

氏 名 鈴木基晴

学位（専攻分野） 博士（理学）

学位記番号 総研大甲第 1128 号

学位授与の日付 平成 20 年 3 月 19 日

学位授与の要件 物理科学研究科 核融合科学専攻  
学位規則第 6 条第 1 項該当

学位論文題目 マイクロ波による金属粉体加熱の有限要素法解析

論文審査委員 主 査 教授 川端 一男  
教授 佐藤 元泰  
教授 石黒 静児  
准教授 田中 基彦  
准教授 吉川 昇（東北大学）  
主任研究員 佐野 三郎（産業技術総合  
研究所）

## 論文内容の要旨

本研究はマイクロ波による金属粉体の加熱現象をマクロな古典的過程として解明するため、金属粉体に対して有限要素法による電磁場解析を行った。その結果、マイクロ波が金属粉体の試料内部へ浸透して電流を誘起し、そのジュール損失を通して金属粉体が加熱されることを理論的に初めて実証した。

マイクロ波による金属粉体の焼結や冶金は、従来の外部からの熱伝導による加熱と比較して物質のバルク発熱を利用するため、短時間で加熱できる。物質を加熱するためにはマイクロ波が物質中に浸透する必要がある。バルク金属では表皮効果のためマイクロ波は表皮にしか浸透しないため、表面だけ加熱される。1999年になって金属を粉体にすることでマイクロ波により完全焼結できることが報告された。その理論的な解釈として2004年に Rybakov らが導電性粉末材料のマイクロ波加熱を Mie 散乱により説明を試みた。

本研究では有限要素法による電磁波伝播の理論解析において、微小な領域で電磁場を計算する方法を構築した。これを Mie 理論で扱える  $1\mu\text{m}\sim 10\mu\text{m}$  径の単粒子の場合について計算を行い、Mie 理論と比較してその精度が定量的に十分であることを検証した。続いて多体系の金属粉体をモデル化して、マイクロ波が浸透する様子を計算して、浸透現象と発熱量を定量的に求めた。

具体的には、まず導波管の中に置かれた金属粉末を想定して導波管モードの電磁場解析を検討したが、導波管モードと微小な物質では空間スケールが異なるため、有限要素法を用いると多くのメモリと計算時間がかかる。他方、導波管のサイズを小さくするとカットオフが発生して電磁波が伝播しない。この困難を克服する計算方法として平行平板モードを用いることで、ミクロンサイズの試料について定量的な加熱過程の解析が可能となった。

有限要素法の誤差は要素分割の細分化の程度による。特に表皮効果のように非常に短い距離で指数的に電磁場が減衰すると粗い分割では大きな誤差が生じる。このため要素の種類とサイズを変えてジュール損失を計算し、結果が要素サイズによらない条件を求めた。

実験では金属粉体が電場より磁場のほうで速く加熱されることが確認されている。この現象を理論的に調べるため、反射壁付近での定在波を用いて電場と磁場を分離することで、電場と磁場の効果を論じることができる。半径が  $1\mu\text{m}\sim 10\mu\text{m}$  の金属球を1個だけ配置して、有限要素法と Mie 理論の両方で計算を行い、数  $\mu\text{m}$  の金属球に対して磁場が誘導電流を励起してこれがジュール損失して加熱が起きることを証明した。また、ジュール損失は球半径が表皮深さの2.5倍で最大になることを見出し、加熱に最適な粒子径があることを示した。

つぎに、金属粉末に電磁波が浸透する問題を調べるため、 $100\mu\text{m}\times 100\mu\text{m}\times 216\mu\text{m}$  の領域に半径  $6\mu\text{m}$  の銅粒子を  $4\mu\text{m}$  の間隔で475個配置して有限要素法で計算した。このときマイクロ波は金属粒子の内部まで浸透し、その減衰長が約  $50\text{cm}$  になることを求めた。マイクロ波が試料内部まで浸透しない条件は金属粒子間が接触することであり、その場合は遮蔽電流が生じ表面で反射する。実験で金属粉体が電氣的に接触しない状況は

表面が酸化膜で覆われている場合である。この様子を亜鉛の球、その粒界を酸化亜鉛で埋めてモデル化した計算で、大きなエネルギー損失が発生し、マイクロ波の粉体への浸透距離が短くなることを定量的に求めた。

ところで、単体球の Mie 理論計算と実験計測において、銅の場合では直径  $3\mu\text{m}$  以上で理論値より実験値が大幅に少なくなる。我々は Mie 理論計算が単体の損失を体積比で  $N$  倍して評価する方法に問題があると考えた。つまり金属粉体が多数存在すると金属粒子間の電磁場が単体球のときと比べて変化する。この推測のもと、粉体の密度を変えて計算することにより、密度が大きくなると体積当りのジュール損失が少なくなることを証明した。

有限要素法による電磁波解析のさらなる応用として、東北大学からの依頼を受けて、粉末試料を圧縮焼結する電場加熱用アプリケーションと磁場加熱用アプリケーションの装置について電磁場解析を行い、その装置の改良方法について提言を行った。

## 論文の審査結果の要旨

鈴木基晴君の博士論文は、マイクロ波による金属（粉体）の焼結という、従来は不可能と考えられていた実験事実（R. Roy, et al: Nature1999）を、非磁性金属の粉体試料を模擬した多粒子系加熱機構の有限要素法電磁波解析により理論的に明らかにしたものである。多粒子系試料中へのマイクロ波の浸透と粉体加熱の理論解析は、他ではまだ発表されておらず、価値ある新しい研究として評価できる。

研究手法として用いた電磁波解析では、解析すべき試料サイズ（サブミクロン）がマイクロ波の波長（122mm）より桁違いに小さいため、通常のキャビティーモードをフルに使用した解析は計算時間と計算機メモリの関係上できない。この代わりに平行平板間に試料を置いて平面波を伝播させるモデルを考案することで、試料周辺だけを高い精度でシミュレートする解析を可能とした。実際の計算に先立って、空間メッシュの形状（正4面体、立方体）やメッシュサイズと計算精度の関係のチェックを行い、電磁波の金属粒子への浸透を表す表皮深さに対して十分な解像度をもつ空間メッシュを、計算時間とメモリを考慮して適切に選択した。研究では、2枚の金属平板の間に置かれた金属の単体球から始めて、2個の球、さらに多粒子系へと段階的に複雑化を図っている。最初に（1）単体球に対する有限要素法の計算結果と、Mieの解析式の結果とを比較し、両者がよい精度で一致する事を確認した。これは、以下の多粒子系試料の解析が定量的に信頼出来ることを示すものである、（2）非磁性金属の粉体はマイクロ波の磁場で誘導励起される渦電流のジュール損失で加熱されることを定量的に示し、最大の加熱は粒子径が表皮深さの2.5倍のときに起こることを示した。つぎに、（3）非磁性金属である銅をモデルとして、粒子2個および多粒子系について解析を行い、非接触の粉体では電磁波が10cmのオーダーで多粒子系マトリックスの内部に浸透することを理論的に示した。他方、粉体の金属粒子どうしが接触して導通している場合は、マイクロ波が空間的に強く減衰して、バルク金属に似て内部へ浸透しにくいことを示した。これらはよく知られた金属板の電磁波遮蔽と符合する。（4）同様に、多粒子系である誘電性の金属酸化物の粉体が、マイクロ波の電場により、誘電損失（誘電率の虚部）の大きさに比例して加熱されることを示した。（5）多粒子系の加熱では、Mie理論による損失予測は実験より数倍大きい値となるが、多粒子系について有限要素法電磁波解析を行い、実験をファクター1.5程度で説明できる値を得た。この解析結果は、実際の試料のマイクロ波加熱では密度効果（粒子間距離が近づくにつれて粒子内の誘導電流が他粒子の誘導電流に影響を与える）が重要であることを示した。

さらに、東北大学への研究協力として、有限要素法による形状が複雑なキャビティー装置内でのマイクロ波の解析を行い、マイクロ波の電場と磁場を分離した実験に使う有用な情報を提供した。

以上のように、本論文では有限要素法を用いた電磁波解析に基づく多粒子系試料へのマイクロ波の浸透と粉体加熱の解析により、マイクロ波による金属（粉体）の焼結に関する新しい知見と物理的描像を示した。

よって、本審査委員会はこれらの成果と当該分野への貢献の程度から判断し、本論文が学位論文としてふさわしい学術内容を持っていると認めた。