軽金属へのマイクロ波加熱の
高度利用技術

吉川 昇*

Journal of The Japan Institute of Light Metals, Vol. 61, No. 8 (2011), 404-409

Advanced application of microwave heating to light metals

Noboru YOSHIKAWA*

Keywords: microwave, heating, light metal, sintering, combustion reaction, infiltration

1. はじめに

マイクロ波は300 MHz から300 GHzの周波数帯を持つ電磁波と定義されるが、真空中での波長は1 m から1 mmに相当する。この中で我々が使う電子レンジの周波数である2.45 GHzの波長は12.4 cmであるため、むしろこの領域はセンチ波と称すべきである。これより高い周波数領域(30 GHz から300 GHz)はミリ波と呼ばれており、実際にミクロンサイズの波長を有する電磁波はテラヘルツ波以上なのである。

マイクロ波は第2次世界大戦以前からレーダや通信などの目的に用いられていたが、1946年マイクロ波の発振管の実験をしていた米国のP. Spencerが、ポケットのキャンディが溶けていることに気づき、マイクロ波加熱を発見したと言われている¹⁾。その後マイクロ波加熱研究は各分野において盛んになった。1970年代に入りオイルショックが起ると、電熱への依存性が重視されるようになった²⁾。このためマイクロ波加熱の研究が更に加速した。その頃には、発振管であるマグネトロンの大量生産が可能となり、家庭用の電子レンジが普及した³⁾。

マイクロ波は、電気エネルギーを伝送するためにも用いられている。宇宙で太陽光により発電した電力をマイクロ波に変換し地球上に伝送しようという計画が60年代から提案され⁴⁾、NASAでも検討された。これはISM周波数(産業、科学、医療のために割当てられている周波数帯)のうち、センチ波(2.45や5.8 GHz)は、電離層を透過し、大気や水分による減衰が生じないことから電波の窓と言われ、宇宙からのエネルギー伝送には有効とされている⁵⁾。

マイクロ波加熱は食品等の加熱に有効であり、家庭用だけではなく、調理や食品加工に広く応用されている。一方80年代に入り、ファインセラミックスの研究が盛んになり、セラミックス粉末の乾燥にマイクロ波を用いていたところ、セラミックス自体が高温に加熱されることがわかり⁶⁾、セラミックスの焼結や高温を必要とする無機材料のプロセッシングに応用しようという動きが出てきた。またミリ波の応用がセラミックスの焼結を促進するとの報告⁷⁾もあり、高出力のミリ

波発振管の開発と相俟って盛んに研究が行われた。

その中でマイクロ波による金属の加熱に関する研究は、比較的歴史が浅いと言える。これは一般に金属の塊はマイクロ波を反射し、主な加熱手段ではなかったためである。

1988年、Walkiewiczらは種々の金属粉末をマイクロ波加熱したところ、金属の種類により昇温速度に違いがあることを報告した⁸⁾。金属はバルク体ではなく、粉末や圧粉体であれば加熱が可能であり、Full sinteringが可能であるという報告が1999年Nature誌に掲載された⁹⁾。また金属薄膜もマイクロ波加熱が可能であることも知られている¹⁰⁾。

金属の中でも強磁性金属はマイクロ波加熱が起こりやすいが、これは磁性に起因する加熱機構が存在するためである。軽金属(単体)は強磁性を有しないため、加熱機構としては後に詳説するようにマイクロ波磁場による誘導電流(渦電流)が主なメカニズムとなる。

本稿においては、金属のマイクロ波加熱の基礎事項に関し次節で述べ、その次にマイクロ波加熱を利用した軽金属の焼結、軽金属複合材料、燃焼合成反応などに関する最近の研究を紹介する。

2. 金属のマイクロ波加熱に関する基礎

2.1 種々物質のマイクロ波の浸透距離

前述したようにマイクロ波は電磁波であり、電場と磁場を有している。電磁波は真空中(空気中でも)では、光速 $c=1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$ で進むが(ここで、真空の誘電率 ϵ_0 、透磁率 μ_0)、物質があると一部は反射し一部は物質内に侵入する。その度合いは、物質のインピーダンス Z (誘電率 ϵ 、透磁率 μ 、電気伝導度 σ の関数)に依存し、これはまた周波数の関数でもある($Z=Z(\epsilon, \mu, \sigma, \omega)$)。物質を透過する場合もある。

物質内に侵入した部分において物質とマイクロ波との相互作用が生じ、発熱が生じる。侵入深さがどのくらいの範囲であり、その中における電場、磁場の強度分布が発熱の度合いを決定することになる。このため侵入深さに関して、検討する必要がある。電場(E)、磁場(H)は、物質内では次の式に従って減衰する。

* 東北大学大学院環境科学研究科 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-02)。Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University (6-6-02, aza-Aoba, Aoba-ku, Aramaki, Sendai-shi, Miyagi 980-8579). E-mail: yoshin@material.tohoku.ac.jp

受付日:平成22年11月15日 受理日:平成23年2月7日

$$\begin{pmatrix} \mathbf{E} \\ \mathbf{H} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{E}_0 \\ \mathbf{H}_0 \end{pmatrix} e^{-\alpha x} \quad (1)$$

ここで $\mathbf{E}_0, \mathbf{H}_0$ は物質表面での電場、磁場であり、 x は表面から物質内部への距離である。ここで α は減衰距離に関する特性距離であり、その逆数 $\delta=1/\alpha$ が電磁波の浸透距離を表す。ここで、 α は以下に示す複雑な関数である。

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

誘電体では、 $\sigma = \omega \varepsilon''$ とおくことにより、(2) 式は (3) 式のように表せる。

$$\begin{aligned} \alpha &= \omega \sqrt{\frac{\varepsilon_0 \mu_0}{2}} \cdot \left[\sqrt{(\varepsilon_r')^2 + (\varepsilon_r'')^2} - \varepsilon_r' \right]^{1/2} \\ &= \frac{\omega}{\sqrt{2} \cdot c} \cdot \left[\sqrt{(\varepsilon_r')^2 + (\varepsilon_r'')^2} - \varepsilon_r' \right]^{1/2} \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、この誘電体では透磁率 μ は真空の透磁率 μ_0 と等しいとしている。

また誘電率は、真空の誘電率 ε_0 で規格化された比誘電率 $\varepsilon_r', \varepsilon_r''$ を用いている。

一方、金属の場合、(2) 式における $\sigma/\omega \varepsilon$ は 1 より十分大きいと仮定することにより (4) 式のようになる。

$$\alpha = \sqrt{\frac{\omega \mu \sigma}{2}} \quad (4)$$

(3), (4) 式を用いれば、(その逆数から) マイクロ波侵入距離を見積もることができる。たとえば、金属 Mg ($\sigma=2.5 \times 10^7$ [S/m]) の場合、2.45 GHz では $2 \mu\text{m}$ であり、牛肉の場合 ($\varepsilon_r'=48.3, \varepsilon_r''=13.5$) には 0.2m となる。

2.2 マイクロ波の加熱機構

電磁波のエネルギーは、Poynting ベクトル ($\mathbf{E} \times \mathbf{H}$) により表せる¹¹⁾ が、この発散 (divergence) をとると、(5) 式のようになる。

$$\nabla(\mathbf{E} \times \mathbf{H}) = -\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\varepsilon \mathbf{E}^2}{2} + \frac{\mu \mathbf{H}^2}{2} \right) - \sigma \mathbf{E}^2 \quad (5)$$

(5) 式の各項はそれぞれ誘電エネルギー、磁気エネルギーとして物質内に蓄えられ、伝導電流 ($\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$) により発熱する仕事 ($\mathbf{J} \cdot \mathbf{E} = \sigma \mathbf{E}^2$) に対応する。これは、誘電加熱、磁気加熱および誘導加熱機構に相当する。誘電加熱は、電気双極

子がマイクロ波の交番電場 ($\mathbf{E}$) により (回転) 運動する際に、摩擦として消散され発熱する機構である。磁気加熱とは、磁気由来する加熱機構であるが、これがどのような機構であるかについては、最近^{12),13)} まで十分な検討がなされてこなかった。この機構は自発磁化を有する強 (フェリ) 磁性体において生じるため、強磁性が消滅するキュリー温度以上では存在しない。

また、金属のような導電性が大きい物質では表面に表皮 (渦) 電流が生じるが、これによりジュール発熱が生じる。後で述べる実験結果より、金属はマイクロ波磁場において加熱されやすい。渦電流は誘導電流として、マイクロ波磁場により励起されるためと解釈される。一方誘電体では、電束密度 ($\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}$) の時間変化 ($\partial \mathbf{D} / \partial t$: 変位電流, t : 時間) により発熱が生じ、これが誘電加熱に相当する (電束密度 $\mathbf{D}$ の電場 $\mathbf{E}$ からの遅れによるエネルギーロス)。

金属粉体の誘電率がマイクロ波領域において測定されており、 $\varepsilon', \varepsilon''$ が得られている。しかしながらこの誘電率は金属固有の物性値ではなく、表面酸化物や粉体空隙の影響を含んでいる可能性もある。

2.3 シングルモードとマイクロ波電場・磁場分離加熱

マイクロ波はマグネトロンなどの発振管 (近年では 2.45 GHz でも高出力 (~500 W) を有する半導体発振器も発売されてきている) により発振された後、導波管を通じて加熱室内に導入される。電子レンジのように (図 1(a)), 金属の壁で囲まれた空間 (cavity) 内では、マイクロ波は壁で何度も反射され、その空間の形状・寸法と、マイクロ波の波長で決まる定在波が形成される。これは不均一なマイクロ波分布である。この中で加熱 (調理) したい物質を均一に加熱するために、物体を回転させている。そうでない場合は、キャビティに入る前に金属製の回転羽 (ディフューザ) に当ててマイクロ波を散らし、試料に均一に照射する場合もある。これは、キャビティ内で種々のモードが生じるため、マルチモードキャビティと称される。

一方、導波管の一端を金属壁で閉じるとともに、図 1(b) のように導波管のある位置に窓 (アイリス) を設置し、この領域内にマイクロ波を閉じ込めてしまう。この領域では、終端壁とアイリス壁との間で定在波が形成される。これは一つのモードのマイクロ波分布を持つため、シングルモードキャビティと称される。シングルモードキャビティの中では、電場と磁場の分布が異なり、それぞれの場の最大位置に加熱試料を置くことにより、電場と磁場を分離した加熱が可

図 1 (a) マルチモードアプリケーション (電子レンジ), (b) シングルモードアプリケーション (TE103 キャビティ) 内の電場・磁場分布の模式図

図2 (a) Hybrid 加熱装置模式図¹⁹⁾, (b) Hybrid 加熱プロセスにおける熱移動方向

能^{14),15)}である。これは物質の加熱機構を論じるためには、よい手段である。ただし電場・磁場のみが存在する領域の大きさは小さく、その場所以外は両者が混在しているため、純粋な電場・磁場加熱とは言えない場合が一般的である。また波長とともにそれぞれの領域も小さくなるため、ミリ波では電場・磁場を分離して加熱できる試料寸法は大きくない。

2.4 サセプタ加熱 (Hybrid 法)

特殊な加熱法として、サセプタ加熱という加熱方法がある。例えばアルミナ等の酸化物は室温では誘電 (損) 率が低いいため、マイクロ波加熱が起りにくい。高温になると誘電 (損) 率が増加し、加熱が起こようになる。したがってマイクロ波加熱しやすい物質 (サセプタ) により、ある程度の温度まで上げておいて、マイクロ波吸収を生じさせる方法である。キャビティ内に十分な大きさがとれる場合、試料の近傍にある程度の大きさのサセプタを入れ、サセプタと試料ともにマイクロ波が照射されるようにしておく (図2(a))。サセプタの温度上昇に伴い伝熱により試料が昇温し、マイクロ波を吸収して発熱するようにする。

マイクロ波加熱とサセプタ加熱においては熱流の方向が異なり (図2(b)), 後述するように金属の焼結にも有効である。しかしながらこの方法を用いると、その試料に対してマイクロ波加熱がどれくらいの割合で寄与しているのか議論が困難になる。またサセプタとしてSiCを用いる場合が多いのであるが、SiCは1000℃程度まではマイクロ波をよく吸収し迅速に昇温するが、それ以上には温度があまり上がらない。酸化物では温度の上昇とともにマイクロ波を吸収しやすくなることと逆の傾向である。

ガラス粉体やカレット、土壌の加熱において黒鉛や金属棒などを混入させる場合¹⁶⁾がある。これもマイクロ波のサセプタ加熱であるが、これらの場合は試料は粒状などで小さく、外部加熱サセプタとは異なる。

3. マイクロ波加熱の応用例

3.1 軽金属粉末の焼結

金属粉末の圧粉体をマイクロ波加熱により焼結を行う場合、焼結とともに圧粉体が緻密化していき、マイクロ波は中に入らなくなると考えられる。このことに関しては、図3に例を用いて説明する。

電子レンジの窓に設置された金網 (金属で結合している) からマイクロ波は外部に出て行かないが、金属円盤が孤立し配列したシートをマイクロ波は透過する (図3(a))。これに関するシミュレーションも行われている¹⁷⁾。マイクロ波の波

図3 マイクロ波と金属粉末との相互作用に関する模式図 (a) 孔のある金属板のマイクロ波遮断 (左), 孤立した円盤列へのマイクロ波浸透 (右), (b) 金属塊によるマイクロ波の反射, 疎圧粉体と緻密圧粉体, 部分焼結体における反射と透過, (c) 孤立した金属粒子集合体 (左) と結合した金属粒子集合体 (右) 内における電磁場

長に比べ金属粉末は圧倒的に小さいが、この傾向は成立つと考えられる。

金属表面に酸化物があれば粒子間で金属同士は接しておらず、マイクロ波は入って行くことが可能であるが、焼結体以外でも圧粉体の圧縮率が高い場合は金属粒子同士の接触が生じ、マイクロ波の侵入は困難になると考えられる (図3(b), (c))。

緻密化が進んだ状態ではマイクロ波は内部まで浸透しないが、表面層の加熱により熱伝導が生じて内部の温度が上が

り、焼結が進むことは考えられる。十分小さい試料では熱伝導により試料全体で焼結が進行し、緻密化できる可能性がある。また金属粉末にグラファイト粉末を混ぜ、昇温することも可能であるが、この場合炭化物の生成や炭素の固溶が生じる可能性がある。

緻密な焼結体を得るためには、Hybrid 加熱法が有効である。これに関しては、Al, Mg, Ti を含め、Gupta のグループが多くの研究^{18),19)}を行っている。Hybrid 法では、焼結密度が低い場合は内部までマイクロ波が侵入し、圧粉体内部の温度が上がると同時に、SiC サセプタが外部から試料を加熱し、十分緻密な焼結体を得られたということである。製品によって上手なプロセスコントロールすることが必要と思われるが、図 4 には同プロセスにて作製した Al-Al/Cu ナノ複合焼結体の破面の写真を示す。焼結体の気孔率が 1% 以下であると述べている。

国内においては、軽金属のマイクロ波焼結に関する研究例は多いとは言えないが、その中でシングルモードを用いた Al の焼結に関する研究を紹介する。田口、岡本²⁰⁾は Al 粉末を NaCl 粉末と混合圧粉し、マイクロ波磁場において Al を焼結後 NaCl を溶解し、Al 金属多孔体を得ている。また高宮、福島²¹⁾も同様にシングルモードアプリータ磁場最大位置で Al の焼結を行った。いずれの場合も共通な知見としては、(1) 電場最大位置では十分な温度上昇が得られない、(2) 圧粉の度合いが大きい場合、加熱温度は高く上がらないことである。高宮らは、あらかじめ大気加熱した Al 粉末は圧粉後磁場加熱により 700°C まで加熱できたが、これには γ アルミ

図 4 Al-Al/Cu ナノ複合材料の破面 SEM 写真¹⁸⁾，下部におけるスケールは 5 μ m を示す

ナが生成しており、焼結は生じなかった。アルミナの加熱が関係していると論じているが、内部の Al は酸化物により十分孤立化されており、マイクロ波加熱が生じたかもしれない。

また田口らによると、加熱の初期段階で加熱速度が高くなり、温度が上昇するが、その後速度は低下し、図 5 に示すようにピークを持つようになる」と述べている。Ma ら²²⁾は Cu 粉末の加熱において見られる初期の温度ピークについて図 6 の模式図に示したように、初期加熱後に粒成長が生じ、これが多孔質体へのマイクロ波の浸透厚さ以上になると加熱速度が低下することが原因であると述べている。著者らも金属薄膜のマイクロ波加熱においても同様の初期ピークを観察している。このようにマイクロ波加熱初期における何らかの組織変化が生じることがマイクロ波の吸収特性に影響しており、加熱温度のピークが生成する原因であると考えられる。

3.2 燃焼合成，置換反応による複合材料作製

軽金属は活性金属であり、燃焼合成反応により金属/セラミックス複合材料を作成するために用いられている。たとえば酸化物を利用する場合、次のような置換反応が生じる。ここで、金属 M^* は金属 M よりも酸素との親和力が弱く、 M により M^* 酸化物の還元が生じ、全体としては次のような酸化還元反応が生じる。

M としては、活性金属 (Al, Mg, Ti etc.) があり、 M^* の酸化物としては、 Fe_2O_3 (Fe_3O_4), NiO などがある。(6) 式は、熱力

図 5 異なる雰囲気における Al 圧粉体の加熱曲線²¹⁾ (シングルモード磁場加熱)

図 6 (a) Cu 粉末の電場、磁場における加熱曲線、番号は加熱回数を示す²²⁾，(b) 加熱初期に生じる粒成長の模式図

学的には全温度において生じる場合が多いが、自発的に反応が進行するためには、ある温度以上にする必要がある。また単位体積において反応により生じる発熱量 (ΔH) により、断熱状態を仮定してその体積における最高温度を計算することができる²³⁾。しかし自発的に反応が進行しなくとも、何らかの置換反応は生じる場合が多い。

一般に燃焼合成プロセスでは高温は放電やレーザー等を用いて着火し、自発的に反応を進行させる。一度着火すると、自発的に反応領域が熱波として広がる。しかしながらこの条件は結晶粒径や気孔率等の種々因子に影響を受けることが知られている²⁴⁾。反応における発熱量が小さい系では、気孔率が低く熱伝導度がよい場合、発生した熱が逃げやすくなり、熱波の伝播が停滞してしまう場合もある。

マイクロ波加熱の場合、熱波フロントにおいて熱を十分に供給することが可能であり、熱波の伝播を停めることなく反応を進行させることができる。これを利用したマイクロ波燃焼合成の研究については、すでにいくつかの報告例^{25),26)}がある。このようにマイクロ波加熱では熱の供給をコントロールすることが可能である²⁷⁾。したがって、逆に条件によっては自発的な反応を意図的にストップさせたり制御したりすることが可能であるかもしれない。図7には、Al-Ti系で観測された熱波の伝播状態を示している²⁸⁾。反応の進行により高温部(明部)が拡大している。この例では一般加熱よりマイクロ波プロセスでは、最高到達温度が高いことがわかった。これは熱波フロントにおけるマイクロ波エネルギーの吸収によるとしている。

これらの実験はマルチモードで行われたものである。燃焼合成反応では、反応熱の助けにより昇温が容易に生じる結果となっている。シングルモードを用いると、大きな試料には不都合であるが、電場と磁場では物質により加熱の度合いが異なるため、反応生成物が異なってくる可能性がある。今後の研究に期待するところである。

一般に燃焼合成では、発熱が大きすぎるとすべて熔融してしまうが、そうでないと形成される複合材料は、ポーラスな物が多い。これは、初期圧粉体の気孔率、反応に伴って生じるモル体積変化、反応時に放出されるガスや瞬時反応に伴って生じる間隙空気の時積膨張等が原因である²⁴⁾が、マイクロ波加熱により燃焼合成反応を制御して多孔体の作製が可能かもしれない。

3.3 マイクロ波加熱によるAlの含浸

マイクロ波加熱を利用した、金属基複合材料の製造に関しても報告²⁹⁾がなされている。これは、熔融Alを利用したプロセスであり、セラミックプリフォームへの金属の含浸過程へのマイクロ波加熱効果に関するものである。

米国 M Cubed 社では、PRIMEX (反応浸透), DIMOX (方

図7 Al-Ti(Ti:3Al) 圧粉体における反応伝播のビデオイメージ²⁸⁾

向性酸化), RB (反応接合) プロセスにおける所要時間をマイクロ波プロセス (MASS) を用いることにより、短時間で同等の特性を有する金属基複合材料の作成が可能であると報告している。この中で PRIMEX 法による SiC 繊維プリフォームに Al を含浸させるときにマイクロ波加熱を利用することにより、浸透時間を短縮できると述べている。この装置図を図8に、浸透速度を図9に示す。

ここでマイクロ波印加による Al の溶融に関しては、興味のあるところである。Agrawal らは、金属を十分加熱しておくくとマイクロ波を吸収しやすくなると述べており、セラミックスの接合に金属粉末を用いてろう接を行った例がある²⁹⁾。金属の電気抵抗は高温で大きくなり、溶解により更に増加する。これに伴ってマイクロ波の浸透深さが増し、加熱が生じやすくなる可能性はある。また一部が非常に高温になると放電が起こりやすくなり、マイクロ波吸収が生じるとともに金属の溶解が生じるかもしれない。

ただし Al-SiC 系では SiC プリフォームはマイクロ波ですでに十分加熱されていると考えられる。このため接触する Al がプリフォームとの間で十分な濡れが生じ、浸透が進行するの

(a) 従来法

(b) マイクロ波加熱法

図8 実験装置模式図²⁹⁾, (a) 従来加熱プロセス, (b) マイクロ波加熱 (MASS) プロセス

図9 従来法と MASS PRIMEX 法によるアルミニウム浸透速度の比較²⁹⁾

ではないかと考えられる。浸透速度の促進効果にマイクロ波がどのように関与しているかについては明確ではないが、このデータから浸透が開始するためには、どの場合も2~3時間程度であるとも読み取れる。得られた複合材料は、一般加熱で得られたものと同等の機械的性質を有することを同論文では報じている²⁹⁾。

3.4 軽金属, 軽金属化合物の反応とマイクロ波吸収

(1) 軽金属酸化物のマイクロ波吸収と還元

Al_2O_3 は、室温では誘電損率は小さく、ほとんどマイクロ波を吸収しないが、例えば1000°C程度の高温になると誘電損率が100倍も増加し、マイクロ波吸収が非常によく起こるようになる³¹⁾。一方セラミックスの焼結を行うときに、この現象は熱暴走(thermal runaway)と呼ばれ、温度制御が困難となる原因でもある。 MgO も同様と考えられるが、十分に調べられた研究は少ない。

TiO_2 は特異な挙動を伴う。 TiO_2 は酸素が欠損し非化学量論組成をとるようになると、室温からでもマイクロ波吸収が非常に容易となる。すなわち水素や炭素で少し還元することによりマイクロ波を吸収し高温加熱が可能である。これは TiO_{2-x} が高い導電性を持つことによるためである。

種々の炭素材料の中でグラファイトはマイクロ波を非常に吸収し、発熱しやすいものであるため、 TiO_2 と混合して加熱し還元を起こす試みもなされている。この結果、大気中還元により Ti_3O_5 と窒化物(TiN)の生成が確認されている³²⁾。

(2) 窒化物の生成

大気中でTi粉末をマイクロ波加熱すると TiO_2 ではなく TiN が生成することが報告された。これははじめ28GHzで行われた³³⁾が、2.45GHzでも観測されている³⁴⁾。

また、Alの大気加熱でも一部 AlN の生成が報告されている²¹⁾。大気中の N_2 はそれほど活性ではなく、一般に酸化物の方が生じやすいと考えられるが、この原因に関しては、現在よくわかっていない。

(3) 水素化物の加熱性と水素放出

金属の水素化物が水素吸蔵合金として注目され、多くの研究がなされた。この中で、マイクロ波加熱が容易なのは遷移金属の水素化物であり、電気伝導性の高さに関係していることが調べられている³⁵⁾。これはマイクロ波加熱により水素を迅速に放出するための手段として注目されている。

4. 最後 に

本稿では、マイクロ波加熱の基礎と軽金属に関する応用について述べたが、マイクロ波加熱の実験においては、温度測定 of 困難さが常に存在する。光学的に室温から1000°C以上の高温までの連続測定は困難であるし、表面温度の測定となってしまう。熱電対の使用も注意が必要である。選択加熱を利用して材料作製を行う場合、微小領域の温度分布を測定する必要が生じるが、これも相当難しい。このような事情からマイクロ波加熱により生じる現象が、真に熱的な物なのか、そうでないのか注意深く検討する必要があると考えられる。

著者らも一般加熱と異なる特殊な効果があることを期待しながら、研究を行っているのであるが、熱振動(金属のデバイ温度は数十THzに相当)よりはるかに低い周波数において何らかの原子の運動が励起されたとしても格子振動に打消されてしまい、顕著な現象としては現れないのかもしれない。

参 考 文 献

- 1) J. M. Osepchuk: IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, Vol. MTT32, [9], Sept. (1984), 1200-1224. <http://www.gallawa.com/microtech/history.html> (browsed in Aug. 2010)
- 2) J. D. Katz: Annu. Rev. Mater. Sci., **22** (1992), 153-170.
- 3) K. S. Chang, D. K. Suh, C. B. Lee, W. W. Eom, J. J. Cha, D. W. Kim and H. J. Ha: Vac. Electro. Conf., (2002), IV, IVEC2002, 3rd, IEEE International, p. 7-8.
- 4) P. E. Glaser: Science, **162** (1968), 857-861. http://en.wikipedia.org/wiki/Space-based_solar_power
- 5) R. A. Henderson: Acta Astronautica, **7** [4-5], (1980), 499-511.
- 6) W. H. Sutton, M. H. Brooks and I. J. Chabinsky: Mater. Res. Symp. Proc. **124** (1988), pp. 287-295.
- 7) M. A. Janney and H. Kimrey: Ceramic Powder Science II, Ceramic Trans. Am. Ceram. Soc., **1** (1988), 919-924.
- 8) J. Walkiewicz, G. Kazonich and S. L. MacGill: Min. Metall. Processing, **5** (1988), 39-42.
- 9) R. Roy, D. Agrawal, J. Cheng and S. Gedevarishvili: Nature, **399** (1999), 668-670.
- 10) Z. Cao, N. Yoshikawa and S. Taniguchi: Mater. Chem. Phys., **117** (2009), 14-17.
- 11) J. D. Jackson: "Classical Electrodynamics", 3rd ed., Wiley and Sons Inc., Hoboken, USA, (1998), p. 259.
- 12) M. Tanaka, H. Kono and K. Maruyama: Phys. Rev., **B79** (2009), 104420.
- 13) N. Yoshikawa and T. Kato: J. Phys. D: Appl. Phys., **43** (2010), 425403.
- 14) J. Cheng, R. Roy and D. Agrawal: Mater. Res. Innovat., **5** (2002), 170-177.
- 15) N. Yoshikawa, E. Ishizuka and S. Taniguchi: Mater. Trans., **47** [3] (2006), 898-902.
- 16) C. J. G. Jou: J. Environmental Management, **78** (2006), 1-4.
- 17) M. Suzuki, M. Ignatenko, M. Yamashiro, M. Tanaka and M. Sato: ISIJ Int., **48** (2008), 681-684.
- 18) S. Nawathe, W. L. E. Wong and M. Gupta: J. Mater. Proces. Tech., **209** (2009), 4890-4895.
- 19) W. L. E. Wong and M. Gupta: Composites Sci. Tech., **67** (2007), 1541-1552.
- 20) 田口真実: 第2回EMAP研究会資料, (2009.12), p. 18.
- 21) 高宮博之, 福島英冲: 第3回日本電磁波エネルギー応用学会(JEMEA)シンポジウム講演概要集, (2009), 108-109.
- 22) 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).
- 23) A. Varma and J. P. Lebrat: Chem. Eng. Sci., **47**[9-11], (1992), 2179-2194.
- 24) G. Tosun, L. Ozler, M. Kaya and N. Orhan: J. Alloys Compounds, **487** (2009), 605-611.
- 25) G. Poli, R. Sola and P. Veronesi: Mater. Sci. and Eng. A, **441** (2006), 149-156.
- 26) G. Golkar, S. M. Zebarjad and J. Vahdati khaki: J. Alloys Compounds, **487** (2009), 751-757.
- 27) D. E. Clark, I. Ahmad and R. C. Dalton: Mater. Sci. Eng., **A144** (1991), 91-97.
- 28) J. R. Jokisaari, S. Bhaduri and S. B. Bhaduri: Mater. Sci. Eng., **A394** (2005), 385-392.
- 29) P. G. Karandikar and M. K. Aghajanian, D. Agrawal and J. Cheng: Ceram. Eng. Sci. Proc., "Mechanical Properties and Performance of Engineering Ceramics and Composites II", ed. by R. Tandon, American Ceramic Society, **27**[2] (2007), 435-446.
- 30) D. Agrawal, J. Cheng, R. Peelamedu, Y. Fang and R. Roy: までりあ, **45** (2006), 574-576.
- 31) D. L. Gershon, J. P. Calme, Y. Carmel, T. M. Antonsen and R. M. Hutcheon: IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, **47** [9] (1999), 1640-1648.
- 32) R. D. Peelamedu, M. Fleming, D. K. Agrawal and R. Roy: J. Am. Ceram. Soc., **85**[11] (2002), 117-122.
- 33) 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.
- 34) 田口真実, 岡本和孝: 私信
- 35) Y. Nakamori, M. Matsuo, K. Yamada, T. Tsutaoka and S. Orimo: J. Alloys Compounds, **446-447** (2007), 698-702.