

# 電磁波解析による耐火物加熱用マイクロ波設備設計

## Designing of Microwave Applicators by Electromagnetic Wave Analysis

梅津 健司<sup>\*(1)</sup>  
Kenji UMETSU

富澤 安次<sup>\*(2)</sup>  
Yasuji TOMIZAWA

### 抄 録

近年、生産能力向上により、耐火物の高速乾燥の必要性が増大してきた。現在、それに対応できる最も有効な手段としてマイクロ波加熱が検討されるようになった。そこで、電磁プロセスソリューションの一環として、効率よい設備構成を得るべく、電磁波解析技術を活用して加熱特性を定量的に評価することでマイクロ波加熱装置の最適設計を試みた。その過程で電磁波解析特有の問題がいくつか判明し、それらを回避するための工夫について述べる。そして、実機レベルのモデルに適用したところ、現実性のある最適設計が可能であることがわかり、その設計内容と解析手法の関係がわかるよう、電磁波解析の理論的特性についても詳述する。

### Abstract

Recent high productivity of steel making processes is forcing to achieve more rapid drying for refractories. The microwave heating, then, has been required as the most powerful means to realize the rapidity. So, as a process-solution approach, we picked out the new one to obtain the solution, the electromagnetic wave analysis, which may be expected to show us an optimum design of a heating applicator. Our trial has succeeded quite well for a practical model for the applicator. But we have found that the analysis has essential difficulties in designing applicators. This paper presents the difficulties and the techniques to reduce them, and also describes the theory of the analysis in advance to understand well their relations.

## 1. 緒 言

本稿では電磁場解析の中でもやや特殊な電磁波解析を用いて、鉄鋼プロセスへの応用例としてマイクロ波による乾燥設備の設計例を紹介する。

マイクロ波の新日本製鐵の鉄鋼プロセスへの適用は種々の鉄鋼プロセスに用いられる耐火物の乾燥用として利用されている。本例では電磁波解析手法は設備の最適化を目的として導入された。しかしながら、電磁波解析分野は産業プロセスへの適用よりも圧倒的に通信関係の分野での適用が主であり、本稿で紹介する鉄鋼プロセスへの適用例のような大規模計算は特に見当たらない。そのため、実際に適用した場合に直面する解析上の問題などについても触れることにする。

以下、産業への応用を概観し、電磁波解析の内容を述べ、具体的な鉄鋼プロセスへの応用について詳述していくことにする。

## 2. マイクロ波の産業応用の概観<sup>1)</sup>

一般にマイクロ波と呼ばれるものは、電磁波の一種で、電波法では3 THz以下の電磁波を“電波”と規定しており、その中の300MHz~300GHzの帯域のものを指す。しかし、広帯域にもかかわらず、電波法上の制約でほとんどが通信やレーダー関係に占有されており<sup>2)</sup>、

マイクロ波の産業応用に使われている周波数帯域はごくわずかである。その中でもよく利用されているのは915MHz(±25MHz)と2450MHz(±50MHz)で、特に後者が採用されていることが多い。具体的な用途は、食品類の加熱、殺菌、セラミックスの乾燥、ゴム加硫、木材の加工などである。概して加熱が多いが、これはマイクロ波の周波数に起因する。誘電体(絶縁性物質)にマイクロ波を照射すると、周波数が高いことから図1のように組成分子の配向分極に共鳴して運動エネルギーを与え、加熱することができる。

マイクロ波による加熱の利点には、短時間に加熱ができる、対象物の形状に寄らず内部を直接加熱できる、加熱効率が高い(80%以上も珍しくない)、選択的に目的物を加熱できる、制御性が高い、騒音や排ガスを生じないなどがある。問題点としては、電源の容量が最大でも100kW程度と小さいことと、金属

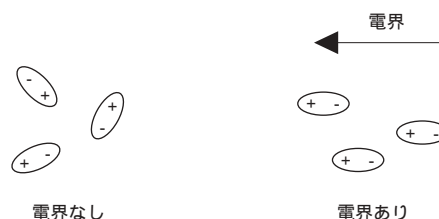


図1 分子の配向分極とマイクロ波電界

<sup>\*(1)</sup> 環境・プロセス研究開発センター システム制御技術部 マネジャー  
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511 TEL(0439)80-2459

<sup>\*(2)</sup> 太平工業(株) 広畑支店 プラント技術部

や金属粉があると放電を起こすことがあり、設備や使用環境に配慮が必要なことがあげられる。

用途が主に加熱に集中しており、帯域も限定されているため、マイクロ波応用はあまり展望のないもののような印象をうけかねないが、マイクロ波を使うことで、例えば、食品の加熱では殺菌効果が熱湯殺菌よりも著しいことや、酸化酵素の活力を短時間に奪うことで日持ちすることなど、副次的な効果が確認されている。このような応用はまだ十分に開拓されていないので、マイクロ波応用はまだまだ十分に熟成していない可能性がある。したがって、現時点でのマイクロ波応用の実態を見て、マイクロ波応用そのものを判断してしまうのは早計と思われ、今後の成長が期待できる分野といえる。

### 3. 電磁波解析の特殊性

計算機の大容量化、高速化が急速に進んだ1980年代から産業への本格的な普及をみた数値解析は各分野でそれぞれに合った手法を取り入れて発展していった。電磁場解析も簡単な静電場、静磁場にはじまり、過渡現象の電磁場まで比較的順調に解析対象を拡大していき、現在に至っている。しかしながら、電磁波解析はその初期から通信関係分野での放射や散乱を扱うなど、他の電磁気応用とは源泉が別との異質性から、これらとはほぼ独立に発展した<sup>3)</sup>。それには方程式の性質が大きく関与している。次にそれをみていくことにする。

#### 3.1 方程式の性質の相違

物理的には電磁波も電磁場の一つの形態なので、原理的には電磁波解析は電磁場解析のなかの一種とみなすことが推察される。しかし、数値計算上はこの二つは全く別扱いになる。その原因は方程式の相違による。

電磁場はすべて、以下のMaxwell方程式によって完全に記述される(各物理量の定義は本稿末尾にまとめて挙げてある)。

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (3)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}, \quad \mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \quad (4)$$

一般に、周波数が低い場合、上述の方程式のうち、変位電流と呼ばれる項(1)式右辺第2項)が他に比べて無視できるため、これを除いた方程式を近似的に求める。次の(5)式で変換したのち、いくつかの数学的操作を経て、Maxwell方程式は(6)、(7)となる<sup>4,5)</sup>。

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}, \quad \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \nabla \phi \quad (5)$$

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) + \sigma \left( \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla \phi \right) = \mathbf{J}_0 \quad (6)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = \nabla \cdot \left[ \mathbf{J}_0 - \sigma \left( \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla \phi \right) \right] = 0 \quad (7)$$

これらの方程式では空間に関する微分が2階なのに対し、時間の微分が1階と、時間と空間に関して同階にならず、本来の方程式から変化してしまっている。そのため、もともとは無限遠まで伝播する波動を記述するMaxwell方程式が、低周波においてその性質を失い、電磁的な源(コイルなど)があるところから遠ざかるにつれ急激に減衰するものとなる。この本来の電磁波の伝播の性質があるかないかが最終的には電磁波解析の本質的な特徴に反映することにな

る。

#### 3.2 方程式の離散化

Maxwell方程式を数値的に表現しようとすると、空間、時間に関して離散化する必要がある。また、境界条件と物質条件、電流などの源の設定を施して、発生する電磁場を数値的に仮想実現させる。空間の離散化手法としては電磁場解析では有限要素法が圧倒的に使用されている。時間に関する離散化では電磁場解析では2種類の方法がある。差分法と交流場の場合に時間微分項を $j\omega$ ( $j$ は虚数単位)の複素数で置き換え、代数的に表現する方法( $j\omega$ 法)である<sup>3,4)</sup>。電磁波解析では時間の離散化は差分法が多く、空間の離散化では差分法または境界要素法が主に用いられる。

こうして離散化の考慮まで進んできたわけであるが、電磁波解析では別に大きな制約が存在する。計算に必要なデータ容量の問題である。電磁波解析の場合、まず、伝播すると思われる空間は原則すべて考慮する必要がある(無限遠方への伝播は除く)。一方、マイクロ波のスケールはその波動をきちんと捉えようとするとcmオーダーの分解能が必要である。もし、mオーダーの3次元領域の中でマイクロ波の伝播を取り扱おうとすると、空間の各次元で100以上、つまり全体で100万以上の領域分割が必要になることがわかる(後述する例では9千万弱の空間分割)。これを実現するには現状ではデータが少なく済む差分法しか選択の余地はなく、有限要素法のおよそ数十分の一程度の容量で計算することができる。また、時間に関しても本質的に波動伝播で過渡的な変化が顕著であることから、差分法を使うのが妥当である。

以上から、電磁波解析は、原理的には種々の離散化手法の取込みの可能性を持っているが、現時点の市販計算機の能力では両者ともに差分法を使うのが実用的である。その代表例がFDTD法である。この方法の詳細はここでは述べないが、以下のある物理量 $F$ に対しての中央差分(8)を使って方程式(1)と(2)を離散展開する<sup>6,7)</sup>。

$$\frac{\partial F}{\partial x} \approx \frac{F\left(x + \frac{\Delta x}{2}, y, z, t\right) - F\left(x - \frac{\Delta x}{2}, y, z, t\right)}{\Delta x} \quad (8)$$

ここで $\Delta t$ 、 $\Delta x$ はそれぞれ時間およびX軸方向の刻み幅である。

以上で基本的な電磁波方程式の離散展開はできたことになる。

#### 3.3 電磁波解析での評価物理量

電磁波解析が電磁場解析と違うもう一つの点は、評価する物理量が異なることである。電磁場解析では通常、磁束密度、渦電流損、電磁力(ローレンツ力、マクスウェル応力)を主に抽出して、設備設計の指標として援用する。一方、電磁波解析では、式(1)、(2)を直接取り扱い、磁界強度および電界強度、誘電損失をその指標として扱う。

ここでも、本質的に波動伝播のため、過渡的にみる必要があり、得られた解をある一時刻だけの場の様子で判断するのは危険なことが多い。特に大きな閉空間に電磁波を入射する場合は、反射を繰り返して定在波が生成されるのには時間がかかるため、早く解を得ようとして解析時間を短くしてしまうと、各物理量の見積りを誤って評価してしまいかねないので、どれだけのステップを計算するか見積もることは妥当な解を得るために非常に重要となる。

加熱の直接の指標として使う誘電損失は真空の誘電率 $\varepsilon_0$ を用いて次式で求める。

$$\frac{\omega \varepsilon_0 \varepsilon''}{d} |\mathbf{E}|^2 \quad (9)$$

#### 4. 電磁波解析モデリング上の注意点

実際にマイクロ波のプロセス应用到電磁波解析を適用しようとすると、実条件に近い形でモデリングをしないと十分な答が得られない。モデリングにも多くの要因があるが、それらのうち重要なものについて触れる。

##### 4.1 加熱域の決定(浸透深さ)

電磁波応用の概観で述べたように、産業応用の電磁波は実質的に二つの周波数に限定される。誘導加熱などでは対象が効率よく加熱されるかされないかを判断する重要な因子として浸透深さという、電磁場が対象物の表面からどこまで浸入できるかを見積もる指標がある。同じものが電磁波の場合にもあり、その導出式は以下のとおりとなる。ここで $\epsilon'$ は誘電率 $\epsilon$ の実部である。

$$L = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{2}{\epsilon'(\sqrt{1 + \tan^2 \delta} - 1)}} \quad [cm] \quad (10)$$

この浸透深さ $L$ は加熱対象の材質が同じ場合、波長に比例する。したがって、対象物の代表的な寸法が与えられている場合、この式から、加熱可能なように周波数を選択しておく必要がある。対象物を内部まで加熱したい場合は低い周波数(915MHz)を、比較的表面を加熱したい場合は高い周波数(2450MHz)を選ぶことになる。

##### 4.2 導波管のモデリング(生成波動の精緻化)

導波管をどうモデリングするかも重要である。マイクロ波の波長が10cmオーダーのため、導波管の大きさの精度や厚みなどが波動伝播と拡散に影響する場合がある。したがって、粗い空間分割や物体のモデリングをすると、対象領域内の電磁波の伝播や反射の様子を大きく変えてしまう。

実用に益するようになると、電磁波解析では大容量が必要で、そのため、ほぼ必然的に差分法を選択せざるを得ないことは詳述したとおりであるが、差分法を採用した場合、どうしても避けたいモデリング上の問題が発生する。それは格子状の分割しか許されないことである。有限要素法のように四面体や三角柱のような分割は許されない。したがって、局面を持つ物体や矩形状でも格子に対して角度を持つ場合は階段状に表面の凹凸を持たせて近似する以外に手が無い。

また、導波管内に双極子の点源を置いて電磁波を生成させるが、導波管の長さをどの程度とり、どの位置に点源を置くかも重要である。ただ、点源の位置については通常、導波管内には実際にはほとんど発生しない反射波(電源側のダミーロード吸収体でほぼ吸収)を生じさせないように、奥から $\lambda/4$ の位置に設定する。これにより、点源から導波管奥に向かった電磁波は反射後、自身で相殺して射出側に現れないようにすることができる。

##### 4.3 境界のモデリング(対象物の精緻化)

次に境界特性の設定を考える。電磁波解析では一般的には二つの見方から境界は分類される。一つは境界での反射と吸収、もう一つは閉鎖系か開放系かである。金属の壁に囲まれた空間に照射をするような場合は反射系かつ閉鎖系となる。少し複雑なところでは、薄い誘電体層(電磁波吸収体)で囲んだ空間に照射をするような場合、電磁波の一部が誘電体をすり抜けて無限空間に拡散していくような境界設定も可能である。そして、さらにその外側に金属壁を設けることもできる。どこまで数値モデリングの精度を確保したいかによってこれらを解析者は決定する必要がある。

以上のように、精度よい結果を得るためには、通常の電磁場解析

同様、対象物の物性や空間領域の大きさ、選択する周波数、構造体の形状など、問題ごとに注意を要するものが多様で、かつ波動伝播の特質上、その影響が全体に及ぶことが少なくないので、こうすれば必ず妥当な解が得られるというような汎用的な設計論を展開してみせることは難しい。

#### 5. 解析例(製鋼プロセス耐火物乾燥)

前節で述べた内容を耐火物の加熱の例で具体的にみていく。

図2は鉄皮と耐火煉瓦で囲まれた大きな空間(天井は鉄皮のみ)にマイクロ波を入射する設備のモデル図である(天井と手前の2壁面は表示していない)。部屋の床には乾燥すべき耐火物構造体が3つある。導波管は矩形導波管を3本用いていて、互いに干渉を避けるために120°ずつ回転した関係に配置している。格子と適合しているのは左手前の導波管のみで、残りの2本は適合していない。その影響がなるべく出ないように細かな分割をし、セル分割数は87882624となった。周波数は915MHz、投入電力は18kWである。使用計算機はHPC-AlphaDP264/667F(主記憶4GB, 600MHz)で、5000ステップに約1日かかった。

3本の導波管の1本の点源の位置を変えて発生する電磁波の様子を表したのが図3である。同一色で強度を表しているが、両者では射出する電磁波の強度にずれが生じている。右は上部で反射した波が重畳された結果、電界が強まった例である。また、波の間隔にも若干のずれが生じており、反射により他の周波数が混在した状態になっている。ほかの2本についても同様で、この格子では導波管の

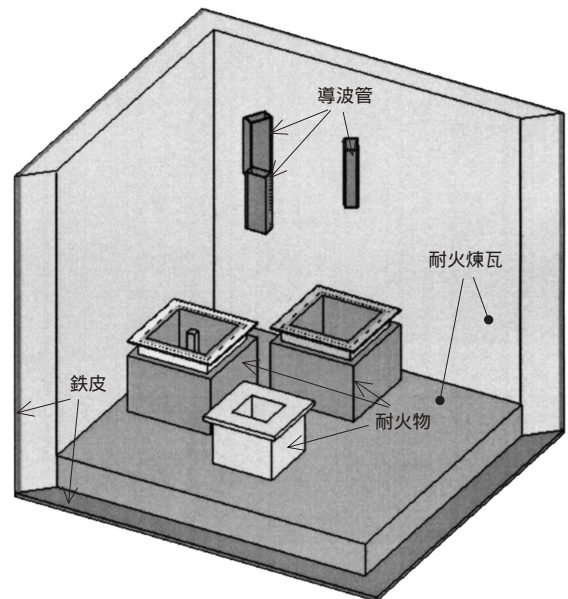


図2 耐火煉瓦と鉄皮で囲まれた乾燥室のモデル

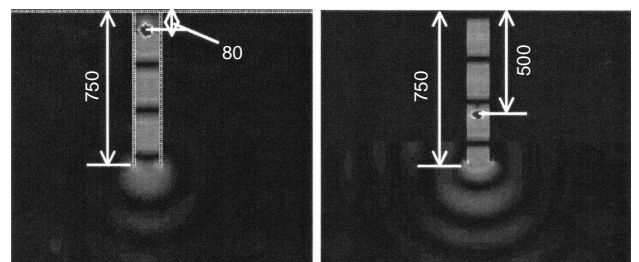
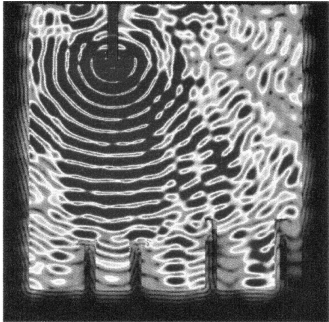
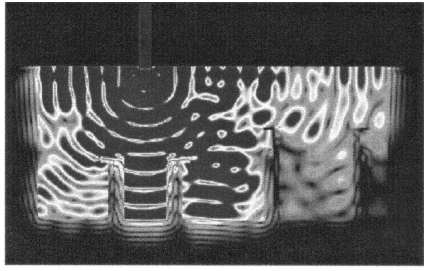
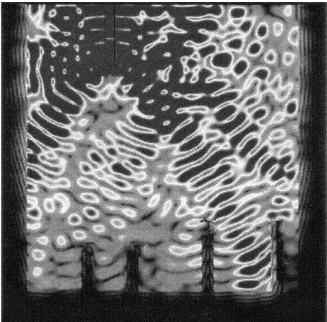
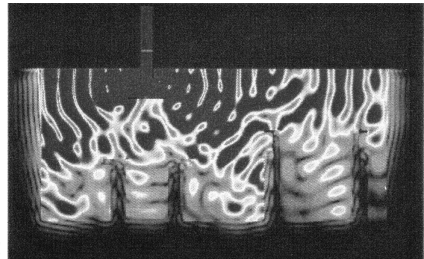
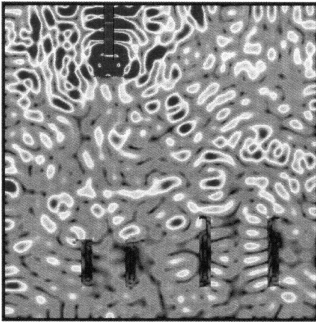
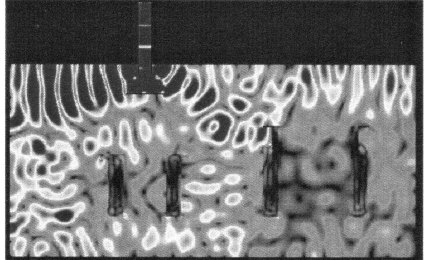


図3 導波管内の点源の位置の影響(電界強度)

表1 電界強度分布(導波管の位置, スターラー, 外壁の効果)

	高天井	低天井
導波管のみ	 <p>linear scale, Mag E disp. 100%= 1.00e+03v/m</p> <p>加熱エネルギー : 2.5kW</p>	 <p>linear scale, Mag E disp. 100%= 1.00e+03v/m</p> <p>加熱エネルギー : 6.2kW</p>
スターラー追加	 <p>linear scale, Mag E disp. 100%= 1.00e+03v/m</p> <p>加熱エネルギー : 3.2kW</p>	 <p>linear scale, Mag E disp. 100%= 1.00e+03v/m</p> <p>加熱エネルギー : 1.5kW</p>
外壁鉄皮化	 <p>linear scale, Mag E disp. 100%= 3.00e+03v/m</p> <p>加熱エネルギー : 10.0kW</p>	 <p>linear scale, Mag E disp. 100%= 3.00e+03v/m</p> <p>加熱エネルギー : 15.8kW</p>

格子との不適合は問題にはならなかったが、点源位置は重要であった。

さらに条件を変えて解析を行った(表1参照)。まず、天井の高さを下げて導波管の位置の影響をみたところ、低くした方が近接した分、耐火物に入る加熱エネルギー(三つの耐火物の誘電損失の総和)が大きく上昇した。次に、導波管の出口に反射板(スターラー)を置いて強拡散を試みたところ、高天井では改善がみられたものの、低天井は反射の影響が強くて、耐火物に入るべき加熱エネルギーが著しく低下した。そこで、外壁を鉄皮だけにして、反射をよくしたところ、低天井は最も高い15.8kWの加熱エネルギーを得た。

以上から、最大効果を得るためには低天井で反射板を設け、外壁を金属壁にするのが一番効率がよく、最適な設備構成を得ることができた。なお、使用したソフトウェアは米国Remcom社のXFDTDである。

## 6. 結言

本稿では鉄鋼プロセスへの解析アプローチとしてはほとんど例のない電磁波解析について、解析の内容とその解析例を紹介した。電磁波解析は物理対象としては電磁場に分類されるが、解析の内容そのものはやや特殊であり、現状の計算機ではたいへん負荷が重く、難度の高い計算であることを述べた。そして、解析例では設備設計を例にとり、最適化の要因がどう決められるかを説明した。

今後、電磁波解析がどのような方向に行きそうかをここで少し述べることにする。先述したように、電磁波解析は産業プロセスへの適用よりも圧倒的に通信関係分野での使用が主流である。現状では通信産業の発展がまだまだ続きそうであり、電磁波障害など無線関係の問題に適用されていくことが考えられる。

先にマイクロ波特有の副次的効果について述べた。このようにミ

クロレベルの材料特性の変化を探る動きが現在世界的に進められており、材料開発の視点から注目を浴びている。今後はいろいろな分野でマイクロ波適用の展望が見込まれる。

また、産業レベルの高出力の電磁波発生装置は技術的な困難もあって、製作メーカーや種類が少なく、そのことが却って応用への道を阻んでいた面もあったが、進展はみられるので、他の誘導加熱装置や熔融攪拌装置など種々の電磁エネルギー応用装置に比肩するようになっていく可能性が十分にある。そのときにはここで述べたような数値解析による装置や設備設計が当然のようになる時代が遠からずやってくるであろう。我々が現時点で保有しているここで述べた解析技術は、いつまたそのような新たな応用の必要性に遭遇しても対処できるものであると確信している。

## 7. 謝 辞

本稿の解析にあたっては、解析環境や使用ソフトウェア機能について、新日本製鐵環境・プロセス研究開発センター計測・制御研究開発部の藤崎敬介主幹研究員、平山隆主任研究員に御協力、御教示いただいた。

### 参考文献

- 1) 日本電熱協会編: エレクトロヒート応用ハンドブック. 初版. 東京, オーム社, 1990. p.211-266
- 2) 総務省: 周波数の公開. <http://www.tele.soumu.go.jp/search/index.htm>
- 3) Harrington, R.F.: Field Computation by Moment Methods. 1st ed. New York, The Macmillian Co., 1968
- 4) Ueyama, T. et al.: IEEE Trans. on Magnetics. MAG-25(5), 4153-4155(1989)
- 5) 梅津健司ほか: 新日鉄技報. (357), 11(1995)
- 6) Kunz, K.S., Luebbers, R.J.: The Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetics. 1st ed. Boca Raton, CRC Press, 1993, 448p
- 7) 宇野亨: FDTD法による電磁界およびアンテナ解析. 東京, コロナ社, 1998, 274p
- 8) 越島哲夫編: マイクロ波加熱技術集成. 初版. 東京, (株) NTS, 1994, 787p

### 各記号の物理量

太字はベクトル量でそれ以外は基本的にスカラー量である。

- $B$**  : 磁束密度( Wb/m<sup>2</sup> )
- $H$**  : 磁界強度( A/m )
- $E$**  : 電界強度( V/m )
- $D$**  : 電束密度( C/m<sup>2</sup> )
- $A$**  : ベクトルポテンシャル( Wb/m )
- $\phi$  : スカラーポテンシャル( V )
- $F$**  : 電磁力( N/m<sup>3</sup> )
- $J_0$**  : 強制電流密度( A/m<sup>3</sup> )
- $t$  : 時間( s )
- $\mu$  : 透磁率( H/m )
- $\varepsilon$  : 誘電率( F/m )
- $\varepsilon''$  : 複素誘電率( F/m )
- $\rho$  : 電荷密度( C/m<sup>3</sup> )
- $\sigma$  : 導電率( S/m )
- $\omega$  : 角周波数
- $\lambda$  : 波長( m )
- $d$  : 誘電体の密度( kg/m<sup>3</sup> )
- $\delta$  : 誘電体の損失係数