

平成 27 年 6 月 18 日現在

機関番号：50103

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560223

研究課題名(和文)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

研究課題名(英文)Development of the control method for temperature uniformity and the optimization technique of heating characteristics using microwave heating in rectangular cavity

研究代表者

赤堀 匡俊(AKAHORI, MASATOSHI)

釧路工業高等専門学校・機械工学科・准教授

研究者番号：10303182

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：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)キャビティ内における電磁場解析と熱解析を組み合わせた数値シミュレーション法を開発した。(2)加熱物体内における電磁波干渉および反射波制御による加熱特性の高効率化法を明らかにした。(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法を明らかにした。(4)誘電特性が急激に変化する乾燥過程の最適化手法を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this project are the developments of high performance and optimization of a heated materials by microwave of TE and hybrid modes in a rectangular cavity. The obtained results are follows; (1) Numerical simulation method of the heated material by microwave in the rectangular cavity has been developed. (2) The high performance method of heating characteristics by the interference control of electromagnetic wave in a heated material and the reflected wave control on the surface of the material has been clarified. (3) The control method for temperature uniformity of a heated material by the interference control of the reflected and transmitted waves in the material, and the thermal control using the thermal diffusion effect of the high dielectric material has been clarified. (4) Optimization technique of the drying process that dielectric physical properties suddenly change has been developed.

研究分野：熱工学

キーワード：マイクロ波加熱 最適加熱 電磁場 電磁場干渉 共振 反射・透過 数値解析

1. 研究開始当初の背景

物体内で電磁波の透過・吸収・反射を生じるマイクロ波加熱は表面からの熱伝導を主体とする従来の加熱と大きく異なり、物体の内部加熱、急速加熱および選択的加熱などの特徴を有する。近年、マイクロ波加熱の利用は拡大しており、物質の乾燥、食品の解凍、セラミックスの焼成・接合をはじめ、癌の温熱療法（ハイパーサーミア）、分子の回転エネルギー付与を利用した化学反応の促進、プラズマの生成、宇宙におけるエネルギー伝播や加熱など広範囲に利用されている。

マイクロ波加熱では、加熱物体内部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ともに、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。

このようにマイクロ波加熱は多くの特徴を有しているが、マイクロ波加熱を伝熱学的に取り扱った研究は非常に少なく、電磁波と熱の複合現象としてマイクロ波による物体の加熱およびその最適化を詳細に解明することは重要な課題である。

2. 研究の目的

本研究では、多重反射を含むキャビティ内におけるマイクロ波加熱に対し、(1)被加熱物体内部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。

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。

(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

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。

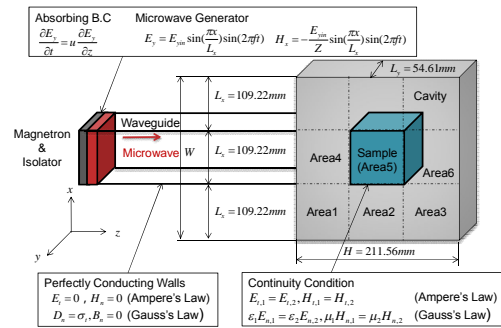


図 1 解析モデルおよび境界条件

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

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

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

$$\mathbf{E}_t = \mathbf{0}, \mathbf{H}_n = \mathbf{0} \quad \dots \dots \dots (3)$$

ここで、添え字  $t, n$  は接線および法線方向成分を表す。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、

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{t,1} &= \mathbf{E}_{t,2}, & \epsilon_1 \mathbf{E}_{n,1} &= \epsilon_2 \mathbf{E}_{n,2} \\ \mathbf{H}_{t,1} &= \mathbf{H}_{t,2}, & \mu_1 \mathbf{H}_{n,1} &= \mu_2 \mathbf{H}_{n,2} \end{aligned} \quad \dots \dots \dots (4)$$

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。

$$\frac{\partial \mathbf{E}_t}{\partial t} = \pm u \frac{\partial \mathbf{E}_t}{\partial z} \quad \dots \dots \dots (5)$$

ここで、 $u$ [m/s]は位相速度を表す。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  $H_x$  の励振として次式で与える。

$$\begin{aligned} E_y &= E_{y,in} \sin\left(\frac{\pi x}{L_x}\right) \sin(2\pi ft) \\ H_x &= -\frac{E_{y,in}}{Z} \sin\left(\frac{\pi x}{L_x}\right) \sin(2\pi ft) \end{aligned} \quad \dots \dots \dots (6)$$

ここで、 $E_{y,in}$ [V/m]は入射電界、 $f$ [Hz]は周波数、 $L_x$ [m]は導波管の  $x$  方向長さ、 $Z$ [ $\Omega$ ]は特性インピーダンスを表す。

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。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad \dots \dots \dots (7)$$

ここで、 $\rho$ [kg/m<sup>3</sup>]は試料の密度、 $c$ [J/(kgK)]は比熱、 $k$ [W/(mK)]は熱伝導率、 $T$ [K]は温度であり、 $Q$ [W/m<sup>3</sup>]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。

$$Q = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon_r \tan \delta |\mathbf{E}|^2 \quad \dots \dots \dots (8)$$

ここで、 $\epsilon_0$ [F/m]は真空の誘電率、 $\epsilon_0[-]$ 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。

#### 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科尔ソン法を用いた。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。

#### (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) 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、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、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。

#### (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、反射板の局部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. 研究成果

初年度は、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効率化を理論的に検討した。具体的には、反射波の抑制に対して有効な表面および内部構造を解明するため、(1) 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、(2) 反射波制御用補助物体による反射波の抑制法を検討し、以下の成果を得た。

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。

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。

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。

第2年度は、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。具体的には、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した。以下に得られた成果を示す。

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。

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。

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。

最終年度は，反射波制御用補助物体の表面形状変化による反射波の抑制法の検討に加えて，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た。具体的には，マイクロ波による木材の乾燥過程を対象に，マイクロ波加熱の有する内部加熱および選択的加熱の特性を利用して，誘電物性が急激に変化する場合の加熱特性の最適化を検討し，以下の成果を得た。

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表面形状の影響を，誘電物性，補助物体の厚さ，設置位置および表面構造パラメーターと関連づけて解析的に明らかにし，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。

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. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計4件)

橋本裕貴，赤堀匡俊，マイクロ波加熱に及ぼす物体構造の効果，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

会講演論文集，(2013)，275-276，査読無  
須田涼太，赤堀匡俊，矩形空洞共振器を用いたマイクロ波加熱の高効率化について，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，査読無

千田俊策，青木和夫，赤堀匡俊，熱伝導を用いたマイクロ波加熱の高効率化，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，査読無  
赤堀匡俊，青木和夫，矩形導波管を用いたマイクロ波加熱の高効率化，釧路工業高等専門学校紀要，(2012)，145-150，査読無

[学会発表](計3件)

橋本裕貴，赤堀匡俊，マイクロ波加熱に及ぼす物体構造の効果，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，2013年03月09日，旭川市ときわ市民ホール(北海道・旭川市)

須田涼太，赤堀匡俊，矩形空洞共振器を用いたマイクロ波加熱の高効率化について，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，2013年03月09日，旭川市ときわ市民ホール(北海道・旭川市)

千田俊策，青木和夫，赤堀匡俊，熱伝導を用いたマイクロ波加熱の高効率化，日本機械学会 北陸信越支部 第50期総会・講演会，2013年03月09日，福井大学 文京キャンパス(福井県・福井市)

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者

赤堀 匡俊 (AKAHORI, Masatoshi)

釧路工業高等専門学校・機械工学科・准教授  
研究者番号：10303182

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし