

磁場解析入門セミナー

1. 磁場解析の概要
2. 磁場解析の機能・設定の紹介
3. 磁場解析のポイント

1. 磁場解析の概要

- Femtet[®] の3つの電磁界ソルバ
- 磁場解析の3つの種類
- 静解析
- 調和解析
- 過渡解析

2. 磁場解析の機能・設定の紹介

3. 磁場解析のポイント

Femtet[®] の3つの電磁界ソルバ Murata Software

Femtet[®] には3つの電磁界ソルバがあります。

ソルバの選択

電磁界

- 電場解析 *Coulomb*
- 磁場解析 *Gauss/Luvsen*
- 電磁波解析 *Hertz*

応力・圧電

- 応力解析 *Galileo*
- 圧電解析 *Ravleigh*

音波・流体

- 流体解析 *Bernoulli*
- 音波解析 *Mach*
- 簡易流体解析 *Pascal*

熱

- 熱伝導解析 *Watt*
- 電場-熱連成 *Curie*

解析の種類

解析できる周波数の目安

電界解析

一定電流・電圧

磁界解析

低周波 (～ 1MHz くらい)

電磁波解析

高周波 (1MHz ～ 数十GHz くらい)

磁場解析の3つの種類

磁場解析では、3種類の解析ができます。

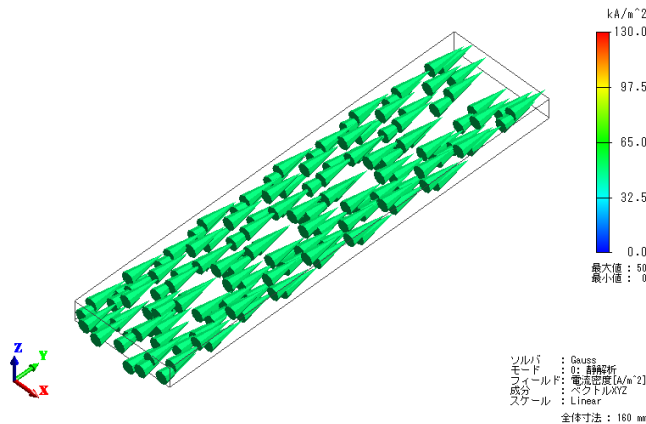
磁場解析

解析の種類

- 静解析 (Gauss)
- 調和解析 (Gauss)
- 過渡解析 (Luvens)

静解析	調和解析	過渡解析
<ul style="list-style-type: none">• 静磁場分布の解析• インダクタンス• 電磁力 ...など	<ul style="list-style-type: none">• 交流磁場分布の解析• 表皮効果を考慮したインダクタンス• 誘導電流、誘導加熱 ...など	<ul style="list-style-type: none">• 時間軸磁場分布の解析• 誘導電流• モータの解析 ...など

静解析では、直流電流や磁石が作り出す静磁場分布を計算します。
インダクタンスや電磁力も計算されます。
非線形のBHカーブをもつ材料を扱うことができます。



周波数=0(直流)の解析

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} (\nabla \times A) = J_0$$

を解いています。

電流密度分布(静解析)

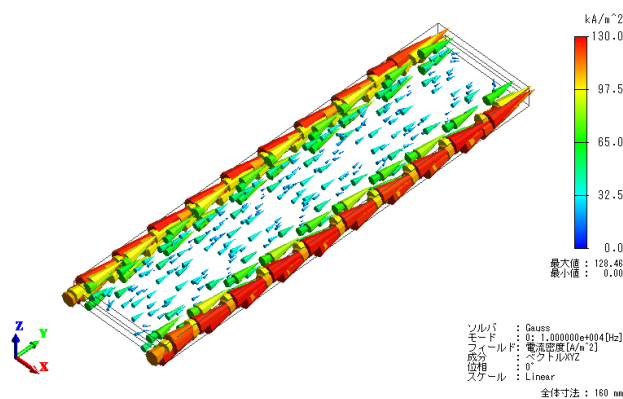
A: 磁気ベクトルポテンシャル(磁束密度 $B = \nabla \times A$)
 Φ : 電位 μ : 透磁率 σ : 導電率
 J_0 : 強制電流密度

調和解析では、交流電流が作り出す交流磁場分布（動磁場分布）を計算します。
誘導電流や表皮効果を考慮した計算ができます。

インダクタンスも計算されます。

熱伝導解析との連成により、誘導加熱（IH）の計算も可能です。

非線形のBHカーブをもつ材料を扱うことはできません。



電流密度分布(調和解析 10kHz)

0<周波数(交流)の解析

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} (\nabla \times A) + \sigma (j\omega A + \nabla \phi) = J_0$$

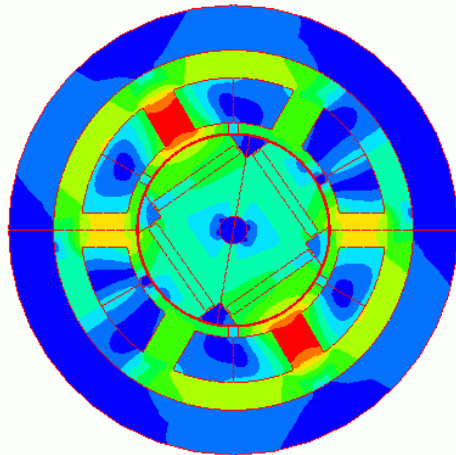
を解いています。

A : 磁気ベクトルポテンシャル(磁束密度 $B = \nabla \times A$)

Φ : 電位 μ : 透磁率 σ : 導電率

J_0 : 強制電流密度

過渡解析では、直流/交流/任意波形の電流や磁石が作り出す時間軸の磁場分布（動磁場分布）を計算します。
誘導電流や表皮効果を考慮した計算ができます。
非線形のBHカーブをもつ材料を扱うことができます。
外部回路との連成解析が可能で、モータの解析ができます。
※過渡解析は磁場拡張オプション機能です。



磁束密度分布(過渡解析)

時間軸の解析

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} (\nabla \times A) + \sigma \left(\frac{\partial A}{\partial t} + \nabla \phi \right) = J_0$$

を時間ステップを刻んで解いています。

A : 磁気ベクトルポテンシャル(磁束密度 $B = \nabla \times A$)
 Φ : 電位 μ : 透磁率 σ : 導電率
 J_0 : 強制電流密度

1. 磁場解析の概要

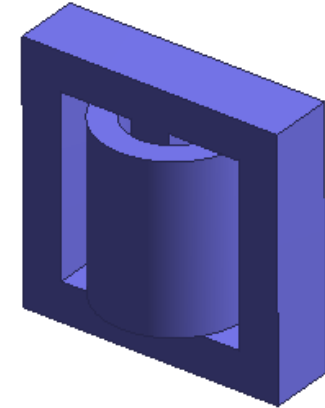
2. 磁場解析の機能・設定の紹介

- 解析の流れ
- 解析条件の設定
- 材料定数の設定
- 境界条件の設定
- 解析結果

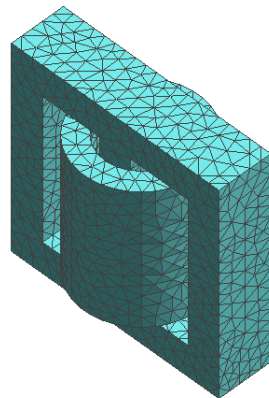
3. 磁場解析のポイント

解析の流れ

- 3次元モデルの形状定義
- 解析条件：解析の種類・メッシュサイズ…
- ボディ属性：磁化の方向…
- 材料定数：比透磁率・導電率・鉄損…
- 境界条件：電気壁・磁気壁・開放境界・対称境界…



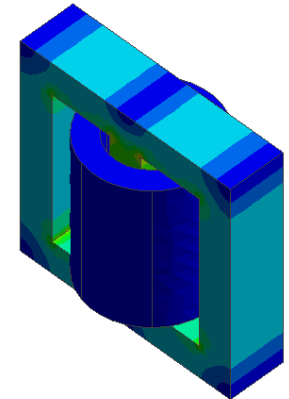
メッシュ分割



解析ソルバ

- 電場解析
- 磁場解析
- 電磁波解析
- 応力解析
- 熱解析
- 圧電解析
- 音波解析

解析結果の表示



解析条件:回転機

過渡解析で回転機（モータや発電機）の解析を行うための設定です。
回転速度やスライドメッシュなどを設定します。

回転機

回転移動

速度一定 []

回転数 X10 [r/min]

ロータの初期回転位置 [deg] ※負値で逆回転

運動方程式連成 ...

中心軸の位置(軸上の任意の座標)

X

Y mm

Z

ギャップタイプ

ラジアルギャップ

アキシアルギャップ(3次元解析のみ対応)

スライドメッシュの分割数

周方向メッシュ分割角度 [deg]

1ステップ当たりの回転量 [メッシュ]

スライドメッシュ層数 []

スライドメッシュの位置(ロータ/ステータのギャップ部)

自動計算

ロータタイプ

インナーロータ

アウターロータ

ギャップ部の半径

内側

外側 mm

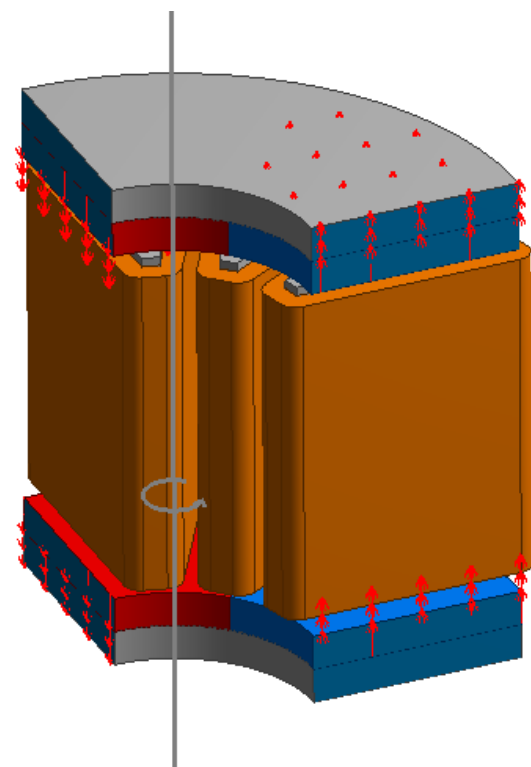
中心

スライドメッシュの軸方向の分割サイズ

軸方向のメッシュサイズを自動的に決定する

指定のメッシュサイズで等間隔に分割 [mm]

テーブルで座標ごとのメッシュサイズを指定 ...



解析条件:外部回路連成

過渡解析で外部回路との連成解析を行うときの設定です。
外部回路図エディタを起動して定義します。

磁場解析

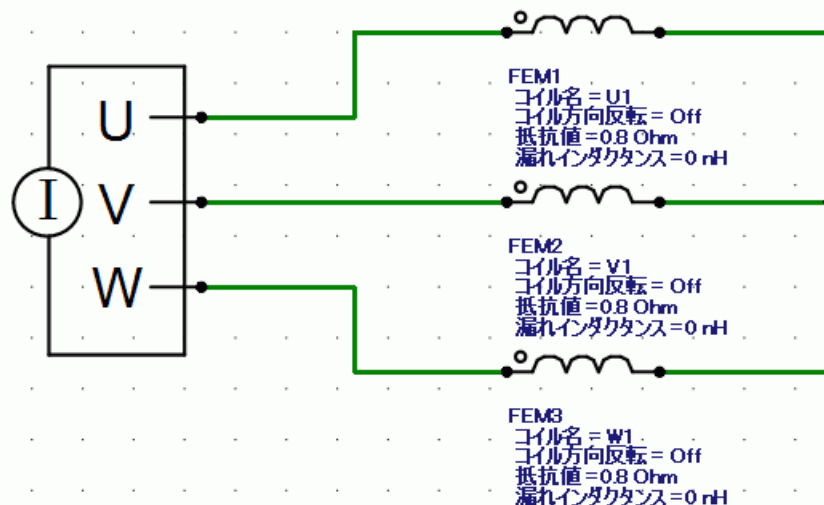
解析の種類

- 静解析 (Gauss)
- 調和解析 (Gauss)
- 過渡解析 (Luvens)

オプション(Luvens)

- 外部回路連成
- 回転機
- 並進機
- インダクタンスを計算する

IUVW1
波形タイプ = 交流 (cos波)
電流 (振幅) = 5 A
周波数 = 60 Hz
U相の位相 = 85.6 deg
相順 = U-W-V
電源の結線タイプ = Y結線



解析条件：外部磁界

モデル外部から磁界を印加した状態を解くための設定です。
静解析、過渡解析では一定磁場、
調和解析では振動する磁場が印加されます。

外部磁界

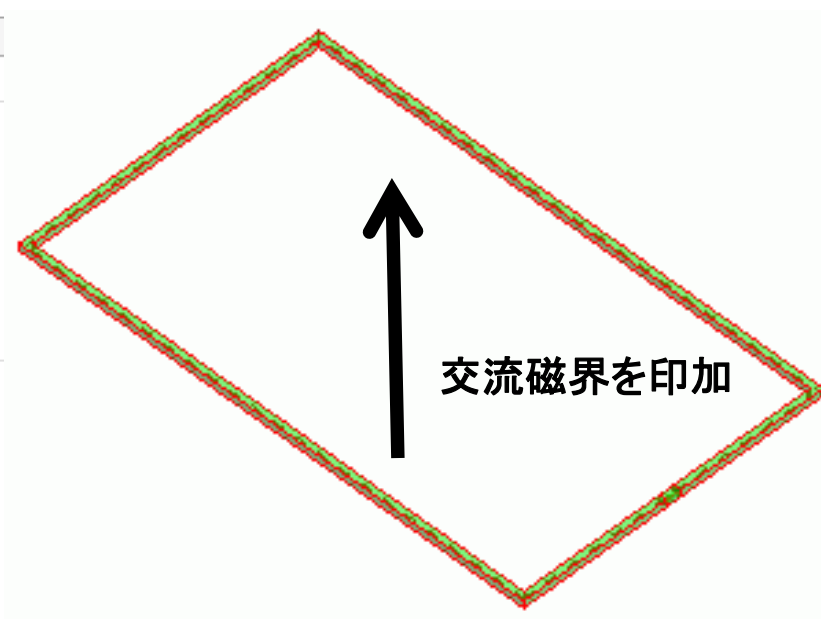
入力タイプ

磁束密度 [T]
 磁界 [A/m]

外部磁界の強さ

X
Y T
Z

(注) 外部磁界を設定すると、外部境界条件が外部磁場印加条件に変更されます。



受信コイルの起電力(NFC)

材料定数

磁場解析で設定できる材料定数は3種類あります。

透磁率

材料タイプ

- 軟磁性材料
- 永久磁石
- 着磁材料
- 永久磁石 (不可逆減磁考慮)
- 軟磁性材料 (マイナーループ使用)
- 着磁結果引用
- 永久磁石 (不可逆減磁結果の減磁率反映)

磁化特性タイプ

- 線形(一定値)
- B-Hカーブ



異方性

- 等方
- 異方

周波数依存

- なし
- あり



温度依存性

- なし
- あり



比透磁率

1.0

透磁率

材料定数

導電率

導体の種類

- 絶縁体
- 導体
- 半導体
- 多層電極
- 完全導体

異方性

- 等方
- 異方

温度依存性

- なし
- あり



導電率

5.977 X10⁷ [S/m]

導電率

鉄損

鉄損の特性定義タイプ

- ジュール損のみ
(電流分布から計算)
- 鉄損テーブル
- 鉄損経験式

計算手法(磁束密度の参照)

- 振幅値(変化幅/2)
- 最大値
- 周波数分析(FFT)

テーブル追加

周波数 Hz

テーブル編集、確認

周波数 [Hz]

鉄損

磁性材料の材料定数入力

磁性材料には大きく分けて2種類あり、それぞれ入力方法が異なります。

○軟磁性材料

保磁力が小さく透磁率が大きい材料。

鉄

ケイ素鋼

ニッケル

パーマロイ

ソフトフェライト など

○硬磁性材料(永久磁石)

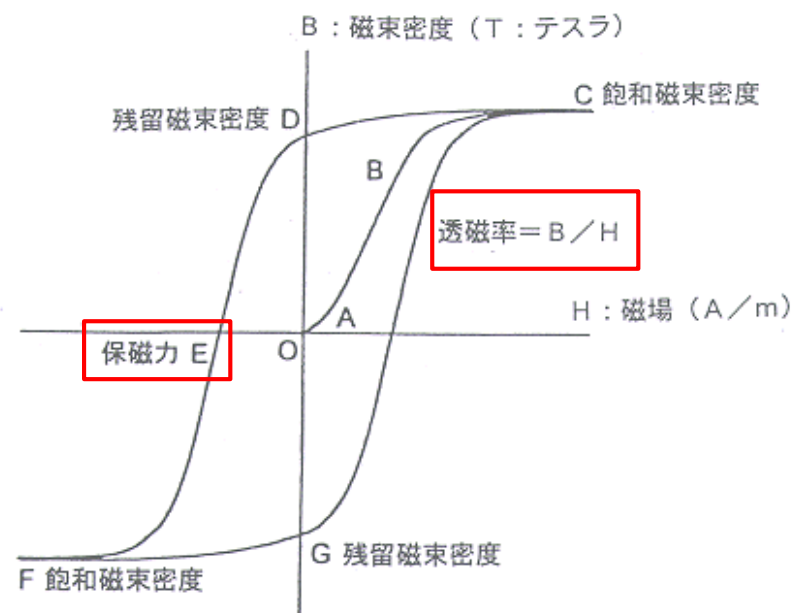
保磁力が大きい材料。永久磁石として用いられる。

ネオジウム磁石

アルニコ磁石

フェライト磁石 (ハードフェライト)

サマリウムコバルト磁石 など



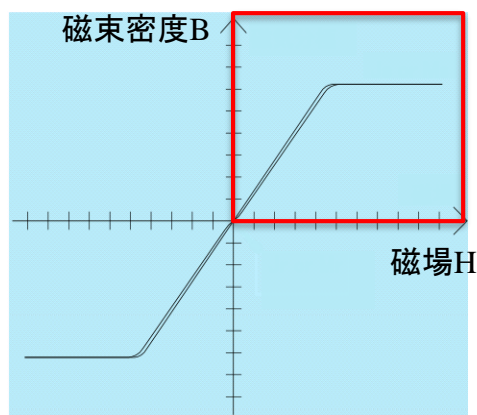
B-H曲線(磁気ヒステリシス曲線)

軟磁性材料の入力方法

透磁率タブで材料タイプで[軟磁性材料]にチェックを入れ、以下のように入力します。

①短時間で解析したい場合
[比透磁率]を入力します。

②精度よく解析したい場合(計算時間は長い)
材料のB-H曲線(磁気ヒステリシス曲線)のデータをそのまま[非線形テーブル]に入力します。
通常は初磁化特性(第一象限)を入力します。
B-H曲線データは、材料メーカーのHPなどから入手できます。



軟磁性材料のB-H曲線

透磁率

材料タイプ

軟磁性材料 永久磁石 着磁材料 永久磁石(不可逆減磁考慮)

軟磁性材料(マイナーループ使用) 着磁結果引用 永久磁石(不可逆減磁結果の減磁率反映)

磁化特性タイプ

① 線形(一定値) ② B-Hカーブ

異方性

等方 異方

周波数依存

なし あり

温度依存性

なし あり

比透磁率

①

B-Hカーブテーブル

No.	磁界	磁束密度
0.	0.0	0.0
1	58	0.42
2	90	0.8
3	180	1.19
4	360	1.37
5	1100	1.48
6	2000	1.55
7	3000	1.608
8	11000	1.81
9	20000	1.91
10		
11		
12		
13		
14		
15		
16		
17		
18		
19		
20		

行の挿入(I) 行の削除(D) インポート(M) グラフ(G)

内挿方法

直線補間 アキマ法補間

外挿方法

真空の透磁率 最終2点のな配 2次曲線

単位 A/m T

OK キャンセル ヘルプ(H)



硬磁性材料（永久磁石）の入力方法

透磁率タブの材料タイプで[永久磁石]にチェックを入れ、以下のように入力します。

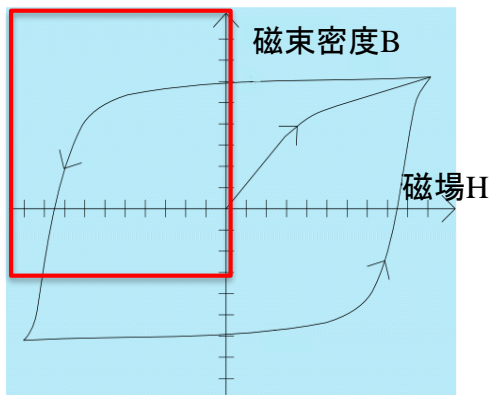
①短時間で解析したい場合

[磁化の強さ] (残留磁束密度) と [比透磁率] (リコイル比透磁率) を入力します。

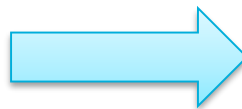
②精度よく解析したい場合 (計算時間は長い)

材料のB-H曲線 (磁気ヒステリシス曲線) のデータを [非線形テーブル] に入力します。

通常は減磁曲線 (第二～三象限) のデータを入力します。B-H曲線データは、材料メーカーのHPなどから入手できます。



永久磁石のB-H曲線



透磁率

材料タイプ

軟磁性材料 永久磁石 着磁材料 永久磁石 (不可逆減磁考慮)

軟磁性材料 (マイナーループ使用) 着磁結果引用 永久磁石 (不可逆減磁結果の減磁率反映)

磁化特性タイプ

① 線形 (一定値)

② B-Hカーブ ...

M-Hカーブ ...

磁化の強さ (残留磁束密度) T

比透磁率

① T

※磁化の方向は [ボディ属性] の [方向] タブで指定して下さい

No.	磁界	磁束密度
1	-5.25	1.16
2	-4.5	1.2
3	0	1.25
4	1.5	1.3
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14		
15		
16		
17		

単位 kA/m T

②

OK キャンセル ヘルプ(H)

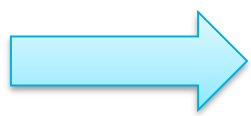
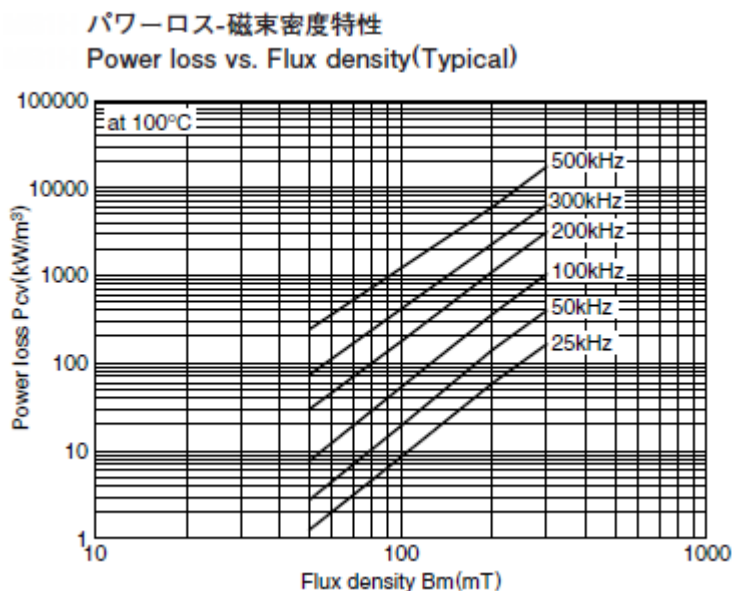
鉄損特性の入力方法

鉄損特性の設定には2種類の方法があります。

①鉄損テーブル

鉄損を磁束密度と損失密度のテーブルから算出します。

周波数毎に磁束密度と損失密度の関係をを入力します。データは、材料メーカーのHPなどから入手できます。



鉄損

鉄損の特性定義タイプ

- ジュール損のみ (電流分布から計算)
- 鉄損テーブル
- 鉄損経験式

計算手法(磁束密度の参照)

- 振幅値(変化幅/2)
- 最大値
- 周波数分析(FFT)

※基本周波数は解析条件の磁場解析タブで設定

テーブル追加

周波数 Hz

テーブル編集、確認

周波数 [Hz]

非線形テーブルの編集

No.	磁束密度	損失密度
1	50	5
2	500	500
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14		
15		
16		
17		

単位 mT [kW/m³]

鉄損特性の入力方法

②鉄損経験式

鉄損を磁束密度と周波数からなる経験式を使用して算出します。
経験式の係数を入力します。

$$W_h = K_h B^{\alpha} f^{\beta}$$

$$W_e = K_e B^{\gamma} f^{\delta}$$

Wh: ヒステリシス損失密度 [W/m³]

We: ジュール損失密度 [W/m³]

B: 磁束密度 [T]

f: 周波数 [Hz]

鉄損

鉄損の特性定義タイプ

ジュール損のみ
(電流分布から計算)

鉄損テーブル

鉄損経験式

計算手法(磁束密度の参照)

振幅値(変化幅/2)

最大値

周波数分析(FFT)

※基本周波数は解析条件の磁場解析タブで設定

ヒステリシス損

Kh

α

β

ジュール損

Ke

γ

δ

鉄損特性の入力方法

鉄損の計算手法と基本周波数

①鉄損テーブル、②鉄損経験式に共通の設定として、計算手法と基本周波数があります。

鉄損

鉄損の特性定義タイプ

ジュール損のみ
(電流分布から計算)

鉄損テーブル

鉄損経験式

計算手法(磁束密度の参照)

振幅値(変化幅/2)

最大値

周波数分析(FFT)

※基本周波数は解析条件の磁場解析タブで設定

テーブル追加

周波数 Hz

解析条件の磁場解析タブ

基本周波数(1周期、鉄損計算で利用)

電源の周波数

周波数を指定

周波数 [Hz]

極数、回転数から計算

極数

回転数 [r/min]

<鉄損の計算手法>

- ・入力電流が正弦波の場合
[振幅値]を選択
- ・入力電流が三角波や矩形波等の場合と
高調波の損失を考慮したい場合
[周波数分析(FFT)]を選択
※過渡解析が必要

<基本周波数>

原則、[電源の周波数]が良い。
入力電流が任意波形の場合は、任意波形テーブルの定義時刻範囲から周波数が決定される。

DC電源の場合や、自身で明示的に設定したい場合は、[周波数を指定]や[極数、回転数から計算]を利用する。

ボディ属性

ボディ属性とは、材料定数以外のボディに与える条件のことです。
磁場解析で設定できるボディ属性は3種類あります。

厚み/幅

奥行き方向の厚み

指定方法

- 解析空間での設定値を使う
 ボディ属性毎に指定する

1.0 X10 [mm]

0

ワイヤボディの幅

1.0 X10 [mm]

-3

厚み/幅

方向

方向タイプ

- ベクトル 円中心方向 (ラジアル) 極異方
 オイラー角 円周方向 ハルツァハ

z方向ベクトル

X 0

Y 0

Z 1

- 2本のベクトルを入力し3方向を指定する

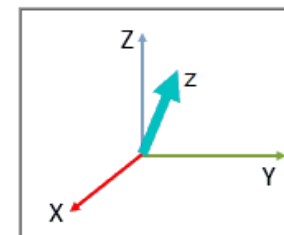
x方向ベクトル

X 0.0

Y 0.0

Z 0.0

XYZはモデルウィンドウの座標系です。
xyzは材料定数の座標系です。



- 分布取込

z方向ベクトル分布取込

x方向ベクトル分布取込

方向

ボディ属性

電流

波形 <input type="radio"/> 一定 <input checked="" type="radio"/> 交流 (cos波) <input type="radio"/> 任意波形 ... <input type="radio"/> 外部回路連成 回路図上のコイル名 U1	値 電流値 (振幅) 0.1 A 周波数 50 kHz 位相 0.0 [deg] 巻数 100 [Turn]	方向 <input checked="" type="radio"/> ループコイル/磁場方向指定 <input type="radio"/> 流入面指定 <input type="radio"/> 流入出面指定 <input type="radio"/> 流入出面指定(内部) ※流入出面が空気の内部に存在 <input type="radio"/> 境界条件指定 磁場方向ベクトル X 0.0 Y 0.0 Z 1.0
---	---	--

オプション

<input type="checkbox"/> 与える電流の分布を均一にする (巻数 > 1Turn の場合に使用検討)	
誘導電流 <input checked="" type="radio"/> あり <input type="radio"/> なし	誘導電流の流入出 <input checked="" type="radio"/> Open <input type="radio"/> Short

電流

ボディ属性:方向

磁石の磁化方向の設定に使用します。

方向

方向タイプ

- ベクトル
 円中心方向 (ラジアル)
 極異方
 オイラー角
 円周方向
 ハルバツハ

Z方向ベクトル

X

Y

Z

- 2本のベクトルを入力し3方向を指定する

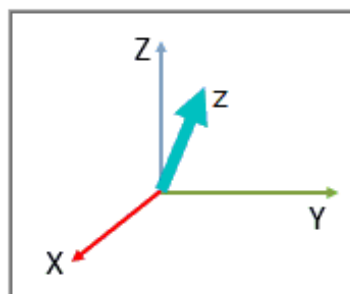
X方向ベクトル

X

Y

Z

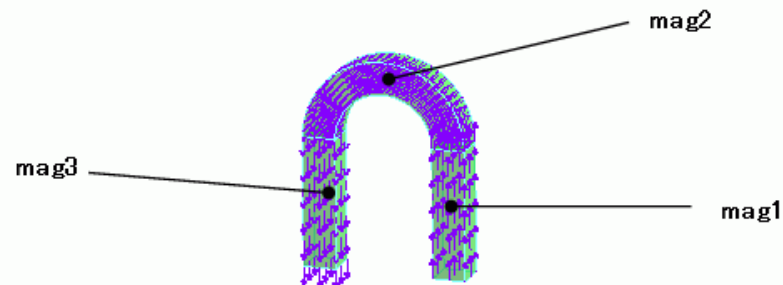
XYZ はモデルウィンドウの座標系です。
xyz は材料定数の座標系です。



- 分布取込

z 方向ベクトル分布取込

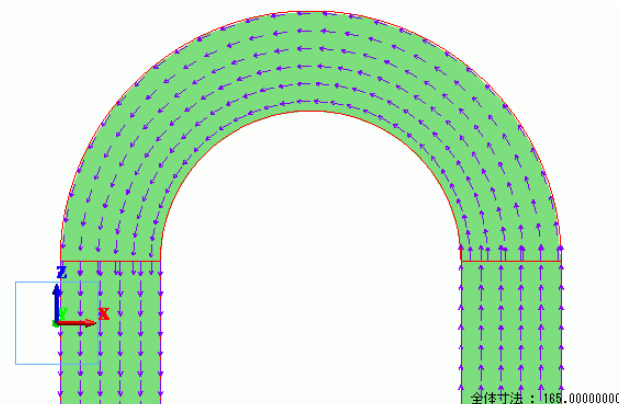
x 方向ベクトル分布取込



U字磁石を構成する各ボディ属性(mag1~mag3)の磁化の方向を以下のように設定しています。

ボディ属性名	タブ	設定項目	条件
mag1	方向	方向タイプ	ベクトル
		ベクトル	X=0, Y=0, Z=1
mag2	方向	方向タイプ	回転方向
		中心軸上の座標	X=0, Y=0.005, Z=0.04
		中心軸のベクトル向き	X=0, Y=1, Z=0 左回り
mag3	方向	方向タイプ	ベクトル
		ベクトル	X=0, Y=0, Z=-1

この設定により、各ボディにおける磁化の方向は以下の矢印の示す方向となっています。



U字磁石の場合の設定

ボディ属性:電流

ボディに印可する電流値や電流方向を設定します。

電流

波形 <input type="radio"/> 一定 <input checked="" type="radio"/> 交流 (cos波) <input type="radio"/> 任意波形 ... <input type="radio"/> 外部回路連成 回路図上のコイル名 U1	値 電流値 (振幅) 0.1 A 周波数 50 kHz 位相 0.0 [deg] 巻数 100 [Turn]	方向 <input checked="" type="radio"/> ループコイル/磁場方向指定 <input type="radio"/> 流入面指定 <input type="radio"/> 流入出面指定 <input type="radio"/> 流入出面指定(内部) ※流入出面が空気の内部に存在 <input type="radio"/> 境界条件指定 磁場方向ベクトル X 0.0 Y 0.0 Z 1.0
---	---	--

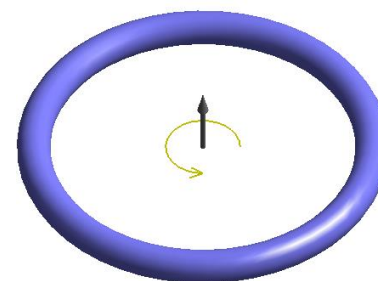
オプション

与える電流の分布を均一にする (巻数 > 1Turn の場合に使用検討)

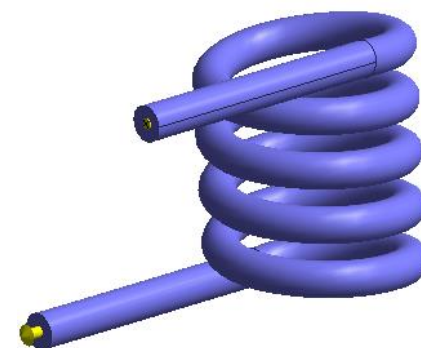
誘導電流 <input checked="" type="radio"/> あり <input type="radio"/> なし	誘導電流の流入出 <input checked="" type="radio"/> Open <input type="radio"/> Short
--	---

＜方向の設定＞

- ・ループコイルの場合
磁場方向ベクトルを設定します。

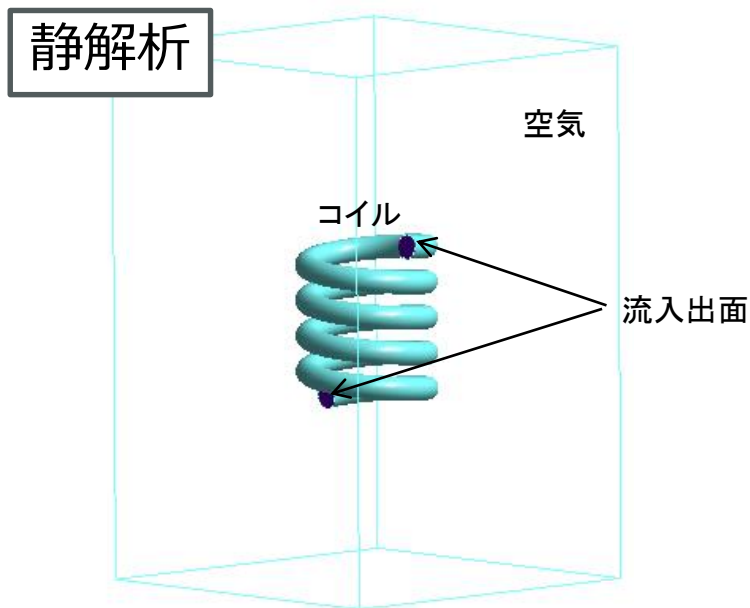


- ・それ以外の場合
流入出面を選択します。

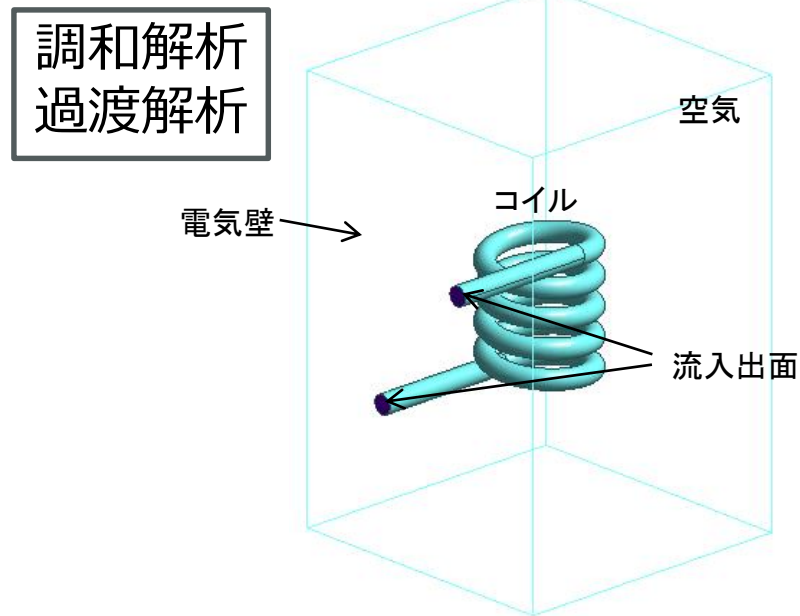


ボディ属性：電流

流入出面の位置には以下のルールがあります。



流入出面が空気内部にあっても良いです。

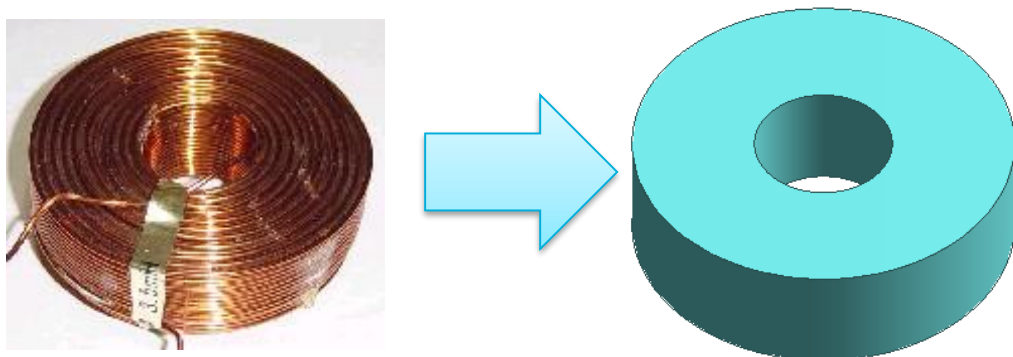


流入出面は空気外部に引き出す必要があります。
外部境界条件は電気壁に設定する必要があります。
(流入出面が互いに電氣的に接続されている状態)

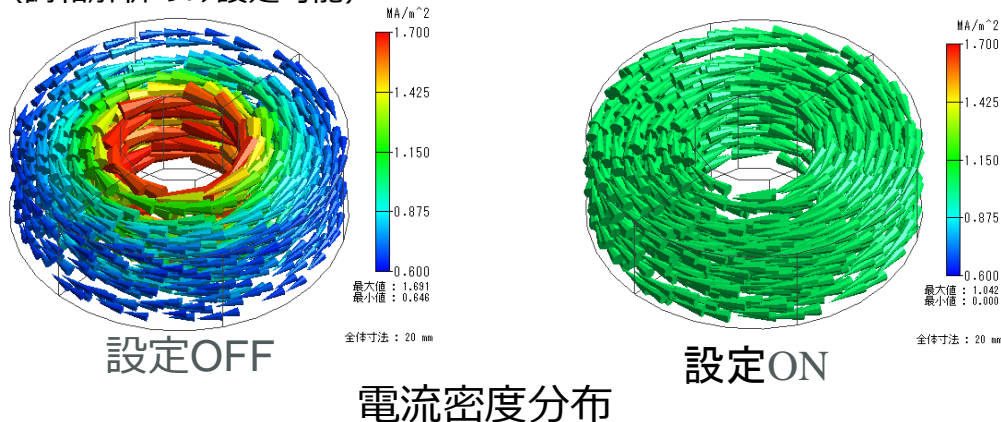
※ループコイルの場合は引き出す必要はありません。

多巻きコイルの解析

多巻きコイルの解析では、ボディ形状が複雑になり計算負荷が大きくなるため、Femtetではコイル領域を塊状として巻数を設定する機能（通称バルクコイル）を備えています。



バルクコイルでは電流密度分布が内側に偏るという特徴があります。スパイラルコイルなど、現実とかい離する場合は、[与える電流の分布を均一にする]の設定を有効にします。（調和解析のみ設定可能）



電流

波形

- 一定
- 交流 (cos波)
- 任意波形
- 外部回路連成

回路図上のコイル名: U1

値

電流値 (振幅): 0.1 A

位相: 0.0 [deg]

巻数: 100 [Turn]

オプション

与える電流の分布を均一にする (巻数 > 1Turn の場合に使用検討)

誘導電流

- あり
- なし

誘導電流の流入出

- Open
- Short

直流重畳解析における交流電流値を指定する

接続されているコイルを結び、ループコイルを形成する

境界条件の分類

境界条件は大きく3つに分けられます。

外部境界条件

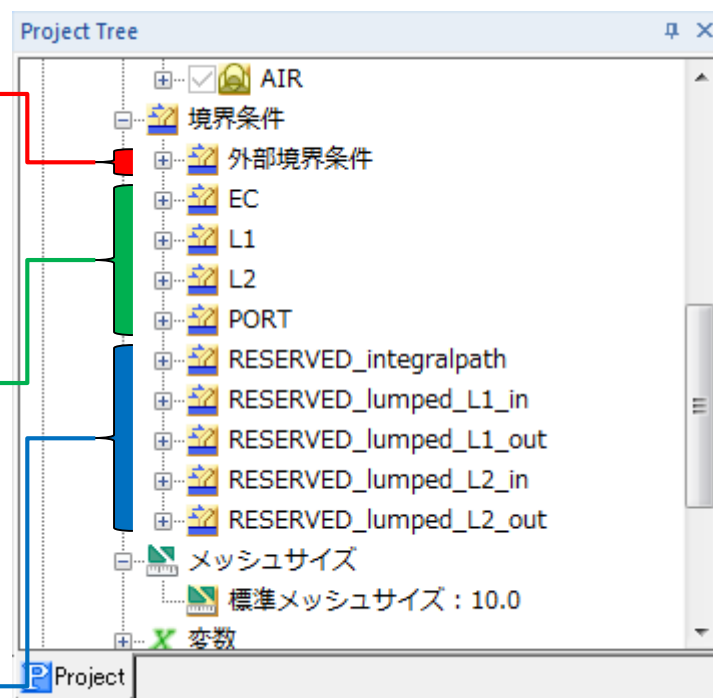
解析実行時にモデルの一番外側に設定されます。
外部境界条件の種類はユーザが選択できます。

ユーザが設定する境界条件

ユーザが必要な部分に設定します。
外部境界条件と重なるときはこちらが優先されます。
種類と境界条件名はユーザが設定できます。

Femtet が設定する境界条件

解析実行時に Femtet が自動で設定します。
解析結果画面のみで表示されます。
"RESERVED_" で始まる境界条件名が付けられます。



境界条件の種類

磁場解析で使える**境界条件**は6種類あります。

電気

境界条件の種類

- 電気壁
- 開放境界
- 磁気壁
- めっき壁
- 表面インピーダンス
- 入出力ポート
- 積分路
- 集中定数
- 多層電極

- **電気壁**
磁界ベクトルが平行になる境界
- **開放境界**
磁界が自然に広がる境界
- **磁気壁**
磁界ベクトルが垂直になる境界
- **入出力ポート**
電磁波の出入り口となる境界
- **積分路**
電流を積分して起電力を計算する境界
- **対称面**
対称モデルの対称面に設定する境界

入出力ポートはほとんど使いません。
それ以外の5つをご紹介します。

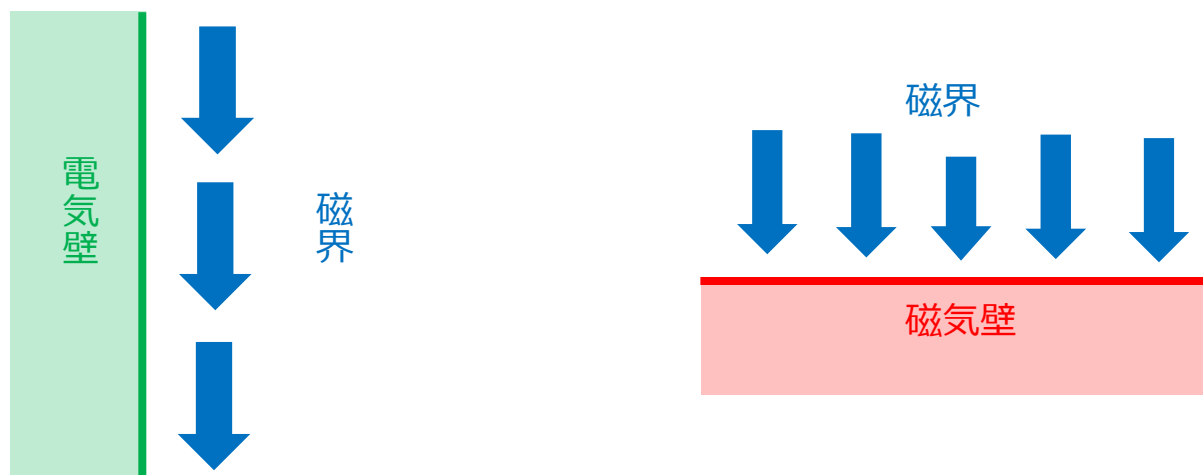
境界条件：電気壁と磁気壁

磁界は、**電気壁に対して平行に、磁気壁に対して垂直**になります。

磁気壁は、主に外部磁場印加時に利用します。

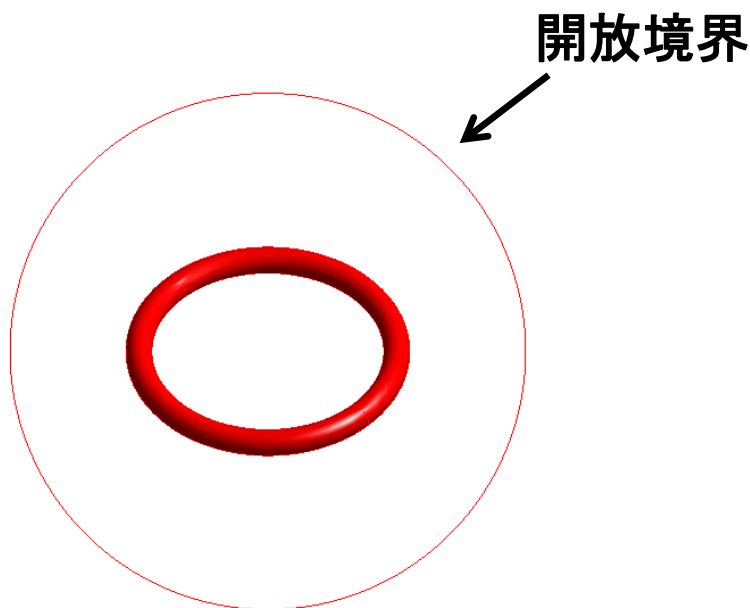
電気壁は、**導体で囲まれた解析空間**を表現できます。

磁場解析の外部境界条件のデフォルトは電気壁です。



境界条件：開放境界

磁界が解析領域外に自然に広がる境界条件です。
磁界の指向性解析時に使用します。



磁界指向性解析(近傍界放射)

開放境界

種類

無限要素

吸収境界

PML(完全整合層)

吸収境界(低周波)

原点座標

X

Y mm

Z

吸収境界の次元

1次 2次

ソルバ固有の設定

現在のお使いのソルバでは固有の設定はありません

PML層の設定

PML厚み [波長] 圧電解析用の設定

注意

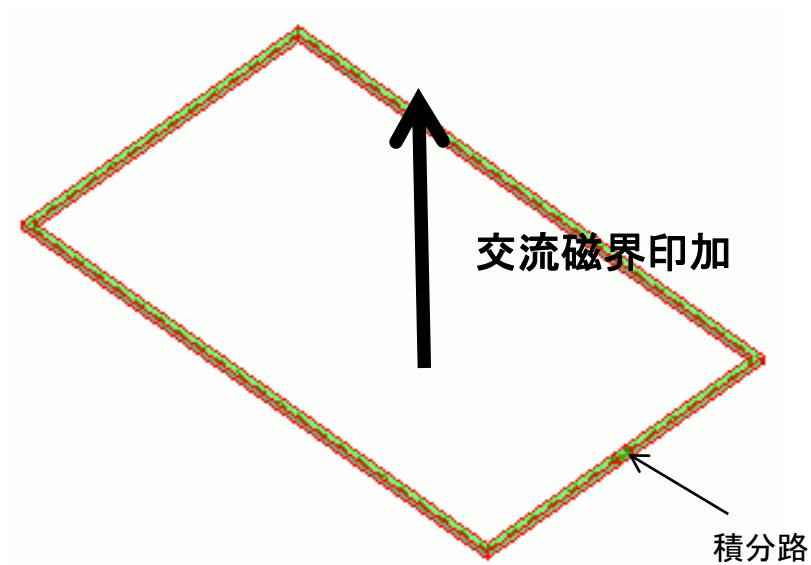
このタブで設定された開放境界を用いるには、モデル上に「開放境界」の境界条件を設定してください。PML以外であれば、外部境界条件に指定する事もできます。

<使用上の注意>

- ・解析条件設定で原点座標を設定する必要がある
- ・開放境界は球面上にのみ設定可能

境界条件：積分路

誘導起電力の計算を行いたい場合に設定します。
調和解析で利用可能です。



受信コイルの起電力 (NFC)

テーブル			
磁界エネルギー[J]	Q値	起電力[V]	ジュール損 Pe[W]
		実部	虚部
Integral		2.73848515e-005	3.35324547e-001

受信コイルの起電力や、無線電力
伝送の解析などで使用します。

境界条件:対称面

対称モデルの対称面に設定する境界条件です。

対称/不連続

対称

対称面

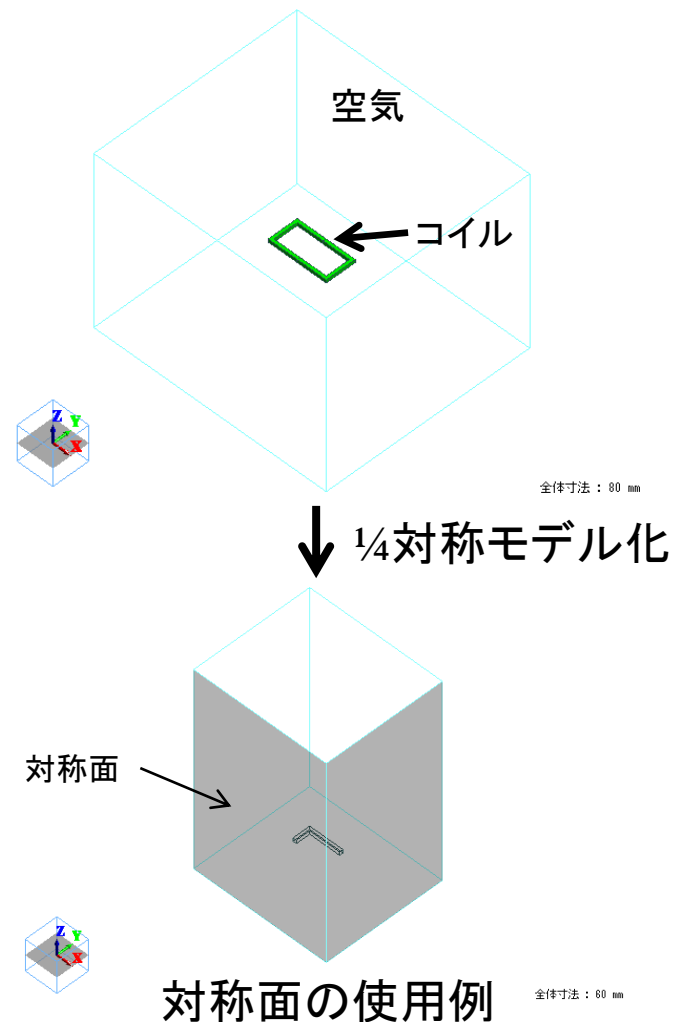
周期的

不連続

不連続

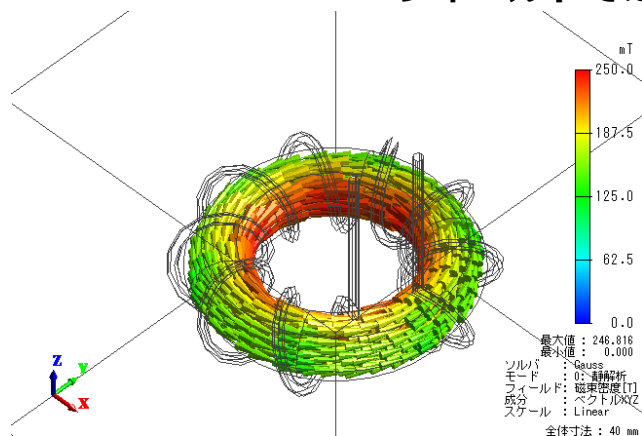
<使用上の注意>

- ・対称面は、電気壁として扱われます。
切断面に対して磁界が水平方向となる場合のみ
利用可能です。



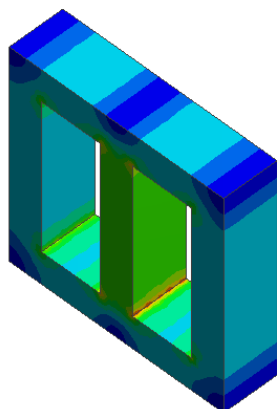
計算結果:フィールド

フィールドでは電磁界などが視覚的に表示されます

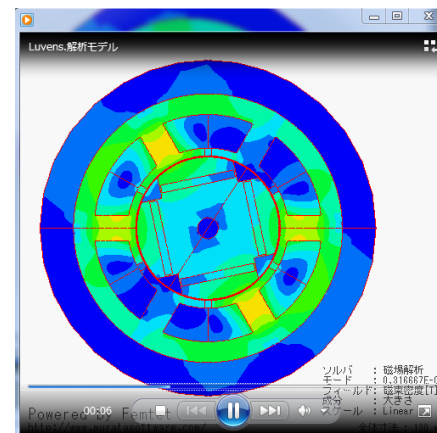


磁束密度のベクトル表示

- 磁界、磁束密度、電流密度などベクトル量のベクトル表示
- 各種損失密度などスカラー量・各種ベクトル量の大きさのコンター図表示
- グラフ表示
- アニメーションの作成



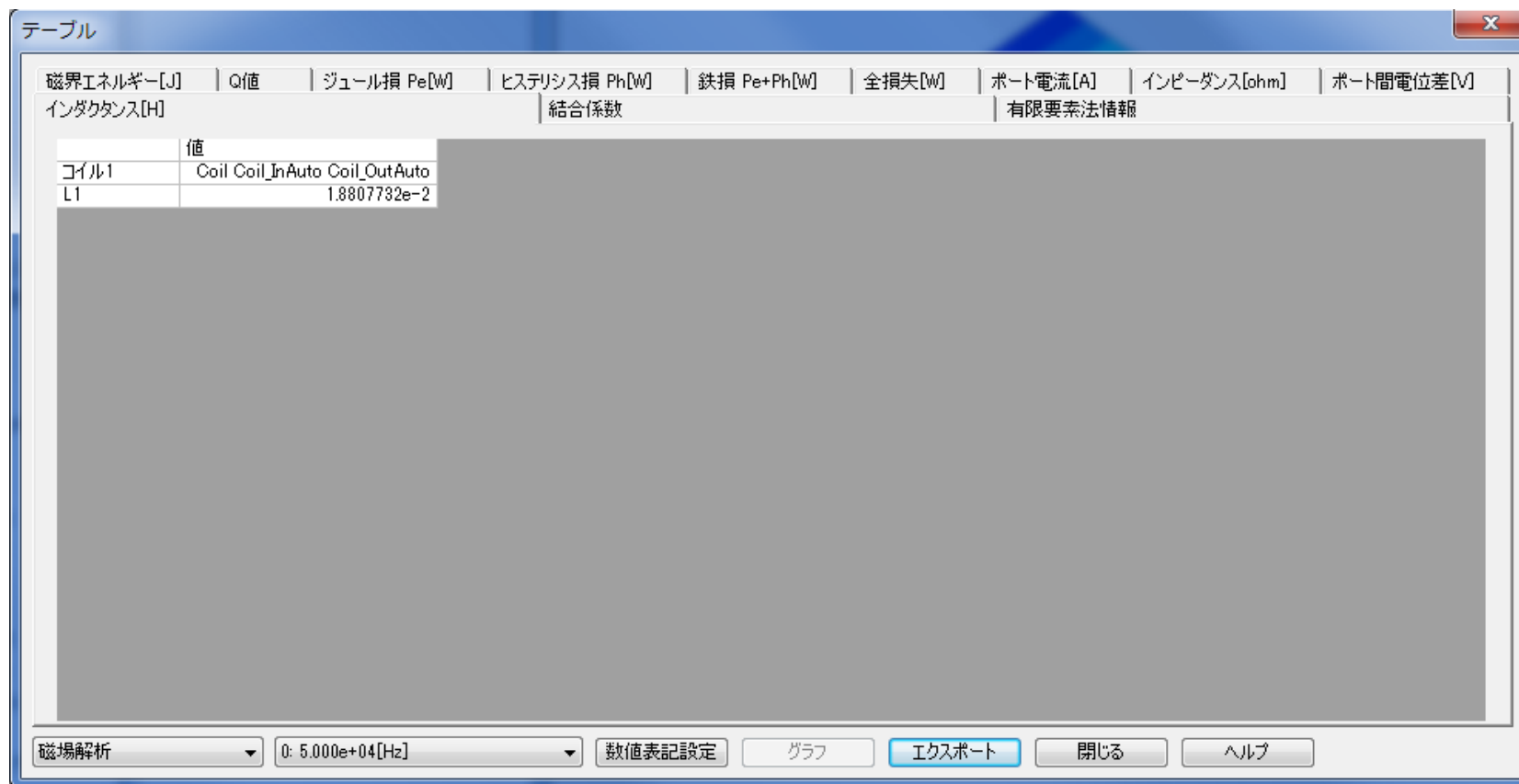
コンター図による損失密度表示



アニメーション

計算結果：テーブル

テーブルでは主な計算結果の値を確認できます

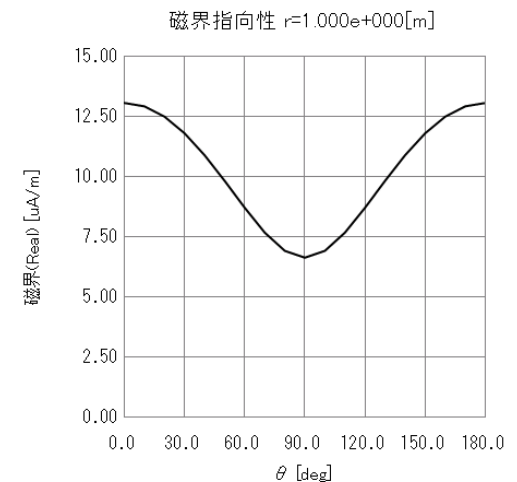
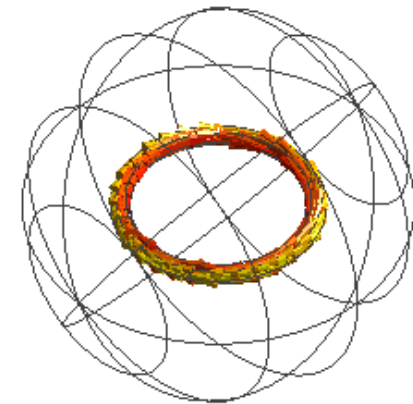
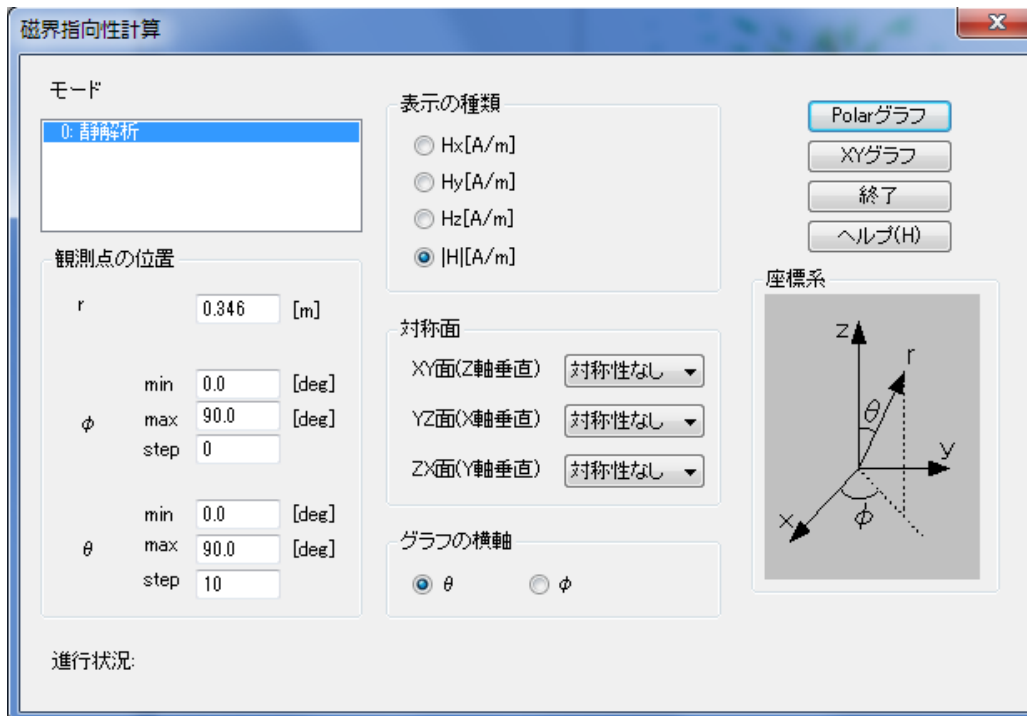


磁界エネルギー[J]	Q値	ジュール損 Pe[W]	ヒステリシス損 Ph[W]	鉄損 Pe+Ph[W]	全損失[W]	ポート電流[A]	インピーダンス[ohm]	ポート間電位差[V]
インダクタンス[H]	結合係数		有限要素法情報					
	値							
コイル1	Coil	Coil_InAuto	Coil_OutAuto					
L1		1.8807732e-2						

インダクタンス、トルク、各種損失量などが表示されます。

計算結果:指向性

指定した距離での磁界の指向性を表示できます。



1. 磁場解析の概要

2. 磁場解析の機能・設定の紹介

3. 磁場解析のポイント

- 解析精度の向上と計算の高速化
- 線形解析と非線形解析
- 調和解析
- 損失と磁場熱連成解析
- 電場解析機能による浮遊容量計算

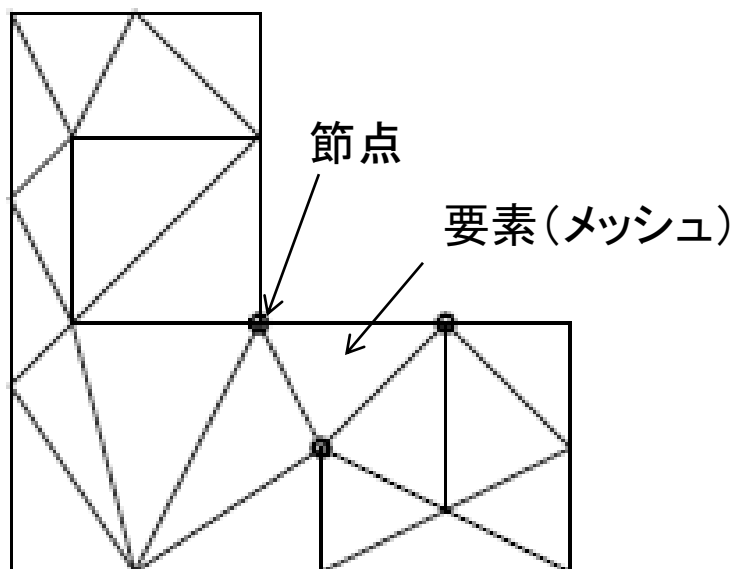
- ・メッシュ
- ・空気サイズ
- ・対称モデル

有限要素法とは

構造解析、電磁界解析、流体解析など広範囲な分野で利用されている
もっとも著名な数値解析手法の一つです。

解析領域を有限個の要素と呼ばれる小領域に分割して解く事から、
有限要素法の名前がついています。

Femtetではこの有限要素法を使用しています。



解析領域の分割

要素の種類

[解析条件の設定] の [メッシュ] タブから1次要素と2次要素を選択できます。

メッシュ

メッシュ設定

メッシュ作成方法

自動メッシュ

半自動メッシュ(マップメッシュ)

手動メッシュ

メッシュサイズ

標準メッシュサイズを自動的に決定する

標準メッシュサイズ [mm]

要素の種類

4面体

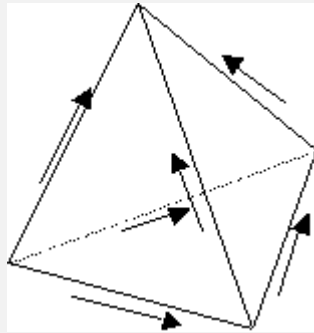
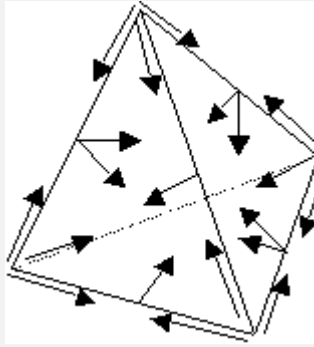
6面体(開発中)

ボディ表面のメッシュが正三角形となるよう作成する

要素の次数

1次要素 (時間重視)

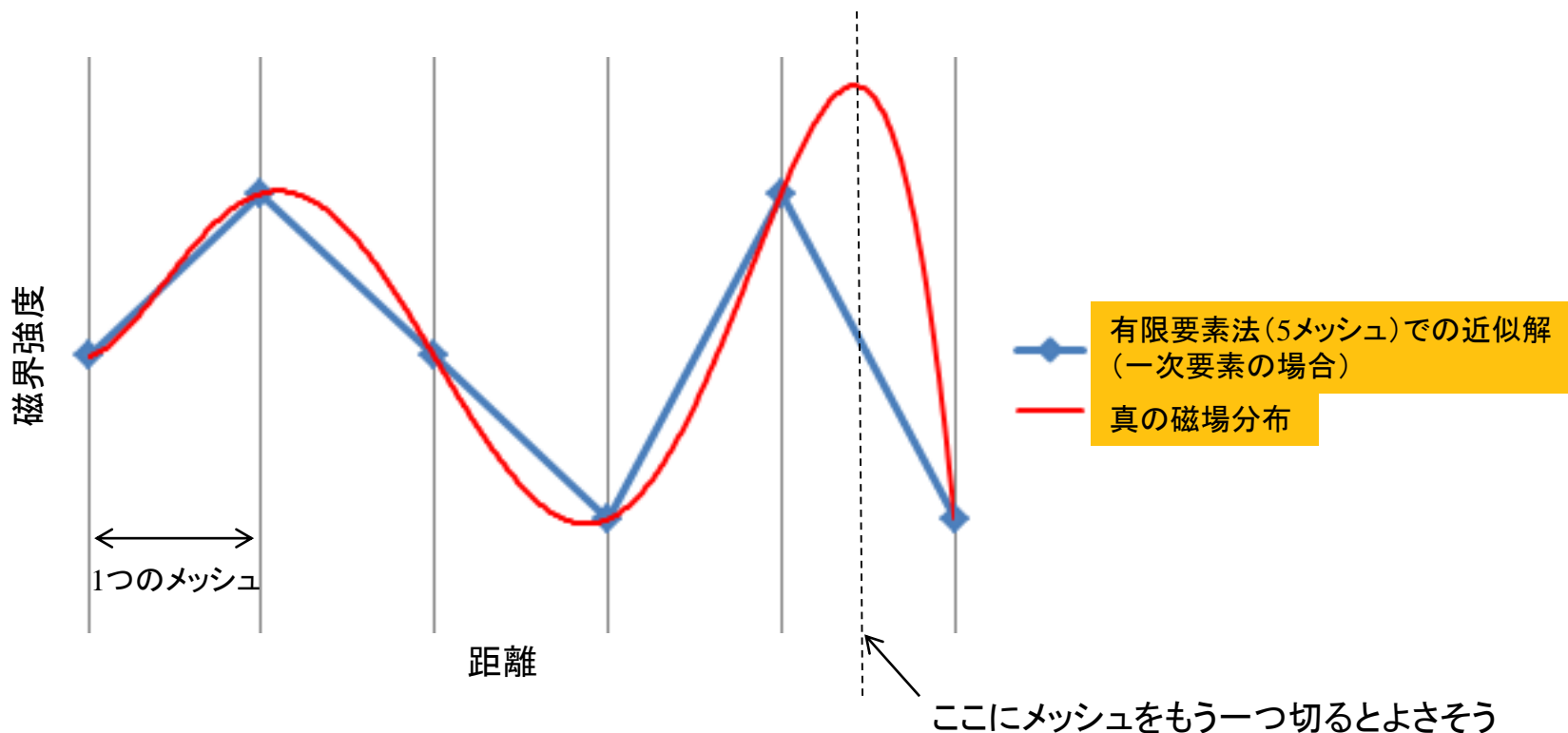
2次要素 (精度重視)

要素の種類	未知数の位置	計算時間	計算精度
1次要素		短い	低い
2次要素		長い	高い

(↖: 未知数)

メッシュサイズ

メッシュを細かくすると、計算の精度が向上し真値に漸近します。
磁場の変化が激しい所を細かくする必要があります。
磁場の変化がなだらかな所は、逆に粗くすることで解析時間が短縮できます。



一次元での例

メッシュサイズの設定方法

標準メッシュサイズの設定



メッシュ

メッシュ設定

メッシュ作成方法

- 自動メッシュ
- 半自動メッシュ(マップドメッシュ)
- 手動メッシュ

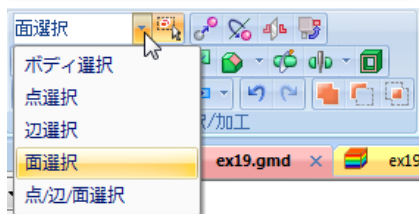
メッシュサイズ

標準メッシュサイズを自動的に決定する

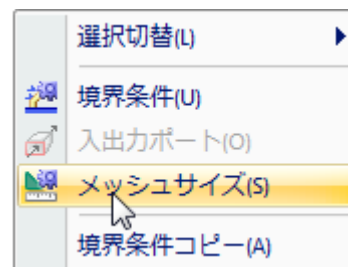
標準メッシュサイズ [mm]

部分的にメッシュサイズを設定 (任意のボディ/面/辺/点へのメッシュサイズの設定)

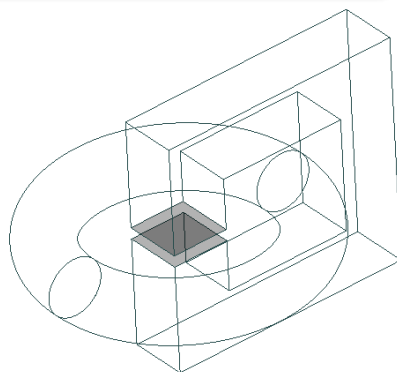
① 選択モード切替



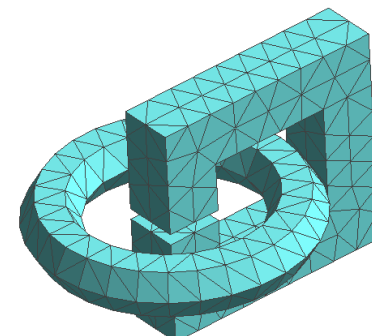
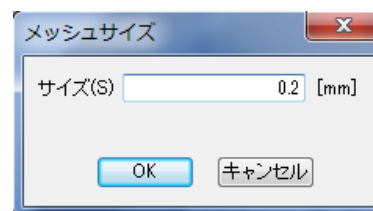
③ 右クリック



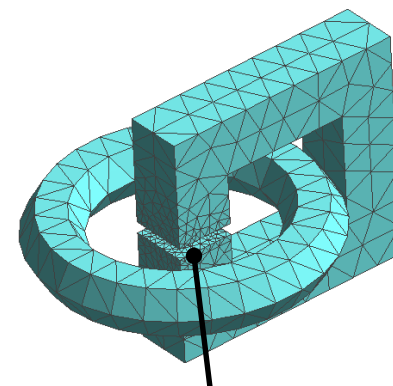
② 対象の選択



④ サイズ入力



元のメッシュ



指定した面を
細かく分割

空気のサイズ

磁場が十分小さくなる所まで空気のボディが存在している必要があります。

空気領域の自動的作成設定（デフォルトはONでスケールは3）

メッシュ

メッシュ設定

メッシュ作成方法

- 自動メッシュ
- 半自動メッシュ(マップドメッシュ)
- 手動メッシュ

メッシュサイズ

標準メッシュサイズを自動的に決定する

標準メッシュサイズ [mm]

メッシュのコントロール

アダプティブメッシュ

アダプティブメッシュを使用する

空気領域自動作成

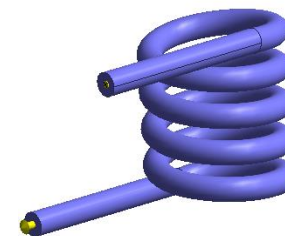
- 空気領域を自動作成する

空気領域のスケール モデル長 x

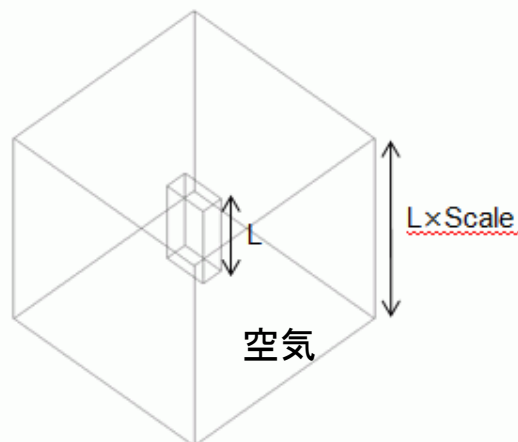
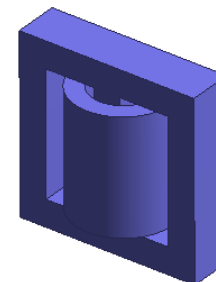
- 空気領域のメッシュサイズを自動的に決定する

空気領域のメッシュサイズ [mm]

開磁路のモデルの場合
スケールは最低2以上は必要です。

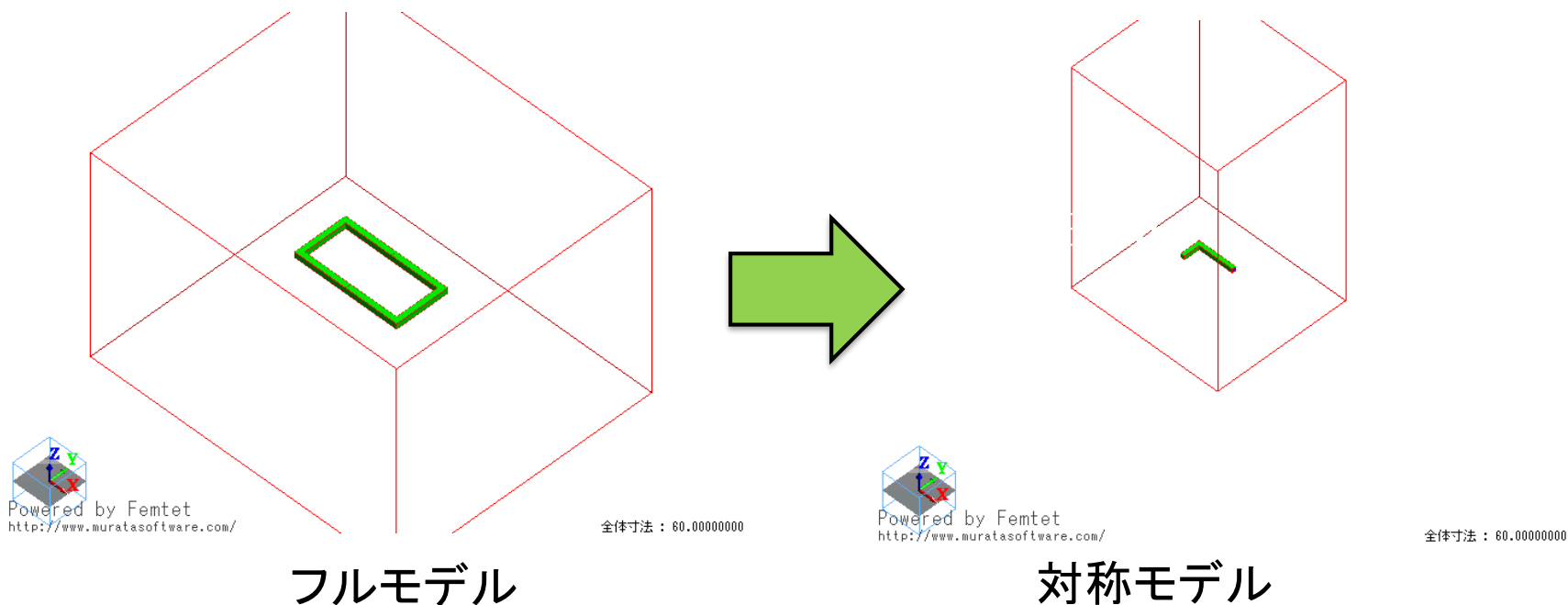


閉磁路のモデルの場合
(磁界が磁性体コアに集中し漏れない)
スケールは1.2倍程度で十分です。



対称モデル

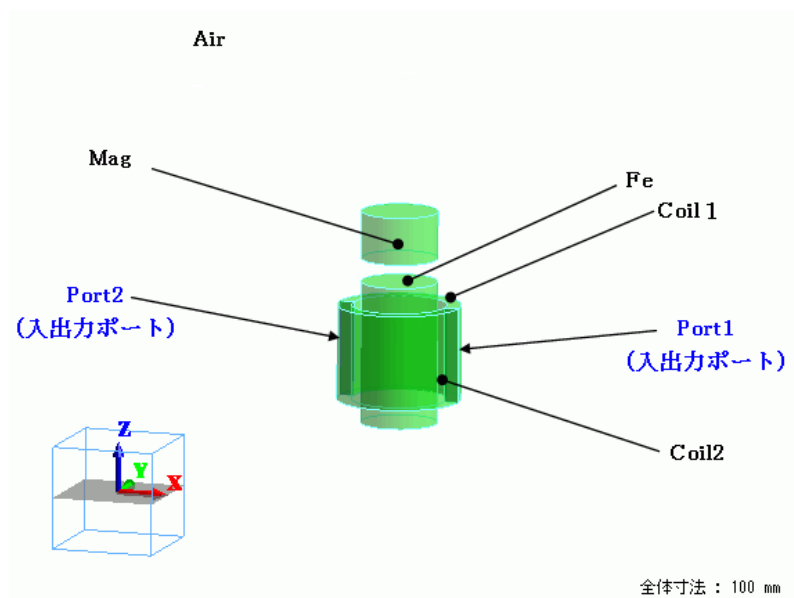
解析モデルの形状（属性含む）に対称性がある場合、
モデルを対称面でカットした対称モデルで解析することができます。



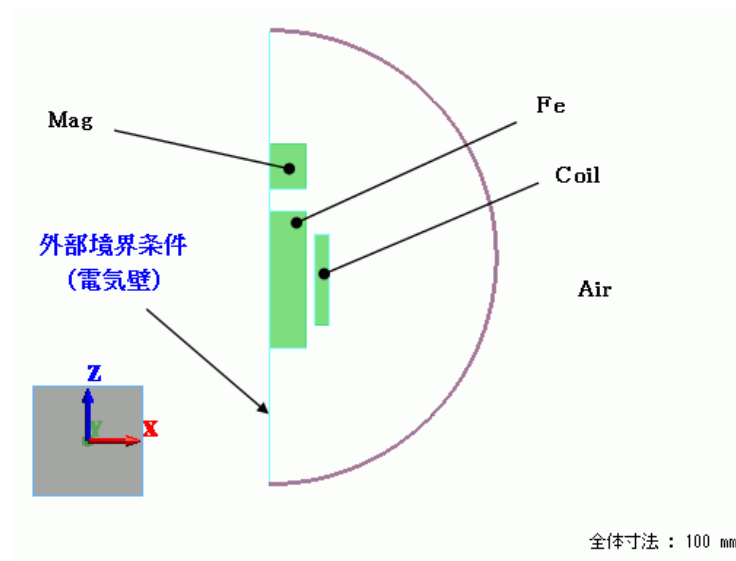
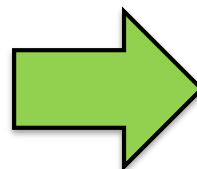
要素数を低減して計算コスト(時間やメモリ量)を大幅に低減することができます。

2次元軸対称モデル

解析モデルの形状(属性含む)に軸対称性がある場合、2次元軸対称で解析することでさらに計算時間を短縮可能です。



フルモデル

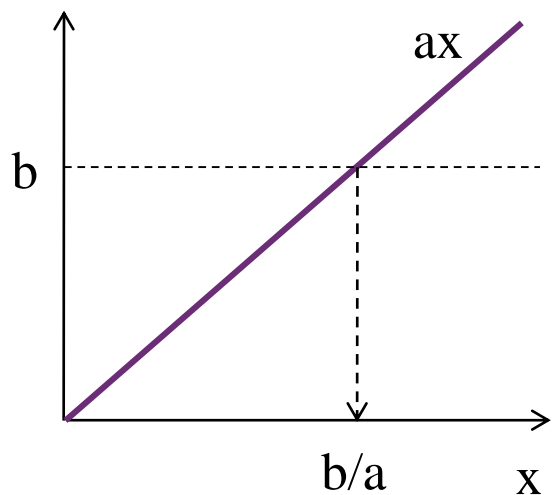


軸対称モデル

- ・線形と非線形解析
- ・磁場解析での非線形解析

線形方程式

$$ax = b \quad a, b \text{ は定数}$$

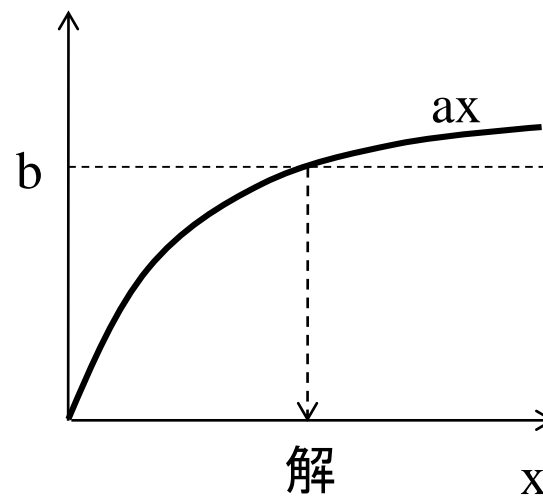


- ・線形方程式は一回の演算で解けます

計算量→小

非線形方程式

$$ax = b \quad a \text{ や } b \text{ が } x \text{ によって変化}$$



- ・非線形方程式は一回の演算で解けません
- ・反復計算(ニュートンラフソン法)で解きます
- ・場合によっては解けないケースもあります

計算量→大

磁場解析での非線形解析

透磁率

材料タイプ

軟磁性材料 永久磁石 着磁材料 永久磁石 (不可逆減磁考慮)
 軟磁性材料 (マイナーループ使用) 着磁結果引用 永久磁石 (不可逆減磁結果の減磁率反映)

磁化特性タイプ 異方性 周波数依存 温度依存性

線形(一定値) 等方 なし なし
 B-Hカーブ 異方 あり あり

[...] ボタンでデータを設定して下さい

透磁率

材料タイプ

軟磁性材料 永久磁石 着磁材料 永久磁石 (不可逆減磁考慮)
 軟磁性材料 (マイナーループ使用) 着磁結果引用 永久磁石 (不可逆減磁結果の減磁率反映)

磁化特性タイプ

線形(一定値) **B-Hカーブ** M-Hカーブ

磁化の強さ(残留磁束密度) 比透磁率

0.0 T 1.0

※磁化の方向は[ボディ属性]の[方向]タブで指定して下さい

材料（透磁率もしくは磁石）の磁化特性タイプで
B-Hカーブ（もしくは**M-Hカーブ**）が選択されると**非線形解析**となります。

非線形計算が収束しないときは

1. B-Hカーブの曲線が測定誤差などによりガタガタになっている(一意に増加していない)箇所がないか調べ、なめらかになるよう修正します。
2. [解析条件の設定] – [高度な設定]で以下の値を変更します。
 - 2-1. [加速/減速係数を自動で補正する]をOFFにし、
[加速/減速係数]に0.5、0.1といった1より小さい値を設定してみる
 - 2-2. 最大反復回数を増やしてみる



高度な設定

各種設定

非線形解析の設定 ...

固有値計算の設定 ...

応力解析/圧電解析の設定 ...

表面間輻射の設定 ...

熱伝導解析の設定 ...



非線形解析の設定

収束判定設定

最大反復回数

100

加速/減速係数

1.0

加速/減速係数を自動で補正する

-4

収束判定

1.0

X10

収束判定(絶対誤差)

1.0

X10

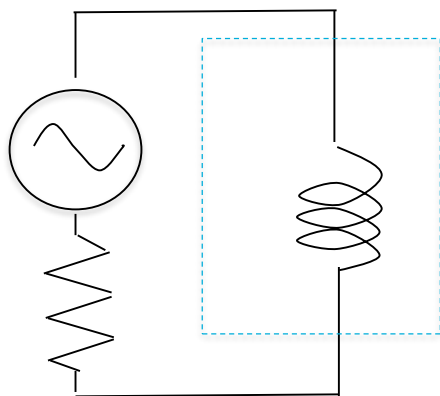
-15

- ・解析可能な周波数の範囲
- ・調和解析でのインダクタンス
- ・表皮効果とは
- ・調和解析での導体の扱い

解析可能な周波数の範囲

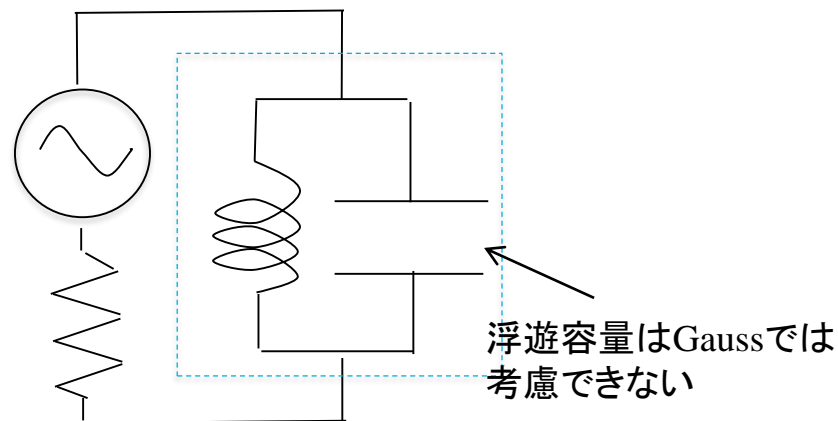
コイルの例

周波数が低い時



磁場解析(Gauss)で計算可能

周波数が高くなると

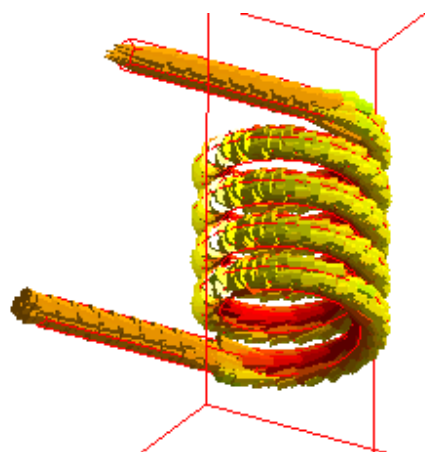


磁場解析(Gauss)で計算不可能
→電磁波解析(Hertz)で計算可能

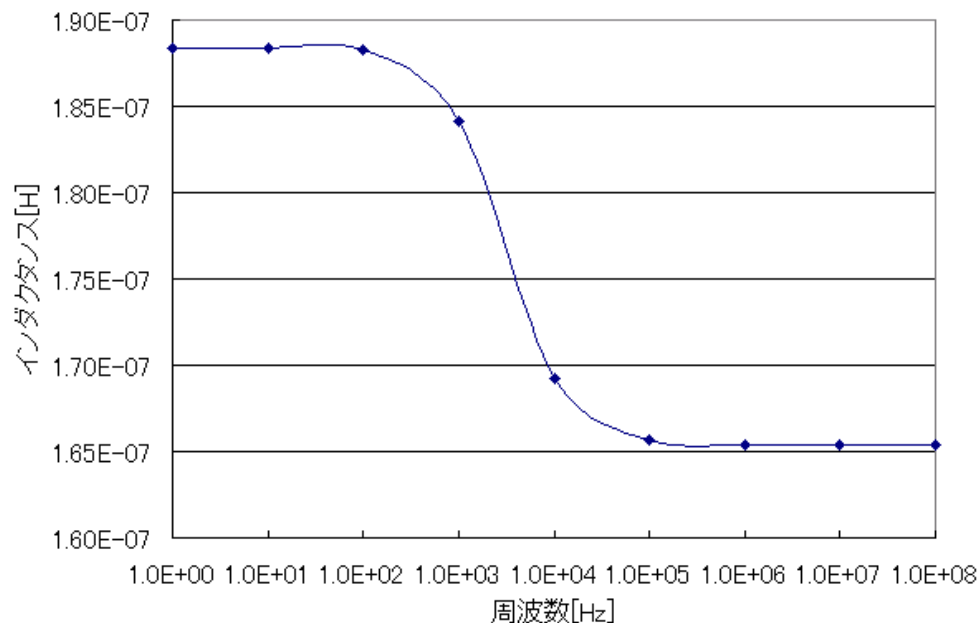
磁場解析(Gauss)の計算可能周波数(目安)
モデルサイズが波長の1/10以下くらいまで

周波数によるインダクタンス

周波数によりインダクタンスは変化します。
以下は調和解析で解析した例です。



コイルの断面直径:4mm



周波数が高くなるにしたがい、
インダクタンス値は小さくなります。
この現象は表皮効果によるものです。

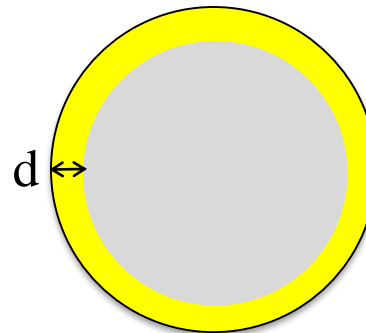
表皮効果とは

周波数が高くなると磁場は金属の表面のみにしか侵入できません。
この現象のことを**表皮効果**といい、侵入できる距離を**表皮厚み**といいます。

表皮厚みは、次式で計算されます。

$$d = \sqrt{\frac{2}{\sigma\omega\mu}}$$

σ = 導体の導電率
 ω = 電流の角周波数 = $2\pi f$
 μ = 導体の透磁率



導体の断面図
黄色が磁場が侵入する部分

(参考)銅の表皮厚み

1Hz	65mm
1kHz	2.1mm
1MHz	65 μ m
1GHz	2.1 μ m

※正確には表皮厚みは、ある材質に入射した電磁界が $1/e$ ($\simeq 1/2.718 \simeq -8.7\text{dB}$) に減衰する距離である

- 表皮効果により、中心部分(灰色)の磁場が0に→磁場の総量が減る→インダクタンス減
- 表皮効果により、電流が流れる断面積が減る→抵抗増→損失増
- 表皮効果は渦電流(誘導電流)により発生する現象

表皮メッシュ機能

表皮効果を少ないメッシュ数で精度良く計算するための機能です。
調和解析、過渡解析で利用できます。



メッシュ

メッシュ設定

メッシュ作成方法

- 自動メッシュ
- 半自動メッシュ(マップドメッシュ)
- 手動メッシュ

メッシュサイズ

標準メッシュサイズを自動的に決定する

標準メッシュサイズ [mm]

要素の種類

- 4面体
- 6面体(開発中)
- ボディ表面のメッシュが正三角形となるよう作成する

要素の次数

- 1次要素 (時間重視)
- 2次要素 (精度重視)

メッシュのコントロール

アダプティブメッシュ

アダプティブメッシュを使用する

空気領域自動作成

空気領域を自動作成する

空気領域のスケール モデル長 x

空気領域のメッシュサイズを自動的に決定する

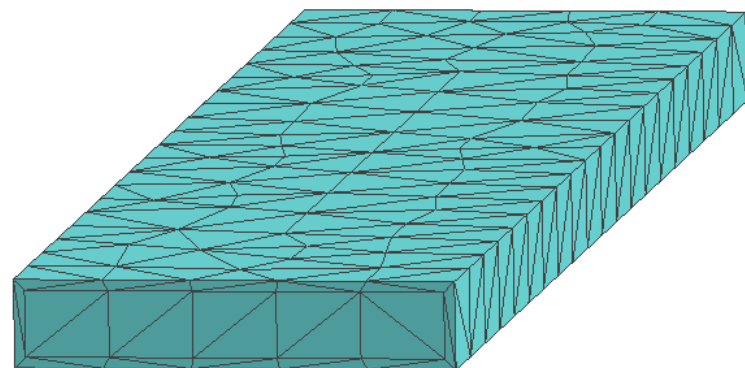
空気領域のメッシュサイズ [mm]

周波数依存メッシュの設定

参照周波数 MHz

導体表面処理タイプ (表皮厚みより厚い導体が対象)

- 表皮メッシュを生成する
- 表面インピーダンス境界を適用する
- 処理なし



導体表面に薄いメッシュが自動生成される

- 損失
- 磁場熱連成解析

損失

損失には一般的に以下のものが存在します。

銅損:コイルのジュール損

鉄損:コアのヒステリシス損+コアのジュール損(誘導電流損)

損失はいずれも熱エネルギーに変わります。

誘導電流損による熱を利用したものが誘導加熱(IH)です。

ポート電流[A]	インピーダンス[ohm]	ポート間電位差[V]	インダクタンス[H]	結合係数	有限要素法情報
磁界エネルギー[J]	Q値	ジュール損 Pe[W]	ヒステリシス損 Ph[W]	鉄損 Pe+Ph[W]	全損失[W]
	値				
Air	0.00000000e+000				
Coil1	4.38574069e-004				
Coil2	4.38459504e-004				
Core	0.00000000e+000				
全体	8.77033573e-004				

調和解析の出力結果例

磁場熱連成解析

熱伝導解析との連成により、温度分布の解析が可能です。
磁場解析で求めた損失=発熱量として計算します。

ソルバの選択

電磁界

- 電場解析 *Coulomb*
- 磁場解析 *Gauss/Luvs*
- 電磁波解析 *Hertz*

熱

- 熱伝導解析 *Watt*
- 電場-熱連成 *Curie*

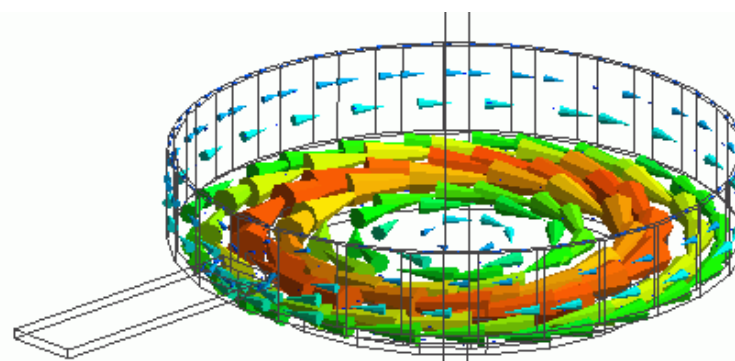
応力・圧電

- 応力解析 *Galileo*
- 圧電解析 *Ravleigh*

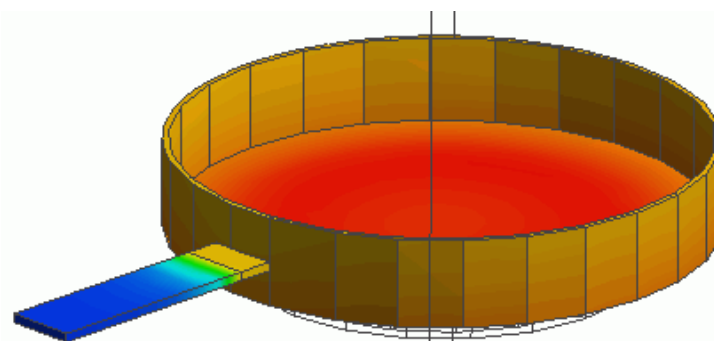
音波・流体

- 流体解析 *Bernoulli*
- 音波解析 *Mach*
- 簡易流体解析 *Pascal*

ソルバの選択



電流密度分布



温度分布

IHクッキングヒーターの解析

放熱経路(境界条件)の設定が最大のポイントです。

熱伝導解析の境界条件

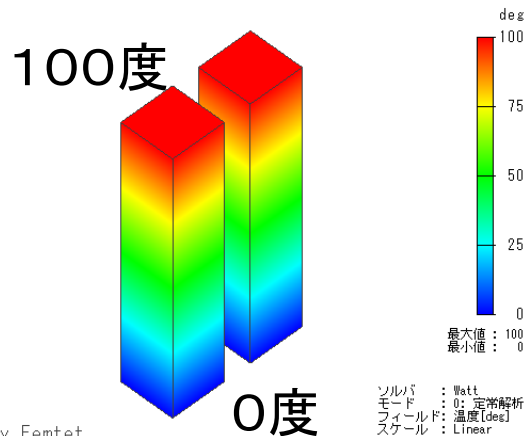


The screenshot shows a software window titled "熱" (Heat). It contains two main sections: "境界条件の種類" (Boundary Condition Type) and "輻射の設定" (Radiation Settings). In the "境界条件の種類" section, there are six radio button options: "温度" (Temperature), "熱抵抗" (Thermal Resistance), "熱流束" (Heat Flux), "測定端子" (Measurement Terminal), "熱伝達・対流" (Heat Transfer/Convection), and "断熱(設定なし)" (Insulation (No Setting)). The "温度" option is selected. In the "輻射の設定" section, there is a dropdown menu currently set to "なし" (None), a checkbox for "個別設定" (Individual Setting), and a button with three dots. Below these sections, there is a numerical input field containing "0.0", a unit label "[deg]", and two checkboxes: "時間依存" (Time Dependent) and "分布取込" (Load Distribution). At the bottom of this section are two buttons: "重み開数" (Weight Count) and "分布データ" (Distribution Data).

境界条件の種類

- ・温度
- ・熱流束
- ・熱抵抗
- ・熱伝達・環境輻射
- ・物体間輻射
- ・断熱(初期設定:熱の出入りなし)

熱伝導解析の境界条件

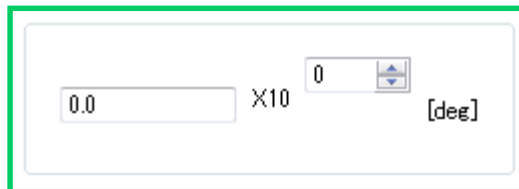


Powered by Femtet
http://www.muratasoftware.com/

ソルバ : Watt
モード : 0: 定常解析
フィールド: 温度[deg]
スケール : Linear
全体寸法 : 50 mm

温度 ... 温度を指定

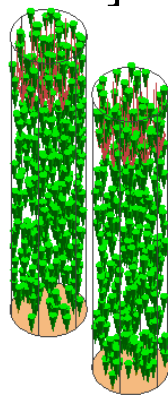
(例題1)
柱の先端を100度に固定
柱の根元を0度に固定



電気回路に例えると

⇒ 電位

$1e5 [W/m^2]$



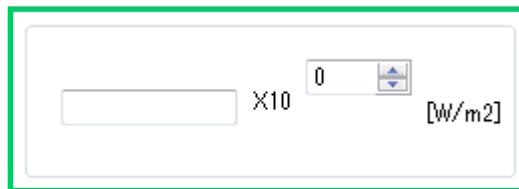
Powered by Femtet
http://www.muratasoftware.com/

kW/m²
最大値 : 100.003
最小値 : 89.997
ソルバ : Watt
モード : 0: 定常解析
フィールド: 熱流束[W/m²]
成分 : ベクトルXYZ
スケール : Linear
全体寸法 : 50 mm

熱流束... 熱流束を直接指定

正符号で流入(+), 負符号で流出(-)となる

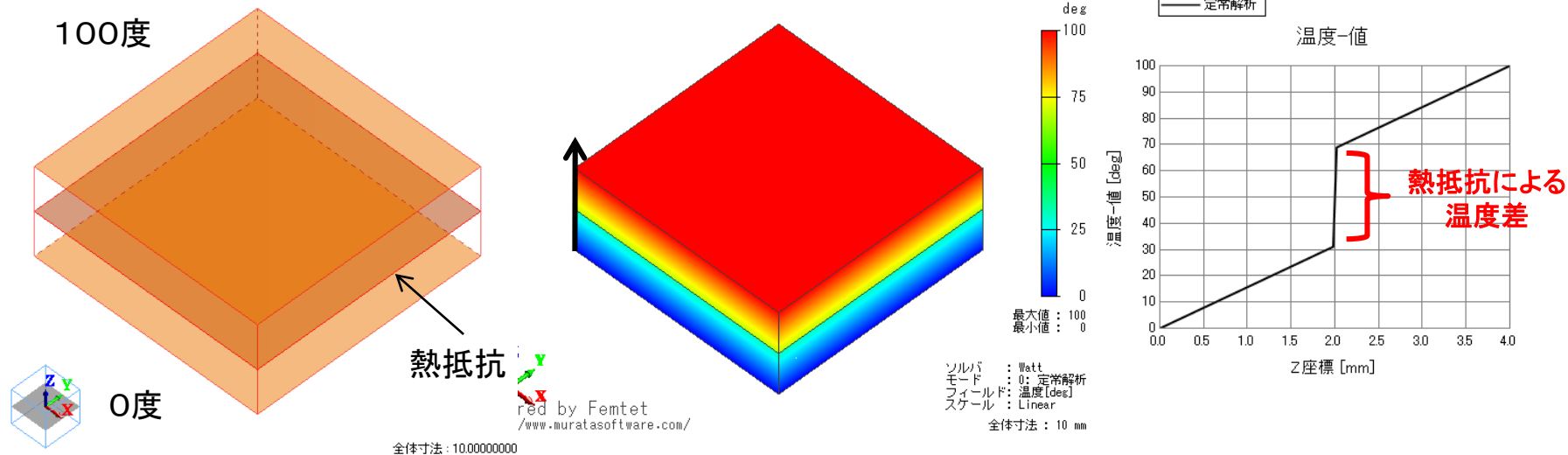
(例題13) 柱の先端の熱流束を $1e5 [W/m^2]$ に設定



⇒ 電流密度

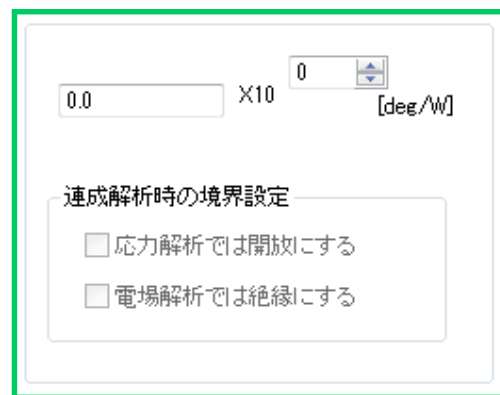
熱伝導体に熱が流れると温度差が発生(フーリエの法則)
導電体に電流が流れると電位差が発生(オームの法則)

熱伝導解析の境界条件



熱抵抗... 複数のボディの境界面に設定

(例題15) 熱抵抗境界条件を用いた解析事例
熱抵抗面において温度が不連続に変化



熱伝導解析の境界条件

熱

境界条件の種類

- 温度
- 熱抵抗
- 熱流束
- 測定端子
- 熱伝達・対流
- 断熱(設定なし)

熱伝達・対流の種類

- 熱伝達係数指定
- 自然対流(係数自動計算)
- 自然対流(係数直接指定)
- 強制対流
- ヒートシンク

①

②

①

室温(環境温度)

解析条件の環境温度を使用する

25.0

[deg] ⓘ

①熱伝達
(例:強制対流)



輻射の設定

環境(速度重視)

なし

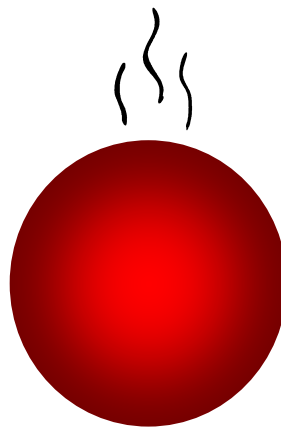
環境(速度重視)

表面間(精度重視)

③

④

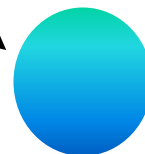
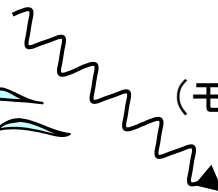
②自然対流



③環境輻射
(周囲空間への輻射)



④物体間輻射
(モデル間の輻射)



熱伝達・環境輻射

熱伝達係数...熱伝達係数 h を指定

強制対流...風速と代表長さから h を計算

自然対流...自然対流の係数 con を指定
(自動計算も可)

環境輻射...相手が無限遠に存在する
場合の輻射の係数 rad を指定

熱

境界条件の種類

温度 熱抵抗

熱流束 測定端子

熱伝達・対流 断熱(設定なし)

輻射の設定

環境(速度重視) ▼

個別設定 ...

熱伝達・対流の種類

熱伝達係数指定

自然対流(係数自動計算)

自然対流(係数直接指定)

強制対流

ヒートシンク

熱伝達係数

[W/m2/deg]

分布取込

分布データ

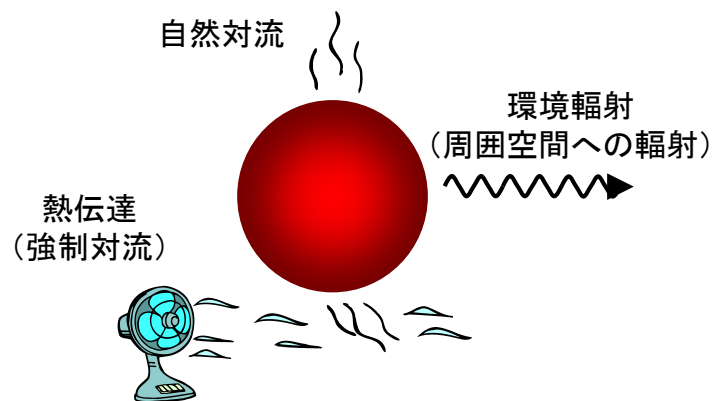
室温(環境温度)

解析条件の環境温度を使用する ▼

25.0 [deg] ⓘ

時間依存 分布取込

重み開放 分布データ



熱伝導解析の境界条件

熱

境界条件の種類

温度 熱抵抗
 熱流束 測定端子
 熱伝達・対流 断熱(設定なし)

輻射の設定

表面間(精度重視) 個別設定

熱伝達・対流の種類

熱伝達係数指定
 自然対流(係数自動計算)
 自然対流(係数直接指定)
 強制対流
 ヒートシンク

熱伝達係数

[W/m2/deg]

分布取込 分布データ

室温(環境温度)

解析条件の環境温度を使用する 時間依存 分布取込
25.0 [deg] ① 重み関数 分布データ

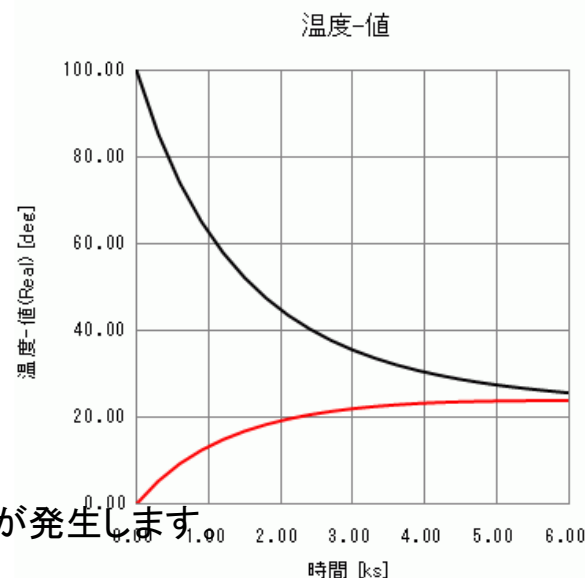
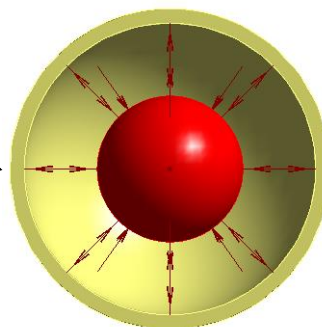
物体間輻射 ...

モデルの表面間での輻射における放射率を設定

(例題9)

内球(初期温度100度)と外球壁(初期温度0度)間の輻射による熱のやりとりを考慮した過渡解析

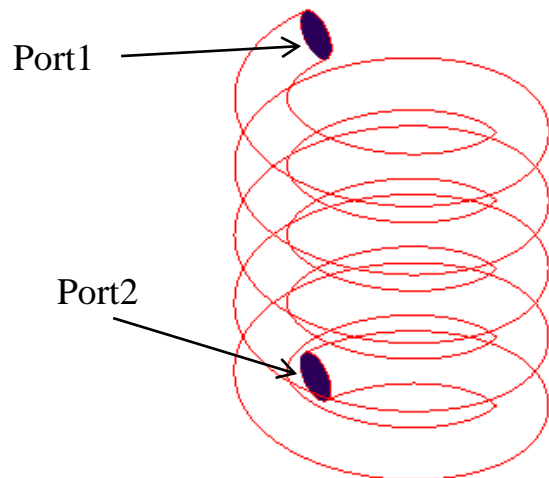
同グループにおいてすきまなく設定することがポイント



※1 物体間輻射の境界条件のすきまが大きい場合は不自然な温度低下が発生します

※2 輻射の相手が無限遠にある場合は「環境輻射」で係数設定します。

電場解析を利用することで、コイルの浮遊容量が計算できます。



テーブル		
容量[F]	静電力	有限要素法情報
	値	
電極1		Port1
電極2		Port2
C1-GND(0V)	-3.5181661e-19	
C1-2	5.1432098e-13	
C2-GND(0V)	-3.6002321e-19	

解析方法

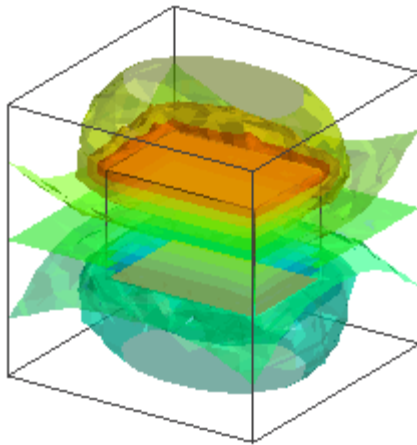
1. コイルのインダクタンスを計算するモデルを用意
2. ソルバを電場解析(Coulomb)に変更
3. 解析条件の設定を静解析 – 誘電体に変更
4. 外部境界条件を磁気壁に変更
5. 空気ボディを作成
6. コイルのボディを選択し、電位1Vの境界条件を設定 (コイルのボディを選択して周囲全体に設定)
7. コイルの両端面に入出力ポートの境界条件 (Port1,Port2)を設定
8. コイルの材料定数を完全導体に設定
9. 計算実行

磁場解析例題8 ヘリカルコイル
のモデルで浮遊容量を解析した例

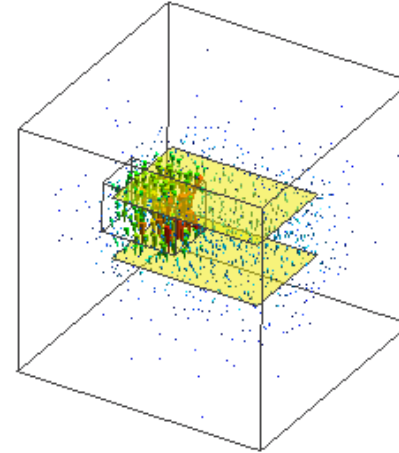
参考資料

- ・解析事例
- ・解析条件

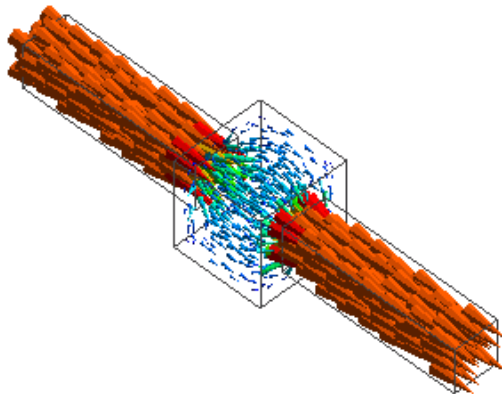
コンデンサの容量値



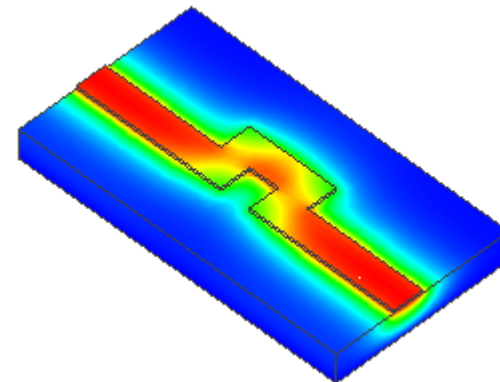
誘電体に働く静電力



導体の抵抗値



信号線の発熱(電場熱連成)





解析の種類

- ・ 静解析
- ・ 調和解析

解析オプション

- ・ メッキ解析
- ・ ホール素子解析

静解析

周波数=0(直流)の解析

誘電体の解析： $-\varepsilon \nabla^2 \varphi = \rho$

導体の解析： $-\sigma \nabla^2 \varphi = 0$

を解いている

調和解析

0<周波数(交流)の解析

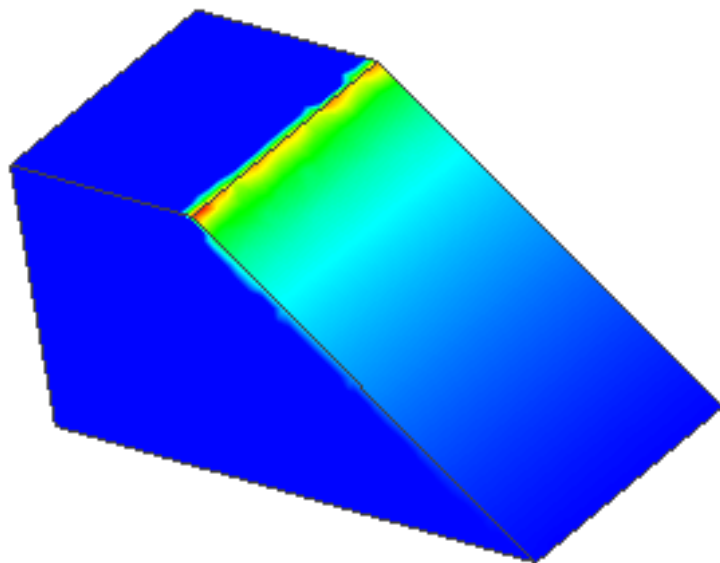
$$-\nabla \cdot (\sigma + j\omega\varepsilon) \nabla \varphi = j\omega\rho$$

を解いている

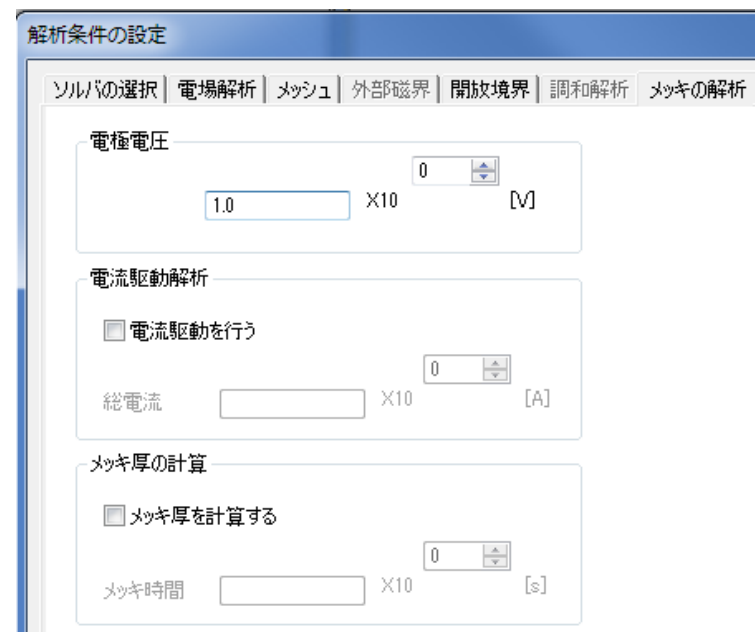
ε : 誘電率 φ : 電位 ρ : 電荷密度 σ : 導電率

電場解析：めっき解析

めっき槽内部の電流密度、電位分布やめっき膜厚みを求めます。



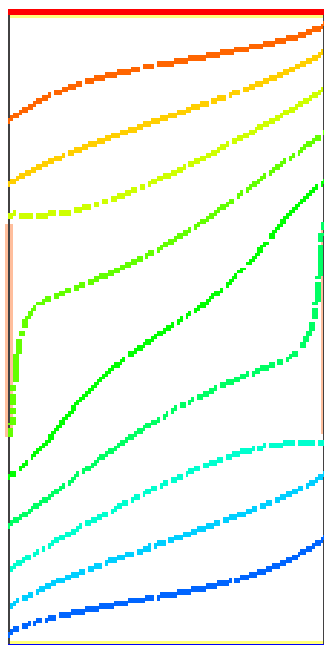
めっき槽の解析



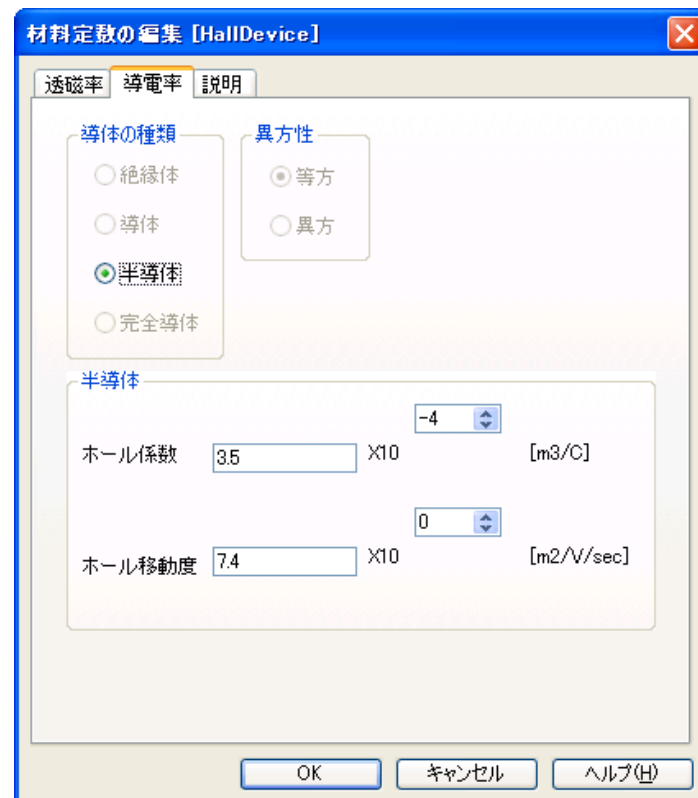
めっき解析の条件設定

電場解析:ホール素子解析

ホール効果を考慮した印加磁界に対するホール電圧、抵抗値を求めます。



ホール素子解析(2次元)



材料定数設定

Maxwell方程式

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

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

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

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (4)$$

H 磁場強度 [A/m]

J 電流密度 [A/m²]

D 電束密度 [C/m²]

E 電場強度 [V/m]

B 磁束密度 [T]

ρ 電荷密度 [C/m³]

J_e 誘導電流密度 [A/m²]

J_e はファラデーの誘導法則で発生する未知の電流

(1)式より

$\mathbf{J} = \mathbf{J}_0 + \mathbf{J}_e$ とおくと

$$\begin{aligned} \nabla \times \mathbf{H} &= (\mathbf{J}_0 + \mathbf{J}_e) + \delta \mathbf{D} / \delta t \\ &= (\mathbf{J}_0 + \sigma \mathbf{E}) + j\omega \epsilon \mathbf{E} \end{aligned}$$

$j\omega \epsilon \mathbf{E} = 0$ と近似すると

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_0 + \sigma \mathbf{E}$$

$\mathbf{H} = (1/\mu)\mathbf{B}$ より

$$\nabla \times (1/\mu)\mathbf{B} = \mathbf{J}_0 + \sigma \mathbf{E} \quad (5)$$

(4)式から

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (6)$$

となるベクトルポテンシャルAが定義できる

(2)式に(6)式を代入すると

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \delta / \delta t (\nabla \times \mathbf{A})$$

$$\nabla \times (\mathbf{E} + \delta \mathbf{A} / \delta t) = 0$$

$$\mathbf{E} = - \nabla \phi - \delta \mathbf{A} / \delta t \quad (7)$$

となるスカラーポテンシャル ϕ が定義できる

(5)式に(6)、(7)式を代入すると

$$\nabla \times (1/\mu) \nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{J}_0 - \sigma (\nabla \phi + \delta \mathbf{A} / \delta t)$$

出力項目の計算方法

<インダクタンス>

鎖交磁束数から算出している。

$$L = \Phi / I$$

Φ : 鎖交磁束数

I: コイル電流

詳細は以下の参考文献参照。

参考文献: 磁界系有限要素法を用いた最適化 高橋則雄 森北出版 p68-70

<電磁力>

節点法を用いて算出している。

$$F = -\int T \cdot \nabla N dV$$

T: Maxwellの応力テンソル

N: 補間関数

詳細は以下の参考文献参照。

参考文献: 磁界系有限要素法を用いた最適化 高橋則雄 森北出版 p70-77

ソルバ名「Gauss」の由来



カール・フリードリヒ・ガウス(1777年4月30日 - 1855年2月23日)はドイツの数学者、天文学者、物理学者である。彼の研究は広範囲におよんでおり、特に近代数学のほとんどの分野に影響を与えたと考えられている。数学や磁気学の各分野には彼の名が付いた法則、手法等が数多く存在する。18-19世紀最大の数学者の1人である。