

# キャビティ内のマイクロ波加熱における 加熱特性の高効率化と温度均一化手法の開発

赤堀 匡俊\*

Development of the control method for temperature uniformity and the optimization technique of heating characteristics using microwave heating in rectangular cavity

Masatoshi AKAHORI

## 1. はじめに

平成 24～26 年の 3 か年に渡り、科学研究費助成事業 基盤研究 (C) 課題番号 24560223 を受けた。以下にその概要を報告する。

## 2. 研究の目的

マイクロ波加熱では、加熱物体内での透過波と反射波の干渉が重要となり、両波の干渉による減衰および共振が生じるため、加熱特性は局所的に複雑に変化する。これらの干渉過程は加熱物体の誘電物性、構造、大きさ、設置位置に関係し、マイクロ波吸収による物体の加熱速度に大きな影響を与えると同時に、物体内の温度不均一の要因ともなる。また、マイクロ波加熱では、誘電物性の違いが重要な意味を持ち、例えば、永久双極子をもつ液相では気相や固相に比べて誘電損が100倍以上となり、これらが共存する系ではマイクロ波の吸収はほとんど液相で生じることとなる。

本研究では、多重反射を含むキャビティ内における TE モードおよびハイブリッドモードのマイクロ波による物体加熱の高効率化および最適化手法の開発を目的として、(1)被加熱物体内における電磁波干渉の制御、(2)被加熱物体の表面および内部構造による反射波の制御、(3)高加熱物体の熱拡散効果を利用した熱的制御に基づくマイクロ波加熱の高効率化とその最適化手法を提案するとともに、被加熱物体内部の温度均一化を目的とした制御とその最適化手法を提案することを目的としている。

## 3. 研究の方法

本研究では、キャビティ内の TE モードおよびハイブリッドモードのマイクロ波に対して、電磁場解析と熱解析を組み合わせた数値解析手法によりマイクロ波加熱の高効率化および最適化手法を検討する。

### 3.1 キャビティ内におけるマイクロ波加熱の数値シミュレーション

#### 3.1.1 電磁場解析

図 1 に解析モデルおよび境界条件を示す。TE<sub>10</sub>モードの矩形導波管に TE<sub>303</sub>モードの矩形空洞共振器 (キャビティ) を設置したモデルを考える。空気および被加熱物体を等方・非分散性物質と仮定すると、三次元のマクスウェル方程式は次式のように表される。

$$\epsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \sigma \mathbf{E} = \nabla \times \mathbf{H} \quad (1)$$

$$\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = -\nabla \times \mathbf{E} \quad (2)$$

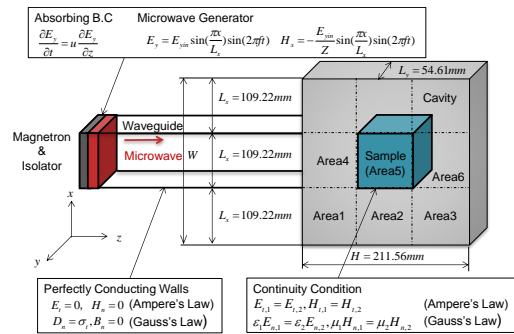


図 1 解析モデルおよび境界条件

ここで、 $\mathbf{E}[\text{V/m}]$ は電界ベクトル、 $\mathbf{H}[\text{A/m}]$ は磁界ベクトル、 $\epsilon[\text{F/m}]$ は誘電率、 $\mu[\text{H/m}]$ は透磁率、 $\sigma[\text{S/m}]$ は導電率、 $t[\text{s}]$ は時間を表す。

境界条件として、導波管およびキャビティの金属壁面は完全導体 (PEC) とする。異なる媒質間での境界条件は表面電荷、表面電流がないものとして、連続条件を与え、また、導波管の両端部において、マイクロ波を完全吸収させるため、G Mur の 1 次吸収境界条件を適用する。マイクロ波の照射は Total Field / Scattered Field の手法を導入し、TF/SF の境界で  $E_y$  および  $H_x$  の励振として与える。

#### 3.1.2 温度場解析

マイクロ波吸収による内部発熱を伴う熱移動解析には、三次元熱伝導方程式を用いた。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad (3)$$

ここで、 $\rho[\text{kg/m}^3]$ は試料の密度、 $c[\text{J/(kgK)}]$ は比熱、 $k[\text{W/(mK)}]$ は熱伝導率、 $T[\text{K}]$ は温度であり、 $Q[\text{W/m}^3]$ はマイクロ波の吸収による単位体積当たりの発熱量を表し、次式を用いて算出した。

$$Q = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon_r \tan \delta |\mathbf{E}|^2 \quad (4)$$

ここで、 $\epsilon_0[\text{F/m}]$ は真空の誘電率、 $\epsilon_r[-]$ は比誘電率、 $\tan \delta[-]$ は誘電損失係数を表す。境界条件として、試料の周囲境界は、短時間の加熱のため断熱条件とし、また、異なる媒質間における境界には連続条件を与えた。

#### 3.1.3 解析手法

マイクロ波による物体加熱の数値シミュレーションについては、マクスウェル方程式とマイクロ波吸収による内部発熱を伴う熱伝導方程式を連立して解析を行った。電磁場解析には三次元時間領域差分法 (FDTD 法) を適用し、温度場解析は有限体積法により離散化し、時間積分にはクランクニコルソン法を用いた。解析条件としては、マイクロ波の周波数を 2.45GHz、マイクロ波の出力は 30W～1500W とした。水層の誘電物性は温度依存性を考慮し、空気およびガラスの誘電物性は温度によらず一定とした。

\* 釧路高専機械工学科

### 3.2 加熱物体内における電磁波干渉および反射波抑制による加熱特性の高効率化

物体表面におけるマイクロ波の反射は物体の誘電物性に強く依存しており、液相のようなマイクロ波を吸収する高誘電損傷物体ほど表面での反射は大きくなる。したがって、物体表面における反射を低減させることができれば、マイクロ波加熱の効率は飛躍的に向上する。そこで本研究では、反射波の抑制に対して有効な内部構造を解明するため、被加熱物体の前面および内部に反射波制御用補助物体を設置し、物体表面における反射波の位相を制御する方法を検討する。具体的には、TE<sub>303</sub>モードのキャビティ内における反射制御用補助物体の付加による加熱特性の有効性を、補助物体の誘電物性および加熱物体と補助物体の配列構造（並列および直列）と関連づけて明らかにする。

### 3.3 電磁波干渉制御および熱拡散効果を利用した熱的制御による加熱物体の温度均一化

マイクロ波加熱では、加熱物体内において透過波と反射波の干渉によるマイクロ波の減衰および共振が生じるため、加熱特性は局所的に複雑に変化する。これらの干渉過程はマイクロ波吸収による物体の加熱速度に大きな影響を与えると同時に、物体内の温度不均一の要因ともなる。本研究では、加熱物体内の温度均一化に対して、(1)位相制御用補助物体および反射板の設置による電磁波モードおよび電磁場干渉を制御する手法、(2)加熱補助物体から加熱物体への熱伝導効果を利用した熱的制御法を検討する。具体的には、キャビティ内の電磁波モードと加熱物体の配置、サイズ、内部物体との関係を明らかにするとともに、物体内部の電磁波干渉を積極的に制御するため、位相制御補助物体および反射板の設置によるモード変化や電磁波干渉についても検討し、電磁波の干渉制御による温度均一化の有効性を明らかにする。さらには、加熱物体内の温度均一化を目指し、加熱補助物体の設置による熱拡散効果を利用した熱的制御による加熱特性の最適化および温度均一化を検討する。

### 3.4 誘電特性が急激に変化する相変化過程の最適化

マイクロ波による木材の乾燥過程を対象に、誘電物性が急激に変化する相変化過程の最適化を検討する。

マイクロ波加熱による乾燥では、乾燥速度の低下と乾燥域の温度上昇という通常乾燥の2つの克服課題に対し、マイクロ波加熱の有する選択加熱と内部加熱の特性を利用して、乾燥域の温度上昇を抑えた高い乾燥速度を維持することが可能となる。しかし、乾燥の進行にともなう層内の水分変化により誘電特性が変化するため、マイクロ波の透過波と反射波の干渉状態が複雑に変化し、両波が共振する状態でマイクロ波の吸収はピークとなる。このため、乾燥速度および物体内の温度分布は周期性を有することとなる。本研究では、相変化により誘電物性が急激に変化する場合の加熱特性の最適化を目的として、水分の乾燥により時間的に誘電物性が変化する乾燥過程に適用し、反射板の局所的な設置によるマイクロ波干渉制御の有効性を明らかにする。

## 4. 研究の成果

4.1 加熱物体内における電磁波干渉および反射波抑制による加熱特性の高効率化を理論的に検討し、以下

の成果を得た。

- (1) キャビティ内のマイクロ波加熱に対する三次元電磁場と熱の複合解析の取り扱いを確立するとともに、物体の誘電物性および設置位置とモード変化を解析的に明らかにした。
- (2) 物体前面および内部に補助物体を設置して透過波の位相を制御した場合の透過波と反射波の干渉実験を行い、共振現象に及ぼす誘電物性および補助物体の影響を示すと同時に、物体内の温度分布をマイクロ波出力と関連づけて実験的に明らかにした。
- (3) 補助物体を設置して透過波の位相を制御した場合の透過波と反射波の干渉状態、および、キャビティ内のマイクロ波加熱に及ぼす誘電物性、補助物体の厚さおよび設置位置と関連づけて解析的に明らかにした。

4.2 電磁波干渉制御および熱拡散効果を利用した熱的制御による加熱物体の温度均一化を理論的に検討した。以下に得られた成果を示す。

- (1) 位相制御補助物体および反射板を設置した場合の電磁波モードの変化や電磁波干渉状態を、誘電物性、補助物体の厚さおよび設置位置と関連づけて検討し、同一強度のマイクロ波に対する最大加熱量を理論的に明らかにした。また、電磁波の干渉制御による温度均一化手法を検討した。
- (2) 加熱補助として高加熱物体を付加した場合のマイクロ波加熱における熱伝導の効果を、補助物体の厚さおよび設置位置と関連づけて検討し、同一強度のマイクロ波に対する最大加熱量を理論的に明らかにした。また、加熱補助物体からの熱拡散を利用した温度均一化の手法を検討した。
- (3) 透過波と反射波の制御に加えて熱伝導効果を複合的に捉え、最大加熱量および温度均一化に対する補助物体の誘電物性、厚さおよび設置位置の影響を三次元 TE モードのもとで理論的に検討した。

4.3 誘電特性が急激に変化する相変化過程の最適化を検討し、以下の成果を得た。

- (1) 外部流を含む粒子層内の非等温気・液二相流れと電磁場・熱解析を組み合わせた乾燥モデルを提案し、マイクロ波加熱の特長である選択的加熱と内部加熱の効果により、乾燥域の温度上昇を抑えた乾燥過程を明らかにするとともに、乾燥の進行にともなう層内の水分分布の変化により誘電特性が急激に変化するため、マイクロ波の透過波と反射波の干渉状態が複雑に局所的に変化し、乾燥速度および物体内の温度分布が周期性を有することを明らかにした。

## 5. 成果の発表

- (1) 赤堀匡俊, 青木和夫, 釧路工業高等専門学校紀要, (2012), 145-150
- (2) 橋本裕貴, 赤堀匡俊, 日本機械学会北海道学生会 第 42 回学生員卒業研究発表講演会講演論文集, (2013), 275-276
- (3) 須田涼太, 赤堀匡俊, 日本機械学会北海道学生会 第 42 回学生員卒業研究発表講演会講演論文集, (2013), 277-278
- (4) 千田俊策, 青木和夫, 赤堀匡俊, 日本機械学会 北陸信越支部 第 50 期総会・講演会講演論文集, (2013), 389-390