

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月31日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560205

研究課題名（和文）マイクロ波加熱における電磁波干渉と熱的制御による加熱特性の高効率化と最適化

研究課題名（英文）High performance and optimization of the heating characteristics by electromagnetic wave interference and thermal controls in microwave heating

研究代表者

赤堀 匡俊（AKAHORI MASATOSHI）

長岡技術科学大学・工学部・助教

研究者番号：10303182

研究成果の概要（和文）：本研究では、マイクロ波加熱が困難な条件、さらには、誘電物性が時間的・空間的に急激に変化する条件に対するマイクロ波加熱の高効率化およびその最適化手法を理論的・実験的に追究した。矩形導波管内における  $TE_{10}$  モードのマイクロ波による物体加熱の特徴を最大限活用し、(1)被加熱物体内における電磁波干渉の制御、(2)被加熱物体表面における反射波の制御、(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およびその最適化手法を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：In this project, the high performance of the microwave heating on the conditions under which the microwave heating becomes difficult and the conditions under which the dielectric physical properties change rapidly in time and space, and its optimization technique were investigated theoretically and experimentally. The high performance of the heating efficiency based on (1)control of the interference of transmitted and reflected waves in materials, (2)control of the reflected wave on the surface of the materials and (3)thermal control using the thermal diffusion effect of the high dielectric materials, and its optimization technique were clarified, by utilizing the feature of the microwave of  $TE_{10}$  mode and frequency of 2.45GHz in rectangular waveguide.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：伝熱工学，熱工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：伝導，マイクロ波加熱，最適加熱，電磁場，矩形導波管，電磁場干渉，FDTD法

## 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。しかし、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

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、マイクロ波の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、物体内部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、マイクロ波加熱が困難な条件、さらには、誘電物性が時間的・空間的に急激に変化する条件に対して、マイクロ波加熱の特徴を最大限活用し、①被加熱物体内部における電磁波干渉の制御、②被加熱物体表面における反射波の制御、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およびその最適化手法を提案することを目的とする。

## 3. 研究の方法

(1) 矩形導波管内におけるマイクロ波加熱の数値シミュレーション

### ① 電磁場解析

本研究で用いた解析モデルおよび境界条件を図1に示す。TE<sub>10</sub>モードの矩形導波管内におけるマイクロ波加熱を解析するため、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。

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

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

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、 $\varepsilon$ [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、導波管壁面は完全導体(PEC)とする。

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

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

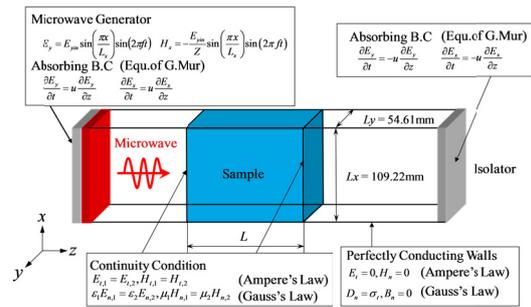


図1 解析モデルおよび境界条件

電荷、表面電流がないものとして、

$$\mathbf{E}_{t,1} = \mathbf{E}_{t,2}, \quad \varepsilon_1 \mathbf{E}_{n,1} = \varepsilon_2 \mathbf{E}_{n,2} \quad (4)$$

$$\mathbf{H}_{t,1} = \mathbf{H}_{t,2}, \quad \mu_1 \mathbf{H}_{n,1} = \mu_2 \mathbf{H}_{n,2}$$

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。

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

ここで、 $u_p$ [m/s]は位相速度を表す。マイクロ波の照射は Total Filed / 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。

$$E_y = E_{y,in} \sin\left(\frac{\pi x}{L_x}\right) \sin(2\pi f t) \quad (6)$$

$$H_x = -\frac{E_{y,in}}{Z} \sin\left(\frac{\pi x}{L_x}\right) \sin(2\pi f t)$$

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。

### 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。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q \quad (7)$$

ここで、 $\rho$ [kg/m<sup>3</sup>]は試料の密度、 $c$ [J/kgK]は比熱、 $T$ [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。

$$Q = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon_r \tan \delta |\mathbf{E}|^2 \quad (8)$$

ここで、 $\varepsilon_0$ [F/m]は真空の誘電率、 $\varepsilon_r$ [-]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 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、Maxwell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、時間領域差分法(FDTD法)、用いて数値解析を行った。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) マイクロ波加熱実験

図 1 に実験装置の概要を示す。マグネトロンにより発せられた周波数 2.45GHz のマイクロ波は、内径寸法 109.22×54.61mm の矩形導波管内を TE<sub>10</sub> モードで伝播し、試料に照射され、試料を透過したマイクロ波は水負荷を用いた無反射終端により吸収される。試料容器は厚さ 0.75mm のポリプロピレン製で、試料は、水層、ガラス層および平均直径が 0.15mm のガラス粒子で構成された粒子層 (109.22×54.61×50mm) を使用し、周囲への熱損失を防ぐため導波管試料部は断熱されている。試料内の温度測定はマイクロ波の影響を受けない光ファイバー式温度計を使用し、パソコンに記録した。

## 4. 研究成果

本研究では、①被加熱物体内における電磁波干渉の制御、②被加熱物体表面における反射波の制御、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およびその最適化手法を提案するため、矩形導波管内の TE<sub>10</sub> モードのマイクロ波に対し、研究項目 (1) マイクロ波加熱が困難な低誘電損物体に対する加熱特性の高効率化、研究項目 (2) 加熱物体表面での反射波抑制による加熱特性の高効率化、(3) 誘電特性が急激に変化する相変化過程の最適化、に関する伝熱現象を理論的・実験的に検討した。

### (1) マイクロ波加熱が困難な低誘電損物体に対する加熱特性の高効率化

固・液・気相が共存する系では、マイクロ

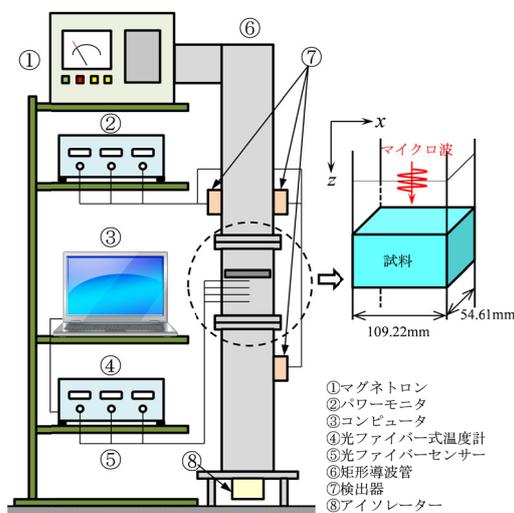


図 2 実験装置の概要

波の吸収はほとんど液相で生じることとなる。すなわち、被加熱物体が液相成分を含まない低誘電損物体である場合、マイクロ波による加熱は非常に困難となる。そこで本研究では、マイクロ波加熱が困難な低誘電損物体の加熱特性の高効率化を目的として、加熱補助として高加熱物体を付加する方法を検討する。加熱補助物体の付加は、①加熱補助物体の配置・厚さ・構造に基づく干渉状態の制御、②熱伝導効果による被加熱物体の加熱量増大、の効果をもたらす。ここでは、電磁場の干渉制御による加熱特性の有効性を被加熱物体および加熱補助物体の誘電物性、設置位置および構造に関連づけて明らかにするとともに、加熱補助物体から被加熱物体への熱伝導による加熱効果の有効性を検討した。

本研究で対象としたモデルを図 3 に示す。マイクロ波の照射方向に試料と補助試料が直列に配置される系で、補助試料が試料に挟まれ形が対象である。

### ① 加熱補助物体による干渉状態の制御 (熱伝導を考慮しない場合)

はじめに、試料と補助試料の配置により電磁波の干渉状態が異なる。ここでは、典型的なモデルとして、試料をガラス層、補助試料を水層とした電磁波の干渉状態および試料と補助試料の加熱量を数値計算により検討した。試料(ガラス)および補助試料(水)の加熱量は補助試料をどこに配置するかにより電磁波の状態は大きく異なることが示され、本研究で得られた電磁場干渉による最適加熱条件を表 1 に示す。最適加熱条件は加熱対象によっても大きく異なることが理解される。ここで、 $\lambda_g, \lambda_w$  はそれぞれガラス層および水層の管内波長、 $n$  は  $n=0, 1, 2, 3, \dots$  を意味し、また、ガラス層厚さ  $L_g$  はトータルのガラス層厚さを意味している。

表 1 電磁場干渉制御による最適加熱条件

	設置位置 $L_l$	水層厚さ $L_w$	ガラス層厚さ $L_g$
ガラス	$(0.25+0.5n)\lambda_g$ なるべく後ろ	$(0.25+0.5n)\lambda_w$	$(0.25+0.5n)\lambda_g$
水	$0.25\lambda_g$	$0.5n\lambda_w$	$(0.25+0.5n)\lambda_g$
トータル	$(0.25+0.5n)\lambda_g$ なるべく後ろ	$0.5n\lambda_w$	$(0.25+0.5n)\lambda_g$

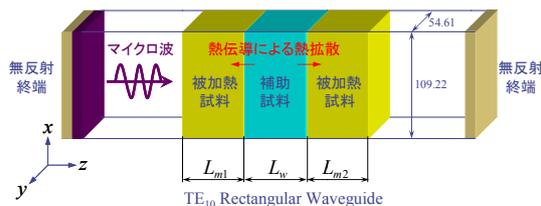


図 3 低誘電体の加熱に対する補助加熱試料の設置

② 熱伝導効果による被加熱物体の加熱制御

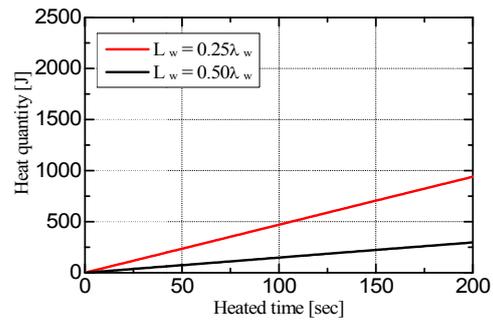
次に、補助試料からの熱伝導による試料の加熱効果について検討する。すなわち、電磁波干渉によるマイクロ波の吸収に加えて、熱伝導解析を複合したものである。図4に熱伝導を考慮した場合としない場合のガラスの加熱量に対する時間変化の一例を示す。上述したように、ガラス層の加熱量が極大となる水層の設置位置は  $z=0.75\lambda_g$  とした場合である。熱伝導による加熱効果が非常に大きいことが理解される。すなわち、ガラスのように誘電率が小さな物体の加熱に対して、誘電率の大きな物体を補助として加熱することの有効性が指摘される。ただし、補助物体の大きさと設置位置は、電磁波の干渉および非定常熱伝導を考慮して決定されるべきものといえる。

(2) 加熱物体表面での反射波抑制による加熱特性の高効率化

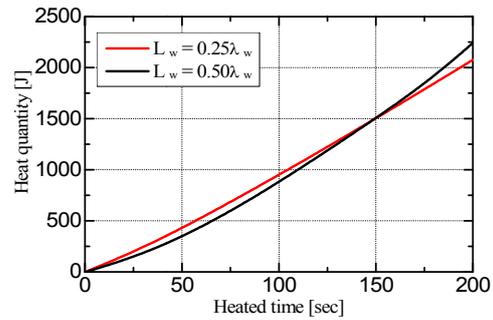
物体表面におけるマイクロ波の反射は物体の誘電物性に大きく依存しており、液相のようなマイクロ波を吸収する高誘電体物質ほど表面での反射は大きくなる。従って、物体表面での反射を低減させることにより、マイクロ波加熱の効率は飛躍的に向上する。そこで本研究では、反射波の抑制に対して有効な構造を解明するため、試料の表面形状変化による反射波の抑制法を検討した。具体的には、図5に示す2種類の表面構造と、それぞれの表面構造に対して異なる2つの配列方向の合計4種類のモデルを検討した。試料は表面での反射が顕著となる高誘電体物質の水層とし、試料後端からの反射波の影響を排除するため試料長さを半無限とした。表面凹凸構造は水層と空気層が等間隔で交互に並ぶ構造であり、水と空気の体積割合が等しく両者が無限小で均一に分布している均一構造の入射波制御層を代用したモデルとなっている。一方、表面山型構造は誘電物性が線形分布を有する不均一構造の入射波制御層を代用したモデルとなっている。矩形導波管内における電磁場モードは試料の表面構造に大きく依存しているため、電磁場モードと表面構造の空間的な位置関係を考慮し、配列方向の違いを(a)および(b)として示す。モデル(a)はy軸方向に一樣な表面構造であるため、y軸方向に電界の変化を持たない  $TE_{10}$  モードの電磁場が維持される。一方、モデル(b)はx軸方向に一樣でy軸方向に変化を伴う表面構造であるため、 $TE_{10}$  モードが維持されず、y軸方向に電界の変化が生じるハイブリッドモードの電磁場が形成される。

① 表面凹凸構造の効果

マイクロ波加熱における表面凹凸構造の効果を検討するため、凹部深さ  $\delta z$  に対する加



(a) 熱伝導なし



(b) 熱伝導あり

図4 熱伝導を考慮したガラスの加熱量

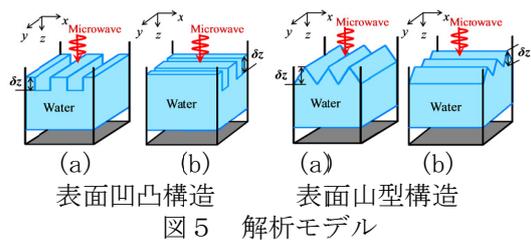


図5 解析モデル

熱量の変化を図6に示す。参考のため、均一構造の入射波制御層を付加した結果も併せて示す。表面凹凸構造(a)の場合、加熱量は周期的に変動しており、 $N$  に関係なく  $\delta z = (0.25 + 0.5n)\lambda_{wa}$  ( $n=0, 1, \dots$ ) の条件でピークを持つ。ここで、 $\lambda_{wa}$  ( $=18.68\text{mm}$ ) は均一層の管内波長である。全体的に加熱量は低いが、凹凸数  $N$  の増大とともに均一層の加熱量に近づくことが示される。一方、表面凹凸構造(b)の場合、マイクロ波の遮断が生じないため、加熱量は全体的に高く、また、凹部内に透過したマイクロ波と凹部下端からの反射波の複雑な干渉により、 $\delta z$  および  $N$  の変化に伴い周期的に変動している。ただし  $N=4$  の場合、 $\delta z=25\text{mm}$  以降で加熱量が一定値となる。これは凸部の幅が  $\delta y \approx 0.5\lambda_w$  ( $\lambda_w=13.25\text{mm}$  は水の管内波長) となるため、凹部から凸部の両側面へ入射するマイクロ波が共振状態となり、凹部内に浸透したマイクロ波が水層に完全吸収されるためである。以上のことから、実用性を考慮すると、表面凹凸構造ではモデル(b)の凹凸数  $N=4$  が最適構造と言える。

② 表面山型構造の効果

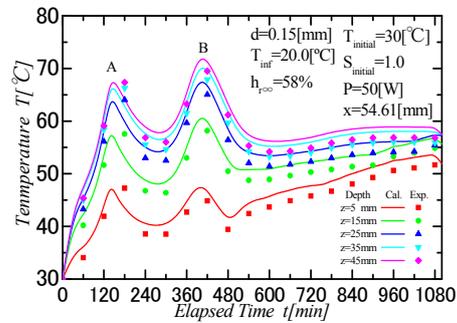
次に、マイクロ波加熱における表面山型構造の効果を検討するため、山部深さ $\delta z$ に対する加熱量の変化を図7に示す。参考のため、誘電物性が線形分布を持つ不均一構造の入射波制御層を付加した結果も併せて示す。表面山型構造の場合においても配列方向の違いにより、試料の加熱特性は大きく異なる。表面山型構造(a)の場合、加熱量の周期的な変動はほとんど無く、 $\delta z$ の増大とともに単調に増加する。また、 $N$ の増大とともに不均一層の加熱量に近づくことが示される。表面山型構造(b)の場合も同様に、加熱量は $\delta z$ の増大とともに単調に増加するが、 $N$ の変化に対しては複雑な変動を示す。これは $N$ の変化に伴う山型部表面の傾斜角が表面での反射・吸収特性に影響を与えるためと考えられる。 $N=6$ の場合、山部深さ $\delta z$ が比較的短い条件で高い加熱量を示すことから、この条件が山型構造の最適構造である。

両構造をまとめると、表面構造を作成する際の簡便さや試料の加熱特性の観点から実用性を考慮すると、表面凹凸構造(b)の凹凸数 $N=4$ が最適な表面構造である。

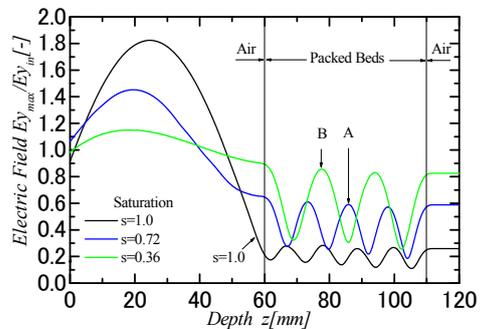
(3) 誘電特性が急激に変化する相変化過程の最適化

粒子径  $d=0.15\text{mm}$  における水で飽和された粒子充填層のマイクロ波による乾燥過程の一例を図8に示す。マイクロ波加熱による乾

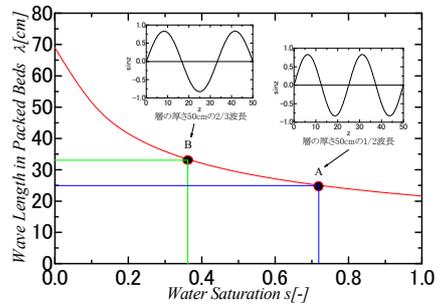
燥では、乾燥速度の低下と乾燥域の上昇という通常乾燥の2つの克服課題に対し、マイクロ波加熱の有する選択加熱と内部加熱の特性を利用して、乾燥域の温度上昇を抑えた高い乾燥速度を維持することが可能となる。しかし、乾燥の進行にともなう層内の水分変化により誘電特性が変化するため、マイクロ波の透過波と反射波の干渉状態が複雑に変化し、両波が共振する状態でマイクロ波の吸収はピークとなる。このため、乾燥速度および物体内の温度分布は周期性を有することとなる。水分の乾燥により時間的に誘電物性が変化する乾燥過程の最適化を検討することを目的とし、反射板の局所的な設置によるマイクロ波干渉制御の有効性を検討するための基礎データを取得できたが、最適化制御に至るにはさらなる検討が必要である。



(a) 粒子層内の温度分布



(b) 導波管中央における電界分布



(c) 含水飽和度と波長の関係

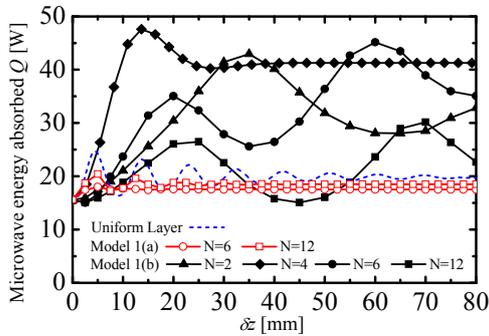


図6 凹部深さに対する吸収熱量の変化 (表面凹凸構造)

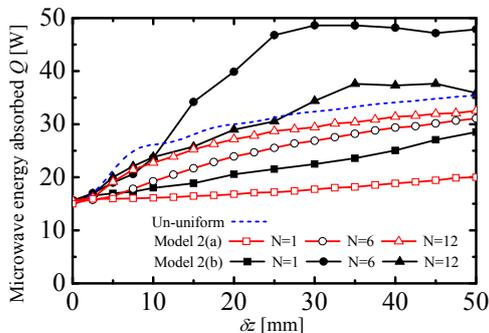


図7 山部深さに対する吸収熱量の変化 (表面山型構造)

図8 マイクロ波加熱による粒子層の乾燥過程

## 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6件)

- ① 赤堀匡俊, ギュム アイン ティ ラン, 青木和夫, マイクロ波加熱における物体の内部構造の効果, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2011 講演論文集, (2011), 171-172, 査読無.
- ② 赤堀匡俊, 青木和夫, 大嶋崇之, ギュム アイン ティ ラン, 矩形導波管を用いたマイクロ波加熱における表面構造の効果, 第48回日本伝熱シンポジウム講演論文集, Vol. II, (2011), 485-486, 査読無.
- ③ 大嶋崇之, 赤堀匡俊, 青木和夫, 矩形導波管を用いたマイクロ波加熱における表面凹凸構造の最適化, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2010 講演論文集, (2010), 43-44, 査読無.
- ④ Masatoshi Akahori, Kazuo Aoki, Shinya Taniguchi, The Effect of Surface Structure on Microwave Heating, Proceedings of the 14th International Heat Transfer Conference, (2010), No. IHTC14-23215, 査読有.
- ⑤ 赤堀匡俊, 青木和夫, 小林健, 矩形導波管を用いたマイクロ波加熱に及ぼす表面構造の影響, 第47回日本伝熱シンポジウム講演論文集, Vol. II, (2010), 397-398, 査読無.
- ⑥ 赤堀匡俊, 青木和夫, 小林健, 矩形導波管を用いたマイクロ波加熱の三次元解析, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2009 講演論文集, (2009), 131-132, 査読無.

[学会発表] (計6件)

- ① 赤堀匡俊, ギュム アイン ティ ラン, 青木和夫, マイクロ波加熱における物体の内部構造の効果, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2011, 2011年10月29日, 静岡大学浜松キャンパス (静岡県)
- ② 赤堀匡俊, 青木和夫, 大嶋崇之, ギュム アイン ティ ラン, 矩形導波管を用いたマイクロ波加熱における表面構造の効果, 第48回日本伝熱シンポジウム, 2011年6月2日, 岡山コンベンションセンター (岡山県)
- ③ 大嶋崇之, 赤堀匡俊, 青木和夫, 矩形導波管を用いたマイクロ波加熱における表面凹凸構造の最適化, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2010, 2010年10月30日, 長岡技術科学大学 (新潟県)
- ④ Masatoshi Akahori, Kazuo Aoki, Shinya Taniguchi, The Effect of Surface Structure on Microwave Heating, 14th International Heat Transfer Conference,

8.12.2010, Omni Shoreham Hotel (USA)

- ⑤ 赤堀匡俊, 青木和夫, 小林健, 矩形導波管を用いたマイクロ波加熱に及ぼす表面構造の影響, 第47回日本伝熱シンポジウム, 2010年5月27日, 札幌コンベンションセンター (北海道)
- ⑥ 赤堀匡俊, 青木和夫, 小林健, 矩形導波管を用いたマイクロ波加熱の三次元解析, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2009, 2009年11月7日, 山口大学常磐キャンパス (山口県)

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

赤堀 匡俊 (AKAHORI MASATOSHI)  
長岡技術科学大学・工学部・助教  
研究者番号: 10303182

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし