

令和 6 年 5 月 29 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04175

研究課題名（和文）開放系マイクロ波加熱の多次元拡張の研究

研究課題名（英文）Study on Multidimensional Extension of Open-System Microwave Heating

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） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、「開放系マイクロ波加熱」すなわち「金属で囲わなくてもほとんどマイクロ波が漏洩しない電子レンジ」の実現であり、開放系マイクロ波加熱において試料を均一に加熱することである。目的達成のために、電磁界結合型マイクロ波加熱の次元拡張に関する研究、0次モード共振を活用したマイクロ波加熱領域の拡張に関する基礎研究、軌道角運動量モードを活用した一様マイクロ波加熱の基礎研究を実施した。各研究テーマにおいて電磁界シミュレーションや実証実験を実施した。研究成果から、均一に加熱する開放系マイクロ波加熱の多次元拡張が原理的に可能であることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

マイクロ波加熱は、近年では食品加熱のみならず有機合成、無機材料焼結、バイオマスからの成分抽出、殺菌・無害化、がん治療（ハイパーサーミア）など多様な分野で利用されている。ところが、マイクロ波加熱応用研究が多様化・先進化する一方で、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い難い。本研究課題では、既存のマイクロ波加熱技術からの脱却を目指した開放系マイクロ波加熱を提案し、開放系マイクロ波加熱の原理的な多次元拡張に成功した。この研究成果は、既存マイクロ波加熱技術の欠点の一つである加熱ムラを克服することができ、学術的意義や社会的意義は非常に大きい。

研究成果の概要（英文）：The objective of the present study is to realize an open microwave heating system i.e., a microwave oven with almost no microwave leakage without metal enclosure, and to uniformly heat samples in open microwave heating systems. The following studies were conducted: dimensional extension of electromagnetic coupling-type microwave heating, fundamental study on extension of microwave heating region utilizing zeroth-order mode resonance, and fundamental study on uniform microwave heating utilizing orbital angular momentum (OAM) modes. Electromagnetic simulations and experimental demonstrations were conducted in each study. The simulation and experimental results verified that multidimensional extensions of open microwave heating systems for uniform heating were principally succeeded.

研究分野：マイクロ波工学

キーワード：マイクロ波 マイクロ波加熱 電磁界結合 軌道角運動量

1. 研究開始当初の背景

マイクロ波加熱は、電子レンジとして世界中で利用されている加熱手法であり、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。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以下の 3 つの重要な特徴を有する。

内部加熱・・・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。

高速加熱・・・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。

選択加熱・・・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。

上記の特徴を活かし、近年では食品加熱のみならず有機合成、無機材料焼結、バイオマスからの成分抽出、殺菌・無害化、がん治療(ハイパーサーミア)など多様な分野でマイクロ波加熱が利用されている。特に 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、マイクロ波加熱応用研究が多様化・先進化する一方で、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いがたい。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が、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。よって、反応・プロセスに直接的な影響を与えているマイクロ波を外部熱源という形でブラックボックス化せざるを得ず、従来加熱法とマイクロ波加熱法との比較のみに焦点が当てられた研究に終始している。

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、金属遮蔽された閉空間に試料を設置するという制約が存在する。この制約は、マイクロ波が漏洩することによる人体や通信機器への影響を防護するための必要措置であるが、その反面でマイクロ波加熱応用の進展には大きな障壁となっている。従来のマイクロ波加熱装置では、金属筐体の存在により内部の直接確認が困難で、複数試料の同時かつ均一な加熱が困難という問題がある。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、本研究課題は「開放系マイクロ波加熱」すなわち「金属で囲わなくてもほとんどマイクロ波が漏洩しない電子レンジ」の実現に取り組んだ。本研究の目的は、開放系マイクロ波加熱において試料を均一に加熱することである。目的達成のために、以下の 3 つの研究テーマに取り組んだ。なお、全ての研究テーマにおいて、マイクロ波周波数は従来のマイクロ波加熱で利用されている 2.45 GHz とした。

(1) 電磁界結合型マイクロ波加熱の次元拡張に関する研究

本研究テーマは、研究代表者が 2018 年度～2021 年度の基盤研究(C)18K04263「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」で実施した内容の継続研究である。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、電磁界結合型マイクロ波加熱の加熱範囲を 2 次元拡張することを目指した。

(2) 0 次モード共振を活用したマイクロ波加熱領域の拡張に関する基礎研究

0 次モード共振とは、波数 0 の共振モードのことであり、理論上の共振波長が無限大となる。そのため共振空間内で発生する電磁界の定在波に節や腹が存在せず、広範囲で均一なマイクロ波加熱が期待される。本研究では、0 次モード共振器を誘電体基板上に設計・試作し、電磁界結合型マイクロ波加熱を適用することで、加熱領域の拡張を目指した。また、導波管型 0 次モード共振器を設計・試作し、同様に加熱領域の拡張を目指した。

(3) 軌道角運動量(Oribital Angular Momentum: OAM)モードを活用した一様マイクロ波加熱の

基礎研究

金属壁で囲まれた筐体を使用しないマイクロ波加熱手法として、アンテナからのマイクロ波照射による加熱手法も考えられる。照射アンテナとしてアレーアンテナを用いることで、ビームフォーミングにより所望の方向にマイクロ波を集中して照射することが可能である。一方、アレーアンテナによるビームフォーミングによって均一ビームを生成することも可能であり、広範囲にムラなくマイクロ波を照射することによる一様マイクロ波加熱が期待できる。本研究では、OAMモードがもつビームパターンに着目した新たな一様マイクロ波加熱手法を検討した。

3. 研究の方法

(1) 電磁界結合型マイクロ波加熱の次元拡張に関する研究

電磁界結合型マイクロ波加熱では、誘電体基板上に設置した2つの電磁界共振器を電磁界結合させ、共振器間に試料を設置することでマイクロ波加熱を行う。このとき、2つの電磁界共振器を遠ざけるほど、結合係数が小さくなり電磁界結合が起こりにくくなる。そこで、加熱装置を2次元方向に拡張する上で、共振器間の距離を大きくしても共振器間の結合度合いが十分に保たれるように、図1に示すようにリピータと呼ばれる中継用の電磁界共振器を追加挿入した電磁界結合型マイクロ波加熱装置を提案した。リピータで中継することにより、図1のように2つの試料を同時にマイクロ波加熱できる。

本研究テーマでは、電磁界シミュレーションによるマイクロ波加熱装置の設計を実施し、入力マイクロ波電力に対する試料への吸収電力、装置外部への漏洩電力、基板や共振器等での消費電力を評価した。また、リピータ付きの電磁界結合型マイクロ波加熱装置を試作し、2つの試料を同時にマイクロ波加熱する実証実験を行った。

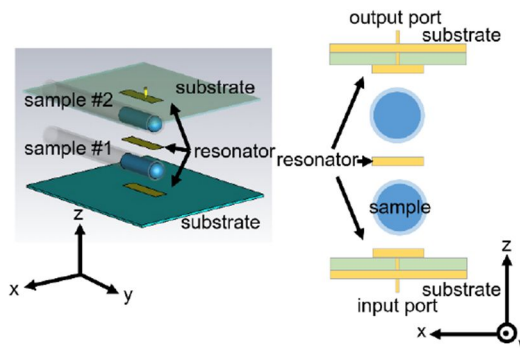


図1 リピータを用いた電磁界結合型マイクロ波加熱装置の概略図

(2) 0次モード共振を活用したマイクロ波加熱領域の拡張に関する基礎研究

マイクロ波電磁界における0次モード共振に関しては、右手系線路と左手系線路を融合したCRLH(Composite Right/Left-Handed)線路により実現可能である。右手系線路とは、電界ベクトル・磁界ベクトル・電磁波の伝搬方向(エネルギー進行方向)ベクトルが、この順で右手の親指・人差し指・中指に対応する線路で、一般的な伝送線路は全て右手系線路である。一方、左手系線路は前述のベクトル関係が左手に対応する線路であり、負の屈折率を人工的に設計することにより実現できる線路である。CRLH線路を用いて共振器を設計すると、右手系線路や左手系線路において各々独立に発生する共振モードが存在するとともに、CRLH線路特有の共振モードが発生する。このCRLH線路特有の共振モードの中に0次モード共振が存在し、設計共振周波数において0ではない群速度を持ちつつ波数が0となるマイクロ波を伝搬させることができる。

本研究テーマでは、図2に示すような0次モード共振器を誘電体基板上に試作し、2つの0次モード共振器を対向させて共振器間に試料を設置することによる電磁界結合型マイクロ波加熱装置を考案した。電磁界シミュレーションによるマイクロ波加熱装置の設計を実施し、0次モード共振器上の電界分布を評価した。また、0次モード共振器を利用した電磁界結合型マイクロ波加熱装置の実測評価を行った。加えて、図3に示すように導波管型の0次モード共振器を試作し、導波管内でのマイクロ波加熱を実施した。電磁界シミュレーションによる導波管型0次モード共振器の設計を実施し、入力マイクロ波電力に対する試料への吸収電力や入力ポートへの反射電力を評価した。また、導波管型0次モード共振器を利用したマイクロ波加熱の実測評価を行った。

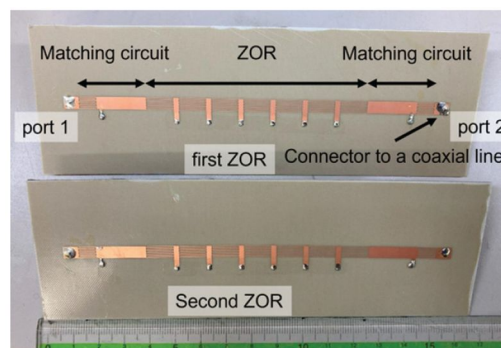


図2 誘電体基板上に試作した0次モード共振器の写真

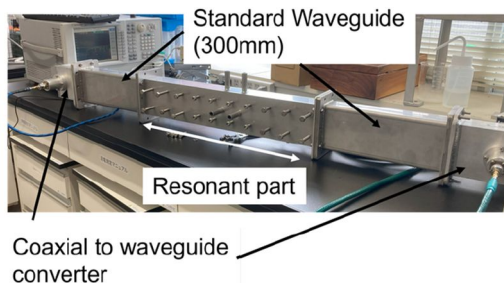


図3 試作した導波管型0次モード共振器の写真

(3) OAM モードを活用した一様マイクロ波加熱の基礎研究

電磁波がもつ角運動量には、偏波に起因するスピン角運動量に対して、空間の位相分布の回転に起因する OAM の存在が知られている。伝搬軸周りの位相の回転数はモード指数 l で表され、アレーアンテナから放射される各モードの電磁波は図 4 上に示すように螺旋状の等位相面をもって伝搬する。伝搬軸周りの位相は $2\pi l$ rad だけ回転する。負のモードについては回転方向が逆向きとなる。これらのモードには直交性があり、同一周波数による情報の多重伝送が可能であることから、OAM モードは無線通信分野において広く研究されている。図 4 上に示した位相回転の特徴により、 $l = 0$ の OAM モードはアレーアンテナから同相励振で放射することと等価であり、伝搬軸上の電磁界強度が最大となる。一方、 $l \neq 0$ の OAM モードは伝搬軸上が位相特異点となり、電磁界強度が 0 となる。これにより、伝搬軸に垂直な面でみた電力密度分布は図 4 下のような円環状のパターンとなる。 $|l|$ の増加に伴ってビーム角度が大きくなり、円環の径は大きくなる。

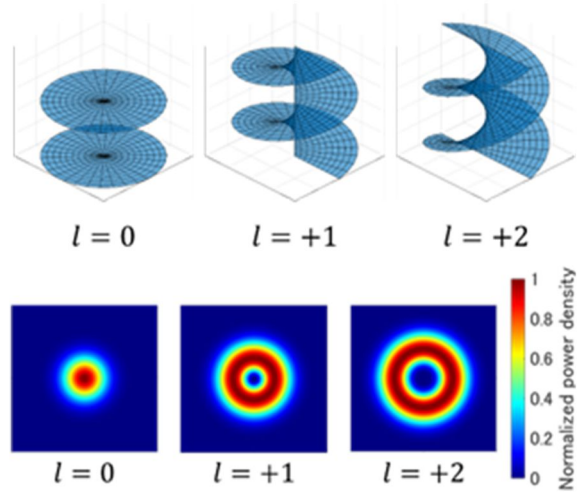


図 4 OAM モードの各モード指数 l における等位相面（上）および伝搬軸に対する鉛直面での電力密度分布（下）の概要

本研究テーマでは、複数の OAM モードを適当な時間割合で放射し、図 4 下に示す複数の電力密度分布を空間合成することで大面積試料の一様マイクロ波加熱の実現を試みた。電磁界シミュレーションを用いて OAM モード放射用アレーアンテナを設計し、各 OAM モードの放射電力密度分布を電磁界計算により求め、一様マイクロ波電力密度分布を実現できるモード合成手法を検討した。また、図 5 に示す OAM モード放射用 8 素子アレーアンテナを試作し、一様マイクロ波加熱の実測評価を行った。

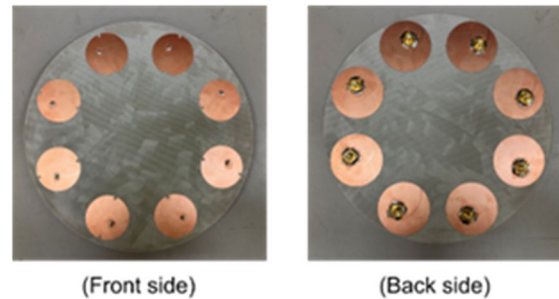


図 5 試作した OAM モード放射用 8 素子アレーアンテナの写真

4. 研究成果

(1) 電磁界結合型マイクロ波加熱の次元拡張に関する研究

試料として純水およびエタノールを想定し、試料温度を 20、50、70 とした際のリピータを用いた電磁界結合型マイクロ波加熱装置のシミュレーション結果を図 6 に示す。図 6 は入射電力から反射電力を差し引いたものを正味の入力電力とし、試料 1 での吸収電力 P_{A1} 、試料 2 での吸収電力 P_{A2} 、装置外への漏洩電力 P_L 、その他の消費電力 P_0 を入力電力に対する比率で表したグラフである。試料の差異および試料温度の差異は、試料の複素誘電率の差異に相当する。また、図 1 に示したリピータを挿入した場合と挿入しなかった場合でシミュレーション結果を比較した。

図 6 のシミュレーション結果より、リピータありとリピータなしの場合で比較すると、純水加熱時はリピータの有無によって消費電力の割合がほとんど変わらない結果が得られた。一方で、エタノール加熱時はリピータありの方が 2 つの試料の吸収電力の差 $|P_{A1} - P_{A2}|$ が小さくなり、各試料に均等に電力が分配される結果が得られた。すなわち、リピータが純水よりもエタノールのマイクロ波加熱時により効果を発揮することを示した。また、電磁界結合型マイクロ波加熱装置を試作し、2 試料を同時にマイクロ波加熱する実証実験では、リピータの有無による加熱速度の改善は見られなかったが、リピータを設置することによる 2 次元拡張の可能性については実証できた。

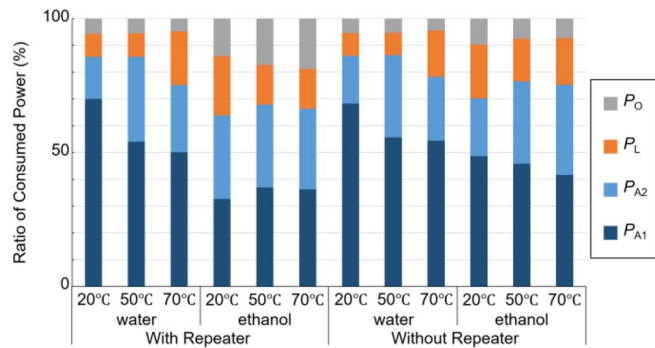


図 6 リピータを用いた電磁界結合型マイクロ波加熱装置のシミュレーション結果

以上より、電磁界結合型マイクロ波加熱システムを 2 次元方向に拡張する

手段としてのリピータの有効性を示すことができた。

(2) 0 次モード共振を活用したマイクロ波加熱領域の拡張に関する基礎研究

図2に示した誘電体基板での0次モード共振器上の電界分布を電磁界シミュレーションと実測実験とで比較した。電界分布のシミュレーション結果および実測結果を図7に示す。ただし、図7の電界分布は誘電体基板から20 mm離れた位置での電界分布であり、0次モード共振器の長さ方向をx軸、幅方向をy軸としてy=0 mm(共振器の真上の軸上)およびy=±5 mmにおけるx軸上の電界分布を計測した。また図7の電界分布は、各計測における最大値で規格化した。規格化電界強度が $1/\sqrt{2}$ 以上になる範囲を均一電界範囲と定義し、図7の結果から均一電界範囲を求めると、実測結果においてはy=-5 mm, 0 mm, 5 mmにおいてそれぞれ62 mm, 67 mm, 63 mmとなった。一般的に、定在波をもつ電磁界が発生する際に規格化電界強度が $1/\sqrt{2}$ 以上になる範囲は、波長の1/4となる。つまり、周波数2.45 GHzのマイクロ波の場合は約31 mmとなる。一方、今回試作した0次モード共振器上の電界分布では、規格化電界強度が $1/\sqrt{2}$ 以上になる範囲が従来の2倍以上となった。よって、この電界分布をマイクロ波加熱に応用できれば、マイクロ波加熱領域が2倍以上に拡張できることが明らかとなった。

また、図2に示した0次モード共振器を利用した電磁界結合型マイクロ波加熱装置の実測評価では、50 mm×50 mm×厚さ1 mmのSiC基板をマイクロ波入力50 Wでマイクロ波加熱したところ、10分程度のマイクロ波加熱でSiCの温度が室温から100℃まで上昇した。以上より、加熱領域を拡張したマイクロ波加熱の原理検証に成功した。

図3に示した導波管型0次モード共振器のマイクロ波加熱実証実験においては、20 mm×100 mm×厚さ1 mmのSiC基板をマイクロ波入力50 Wでマイクロ波加熱したところ、10分程度のマイクロ波加熱でSiCの温度が室温から55℃まで上昇した。またSiC基板が均一にマイクロ波加熱されたことを確認した。

以上より、0次モード共振を活用したマイクロ波加熱領域の拡張に成功した。ただし、試料と同時に0次モード共振器そのものも加熱されることが確認され、マイクロ波加熱効率の向上が今後の課題となることが明らかとなった。

(3) OAMモードを活用した一様マイクロ波加熱の基礎研究

図5に示したOAMモード放射用8素子アレーアンテナから $l = 0, +1, +2$ の各OAMモードを放射した先の電界分布の近傍界測定装置による実測結果を図8に示す。図8に示す電界強度は、各OAMモード内の電界最大値で規格した。図8より、 $l = 0$ のときは中心部分に電界が集中する分布となった。一方、 $l \neq 0$ のときは円環状の電界分布が得られた。また、電波吸収体を被加熱試料とした実証実験では、各OAMモードに対する最適な照射時間割合を設定することにより、 $3.77\lambda^2$ (λ はマイクロ波の波長)の面積内で均一なマイクロ波加熱分布が得られた。

以上より、これらのOAMモードを時分割で電力合成することにより、一様マイクロ波加熱が可能であることを原理的に示した。ただし、今回の実証実験では合成マイクロ波電力が最大16 Wでしか実験できなかったため、十分な温度上昇の確認には至らなかった。今後は各アンテナ素子にマイクロ波電力10 W以上の半導体増幅器を搭載し、マイクロ波加熱による均一な温度上昇が確認できるかどうかを実証する予定である。

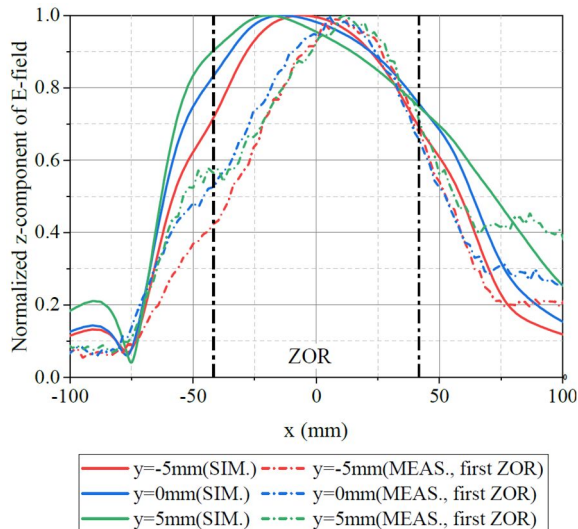


図7 誘電体基板での0次モード共振器上の電界分布のシミュレーションおよび実測結果

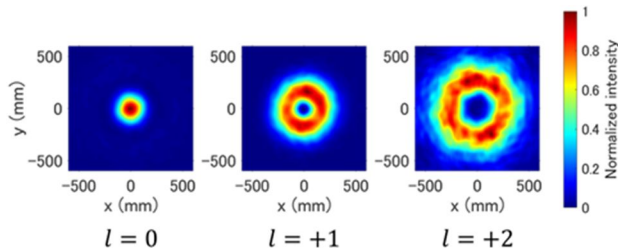


図8 試作アンテナから放射された各OAMモード電界分布の実測結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 鈴木 健斗、三谷 友彦、篠原 真毅	4. 巻 7
2. 論文標題 マイクロ波加熱に向けたOAMモード切り替えによる 電力密度均一化手法	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本電磁波エネルギー応用学会論文誌	6. 最初と最後の頁 25 ~ 34
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.32304/jemeajournal.7.0_25	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Baku Takahara, Tomohiko Mitani, Naoki Shinohara	4. 巻 E107-C
2. 論文標題 Uniform Microwave Heating via Electromagnetic Coupling Using Zeroth-Order Resonators	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Electronics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計18件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 9件）

1. 発表者名 Tomohiko Mitani
2. 発表標題 Current Status and Future Perspective of Microwave Heating Systems Based on Magnetrons and Solid-State Devices
3. 学会等名 4th Global Congress on Microwave Energy Applications (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Baku Takahara, Tomohiko Mitani, Naoki Shinohara
2. 発表標題 Feasibility Study on One-Dimensional Uniform Microwave Heating by Zeroth-Order Resonator
3. 学会等名 4th Global Congress on Microwave Energy Applications (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kento Suzuki, Tomohiko Mitani, Naoki Shinohara
2. 発表標題 Feasibility Study of OAM-Mode Irradiation Patterns for Uniform Microwave Heating
3. 学会等名 4th Global Congress on Microwave Energy Applications (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takero Toyonaga, Tomohiko Mitani, Naoki Shinohara
2. 発表標題 Study on Simultaneous Microwave Heating of Multiple Samples by Semi-Open Type Applicators
3. 学会等名 4th Global Congress on Microwave Energy Applications (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 三谷 友彦
2. 発表標題 世代マイクロ波加熱システムの研究開発および若手研究者ネットワークの形成
3. 学会等名 第16回日本電磁波エネルギー応用学会シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高原 麦、三谷 友彦、篠原 真毅
2. 発表標題 0次モード共振器を用いた電磁界結合型均一マイクロ波加熱の基礎研究
3. 学会等名 第16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 2022年

1. 発表者名 鈴木 健斗、三谷 友彦、篠原 真毅
2. 発表標題 マイクロ波加熱に向けたOAM モード切替による電力密度分布の平均化”
3. 学会等名 第16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 2022年

1. 発表者名 豊永 雄郎、三谷 友彦、篠原 真毅
2. 発表標題 リピータを用いた電磁界結合型マイクロ波加熱装置の検討
3. 学会等名 第16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 2022年

1. 発表者名 Kento Suzuki, Tomohiko Mitani, Naoki Shinohara
2. 発表標題 Feasibility Study of Uniform Microwave Heating by Switching OAM Modes
3. 学会等名 2022 Asia-Pacific Microwave Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takeru Toyonaga, Tomohiko Mitani, Naoki Shinohara
2. 発表標題 Study on Electromagnetic Coupling-Type Microwave Heating Systems with Repeaters
3. 学会等名 2022 Asia-Pacific Microwave Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Baku Takahara, Tomohiko Mitani, Naoki Shinohara
2. 発表標題 Feasibility Study on Electromagnetic Coupled Type Uniform Microwave Heating Using a Zeroth-Order Resonator
3. 学会等名 2022 Asia-Pacific Microwave Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 豊永 雄郎、三谷 友彦、篠原 真毅
2. 発表標題 電磁界結合型マイクロ波加熱システムの次元拡張に関する研究
3. 学会等名 電子情報通信学会無線電力伝送研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 豊永 雄郎、三谷 友彦、篠原 真毅
2. 発表標題 ヒドロゲルに対する高空間分解能マイクロ波加熱の基礎検討
3. 学会等名 第15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 2021年

1. 発表者名 Takeru Toyonaga, Tomohiko Mitani, Naoki Shinohara
2. 発表標題 Basis Study on High Spatial Resolution Microwave Heating for Hydrogels
3. 学会等名 2nd Thailand-Japan Microwave (TJMW) Student Workshp (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomohiko Mitani
2. 発表標題 Study on an innovative microwave heating reactor utilizing electromagnetic coupling technique
3. 学会等名 Pacifichem 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 豊永 雄郎、三谷 友彦、篠原 真毅
2. 発表標題 電磁界結合型マイクロ波加熱装置による複数試料同時加熱の検討
3. 学会等名 2022年 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高原 麦、三谷 友彦、篠原 真毅
2. 発表標題 0次モード共振を用いた均一マイクロ波加熱の基礎研究
3. 学会等名 2022年 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木 健斗、三谷 友彦、篠原 真毅
2. 発表標題 OAMモード照射パターンを利用した一様マイクロ波加熱の基礎研究
3. 学会等名 2022年 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 堀越 智、三谷 友彦、櫻村 京一郎	4. 発行年 2021年
2. 出版社 オーム社	5. 総ページ数 224
3. 書名 光・電波・電磁波の基本と応用がよくわかる本	

〔産業財産権〕

〔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
---------	---------