

令和 3 年 4 月 20 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04263

研究課題名（和文）電磁界結合を用いた開放系かつ低漏洩なマイクロ波加熱装置の研究

研究課題名（英文）Study on a Open-End Low-Leakage Microwave Heating Applicator by Using Electromagnetic Coupling

研究代表者

三谷 友彦（Mitani, Tomohiko）

京都大学・生存圏研究所・准教授

研究者番号：60362422

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、開放系かつ低漏洩なマイクロ波加熱装置、いわばマイクロ波が漏れない電子レンジの実現である。目的達成のために、無線電力伝送分野での研究が進展している電磁界結合を応用し、周波数2.45GHz帯でのマイクロ波加熱装置開発を実施した。研究成果として、容量4.3mlの純水を注入した試験管を試料とした場合に最大85%の効率で加熱できる装置を開発した。また、2つの試料を温度差3.2K以内で同時に加熱するマイクロ波加熱装置を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

マイクロ波加熱は近年において化学・材料科学・農学・医薬学などの様々な分野で飛躍的に利用されている一方、マイクロ波加熱装置の研究は国内外においてほとんど進んでいない。本研究は、従来にはないマイクロ波加熱手法として開放系マイクロ波加熱の実現を目指しており、本研究成果はその学術的な礎となる。将来的には、開放系マイクロ波加熱の産業応用への発展や全く新しい電子レンジの実現などが期待される。

研究成果の概要（英文）：The objective of the present study is development of an open-end and low-leakage microwave heating applicator, that is, "leak-less microwave oven". For achievement of the objective, we developed 2.45 GHz microwave heating applicators by using electromagnetic coupling, which has been applied to wireless power transfer technologies. As study outcomes, a developed applicator could heat a sample, 4.3 ml pure water poured into a glass test tube, with a heating efficiency of 85% at maximum. In addition, we developed a simultaneous microwave heating applicator for two samples whose temperature difference was within 3.2 K.

研究分野：マイクロ波工学

キーワード：マイクロ波加熱 電磁界結合 開放系加熱装置 マイクロ波応用

### 1. 研究開始当初の背景

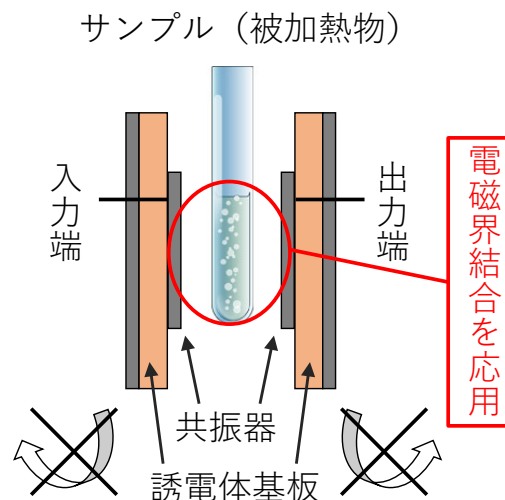
マイクロ波加熱は、マイクロ波と呼ばれる周波数 GHz 帯の電磁波を照射することによって物質を加熱する手法であり、一般家庭においては電子レンジとして世界中で利用されている。マイクロ波加熱は、主に誘電加熱と呼ばれる原理により加熱される。すなわち、マイクロ波が照射されることによって極性物質内に分極が発生し、分極の発生・緩和と照射マイクロ波の電界ベクトルの変化に時間的なずれが存在することにより、最終的にマイクロ波エネルギーが物質に仕事をすることで加熱される仕組みである。マイクロ波加熱は、伝熱などの従来の加熱手法と比較して3つの重要な特徴を有する。1つ目は内部加熱と呼ばれる特徴である。従来の加熱手法は熱源の接触部から熱が伝わることによって物質が加熱されるが、マイクロ波加熱はマイクロ波が物質内に直接浸透して分極を発生させるため、物質の外周部と同時に内部も加熱される。2つ目の特徴は高速加熱である。マイクロ波は周辺環境である空気をほとんど加熱せず、照射される物質のみを直接加熱するため、従来の加熱手法よりも物質の温度上昇速度が速くエネルギー効率の高い加熱が期待される。3つ目の特徴は選択加熱である。誘電加熱の原理により、分極しやすい極性物質はマイクロ波により加熱されやすいが、一方で分極がほとんど起こらない無極性物質はマイクロ波では加熱されにくい。その結果、混合物をマイクロ波照射した場合には混合物内に局所的な温度差が発生することがある。これらの特徴は従来の加熱手法には存在しないものであるため、近年では食品加熱のみならず化学・材料科学・農学・医薬学などの様々な分野でマイクロ波加熱が利用されている。これに伴い、21世紀以降はマイクロ波加熱を利用した化学反応プロセス・材料合成などの学術論文が飛躍的に増加しており、マイクロ波加熱は電磁波工学と様々な分野との異分野融合研究領域として注目されている。

ところが、マイクロ波加熱研究が盛んになる一方でマイクロ波加熱装置自体は十分な発展がなされてきたとは言えず、現代においても市販電子レンジを用いた化学反応プロセスの研究発表が散見される状況にある。既に化学分野においては、電子レンジを用いたマイクロ波加熱はマイクロ波出力や被加熱試料温度の制御性に乏しく、化学反応研究には不向きな装置として認識され始めている。また、近年ではマイクロ波帯の周波数領域においても1kW級の出力をもつ半導体増幅器が市販されはじめており、マイクロ波加熱のマイクロ波源として広く利用されてきたマイクロ波電子管であるマグネトロンよりも、制御性の高い半導体増幅器を利用するマイクロ波加熱研究事例が増え始めている。しかし、近年のファインケミカル、微細材料合成、マイクロフローリアクターなどの高精度かつ綿密な制御性を必要とする化学プロセス・材料合成に活用できるようなマイクロ波加熱装置がほとんど現存しないという状況である。

さらに、様々な分野への応用を検討する上での既存マイクロ波加熱装置の問題点として、金属で覆われた筐体内にマイクロ波を閉じ込める必要がある点が挙げられる。これは電磁波が外部に漏洩して人体や通信機器に影響を及ぼさないための措置であるが、サンプルを筐体内に設置してマイクロ波を照射し、加熱後にサンプルを取り出すという手間がかかる。しかも、電子レンジのように筐体内でマイクロ波が多重反射する系ではサンプル配置のずれによる加熱の再現性に難があり加熱ムラも起こりやすい。よって、マイクロ波加熱を化学分野等に利用することは研究室レベルでは可能であるものの、作業効率が悪く汎用性に乏しいのが現状である。

### 2. 研究の目的

上記の研究背景より、研究代表者は半導体増幅器の利用をベースとした従来にはないマイクロ波加熱装置の研究開発に着手した。特に、金属閉空間で囲うという既存のマイクロ波加熱装置の常識から脱却すべく、開放系マイクロ波加熱の研究開発に取り組んだ。本研究の目的は、開放系かつ低漏洩なマイクロ波加熱装置、いわば金属で囲わなくともマイクロ波が漏れない電子レンジの実現である。目的達成のために、本研究では無線電力伝送分野で研究されている電磁界結合を応用した。電磁界結合とは、同じ共振周波数を有する2つの共振器を近接配置することで電磁界結合させ、一方の共振器から他方の共振器に電磁界エネルギーを伝送する手法であり、外部への電磁波漏洩の少ない無線電力伝送方式として期待されている。本研究では図1に示すように電磁界結合部分にサンプル(被加熱物)を設置することで、低漏洩なマイクロ波加熱の実現を目指した。



マイクロ波を漏らさない！！

図1 電磁界結合方式を応用した  
マイクロ波加熱装置の概略図

### 3. 研究の方法

本研究では、電磁界解析シミュレーションと実証実験により、開放系かつ低漏洩な加熱を実現するためのマイクロ波加熱装置の電磁界モード・電磁界分布の在り方を明らかにすることを目指し、金属で囲わなくとも漏れない電子レンジとしての有効性を定量的に評価した。

電磁界解析シミュレーションでは、図1の概念図に示したマイクロ波加熱装置を計算機空間内に構築し、共振器の形状、寸法、共振器間の距離、マイクロ波給電位置などをパラメータとした装置設計を行った。解析においては、マイクロ波給電ポートにおける反射係数や試料でのマイクロ波吸収電力を評価した。また、どのような電磁界モード・電磁界分布を採用すれば漏洩のないマイクロ波加熱が実現できるかについて、シミュレーション空間内の電磁界分布を可視化して評価した。図2に電磁界解析シミュレーションの実施例を示す。本研究においては、マイクロ波加熱に使用する周波数は2.45GHzとした。共振器は方形の銅箔を誘電体基板上に設置することで実現した。装置全体は共振器を置いた誘電体基板2枚を対向させ、共振器間に加熱試料を設置した。加熱試料は、ガラス試験管内に注入した4.3mlの純水とした。物質の電気定数のうち、誘電率はマイクロ波加熱の原理である誘電加熱の度合いを左右する指標であり、かつ温度および周波数に依存する。よって、事前に純水の誘電率の周波数特性および温度特性を実測し、誘電率データを事前にシミュレーション内に取り込むことで、現実のマイクロ波加熱に即したシミュレーションを実施した。

実証実験では、電磁界解析シミュレーションで設計した装置を実際に試作し、電波暗室内にてマイクロ波加熱実験を行った。実験結果からマイクロ波加熱効率や漏洩電磁波を評価するとともにシミュレーション結果と比較することで改善点を電磁界解析シミュレーションにフィードバックし、より高効率なマイクロ波加熱装置の実現を目指した。図3に実証実験の写真を示す。

研究期間においては、まず単一試料を加熱するための開放系マイクロ波加熱装置の設計開発に取り組んだ。また、2つの試料を同時かつ同じ温度上昇速度で加熱するための開放系マイクロ波加熱装置の設計開発にも取り組んだ。

### 4. 研究成果

単一試料のマイクロ波加熱においては、1次側共振器から10Wのマイクロ波を入力し、2次側共振器の終端インピーダンスを開放とする条件において、約600秒で純水を室温から70℃まで加熱させることに成功した。この実証実験において、1次側共振器で実測した反射電力は電磁界解析シミュレーションで評価した反射係数とよく一致しており、電磁界解析シミュレーションによる装置設計に問題がないことを確認した。また、電磁界解析シミュレーションで評価したマイクロ波漏洩電力密度から、開発した開放系マイクロ波加熱装置で使用できる最大マイクロ波入力電力を見積もった。装置から10cm離れた直方体空間を境界とし、境界面から漏洩する最大マイクロ波漏洩電力密度が電波防護指針の管理環境基準である $5\text{mW}/\text{cm}^2$ 以下となる条件において、使用できる最大マイクロ波入力電力は約36Wと算出された。さらに、電磁界解析シミュレーションにより試料が吸収するマイクロ波電力効率を試料の温度ごとに評価した。その結果、マイクロ波吸収電力効率は最大73%であった。市販電子レンジにおけるマイクロ波電力吸収効率は65%~90%とされており、開発した開放系マイクロ波加熱装置においても市販電子レンジ相当のマイクロ波加熱が実現可能であることを実証した。

次に、単一試料のマイクロ波加熱におけるマイクロ波電力吸収効率の向上およびマイクロ波漏洩電力の低減を目指すべく、マイクロ波加熱装置の改良に取り組んだ。重要な改良点として、開放端として設計及び実証実験を行っていた2次側共振器の終端インピーダンスを開放以外の純リアクタンスとし、終端インピーダンスをパラメータとした設計を実施した。マイクロ波吸収電力効率の改善効果が最も大きかった終端インピーダンスに調整した結果、電力吸収効率は改善前の73%から85%まで向上した。また、実証実験においても同一条件において改善前よりも加熱速度が100秒程度早まることを確認した。さらに、漏洩電力密度も改善前から50%以上低減させることに成功し、電波防護指針の管理環境基準以下となる条件での最大マイクロ波入力電力を約80Wまで引き上げることに成功した。この改善により、更なる大電力での開放系マイクロ波加熱が実現できるようになった。

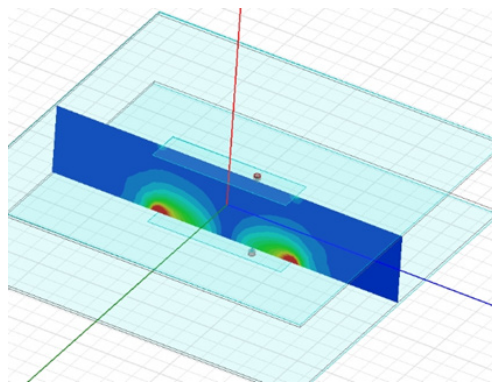


図2 電磁界解析シミュレーションによるマイクロ波加熱装置設計の一例

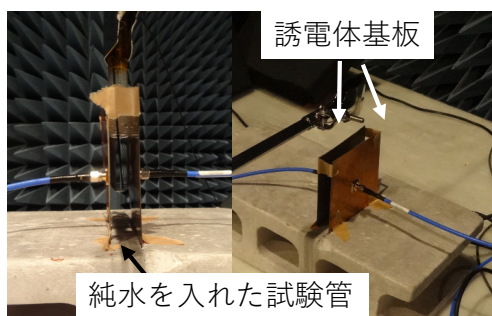


図3 試作マイクロ波加熱装置による実証実験の写真

並行して、2次側共振器の終端インピーダンスをパラメータとした電磁界解析シミュレーションにより漏洩マイクロ波の発生要因について検討した。シミュレーション空間内の電磁界分布や電磁界モードを調査した結果、2つの共振器の裏面銅箔間の電位が逆相になることで共振器間に差動モードの電界が発生し、これによりマイクロ波が漏洩することを明らかにした。

最後に、2つの試料を同時かつ同じ温度上昇速度で加熱する開放系マイクロ波装置を設計した。本設計においては、1次側の共振器数を1つ、2次側の共振器数を2つとし、3つの共振器間で電磁界結合させる構成とした。電磁界解析シミュレーションおよび実証実験を行った結果、マイクロ波入力電力10Wにおいて、約440秒で純水を室温から70℃まで加熱させることに成功した。また、2つの純水試料の温度差は3.2K以内におさまることを実験により確認し、2つの試料を同時かつ同じ温度上昇速度で加熱できる開放系マイクロ波加熱装置を実現した。

今後は、開放系マイクロ波加熱装置の更なるマイクロ波吸収電力効率の向上を目指すとともに、多数の試料を同時にマイクロ波加熱できる装置の開発に取り組む予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 三谷 友彦
2. 発表標題 次世代マイクロ波化学プロセスに向けたマイクロ波装置の在り方
3. 学会等名 日本化学会第101春季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 榎木 涼介、篠原 真毅、三谷 友彦
2. 発表標題 電磁界結合型マイクロ波加熱装置の低漏洩化に関する研究
3. 学会等名 電子情報通信学会無線電力伝送研究会(2020年度3月)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 榎木 涼介、篠原 真毅、三谷 友彦
2. 発表標題 電磁界結合型マイクロ波加熱装置の高効率化に関する研究
3. 学会等名 第14回日本電磁波エネルギー応用学会シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tomohiko Mitani, Daichi Nishio, and Naoki Shinohara
2. 発表標題 Feasibility Study on Simultaneous Microwave Heating of Multiple Samples by Electromagnetic Coupling-Type Applicator
3. 学会等名 53rd Annual Microwave Power Symposium (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tomohiko Mitani
2. 発表標題 Recent Trend in Microwave Sources for Microwave Heating Applications
3. 学会等名 2019 URSI-Japan Radio Science Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 榎木 涼介、篠原 真毅、三谷 友彦
2. 発表標題 電磁界シミュレーションによる電磁界結合型マイクロ波加熱装置のパラメータ検討
3. 学会等名 第13回日本電磁波エネルギー応用学会シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tomohiko Mitani, Daichi Nishio, and Naoki Shinohara
2. 発表標題 Feasibility Study on a Microwave Heating Applicator Using Electromagnetic Coupling
3. 学会等名 2018 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 三谷 友彦、西尾 大地、篠原 真毅
2. 発表標題 電磁界結合を利用した複数試料の同時マイクロ波加熱の研究
3. 学会等名 第12回日本電磁波エネルギー応用学会シンポジウム
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 加熱装置	発明者 三谷友彦、西尾大地	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、PCT/JP2018/33576	出願年 2018年	国内・外国の別 外国

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------