

工業材料

ENGINEERING MATERIALS



2018
VoL.66 No.1

特集

次世代パワー半導体デバイスを用いたマイクロ波加熱・エネルギー応用技術

新連載 多様な材料開発を支える試験・評価・解析評価技術
— 神奈川県立産業技術総合研究所

モノづくり
部品大賞

ものづくり生命文明機構理事長賞受賞

フィルムなど基材レスを実現した粘着テープ

メカニカルファイバーシリーズ

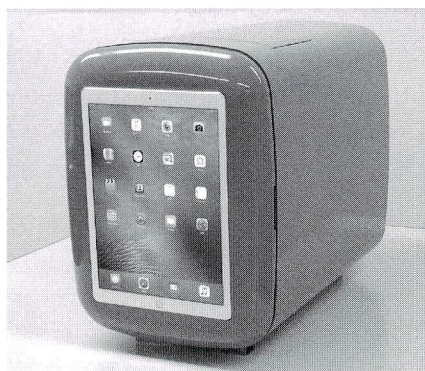
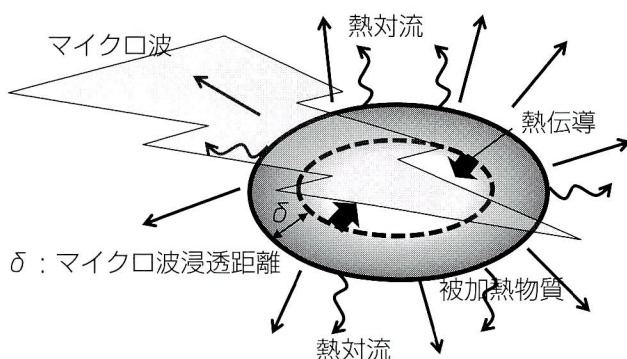
粘着剤の柔軟さと接着剤の硬さ、双方の強みを両立
100 μ m以下の薄さで軽さと省資源化を実現

KGK

多機能化技術で貢献する
共同技研化学株式会社

<http://www.kgk-tape.co.jp>

次世代パワー半導体デバイスを用いた マイクロ波加熱・エネルギー応用技術



GaN半導体式発振器を組み込んだインテリジェント電子レンジ。安定したマイクロ波を発生することができ、小型・軽量で省エネ化を達成。



GaN半導体発振器を接続したドローンで植物にマイクロ波を照射し育成に有効な刺激を与える実験

LEDや電源への応用が進んでいる次世代パワー半導体デバイスの次の利用先としてRFパワーデバイスが注目されている。特にマイクロ波加熱やエネルギー応用のために半導体発振器の研究が欧米日を中心に加速している。本特集では、パワーデバイスを利用したマイクロ波半導体発振器の利点と問題点を解説し、自動車・材料プロセス・環境保全・植物育成などへの応用例を紹介する。

解説

RF パワー半導体デバイスの マイクロ波加熱・エネルギー応用への広がり

Horikoshi Satoshi
上智大学 堀越 智

理工学部物質生命理工学科 准教授
マイクロ波サイエンス研究センター センター長
〒102-8554 東京都千代田区紀尾井町7-1
☎03-3238-4662 e-mail horikosi@sophia.ac.jp

▶特集記事について

近年、パワー半導体の注目と共に、RF(高周波)パワー半導体、半導体材料、電気デバイスなどを解説した専門書が増加している。一方、これらを利用したマイクロ波加熱やエネルギー分野を総括した専門書はほとんどない。

このニーズに対して、本特集ではRFパワー半導体を用いたマイクロ波加熱やマイクロ波エネルギー分野への応用を各専門家らによって実例を交えて解説していただいた。特に、従来のマイクロ波加熱やエネルギー応用技術と比較して、RFパ

ワー半導体を使うことによる利点と問題点をわかりやすく解説していただいた。前半では、マイクロ波加熱やパワー半導体デバイスの基礎について、後半では、その応用分野である自動車、プラズマ、水処理、化学合成、電子レンジ、植物育成、ハイブリッド電源、無線伝送を取り上げた。

▶半導体デバイスへの転換

1946年にJ. EckertとJ. MauchlyがENIAC(Electronic Numerical Integrator and Computer)を発表し、世界でも最も早い時期につくられた電気式計算機として登録された(図1)。この初期型コ

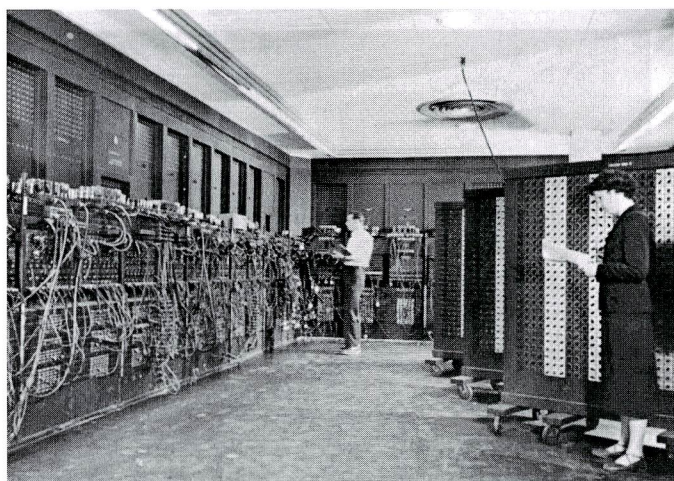


図1 プログラミングされるENIAC (U.S Army Photo, <https://ja.wikipedia.org/wiki/ENIAC>)

ンピュータは17,468本の真空管を150kWで駆動させ、1秒間に5,000回の加算が可能になった。現在では考えられないサイズと消費電力であるが、当時の計算機としては驚異的な演算スピードであったと報告されている。現在のパソコン(CPU: Intel Core i7)は、20~30Wの消費電力で1秒間に 5.3×10^9 回の計算を行うことができるため、ENIACと比べると別次元の計算機に進化をしている。この進化はなにに由来するものであろうか。

原始的な生物が革新的進化を遂げられたのは、ミトコンドリアを体内に導入し、時間や空間的制限を超越することに成功したためであるが、コンピュータの進化は、その頭脳が真空管から半導体へ変わったことに由来する。この「真空管デバイスから半導体デバイスへの転換」はコンピュータ分野だけに収まらず、近年でもそれは続けられてきた。例えば、大画面化に伴いブラウン管(真空管)TVから液晶(半導体制御)TVに切り替えが進んだ。また水銀の健康問題から蛍光灯(真空管灯)からLED(半導体灯)に切り替えが進んだ。

このように日用品を見回しても真空管を利用した製品を目にすることはなくなった。しかし、あまり知られていないことではあるが、電子レンジを駆動させるためのマイクロ波発振器であるマグネトロンは真空管技術を利用しており、もししたらこれが最後の真空管製品なのかもしれない。

▼パワー半導体デバイスの市場

半導体というとパソコンのCPUやメモリなどをイメージする読者も多いと思われる。これらは演算や記憶をするための半導体デバイスであり、本特集で解説しているパワー半導体とは異なる。パワー半導体とは、高い電圧、大きな電流を扱うことができる半導体の総称で、通常の半導体とは違った構造をもっている。その用途は、電圧や周波数の変換、直流から交流や交流から直流への変換など、主に電力変換の用途に使われる。近年では、自動車や鉄道といった産業機器用途から、再生可能エネルギー用途、さらにはエアコンや冷蔵庫などの民生機器用途の電源まで幅広く用いられている。

パワー半導体デバイス分野は日本企業が強みを有している分野であり¹⁾、市場規模がより拡大することが予測されている。世界のパワー半導体デバイスの市場規模は、2005年に110億ドルから2013年には147億ドルへ成長し、2018年には約190億ドルに達すると見込まれている。応用分野別の世界パワー半導体デバイス市場規模の推移を図2に示す。2010年以降の市場は、産業機器、民生機器、自動車などへの電源利用が大きなシェアを占めており、2013年にはこれらが全体の77%を占めた。一方、パワー半導体デバイス市場におけるマイクロ波半導体発振器(加熱用途)の割合

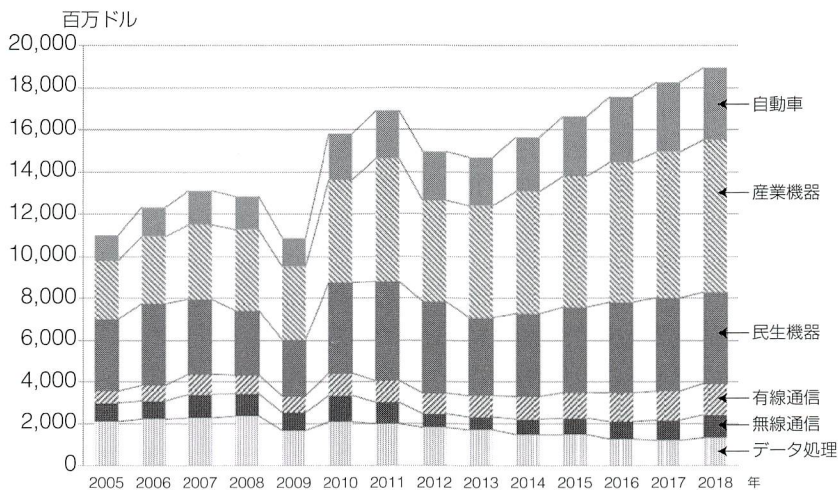


図2 世界のパワー半導体デバイス市場の応用分野別の推移¹⁾

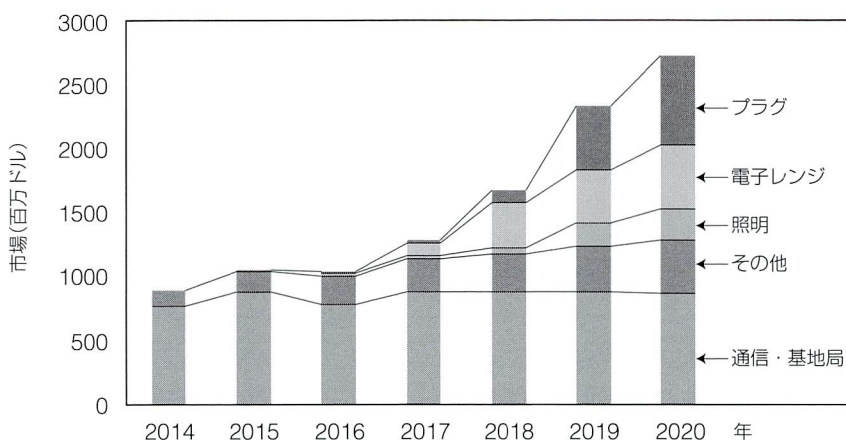


図3 RFパワー半導体デバイスの市場変化

は1%以下であるが、すでに電源に代わる新しい分野への技術応用が求められており、マイクロ波加熱やマイクロ波エネルギー分野への応用が期待されている。

▼RFパワー半導体デバイス

パワー半導体デバイスの中で、マイクロ波発生源として利用されているRFパワー半導体デバイスにおける各用途別の市場動向を図3に示す(欧州企業調べ)。マイクロ波の通信応用である放送や通信基地局の需要はそれほど水位が大きく変動しておらず、今後は市場の飽和が予想されるが、照明、電子レンジ、自動車燃費改善などの用途が著しく市場が向上すると予想されている。また、2020年には、その需要が放送や通信基地局の需要に切迫し、それ以降は追い越すことが予想されている。したがって、今後この分野の利用がRFパワー半導体デバイスの牽引を行うと予想されている。また、調査対象から除外されていたため図3には含まれていないが、プラズマプロセッシング用の電源としての市場があり、マグネトロンからRFパワー半導体デバイスへの代替えが一部ではすでに進んでいる。

一方、わが国ではマイクロ波化学やマイクロ波材料プロセスによる新分野に注目が集まっている。特に、マイクロ波化学はバイオ分野での利用

が盛んであり、バイオ材料は精密な温度管理が必要であることからRFパワー半導体デバイスに期待が寄せられている。一方、米国では医療へのRFパワー半導体デバイスの利用が注目されている。

RFパワー半導体のマイクロ波加熱やマイクロ波エネルギー応用は発展途上を続けている新分野である。しかし、その技術革新と市場への適応性は飛躍的に進んでおり、世界的注目度も高い。その利用方法は、既存のマグネトロンからの代替えに留まらず、マイクロ波を利用していない分野への導入事例もあり、今後目の離せない分野といえる。また、市場の代替えにつながる技術であることから、半導体デバイスメーカーおよびマイクロ波装置メーカーの両面からの期待も大きい。

本特集では、イノベーションを秘めた魅力的な事例も数多く報告されており、アイデア次第ではこれらが引き金となって、更なる新分野への利用につながるかもしれない。本特集を読んだ読者が、それらに繋がる「ヒント」を得ていただければ幸いである。

参考文献

- 1) 平成26年度特許出願技術動向調査報告書

度による温度差を見出すことができなかつたであろう。また、パワー半導体デバイスの有用な使い方として、周波数の変化を追うことができるためサンプル内の誘電特性の変化を議論することもできる。

今後、マイクロ波加熱の特性を活かしたシンプルな化学反応系を構築できれば、基質・官能基への選択的マイクロ波照射、精密制御の可能性など反応促進メカニズムに踏み込み、新しい発見につながると思われる。

▼まとめ

今後、さらなる高品質な工業材料の需要が益々高まるなか、マグネトロンと比較して高精度の制御性と省エネ性をもつパワー半導体デバイスは、マグネトロンとは異なる単一周波数で均一なマイクロ波加熱を提供できる。マイクロ波合成装置メーカーには、ユーザーの需要に応えるパワー半導体デバイスの特性が発揮できるマイクロ波装置開発が望まれる。ただし、ISMバンドで使用できる可能な2.45GHz±50MHzのわずか100MHzで、比誘電率80の水から比誘電率4のトルエンなどの低誘電率溶媒までの幅広い化学材料に対して対応が求められることがマイクロ波加熱を難しくしている大きな原因であり、各装置メーカー共通の悩みどころであろう。加えて、マイクロ波装置すべてにいえることであるが、マイクロ波の浸透深さの観点から、産業スケールへの対応は根本的な課題である。

また、本稿でマイクロ波周波数は2.4~2.5GHzを念頭に書いたが、マイクロ波を漏洩させなければISM周波数帯外の高周波側と低周波側の応用も考えられる。パワー半導体デバイスを活かしたマイクロ波化学装置は、ラボ機という位置づけのマイクロ波装置の現状から脱して、無機合成、ファインケミカルズ、医薬品合成などへの貢献が期待される。

参考文献

1) F. Kishimoto, T. Imai, S. Fujii, D. Mochizuki, M. M. Maitani, E. Suzuki, and Y. Wada : Microwave-enhanced photocatalysis on CdS quantum dots-Evidence of acceleration of photoinduced

electron transfer, *Scientific reports*, 5, 2015.

- 2) D. Wada, J.-i. Sugiyama, H. Zushi, and H. Murayama : An optical fiber sensing technique for temperature distribution measurements in microwave heating, *Measurement Science and Technology*, 26, p. 085105, 2015.
- 3) S. Horikoshi, T. Nakamura, M. Kawaguchi, and N. Serpone : Enzymatic proteolysis of peptide bonds by a metallo-endoproteinase under precise temperature control with 5.8-GHz microwave radiation, *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic*, 116, pp. 52~59, 2015.
- 4) B. Gutmann, A. M. Schwan, B. Reichart, C. Gspan, F. Hofer, and C. O. Kappe : Activation and deactivation of a chemical transformation by an electromagnetic field: evidence for specific microwave effects in the formation of Grignard reagents, *Angewandte Chemie*, 123, pp. 7778~7782, 2011.
- 5) T. Yoshimura, T. Suzuki, S. Mineki, and S. Ohuchi : Controlled Microwave Heating Accelerates Rolling Circle Amplification, *PLoS one*, vol. 10, p.e0136532, 2015.
- 6) T. Yoshimura, T. Hanai, S. Mineki, J. Sugiyama, C. Sato, N. Ohneda, T. Okamoto, and H. Odajima : Electromagnetic Field Analysis of Deoxyribonucleic Acid Rolling Circle Amplification in TM010 Resonator, *IEICE Transactions on Electronics*, vol. 99, pp. 1287 ~ 1294, 2016



応用技術

RF パワー半導体デバイスを用いた 電子レンジや植物有効育成への応用

Horikoshi Satoshi
上智大学 堀越 智

理工学部物質生命理工学科 准教授
マイクロ波サイエンス研究センター センター長
〒102-8554 東京都千代田区紀尾井町7-1
☎03-3238-4662 e-mail horikosi@sophia.ac.jp

▶インテリジェント電子レンジ

1. 電子レンジ

筆者は講演会や講習会で必ず始めに出すスライドがある。「あなたは電子レンジを使ったことがありますか?」といった質問である。100回以上このスライドを使っているが、「使ったことがない」と手を挙げられたのは3名だけであった。現在、日本における電子レンジの世帯普及率は98%以上¹⁾で、冷蔵庫や洗濯機と並ぶ家電の代表といえる。一方、ヨーロッパで頼まれた講演会で同じ質問をすると、場合によっては30%ぐらいの聴講者(フランスが特に多かった)が手を上げることもある。これは食文化の違いに由来すると考えられる。また、ベレストロイカ以前のソ連では、電子レンジを使うと高カロリーの食べ物が簡単に加熱できることから、国民の成人病防止のために電子レンジの使用を禁止していたという話も聞いたことがある。

マイクロ波加熱は物質を簡便に短時間で加熱できる特徴があるため産業でも古くから利用されており、例えば1960年代より車部品に使われるゴムのマイクロ波加硫、70年代よりセラミックスの焼結、80年代よりグアニジンのマイクロ波化学合成、その他として環境浄化、乾燥、医療、農業、木材分野で利用されている²⁾。

2. 繊細で部分加熱が可能な電子レンジがなぜ必要なのか?

1922年に設立されたアメリカの軍需製品メーカーのレイセオン社は、レーダー用マグネトロンを製造していたが、その技師であるパーシー・スペンサーがマグネトロンの調整中にポケットの中のチョコバーが溶けていることに気づき、食品加熱への応用実験を進めた。その後、レイセオン社は世界初の電子レンジ(レーダーレンジ)の販売を開始し(47年)、電子レンジの歴史がスタートした。

テレビなどで電子レンジ誕生秘話をセレンディピティ(偶発力)の例として取り上げられることがあるが、日本でも戦時中に海軍の島田実験所でレーダーの実験を行うときは、「よくサツマイモを装置の近くに置いておいた」という記録が残っており³⁾、これは装置から漏れたマイクロ波で焼き芋ができることを当時の研究者たちは経験的に知っていたことを意味する。

電子レンジが初めて販売された当時、その開発者らは加熱速度があまりにも速いことから、将来の熱源はすべてマイクロ波加熱になると考えた。しかし、当時のアメリカ人マイクロ波加熱専門家の予想では、電子レンジを世間は受け入れないと予想した⁵⁾。しかし実際には予想を裏切り、簡単に食品加熱ができる「便利さ」が世間に受け入れられ、世間に広まった。

我が国の国産第一号の電子レンジは1962年頃

に業務用として発売され、現在では一家に1台が当たり前の家電の一つである。

一方で電子レンジ市場の動向はどうであろうか？ 表1に世界における電子レンジの販売台数を上位5位までをまとめた⁴⁾。2008年から2014年の世界的需要台数の推移はあまり変化していないが、我が国の需要は低下していることが分かる。これは電子レンジの買い替えサイクルが10年といわれていることも関係しているが、電子レンジが「食文化」を変えるような大きなイノベーションを行ってないことも要因として予想できる。また、家電量販店に行くと電子レンジの性能の進化が年々続いていることが紹介されるが、その多くは高温スチーム、熱風、調理法操作、温度管理などであり、電子レンジ加熱の基本であるマイクロ波加熱の技術的革新が含まれることはなく、マイクロ波加熱はすでに成熟した技術として位置づけられている。

3. 半導体式発振器の利用

現在、個食化が進み様々な種類や形態の食べ物が販売されている。一方、その食品の加熱方法の個性はほとんどの食事に加味されていない。特にスーパーやコンビニなどで調理済み食品の温めなおしには電子レンジが活躍するが、個人に合わせた温度設定を行うことができない。もしこれができる電子レンジがあれば、新しい食文化のイノベ

表1 電子レンジの国別需要台数ランキング(台数:千台)⁴⁾

2008年			2014年		
1位	アメリカ	11,340	1位	中国	12,235
2位	中国	6,294	2位	アメリカ	9,740
3位	ロシア	4,400	3位	ブラジル	4,830
4位	イギリス	3,426	4位	ロシア	3,858
5位	日本	3,357	5位	イギリス	3,352

ーションに繋げることができると考え、その技術要素として、電子レンジのマイクロ波源をRFパワー半導体式発振器(半導体式発振器)に切り替えた。昔から半導体式発振器を電子レンジに利用する試みがあったが、装置サイズや価格面で利用できるものがなく、実用化にはいたらなかった。しかし、近年では発振器の超小型化に成功し、大量生産されれば販売価格も現行機と同価格で販売できると試算されている。

電子レンジに半導体発振器を搭載する利点は何であろうか？

例えば、電子レンジに内蔵されているマグネトロン式発振器から発生するマイクロ波周波数は $2.45 \pm 0.2\text{GHz}$ に分布しているが、半導体式発振器から発生するマイクロ波の周波数は 2.45000GHz であり、ゆらぎのない非常に安定したマイクロ波を発生させることができる(図1)。この特徴を利用するとマイクロ波の位相を精密に

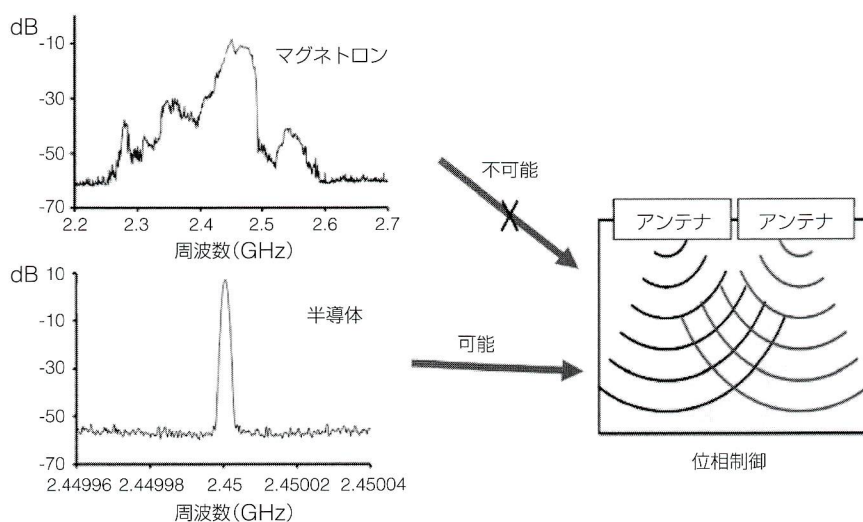


図1 RFパワー半導体式発振器とマグネトロン式発振器のスペクトル比較と位相制御のイメージ^{6), 7)}

	マグネトロン式発振器	半導体式発振器
出力	30W~kW	無限大(合成波)
1kW出力に対する電源重量	6kg	0.5kg
1kW出力に対する印加電圧	1kV	0.05kV
マイクロ波変換効率	70~80%	50~70%
周波数コントロール	困難	可能
加熱の均一性	ターンテーブルや回転アンテナなど	プログラム可能
寿命	500~1000時間	20年
価格	安価	高価(改善)

表2 RFパワー半導体式発振器とマグネトロン式発振器の機能および性能の比較^{6), 7)}



図2 インテリジェント電子レンジ(第4号機)

制御することができるため、電子レンジ庫内の空間で位相合成し、食品の選択加熱(狙った食品だけを温められる)や食品ごとに適温加熱を行うことができる。

また、本方式では必要最低限の加熱を行うことができるため電子レンジの省エネ化を達成できる利点がある。

一方、電源を小型化できることから片手で持てるような小型軽量の電子レンジを試作することもできる。これ以外にもマグネトロン式発振器に対する半導体式発振器の利点は多く、それらは表2にまとめた。

4. インテリジェント電子レンジの試作

筆者たちは企業の協力のもとで半導体式発振器を組み込んだ電子レンジの開発を進め、現在は試作第4号機にまで至った(図2)。

半導体式発振器の利点はマグネトロン式発振器より著しく小型化できる点にあるため、4台の半導体式発振器(GaN)を内蔵した。また、電子レン

ジの扉には、タブレット型コンピュータが埋め込まれており、加熱温度や加熱場所を視覚的に確認できる。電子レンジ内部には食品の形状、色、温度分布を観察するためのカメラが設置されており、これらも扉のタブレットで観察できる。さらに、電子レンジで温めた食品に対する様々な情報は、無線LANを通して加熱の好みや、個食の特徴を解析するための蓄積データとして利用することもできる。

次節からは、初期型インテリジェント電子レンジを用いた食品加熱装置の実施例を紹介する^{6), 7)}。

5. 均一加熱の実証実験

電子レンジの問題点の一つとして庫内の食品が均一に温まらないことが挙げられる。これを改善するために、ターンテーブルや回転アンテナが使用されてきたが、本試作レンジは狙った場所を繊細に温めることができるため、これらを用いない均一加熱を試みた。同じサイズのカップに同量の水を入れ、インテリジェント電子レンジ内に置き複数のアンテナからマイクロ波照射を行った(図3)。2つのカップの水の温度が同じようになるように制御をしながらマイクロ波加熱を行うと、それぞれの水の昇温速度は同じように上昇した。一方、カップAだけを選択加熱するように機械へ指示すると、カップAは100℃近くまで水温が上昇するが、カップBは50℃程度に止めることができた。

6. 選択加熱の実証実験

コンビニで販売されているお弁当を用いて、各具材に対する選択加熱の実験を行った。含まれている具材のマイクロ波の加熱のされやすさである $\tan \delta$ を測定すると、ごはんが具材よりも低い値

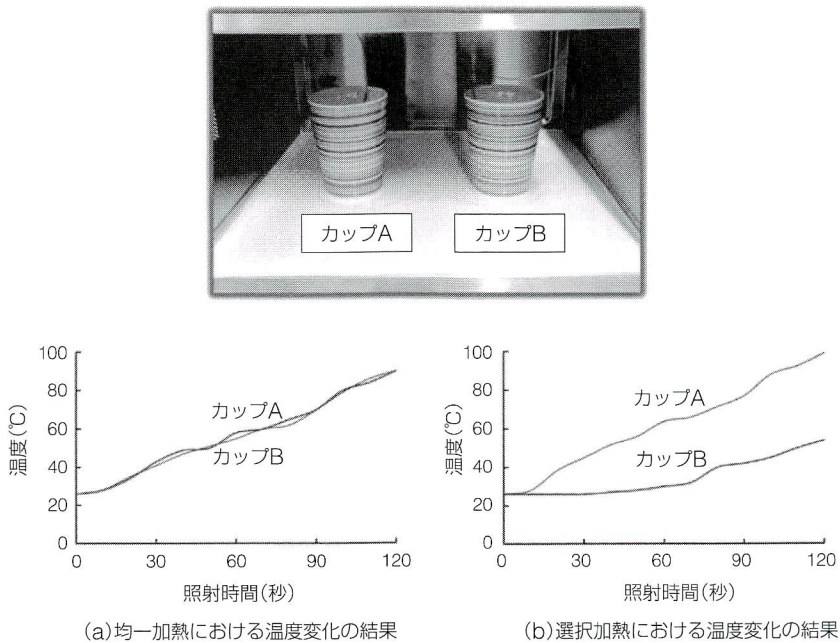


図3 インテリジェント電子レンジによる同種の水の加熱実験^{6), 7)}

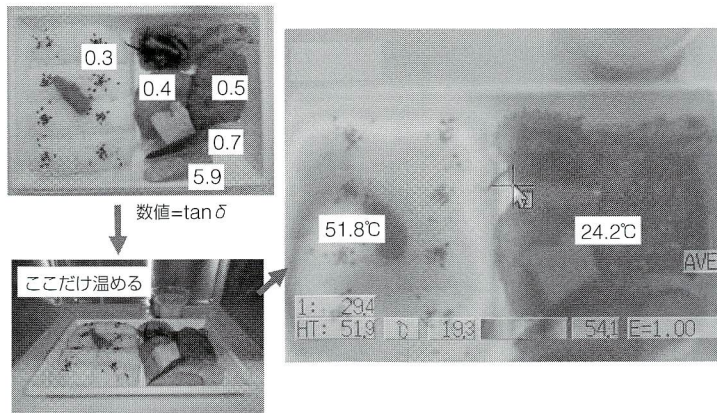


図4 インテリジェント電子レンジによるお弁当内のご飯の選択加熱をサーモグラフィーで観察した様子^{6), 7)}

を示した。そこで、このお弁当の食材の中で最も温めにくいごはんの選択加熱を行った(図4)。ごはんの加熱を電子レンジに指示すると、ごはんの温度が50℃以上に加熱されても具材の温度はほとんど上がらないことが分かった。

7. 繊細加熱の実証実験

半導体発振器はマイクロ波を微小出力で発振することができるため、アイスクリームの適温解凍を行った。冷凍庫から出したばかりのアイスクリームは-7.6℃であり、食べたときの食感が悪い。

インテリジェント電子レンジを用いれば微弱なマイクロ波を食品の温度をモニターしながら照射できる。約15秒の解凍で-7.6℃のアイスクリームは-2.3℃に加熱することができ、食感を向上させることに成功した。

一般に、アイスクリームを食べごろに解凍するには、室温で数十分間自然解凍するしかない。誰もやらないと思うが、既存の電子レンジでアイスクリームの解凍を行うと、微弱な出力制御ができないため、数秒の加熱で液体のアイスクリームに

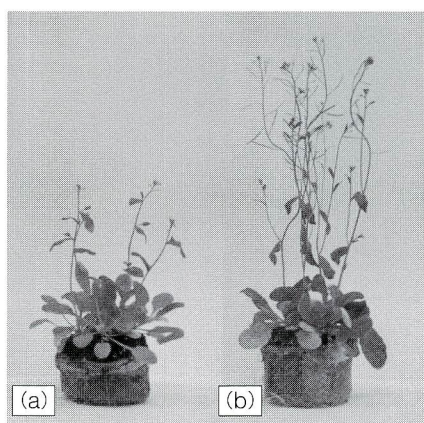


図5 無刺激(a)およびマイクロ波有効刺激を与えた(b)シロイヌナズナの成長比較⁹⁾

なってしまう。インテリジェント電子レンジを用いれば微弱なマイクロ波を繊細加熱へ利用できるため、「食べごろに解凍」を行うことができる。

8. 繊細かつ選択加熱の実証実験

寿司屋で海鮮丼を注文すると、ご飯は10℃強の温度で、海鮮具材は3℃くらいであることが分かる。海鮮丼のような異なった食材が一カ所に盛り付けられ、さらに繊細に加熱をしなければならぬ場合、選択加熱を繊細に行わなければならない。実際に、模擬的な海鮮丼を作り冷蔵庫で1時間冷やすと、全体が約1℃程度に冷却された。そこでごはんを10℃に、海鮮具材を3℃になるように電子レンジに指示を出した。微弱なマイクロ波を選択的に海鮮丼に照射すると、海鮮具材を温めることなくご飯を適温に調整できることを実証した。

▼植物の有効育成

1. マイクロ波植物有効育成法

多くの読者が「マイクロ波で植物を有効に育成できる」と聞いて、不思議に思う人が多いのではないだろうか。野菜(植物)を電子レンジ(マイクロ波)で調理加熱することはあっても、育成に利用した例はないと考えられる。よく「どうしてマイクロ波を植物に当てようと思ったの?」と聞かれることが多い。マイクロ波を植物に照射した理由は、事前に次のイメージを想像していたことによる。

植物は水と二酸化炭素から光をエネルギーとして自分の体を作るが、マイクロ波も光と同じ電磁波に分類されるエネルギーであるため、植物はマイクロ波も受け入れてくれると考えた。しかし、光とは波長が異なるため、植物の体の中の分子レベルでは光とは異なったエネルギー作用があり、植物はこれを良い刺激と感じてくれればと考えた。また、マイクロ波は人工的に作られた電磁波であり、自然界では存在しないため、現在に至る植物の進化の過程で、マイクロ波を浴びたことはなかったはずであり、これも適度な刺激につながると考えた。

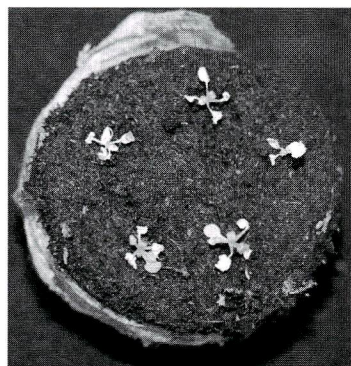
一方、他のエネルギーである、力学エネルギー、熱エネルギー、化学エネルギー、電気エネルギーなどを植物に与えても、電磁波(光)エネルギーとは本質的に異なるため、植物は全く異なった受け入れ方しかできないと考えた。

これらに加え、筆者たちはマイクロ波を化学反応において電磁波エネルギーを利用(加熱以外の効果)する研究を先導的に行っており、エネルギーの中で最も質の高い電磁波(マイクロ波)エネルギーを、最も質の低い熱エネルギーに変換することなく、質を保ったまま植物に良い刺激として与えることができれば、何か新しい現象が植物の中で起こることを直感的にイメージして実験をスタートした。

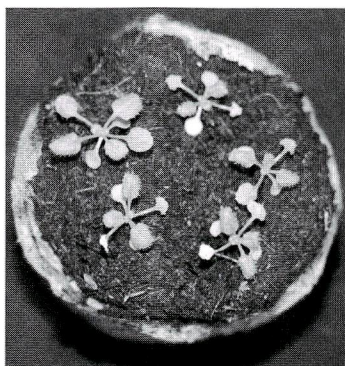
2. 成長速度の促進

初期の実験ではモデル植物としてシロイヌナズナ(*Arabidopsis thaliana*: Columbia)を利用し、グロースチャンバーで温度・湿度・光を調整しながら育成を進めた。播種後14日目にシロイヌナズナを取り出し、微弱なマイクロ波を約1時間照射し、その後すぐにグロースチャンバーへ戻し、引き続き育成をグロースチャンバー内で続けた。

実験は様々な条件(マイクロ波電力量、照射時期、照射時間など)を変化させ、スクリーニング的に実験を行った。またマイクロ波照射時にサーモグラフィやファイバー温度計を用いて温度観察を行い、培養土や芽の温度変化がないことを確認した。さらに、マイクロ波の照射条件は限定されており、この条件から外れてしまうと、シロイヌナズナの育成に変化が生じないか、枯れてしま



マイクロ波未刺激のシロイヌナズナ



マイクロ波刺激のシロイヌナズナ

図6 マイクロ波刺激を与えたシロイヌナズナと未刺激のシロイヌナズナに対する高温環境下(44℃、7日間)の生存率確認実験⁸⁾



図7 GaN半導体発振器を接続したドローンによりマイクロ波刺激を植物に連続的に与える実験の様子

うことも分かった。比較のためにマイクロ波照射を行っていないコントロール植物も、種、播種時期、様々な環境条件をそろえて育成を行った。

播種後14日目のシロイヌナズナにマイクロ波刺激を1時間与えた後の38日後の植物体の直径(葉のサイズ)を測定したが、大きな差は観測されなかった。一方、同じ植物の花序茎の高さは、マイクロ波刺激を行うことで約16cmに成長したが、これは無刺激に比べ約2倍の成長促進であった(図5)⁸⁾。また、育成に対する経時変化の観測から、シロイヌナズナの生殖成長期への移行がマイクロ波刺激によって著しく促進し、それに伴い序茎の成長が大きく促進されることが分かった。マイクロ波は14日目のシロイヌナズナに1時間だけ照射しただけであるが、この刺激が後の育成に持続的的刺激として成長の促進を促したと考えられる。

3. 熱に対する耐性

播種後14日目のシロイヌナズナにマイクロ波刺激を与えると栄養成長期から生殖成長期へと移行

する段階での植物の熱に対する耐性が上昇することが遺伝子の分析から予想された。植物にとって生殖成長期への移行は種子を残すために重要な段階であり、この段階での刺激耐性の上昇は植物自身の発展に有利に働く。実際に熱環境条件下(44℃)でシロイヌナズナの成長を続けると、マイクロ波刺激を与えたシロイヌナズナの生存率は無刺激に比べ30%以上向上した(図6)。

現在、世界の陸地で耕作されている土地は12%といわれており、気温によって耕作が不向きな土地も多い。本技術を用いることで耕作に不向きな土地でも作物を作れば、飢餓、エネルギー、地球温暖化、土地の改質(砂漠の緑地化)などに貢献できる可能性があると考えられる。

4. マイクロ波の照射方法

本技術の利点は、微弱なマイクロ波を短時間一度だけ植物の育成初期の芽または種子に照射することで植物がそれを刺激と感じ、継続的に良い影響を受ける点にある。したがって、マイクロ波有

効刺激を植物の育成の生涯にわたり与える必要はなく、畑や植物工場内部にマイクロ波装置を設置する必要もない。例えば、育成初期の芽または種子をベルトコンベアとマイクロ波照射装置を組み合わせた連続マイクロ波有効刺激装置を用いて大量の植物へ有効刺激を与えることで、種苗段階で生産プロセスを構築できる。この時に安定的なマイクロ波出力と周波数が必要となるため、半導体発振器は重要な技術因子になる。

一方、すでに播種がされている植物には、マイクロ波をドローンなどの移動体で照射しながらマイクロ波有効刺激を連続的に当てることのできる(図7)。あらかじめ様々な情報をデータベース化することで、カメラを積んだドローンを用いれば、GPSやセンサーによって自動飛行化させたドローンにより各植物に対して最適な条件でマイクロ波有効刺激を与えることができる。この時、マグネトロンでは重量や振動の問題からドローンへの積載はできない。しかし、半導体発振器ならそれが可能になる。現在、農業をIoT化する試みが積極的に行われているが、本方式も電気力で有効刺激を与えることができるため、IoT農業に組み込むことは容易であり、他の技術との組み合わせによるさらなる相乗効果が期待できる。

▼おわりに

本稿では、半導体発振器の利用例を電子レンジ

や植物育成で紹介した。両技術とも萌芽的一面はあるが、社会の注目度は高く社会実装に向かって一歩ずつ前進しており、これは半導体発振器の発展に連動している。本解説の新技術が技術立国を目指す我が国において、新しい食文化や農業文化を切り開くためのイノベーション技術の「ヒント」になれば幸いである。

本研究は企業や他の大学の研究者らによる支援とアドバイスのにより、遂行できたことを感謝の念とともにここへ記す。

参考文献

- 1) <http://www.stat.go.jp/data/zensho/2004/taikyuu/gaiyoi.htm> (最終検索日: 2017. 11. 1)
- 2) 堀越智、篠原真毅、滝澤博胤、福島潤: マイクロ波化学-反応、プロセスと工学応用、三共出版(2013)
- 3) (独)日本学術振興会電磁場励起反応場第188委員会、装置計測分科会(霜田光一、餘家清講演)より(2016. 6. 9)
- 4) IT&家電ビジネス 2012. 3
- 5) 2015. 11. 18. 第9回日本電磁波エネルギー応用学会シンポジウム 国際ショートコース資料より
- 6) S. Horikoshi, Selective Heating of Food using a Semiconductor Phase Control Microwave Cooking Oven, IMPPTS 49th Microwave power symposium, San Diego, California, USA, (2015)
- 7) 堀越 智: 食品の選択加熱が可能な半導体発振器搭載電子レンジの開発、日本電磁波エネルギー応用学会 2015年シンポジウム, (2015)
- 8) 長谷川泰彦、鈴木伸洋、浅野麻美子、堀越 智: 日本電磁波エネルギー応用学会、植物に対するマイクロ波の影響とそのメカニズムに関する研究、(2015)

『機械技術』12月特別増大号 ★好評発売中!! 特別定価1650円(税込)

特集 2017年版 世界の先端をゆく工作機械の活用技術

◆解説

- IoT時代のものづくり求められる生産システムと工作機械—最新動向をさぐる.....MAMTEC 清水伸二
- IoT時代に求められる超精密・微細加工とスマート化技術.....中部大学 鈴木浩文
- 研削加工におけるインターネット利用の展望.....岡山大学 大橋一仁
- IoT時代に求められる放電加工技術とスマート化技術.....工学院大学 武沢英樹
- IoT時代に求められるCAMソフトウェア技術.....電気通信大学 森重功一

◆活用編 最新マシンの活用術

- 5軸制御マシニングセンタ.....
- ドイツ ハームレ社DIGITAL MODULE ●機形マシニングセンタMCH6300Rの特徴 ●大型5軸金型加工機[V80S]の開発 ●YBM Vi40の新機能と加工事例 ●高剛性・高精度立形マシニングセンタNVX 5000 2nd Generation
- 微細・精密加工機.....
- 超高精度高速微細加工と加工事例の紹介
- 複合加工機.....
- 超複合加工機[LASER EX]シリーズを用いた生産改革提案 ●最新鋭1タレットスピンドルマシンSC-300 IIについて ●マルチレーザ式金属積層造形を搭載したハイブリッド複合加工機による生産事例
- 研削盤.....
- 超精密平面研削盤SGC-630PREMIUMの活用技術 ●研削加工を

より身近にするべく「研削革命」の取り組み ●CNC万能研削盤GSU-Bシリーズの特徴と活用事例

- 自動旋盤.....
- LFV(低周波振動切削)技術による高付加価値加工の実現 ●ファンク上の高速・高精度ミールリング加工を主軸移動型自動旋盤で実現[SS38MH-5AX]
- ターニングセンタ.....
- 高度に知能化された立形ターニングセンタVT7-1600M
- 横中ぐりフライス盤.....
- 東芝機械の横中ぐり盤シリーズの特徴 ●面板組込横中ぐりフライス盤[KBT-13F.A]
- 放電加工機.....
- 超精密ワイヤ放電加工機最新加工技術 ●最新ワイヤ放電加工機の高精度化技術 ●新型制御装置[D-CUBES]搭載 油加工液仕様ワイヤ放電加工機MX2400
- ウォータージェット加工機.....
- ウォータージェット加工機の高活用
- ガントリマシニング.....
- ハイススピードガントリマシニング[HGM-3500]—高加速度機による高生産性の提案—

日刊工業新聞社 出版局販売・管理部 ☎03(5644)7410