

## マイクロ波の特性を生かした 先導的加熱乾燥技術

堀越 智\*

日本における電子レンジの世帯普及率は97% (2004年3月現在：全国地球温暖化防止活動推進センター調査)で、世界の中でも高い値を維持している。電波(マイクロ波)による加熱方法は、私たちの生活に欠かせない技術であるが、その発明は全くの偶然から生まれたといわれている。アメリカのレーダー技師が、機械の調整中にポケットの中のピーナッツ・クラスター・バーが溶けたことにヒントを得て、食べ物を温める技術に発展した。この出来事は、たびたびセレンディピティの例として取り上げられ、現在では、このマイクロ波加熱技術を乾燥、殺菌、セラミックスの焼結などにも応用している。

また、電子レンジを家電量販店で安価に購入することができることから、化学反応、環境保全への利用を目的とした基礎研究が盛んに行われ、それらを専門的に行うことができるマイクロ波装置も世界中で販売されている。

本稿では、マイクロ波や高周波などの電波を用いた加熱や乾燥の特徴を解説し、さらにその実用例に触れる。

### 1. マイクロ波乾燥の特徴と実例

一般的に物質の加熱には、赤外線、スチーム、熱風などを用いた方法が知られているが、これらとマイクロ波加熱の違いについて解説された参考文献は少ない。以下に食品加熱を例にした、

マイクロ波加熱の特性を簡単にまとめる。

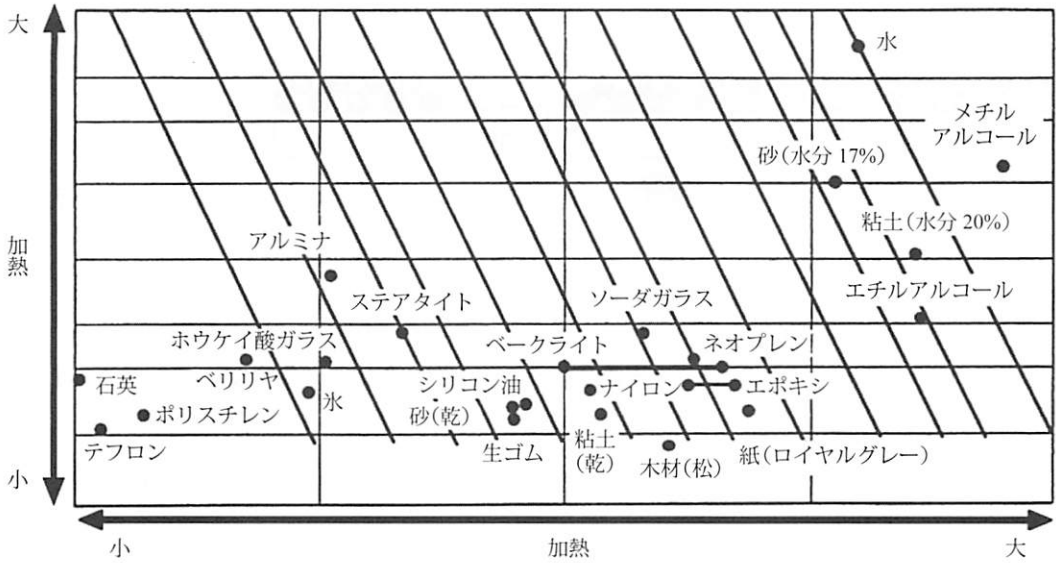
インターネット等には、電子レンジによる加熱メカニズムとして、物質に含まれる水分子の摩擦熱が原因であると示されているものもあるが、これは間違いである。水分子の最大吸収周波数は17GHz付近であり、電子レンジの周波数(2.45GHz)とは異なる。実際には、極性物質(水も含まれる)やイオン性物質などが電子レンジで加熱することができ、中には水よりも加熱効率の高いものもある。一方、プラスチックや有機溶剤などに代表される無極性物質は、電子レンジによる加熱が難しいものも多い。

したがって、極性および無極性物質が混合した物へマイクロ波を照射すると、極性物質だけが選択的に加熱される(選択加熱)。たとえば、お弁当を電子レンジで温めると、容器の中のご飯やおかずだけが温まるが、容器は温まらない。

また、マイクロ波加熱では直接的に温めたいものだけを加熱することができることから、容器などを通して熱伝導により温める必要がなく、そのため迅速に加熱することができる(迅速加熱)。さらに、複雑な形状であっても、均一に加熱(均一加熱)することができるなど、さまざまな特徴を有している。

第1図に、さまざまな材料のマイクロ波による加熱効率を示す<sup>1)</sup>。石英に比べガラスはマイクロ波の吸収が高く、水分を含んでいなくても加熱が進行することがわかる。一方、ポリスチレンや無極性溶媒(トルエンやヘキサンなど)をマイクロ波で温めることはできないが、この

\*ほりこし さとし 上智大学 理工学部 物質生命理工学科 准教授



第1図 さまざまな材料におけるマイクロ波による加熱のしやすさ

ような場合はアルミナ粉末などの高吸収体を混入させることで、アルミナが一種のマイクロ波の発熱体となり、これにより無極性物質を加熱することができる。

(1) 選択加熱を利用した乾燥法の実例

有史以前から人類が行ってきた加熱法の多くは、熱源に近い場所から“伝導、対流、放射”にのっとって熱が伝達するが、マイクロ波加熱では、直接的に物質が加熱されることから、物質のマイクロ波吸収効率によって加熱効率が決定される。選択加熱を利用した実例として、ダイレクトメール等の圧着ハガキや宅配便の配送伝票の糊(のり)付けがある(写真-1 参照)。

既存の加熱を用いると、ハガキや伝票全体が加熱されるため、紙のよれやインクの劣化が進んでしまうが、マイクロ波や高周波のような電波による選択加熱を使用することで、糊だけが選択的に急速加熱し、その結果として紙やインクの質を変えずに、高速に連続加熱処理を行うことができる。

塗装分野においても、選択加熱を利用した乾燥技術について研究が進められている。マイクロ波吸収率の大きく異なる2成分以上の構成要素を基盤に塗布し、マイクロ波を照射すると、マイクロ波吸収が高い物質だけが選択的に加熱乾燥される(第2図参照)。

さらに、マイクロ波吸収が低い基盤を用いれ

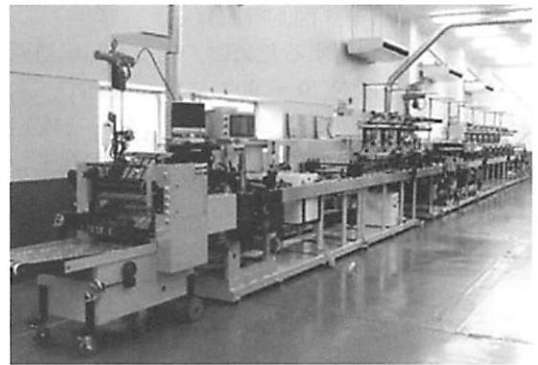


写真-1 圧着ハガキ糊付け装置

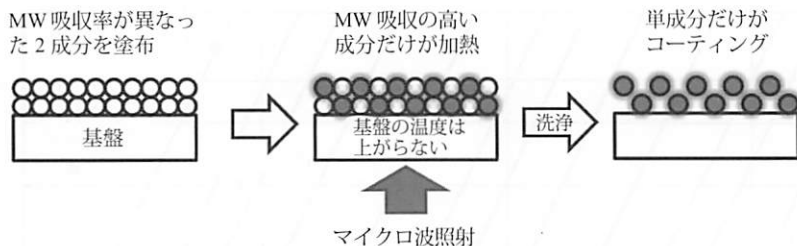
図 富士電波工機(株)製。

ば、基盤の下からマイクロ波を照射しても、基盤を室温に保ったまま、塗膜の乾燥が可能となる。

(2) 内部加熱を利用した乾燥法の実例

近年、温室効果ガスの削減に対して、国産木材の積極的な利用推進が求められている。しかし、国産の木材の多くは含水率が高く、質の高い製材をつくるために新しい乾燥技術が求められてきた。木材の乾燥は含水率を下げるだけではなく、乾燥過程で生じる木材の断面または内部の割れ、曲げ強度の低下、変色、反りや曲がりなどが起きないようにしなければならない。

木材の乾燥に用いられてきた蒸気式熱気乾燥法は、木材の中心温度を100℃に保つため、表



第 2 図  
選択加熱を利用したマイクロ波特殊コーティングのイメージ

面は内部に対して高い温度を維持しなければならないが、木材の内部と表面の膨張率が大きく異なるため割れや反りの原因になり、木質が悪くなることが知られている(第 3 図(a)参照)。

この問題を解決するため、内部加熱と熱風加熱を複合化する加熱方法が行われている。高周波(マイクロ波よりより低い周波数の電波)を木材に照射すると、マイクロ波と同様に木材自身が均一に加熱される。しかし、木材の表皮は外気に熱が奪われることから、木材内部より低い温度になる(第 3 図(b)参照)。

この効果を利用するために、表皮へ熱風通させ、表皮温度を 70～90℃に保つことで、木材の内部と表皮の温度勾配(こうばい)を安定的に維持する。これにより、蒸発潜熱が発生し

て内部の水分は表皮に向かって移動し、木材内部から乾燥が進行する。

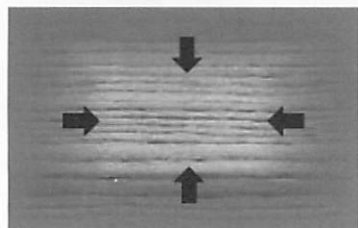
既存の蒸気式熱気乾燥法および高周波/熱風乾燥法を用いたスギ木材の乾燥後の状態を、写真-2 に示す。

蒸気式熱気乾燥法ではスギ角材の内部に割れが生じ、変色や反りなども発生するが、内部加熱/熱風乾燥法は乾燥時間の短縮に加え、乾燥を行っても高い木質が保てることが示された。

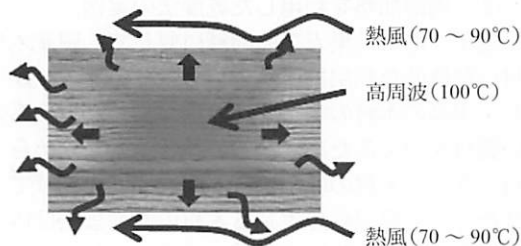
内部加熱/熱風乾燥法を用いた木材乾燥装置を写真-3 に示す。

上記に示したように、木材乾燥の短時間化や

蒸気式熱気乾燥法



中心温度<表皮温度  
(中心に水分が移動)  
(a) 既存スチーム



中心温度>表皮温度  
(表皮に水分が移動)  
(b) 高周波/熱風乾燥法

第 3 図 木材乾燥における熱勾配と水分の流れ

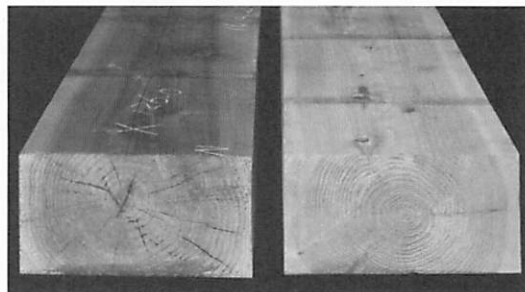


写真-2 既存蒸気式熱気乾燥法(左)および内部加熱/熱風乾燥法(右)のスギ角材の断面

注 山本ビニター(株)。



写真-3 蒸気式熱気乾燥および高周波乾燥を併用した複合化木材乾燥装置

注 山本ビニター(株)製:積載容量 60m<sup>2</sup>。

質の向上に加え、既存の方法よりもエネルギーコストを30%以上削減できることが知られている。また、既存のスチーム乾燥法は化石燃料を使用することが多いが、高周波は電気で駆動することから、二酸化炭素の排出削減にも貢献できるとされている。

## 2. 環境保全・エネルギー分野へのマイクロ波加熱の利用

環境立国を掲げる我が国において、環境保全やエネルギー問題に対する技術開発は優先課題であり、マイクロ波を技術革新のために利用する研究が盛んに行われている。ここ数年の間、これらの分野へマイクロ波を利用した事例が著しく増加しており、その多くが新しい環境保全技術としても期待されている。

### (1) 土壌処理分野への応用

マイクロ波迅速熱分解を用いた、土壌中のPCB類やPAH類の分解例が世界中で報告されている。天然土壌へマイクロ波を照射すると、土壌に含まれる酸化鉄がマイクロ波で加熱されて一種の化学触媒となり、土壌に含まれる毒性の高い汚染物質の分解を行うことができる。

我が国でも、土壌、飛灰、都市ゴミ中に含まれるダイオキシン類の分解処理が可能で、マイクロ波大型処理装置がすでに運用されている(写真-4参照)。ダイオキシンを含んだ土壌、飛灰、都市ゴミなどを炉内へ入れ、マイクロ波を照射すると、短時間でダイオキシンを処理することができる。この処理炉の利点は、処理時間の短縮に加え、マイクロ波の加熱の特徴である選択加熱を利用している点にある。土壌、飛灰、都市ゴミ自身がマイクロ波によって自己発熱することから、処理炉自身の温度は低く、熱による炉の劣化を抑えられ、炉(装置)の寿命が長くなる利点もある。

### (2) 放射能汚染物質処理へのマイクロ波の利用

マイクロ波による放射能汚染物質への適用例として、使用済み核燃料の再利用や不要廃棄物の処理などがある。使用済み核燃料には未燃焼のウランウム235や生成したプルトニウムなどが含まれており、これらは硝酸塩として抽出した後、分解させて酸化物に変化させて再利用される。この一連の操作(濃縮・乾燥・分解)に



写真-4 土壌、飛灰、都市ゴミ中のダイオキシンを分解するためのマイクロ波焼却炉

〔注〕 日本スピンドル製造(株)製。

おける熱源として、マイクロ波が有望視されている。放射能汚染物質の処理では、処理に使用される装置自身も放射能汚染が進行してしまい、二次汚染が進行する。マイクロ波を用いた処理法は短時間で均一に加熱ができる点に加え<sup>2)</sup>、電波(非接触)で加熱を行うことができることから、放射能二次汚染を最小限に留(とど)めることができる。

また、原子炉に使われるコンクリートの破壊においても、その利用が期待されている。これらのコンクリートは放射線で汚染されているため、人力による掘削作業は難しい。また、掘削重機の放射能汚染も進むため、容易にメンテナンスをすることができない。

そこで、マイクロ波照射装置が設置された遠隔操作ロボットの開発が進んでいる。コンクリートはマイクロ波の吸収率が低いため、そのほとんどが透過するが、コンクリート内部に含まれている微量な水分が選択的にマイクロ波を吸収する。その結果、コンクリート内部で水の急速加熱が進み、周囲との温度差を生じるために熱応力による歪(ひず)みが生じ、コンクリートの粉砕が進む。マイクロ波加熱は非接触であることから、放射能による熱源や装置の汚染が進行しにくいとされる。

### (3) 水処理分野への適用

数十年前までは、水処理の分野でマイクロ波の利用は加熱殺菌が主であったが、ここ数年の間、触媒などと組み合わせることで汚染物質の

分解などができることがわかり、これからの新しい環境保全技術としても期待されている。

たとえば、環境触媒として知られている、二酸化チタン( $\text{TiO}_2$ )光触媒活性の向上に利用されている<sup>3)</sup>。一般的に、二酸化チタンを用いた環境浄化法に必要な条件は“水・酸素・紫外線”で、いずれも自然界にありふれたものである。

しかし、水処理の分野では、汚染物質の分解速度が遅いことから大型化には適していないと考えられてきた。私たちは、マイクロ波と紫外線を光触媒二酸化チタンへ同時に照射することで、水質汚染物質の分解処理が著しく促進することを発見した。

各分解法を用いたローダミン B (RhB) 色素水溶液の脱色比較を、写真-5 に示す。分解前の RhB 水溶液(a)に比べ、既存の光触媒反応である紫外線のみを二酸化チタンへ照射する分解法では(b)、若干の脱色が観測された。一方、マイクロ波(2.45GHz)と紫外線を同時照射した複合法では(c)、RhB の脱色が著しく進行し透明になった。すなわち、マイクロ波を用いることで、二酸化チタン光触媒の問題点である分解時間を短縮させることに成功した。

ここで、マイクロ波の照射は水溶液の水温を上昇させることから、ヒーターによる加熱と紫外線照射を併用し、RhB の分解を行った(d)。この時、マイクロ波照射と同じ温度条件でヒーター加熱を行ったが、二酸化チタンの触媒活性を促進させることはできず、既存の熱源では得

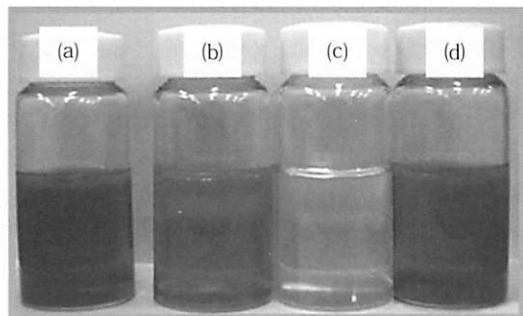


写真-5 各分解法によるローダミン B (RhB) 水溶液の脱色比較

注 (a)分解前の RhB 水溶液、(b)  $\text{TiO}_2$  へ紫外線を照射(既存の光触媒分解法)、(c)  $\text{TiO}_2$  へマイクロ波と紫外線を同時照射、(d)ヒーターで加熱をしながら  $\text{TiO}_2$  へ紫外線を照射。

ることのできない効果がマイクロ波にはあることを示唆した。

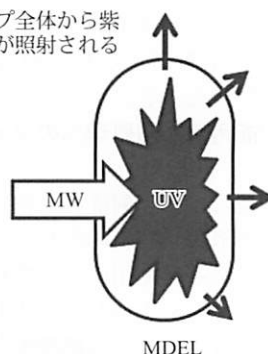
現在までに、水質汚染物質の多くはマイクロ波と紫外線を二酸化チタンへ照射することで、その分解速度が向上することがわかったが、この装置をスケールアップするには光源が問題になる。二酸化チタン光触媒反応に必要な紫外線ランプをマイクロ波照射装置内に設置することは、ランプの電極がマイクロ波による金属放電を起こすため難しい。

この問題を克服するために、マイクロ波をエネルギー源とした電極や電線を持たない紫外線ランプを開発し、これをマイクロ波励起無電極ランプ(Microwave discharged electrodeless lamp : MDEL)とした<sup>4)</sup>。

MDEL は、合成石英製のアンブル内にマイクロ波で励起するガス(水銀、アルゴン、窒素など)を封入した構造になっており、電極や電線を必要としない。単にマイクロ波が照射されている場所に置くだけで、マイクロ波エネルギーを紫外線に変えることができる(第4図参照)。また、無電極であるためランプの寿命が長く(電極の劣化がない)、複雑な形状や微小なサイズのランプの製作ができる利点がある。

農薬が含まれる水溶液へ二酸化チタン粉末を分散させ、MDEL をこの水溶液に投げ込み、マイクロ波を照射した。照射されたマイクロ波は、農薬水溶液の加熱や二酸化チタン光触媒の活性促進以外に、MDEL の点灯にも利用される。MDEL はランプ全体から紫外線(254nm および 185nm)を水溶液へ照射することができるため、効率的に二酸化チタンへ紫外線を供給すること

ランプ全体から紫外線が照射される



第4図 マイクロ波によるマイクロ波励起無電極ランプ(MDEL)のイメージ

ができる。また、エネルギー源がマイクロ波だけであることから、電子レンジで水処理を行うことができる。

MDEL を用いた二酸化チタンによる 2,4-D 除草剤水溶液の分解を行ったところ、市販のランプと二酸化チタンを組み合わせた分解法(マイクロ波は照射しない)に比べ、MDEL と二酸化チタンを組み合わせた分解法は、約 86 倍の分解促進が示された。また、現在までの研究から、VOC などの気体の分解に対しても、MDEL の有効性が同様に示されている。

#### (4) マイクロ波選択加熱を利用したエネルギー輸送

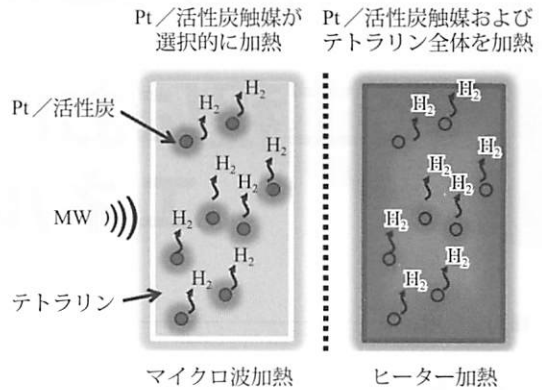
我が国は、石油資源のほとんどを海外に依存していることから、石油代替エネルギーへの転換を国策として進めている。また、地球温暖化対策の観点からも、石油よりもクリーンなエネルギーへの転換が求められている。

一方、国内で生産できるエネルギー量には限界があり、新エネルギーの輸入についても検討が進められている。中でも水素エネルギーは、石油代替エネルギーとして注目が集まっており、大量かつ安価に生産する技術が世界中で研究されている。

しかし、気体である水素を輸入するには輸送手段に問題があり、水素の液化技術が求められる。水素ガスを液化するには $-250^{\circ}\text{C}$ 以下の低温にする必要があり、分子サイズが小さいことから長期大量輸送には向いていない。そのため、水素ガスを安定な有機溶媒(主に有機溶媒)に化学結合させ、常温液化状態で輸送または貯蔵し、使用前にインフラ設備で有機溶媒から水素を取り出すことが提案されている。

この手法の利点は、有機溶媒を輸送することから石油類の運搬法であり、タンカーや石油トレーラーをそのまま使うことができる。私たちは、有機溶媒から水素を獲得するプロセスを、マイクロ波と金属担持触媒を用いて実行した。

プラチナ(Pt)触媒を担持した活性炭を金属担持触媒とし、テトラリン(有機溶媒)から水素獲得を行った。比較のために、同じ温度条件で同様の金属担持触媒を用い、熱源を既存のヒーターに変え、比較実験も行った。マイクロ波加熱法はヒーター加熱法に比べ、2 倍以上の水素が獲得できた。この理由として、テトラリンは



第 5 図 Pt/活性炭触媒を用いたテトラリンから水素獲得反応のイメージ

マイクロ波の吸収がないことから、ほとんど加熱は進行しない。

一方、テトラリン中に分散させた Pt/活性炭触媒は、マイクロ波による選択加熱が進行し(第 5 図左参照)、触媒表面温度が短時間で数百度に上昇する。実際に水素が発生する場所は触媒表面であり、マイクロ波加熱では選択的に触媒だけを加熱することができるため、効率的に水素の獲得を行うことができる。

また一方では、既存の方法では反応系全体を加熱しなければならないため(第 5 図右参照)、非常に効率が悪い。さらに、同じ量の水素を獲得するために必要な消費電力を、マイクロ波加熱を用いることで 40% 以上の省エネができることがわかった。

すでに半世紀以上、食品加熱のための熱源として利用されてきたマイクロ波は成熟した産業技術であり、さらなる異分野への利用が求められている。マイクロ波加熱の特徴を多くの方に広く理解していただき、新分野における加熱・乾燥へ積極的に利用されることを願っている。

#### 《参考文献》

- 1) 村中恒男, 豊島雅和: 塗装工学, 35, 118 (2000)
- 2) 細馬 隆, 市毛浩次, 高橋芳晴: サイクル機構技報, 24 (2004) 11.
- 3) 堀越 智: ケミカルエンジニアリング, 4, 255 (2009)
- 4) 堀越 智, 阿部正彦: J.Jpn.Soc.ColourMater.(色材), 81, 21 (2008)