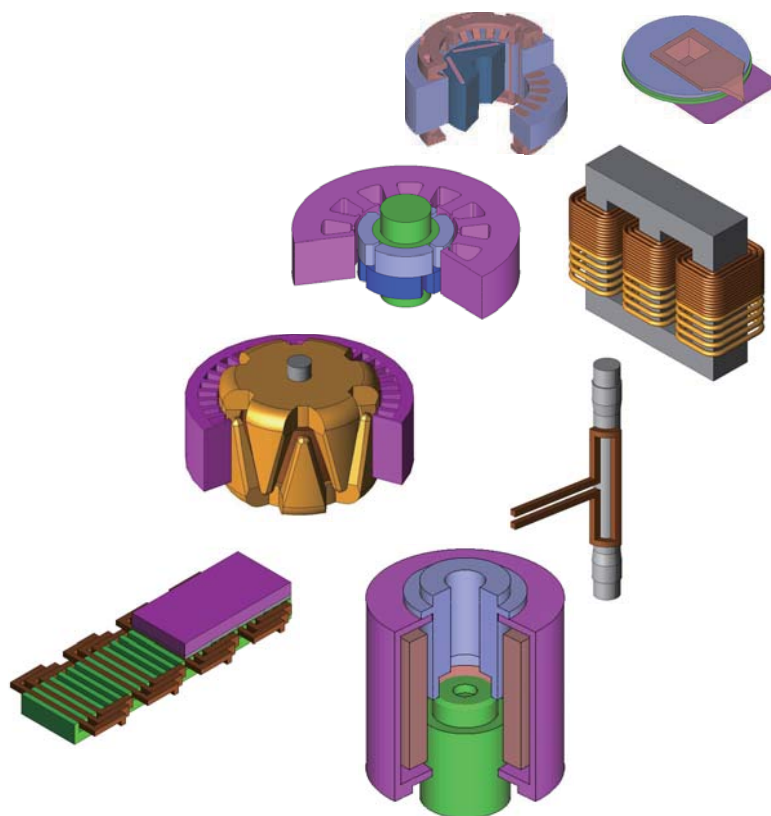


JMAG 初級セミナー

JMAG-Designer 導入編

株式会社 JSOL エンジニアリングビジネス事業部
<http://www.jmag-international.com/>



磁界解析のための基礎知識

第4章 磁界解析のための基礎知識

ここでは、JMAG-Designer を使用して磁界解析を確実に効率よく実行するための情報を記載しています。

解析モデル作成のルール、考え方、および、工程の中で時間的に大きな比重を占める“解析モデルの作成”と“解析”の負荷を軽減する工夫などを説明します。

また、JMAG-Designer を使用した解析の流れを示します。

4-1. 解析目的を明確にする

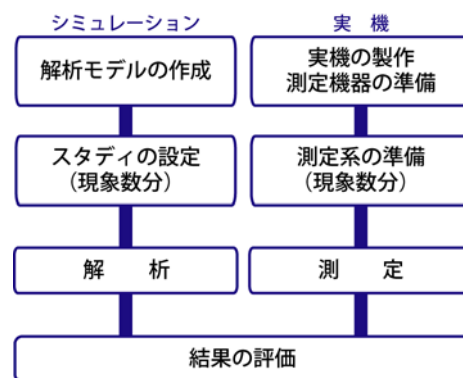
シミュレーションは、試作と実験を計算機上で実行することが大きな目的のひとつになっています。実機の評価では、対象物をひとつ作ることさまざまな現象を確認できるのに対し、シミュレーションでは確認したいひとつの現象に対してひとつの設定が必要になります。

たとえば、ひとつのモータを対象としたときに、トルクを評価するのか、誘起電圧を評価するのかによって異なる設定を与えます。

実機による実験では、実機のほかに測定機器と現象の数だけの測定系が必要になりますが、シミュレーションでは、解析したい現象ごとに用意する設定（JMAG-Designer では「スタディ」という概念で管理します）が、測定機器と測定系の準備に相当します。

実機による解析では、確認したい現象に従って必要な測定機器や測定系が決定するように、シミュレーションでは、解析する目的を明確にした上でモデルを作成し、解析方法を決定して、材料や条件などの設定項目を設定します。

つまり、作業を開始する前に解析目的を明確にすることで、適切な解析モデルの作成と解析の設定が決定することになるのです。



4-2. 解析目的に必要な設定を把握する

シミュレーションでは、解析モデルに与えた設定によって発生する現象を見ることができます。つまり、さまざまな設定を用意することで、ひとつの解析モデルについて、用意した設定すべての現象をひとつずつシミュレーションすることができます。

たとえば、材料特性に線形や非線形のデータを定義したり、部品の材料をいろいろと変更したりして、必要なだけ設定を用意することで、様々な現象を捉えることができます。

しかし、線形のデータを定義した条件では非線形のデータによる現象をシミュレーションすることはできません。実機では、材料が線形か非線形かに関わらず、測定すれば実機の特性を含んだ現象を見ることができますが、シミュレーションではそれらの特性を明示的に指定します。JMAG-Designer では「スタディ」という概念でひとつの設定を管理し、複数のスタディを用意することで、いくつもの設定による結果を得ることができます。

ひとことで「設定」と言っても、さまざまな項目があります。どのように設定をすればよいのかを理解するためには、注目している現象が何に起因しているかを理解する必要があります。これは、実機による解析で使用する機器の動作原理を理解することと同じです。

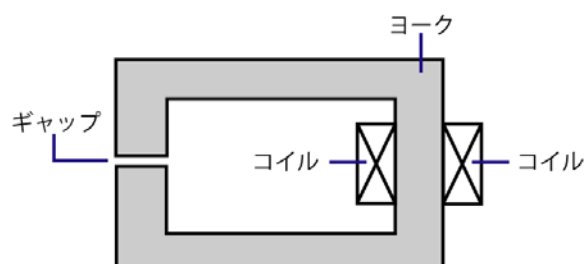
たとえば、モータの解析ではステータ巻線への電流投入のタイミングとロータの位置関係が重要なパラメータですが、値を間違えるとトルクの値が予想外の値になってしまうことがあります。

このようなことを避けるために、解析したいモデルを正しく作成できたか、どのような現象を捉えたいのか、そのために必要な設定は何か、解析モデル作成から解析結果を得るまでの道筋と必要な設定を把握した上でシミュレーションを実行することが基本的な姿勢です。

4-3. 現象を理解する

現象を理解することは、解析結果の評価において重要です。

例として、下図に示すコイルとそれを囲むヨークから構成されるモデルについて考えてみます。



ここでは、すべての材料は線形であると仮定します。このモデルのヨークの比透磁率を1000 から 2 倍の 2000 に変更した場合の、ヨークを通過する磁束の変化量を考えてみます。

透磁率は磁束の通りやすさのひとつの指標です。透磁率を 2 倍にすると、磁束は 2 倍にならずに約 5% の増加という結果が得られます。この結果がシミュレーションによって得られたとき、どのように考えればよいか、ということが現象への理解につながります。

磁束の経路を考察すると、この結果が理解できます。

磁束の量は、通過する経路の磁気抵抗で決まります。ヨークがその長さの 100 分の 1 のギャップをもっているとすると、ヨーク部分はギャップに比べて 100 倍の経路長があることになります。

比透磁率が 1000 の場合、ヨークの磁気抵抗はギャップの 10 分の 1 にしかすぎません。つまり、全体の磁気抵抗の内、ヨークが占める割合は 10% です。比透磁率が 2000 の場合はギャップの 20 分の 1、つまり 5% です。

したがって、ヨークの透磁率を 1000 から 2000 の 2 倍にしても、全体の磁気抵抗は 5%

程度しか変わりません。よって、磁束量の変化もその程度になります。

このように、現象や動作原理を理解することが重要です。

4-4. 解析対象を小さくして計算効率を向上する

同じパターンの繰り返しで成立しているモデルの場合、モデル全体を計算するよりも、モデルを構成しているパターンをひとつ取り出して計算する方が、計算に要する時間は短くなります。パターンをひとつ取り出して計算した場合の結果は、たとえば 1/4 部分モデルの場合、トルクなどのモデルにかかる力の値は 1/4 の値が得られます。これを 4 倍することで、モデル全体の解析結果と同じ値を得ることができません。

つまり、同じパターンの繰り返しで成立しているモデルの場合はモデル全体を計算する必要はなく、モデルを構成しているパターンのうちのひとつだけを解析することで、モデル全体を解析した場合と同じ結果が得られるのです。これによって、解析時間とコストを抑えることができます。

解析対象を小さくして効率よく解析を実行するためには、事前に解析モデルの形状や磁束の流れ、起磁力の配置などを検討し、解析モデル作成前に解析すべき最小の形状を把握してから、最小の形状でモデルを作成することが必要です。

JMAG-Designer は、分割して解析対象を小さくしたモデルを解析するために、境界条件を設定します。境界条件とは、外界とモデルの境目に設定する条件のことです。

ここでは、解析対象が部分モデルの場合に指定する対称境界条件と自然境界条件の働きと適用方法について説明します。

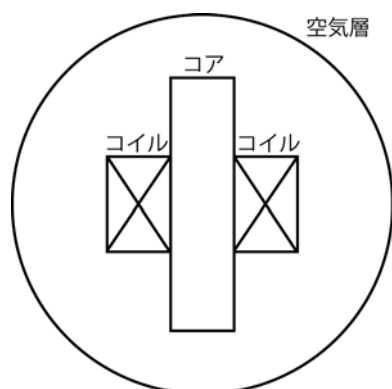
4-4-1. 対称境界条件と自然境界条件

対称境界条件とは、作成した部分モデルの断面を磁束が平行に流れる場合に設定する境界条件です。電流はこの面に対して垂直に出入りします。

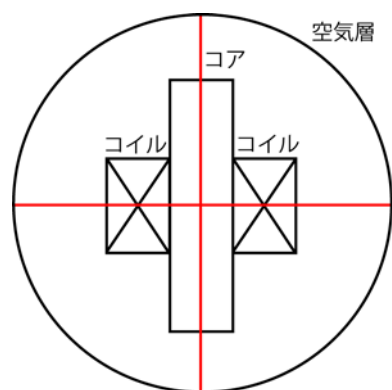
自然境界条件とは、作成した部分モデルの断面を磁束が垂直に出入りする場合に設定する境界条件です。電流はこの面に平行に流れます。

JMAG-Designer では、対称境界条件と自然境界条件を適用するモデルの場合、対称境界条件を適用する面を設定します。設定しなかった面は自動的に自然境界条件と見なされます。

対称境界条件と自然境界条件を使う例として、下図に示した 2 次元の電磁石について考えてみます。

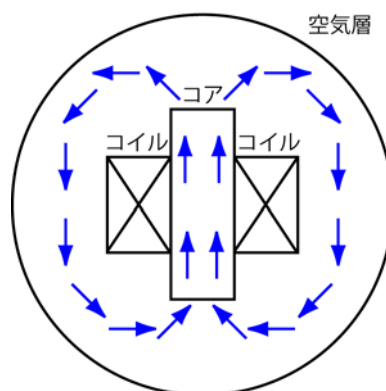


コアとコイルの形状は、左右に対称であり、かつ、上下に対称です。つまり、垂直に 2 分割、水平に 2 分割した状態が 4 つ集まって電磁石のモデルを形成していると考えられます。

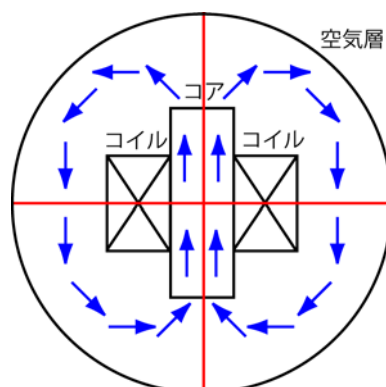


つまり、モデル全体を 1/4 分割して計算すればよいということがわかります。よって、この電磁石を解析するときは 1/4 部分モデルを作成し、解析結果で得られたトルクなどのモデルにかかる力の値を 4 倍することで、元のモデルを解析した場合と同じ結果が得られます。

作成した 1/4 部分モデルは JMAG-Designer で読み込み、分割した面に対して境界条件を与えます。与えなければならない境界条件を考えるために、磁束密度分布を考えます。コア形状とコイルの配置から、磁束密度の分布は次の図のとおりです。



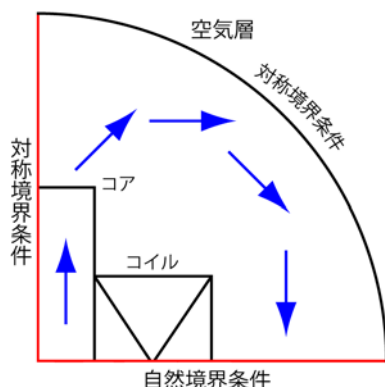
これに、モデルの分割を考慮すると、次のようになります。



磁束密度分布に注目すると、対称面（モデルの断面）として、磁束が横切らない（平行に流れる）面と、垂直に横切る面の 2 つがあることがわかります。

これにより、磁束が横切らない（平行に流れる）対称面に“対称境界条件”を設定することで、次の図に示す 1/4 解析モデルで解析が実行できるという結論になります。このとき、境界条件を設定しなかった磁束が垂直に横切る面

には、自動的に“自然境界条件”が設定されます。



4-4-2. 回転周期境界条件

回転周期境界条件とは、円周上に同じパターンが周期的に繰り返されてモデルを形成している場合に設定する境界条件です。

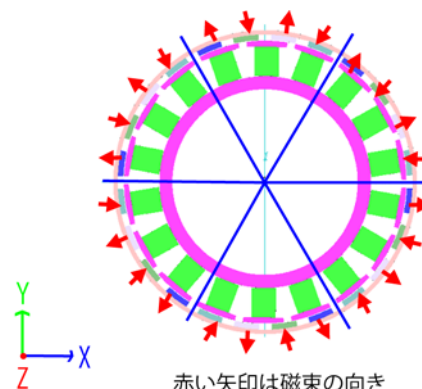
回転周期境界条件には、その周期性によって“周期”と“反周期”の2つがあります。以下にそれぞれを説明します。

■ 周期の回転周期境界条件

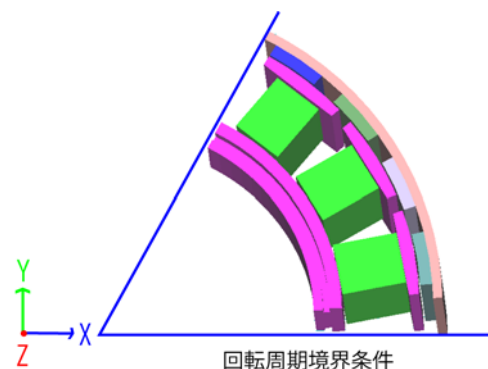
磁束の向きが同じパターンが繰り返される場合に指定します。

周期の回転周期境界条件の例として、Z軸を回転軸にし、原点を中心に行っている24極18スロットのモータを考えてみます。このモータをZ軸側から見ると、60度ごとに6つの同じパターンが円周上に繰り返されている形状と考えることができます。また、

パターンの周期ごとに磁束が同じ向きになっています。



このような場合、1/6部分モデルを作成し、周期の回転周期境界条件を与えることで、解析対象を小さくすることができます。回転周期境界条件は、部分モデルのカット面のどちらかに指定します。



上記モデル例の回転周期境界条件の設定は、次のとおりです。

- 周期角度
同じパターンが何度ごとに繰り返されているかを角度で指定します。この例では、60度になります。
- 回転軸が通る1点の座標
モデルの中心部の座標を指定します。この例では原点を中心と仮定していますので、(0,0,0)を指定します。
- 回転軸の方向
回転軸の軸方向のX成分、Y成分、Z成分を指定します。この例では回転軸をZ軸にしていますので、(0,0,1)を指定します。

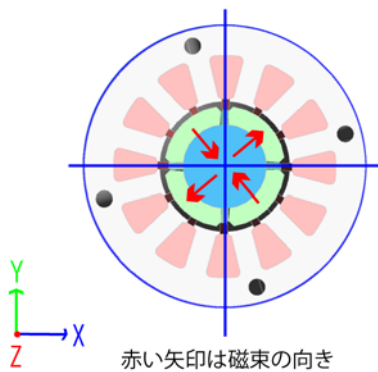
- ・ 周期／反周期／軸反転
回転周期性を指定します。この例では周期ごとの磁束の向きが同じパターンになっているので、周期を指定します。

■ 反周期の回転周期境界条件

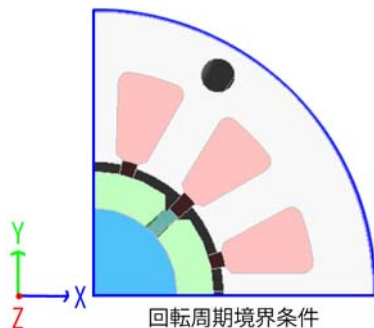
1 周期ごとに磁束の向きが反対になる場合に指定します。

反周期の回転周期境界条件の例として、Z 軸を回転軸にし、原点を中心に行っている 4 極 12 スロットのモータを考えてみます。

このモータを Z 軸側から見ると、4 つの同じパターンが円周上に繰り返されている形状と考えることができます。また、パターンの周期ごとに磁束が反対向きになっています。



このような場合、1/4 部分モデルを作成し、反周期の回転周期境界条件を与えることで、解析対象を小さくすることができます。回転周期境界条件は、部分モデルのカット面のどちらかに指定します。



このモデル例での回転周期境界条件の設定は、次のとおりです。

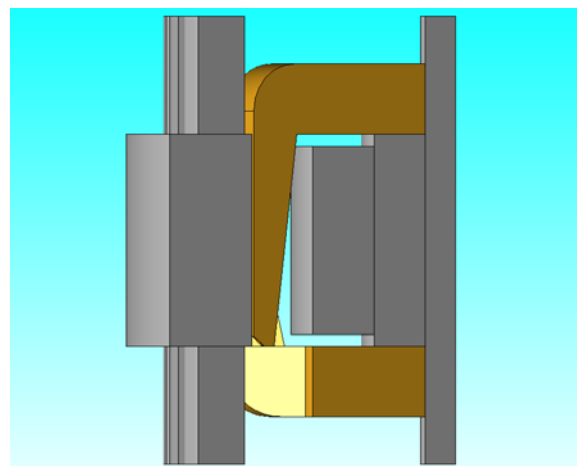
- ・ 周期角度
同じパターンが何度ごとに繰り返されているかを角度で指定します。この例では、90 度になります。
- ・ 回転軸が通る 1 点の座標
モデルの中心部の座標を指定します。この例では原点を中心と仮定していますので、(0,0,0) を指定します。
- ・ 回転軸の方向
回転軸の軸方向の X 成分、Y 成分、Z 成分を指定します。この例では回転軸を Z 軸にしていますので、(0,0,1) を指定します。
- ・ 周期／反周期／軸反転
回転周期性を指定します。この例では 1 周期ごとに磁束の向きが反対になっているので、反周期を指定します。

■ 軸反転回転周期境界条件

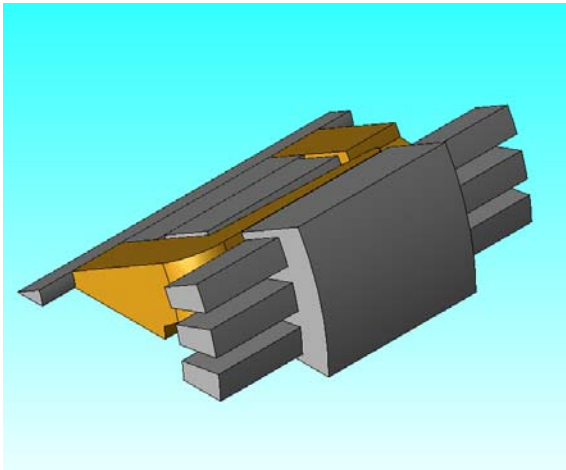
1 周期ごとにモデルの断面が周期境界の軸方向に対して反転するモデルの場合に指定します。

軸反転回転周期境界条件は、一般にはクローポール型回転機などに適用されます。例として、クローポール型回転機の断面を示します。形状が周期境界の軸方向に対して反対になっていることがわかります。

- ・ 平面



- 等角投影



このように、両側の断面が上下反対のモデルの場合、軸反転回転周期の回転周期境界条件を与えることで、解析対象を小さくすることができます。回転周期境界条件は、部分モデルのカット面のどちらかに指定します。

このモデル例での回転周期境界条件の設定は、次のとおりです。

- 周期角度
同じパターンが何度ごとに繰り返されているかを角度で指定します。この例では、30度になります。
- 回転軸が通る 1 点の座標
モデルの中心部の座標を指定します。この例では原点を中心と仮定していますので、(0,0,0) を指定します。
- 回転軸の方向
回転軸の軸方向の X 成分、Y 成分、Z 成分を指定します。この例では回転軸を Z 軸にしていますので、(0,0,1) を指定します。
- 周期／反周期／軸反転
回転周期性を指定します。この例では 1 周期ごとに断面の上下が反対になっているので、軸反転を指定します。

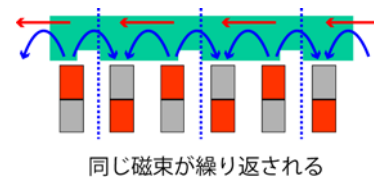
4-4-3. 並進周期境界条件

並進周期境界条件とは、直線上に同じパターンが繰り返されてモデルを形成している場合に設定する境界条件です。

並進周期境界条件には、その周期性によって“周期”と“反周期”の 2 つがあります。以下にそれぞれを説明します。

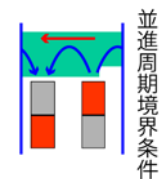
■ 周期の並進周期境界条件

周期の並進周期境界条件の例として、次の図に示すモデルを考えてみます。



このモデルは、青い点線で区切った範囲のモデル形状と磁束が同じパターンが繰り返されているモデルと考えることができます。

このような場合、青い点線で区切った範囲だけを部分モデルとして作成し、周期の並進周期境界条件を与えることで、解析対象を小さくすることができます。並進周期境界条件は、部分モデルのカット面のどちらかに指定します。



例として、この部分モデルの幅が 0.5m で X 軸方向に進行するものと仮定した場合の設定項目を示します。

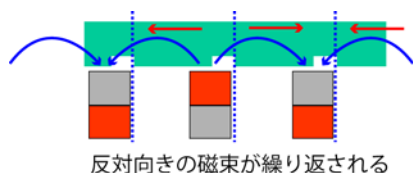
- 並進方向
パターンが並んでいく方向の X 成分、Y 成分、Z 成分を指定します。この例では、X 軸方向に伸びていますので、(1,0,0) を指定します。
- 周期距離
どれだけの距離を周期的に繰り返している

かを指定します。この例では、幅 0.5m のパターンが繰り返されていますので、0.5m を指定します。

- 周期／反周期
並進周期性を指定します。この例では周期ごとの磁束の向きが同じパターンになっているので、周期を指定します。

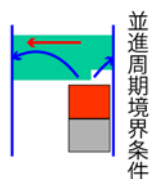
■ 反周期の並進周期境界条件

反周期の並進周期境界条件の例として、次の図に示すモデルを考えてみます。



このモデルは、青い点線で区切った範囲のモデル形状は同じですが、磁束の向きが反対になって繰り返されているモデルと考えることができます。

このような場合、青い点線で区切った範囲だけを部分モデルとして作成し、反周期の並進周期境界条件を与えることで、解析対象を小さくすることができます。並進周期境界条件は、部分モデルのカット面のどちらかに指定します。



例として、この部分モデルの幅が 0.5m で X 軸方向に進行するものと仮定した場合の設定項目を示します。

- 並進方向
パターンが並んでいく方向の X 成分、Y 成分、Z 成分を指定します。この例では、X 軸方向に伸びていますので、(1,0,0) を指定します。
- 周期距離
どれだけの距離を周期的に繰り返しているかを指定します。この例では、幅 0.5m の

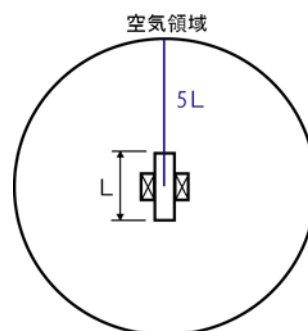
パターンが繰り返されていますので、0.5m を指定します。

- 周期／反周期
並進周期性を指定します。この例では 1 周期ごとに磁束の向きが反対になっているので、反周期を指定します。

4-5. 空気領域を与える

解析の実行では、モデルを取り囲む“空気領域”を指定します。

たとえば電磁石の解析では、磁束がモデルの外のかかなりの範囲まで発生します。磁束密度の測定精度を考慮した場合、以下に示した電磁石の例ではヨークの長辺（図中の L）の 5 倍に相当する空気領域を与えることで、現実に近似した解析結果を得ることができます。



JMAG-Designer では、空気領域を任意の大きさで作成することができます。

▶▶ 参照

空気領域の設定については、P.587「第 4 編 第 35 章メッシュ生成（自動）」を参照してください。

4-6. 解析対象となる部品を把握する

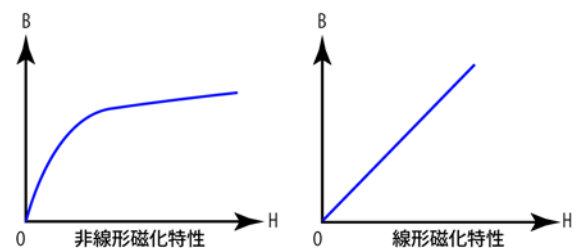
磁界解析を実行する際にはモデルを構成する部品に材料を指定しますが、解析対象となる材料の特性が、“磁性体”、“磁石”、および“コイル”を指定します。非磁性体（プラスチックなど）は解析対象にする必要はありません。

非磁性体を解析対象に含めても含めなくても、得られる結果には影響がありません。非磁性体を解析対象に含めて解析を実行すると要素の数が多くなり、それだけ計算時間が必要になります。つまり、解析の効率を考慮すると、結果に影響のない非磁性体は解析対象から外す必要があるということができます。

4-7. 線形材料と非線形材料を理解する

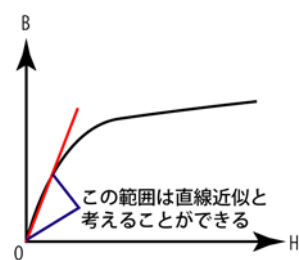
磁性体材料の磁化特性には“線形”と“非線形”があります。

磁化特性はB-Hカーブと呼ばれるグラフで表すことができます。磁束密度を縦軸に、磁界の強さを横軸にした場合に、磁束密度が0の状態から磁性体材料に対して磁界をかけていくと、非線形磁化特性は磁束密度の遷移が曲線で表され、線形磁化特性は遷移が直線で表されます。



非線形磁化特性を指定した解析の場合、線形磁化特性と比較して解析時間が若干多く必要になります。効率よく解析を実行するためには、場合によって線形磁化特性を指定すると良いときがあります。

たとえば、ある磁束の強さの範囲でB-Hカーブが直線に近い形を描く場合は、線形磁化特性に近似していると考えることができます。



解析対象に発生する磁界の強さが線形の範囲に収まっている場合には、線形磁化特性を指定することで解析に必要な時間を短くすることができます。しかし、その場合は非線形性を考慮することができません。

