

金属のマイクロ波加熱の 基礎と応用

吉 川 昇*

1. はじめに

バルク金属とは異なり、金属の粉体や薄膜はマイクロ波加熱が可能である。この事実については、以前からある程度知られていた⁽¹⁾が、工学的な応用を考えた学術的な検討は十分になされてこなかった。90年代終わり頃からマイクロ波磁場による加熱効果⁽²⁾が指摘され、その関心が高まった。著者らは、「金属のマイクロ波加熱と最近の材料・環境への応用」と題する公募シンポジウムを2005年の秋期大会において開催した。そこでは金属のみに限らず広くマイクロ波、ミリ波による加熱応用について討論がなされた。この内容は、基調講演者らにより寄稿頂き、まてりあ2006年8月号にミニ特集としてまとめられている。

本報においては、金属のマイクロ波加熱という点に的を絞り、シンポジウム以前からの研究、及び以後の最新の研究成果を交えて、研究の基礎から応用まで解説を行う。

2. 金属のマイクロ波加熱に関する基礎

(1) 金属および誘電体内への電磁波の浸透距離

周波数 300 MHz~300 GHz(波長 1 m~1 mm)の電磁波をマイクロ波(1 cm 以下の領域はミリ波)と称するが、これが物質内に侵入する距離を求めるには、次の Maxwell の式からスタートする。

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \quad (2)$$

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}, \mathbf{B} = \mu \mathbf{H}, \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}, \quad (3)$$

$$\nabla^2 \mathbf{E}(\text{or } \mathbf{H}) - \mu\sigma \frac{\partial \mathbf{E}(\text{or } \mathbf{H})}{\partial t} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}(\text{or } \mathbf{H})}{\partial t^2} = 0, \quad (4)$$

$$\mathbf{E}(\text{or } \mathbf{H}) = \mathbf{E}_0(\text{or } \mathbf{H}_0) e^{-\alpha \cdot z} \cdot e^{-i(\omega \cdot t - \beta \cdot z)}, \quad (5)$$

ここで、 $\mathbf{E}, \mathbf{H}, \mathbf{B}, \mathbf{D}, \mathbf{J}$ は電場、磁場、磁束密度、電束密度、伝導電流密度であり、 $\mu, \epsilon, \sigma, \rho, \omega$ はそれぞれ透磁率、誘電率、電気伝導度、電荷密度、角周波数($\omega = 2\pi f$: f 周波数)である。

この式(1)(2)(3)から、電場 \mathbf{E} と磁場 \mathbf{H} に関する同じ形の微分方程式(4)が導かれ、その解も同様に式(5)で表される(1次元 z で記述)。ここで電磁波の浸透距離の逆数である α は、式(6)で示される。

$$\alpha = \frac{\omega \sqrt{\mu\epsilon}}{\sqrt{2}} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon}\right)^2} - 1 \right]^{1/2} \quad (6)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \alpha &= \omega \sqrt{\frac{\epsilon_0 \mu_0}{2}} \cdot [\sqrt{(\epsilon_r')^2 + (\epsilon_r'')^2} - \epsilon_r']^{1/2} \\ &= \frac{\omega}{\sqrt{2} \cdot c} \cdot [\sqrt{(\epsilon_r')^2 + (\epsilon_r'')^2} - \epsilon_r']^{1/2} \quad (8) \end{aligned}$$

(c は光速: 3×10^8 m/s)

金属の場合、 $\sigma \gg \omega\epsilon$ なので[†]、 ϵ がキャンセルして式(7)のようになる。これは誘導加熱などにおいて馴染み深い、表皮厚さの式である。一方誘電体(透磁率 $\mu = \mu_0$ ($\mu_r = 1$)とする。)では、 $\sigma = \omega\epsilon''$ とおくことにより、式(6)は式(8)のように表される。(誘電率の実部と虚部が出てくるが、これを真空の誘電率 ϵ_0 で割り、比誘電率 $\epsilon_r', \epsilon_r''$ として示す。実際の数値を代入してみると、家庭用電子レンジに用いられてい

* 東北大学准教授; 大学院環境科学研究科(〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-02) Fundamentals and Applications of Microwave Heating of Metals; Noboru Yoshikawa (Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University, Sendai)

Keywords: *microwave, heating, metal, electromagnetic field, material, environment, processing*
2008年7月24日受理

† この議論をする場合、一般に金属の比誘電率を1としている⁽⁴⁾。

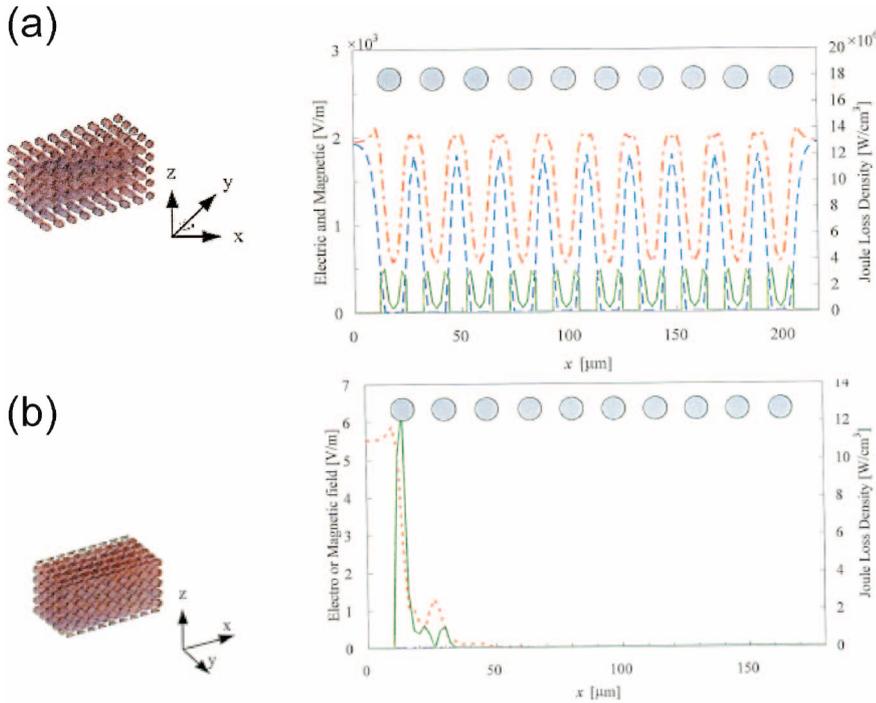


図1 金属銅粒子(6 μm)の充填体内へのマイクロ波(2.45 GHz)の浸透に関するシミュレーション⁽⁵⁾. (a)金属粒子間に空隙がある場合. (b)金属粒子が接触している場合.

る周波数 2.45 GHz においては、金属 Au ($\sigma = 46 \times 10^6 [\text{S} \cdot \text{m}^{-1}]$, $\mu_r = 1$), 牛肉 ($\epsilon_r' = 48.3$, $\epsilon_r'' = 13.5$ (室温))⁽³⁾, Al_2O_3 ($\epsilon_r' = 9$, $\epsilon_r'' = 0.0068$ (室温))⁽³⁾ に対して浸透距離 ($1/e$) を計算すると、それぞれ $1.5 \times 10^{-6} \text{ m}$, 0.2 m , 17 m と言うことになる。すなわちマイクロ波は食品やセラミックスに対しては内部加熱であるが、金属では表面の数ミクロンしか入らない。従って金属塊の加熱は困難であるため、金属粉末や薄膜の加熱に限られることになる。

(2) 金属粉体内への電磁波の浸入

金属粉体をマイクロ波加熱する場合、緻密化の進行とともに電磁波は内部に入りにくくなるであろうと考えられる。金属粉末粒子表面の数ミクロンの浸透層で誘導電流が生じ、これによりジュール発熱が生じたとする。この分のエネルギー損失を考慮した上で、粉体内部にどれだけ電磁波が浸透するか検討が必要である。

ここで電磁界解析ソフトウェア (JMAG, 日本総研ソリューションズ) を使ったシミュレーション結果を図 1 に示す⁽⁵⁾。その結果は、粒子間隙があれば、それが電磁波の波長より十分短くても (図 1(a)) 電磁波は侵入し⁽⁶⁾、通過後の電磁波 (電磁界) 強度は減少する。しかし金属粒子が接触していれば (図 1(b)) 粒子間に表面電流が流れ、電磁波は入っていない。たとえば電子レンジの窓には網が貼ってあり、孔が空いているが、この孔径が電磁波の波長に対し十分に小さければマイクロ波は出て行かない。孔以外の部分は連結しているためである。マイクロ波の浸透距離は、粉体層内で金属粒子の充填構造やそれによる粒子表面電流の状態に依存すると考えられる。

ところで金属粉体内には粒子が無数にあるため、一個ずつ

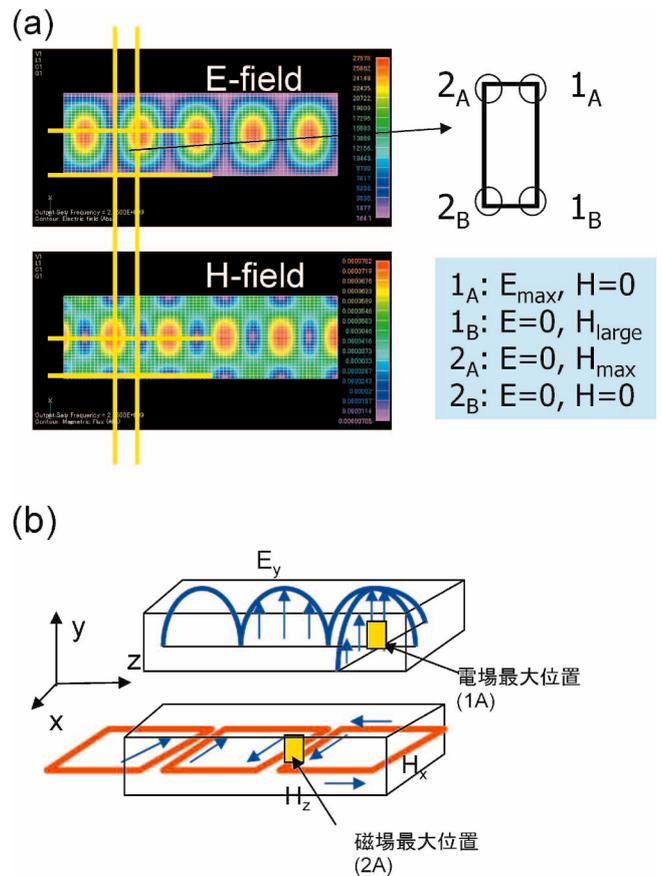


図2 TE01 マイクロ波キャビティ内の電磁場分布の (a)シミュレーション結果 (E_{max} , H_{max} , H_{large} は、それぞれ電場最大値、磁場最大値、極大値を示す.) 及び (b)加熱試料位置 (電場・磁場方向の概略を示す.)

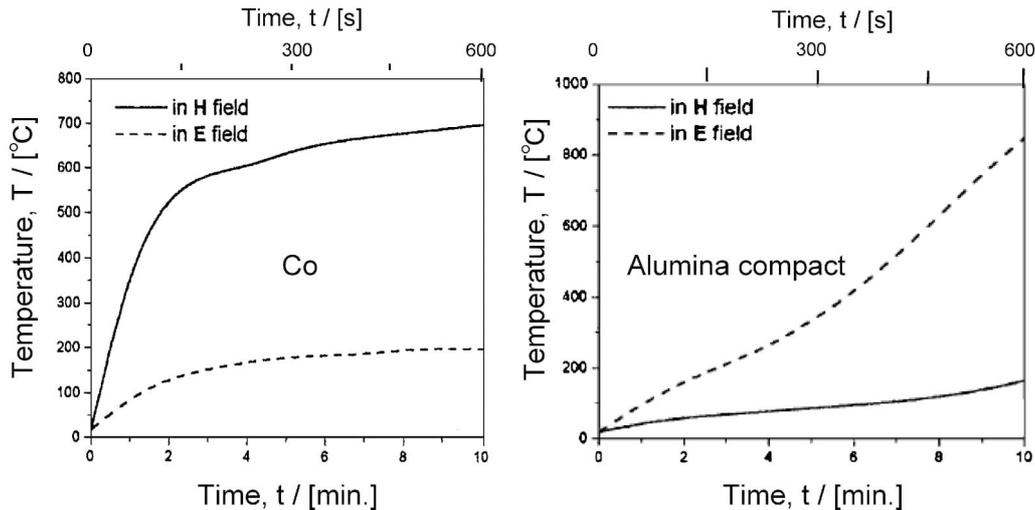


図3 マイクロ波電場および磁場が高い位置における Co およびアルミナ圧粉体の加熱挙動⁽¹²⁾.

の粒子を考慮した計算は不可能である．そこで粉末集合体を一つの物質と考え，そこにその固有の電気伝導度や誘電率の値を与えている⁽⁷⁾⁻⁽⁹⁾．たとえば，粉末充填体は金属粒子と空気(および表面酸化物)から成る複合物質として，平均の電気伝導度と誘電率を与えることにより解析が成されている．しかしながらこの誘電率の設定に関しては，単純ではない．

最近，テラヘルツ領域では金属粒子集合体の電磁波透過能に関する新しい実験結果⁽¹⁰⁾も報告されている．このような観点からも金属粉体内への電磁波の浸入については検討すべき点が未だ残されていると言える．

(3) 電磁波の電場，磁場分離加熱

電磁波のエネルギーは，ポインティングベクトル $\mathbf{E} \times \mathbf{H}$ で表されるが，この発散(divergence)をとると式(9)になる．この式に式(1)(2)(3)を用いて変形すると，式(10)のようになる．

$$\nabla(\mathbf{E} \times \mathbf{H}) = \mathbf{H} \cdot (\nabla \times \mathbf{E}) - \mathbf{E} \cdot (\nabla \times \mathbf{H}) \quad (9)$$

$$= -\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\epsilon \mathbf{E}^2}{2} + \frac{\mu \mathbf{H}^2}{2} \right) - \sigma \mathbf{E}^2 \quad (10)$$

式(10)は電磁波のエネルギーが，電場と誘電率による第1項と，磁場と透磁率による第2項として物質内部に蓄えられ，伝導電流(\mathbf{J})により発熱する仕事($\mathbf{J} \cdot \mathbf{E}$)が， $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$ において電場と導電率により第3項に示されている．最初の2項において誘電率，透磁率の虚部を用いれば，物質内部でのエネルギー損失を表す．これらがそれぞれマイクロ波加熱機構における誘電加熱，磁気加熱，誘導加熱に相当する．物質のマイクロ波加熱機構について電場と磁場による寄与を分離して調べる方法がある．図2には，一端を閉じた導波管(TE01キャビティ：シングルモードアプリアケータとして1つの電磁波定在波モードを閉じ込めているが，一般の電子レンジのようなマルチモードの場合と区別する⁽¹¹⁾.)を示す．この中には定在波においては，電場と磁場の分布が図2のようになっており，電場最大の位置と磁場最大の位置が異

なっている．それぞれの位置に試料を設置し，加熱を行うとマイクロ波電場と磁場の寄与を分離した加熱を行うことができる⁽²⁾⁽¹²⁾⁽¹³⁾．電子スピン共鳴(ESR)を行う場合においても，試料をキャビティ内で磁場最大の位置に設置するのが普通である．このような電場，磁場分離加熱を行って得られた結果の一例⁽¹²⁾を図3に示す．強磁性を有するCo粉末は磁場でよく加熱されるのに対し，誘電体であるセラミックスは，電場においてよく加熱されることが分かる．

3. 金属のマイクロ波加熱が関係する基礎実験結果

金属のマイクロ波加熱が関係したマイクロ波プロセッシングを考える上で重要な最新の研究結果2例を次に示す．

(1) 金属薄膜のマイクロ波電場・磁場分離加熱

金属薄膜もマイクロ波加熱できることを前にも述べたが，実際に加熱を行った結果を示す．金属としては，表面酸化膜の影響を排除する目的からAuを選び，石英ガラス基板に異なる膜厚で蒸着した(45, 133, 407 nm)，これをマイクロ波キャビティ内の電場，磁場の高い位置にそれぞれ設置して加熱を行った．この膜厚はマイクロ波周波数における表皮厚さ(Auの場合，1.5 μm)に比べ十分小さい．図4(a)(b)に示すように，低いパワーでも磁場の方が電場よりも高温となる加熱が生じることが分かった⁽¹⁴⁾．磁場位置においては，磁力線方向に対しAu膜内に生じる渦電流が有効に生じるように働くためであると解釈しているが(図4(c))，この結果は金属のみではなく導電性を有する他の材料の加熱プロセッシングに対しても適用できると考えられる．

図5のAuのX線回折プロファイルからも分かるように，この加熱処理により，ナノサイズ径の粒子が粒成長を起こし，回折線ピークがシャープになっている．これは図4の加熱曲線で見られるピークの存在と関係があると考えられる．すなわち，薄膜の粒構造における microstructural evo-

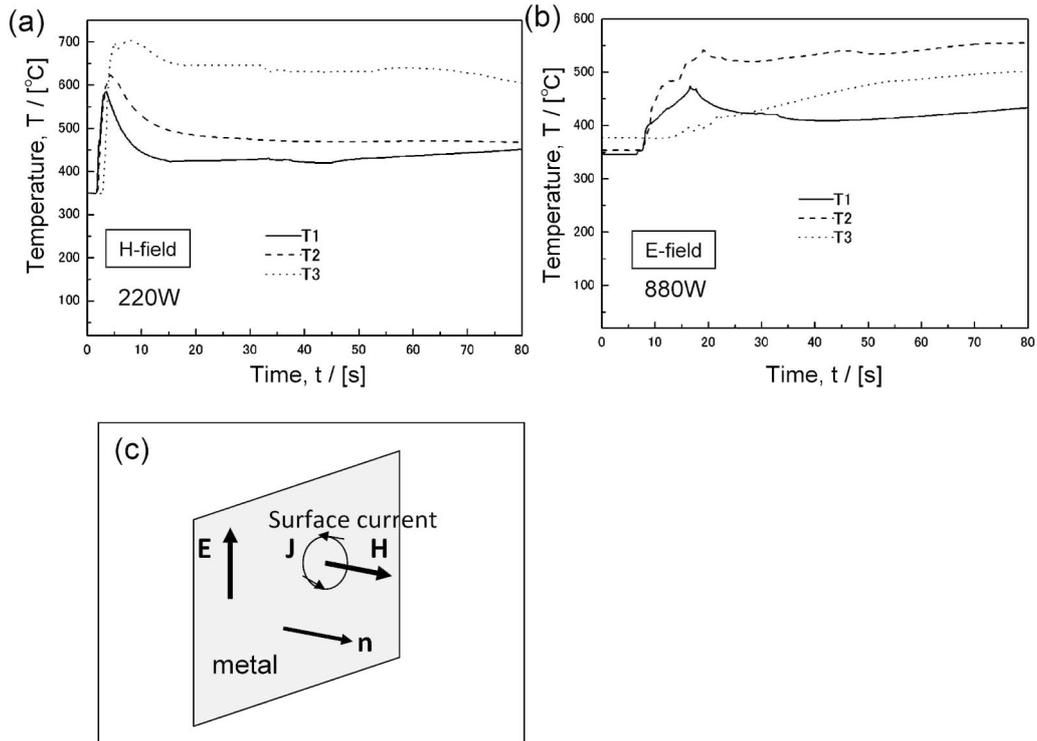


図4 (a)磁場及び(b)電場最大位置における Au 薄膜のマイクロ波加熱曲線⁽¹⁴⁾. (光学的测温のため, 350°C以下は測定値なし)および(c)加熱に關係する表面電流. 膜厚 T1=45 nm, T2=103 nm, T3=405 nm 及び投入電力(W)を图中に示す.

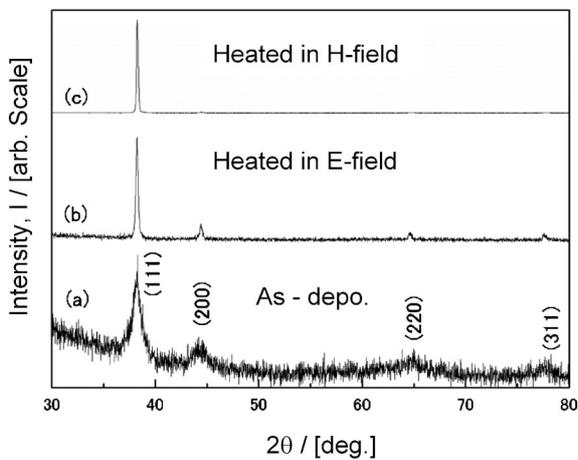


図5 Au 薄膜の X 線回折プロファイル(膜厚 130 nm)⁽¹⁴⁾.

lution がマイクロ波吸収特性に影響を与えることを示しており興味深い. 末吉ら⁽¹⁵⁾も, 以前に Au 薄膜のマルチモード加熱実験を行っており, 同様に微細構造の変化について指摘している.

(2) 金属粒子添加によるソーダ石灰ガラスの加熱

石英ガラス(SiO₂)は, マイクロ波に対して透明であり, 室温からの加熱は困難である⁽¹⁶⁾が, アルカリ(土類)金属などの金属イオンを含むガラスにおいては, マイクロ波吸収能が石英ガラスより大きい. 瓶や窓ガラスなどに使用されている

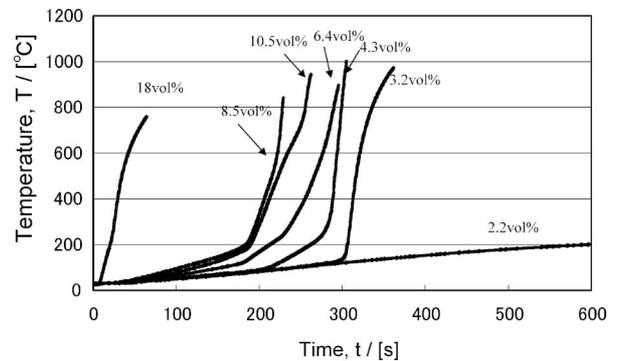


図6 ソーダ石灰ガラスビーズ(直径 0.2 mm)と種々の体積分率の鉄粉(〜70 μm)の混合体の加熱曲線⁽¹⁷⁾.

ソーダ石灰ガラス(Na₂O-CaO-SiO₂)もこの類いではあるが, それでもグラファイト等と比べるとマイクロ波加熱が容易であるとは言い難い. このためマイクロ波加熱が容易な物質を添加し, ガラスの加熱を助長させる. 0.2 mm 径のソーダ石灰ガラスビーズに 70 μm 程度の Fe 粉を添加し, マルチモード装置(出力 670 W)を用い, そのマイクロ波加熱挙動について調べた⁽¹⁷⁾. 図6には, 種々の体積分率で Fe 粉末を加えた混合体の加熱曲線を示している. まずガラスビーズだけの場合は10分間でせいぜい200°C程度しか昇温しなかった. (ただし試料の最高到達温度は, マイクロ波パワーを一定にしても, 試料の断熱状態など諸因子に依存するため, 実

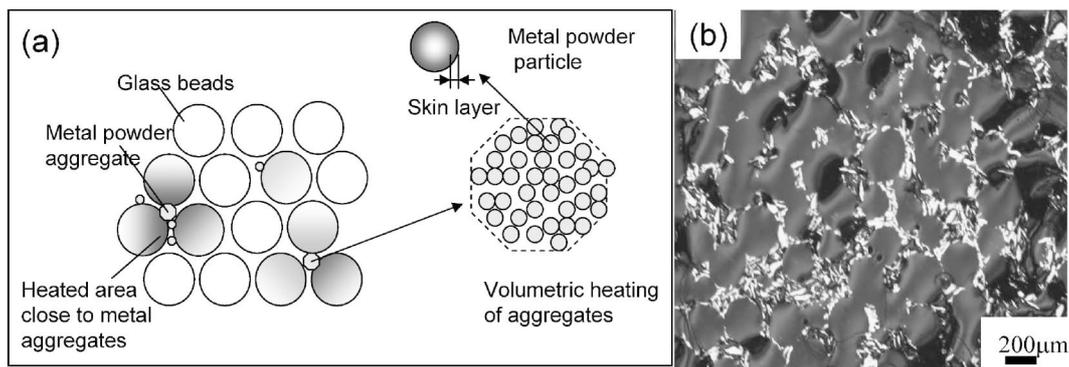


図7 (a)ソーダ石灰ガラス/鉄粉末混合体のマイクロ波加熱に関する模式図、および(b)950°Cに加熱した混合体の光学顕微鏡写真。

験により必ずしも一致しない場合がある。) Feを十分な量(18 vol%)添加すると、マイクロ波照射とともに直ちに加熱が生じた。しかしその量が十分でない場合、加熱初期はガラスビーズと同様の加熱曲線を有するが、ある時点から急激な温度の立ち上がりが生じる。金属粉末は迅速に昇温するが、ソーダ石灰ガラスの誘電率はなかなか上昇せず、金属の加熱により温度が上がり、ようやく加熱が生じたためと考えられる(図7)。誘電率だけではなく、電気伝導度の増加も関係するかもしれないが、ソーダ石灰ガラスの誘電率を測定すると、700°C程度から急激に上昇することが分かっている。

ガラスやセラミックスなどの無機物においては、このような誘電率の温度依存性により、局所的な温度上昇(ホットスポット)が生じ、熱暴走(thermal runaway)と言われる不安定加熱現象が生じる場合があるとされている⁽³⁾⁽¹⁸⁾。本例のような異物、異相が混在した場合における選択加熱の他にも、電磁場の不均一分布による高温部生成などが原因とされる。しかしながら、逆にパワーが低くても局所的に特定の物質を高温にして反応が励起できれば、これを用いて省エネルギー化への応用が可能かもしれない。

4. 応用研究の紹介

金属のマイクロ波加熱が関係する材料・環境プロセスの応用研究として、次に6つの分野における例を紹介する。

(1) 焼結、接合、複合材料

マイクロ波による金属の焼結は、1999年 Royらによって Nature に報告されている⁽¹⁹⁾。彼らは Fe-Ni, Fe-Cu 系の他、その後の報告においても、WC/Co⁽²⁰⁾など種々の合金、金属間化合物の焼結が可能であったことを示している⁽²¹⁾。ミニ特集においても、同グループの Agrawal らが、高融点金属の焼結などの例において高密度焼結体の作製を示している⁽²²⁾。最近では D. V. Louzguin, G. Xie らにより金属ガラスのマイクロ波焼結が行われている⁽²³⁾。

Maら⁽²⁴⁾は銅粉末のマイクロ波加熱において、加熱曲線に温度ピークが現れることを示した。その原因として焼結初

期過程における粒子合体により、そのスケールが skin depth になることが温度ピークの生成と関係していると論じている。(3.(1)の Au 薄膜は skin depth 以下の膜厚である点において異なっている。)

マイクロ波加熱により、ろう材の金属粉末を溶解して金属やセラミックス片の接合を行った研究例がある。Agrawalらは鉄鋼材料片の間に挟んだ“ろう材”金属粉末をマイクロ波加熱することにより、鋼材の接合を行っている⁽²²⁾。

金属粉末をガラスやセラミックスと混合し、マイクロ波加熱することで複合材料を得る試みも成されている。Minayらは、多種の金属粉末とホウ珪酸ガラスとの混合体の加熱⁽²⁵⁾により、ガラス/金属複合材料を作製している。マグネシウムやアルミニウム粉末にセラミックス粉末を混合した系にも応用されている⁽²⁶⁾⁽²⁷⁾。またセラミックプリフォームと Al, Mg(系合金)を接触させ、マイクロ波加熱を同時に行うことにより溶湯の含浸を促進し、セラミック/金属基複合材料の作製時間を低減させたという報告⁽²⁸⁾もある。

(2) 金属薄膜、多層膜のマイクロ波加熱

ガラスに蒸着した金属をマイクロ波加熱できることが示されていた⁽⁶⁾⁽¹⁵⁾⁽²⁹⁾。金属薄膜に関しては、その他金属の例の報告⁽³⁰⁾⁽³¹⁾、そして導電性薄膜の電磁波吸収解析⁽³²⁾などの報告があるが、粉末に比べ数は少ないと言える。

最近 Cao⁽³³⁾ら、Wang⁽³⁴⁾らは、多層膜の電場・磁場分加熱を行った。強誘電体薄膜を有する多層膜において、ゾルゲル法により作製した PZT (Pb(Zr_x, Ti_{1-x})O₃)膜は当初非晶質であり、十分な強誘電特性を有しない。これを結晶化するためにマイクロ波加熱を試みた⁽³³⁾。例えば多層膜として PZT/Pt/Ti/SiO₂/Si という多層のうちで、幾つかの層構成の加熱を試みた。この中に Pt, Ti という金属膜がスパッタ蒸着されている。(Ptは導電膜であり、Tiは応力緩衝層である。)非晶質の PZT ではマイクロ波加熱が十分生じないのであるが、Si層自体がマイクロ波加熱される。それに加え、金属層があると電場・磁場分離加熱において、その状況が変わってくるのが分かった。図8(a)は、磁場中で加熱した場合である。金属層がある場合、加熱は迅速に生じ直ち

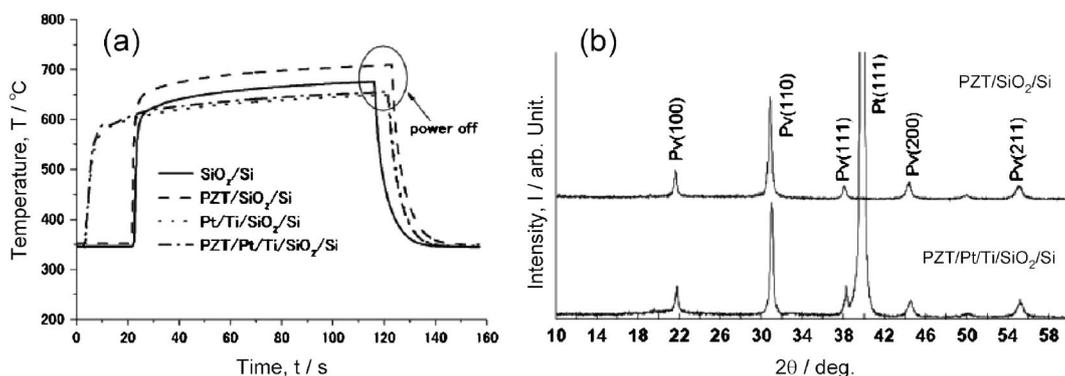


図8 (a)マイクロ波磁場位置で加熱した各種多層膜の加熱曲線。(光学的測温のため、350°C以下は測定値なし)および(b)多層膜のXRDプロファイル(Pv: Perovskite相).

に飽和値に達することが分かる。一方Siの電気伝導度の温度依存性の影響があり、昇温開始は遅いが同様に高温まで加熱ができることが分かった。これにより図8(b)に示すように、PZT膜が完全に結晶化した。

一方、3.(1)の場合と同様に、電場の強い位置では磁場に比べ、大きなパワーを加えても到達温度は低く、結晶化も完全ではなく、パイロクロー相も残存する結果となった⁽³³⁾。

(3) 金属の反応を伴う加熱と材料合成、炭素還元

マイクロ波加熱された金属と反応を起こさせ、特殊な化合物を作成する試みは1995年Mingosらにより報告されている(硫化物)⁽³⁵⁾。この他三元系窒化物の合成も試みられている⁽³⁶⁾。一方ミリ波により金属チタン粉末の大気中加熱により窒化チタンが生成した⁽³⁷⁾ということも非常に興味深い。

マイクロ波加熱による金属、合金粉末の燃焼合成反応についても幾つかの研究報告が成されている。硅化モリブデンの作製のため、モリブデンとシリコン粉末の混合圧粉体をマイクロ波加熱する際に燃焼波の伝播が観察された様子が示されている⁽³⁸⁾。この他にも金属間化合物やセラミックスの合成について報告が成されている⁽³⁹⁾。

マイクロ波加熱を用いTiO₂酸化物の炭素還元によりTiC, TiNなどを作製する研究も行われている⁽⁴⁰⁾。この反応過程においては、TiO_{2-x}の生成を抑え、反応をコントロールすべきであるが、逆にマイクロ波製鉄や金属生産工程における廃棄物(スラグ、ダスト、スラッジ⁽⁴¹⁾などの酸化物)を還元し、金属をリサイクルする際には、反応生成物として金属(粒子もしくは滴)を生じさせることが目的である。比重分離できる程度の大ききになれば、回収が容易である。そこで金属の粒子が生成した時、これがどのように加熱され凝集・合体して塊になるかという点は、マイクロ波加熱メカニズムとともに重要である。(大きくなると加熱が生じにくくなるため、永田らはマイクロ波製鉄⁽⁴²⁾においては、炉壁をSiCにより予熱している。)

(4) ガラス溶融固化、土壌/スラッジ中の重金属処理

マイクロ波加熱による環境技術への応用⁽⁴³⁾として有害廃

棄物のガラス溶融固化がある。ガラス溶融固化は、重金属イオンがSiO₂のネットワーク内に閉じ込められるため、セメント固化に比較し安定化の度合いが高い。更に大きな減容化が可能である。ガラス固化にはマイクロ波以外の加熱方法も存在するが、それぞれの特徴、処理コストなどを考慮して選択されている。

3.(2)でも述べたように、ガラスは必ずしも良好なマイクロ波吸収体ではない。そのために、炭素材料や鉄片が添加材として入れられる。ガラスを高温にして誘電率や電気伝導度を増加させるためである。完全なガラス固化までは至らないが、マイクロ波により工業スラッジや土壌の加熱⁽⁴⁴⁾⁽⁴⁵⁾を行って、重金属を固定化する試みが行われている。その例⁽⁴⁴⁾を図9に示す。Pb(NO₃)₂溶液を含ませた土壌に、鉄線を加えマイクロ波加熱を補助した。測温は成されていないが、処理後に浸出試験(TCLP)を行った。ガラス化された部分(GCF)では、Pbがほぼ溶解せず、ガラス化しなかった部分(SF)でも、加熱処理時間とともにPbの溶出量が減少していることを示している。

(5) 金属水素化物

金属水素化物に対するマイクロ波加熱は、水素放出への応用として最近中森、折茂らにより提案され、詳細な研究が行われている⁽⁴⁶⁾⁽⁴⁷⁾。金属結合性の強いTi-HやZr-Hにおいてはマイクロ波加熱が容易であり、水素吸蔵合金としての使用が検討されている。図10には、種々の金属水素化物のマイクロ波加熱挙動を示している。彼らは、Li-B-H系の水素化物の研究も行っているが、この場合マイクロ波吸収が相変態により変化することを見出している。Li-B-H系において存在するイオン伝導性が、マイクロ波加熱と関係していることを誘電率の測定より議論している。

(6) 触媒金属粒子

一般に金属表面は触媒作用があるため、多孔質のセラミック担持体上に金属粒子を配置し、触媒体とし反応器内に設置する。金属粒子のマイクロ波加熱と環境ガス触媒に関しては、Zhangらによる詳細なレビュー⁽⁴⁸⁾がある。これは、金属粒

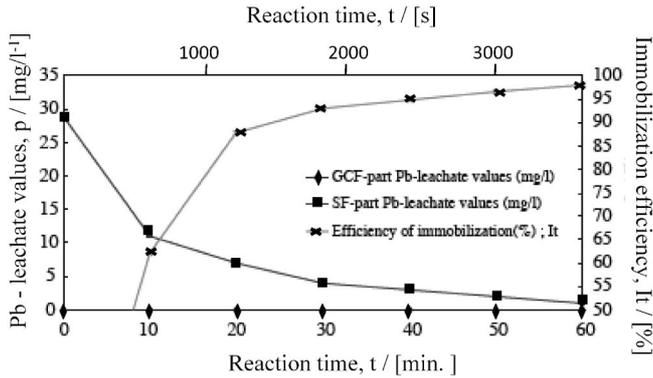


図9 Pb含有土壌のマイクロ波処理時間と浸出試験結果⁽⁴⁴⁾.

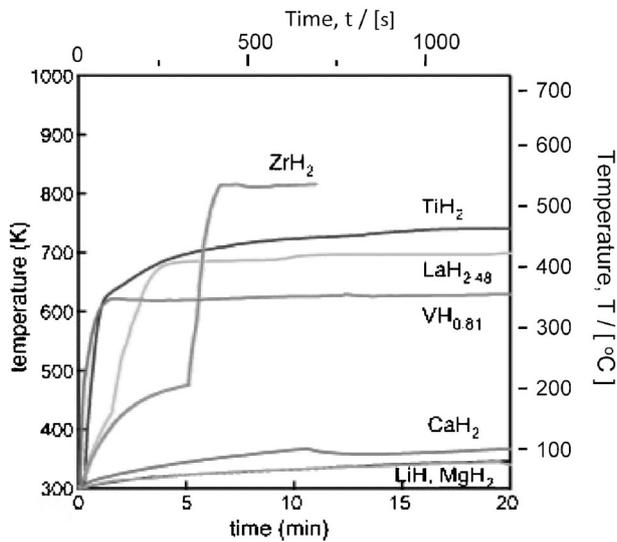


図10 各種金属水素化物のマイクロ波加熱曲線⁽⁴⁶⁾.

子を含めて誘電加熱と題しているが、金属電気伝導度から誘電損率を算出し⁽⁴⁹⁾ ($\epsilon'' = \sigma / \omega$)、議論を進めている。ただし触媒反応の促進には、マイクロ波による吸着分子への影響もあり、十分に分離して議論することは難しいかもしれない。

自動車排ガス中の無害化を目的として白金系触媒金属粒子が多く用いられている。この担持体は自動車の発進時には、十分な温度に加熱されておらず、触媒効果を発揮することができない。そこでマイクロ波加熱により瞬時に金属粒子を加熱させるという試みが成されている⁽⁵⁰⁾。現実としては、金属だけでは安定な加熱が達成できず、それを補償するようなセラミックスを開発し、実用化を進めている⁽⁵¹⁾。

5. 結 言

マイクロ波の金属加熱という狭い範囲の題材を取り上げたが、比較的高温へのマイクロ波加熱プロセッシングの基礎と応用に関して公的な内容を紹介した。マイクロ波加熱の応用分野には、この他にもマイクロ波化学(有機・無機反応、マ

イクロ波プラズマ化学など)があるが、基礎となる物理、化学現象には共通点があると考えられる。今後はこれらを含め新規応用分野を更に発展させていきたいと考えている。

最後に、大気中で活性な金属粉末を電子レンジに入れて加熱するのは、発火の可能性がある危険である。また不活性ガスを導入するために電子レンジを勝手に細工することも、マイクロ波の漏れを起こす可能性がある危険である。これらの点については留意頂きたい。

本研究の一部は、文部科学省特定領域研究(平成18-22年度)「マイクロ波励起・高温非平衡反応場の科学(代表:核融合研佐藤元泰)」, 計画研究 A05「新規マイクロ波加熱法の高度利用による環境・省エネルギー・材料プロセスの開発: 課題番号18070002」により行われたものである。Springer Science and Business Media には図面の掲載にご厚意を頂いたことに感謝します。

文 献

- (1) J. Walkiewicz, G. Kazonich and S. L. MacGill: Min. Metall. Processing, **5**(1988), 39-42.
- (2) J. Cheng, R. Roy and D. Agrawal: Mater. Res. Innovat., **5**(2002), 170-177.
- (3) Microwave Processing of Materials: Ed. by Nat. Res. Council, national Acadmy Press, Washinton D.C. USA, (1994), p. 34
- (4) たとえば, J. D. Kraus and K. R. Carver: Electromagnetics, 2nd ed. Int. Student Ed. McGraw-Hill, New York, USA, (1973), p. 402.
- (5) 鈴木基晴: 文部科学省総合研究大学院大学核融合科学研究所, 博士学位論文, (2008).
- (6) 岡本 正: 平成17年日本鉄鋼協会春季大会招待講演(材料とプロセス, **18**(2005), 140.)及び私信.
- (7) K. I. Rybakov, V. E. Semenov, S. V. Egorov, A. G. Eremeev, I. V. Plotnikov and Y. V. Bykov: J. Appl. Phys., **99**(2006), 023506(1-8).
- (8) J. Luo, C. Hunyar, L. Feher, G. Link, M. Thumm and P. Pozzo: Appl. Phys. Lett., **84**(2004), 5076-5078.
- (9) P. Mishra, G. Sethi and A. Upadhyaya: Metall. Mater. Trans., **37B**(2006), 839-845.
- (10) K. J. Chau, G. D. Dice and A. Y. Elezzabi: Phys. Rev. Lett., **94**(2005), 173904(1-4).
- (11) 吉川 昇: 金属, **76**(2006), 864-869.
- (12) J. Cheng, R. Roy and D. Agrawal: J. Mater. Sci. Lett., **20**(2001), 1561-1563.
- (13) N. Yoshikawa, E. Ishizuka and S. Taniguchi: Mater. Trans., **47**(2006), 898-902.
- (14) Z. Cao, N. Yoshikawa and S. Taniguchi: J. Mater. Res., **24**(2009), 1-6.
- (15) 末吉秀一, 柿内茂樹: 日本金属学会誌, **71**(2007), 629-635.
- (16) J. D. Katz: Annu. Rev. Mater. Sci., **22**(1992), 153-170.
- (17) N. Yoshikawa, H. Wang, K. Mashiko and S. Taniguchi: J. Mater. Res., **23**(2008), 1564-1569.
- (18) V. M. Kenkre, L. Skala and M. W. Weiser: J. Mater. Sci., **26**(1991), 2483-2489.
- (19) R. Roy, D. Agrawal, J. Cheng and S. Gedevisanishvili: Nature, **399**(1999), 668-670.
- (20) E. Breval, J. P. Cheng, D. K. Agrawal, P. Gigl, M. Dennis and A. J. Papworth: Mater. Sci. Eng. A., **391**(2005), 285-295.
- (21) S. Gedevisanishvili, D. Agrawal and R. Roy: J. Mater. Sci. Lett., **18**(1999), 665-668.
- (22) D. Agrawal, J. Cheng, R. Pelemedu, Y. Fang and R. Roy: までりあ, **45**(2006), 574-576.

- (23) G. Xie, S. Li, D. V. Louzguin, Z. Cao, N. Yoshikawa, M. Sato and A. Inoue: Proc. Int. Conf. of Global Congress on Microwave Energy Applications, GCMEA, Ohtsu, Japan (2008), 159-162.
- (24) J. Ma, J. F. Diehl, E. J. Johnson, K. R. Martin, N. M. Miskovsky, C. T. Smith, G. J. Weisel, B. L. Weiss and D. T. Zimmerman: J. Appl. Phys., **101**(2007), 074906(1-8).
- (25) E. J. Minay, A. R. Boccaccini, P. Veroneisi, V. Cannillo and C. Leonelli: J. Mater. Process. Technol., **155-156**(2004), 1749-1755.
- (26) K. S. Tun and M. Gupta: Composite Sci. Technol., **67**(2007), 2657-2664.
- (27) E. P. Bescher, U. Sarkar and J. D. Mackenzie: Proc. Mater. Res. Symp., **269**(1992), 371-378.
- (28) P. G. Karandikar, M. K. Aghajanian, D. Agrawal and J. Cheng: Ceram. Eng. Sci. Proc., **27**(2007), 435-446.
- (29) Y. Menke, D. Chiaretta, D. Milanese and M. Ferraris: J. Non-Crystal. Solid, **352**(2006), 2526-2531.
- (30) K. S. Bhat, S. K. Datta and C. Suresh: Thin Solid Films, **332**(1998), 220-224.
- (31) R. Higuchi, H. Takashima, H. Kato and Y. Kanno: Proc. IEEE Conf. Sys. Man. Cybernetics Oct 8-11 (2006), 1408-1412.
- (32) H. Bossman, Y. Y. Lau and R. M. Gilgenbach: Appl. Phys. Lett., **82**(2003), 1353-1355.
- (33) Z. P. Cao, Z. J. Wang, N. Yoshikawa and S. Taniguchi: J. Phys. D: Appl. Phys., **41**(2008), 092003(1-4).
- (34) Z. J. Wang, Z. P. Cao, Y. Otsuka, N. Yoshikawa, H. Kokawa and S. Taniguchi: Appl. Phys. Lett., **92**(2008), 222905(1-3).
- (35) A. G. Whittaker and D. P. Mingos: J. Chem. Soc., Dalton Trans., (1995), 2073-2079.
- (36) J. D. Houmes and H. C. Loye: J. Solid State Chem., **130**(1997), 266-271.
- (37) 木村 禎一, 滝沢博胤, 上田恭太, 遠藤 忠: 粉体及び粉末冶金, **46**(1999), 378-382.
- (38) J. R. Jokisaari, S. Bhaduri and S. B. Bhaduri: Mater. Sci. Eng., A **323**(2002), 478-483.
- (39) D. Atong and D. Clark: Ceram. Inter., **30**(2004), 1909-1912.
- (40) R. D. Pelemedu, M. Fleming, D. Agrawal and R. Roy: J. Am. Ceram. Soc., **85**(2002), 117-122.
- (41) N. Yoshikawa, E. Ishizuka, K. Mashiko and S. Taniguchi: Metall. Mater. Trans., B **38**(2007), 863-868.
- (42) K. Ishizaki, K. Nagata and T. Hayashi: ISIJ Int., **46**(2006), 1403-1409.
- (43) D. A. Jones, T. P. Lelyveld, S. D. Mavroidis, S. M. Kingman and N. J. Miles: Resources, Conservation and Recycling, **34**(2002), 75-90.
- (44) C. J. G. Jou: J. Environmental Management, **78**(2006), 1-4.
- (45) R. A. Abramovitch, L. ChangQing, E. Hicks and J. Sinard: Chemosphere, **53**(2003), 1077-1085.
- (46) Y. Nakamori, M. Matsuo, K. Yamada, T. Tsutaoka and S. Orimo: J. Alloys Compounds, **446-447**(2007), 698-702.
- (47) M. Matsuo, Y. Nakamori, K. Yamada and S. Orimo: Appl. Phys. Lett., **90**(2007), 232907.
- (48) X. Zhang and D. O. Hayward: Inorg. Chem. Acta, **359**(2006), 3421-3433.
- (49) W. L. Perry, D. W. Cooke, J. D. Katz and A. K. Dartye: Catalysis Lett., **47**(1997), 1-4.
- (50) J. Tang, T. Zhang, L. Ma, N. Li, D. Liang and Li. Ling: J. Catalysis, **211**(2002), 560-564.
- (51) 福島英冲, 石井靖弘, 福島善章: 第5回マイクロ波効果・応用国際シンポジウム講演概要集, (2005), 50-57.



吉川 昇

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★

1983年3月 東北大学大学院工学研究科修士課程修了
 1983年4月 東北大学工学部勤務, 現在に至る。
 1988年3月 工学博士(東北大学)
 専門分野: 循環材料プロセス学, マイクロ波応用材料・環境技術
 金属, セラミックス構造・機能材料の製造プロセスに関する研究に従事してきた。最近は材料製造プロセス, 廃棄物処理等の環境分野におけるマイクロ波加熱利用技術に関する研究活動を行っている。

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★