも平坦である必要がある．水分を多く含む固体食品の測定において，測定温度が凍結温度よりも高い場合は，試料表面とプローブを密着できるので精度良く測定できる．しかし，試料が凍結状態の場合は，試料作成時に上記平坦度を満足させることは困難である．その解決策の1つとして，凍結した試料のプローブが当たる部分に表面がなめらかな金属を押し当て，試料の表面だけを融解し，その後速やかにプローブを密着して再凍結させることにより，凍結食品もプローブ法により測定が可能になる [7]．

3.2 物質の誘電特性

マイクロ波が物質に照射されたときの発熱性は，前述したように誘電物性 (誘電率ε'，誘電損率ε'') に依存する．誘電体に交流電圧を印可すると，分極するのに時間の遅れがあるため，真空中で印可したときの電流に比べて位相の遅れが生ずる．この遅れが発熱(損失)の原因となることは前述したとおりである．この位相の遅れを表すために，誘電率は次式のように複素数で表わされる [8]．

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon'' \tag{3}$$

$$\tan\delta = \varepsilon''/\varepsilon' \tag{4}$$

ここで，ε^*は複素誘電率である．δは誘電体損失角とよばれ，位相の遅れを表す．また，$\tan\delta$は誘電正接とよばれ，損失の割合を表し，誘電物性の1つとして使われる．

周波数2,450 MHzにおける水と氷の誘電物性および種々の物質の誘電物性 [9] をTable 2に示す．表に示した物質は主に容器に使われる素材である．水の誘電損率はこれらの物質の値と比べて大きいことがわかる．このことは，多くの食品では含水率が高いので，誘電損率が高く，誘電損率の低い容器に比べて選択的に加熱されることを意味し，熱伝導を利用した加熱法よりも効率が良いといえる．一方，氷の誘電損率は水の誘

Table 2 Dielectric properties of several materials (2,450MHz)

Material	Dielectric constant [ε']	Dielectric power factor $\tan\delta$	Loss factor $\varepsilon'\tan\delta$	Penetration Depth d [cm]
Air	1.0	0	0	—
Water (5℃)	80.2	0.275	22.0	0.80
Ice (-12℃)	3.2	0.0009	0.00028	12500
Glass	6.5	0.009～0.01	0.06	82.8
Wood (soft)	5.0	0.065	0.32	13.6
Wood (hard)	3.0	0.03	0.09	37.5
Phenolic resin	4.5～6.0	0.04～0.08	0.2～0.5	20.7～9.56
Urea resin	6.0～7.7	0.03	0.16～0.23	29.8～23.5
Vinyl chloride	3.0～5.0	0.025～0.05	0.08～0.25	42.2～17.4
Cellulose acetate	3.0～6.0	0.001～0.07	0.03～0.42	112～11.4
Rubber	2.3～2.6	0.0115	0.027～0.03	109～105
Soft rubber	2.9	0.006～0.04	0.017～0.12	195～27.7
Nylon	3.0～4.0	0.04～0.07	0.12～0.28	28.1～13.9
Polyethylene	2.3	0.0005	0.0012	2460
Polystyrol	2.6～3.0	0.0002～0.0004	0.0005～0.0012	6290～2810
Ebonite	2.0～3.5	0.0025～0.02	0.005～0.09	551～40.5
Teflon	2.1	0.0015	0.0032	883
Pottery	6.4	0.028	0.18	27.4
Porcelain	6.25	0.00055	0.0034	1430
Paper	2.7	0.056	0.15	21.4
Pyrex	4.0	0.0012	0.0048	812
Polypropylene	2.0	0.0002	0.0004	6890

電損率に比べて極めて小さく，電子レンジで純粋な氷を加熱しても全く融解しないことを示す．誘電体損は，水分子の回転により水分子同士が摩擦することによって起こると説明したが，氷の場合は水分子が結晶となっているため，回転が起こらず，誘電体損も起こらない．水と氷のエネルギー吸収性の大きな違いが，マイクロ波解凍において大きな問題となるランナウェイ現象の原因となっている．

マイクロ波が物質に照射されると一部は反射し，一部は浸透する．マイクロ波が空気から誘電体に垂直に照射されるときの反射率γは，次式で表される．

$$\gamma=\frac{P_r}{P_i}=\left(\frac{\sqrt{\varepsilon'}-1}{\sqrt{\varepsilon'}+1}\right)^2 \tag{5}$$

ここで，P_iは誘電体に照射されるマイクロ波のエネルギー強度，P_rは反射エネルギー強度である．水（$\varepsilon'=80$）へ照射されるときの反射率は0.64となり，反射されるマイクロ波は大きい．一方，容器の誘電率を$\varepsilon'_2=2.5$とすると，反射率は0.05となり，誘電率の小さい物質ほど入射するエネルギーは大きくなる．

一方，入射したマイクロ波は減衰しながら浸透する．平面にマイクロ波が入射するときの食品内部におけるエネルギー強度P [W·m^{-2}] は，ランバートの法則から次式で与えられる．

$$P=P_0\exp\left(-\frac{x}{d}\right) \tag{6}$$

ここで，xは食品表面からの距離，P_0は表面エネルギー強度で，電界強度とは次式の関係がある．

$$P_0=\frac{1}{2}c\varepsilon_0E^2 \tag{7}$$

ここで，cは光の速度，ε_0は真空の誘電率である．また，dは浸透深さ（エネルギー強度が1/eになる深さ）で，次式で与えられる [10]．

$$d=\frac{\lambda_0}{2\pi}\left[\frac{1}{2\varepsilon'\left(\sqrt{1+(\tan\delta)^2}-1\right)}\right]^{\frac{1}{2}} \tag{8}$$

ここで，λ_0はマイクロ波の波長である．

(7)式からわかるとおり，エネルギー強度は電界強度の2乗に比例するため，電解強度よりも2倍速く減衰する．電界強度の浸透深さは次式で与えられる．

$$d_E=\frac{\lambda_0}{2\pi}\left[\frac{2}{\varepsilon'\left(\sqrt{1+(\tan\delta)^2}-1\right)}\right]^{\frac{1}{2}} \tag{9}$$

したがって，エネルギー強度の浸透深さdと電界強度の浸透深さd_Eには，（$d_E=2\times d$）の関係にある．論文によっては電界強度の浸透深さを使用している場合があるので，注意を要する．また，マイクロ波の浸透性を表すのに電力半減深度Dも良く使われるが，浸透深さdとの間には次の関係にある．

$$D=\left(-\ln\frac{1}{2}\right)\times d=0.693\times d \tag{10}$$

Table 2に示した物質について，(8)式から計算した浸透深さもTable 2に合わせて示す．水の値が0.8 cmであるのに対して氷の値は12 mとなっており，氷はマイクロ波をほとんど吸収せずに透過させることを意味する．また，容器の素材となる物質の浸透深さも水の

値と比べて大きく，水を含む食品が選択的に加熱されることが浸透深さの値からも確認できる．

3.3 誘電物性の水分・塩分依存性

食品の誘電物性の基本となる水の誘電物性について以下に記す．ここでは，加熱時に対流が起こらない固体食品を想定しているため，1%の寒天ゲルについて記すが，99%が水であり，水の誘電物性とほとんど同じである [11]．寒天1%ゲルにNaClを添加したときの誘電率と誘電損率の測定結果をFig. 4に示す．なお，マイクロ波加熱を想定しているため，測定周波数は2,450 MHzであり，以降の周波数も全て2,450 MHzである．Fig. 4からNaClの濃度が高くなることにより，誘電率はわずかに減少するものの，ほとんど変化しないことがわかる．一方，誘電損率は著しく増大している．これは電解質が入っている場合，温度の上昇とともに電荷移動による誘電損率が増大するためである．Fig. 4の測定結果を用いて(8)式から計算した浸透深さをFig. 5に示す．NaClが添加されていない場合，温度の上昇とともに浸透深さが大きくなるが，NaClを添加することにより温度が上昇しても浸透深さは大きくならない．すなわち，NaClの添加は表面加熱性を大きくすることがわかる．同様に，寒天1%ゲルに蔗糖を添加したときの誘電率と誘電損率の測定結果をFig. 6に示す．蔗糖を添加した場合は，NaClを添加したときとは逆に誘電率が大きく変化していることがわかる．これは，蔗糖が電解質ではないので誘電損率を大きく変化させないが，大量に添加しているため，水分含量が下がり誘電率が下がったと考えられる．

以上の結果から，ショ糖を添加することにより主に誘電率が，NaClを添加することにより主に誘電損率が変化することがわかった．ショ糖およびNaClを同時に添加することにより幅広く誘電物性を変えることができる．Fig. 7に1%寒天ゲルにショ糖およびNaClを同時に添加したときの誘電率と誘電損率の関係を示す．ここでは例として40℃における測定結果を示した．図中のパラメータはショ糖濃度で，NaCl濃度が高くなると矢印の方向に誘電損率は増大する．図からわかるとおり幅広く誘電物性を変化させることができ，ショ糖濃度およびNaCl濃度を調整することにより，任意の誘電物性をもつ食品を模擬することが可能になる [11]．

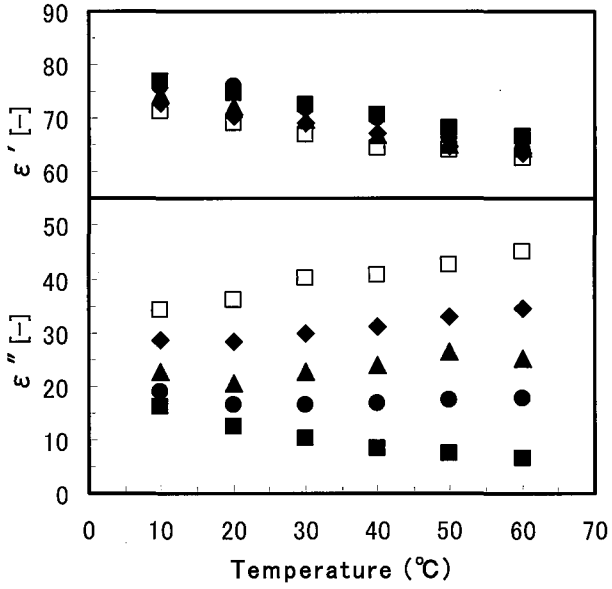

Fig. 4 The dielectric properties of 1% agar gel containing NaCl.
(NaCl concentration ■:0%, ●:0.5%, ▲:1%, ◆:1.5%, □:2%)

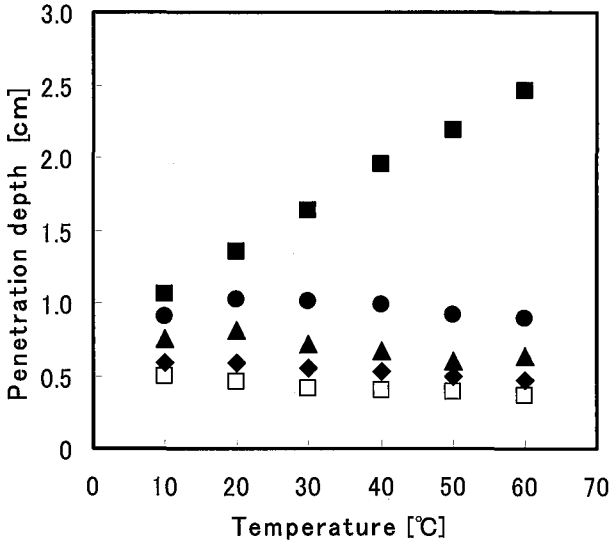

Fig. 5 Penetration depth of 1% agar gel containing NaCl.
(NaCl concentration ■:0%, ●:0.5%, ▲:1%, ◆:1.5%, □:2%)

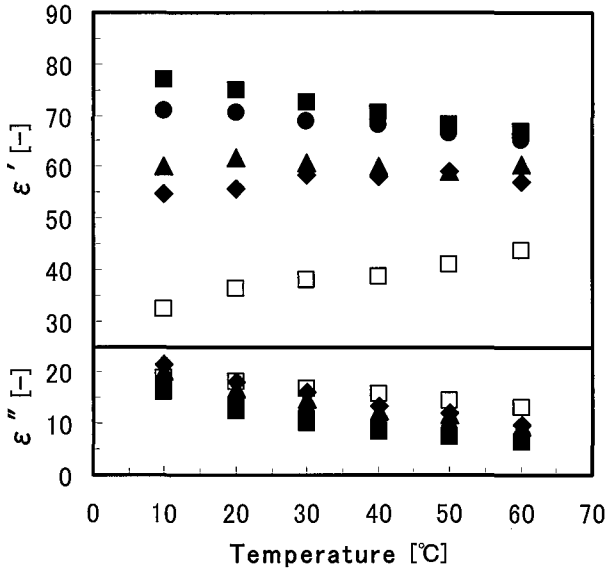

Fig. 6 The dielectric properties of 1% agar gel containing sucrose.
(sucrose concentration ■:0%, ●:10%, ▲:20%, ◆:30%, □:40%)

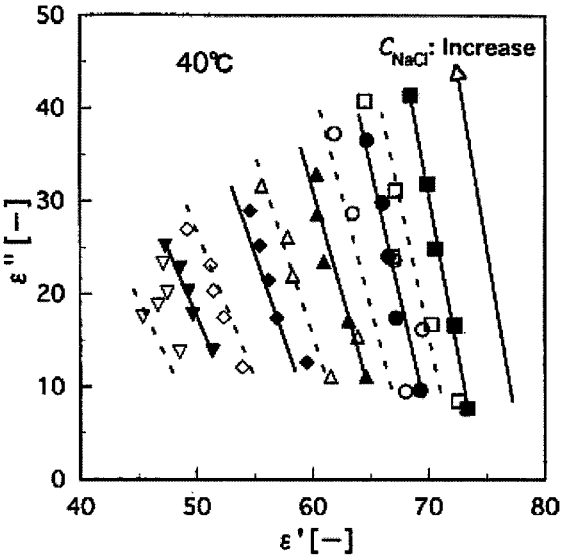

Fig. 7 The relationship of dielectric constant and loss factor (sucrose concentration in aqueous solution, (■) 0%, (●) 10%, (▲) 20%, (◆) 30%, (▼)40%, sucrose concentration in agar 1% gel, (□) 0%, (○) 10%, (△) 20%, (◇) 30%, (▽) 40%).

3.4 誘電物性と食品内温度分布

平面にマイクロ波が照射されたときの食品内部におけるエネルギー強度 P[W・m^{-2}] は，(6)式で与えられる．このとき，マイクロ波は減衰し熱エネルギーに変換される．このときの発熱量 q[W・m^{-3}] は次式で与えられる．

$$q=-\frac{dP}{dx}=P_0\frac{1}{d}\exp\left(-\frac{x}{d}\right) \tag{11}$$

円筒形容器の側面のように曲面がある場合は，界面でマイクロ波が屈折するためエネルギーの集中が起こる．そのときの入射角度は境界にある2種類の物質の誘電率および照射角度によって決まる．Fig. 8のように，物質1（誘電率 ε'_1）から物質2（誘電率 ε'_2）へマイクロ波が角度 θ_1 で照射するとき，物質2への入射角度 θ_2 は次式で表される．

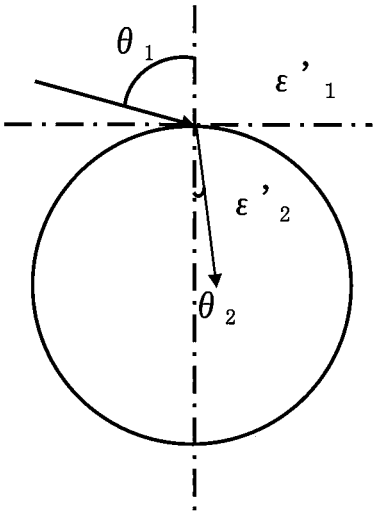

Fig. 8 Refraction of microwave at the interface.

$$\sin\theta_2=\frac{\sqrt{\varepsilon'_1}}{\sqrt{\varepsilon'_2}}\sin\theta_1 \tag{12}$$

曲面に空気中から照射される場合，水の誘電率として ε'_2=80 とすると，その最大入射角度 θ_2 は 6.4° 以内の非常に小さい範囲にある．そのため，多くは入射したマイクロ波は円心に向かって直進すると仮定される場合が多い．マイクロ波が垂直に入射する場合の，食品内部のエネルギー強度および発熱量は次式で表される．

$$P=P_0\left(\frac{R}{r}\right)\exp\left(-\frac{R-r}{d}\right) \tag{13}$$

$$q=\frac{dP}{dr}=P_0\frac{1}{d}\left(\frac{R}{r}\right)\exp\left(-\frac{R-r}{d}\right) \tag{14}$$

ここで，R は円筒形容器の半径，r は中心からの距離である．上式においては食品の中心（r=0）で，P と q は無限大となってしまうので注意を要する．このモデルではマイクロ波は全て中心に向かうが，実際には中心部を透過するため無限大とはならない．正確に計算するためには，試料表面での照射角度および屈折そして中心部での透過を考慮する必要がある [2].

(11) 式および (14) 式は食品内部での発熱分布を与えるが，食品内部では発熱と同時に熱伝導も起こるため，温度分布を求めるためには熱伝導方程式を解く必要がある．内部発熱を含む熱伝導方程式は平板および円筒の場合について以下のように表される．

（平板）
$$\rho C_p\frac{\partial T}{\partial t}=k\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+q \tag{15}$$

（円筒）
$$\rho C_p\frac{\partial T}{\partial t}=k\left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r}\right)+q \tag{16}$$

ここで，T は温度，ρ は密度，C_p は比熱，k は熱伝導度である．

円筒形試料側面からマイクロ波が入射される場合について，計算値と実測値の比較を行った例 [12] を以下に示す．1%寒天ゲルと1%寒天ゲルに1% NaCl を添加したものを，それぞれアクリル製の扁平円筒形容器（高さ 10 mm，半径 20〜47 mm）に封入して試料としている．また，マイクロ波は試料の側面のみから入射するように，容器の上下面蓋にアルミテープが貼ってある．これらの試料をマイクロ波加熱庫内のターンテーブル中央に置いて，ターンテーブルを回転しながら加熱した．加熱時間 120 秒における温度分布の計算結果と実測値の比較を Fig. 9（1%寒天ゲル），Fig. 10（1%寒天ゲル＋1% NaCl）に示す．Fig. 5 に示したように，1% NaCl を含むことにより，浸透深さは小さくなる．そのため，これらの試料を単独に加熱すると，NaCl を 1% 添加した場合は，試料の周辺部のみが加熱されるが，浸透深さの大きい寒天だけであると中心部も加熱され

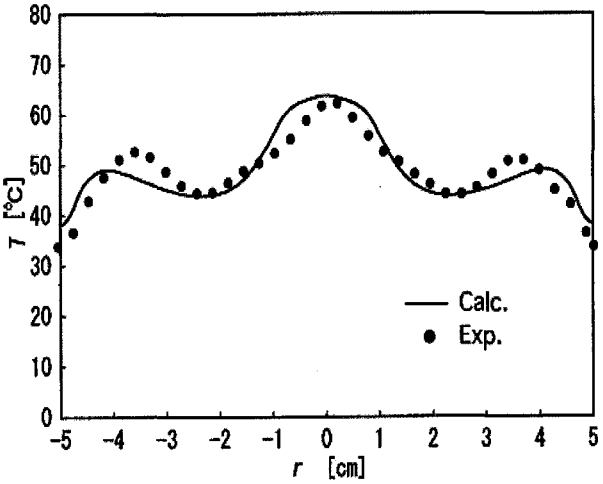

Fig. 9 Comparison of measured temperature distribution and calculated one in radial direction (agar 1%, 120s).

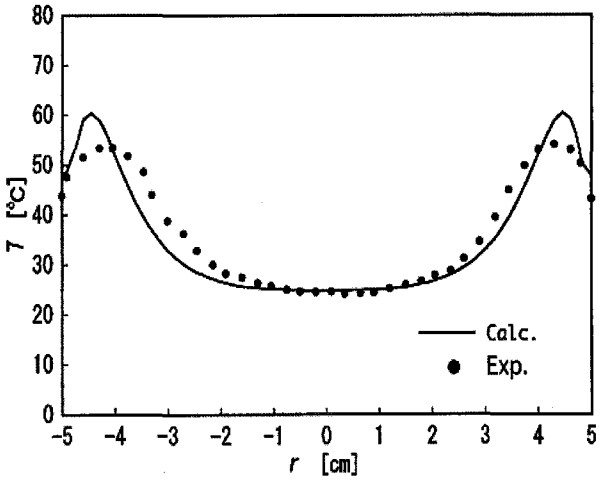

Fig. 10 Comparison of measured temperature distribution and calculated one in radial direction (agar 1% + NaCl 1%, 120s).

る．

円筒形の食品であっても，食品が誘電物性の異なる食材から構成され，発熱分布の軸対称性が崩れる場合，基礎式は2次元平面の熱伝導方程式となる．

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) + q \qquad (17)$$

円筒形容器を考えると，発熱量 q は（14）式で表されるが，浸透深さ d は各物質の誘電物性から与えられることになる．

誘電物性が不均一な例として，Fig. 11 に示すような配置で，誘電物性が異なる2種類のゲルを容器に充填した場合を考える．色の濃い部分が1%寒天ゲルで，色の薄い部分が（1%寒天＋1% NaCl）ゲルである．Fig. 12 に，120 秒加熱したときの温度分布計算結果を示す．1% NaCl を含む領域で被加熱性が大きくなるため，その領域の温度が高くなり，不均一な加熱温度分布を引き起こすことがわかる．また，1% NaCl を含む領域でエネルギー吸収性が増すため，その領域の内部が逆に

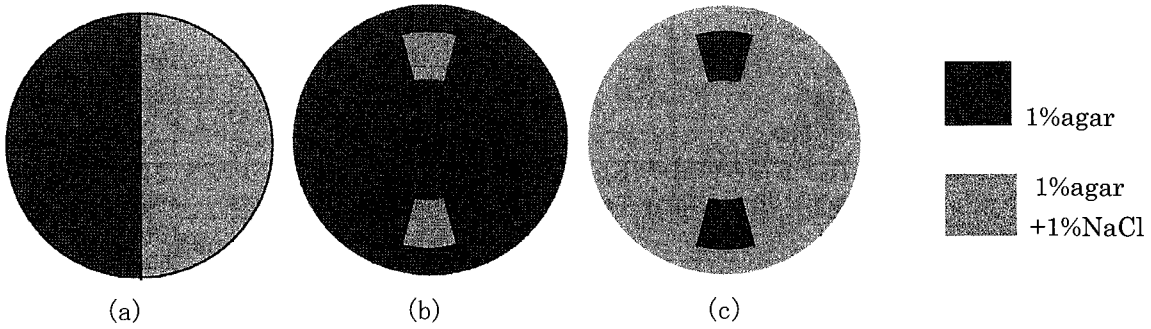

Fig. 11 The ingredient configuration within the sample.

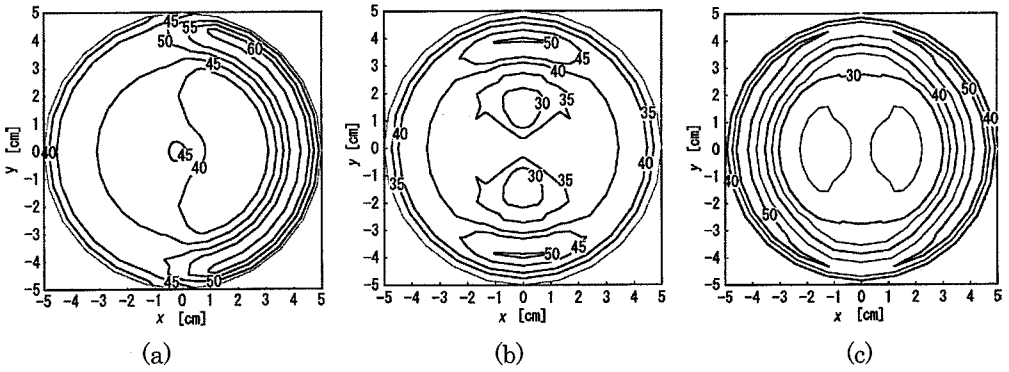

Fig. 12 Calculated temperature distribution.

温度が低くなっている．なお，計算と同じ条件下で実験を行ったが，温度分布は計算結果と良好に一致していることを確認している．

3.5 解凍にともなう物性の変化と食品内温度分布

マイクロ波解凍時の温度分布を予測するには，前述したように熱伝導方程式を解くことになるが，凍結点近傍での物性変化と融解潜熱を考慮する必要がある．熱伝導の問題に潜熱を組み込むための解凍（凍結）モデルとしては種々のものが提案されている．その中で，見かけ比熱モデル [13,14] は潜熱を見かけ上の比熱の変化と考えるもので，凍結層と融解層の移動境界面を考えないため取り扱いが簡単となる．熱移動の基礎式としては熱伝導方程式がそのまま使えることになる．

見かけ比熱 C_{app} ，熱伝導率 k， 密度 ρ などの物性値は融解前後に大きな変化が見られる．例えば，氷の熱伝導率は水の熱伝導率の 4 倍である．これらの物性値に対して，実測値に基づく推算式が種々提案されているが，ここでは Hayakawa ら [15] の推算式を例として以下に示す．

凍結点以上の温度域（$T \geq T_{sh}$）

$$k=k_l,\ \rho=\rho_l,\ C_{app}=C_{pl} \tag{18}$$

凍結点以下の温度域（$T<T_{sh}$）

$$k=k_e+S_k(T_{sh}-T)+(k_l-k_e)\frac{(T_{sw}-T_{sh})}{(T_{sw}-T)} \tag{19}$$

$$\rho=\rho_e+S_d(T_{sh}-T)+(\rho_l-\rho_e)\frac{(T_{sw}-T_{sh})}{(T_{sw}-T)} \tag{20}$$

$$C_{app}=C_e+\frac{D}{(T_{sw}-T)^n} \tag{21}$$

ここで，T_{sw}：水の凍結点 [K]，T_{sh}：食品の凍結点 [K]，k_e, ρ_e, C_e, S_k, S_d, D, n：実験的定数，添字 l：解凍状態における値である．

(19)～(21) 式中の実験的定数は実測値に一致するように決められる定数で，代表的な食品の値を Table 3[10] に示す．魚肉の値（水分 n_w=0.75）を用いて物性値の温度変化の様子を計算した結果を Fig. 13, Fig. 14 に示す．凍結点近傍における見かけ比熱は，水の比熱に比べて極めて大きく，10 倍以上になっていることがわかる．

融解にともなって，食品の誘電物性も大きく変化する．凍結領域も含めて温度を変えて測定した各種食品の誘電率，誘電損率を Fig. 15, Fig. 16 に示す．また，浸透深さを Fig. 17 に示す．水分を多く含む食品（マグロ赤身，牛肉，ニンジン）では，食品の種類に限らず，誘電物性の値に大きな差がないことがわかる．しかし，水分の少ないチーズやマグロとろのように水分が少なくなると，融解状態での誘電率は下がる．全ての食品について凍結温度範囲で誘電率と誘電損率の値は小さく，融解するのにしたがい急激にその値は大きくなる．これは凍結状態では食品内の水分子間の束縛力が大きく，自由に回転できないので誘電体損が減少するためである．

この凍結状態と融解状態で誘電特性が大きく異なることは凍結食品の解凍時に問題となる．凍結した食品を解凍するとき，一部が一旦融解するとその場所の誘電損率が大きくなり，より発熱するようになる．そのため，中心部はまだ凍っているのに融解したところは煮えてしまうといった温度の暴走が起こり，これをランナウェイ現象とよんでいる．

Table 3-1 Empirical constants in Eq.(19)

	n_w [-]	T_{sh} [℃]	kl [W/m℃]	k_r [kJ/kg]	S_k [W/m℃]
Beef(1)	0.75	−0.99	0.477	1.403	0.00765
Beef(2)	0.74	−0.99	0.477	1.078	0.00623
Fish meat	0.82	−0.8	0.523	1.302	0.01206
	0.75	−1	0.523	1.078	0.01518
Asparagus	0.93	−0.7	0.53	1.299	0.01671
straw berry	0.89	−0.9	0.54	1.95	0.0146
carrot	0.88	−1.1	0.5	1.284	0.02214
cherry	0.87	−1.4	0.53	1.718	0.01939
green peas	0.76	−1.8	0.47	1.983	0.01172
plum	0.76	−2.3	0.51	2.316	0.00147

Table 3-2 Empirical constants in Eq.(20)

	n_w [-]	T_{sh} [℃]	ρ_l [kg/m^3]	X_r [kg/m^3]	S_d [kg/m^3℃]
Beef	0.7	−1.01	1070	1012	0.0056
	0.63	−1.76	1075	1019	0.2027
	0.57	−2.96	1080	1025	0.3322
	0.45	−4.09	1090	1057	1104
Fish meat	0.82	−0.8	1060	985	0.2036
	0.75	−1	1070	1008	−0.0426
	0.66	−1.95	1075	1016	0.2
	0.57	−2.96	1080	1030	0.2437
Fruit juice	0.96	−0.39	830	817	0.1348
Vegetable juice	0.87	−1.38	943	943	0.1079
	0.75	−3.19	1100	1030	−0.1079
	0.61	−6.98	1227	1145	0.2248

Table 3-3 Empirical constants in Eq.(21)

	n_w [-]	T_{sh} [℃]	C_l [kJ/kg℃]	D [kJK^{n-1}/kg]	C_e [kJ/kg℃]	n [-]
Beef	0.74	−0.99	3.49	215.7	1.873	1.968
	0.7	−1.01	3.39	169.3	1.542	1.717
	0.63	−1.76	3.24	311	1.735	1.981
	0.57	−2.02	3.09	161.3	0.982	1.497
	0.45	−4.09	2.93	165.1	0.568	1.416
Fish meat	0.82	−0.8	3.83	206.1	1.873	1.999
	0.75	−1	3.65	173.9	1.179	1.628
	0.66	−1.95	3.42	349	1.622	1.934
	0.57	−2.96	3.25	413.4	1.563	1.933
Fruit/ vegetables (Including juice)	0.96	−0.39	4.05	128.7	1.53	1.928
	0.87	−1.38	3.9	356.1	1.735	1.896
	0.75	−3.19	3.61	489.5	1.944	1.75
	0.61	−6.98	3.23	690.5	1.371	1.675

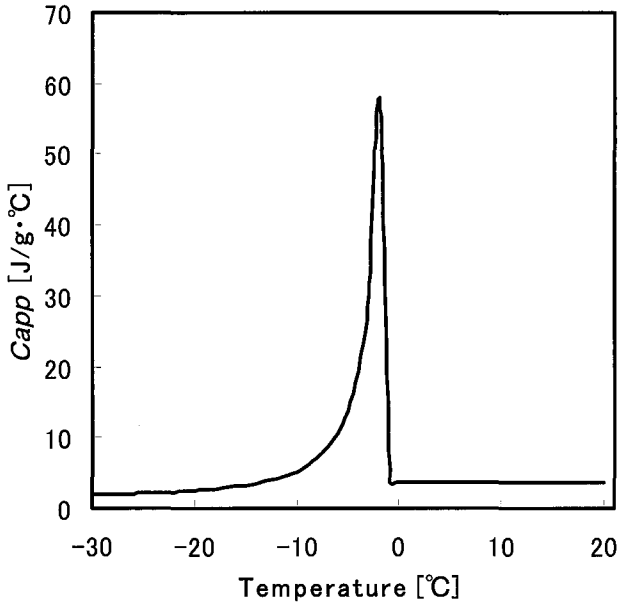

Fig. 13 Apparent specific heat calculated by Eq.(21).

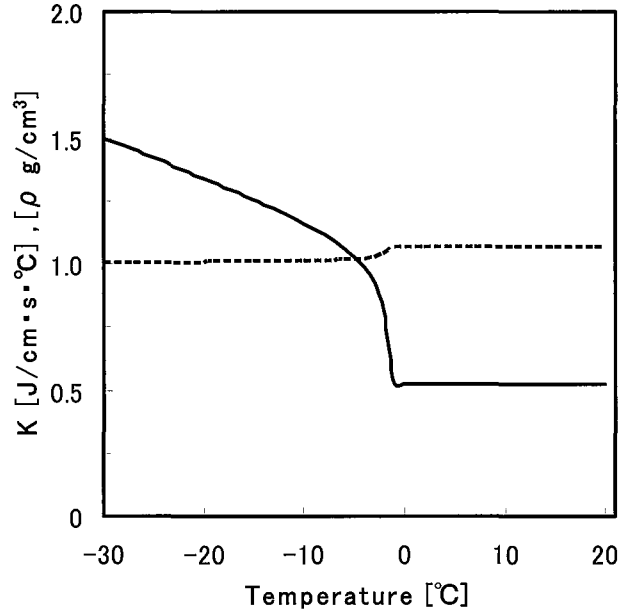

Fig. 14 Thermal conductivity and density calculated by Eqs.(19) and (20). (—)thermal conductivity, (- -)density

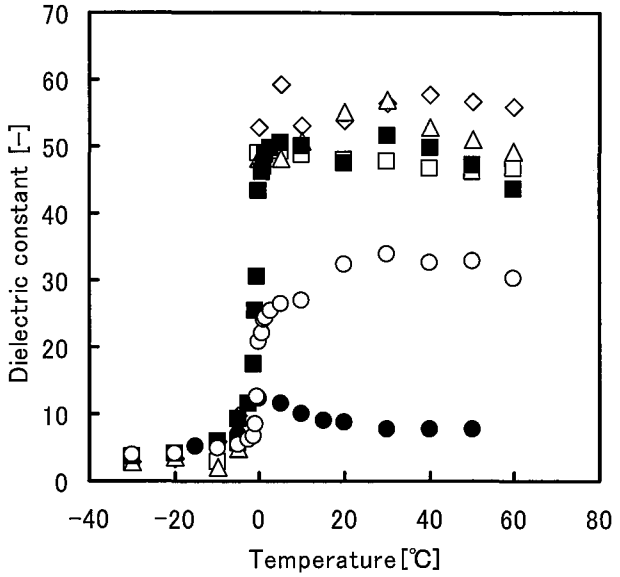

Fig. 15 Dielectric constant of foods.
(□) potato, (◇) carrot, (△) beef, (●) cheese, (■) lean meat tuna, (○) fatty meat tuna

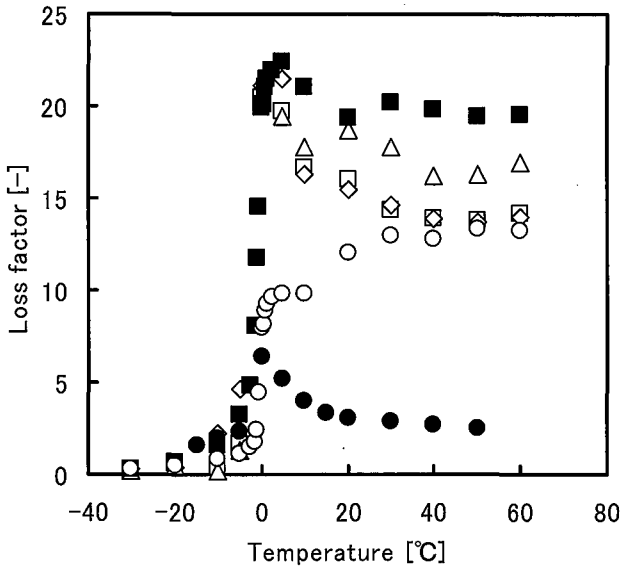

Fig. 16 Loss factor of foods. (□) potato, (◇) carrot, (△) beef, (●) cheese, (■) lean meat tuna, (○) fatty meat tuna

マイクロ波は電磁波の一種であり，食品内部を伝搬するとき波動現象として干渉・共振などが起こる．食品の浸透深さに対して食品が十分大きい場合はこの干渉の影響は無視できるが，食品が凍結している場合には浸透深さが大きいので，干渉の影響が無視できなくなることが考えられる．この干渉の影響はランバートの法則では表すことができない．その場合は電磁波の基礎方程式であるマクスウェルの方程式を解く必要がある．食品の厚さが十分大きい場合は，ランバートの法則とマクスウェルの方程式から求めた発熱量は一致し，その限界は次式 [16] で表わされる．

$$L_{crit}=2.7d_e-0.08 \quad (\mathrm{cm}) \tag{22}$$

ここで，d_e は電界強度の浸透深さで，エネルギー浸透深さの 2 倍（$d_e=2d$）である．

マクスウェルの方程式の詳細については省略するが，マクスウェルの方程式を基に，入射マイクロ波を平面波（x–y plane）としたときの，z 方向に浸透する一次元波動方程式は次式で表される [16,17].

$$\frac{d^2E_z}{d_z^2}+k_z^2E_z=0 \tag{23}$$

ここで，kz は伝播定数で，次式で表わされる．

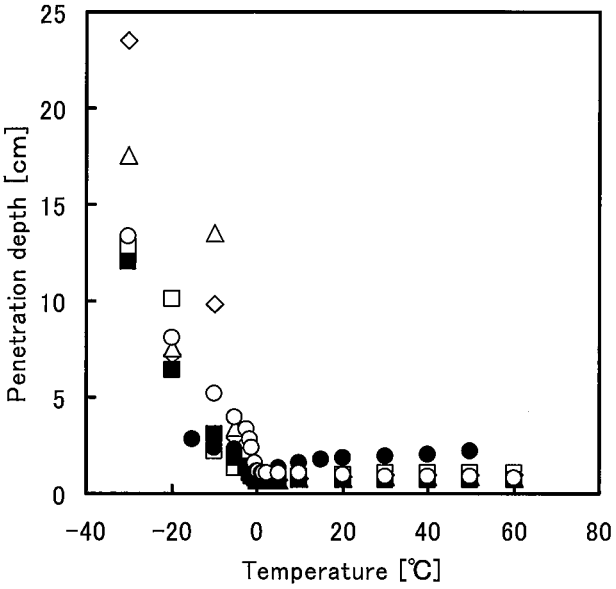

Fig. 17 Penetration depth of foods. (□) potato, (◇) carrot, (△) beef, (●) cheese, (■) lean meat tuna, (○) fatty meat tuna.

$$k_z^2=\omega^2\mu_0\varepsilon_0(\varepsilon'-i\varepsilon'') \tag{24}$$
$$k_z=\alpha+i\beta$$
$$\alpha=\frac{2\pi f}{c}\sqrt{\frac{\varepsilon'\left(\sqrt{1+\tan^2\delta}+1\right)}{2}},$$
$$\beta=\frac{2\pi f}{c}\sqrt{\frac{\varepsilon'\left(\sqrt{1+\tan^2\delta}-1\right)}{2}}$$
$$\tan\delta=\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}$$

ここで，ω $(=2\pi f)$ は角周波数，μ_0 は真空の透磁率である．

マイクロ波の食品内伝播中のエネルギー損失 q^{M} は次式で与えられる．

$$q^{\mathrm{M}}(z)=2\pi f\varepsilon_0\varepsilon''|E(z)|^2 \tag{25}$$

以上の式から求まる発熱量（エネルギー損失）を熱伝導方程式に代入することにより食品内部の温度分布が計算できる．

凍結マグロのマイクロ波解凍を想定して，マックスウェルの方程式とランバートの法則から発熱量を求めた結果 [18] を Fig. 18, Fig. 19 に示す．計算では厚さ 2 cm（Fig. 18）および 8 cm（Fig. 19）の凍結まぐろの 1 面からマイクロ波を照射したときを想定している．また，熱物性値は Fig. 13, Fig. 14 に示した魚肉の値を，誘電物性値は Fig. 15, Fig. 16 に示したマグロ赤身の値を使用している．点線がランバートの法則，実線がマクスウェルの方程式から求めた発熱量である．解凍前（30, 60 秒）においてはマクスウェルの方程式から求めた発熱量は全域で振動し，解凍層が生成されると解凍層でエネルギーが吸収され，解凍層で大きく振動していることがわかる．これは，Fig. 17 に示したように，凍結状態では 1～10 cm の浸透深さがあり，波動の影響が無視できないためである．また，全般的に両者の発熱量は一致していない．図には示していないが，試料の厚さを 16 cm, 32 cm と厚くしていくと，両者の発熱量は一致するようになり，32 cm の場合はほとんど一

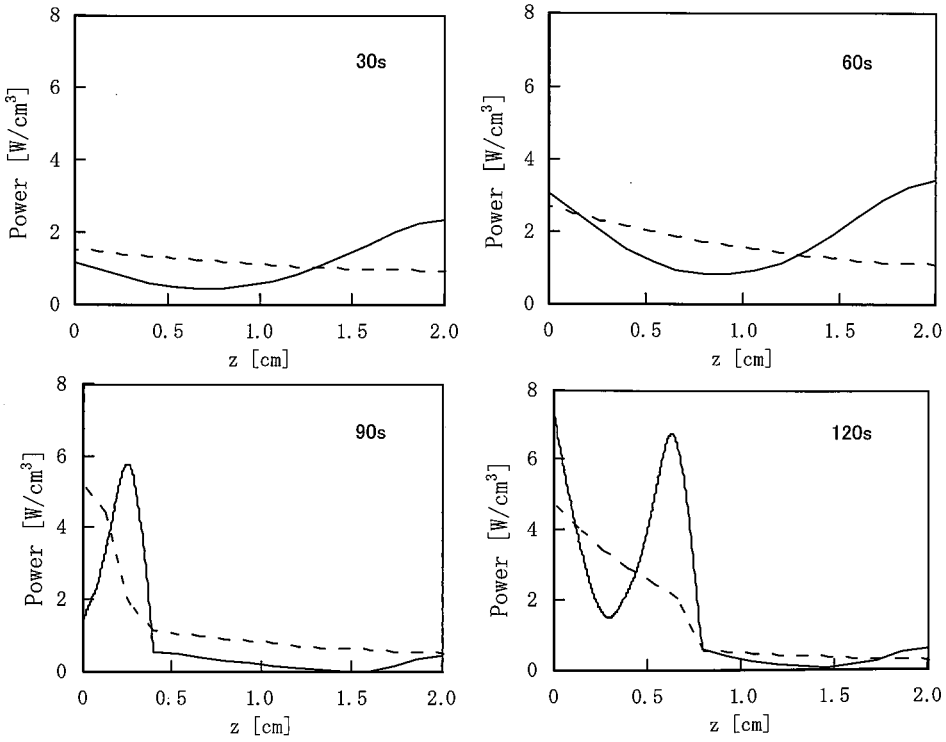

Fig. 18 Microwave power distribution of 2.0 cm thick sample. Solid lines: Maxwell's equations. Dotted lines: Lambert's law.

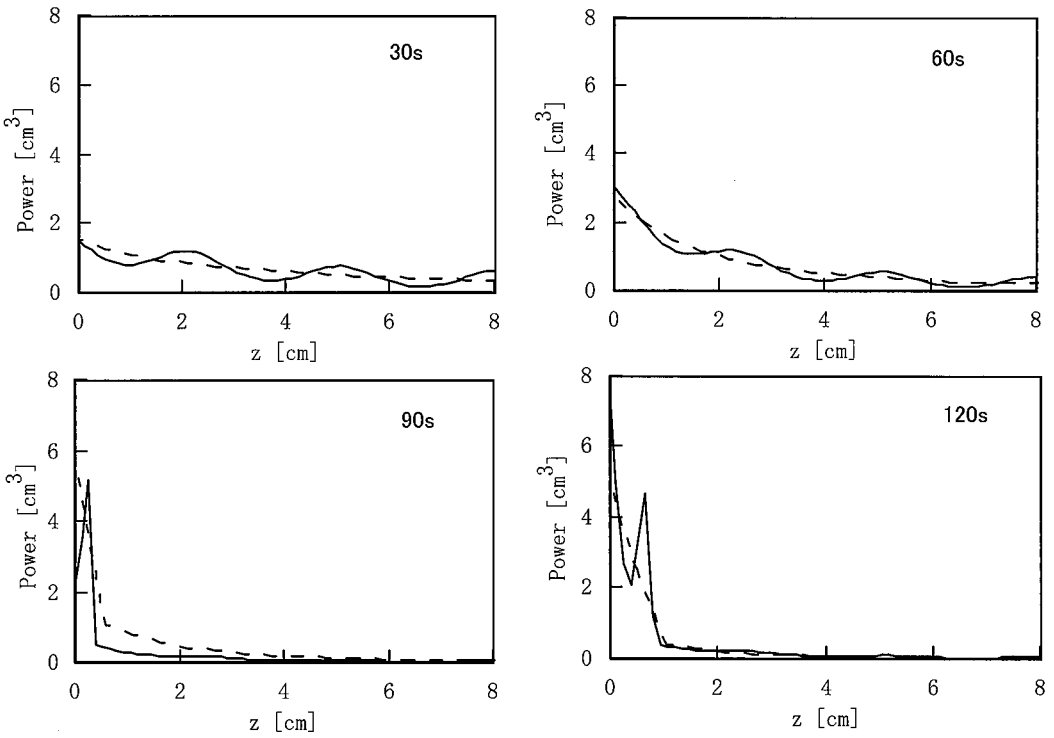

Fig. 19 Microwave power distribution of 8.0 cm thick sample. Solid lines: Maxwell's equations. Dotted lines: Lambert's law.

致する [18].

Fig. 20, Fig. 21 に厚さ 2 cm および 8 cm について，温度分布の計算結果を示す．発熱量分布はランバートの法則とマクスウェルの方程式とで大きく異なるにもかかわらず，温度分布はほとんど変わらないことがわかる．マクスウェルの方程式による発熱量は融解した層で大きく振動するが，融解層が進行するのにしたがい，エネルギーの強い領域が移動していくために発熱量としては平均的なランバートの法則による発熱量と一致するためである．また，同図に実測値を合わせて示したが両者にほぼ一致していることがわかる．以上の結果から，マイクロ波による食品解凍の温度分布解析にはランバートの法則が使えるといえる．

4. 終 わ り に

食品のマイクロ波加熱においては水が大きな役割を果たし，その被加熱性を決めているのは誘電物性であ

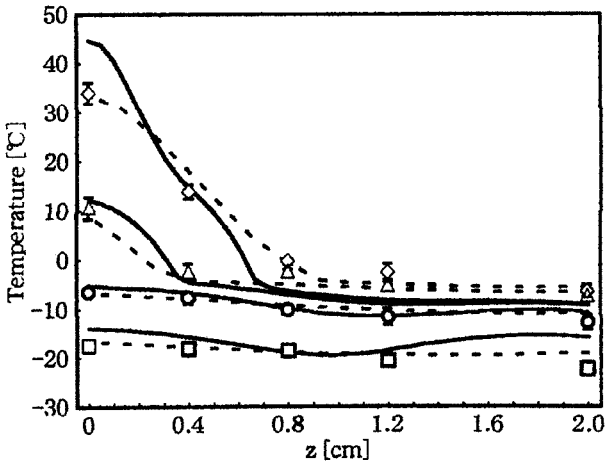

Fig. 20 Comparison of measured (lots) and calculated temperature distributions (solid and dotted lines) of the 2.0 cm thick tuna sample.
Solid lines: Maxwell's equations. Dotted lines: Lambert's law. The heating time□:30s, ○:60s, △:90s, ◇:120s.

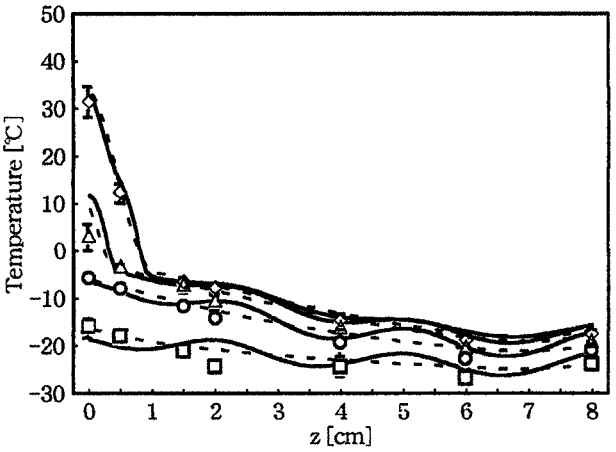

Fig. 21 Comparison of measured (lots) and calculated temperature distributions (solid and dotted lines) of the 8.0 cm thick tuna sample. Solid lines: Maxwell's equations. Dotted lines: Lambert's law. The heating time□:30s, ○:60s, △:90s, ◇:120s.

ることを説明した．とくに，マイクロ波解凍のときに水と氷の誘電物性が大きく違うためにランナウェイ現象が起こるが，物性的に必然的に起こる問題で避けて通れない．実際にはマイクロ波を断続照射することにより，できるだけ均一に加熱できるように工夫しているものの，誘電物性を正確に把握できれば，より短時間に高品質な解凍が期待できる．また，ここでは電界強度分布の影響について説明しなかったが，電界強度分布に基づく加熱むらも大きな問題である．最近は電界強度分布あるいは発熱分布を求めるための電磁界解析ソフトも市販されている．誘電物性と合わせて，このようなソフトを使うことにより，より正確な予測が可能となると考える．

引 用 文 献

1) N. Sakai, Y. Cheng, H. Shimoda; Effect of Incident Power Intensity on Temperature Distribution in Microwave Heated Food, J. Chem. Eng. Japan. **36**, 1432-1438 (2003).
2) Y. Cheng, N. Sakai, T. Hanzawa ; Heat Transfer Analysis of Flat Cylindrical Food Model Heated by Microwave (in Japanese), Nippon Shokuhin Kagaku Kogaku Kaishi, **43**, 1183-1189 (1996).
3) Y. Cheng, N. Sakai, T. Hanzawa; Effects of Dielectric Properties on Temperature Distributions in Food Model During Microwave Heating, Food Sci. and Technol., International, Tokyo, **3**, 324-328 (1997).
4) W. Mao, M. Watanabe, N. Sakai; Dielectric Properties of Frozen Surimi at 915 MHz and 2450 MHz, Food Sci. Technol. Res., **9**(4), 361-363 (2003).
5) H. Ohmori; Electromagnetic Wave and Food (in Japanese), Kohrin, 1993, pp.20-30.
6) C. H. Tong, R. R. Lentz; Dielectric Properties of Bentonaite Paste as a Function of Temperature, J. Food Proces. Preserv., **17**, 139-145 (1993).
7) C. M. Liu, N. Sakai; Dielectric Properties of Tuna at 2450 MHz and 915 MHz as a Function of Temperature (in Japanese), Nippon Shokuhin Kagaku Kogaku Kaishi, **46**, 652-656 (1999).
8) The Institute of Electrical Engineers of Japan, Dielectric Substance Phenomena (in Japanese), Ohmu Sha, 1990, p.89.
9) A. Higo; Handbook for Food and Container in Microwave Oven (in Japanese), Kadoya, S., Science Forum, 1988, p.112.
10) C. Shibata; Handbook for Microwave Heating Technology (in Japanese), Koshijima, T., NTS, 1994, p.8.
11) N. Sakai, W. Mao, Y. Koshima, M. Watanabe; A Method for Developing Model Food System in Microwave Heating Studies, J. Food Eng., **66**, 525-531 (2004).
12) N. Sakai, C. Wang, S. Toba, M. Watanabe; An Analysis of Temperature Distributions in Microwave Heating of Foods with Non-Uniform Dielectric Properties, J. Chem. Eng. Japan, **37**(7), 858-862 (2004).
13) N. Sakai, N. Morita, P. Qiu, T. Hanzawa; Two Dimensional Heat Transfer Analysis of the Thawing Process of Tuna by Far-Infrared Radiation (in Japanese), Nippon Shokuhin Kagaku Kogaku Kaishi, **42**, 524-530 (1995).
14) C. M. Liu, N. Sakai, T. Hanzawa; Thee Dimensional Analysis of Heat Transfer during Food Thawing by Far-Infrared Radiation, Food Sci. Technol. Res., **5**(3), 294-299 (1999).
15) J. Succar, K. I. Hayakawa: Empirical Formulae for Predicting Thermal Physical Properties of Food at Freezing or Defrosting Temperature, Lebensum. –Wiss. U. Technol.. **16**, 326 (1983).
16) K. G. Ayapa and *et al.*; Microwave heating: An evaluation of power formulations, Chem. Eng. Sci., **46**, 1005 (1991).
17) P. Jolly, I. Turner; Non-linear Field Solution of One-dimensional Microwave Heating, J. Microwave Power and Electromagnetic Energy, **25**, 3-15 (1990).
18) C. M. Liu, Q. Z. Wang, N. Sakai; Power and temperature distribution during microwave heating thawing, simulated by using Maxwell's equations and Lambert's law, International J. of Food Sci. Technol., **40**, 9-21 (2005).

要 旨

電子レンジを始めとしてマイクロ波加熱は，速く簡単に加熱・調理できることから，食品産業で良く利用されている．しかし，加熱速度が大きい半面，加熱むらも大きいなど問題も残っている．マイクロ波を照射したとき，被加熱物の加熱性を決めるのは誘電物性であることから，食品の誘電物性を知ることは重要である．本稿では，まずマイクロ波加熱の原理とマイクロ波加熱における水の役割について説明した．次に，水分濃度および塩分濃度の誘電物性に及ぼす影響について説明した．水分が減少することにより誘電率が減少し，塩分濃度が増えることにより誘電損率が増大する．最後に解凍にともなう物性変化について説明した．氷が融解するとき熱物性が変化するのと同時に誘電物性が大きく変化するため，ランナウェイ現象の原因となる．