1節　繊細で部分加熱が可能な半導体式発振器搭載電子レンジの特徴と応用

Features and applications of semiconductor-type microwave cooking oven with selective and delicate heating

上智大学　堀越　智

1．繊細で部分加熱が可能なマイクロ波加熱装置がなぜ必要なのか？

我が国の白物家電市場は約2兆5千億円で、このうち電子レンジを含めた、小型白物家電は約3千6百億円程度と見られている（図1）。この中で電子レンジは約3.3％を占めており、炊飯器や掃除機に次ぐ市場を持っている。また、総務省統計局の調べでは世帯普及率が97.4％に達し

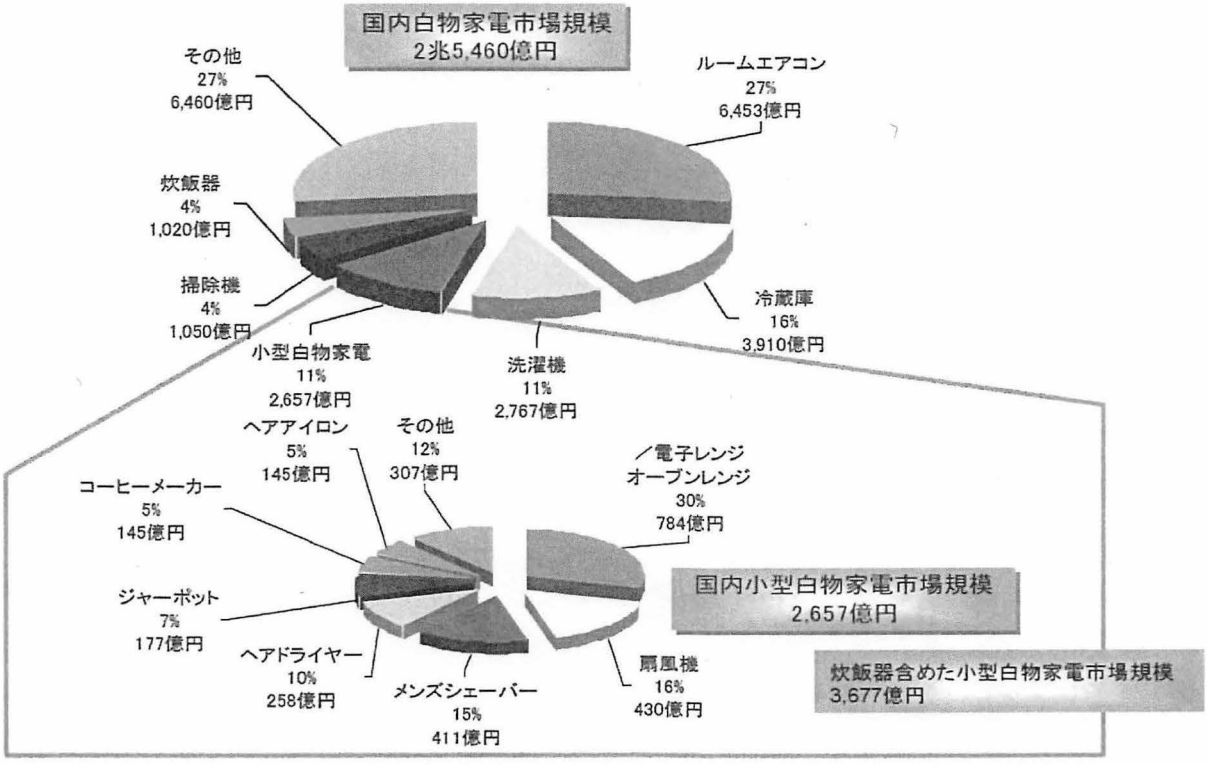


図1　国内白物家電市場（販売額）に占める小型白物家電の割合および内訳[2)]

※ Satoshi Horikoshi, Sophia University

表1　電子レンジの国別需要台数ランキング（台数：千台）[3)]

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

ており[1)]、私たちの暮らしの中で電子レンジは、日常的に使われている食品加熱器具の位置付けにある。

世界的な電子レンジ市場の動向を**表1**に示す。2008年から2014年の6年間で、需要台数はあまり変化していないが、中国の需要増加に加え、ブラジルも3位に上昇している。また、6位以下の国には新興国が増加していることも報告されている。一方、我が国の需要は低下し、これは電子レンジの買い替えが10年と言われていることも関係しているが、電子レンジが「食文化」を大きく変えるようなイノベーションを行ってないことも要因である。また、家電量販店に行くと電子レンジの性能の進化は続いていることが紹介されているが、その多くは高温スチーム、熱風、調理法操作、温度管理などに対する技術革新が主である。世界的にも電子レンジ本来の機能であるマイクロ波加熱の技術的革新は静止したように見え、すでに成熟した技術として位置づけられている。食品にまつわる分野では、新しいニーズや様々な問題が報告されている。例えば、人々の食事に対する好みの繊細さが増し、味に加えて温度にも注意が払われている。また、食品廃棄の問題から食品のチルド化が進み、作り立ての美味しさを瞬間冷却して保存した食品を、どのように簡便短時間で作り立ての形に解凍するかが問題となっている。また、低価格で環境配慮型の食品トレーの開発も急務とされている。

筆者は、1999年よりマイクロ波や他の電磁波をエネルギー源として、化学合成、材料、バイオ、環境、エネルギーに適応すべく、マイクロ波サイエンス（造語）の基礎・応用研究を進めてきた[4)]。マイクロ波サイエンスを実践するには、マイクロ波化学・物理である「マイクロ波理学」と、マイクロ波電気・機械である「マイクロ波工学」を融合した新学術分野が必要であり、私たちはマイクロ波理学を基盤としたマイクロ波工学、マイクロ波工学を基盤としたマイクロ波理学の研究を戦略的に取り組んできた。このような研究背景のもと、15年以上積み上げてきた技術を、食品分野で求められているニーズや問題の解決のために、新しい電子レンジである「インテリジェント電子レンジ」に集約し、その開発を始めてきた。本稿ではこれらの結果も含め、（2項）電磁波と電子レンジの歴史的な関係、（3項）マイクロ波加熱の特徴、（4項）インテリジェント電子レンジを用いた実践例の順に説明するものとする。

2. 電磁波と電子レンジ

人類は有史以前から電磁波である光の利用を行ってきたが、同じ電磁波の一種である電波の利用は、ジェームズ・クラーク・マクスウェル（1864 年）によって理論的に電磁波が予言され、ハインリヒ・ルドルフ・ヘルツ（1888 年）によって、その存在が実験的に証明されてからである。その後、この電波を積極的に応用した試みがなされ、その代表的実験として、ニコラ・テスラによる「無線電力伝送」の実験が 1904 年に行われた（**図 2**(a)）。テスラは電波を「離れた場所に届くエネルギー」として利用したが、当時の技術では十分強い電力を無線で送ることができずに失敗に終わった。これが、マイクロ波をエネルギーとして利用した大掛かりな事例の最初である。

一方、グリエルモ・マルコーニは 1901 年に「電波を情報の媒体」として利用し、北米からヨーロッパへの通信に成功した（図 2(b)）。また、クリスティアン・ヒュルスマイヤーは 1904 年に

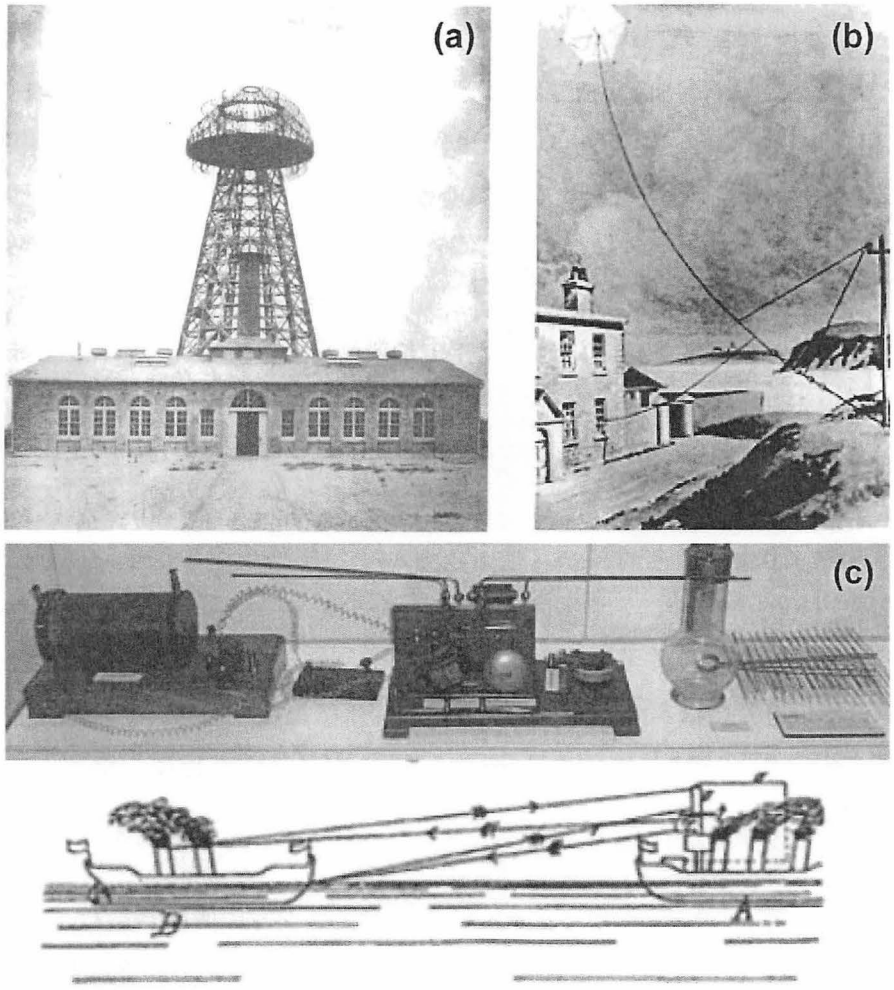


図 2　(a) ニコラ・テスラによって無線電力伝送の実験のために建設された Tesla Broadcast Tower の写真[5]、(b) グリエルモ・マルコーニらが組み立てられた凧の受信機[6]、(c) クリスティアン・ヒュルスマイヤーによる船の衝突を避けるためのレーダーの写真とイメージ図[7]

ドイツとオランダで「電波の反射」を利用して船の衝突を避ける実演を行い、これがレーダー技術の基礎となった（図2(c)）。このような歴史的背景から、通信・レーダーの開発が電波の利用先の中心となった。様々な実用機の開発が進む中、多くの情報を無線通信で送ることや、細部や詳細な場所をレーダーで特定するためには、電波の周波数を高くすることが有利であることから、より周波数の高いマイクロ波発生装置が必要となり、この発生源であるマグネトロンやクライストロンの開発が進んだ。これらは、真空管構造であるためマイクロ波管とも呼ばれ、その技術は第二次世界大戦中に著しく高度化された。

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・スペンサーは、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（1947年）、電子レンジの歴史がスタートした。TVなどで電子レンジ誕生秘話をセレンディピティ（偶察力）の例として取り上げられることがあるが、日本でも戦時中に旧日本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[8]、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。したがって、スペンサーの功績は、この現象の発見ではなく、この現象で製品を生み出した点にある。「電子レンジ元年」はテスラが電波をエネルギー利用しようと考えてから40年以上経てのことであり、おそらくこの時代にテスラが無線電力伝送の実験をやっていれば成功したかもしれない。

我が国でも国産第一号の電子レンジが1962年頃に業務用として発売された。マイクロ波加熱は、人々になじみ深い赤外線加熱より、食品の中まで短時間に温めることができることから画期的な加熱器具として広く知られるようになったが、初期電子レンジの価格が125万円と高価で、その使用はホテルやドライブインに限定された。1964年には新幹線の開業に伴い食堂車に装備され、そのスピード加熱ぶりが広く一般に知られるきっかけとなった。その後、10万円台の家庭用電子レンジの販売（1965年）が開始された。しかし、それでも当時としては高価な家電であり、また和食文化の壁に阻まれ、普及したのは核家族化と個食化が進展した70年代後半と言われている。電子レンジの普及にはターンテーブル方式の採用による「加熱ムラの低減」なども後押しになったと考えられる。1977年には電子レンジにオーブン機能を付加したオーブンレンジが、1978年には焼く・煮る・蒸すなどの調理が一台でできるスチーム発生装置付きの熱風循環式オーブンレンジが発売された。特に、スチーム併用によりマイクロ波加熱法の欠点である食品の表面加熱を補助できるようになった。マイクロ波単機能電子レンジの販売台数は1980年代より減少が続くが、マイクロ波加熱以外の「付加価値」の付いた電子レンジが多数販売されたことによって、全販売台数は増加を続けた。

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早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。また、新日本無線株式会社によって安価で小型

の加熱用マグネトロンが開発され、世界中の電子レンジの価格を下げることにも成功した。一方、当時のアメリカ人マイクロ波加熱専門家の予想では、電子レンジは世間が受け入れないと予想した[9]。しかし、実際には予想を裏切り、電子レンジの市場は広まった。この理由として、簡単に食品加熱ができる「便利さ」が世間に受け入れられたためである。

3. マイクロ波加熱の特徴

便利な加熱として一般家庭に広まったマイクロ波加熱は、産業分野においても大いに利用されている。その装置特性として、熱の高速移転、選択加熱、コンパクトな設備、運転の開始・停止が素早い、省エネ、作業環境の汚染防止、などが挙げられる。特に、連続加熱乾燥装置は産業用加熱装置として目覚ましく発展した。マイクロ波加熱を用いた応用例の一部を**図3**にまとめた(化学・材料プロセス分野は例が多いため文献4を参照していただきたい)。環境、医療、フイルム・紙、食品、産業、インク・塗装、木材などの分野で広く利用されていることが分かる[4]。マイクロ波加熱は既存法に比べ著しい生産効率の向上があるため、多種分野へ応用が進んだ。マイクロ波加熱以外の用途として、半導体の表面加工や人工ダイヤモンドの合成などに使うプラズマ発生源としてもマイクロ波は利用されている。

マイクロ波加熱を産業応用するには設備、ランニングコスト、省エネ、オペレーティングなど

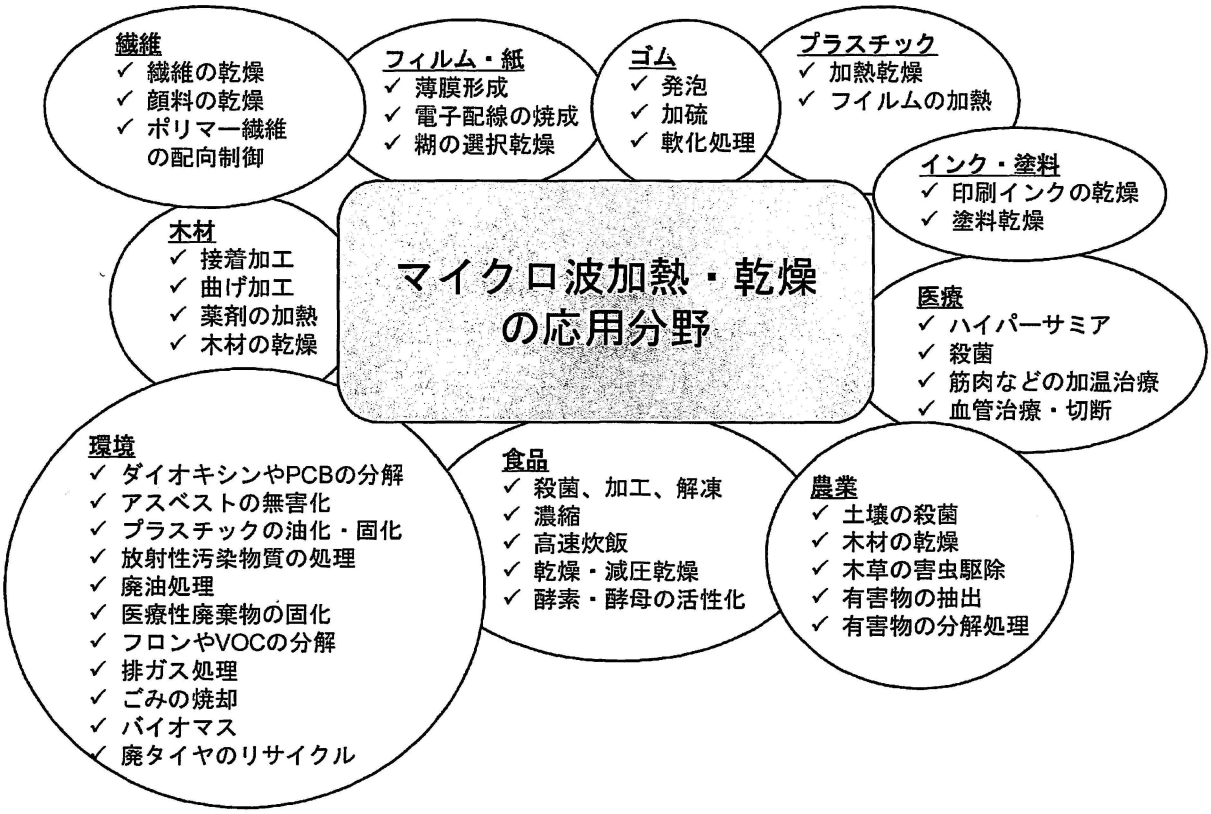


図3　マイクロ波加熱の応用分野の一覧[4]

表2　各熱源の特徴比較[4)]

	電気炉	ガス	スチーム	マイクロ波	高周波	赤外線
加熱効率	低	低	低	高	高	中
温度調整力	低	高	低	高	高	中
環境負荷	小	高	高 (化石燃料の場合)	小	小	小
低熱伝導試料	不適	不適	不適	適	適	適
試料形状	任意	任意	任意	任意	制限	任意
加熱位置	表面	表面	表面	全体	全体	表面

の優位性が重要となる。一般的な加熱法（電気炉、ガス、スチーム）や高周波加熱または赤外線加熱に対するマイクロ波加熱の特徴を表2にまとめた。既存の加熱源に比べ、マイクロ波加熱は多くの優れている点があることが分かる。例えば、電気炉などの加熱機器では炉内の耐火物を加熱しながら試料を熱伝導と放射による伝熱的二次加熱を行わなければならないため、試料温度は炉内の温度より低く、実際に試料を加熱するために利用されるエネルギーは20～30％程度といわれている。一方、マイクロ波加熱では試料を直接的に加熱できるため、消費電力の50～70％程度を試料加熱に使用できる。また、既存の方法からマイクロ波に切り替えることで製品加工の時間を80％短縮し、装置サイズも90％縮小させることに成功した事例もある。

4. インテリジェント電子レンジの要望

4.1　半導体式発振器の利用

電子レンジで長年使われてきたマグネトロン式発振器は、安価で高出力発振が可能であるが、マイクロ波の高精度な制御を達成するためには、マイクロ波源を半導体式発振器にする必要がある。半導体式発振器は通信などで用いられてきたマイクロ波発生源であり、無線LANや携帯電話に普及とともに、著しく技術的革新が進んだ機械である。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、近年では超小型化に成功し、価格もマイクロ波1Wあたり100ドルすると言われていたものが、100Wで10ドル以下程度に低価格化が進みつつある。半導体式発振器はマグネトロン式発振器に比べ利点も多く（表3）、問題であるサイズや価格も解決されようとしていることから、電子レンジに十分実使用できると考えられる。

既存の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±0.02GHz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である（図4）。マグネトロン式発振器が不規則にブロードなマイクロ波を発生させ

表 3　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[10, 11]

	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
寿命	500～1000 時間	20 年
価格	安価	高価

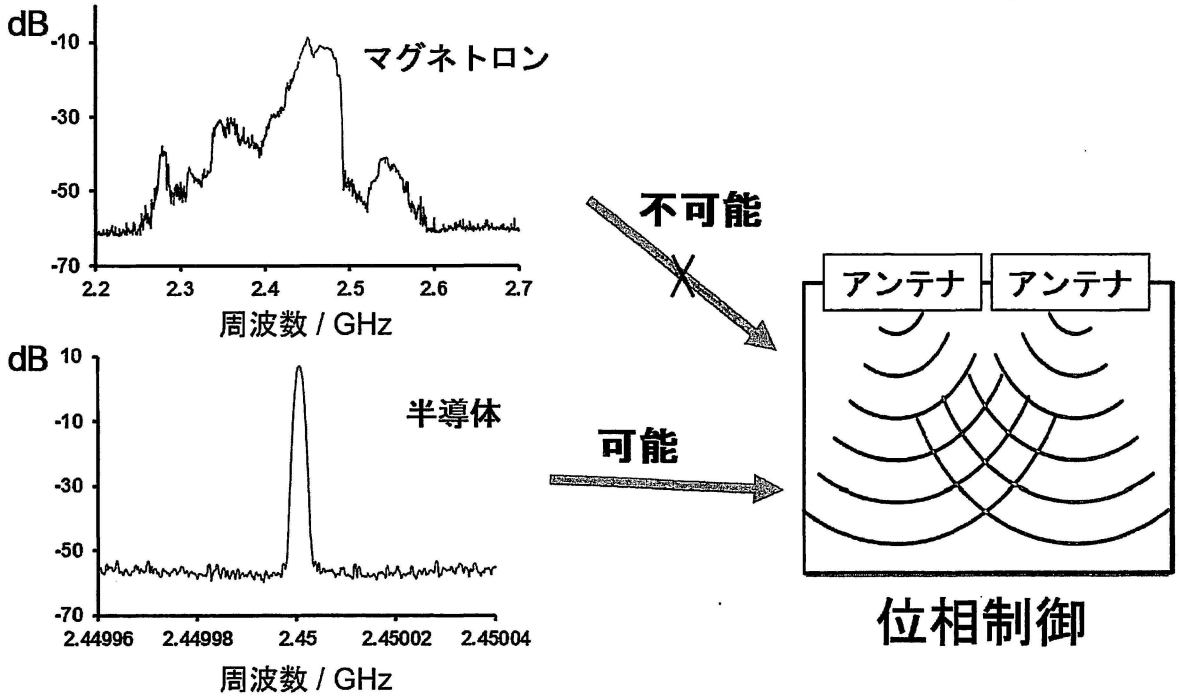


図 4　半導体式発振器とマグネトロン式発振器のスペクトル比較と位相制御のイメージ[10, 11]

ているのに対して、半導体式発振器は周波数範囲が著しく狭く、またその変動も無いため、マイクロ波を一定強度で連続に発振できる。この特徴を利用するとマイクロ波の位相を精密に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を行うことができる。このような現象をマイクロ波の食品加熱に応用することで新しい電子レンジの提案を考えた。

4.2　インテリジェント電子レンジの試作

私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 5）。半導体式発振器ユニットの利点はマグネトロン式発振器ユニットより著しく小型化できる点にあるため、業務用電子レンジに 4 台の GaN 半導体式発振器を内

図5　インテリジェント電子レンジ（第4号機）の外観写真

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の制御を視覚的に行える。また、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各カメラが設置されており、これらの制御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できる。

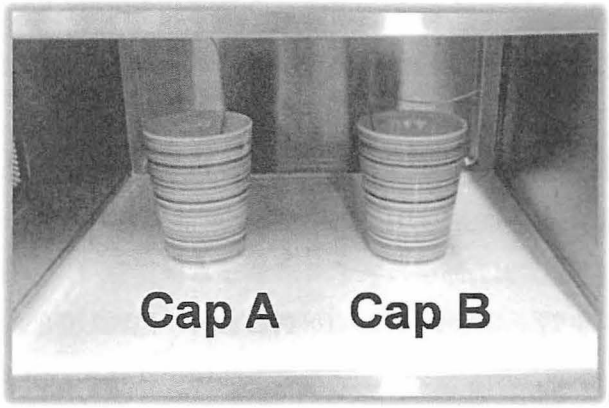
次項からは、初期型インテリジェント電子レンジを用いた食品加熱装置の実施例を紹介する[10, 11]。

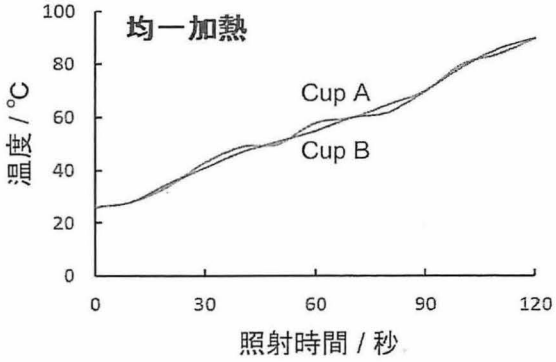
4.3　均一加熱の実証実験

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、本試作電子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6）。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、各々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、約2分のマイクロ波照射で、100℃近くまで加熱できるが、カップBは50℃程度に止めることができた。

4.4　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されやすさであるtan δを測定すると、ごはんが具材よりも低い値を示した。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7）。





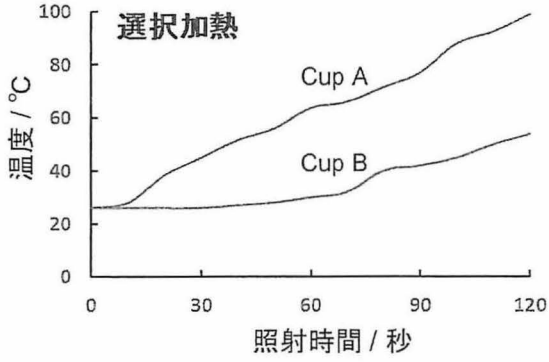


図 6　インテリジェント電子レンジによる同種の水の加熱実験の様子の写真（上）、均一加熱における温度変化の結果（下左）、選択加熱における温度変化の結果（下右）[10, 11]

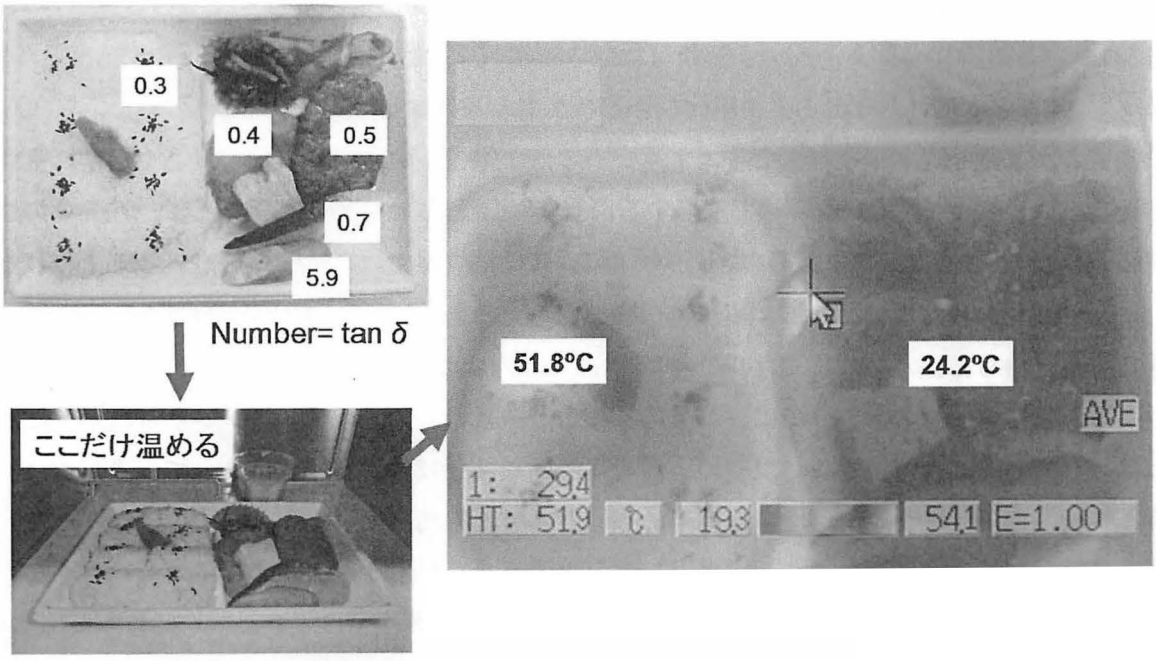


図 7　インテリジェント電子レンジによるお弁当内のご飯の選択加熱をサーモグラフィーで観察した様子[10, 11]

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。

4.5 繊細加熱の実証実験

半導体発振器は微小なマイクロ波出力による発振が可能であるため、アイスクリームの適温加熱を行った。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、硬くてスプーンが通らない。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秒の加熱で−7.6℃のアイスクリームは−2.3℃に加熱することができ、スプーンですくいやすく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ことが推奨されている。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。

4.6 繊細かつ選択加熱の実証実験

お寿司屋さん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か所に盛り付けられ、さらに繊細に加熱をしなければならない場合、選択加熱を繊細に行う必要がある。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。

4.7 省エネおよび時短

消費者が家電を選ぶ指標として省エネ度があるが、電子レンジは例外的に機能や価格に重点が置かれることが主で、「省エネ」を重視する消費者はほとんどいない[12)]。これは、電子レンジの使用時間は一般調理に比べて短いことから、消費者は消費電力に意識がないものと考えられる。しかし、昨今の我が国におけるエネルギー事情を考えると、電子レンジであったとしても省エネ化を推し進める必要があり、また、業務用電子レンジには急務とされている。例えば、都心におけるコンビニエンスストアーでは、お昼時になると複数台の業務用電子レンジが最大出力で稼働し続け、電力を大量消費する。現在の店舗では照明や冷蔵技術の高度化によって、省エネ度が大きく進展したが、電子レンジだけは例外的機器として、特別視されている。すでに、店舗として省エネ技術は高水準に達しており、電子レンジの改革なくしてこれを達成することはできない。

お弁当を例に業務用電子レンジと、インテリジェント電子レンジの加熱比較を行うと半分の消費電力で加熱を達成できることが分かった。加熱したい部分だけを選択的に加熱できることから、加熱に必要な消費電力を著しく下げることができ、電子レンジの問題である「省エネ」を実現で

きることが分かった。また、選択加熱は食品の加熱時間を大幅に短時間化させることができるため、コンビニ等で問題となっている、チルド弁当の加熱時間を「時短化」することができる。

5. 現状の達成度と次の課題

半導体式発振器を電子レンジに使用する利点は、選択加熱による省電力の低下、装置の小型化、発振器の長寿命化、食品の部分加熱や異なるマイクロ波の吸収効率の異なる食品の均一加熱、繊細な加熱を必要とする食品の低出力加熱などが挙げられる。また、制御がスマートフォンやタブレットなどで行うため、新しいアプリソフトとの組み合わせにより、電子レンジの新しい可能性が広がることが分かった。また、装置価格も比較的安価で販売できることが試算されている。マイクロ波照射のための制御アルゴリズムをより高度化することで、精度が高い選択加熱ができると考えられる。また、本電子レンジを用いることで、食品容器や包装等の材料選択が大きく広がる。

6. 最後に

電子レンジの基本概念は、スペンサーが商品化した時代から大きく変わっていない。そのため電子レンジの性能に合わせて、食品や容器の規格が決まってきた。しかし、電子レンジ元年から70年が経とうとしている現在では、一方通行の関係では、この分野がこれに乗り遅れてしまう。すなわち、食品や好みに合わせて電子レンジを使うことができれば、「食の新文化」をキーワードにした新しいビジネスを展開できる。また、環境配慮型の安価な容器の使用や、加熱に要する省エネ化ができれば、電子レンジが21世紀型の家電に飛躍したと言える。また、この基礎技術は電子レンジに関わらず、様々なマイクロ波加熱応用に利用できる。

マイクロ波サイエンスの考えのもと、1900年頃分岐してしまったマイクロ波加熱・エネルギー利用（マイクロ波理学）とマイクロ波通信・レーダー利用（マイクロ波工学）を融合させたインテリジェント電子レンジが、新しい食文化の「食品アプリ」の開発を牽引する一つの要素技術になることを願う。私たちは、この基礎技術を「マイクロ波化学、材料、環境、エネルギー」において、応用する研究を実践しており、実用化研究に突入している。この成果については、別の紙面で紹介するものとする。

7. 謝辞

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/taikyu/gaiyo1.htm（最終検索日：2017年2月23日）

2）経済産業省、小型白物家電に関する新事業戦略研究会報告書、2013

3）IT＆家電ビジネス2012年3月

4）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）

5）https://en.m.wikipedia.org/wiki/Wardenclyffe_Tower（最終検索日：2017年2月23日）

6）http://otonanokagaku.net/products/others/car/history.html（最終検索日：2017年2月23日）

7）https://www.alternatehistory.com/forum/threads/a-martian-stranded-on-earth-tesla-edition.259351/page-2（最終検索日：2017年2月23日）

8）㈱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（平成28年6月9日）

9）2015年11月18日　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

10）S. Horikoshi, Selective Heating of Food using a Semiconductor Phase Control Microwave Cooking Oven, IMPI 49th Microwave power symposium, San Diego, California, USA, (2015)

11）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)

12）https://www.eccj.or.jp/toprunner/microwave/microwave.pdf（最終検索日：2017年2月23日）