

鉄鋼原料のマイクロ波加熱技術の開発

Development of Microwave Heating Process for Iron and Steel Raw Materials

杉橋 敦史* 木下 貴博
Atsushi SUGIHASHI Takahiro KINOSHITA

抄 録

電磁場解析を用いてマイクロ波加熱プロセスの効率改善について検討を行った。バンド乾燥機の下層に位置する塊成化原料の加熱方法として、スロットアンテナを用いてマイクロ波を照射する機構について、電磁場解析によりスロット開口の位置および形状の最適化を検討した。アンテナに近接する金属コンベアとの相互作用により、アンテナ設置高さにより最適スロット長が変化する事がわかった。また原料のミクロな混合状態がマイクロ波吸収に与える影響について電磁場解析を行い、原料粒子を2重構造とする事でマイクロ波の吸収効率が改善する事をつぎとめた。

Abstract

The microwave heating efficiency of the agglomerates of iron oxide dust and carbon powder was investigated by the electromagnetic FEM calculation. We planned to combine the microwave heating with the band dryer to reduce the excess water of the agglomerates in the lower position, by using the slot antenna inserted in the materials layer. The optimal installation height and the slot size of the antenna were investigated. It was found that the optimum slot size varies depending on the antenna installation height since the electromagnetic field distribution is changed by the interaction with the metal conveyor close to the antenna. In addition, the microwave absorption behavior was analyzed according to the mixing conditions of the agglomerates materials. The microwave absorption power was improved by making the material particles double structure.

1. 緒 言

電磁波の一種であるマイクロ波は、赤外線などに対して10000倍程度長い波長を有し、物質の内部まで浸透する事が可能である。さらに被加熱物の物性値に応じてエネルギーが直接吸収される事から、物質を内部から直接加熱できるエネルギー効率に優れた加熱手段として、家庭用の電子レンジをはじめ、産業応用としても食品の解凍、加熱殺菌処理や、ゴムの加硫処理などに広く利用されている¹⁾。

新日鉄住金(株)では、上記の優れた特性に早くから着目し、不定形耐火物乾燥へマイクロ波加熱利用を実用化し、多数の装置を導入してきた²⁾。そこでは100kWを超える大型のマイクロ波装置を用い、不定形耐火物の短時間乾燥を実現し、乾燥に要するエネルギーを低減する省エネルギープロセスを実現している。またグループ会社においても、新日鉄住金化学(株)にて、バイオオイル製造、ナノNi粒子生成などの化学反応にマイクロ波を応用する研究開発に

取り組んできた^{3,4)}。

一方、近年のマイクロ波研究の進展により、従来はマイクロ波では加熱されないと考えられてきた金属の様な導電体も、粒子状態ではマイクロ波で良く加熱される事が判り、その加熱原理⁵⁾や金属粒子を含めた各種機能性材料の合成、製造へのマイクロ波加熱の研究も盛んに行われている⁶⁾。

本稿では、マイクロ波による粉体の加熱応用として、鉄鋼原料の製造プロセスへのマイクロ波利用に向けて電磁場解析を用い、効率的なマイクロ波加熱の検討を行った事例について紹介する。

2. マイクロ波による塊成化原料の乾燥改善の検討

2.1 スロットアンテナを用いたマイクロ波加熱機構の検討

製鉄プロセスにおいては、高炉などで使用しやすい様に、粉状の劣質原料を塊状に成型して使用している。塊成化原

* プロセス研究所 計測・制御研究部 主幹研究員 千葉県富津市新富 20-1 〒293-8511

料を乾燥処理するバンド乾燥機へのマイクロ波加熱の適用を検討した。バンド乾燥機は、粉状原料を塊成化する際に添加した水分を、コンベア状の搬送機の上部から熱風を送風し、塊成原料中を通過させて、原料を乾燥処理する事で、塊成原料の強度を向上させる装置である⁷⁾。上方からの熱風乾燥のため、風温の低下するバンド乾燥機の積層下部の塊成原料の乾燥が不十分となりやすく、強度不足による粉化など歩留まりの低下につながる。そこで、水への吸収効率が良く、水分除去に適したマイクロ波加熱により、バンド乾燥機下部の塊成原料の残留水分を低減させる事を検討した。図1にバンド乾燥機の下層部にマイクロ波加熱を行う装置構成を示す。

これまで新日鐵住金で実用化した不定形耐火物の乾燥と異なり、塊成化物は水同様にマイクロ波の吸収の良い酸化鉄粉や石炭粉で構成されているため、バンド乾燥機の上方からマイクロ波を照射したのでは、上部の塊成化物にマイクロ波が吸収されてしまい、下層部までマイクロ波を届かせる事ができない。また、金属製の網ベルトを用いるバンド乾燥機の搬送コンベアは、マイクロ波を遮断する性質を持つため、下面側からマイクロ波を照射して下層の塊成化

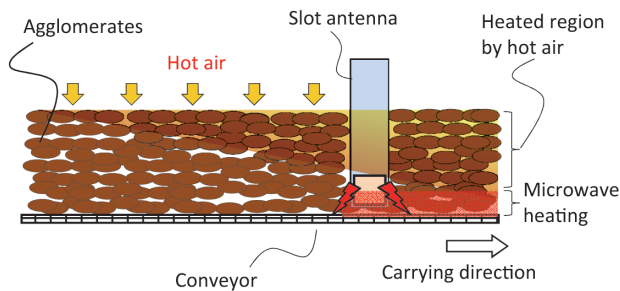


図1 バンド乾燥機下層部のマイクロ波加熱機構
Schematic diagram of microwave heating equipment for the band dryer

原料を加熱乾燥させる事ができない。

そこで図1に示す様に、狭幅のスロットアンテナを積層した塊成化原料中に挿入し、アンテナ中を導波させてマイクロ波を塊成化原料層の下部まで伝送し、先端部からマイクロ波を照射して下層の塊成化物を加熱し、下層部の残留水分の除去を行う方法を検討した。装入するスロットアンテナ放射口の位置や形状について電磁場解析を行い、塊成化物層に効率良くエネルギーを与えるためのアンテナ構造および設置についての指針を得た⁸⁾。

2.2 スロットアンテナの構造と自由空間におけるマイクロ波放射特性

工業加熱に用いられる kW 超出力のマイクロ波の伝送には、導波管と呼ばれる矩形の中空金属管を用いる事が多い。スロットアンテナは、導波管の先端を導体で終端し、導波路の側面にスリット開口を設け、電磁波が外部に放射される様に設計されたアンテナである。伝送効率が良い基本導波モードである TE₁₀ モードの場合、矩形導波管の長辺 (E 面) の長さは、伝送するマイクロ波の周波数による適値があり、加熱に用いられる周波数 2.45 GHz のマイクロ波では、長辺が 109.22 mm の EIA 規格 WR430 の導波管を用いる事が多い。一方、短辺 (H 面) の長さについては、マイクロ波の導波に影響する理論的な制約はなく、伝送可能な電力密度内であれば、短辺側を短くした狭幅の導波管でマイクロ波を伝送する事ができる⁹⁾。

そこで、塊成化原料の搬送抵抗とならない様に、短辺側を短くした狭幅導波管をスロットアンテナとして用い、その長辺方向を搬送方向と平行にして、バンド乾燥機の塊成化原料層に挿入し、下層部にマイクロ波を照射する機構について検討した。

図2にスロットアンテナからマイクロ波が放射される仕

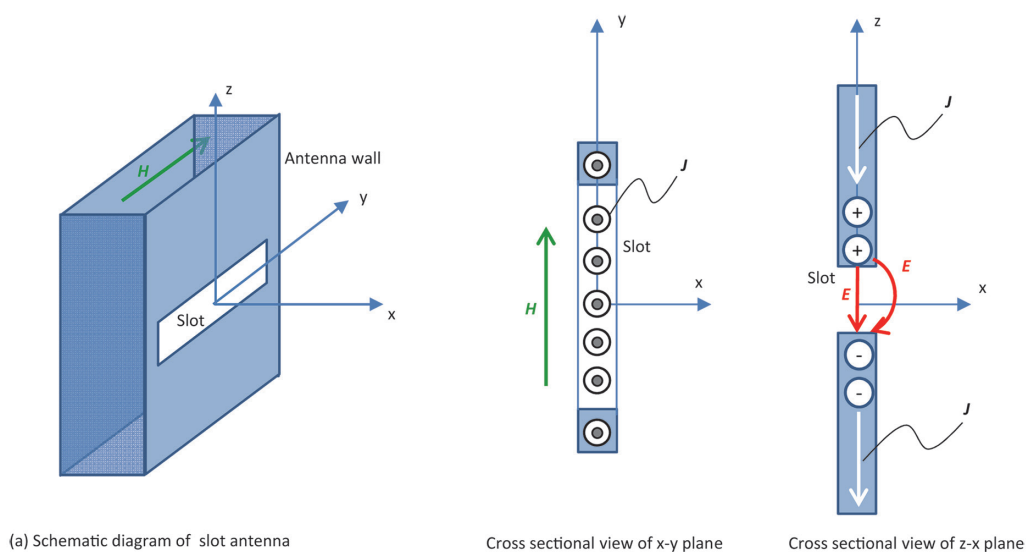


図2 スロットアンテナからのマイクロ波放射の仕組み
Microwave radiation from a slot antenna

組みを示す。マイクロ波をアンテナから効率的に放射するためには、アンテナ導波路中の定在波の磁場最大となる位置にスリットを配置する必要がある。アンテナ内部に形成される磁場によって導波路側面にアンペールの法則に従って電流 J が流れるが、開口の前後では電流が遮られるため、両端に正負の電荷が蓄積し、開口内部に電界 E が発生する事になる。この電界 E を放射源として、アンテナ外部にマイクロ波が放射されるため、導波路側面の電流値が最大となる磁場最大位置にスリットを配置する¹⁰⁾。

スロットアンテナの先端は導体で終端されており、先端部の電場がゼロ（すなわち磁場極大）となる。自由空間に置かれたスロットアンテナ中の磁場極大部分は、先端より $\lambda_g/2$ ほどの位置に発生する（ λ_g ：導波路中のマイクロ波波長）。図3に先端を終端した状態での導波管内の磁場分布

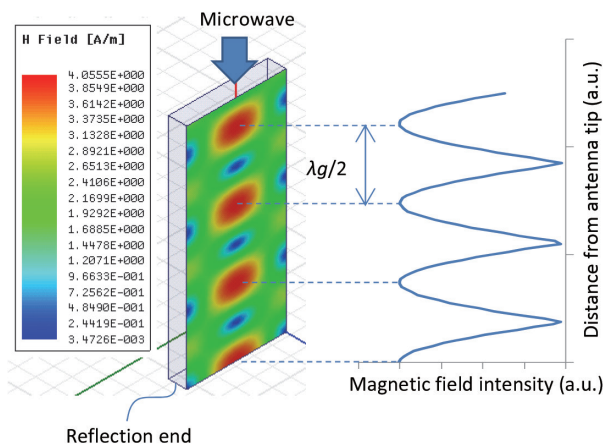


図3 自由空間中に置かれたスロットアンテナ中の磁場分布
Magnetic field distribution of E-plane inside a slot antenna

を示す。図3中のアンテナ内の磁場が極大となる、先端から $\lambda_g/2$ 間隔ごとの位置に開口部を配置するとマイクロ波放射効率の良いアンテナとなる。

2.3 塊成原料層へ挿入するスロットアンテナ構造の最適化

次に、積層した塊成化原料中にスロットアンテナを挿入した場合について、マイクロ波の放射状態を電磁場解析により検討した。解析モデルを図4に示す。

スロットアンテナ①の両側の長辺側面下部に接触させて、ブロック状の塊成化原料②を5段配置したモデルを用いた（図4(A)）。塊成化原料を取り除いたスロットアンテナの形状を図4(B)に示す。アンテナは、金属製のコンベア平面③の上方に距離 L で設置されている。スロットアンテナの長辺側面下部には先端部から幅 h の開口部（スロット）④を設けている。アンテナの設置位置 L および、先端に設けたスロット幅 h とマイクロ波放射効率の関係を解析した。解析には有限要素法の電磁場解析ソフトウェアである Ansys 社の HFSS を用いた。

2.3.1 塊成化原料中に設置したスロットアンテナの放射特性

スロットアンテナを積層塊成原料の深部に挿入した状態では、近接するコンベア面上の磁界との相互作用の結果、自由空間中での放射に対し、導波管内の電磁界分布が変化する事がわかった。解析例として、図5にアンテナ設置高さ $L=25\text{ mm}$ 、開口幅 $h=30\text{ mm}$ の条件のアンテナ H 面に平行な XY 断面内の磁界強度分布を示す。磁場の極大点が、

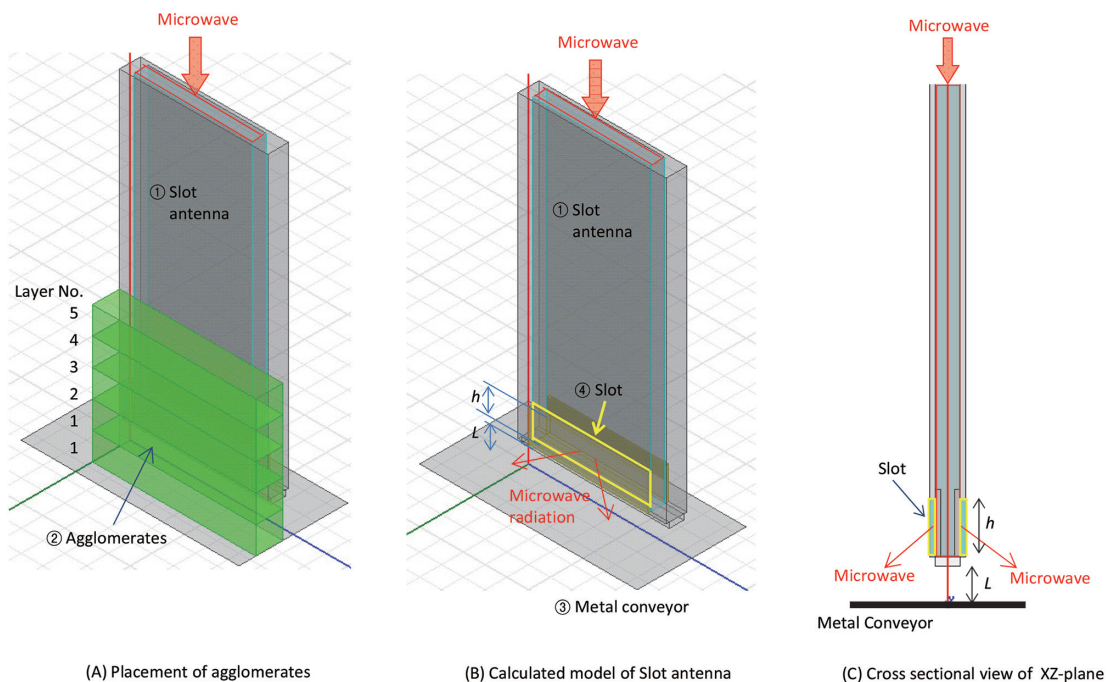


図4 塊成化原料層中のスロットアンテナの解析モデル
Geometry of the numerical simulation model

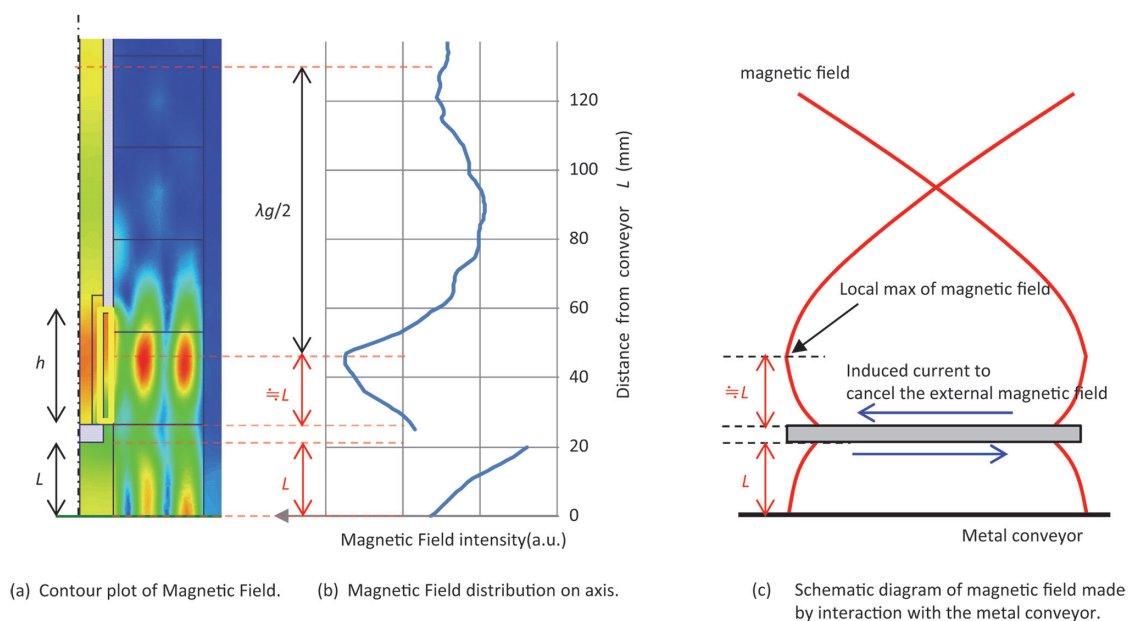


図5 塊成化原料層中に設置したスロットアンテナ内の磁場分布 ($L=25\text{mm}$)
Calculation results of the magnetic field distribution of the slot antenna inserted in the agglomerates layer

コンベア面と導体面を対称軸とする $S=L$ となる位置に発生し、自由空間中の磁場分布の結果(図3)で磁場極大となっていた $S=\lambda_g/2$ の位置の磁場が小さくなっている。これは導体であるコンベア面内を流れる渦電流が作る磁場の作用による二次的な渦電流がアンテナ終端の導体面に発生する影響から、磁場の極大位置が、コンベア面と終端導体を対称面とするアンテナ内部位置に発生する様に、定在波のモードが変化してしまうからである(図5(c))。

この様に、スロットアンテナを塊成原料層内部に挿入して使用する場合は、アンテナの設置高さ L に応じて、アンテナ中の磁場最大位置が移動するため、磁場極大点を含む $h>L$ の条件を満たす様にスロット幅 h も変更する必要がある事がわかった。

2.3.2 スロットアンテナによる塊成化原料のマイクロ波加熱試験

前記解析結果について実験的な検証を行った結果を示す。図6の様に金属性の容器内に敷き詰めた塊成化原料中に試作したスロットアンテナを挿入し、塊成化原料の加熱状態を評価する実験を行った。加熱状態は、塊成化原料に挿入した熱電対にて測定した。

スロットアンテナ先端とコンベア面を模した金属容器底面との設置距離 L (mm)、スロットアンテナ先端の開口部長 h (mm) を変更した4条件で、マイクロ波を照射して塊成化原料を加熱した。表1に、アンテナ設置高さ L 、スロット幅 h の条件と、加熱時のマイクロ波出力の反射率 R を示す。また図7に、塊成化原料の温度上昇から求めた塊成化原料位置ごとのマイクロ波の吸収率を示す。

アンテナ先端の開口部が、電磁場解析からアンテナ内で

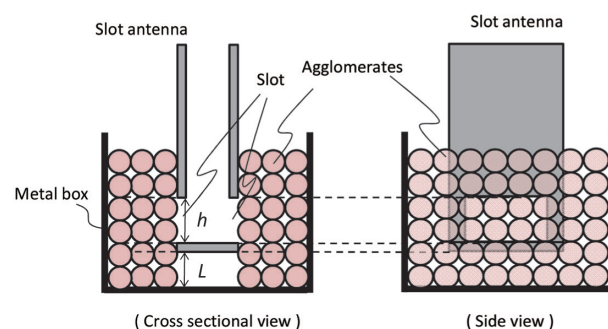


図6 塊成化原料のマイクロ波加熱実験の構成
Experimental setup of microwave heating of agglomerates by the slot antenna

表1 塊成化原料のマイクロ波加熱実験条件
Reflection coefficient R with respect to antenna installation height L and slot size h in the experiments

Case	A	B	C	D
L (mm)	20	20	10	10
h (mm)	30	60	15	5
R (%)	8.3	75	19	71

の磁場最大点となると予想される $h>L$ となる点を含む条件 A, C ではマイクロ波の反射が小さく、 $h<L$ となり、開口に磁場最大点を含まない条件 D では、マイクロ波の反射が大きくなる結果となった。条件 B は、 $h>L$ の条件を満たしているが、スロット幅 h が大きく $h \approx L + \lambda_g/4$ となっており、スロット開口の上端部が磁場極小位置近傍となっているため、マイクロ波放射効率が大きく低下して反射が大きくなった。また、アンテナ設置高さ L を低くした条件 C では、最下層に近い塊成化原料がよく加熱され、スロットアンテナを少し上方に設置した場合(条件 A) では、より上層の塊

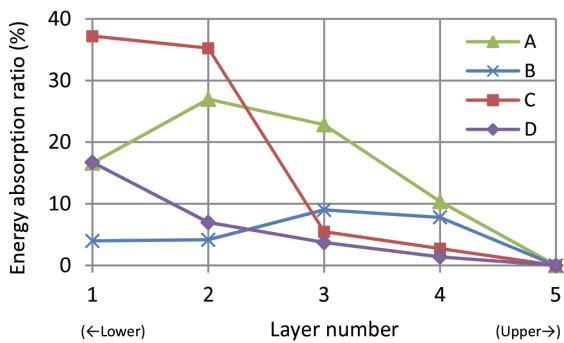


図7 マイクロ波による塊成化原料の加熱結果
Energy absorption ratio of agglomerates layer in the experiment

成化原料が加熱され、スロットアンテナの挿入位置に応じて、塊成化原料の加熱分布を制御可能である事がわかった。さらに、試作したスロットアンテナを稼動中のバンド乾燥機に挿入し、マイクロ波を照射したところ下層部にある塊成化原料の温度上昇が観測され、本加熱方法の有効性を確認する事ができた。

3. 塊成化原料のマイクロ構造のマイクロ波吸収に与える影響

次に、マイクロ波による鉄鋼原料加熱効率自体を改善する事を目的に、酸化鉄と炭素材の混合粉体である塊成化物のマイクロ構造について、マイクロ波加熱に適した粒子構造の検討を行った事例を紹介する。

3.1 解析モデルの概要

酸化鉄と炭素の2種類の粉体原料が混合されているモデルについて、それらの混合状態がマイクロ波の吸収に及ぼす影響を調べた。解析モデルの概要を図8に示す。一辺100 μm の立方体粒子が間隔20 μm で4 \times 4 \times 4個配列されている粒子塊にY軸に沿った方向からマイクロ波を照射するモデルにて解析を行った。照射したマイクロ波はZ軸方向に電界場を、Y軸方向に磁場を持つ平面とし、それぞれモデルのXY面に平行なモデルの上下面を電界の対称境界、YZ面に平行なモデルの両側面を磁界の対称境界とした。解析には前項同様、Ansys社のHFSSを用いた。

解析モデル中に配置する2種類の粒子は、酸化鉄として Fe_2O_3 を、炭素材としてカーボンブラックを想定した。モデル中の両者の体積混合比は1:1に固定し、以下の(A)から(E)のモデルについて、モデル中の粒子群に吸収されるマイクロ波エネルギーを計算して比較を行った。各ケースの粒子配置を図9に示す。

モデル(A),(B):比較的大きな固まりとして両者が偏在分布している場合を想定したモデルとして、モデル中の粒子を各々の単一組成の粒子で構成した場合について解析を行い、それぞれの結果を平均化して2種類の粒子が混合された時のマイクロ波吸収量として評価した。モデル(A)では

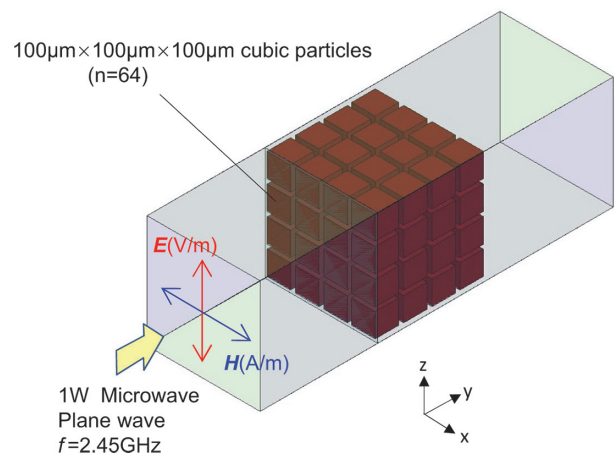


図8 解析モデルの概要
Geometry of the numerical simulation model

粒子を Fe_2O_3 とし、モデル(B)では粒子を炭素とした。モデル(C):微粉状態で酸化鉄粉と炭素粉が均一に混合されているモデルとして、一辺100 μm の立方体が交互に酸化鉄あるいは炭素粒子として配列されたモデルのマイクロ波の吸収量を求めた。

さらに、よりミクロな状態で両者が混合されているモデルとして、以下の2ケースの2層粒子モデルを検討した。モデル(D):中央の炭素粒子の周囲を微細な酸化鉄(Fe_2O_3)粉が取り囲んでいる2層構造の粒子が配列されているモデル

モデル(E):中央の酸化鉄(Fe_2O_3)の周囲を微細な炭素粉が取り囲んでいる2層構造の粒子が配列されているモデルのマイクロ波の吸収量を求めた。

ケース(D),(E)では、各粒子のサイズは一辺100 μm とケース(A),(B)と同じ大きさとし、中心の立方体粒子の一辺を79.4 μm とし、その外側を異なる材料が10.3 μm 厚の層で取り囲む構造とし、1つの粒子中の酸化鉄部分と炭素部分の体積が同一となる様に設定した。

3.2 各モデルにおけるマイクロ波エネルギーの吸収

各モデルのマイクロ波吸収エネルギーを図10のグラフに示す。モデル(A),(B)については、各々の吸収エネルギーの平均値をとり、比較的大きな塊として Fe_2O_3 粒子の塊と炭素粒子の塊が混合されている場合のマイクロ波吸収エネルギーと考えた。

モデル(A),(B)のマイクロ波吸収量の平均値と、微小粒子の状態でも均一に混合されている場合(モデル(C))を比較すると、マイクロ波の吸収エネルギーに大きな差は発生していない。これは、各粒子が偏在している混合では、各粒子のマイクロ波吸収の違いにより、局所的には加熱状態に差異が発生するものの、微小粒子が均一に混合されている場合と比較して、両者の混合比が同一の場合、系全体としてはマイクロ波の吸収効率に大きな影響が無い事を示

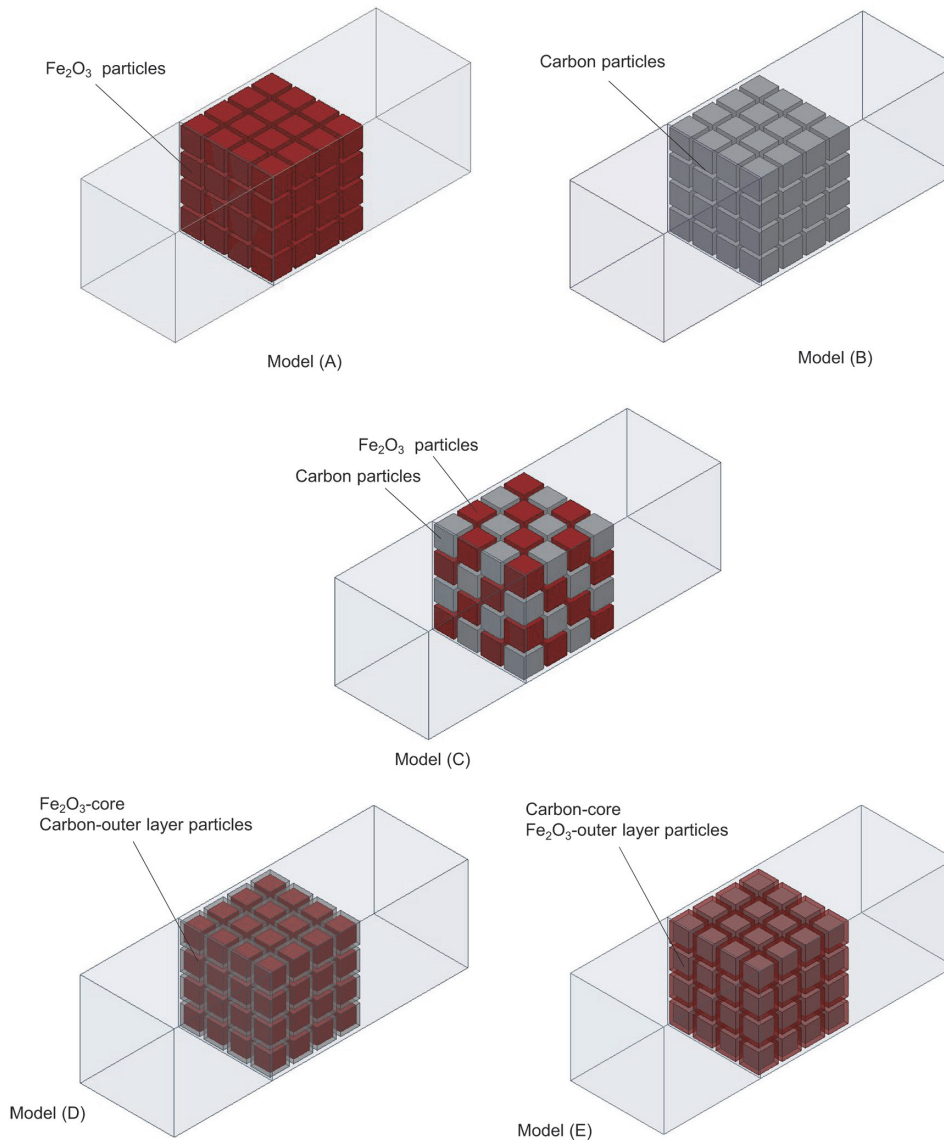


図9 解析ケース詳細
Calculation models

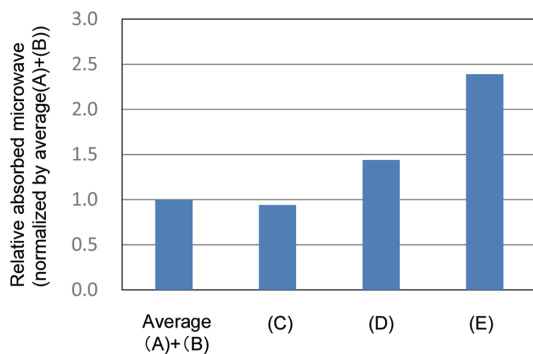


図10 各ケースのマイクロ波吸収量の比較
Calculation results of the microwave absorption of the analyzed models

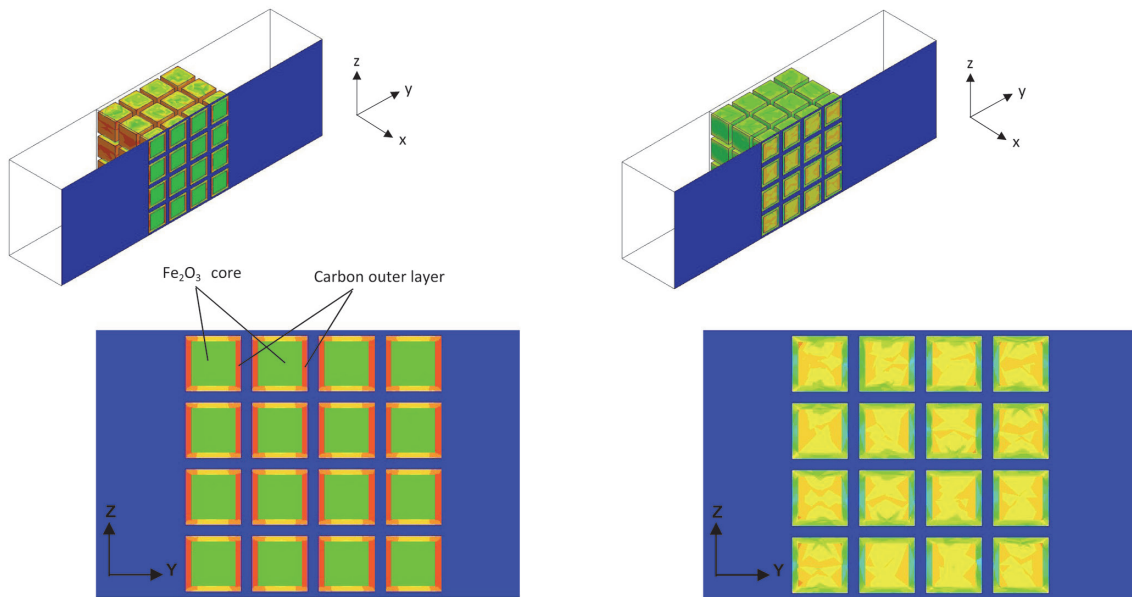
唆しているものと考えられる。

一方、粒子を2層化したモデル (D), (E) では、いずれの場合においても、粒子を単純に混合したモデル (C) と比較して、マイクロ波の吸収量が大きく改善する結果となっ

た。この結果は、混合する粒子の大きさなどを調整し、2重構造など原料粒子の微細構造を作りこみ制御する事ができれば、よりマイクロ波加熱効率の高い原料処理システムが構築できる可能性を示しているものである。図11にモデル (D), (E) のマイクロ波吸収分布の結果を示す。2重構造の粒子の中心部と外層部分でマイクロ波の吸収分布に違いが発生しており、粒子の構造を変化させる事で、どちらの成分をより加熱したいかなど、選択的加熱処理も可能と考えられる。

4. 結 言

本稿では、マイクロ波による塊成化原料の加熱乾燥処理について、照射に用いるアンテナ構造および混合粉体原料のミクロ構造について、電磁場解析を用いて最適化の検討を行い、マイクロ波加熱効率が大きく改善できる事を示した。新日鐵住金では、従来より、100kW クラスの大出力工



(a) Absorbed power density distributions of the model (D)

(b) Absorbed power density distributions of the model (E)

図 11 粒子中のマイクロ波吸収電力分布
Calculation results of absorbed microwave power distributions of model (D) and model (E)

業用マイクロ波を製鉄プロセスに活用し、独自の省エネルギープロセスを実現してきた。こうした装置化技術と、前記に示した電磁場解析技術を組み合わせることで、さらなるマイクロ波の省エネルギープロセス開発が可能となるものと考えている。

参考文献

- 1) マイクロ波加熱技術集成. NTS, 1994, p.93-104, p.268-336
- 2) 平 ほか: 新日鉄技報. (388), 69-75 (2008)
- 3) 井上 ほか: 日本電磁波エネルギー応用学会シンポジウム講演要旨集. 2009, p.58-59
- 4) 竹腰 ほか: 日本電磁波エネルギー応用学会シンポジウム講演要旨集. 2009, p.74-75
- 5) Suzuki, M. et al.: Numerical Study of Microwave Heating of Micrometer Size Metal Particles. ISIJ International. 48 (5), 681-684 (2008)
- 6) 最新 マイクロ波エネルギーと応用技術. 産業技術サービスセンター, 2014, p.331-448
- 7) Oda, H. et al.: Dust Recycling System by the Rotary Hearth Furnace. Nippon Steel Technical Report. (94), 147 (2006)
- 8) Kinoshita, T., Sugihashi, A.: Design and Optimization of a Slot Antenna for Microwave Heating of Agglomerates. COMPEL. 2018 (in press)
- 9) 早川正士: 波動工学. コロナ社, 1992, p.99-107
- 10) Johnson, R.C., Jasik, H., Crawford, H.B.: Antenna Engineering Handbook. McGraw-Hill Inc., US, 1984



杉橋敦史 Atsushi SUGIHASHI
プロセス研究所 計測・制御研究部
主幹研究員
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



木下貴博 Takahiro KINOSHITA
プロセス研究所 計測・制御研究部
主任研究員