

## マイクロ波加熱によるナノ物質創成

高山 定次

マイクロ波とは、1ギガヘルツ～30ギガヘルツ(波長1～30センチメートル)の電磁波の一種です。家庭にある電子レンジの場合、周波数は2.45ギガヘルツで、波長は12.24センチメートルになります。

一般に物質を加熱する場合、電気ヒータやガスなどの熱エネルギーを、熱対流、熱伝導、赤外線放射によって物質の表面に伝え、物質表面の熱が物質内部に伝わることで加熱されます。これに対してマイクロ波加熱は、物質がマイクロ波を吸収し、その物質自身が発熱することで温度上昇します。

このマイクロ波による物質加熱というものは、無機材料ではセラミック焼成、粉末冶金、そして近年ではナノ・マイクロスケールの機能性材料の生成に、有機においても各種高分子系の分解・合成に応用されています。その歴史は、1960年代に、誘電体であるセラミックスのマイクロ波加熱から始まりました。1999年には、ペンシルバニア大学のRoy教授らによって、マイクロ波による粉末金属の焼結が実証されています。

現在、このマイクロ波の特徴を生かした研究が進められており、マイクロ波効果と言われる、これまでの物性学では説明できない現象がギガヘルツ帯の電磁波照射実験で多数報告されています。例えば、分子内エネルギー輸送、ナノ構造形成、ロー(Low)ポテンシャル化学反応などです。そのため、電磁波によるエネルギー供給には、触媒に似た作用があると考えられています。

もう一つの特徴は最初に述べたようにマイクロ波は電磁波の一種ですので、電場成分と磁場成分から成り立っていることです。この電場成分と磁場成分の加熱では、物質の結晶状態に違いが生じることを見だしていますので、その結果について紹介します。

磁性体である磁鉄鉱(英名マグネタイト;  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )

粉末をマイクロ波の電界成分と磁界成分で加熱し、焼結体の結晶構造を透過型電子顕微鏡(TEM)で観察しました。マグネタイトはマイクロ波による物質加熱、特に磁性体のマイクロ波吸収機構の研究対象として関心がもたれています。磁性体であるマグネタイトがマイクロ波により加熱されるのは、3d軌道の不対電子スピニングがマイクロ波の磁界成分で配向し、その遅れによりマイクロ波が吸収されるためと考えられています。今回用いた試料は、マグネタイト粉末を直径8ミリメートル、長さ5ミリメートルの円柱状ペレットにプレス成形し、マイクロ波加熱装置(図1)に断熱材と共に設置して加熱焼結しました。この装置はシングルモード共振器と言われるタイプで、定在波を作ることにより電場成分と磁場成分に分離することができます。マグネトロン発振器で作られたマイクロ波はアイソレータ、方向性結合器、そしてアイリスを経て共振器内部に入ります。マイクロ波は共振器内でアイリスと終端部であるブランジャの間で定在波が形成されます。その定在波には電場成分と磁場成分が最大になる場所が存在しますので、加熱試料の設置場所を変えて、磁場成分による加熱と電場成分による加熱を行うことができ、それぞれ磁界加熱と電界加熱と呼んでいます。温度測定は、試料端面から放射温度計を用いて行い、マイクロ波シングルモード共振器内部はターボボ

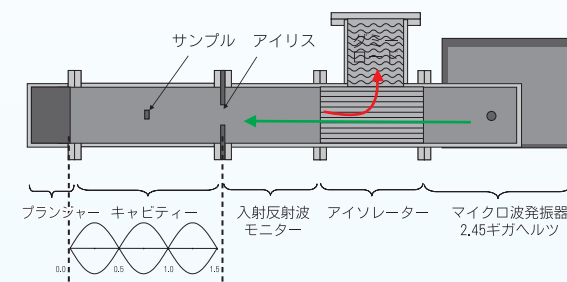


図1 マイクロ波シングルモード共振器

ンプで真空にし、窒素置換しました。加熱条件は、最大温度1000度で、約1時間保持しました。

磁場加熱後の焼結体を図2に示します。焼結密度は加熱前の相対密度46%から、相対密度82%まで上昇し、変形無く焼結できました。マイクロ波による電界加熱と磁界加熱のそれぞれの試料の結晶構造を調べるため、透過型電子顕微鏡(TEM)で観察しました。図3にマイクロ波磁場加熱後の試料で観察されたTEM写真を示します。磁場加熱では図3の白枠内で示するような数ナノメートルの微結晶が観察されました。一方、図4に示します電場加熱の試料では、結晶ひずみは観察されましたが、図3のような微結晶状態は見つかりませんでした。これらのことから、マイクロ波による磁場加熱と電場加熱では加熱後の結晶状態が異なることが確認されました。



図2 磁場加熱後の試料写真

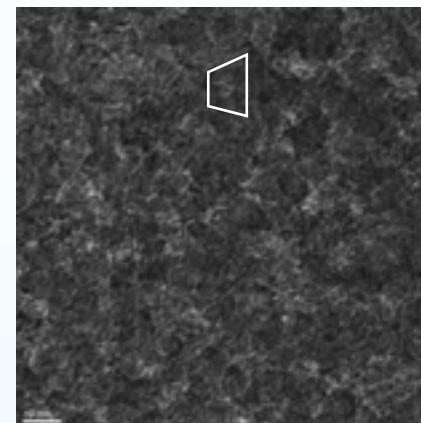


図3 磁場加熱後のTEM写真

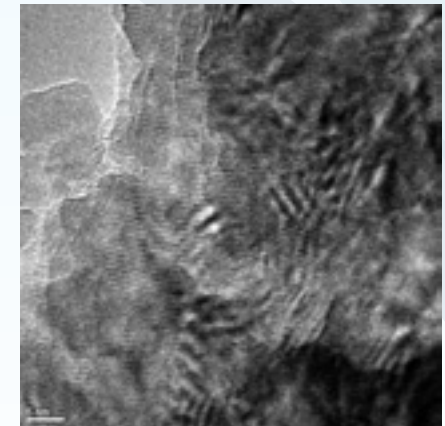


図4 電場加熱後のTEM写真

次に、マグネタイトの加熱前と磁場加熱後の磁気特性を測定しました(図5)。加熱前に比べ、磁場加熱後の試料では飽和磁化は変わっていませんが、飽和磁化に必要な外部磁場が小さくなっています。また、ヒステリシス損失も加熱前に比べ小さくなっており、保磁力が小さく透磁率が大きいことを特徴とする軟磁性を示しています。また、この微結晶化はマイクロ波の磁場加熱にのみ見られることから、マグネタイトの不対電子とマイクロ波の磁場成分との相互作用によるものと考えられます。これらの研究成果は、磁石へ応用でき、磁気遮蔽材や高出力電気モーターへの適用が期待されます。

(装置工学・応用物理研究系 准教授)

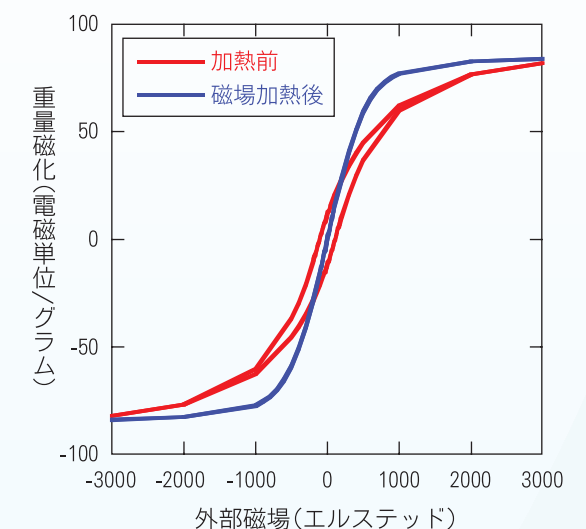


図5 マグネタイトの磁気特性