

マイクロ波解析技術の開発

Development of Microwave Analysis Technology

牧 田 実*
Minoru Makita

要 旨

差分法に基づいた有限差分時間領域法 (FDTD : Finite Difference Time-Domain) によるマイクロ波の解析技術の概要と, 電子レンジへの応用として, 食品の吸収電力分布解析による均一加熱性能の評価, ドア隙間への通過電力の解析によるドアシール構造評価, 導波管給電における入射波と反射波を分離し反射係数算出による負荷整合評価について述べる。

This article describes our approaches for designing microwave ovens. Firstly, an outline of the Finite Difference Time-Domain method is introduced. Secondly, its applications for microwave ovens are described. Those applications are as follows.

(1) Heating evenness evaluation by analyzing the distribution of the absorbed power into food.

(2) Door seal structural design by analyzing the leakage power through the door gap.

(3) Impedance matching to the load by analyzing the reflection coefficient of the incident wave into the waveguide.

These evaluations reveal this analysis to be a powerful tool for designing microwave ovens.

まえがき

周波数 2.45GHz のマイクロ波による加熱原理を応用した電子レンジは既に家庭の必需品となっている。熱伝導を利用した加熱調理器と異なり, 食品の内部まで浸透し内外から一斉に発熱する一方, マイクロ波の偏りによる加熱むらが発生するなど利点と欠点がある。マイクロ波の挙動に起因するこれらの特性は, 電子レンジの加熱特徴として長年に渡り研究され改善されてきた。商品設計において, 均一加熱, 加熱効率の改善は主要な課題であるが, 従来はこれらの性能評価

は試作品での実動作によってのみ可能であった。経験に基づいた基本設計から始まり, 目標性能を達成するまで試作確認と設計変更の繰返しにより製品開発が遂行されていた。最近のコンピュータの進歩とともに, 電磁場の数値解析が発達してきており, 電子レンジの設計への応用が実用化してきている。電磁場の解析には時間領域または周波数領域で解析する手法に大別されるが, 当部門では, 時間領域である差分法に基づいた有限差分時間領域法 (FDTD 法) を用いて電子レンジの設計に応用している。試作前にコンピュータ上でシミュレーションを行うことにより, 試行回数を減らし製品開発期間の短縮が可能となった。

本稿では, FDTD 法とそれの電子レンジへの応用について概要を紹介する。

1. FDTD 法の概要

1.1 原理

等方的な媒質中では Maxwell の方程式は以下の通り表される。

$$\begin{aligned} \times E &= -\mu \frac{H}{t} \\ \times H &= E + \frac{E}{t} \end{aligned}$$

ここで,

E : 電界強度 (V/m), H : 磁界強度 (A/m),
: 誘電率 (F/m), μ : 透磁率 (H/m),
: 導電率 (S/m)

である。

有限差分時間領域法 (Finite-Difference Time-Domain) とは, 上記の Maxwell 方程式の直接解法として知られている。この手法は 1966 年 Yee によって初めて提唱されたもので, Yee の格子と呼ばれる特殊な格子を定義することにより時間と空間を直接差分化することを可能にしたものである¹⁾。任意の座標位置 (i,j,k), 時間ステップ n における関数 F に対する空間・時間の一次の中央差分は以下の通り表わされる。

* 電化システム事業本部 電化商品開発センター 第 2 開発部

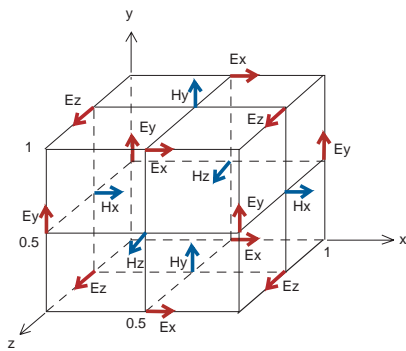


図1 Yeeの格子
Fig. 1 Yee's Lattice.

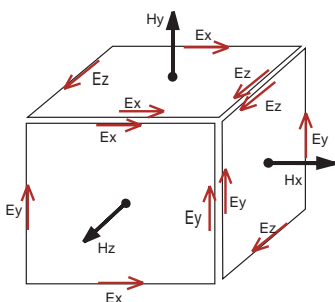


図2 電界&磁界のベクトル配置
Fig. 2 Position of electric and magnetic vector.

$$\frac{F^n(i, j, k)}{x} \equiv \frac{F^n(i + \frac{1}{2}, j, k) - F^n(i - \frac{1}{2}, j, k)}{x}$$

$$\frac{F^n(i, j, k)}{t} \equiv \frac{F^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) - F^{n-\frac{1}{2}}(i, j, k)}{t}$$

空間差分は y, z についても同様である。

Yeeの格子は図1のように、電界、磁界の1/2格子分だけずれた特殊な格子で、電界と磁界は互いに $t/2$ だけ離れて定義される。

図1の電界と磁界のベクトルの位置関係を分かりやすく表したのが、図2である。

例えば、磁界 H_x は1離散時間前のその位置における値と半離散時間前の周囲の電界 E_y, E_z から計算できる。即ち、

$$H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}) = H_x^{n-\frac{1}{2}}(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2})$$

$$+ \frac{t}{\mu} \left[\frac{E_y^n(i, j + \frac{1}{2}, k + 1) - E_y^n(i, j + \frac{1}{2}, k)}{z} + \frac{E_z^n(i, j, k + \frac{1}{2}) - E_z^n(i, j + 1, k + \frac{1}{2})}{y} \right]$$

となる。

具体的な差分式は専門書籍²⁾などに詳細に記されており、ここでは割愛するが、この電界と磁界の計算を交互に繰り返すことによって、電磁界の時間応答を求めることができる。

1・2 境界条件

各格子の電磁界を計算するに際して、対象とする空間内で計算を打ち切る必要があり、その境界条件を適切に設定しなければならない。境界条件としては、吸収境界、金属壁(PEC)、磁気壁(PMC)がある。電子レンジの加熱庫内での現象を解析する場合、金属壁で囲われたモデルとなるため、加熱庫の外の電磁界はゼロである。従って、開放領域の解析と異なり、一般的にいわれる吸収境界の誤差に伴う問題は発生しない。一方、ドアからの電波漏れを解析する場合は、自由空間への放射が含まれるので、放射領域の境界条件は吸収層を設定する必要がある。また、ドアなどを部分的にモデル化する場合はその境界を磁気壁(PMC)または電気壁(PEC)を設定することになる。どの境界条件を採用するかはモデルの対象性などの条件により適宜使い分ける。

1・3 収束条件

前述の計算を繰り返して電磁界を求めるが、最終的に解が収束しなければならない。

空間の増分値である x, y, z の格子寸法は計算精度を確保するため、波長に比べて十分小さい値でなければならない。金属や誘電体のモデルをどの程度正確に作成するかにもよるが、一般的には1/10波長以下にする。大まかな分布を知りたいのであれば1/4波長程度でも良い。

格子寸法の次に時間の増分値である t を決定する。但し、 t は次の条件を満たす必要がある。

$$t \leq \frac{1}{v \sqrt{\frac{1}{(x)^2} + \frac{1}{(y)^2} + \frac{1}{(z)^2}}}$$

v : 速度

t は上式を満足すればよく、あまり小さくしすぎると計算時間の増大になり好ましくない。

2. 電子レンジへの応用

電子レンジのマイクロ波に関わる基本性能としては、高周波出力と均一加熱性能がある。また安全面から、扉の隙間からの電波漏れを最小に抑える為、ドア

シール構造を最適化する必要がある。これらの性能をFDTD法を用いた解析にて評価することが出来る。

2・1 加熱むらの評価

コンピュータによるマイクロ波解析技術の最大の効用は、電界分布の可視化により被加熱物の加熱むら状態が把握できることにある。電界Eに存在する損失誘電体の単位体積あたりの吸収電力は

$$P_L = 2 \pi f \epsilon'' E^2$$

として表される。

ここで、 ϵ'' : 比誘電率の虚部, ϵ_0 : 真空の誘電率, f : 周波数 (Hz), E : 電界強度 (V/m) である。

マイクロ波加熱による食品の温度上昇はこの吸収電力に比例するものと考えられる。食品形状を格子寸法のセルにて分割およびモデル化し、各セルの吸収電力を計算することにより加熱分布が求められる。しかしFDTD法においては、**図1**に示されるように電界Ex, Ey, Ezは格子の辺に存在し、それぞれの位置は一致していない。そこで解析では各成分について格子の辺上に存在する4つの吸収電力を計算し、その平均を求め、その格子の中心での吸収電力の瞬時値とすることでより精度の高い結果が得られる。また、一般に食品は水分を多く含んでいることより、その誘電率も大きく、食品内の加熱分布を解析する際、その格子寸法に注意する必要がある。

周波数 2.45GHz における食品の誘電特性例を表1に示す。

誘電体内でのマイクロ波の波長 λ は 誘電体の比透磁率を 1 と考えると

$$\lambda = \lambda_0 / \sqrt{\epsilon_r}$$

となり、真空中の波長 λ_0 より小さくなる。

例えば、水 (25℃) を加熱する場合、内部の波長は約 1.4cm となり水負荷をモデル化する際、格子寸法はそれに比べ十分小さくしなければならない。

表1 食品の誘電特性

Table 1 Relative dielectric constant of food.

(ϵ' : 比誘電率の実部, ϵ'' : 比誘電率の虚部)

品名	ϵ'	ϵ''	tan
水 (25℃)	76.7	12.3	0.160
水 (85℃)	56.5	3.1	0.055
氷 (-12℃)	3.2	0.0029	0.001
牛乳 (20℃)	68.5	7.5	0.109
じゃがいも	61.5	19.5	0.317

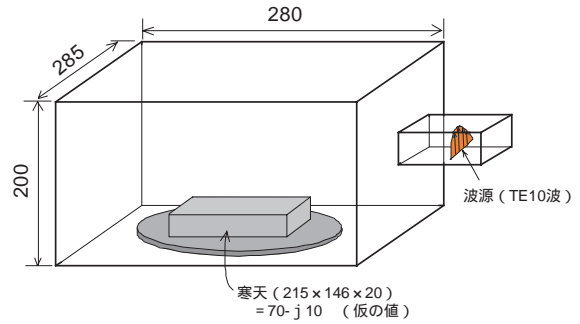


図3 解析モデル
Fig. 3 Analysis model.

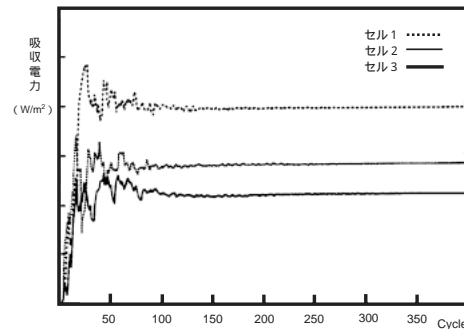


図4 収束性
Fig. 4 Convergence.

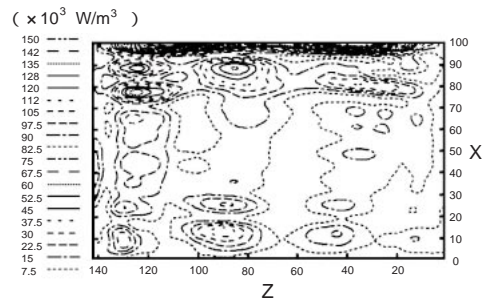


図5 加熱分布
Fig. 5 Heating power distribution.

次に、安定状態の解であるかを考慮する必要がある。**図3**に示される加熱庫内のガラステーブルに方形状の寒天を置き、導波管からマイクロ波を給電するモデルにおいて、加熱対象である寒天の任意の3点のセルにおける吸収電力の解析値の変化を**図4**に示す。約150~200サイクルで安定状態に到達しているのが分かる。安定状態になった時点での1周期分の吸収電力を計算し、加熱分布のデータとする。

以上の方法により求められた加熱分布の例を**図5**に示す。

FDTD法によるシミュレーションで得られた加熱分布と実際に加熱した表面温度分布とを比較した解析精

度の検証については文献3を参照されたい。実際の加熱と非常に近いデータが得られており、シミュレーションの有効性が確認されている。但し、実際の電子レンジでは均一加熱手段としてターンテーブルで食品を回転させるか、スタラーファンで電波を攪拌しているが、シミュレーションでは固定したモデル形状に対しての解析となる。シミュレーションで同様の解析を行うには、幾つかの回転角度毎にモデルを作成し、各々シミュレーションを実施し、各結果を合算しなければならない。食品形状にもよるが、回転モデルをどれだけ作成しシミュレーションするかは、作業量及び計算時間と必要なシミュレーション精度とを勘案して決めなければならない。

2.2 電波漏れ評価

電子レンジのドアと筐体間の隙間からの電波漏洩を抑える為、ドア周辺にはチョークシール方式が採用されている。チョークシール構造は、図6で示される様に、ドアとオープンとの隙間に併行してチョーク空洞を形成し、共振させることによりフィルター効果を出し、シールド特性をもたせる構造となっている。

実際のチョークは様々な構造が提案されており、その寸法設計には多くの実験による試行錯誤で最適化していた。これらの評価について、マイクロ波解析技術を応用することにより、少ない実験回数で最適な構造寸法にすることが可能となる。

解析方法としては、3次元のチョーク構造を導波管フィルターと見なし、ドアチョーク部分だけをモデル化し、入射電力P1を与え、ドアとオープン隙間を通過した電力P2を計算してエネルギー減衰量を評価する⁴⁾。

シールド効果SEは

$$SE = -10 \log (P_2 / P_1) \quad (\text{dB})$$

として求められる。

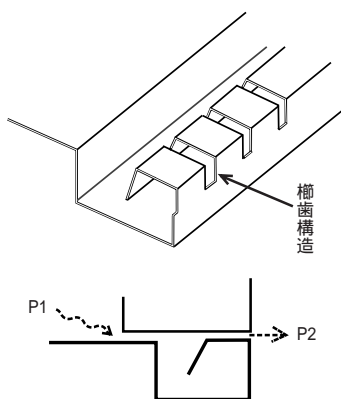


図6 チョーク構造
Fig. 6 Construction of choke.

チョーク性能を解析するには隙間を表現できる様にセル寸法を細かく設定する為、ドア全体をモデル化すると膨大なコンピュータリソースを消費する。従って、実際の解析においては部分的なモデルで行い、コンピュータメモリの削減及び計算時間の短縮を行う。

また、実際のチョーク溝に本体から進入する漏洩電波は非常に複雑であり、多くの高次モードを含んでいる。解析評価の精度を上げるには波源のモード設定に注意しなければならない。そこで、ドアと本体との隙間を設けない加熱庫全体の電磁波解析を行い、庫内のドア近傍の電磁界分布を求め保存しておき、別途ドアチョーク構造だけのモデルに対して、保存したデータを基に波源を生成し、シールド効果の評価をすることで、より精度の高い結果が得られる。

解析例として、ドアと電子レンジ本体の隙間を2mmとし、0.5mmの基本セルによる4セルで隙間をモデル化して解析したものを示す。安定状態に収束する時間はモデルの寸法が小さいので、5~10周期程度で収束しているのが分かる。

一般的なチョークを構造を用いた電波漏洩に関する解析に対してFDTD法が有効であることやチョーク構造の各種金属部分の寸法の変化に対して、シールド

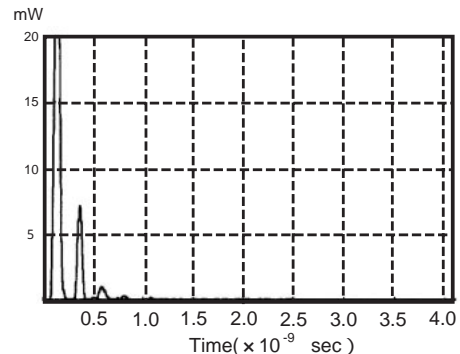


図7 漏洩電力
Fig. 7 Leakage power.

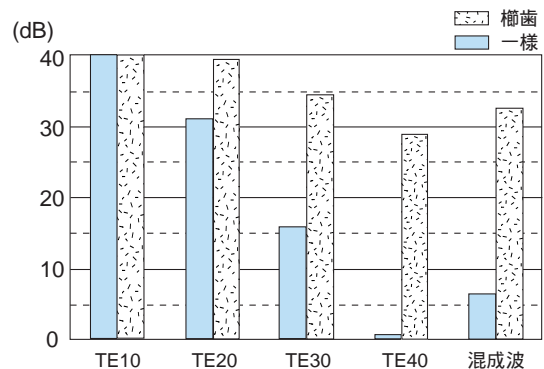


図8 入力モード対シールド効果
Fig. 8 Input mode vs shield effect.

効果を計算することにより、より効果的なヨーク構造を解析的に検討することが可能である。又、図8で示される様に種々の高次モードの漏洩波源に対するシールド効果を計算した結果、櫛歯状構造が高次モードに対するシールド効果をもたせるのに有効であることもこの解析手法により解明されている⁵⁾。

2・3 加熱効率の評価

電子レンジの設計要素として均一加熱や電磁波シールドの外で重要な要素は、加熱効率を高めることである。マグネトロンから放射されたマイクロ波が全てオープン庫内に放射され被加熱物である食品に効率良く吸収されるように、マグネトロンと負荷であるオープンとのインピーダンス整合を取る必要がある。静特性試験として実際にはネットワークアナライザを用いたインピーダンス測定で確認しているが、FDTD法によるシミュレーションにより同様の整合性を計算することができる⁶⁾。実際の測定ではマグネトロンの擬似アンテナプローブを使用して、マグネトロンから見た負荷インピーダンスを測定できるようになっている。しかしながら、シミュレーションにおいてはアンテナプローブを正確にモデル化することは困難であるので、導波管内に励振波源としてTE₁₀モードを設定し、当該導波管内を伝播する進行波と反射波を分離することにより、負荷との整合性を計算することができる。

TE₁₀モードの電界E_yと磁界H_xとの間には、

$$\frac{E_y}{z} = \mu \frac{H_x}{t}$$

なる関係がある。

そこでいま、電界E_yをz軸の方向に進む入射波E_y⁺と負方向に進む反射波E_y⁻に分離して、

$$E_y = E_y^+ + E_y^-$$

として表し、位相定数を $\beta = \frac{2\pi}{g}$ (g は導波管内の管内波長) とすると、

$$- \frac{\mu}{g} H_x = E_y^+ - E_y^-$$

ここで、 μ は透磁率である。従って、入射波と反射波は次式のように表現できる。

$$E_y^+ = \frac{\left(E_y - \frac{\mu}{g} H_x \right)}{2}$$

$$E_y^- = \frac{\left(E_y + \frac{\mu}{g} H_x \right)}{2}$$

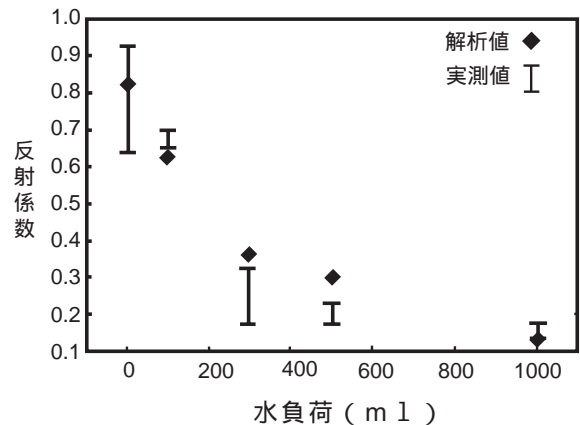


図9 負荷量 vs 反射係数

Fig. 9 Volume of load vs reflection coefficient.

そして、反射係数は E_y^- / E_y^+ をフーリエ変換し、その比をとることで求められる。

$$= F(E_-) / F(E_+)$$

ここでF()はフーリエ変換を表す。

FDTD法では電界Eと磁界Hには時間および位置のずれがある。伝搬方向で半セル分、時間的に半時間ステップ $t / 2$ 分だけずれることになる。

ずれを補正する為、例えば、時刻 $t = n \cdot \Delta t$ 、伝搬方向 (z 方向) の座標 $z = k \cdot \Delta z$ の電界を E_k^n と表すとする。 $z = k \cdot \Delta z$ の地点において、時刻 $t = (n+1/2) \cdot \Delta t$ の電界 $E_k^{n+1/2}$ は時刻 $n \cdot \Delta t$ と時刻 $(n+1) \cdot \Delta t$ における電界の平均値として近似できる。同様に、時刻 $t = (n+1/2) \cdot \Delta t$ において、半セル内側の位置 $k \cdot \Delta z$ と位置 $(k+1) \cdot \Delta z$ の電界の平均を位置 $(k+1/2) \cdot \Delta z$ の電界として近似できる。この様にして求めた電界 $E_{k+1/2}^{n+1/2}$ と、磁界 $H_{k+1/2}^{n+1/2}$ とを用いて反射係数を計算する。

オープン庫内中央にピーカに入れた水を置き、その量を変えたときのオープンインピーダンスの実測データとFDTD法での反射係数の計算結果を図9に示す。

実測値に幅があるのは、ターンテーブルの回転とともに負荷状態が変動していることによる。負荷量が小さくなるにつれて反射係数が増加し効率が低下する特性があるが、解析値も同様な結果が得られた。

むすび

以上、FDTD法によるマイクロ波解析技術の概要と電子レンジへの応用について述べた。電子レンジの基本性能である加熱むらや軽負荷での効率低下は年々改善されてきているが未だ完全ではない。より一層の性

能向上を実現していくにはコンピュータ解析技術の応用は不可欠と思われる。

今後の課題としては、非線形な誘電特性を考慮した熱解析との関係による加熱特性解析や、高誘電率の物質内部の電界分布を詳細に観測できるようにする為、局部的に格子寸法を微細化できる機能、及び機構CADデータとの関係による統合型CAE環境の構築などが考えられる。

謝辞

本解析技術を開発するにあたり、日頃よりご指導頂いております青山学院大学理工学部橋本教授および有効な資料を提供頂いた調理システム事業部の関係各位に深謝致します。

参考文献

- 1) K.S.Yee, "Numerical solution of initial boundary value problems Involving Maxwell's equations in isotropic media," IEEE Trans. 1966, AP-14, pp.302-307.
- 2) 橋本 阿部 ; "FDTD時間領域差分法入門" 森北出版(1995)
- 3) 橋本 毛塚 他 ; "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" 電子情報通信学会論文誌 ,Vol.J81-A No.2 , PP.1-3(1998.2)
- 4) 橋本 草間 他 ; "FDTD法を用いた電子レンジのドアシールに関する一検討" 信学技報 ,MW97-128 pp.7-12(1997-12)
- 5) 橋本 草間 他 ; "FDTD法による高次モード成分を考慮した電子レンジ用ドアシール解析" 電子情報通信学会論文誌 ,Vol.J82-B No.4,pp.667-673(1999-4)
- 6) 渡邊 橋本 牧田 ; "FDTD法を用いた電子レンジ内の負荷変化に対する反射係数解析" 信学技報 ,MW99-166,pp.79-84(1999)

(2002年1月22日受理)