

PRESS RELEASE (2024/10/23)

## マイクロ波の電磁場の空間分離によりバイオマスを「超」急速熱分解 ～リグノセルロースや食品廃棄物など有機資源の利活用に貢献～

### ポイント

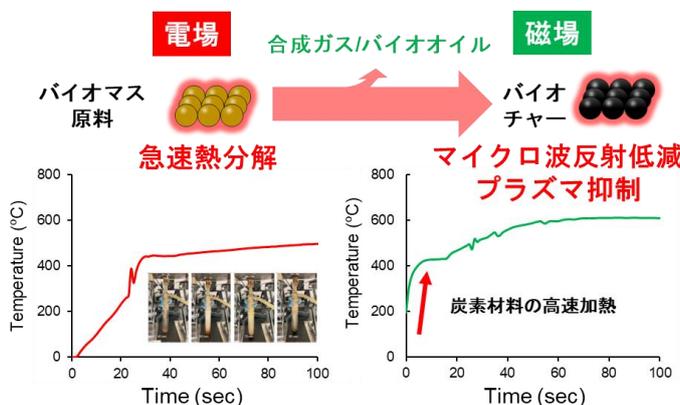
- ① カーボンニュートラル社会の実現に向けてバイオマスなどの有機資源の有効利用が望まれる
- ② 電場/磁場分離したマイクロ波\*<sup>1</sup> を用いたバイオマスの「超」急速熱分解反応を開発
- ③ リグノセルロースや食品廃棄物などの有機炭素資源の有効活用に貢献

### 概要

林地残材や農業残滓などのリグノセルロースや、食品廃棄物といった地域の未利用バイオマス資源は、バイオマス発電燃料や機能性材料として利用の促進が期待されます。バイオマスに由来する炭素材料（バイオチャー）は、炭素を固体として長期間にわたり貯蔵することが可能であり、脱炭素化に貢献することができます。

九州大学の椿俊太郎 准教授、東北大学の福島潤 助教、産業技術総合研究所の山口有朋 研究部門長、みなも株式会社の西岡将輝 博士、東京工業大学（現 東京科学大学）の和田雄二 名誉教授の研究グループは、マイクロ波の電場加熱と磁場加熱の空間的な分離により、効率的にバイオマスを「超」急速熱分解する技術を開発しました。本方法では、半導体式マイクロ波発振器\*<sup>2</sup> と電場・磁場分離型の空洞共振器を用いて、マイクロ波の電場と磁場を分離することで、熱分解反応中のバイオマスの効率的な加熱を実現しました。バイオマスは熱分解によって炭素化が進むと、誘電体から導体に変化するため、マイクロ波の吸収特性が著しく変化します。炭素化したバイオマスはマイクロ波を反射してプラズマが発生してしまうため、マイクロ波の電場による誘電加熱\*<sup>3</sup> では効率的な加熱が困難でした。そこで、マイクロ波磁場による誘導加熱\*<sup>4</sup> を組み合わせることで、炭素化の進んだバイオマスでも効率的にマイクロ波加熱することができるようになりました。さらに、915 MHz を用いた空洞共振器の大型化や、2.45 GHz のフロー式の磁場加熱装置を開発し、高効率化を達成しました。

本研究成果は Elsevier の「Chemical Engineering Journal」誌に 2024 年 9 月 28 日（土）（日本時間）にオンライン掲載されました。



マイクロ波電場による急速熱分解と、マイクロ波磁場によるバイオチャーの急速加熱の概念図

### 研究者からひとこと：

家庭用の電子レンジにも用いられるマイクロ波加熱は、物質を効率的かつ高速に加熱できます。特に炭素材料はマイクロ波によって極めて高速で加熱されることが知られていますが、加熱中にプラズマが生じることが課題です。そこで、IH調理にも用いられる磁場を用いた誘導加熱を組み合わせることで、プラズマの形成を抑えてバイオチャーを効率的に加熱すること、さらに、連続式の磁場加熱に成功しました。

## 【研究の背景と経緯】

カーボンニュートラルな化学産業の実現に向けて、従来の石油化学工業に代わり、バイオマスやCO<sub>2</sub>などの炭素資源を効率的に活用することが期待されています。バイオマスの急速熱分解によってガス成分（水素や一酸化炭素などの合成ガス）、液体成分（タール）、固体成分（バイオチャー）に迅速かつ効率的に分離することができます。従来のバイオマスの熱分解では、バイオマスと熱媒体を接触させることで、急速な加熱を行ってきました。しかし、この方法ではバイオマスを微粉末化する必要があり、プロセスの効率向上の障壁となってきました。

バイオマスの急速熱分解にマイクロ波を用いることで、バイオマスを内部から直接加熱し、微粉末化することなく急速熱分解をすることができます。我々は、半導体式マイクロ波加熱装置と空洞共振器を用いてマイクロ波を試料に集中して照射することにより、従来の電子レンジ型装置よりもはるかに高速でバイオマスの急速熱分解が可能であることを報告してきました（Tsubaki et al., Green Chem 2020）。一方、バイオマスの急速熱分解が進むと、試料の炭素化が進み、導体となるため、マイクロ波が反射されてプラズマを形成してしまうことが問題でした。

## 【研究の内容と成果】

マイクロ波を用いたマイクロ波の電場と磁場を空間的に分離した空洞共振器と、半導体発生器を備えたマイクロ波発振器を組み合わせた熱分解炉を開発し、マイクロ波によるバイオマスの「超」急速熱分解を達成しました。本手法は、竹粉や、スギ木粉、ヤシ殻、クロレラ（微細藻類）、麦わら粉、もみ殻粉の急速熱分解に、高い有効性を示しました。モデル原料として竹粉を用い、マイクロ波の電場加熱によって誘電加熱<sup>4</sup>したところ、わずか30秒程度で急速昇温し、急速熱分解が促進できることを見出しました（図1A）。この間、主に水素と一酸化炭素で構成された合成ガスが生じるとともに（図1A）、リグニンの断片化によって生じたタールが生成され、空冷トラップで効率的に回収することができました（図1BC）。これより、マイクロ波電界では、バイオマスの急速熱分解が促進され、合成ガスとタールが短時間で分離されることを明らかにしました。

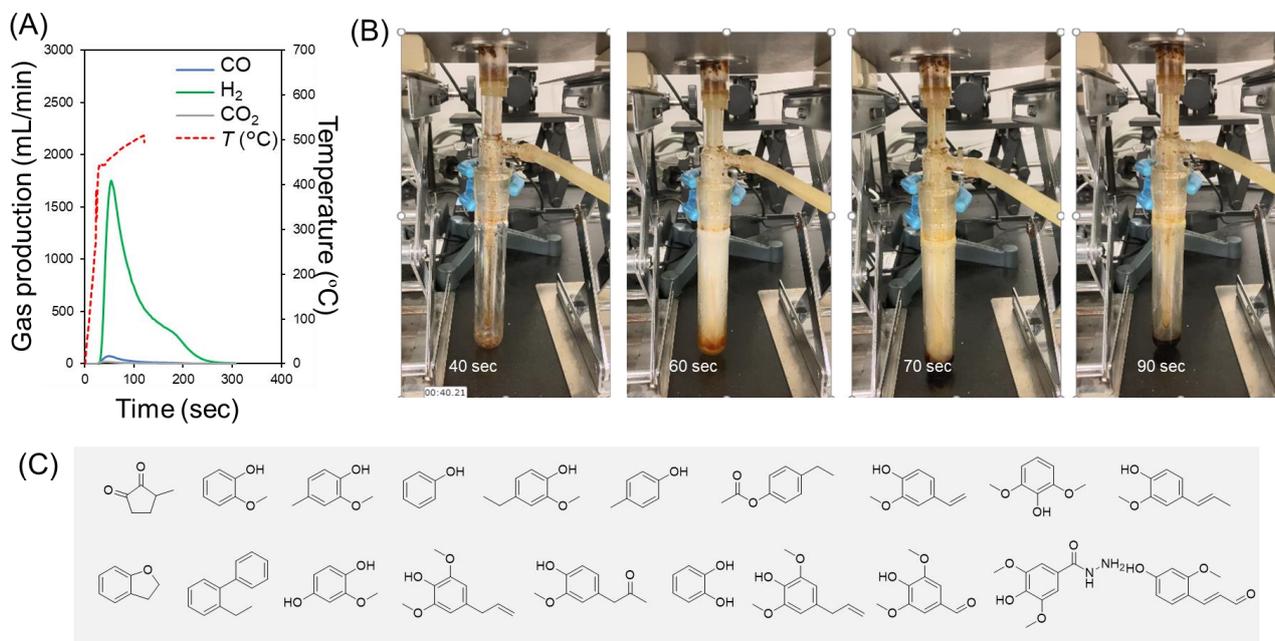


図1. 半導体式マイクロ波装置（915 MHz）を用いた電場加熱による、竹粉の急速熱分解

(A)本装置を用いた竹粉の加熱およびガス生成挙動。

(B)竹粉の急速熱分解中に生じたタール成分の回収の様子。(C)タールを構成する成分。

一方、マイクロ波電場で竹粉の炭化が進むと、マイクロ波の反射が顕著に大きくなりました。これは、バイオマスの炭化が進むことで導電性が増し、マイクロ波が反射されることが原因です。そこで、マイクロ波の磁場を用いて誘導加熱<sup>5</sup>することで、マイクロ波の反射を抑えて、炭化の進んだ竹粉を効率的に加熱しました(図2A)。また、マイクロ波で急速加熱した場合、電気炉を用いた伝熱加熱よりも、欠陥が多くより非晶質なバイオチャーが得られることが明らかとなりました(図2B)。

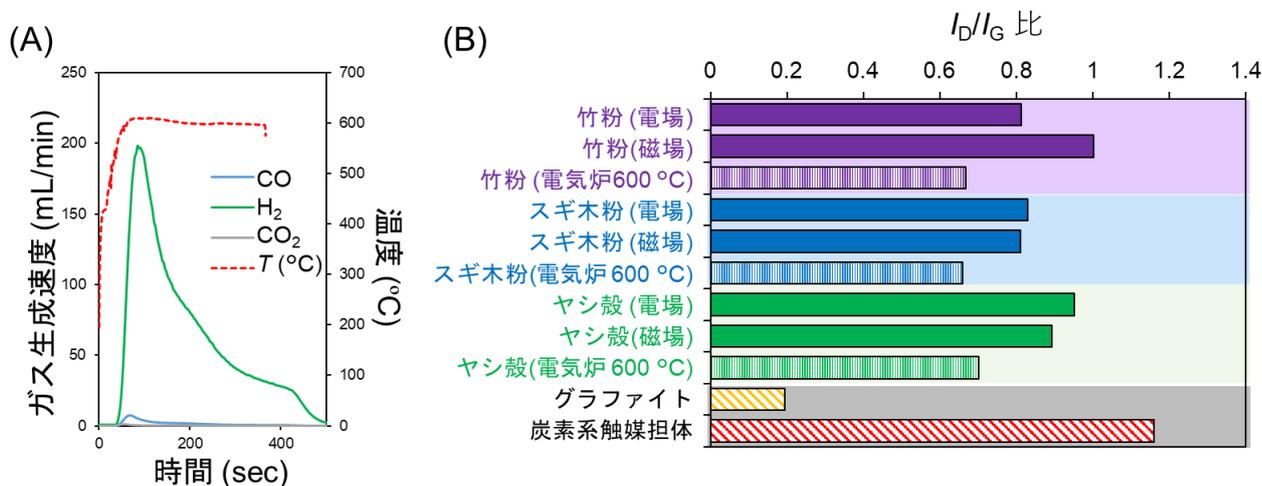


図2. バイオマス炭化物のマイクロ波磁場加熱

(A) 竹粉の半炭化物のマイクロ波磁場加熱およびガス成分の生成挙動。  
 (B) 竹粉やスギ木粉、ヤシガラの炭素化物の  $I_D$  (非晶質) /  $I_G$  (結晶質) 比。

さらに、上記のマイクロ波電場および磁場加熱を組み合わせた急速加熱法のスケールアップも達成しました。大型の空洞共振器を開発し、既報と比較して20倍の原料を熱分解することができました。さらに、フロー式マイクロ波磁場反応装置を開発し、電場で半炭化させた竹粉を連続供給しながら磁場加熱することで、より純度の高い炭化物が得られることを実証しました。

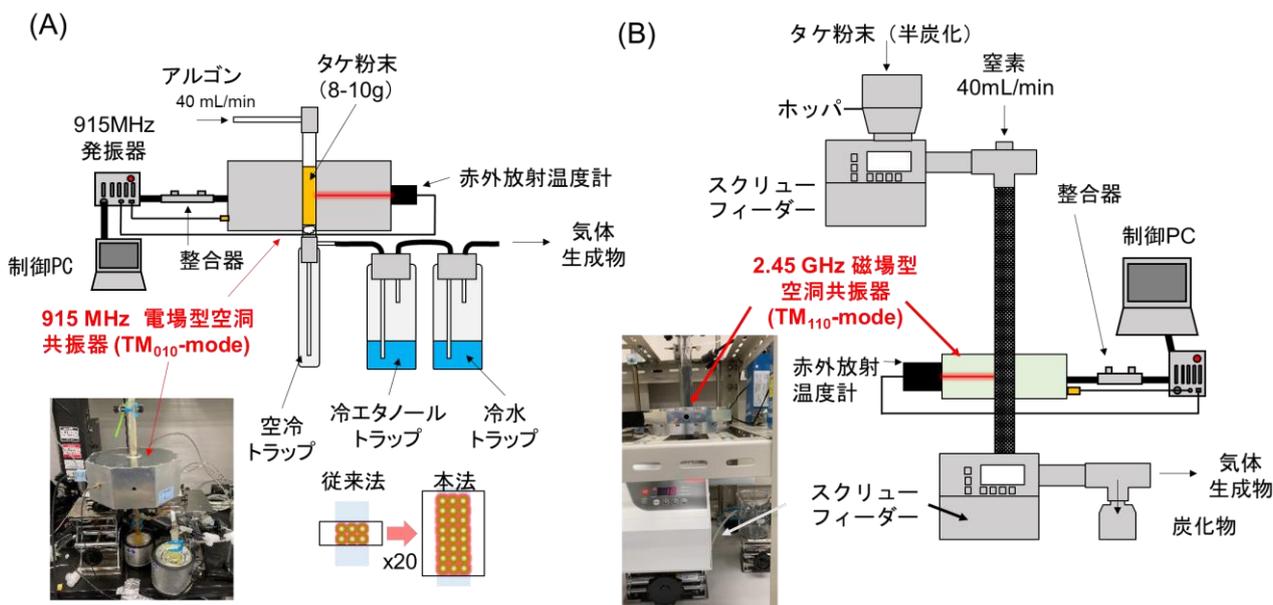


図3. マイクロ波「超」急速熱分解のスケールアップ

(A) 電場加熱。(B) フロー型磁場加熱。

## 【今後の展開】

本研究では、半導体式マイクロ波加熱装置と、電場/磁場分離型の空洞共振器を用いることで、小型のバイオマス「超」急速熱分解装置を開発し、その有効性を実証しました。今後は、リグノセルロースや、食品廃棄物、医療廃棄物、汚泥などの有機廃棄物を急速熱分解し、効率的に合成ガスやタール、チャーに分画する方法として応用が期待されます。また、バイオマスの発生するオンサイトで、オンデマンドにバイオマスを急速熱分解する小型で可搬型のマイクロ波熱分解装置の開発へと応用していきたいと考えています。

## 【用語解説】

### (※1) マイクロ波

周波数が 300 MHz~30 GHz の電磁波の一種で、通信（携帯電話、WiFi など）やレーダーとして広く利用される。2.45 GHz や 5.8 GHz の特定の周波数は、家庭用電子レンジや産業用加熱装置としても利用される。スケールにアップには波長の長い 915 MHz が有効であるが。さらに低い周波数（300 MHz 以下）は高周波とも呼ばれる。

### (※2) 半導体式マイクロ波発振器

従来の電子レンジは真空管（マグネトロン）式であり、位相や周波数、出力が経時的に変化しやすい。一方、半導体式マイクロ波発振器ではこれらを精密に制御することができ、これによって従来の電子レンジでは困難な、繊細なマイクロ波加熱制御が可能となった。さらに、近年、高出力の半導体によるマイクロ波加熱装置が普及しつつある。

### (※3) 誘電加熱

マイクロ波や高周波の電場によって、水などの双極子の回転緩和に伴って発熱が生じる現象。

### (※4) 誘導加熱

金属や炭素などの導体に磁場を与え、表面に生じる渦電流を生じ、ジュール加熱が生じる現象。

## 【謝辞】

本研究は、環境研究総合推進費 3RF-1801（若手枠）、3MF-2302（ミディアムファンディング枠）、JSPS 科研費 基盤研究 (B) 23K25033, JSPS 挑戦的研究（萌芽）23K18546、旭硝子財団研究助成、松籟科学技術財団研究助成による支援を受けました。

## 【論文情報】

掲載誌：Chemical Engineering Journal

タイトル：Process intensification of the ultra-rapid pyrolysis of bamboo by spatially separated microwave electric and magnetic fields

著者名：Shuntaro Tsubaki, Jun Fukushima, Aritomo Yamaguchi, Masateru Nishioka, Yuji Wada

D O I : doi.org/ 10.1016/j.cej.2024.156260

【お問合せ先】

<研究に関すること>

九州大学大学院農学研究院

准教授 椿 俊太郎（ツバキ シュンタロウ）

TEL：092-802-4805

Mail：tsubaki.shuntaro.318@m.kyushu-u.ac.jp

<報道に関すること>

九州大学 広報課

TEL：092-802-2130 FAX：092-802-2139

Mail：koho@jimu.kyushu-u.ac.jp

**Kyushu  
University** VISION 2030  
総合知で社会変革を牽引する大学へ