

COMSOL Multiphysics Ver.5.2 専門モジュールイントロダクション

RF モジュール

マイクロ波と RF 設計用のソフトウェア

計測エンジニアリングシステム株式会社
東京都千代田区内神田 1-9-5 井門内神田ビル
2015 11.18

1. RF モジュールの概要

出典：<https://www.comsol.jp/rf-module>

マイクロ波と RF 設計を仮想的に予測

RF モジュールは、RF 装置とマイクロ波装置の設計者が、アンテナ、導波管、フィルター、回路、キャビティ、メタマテリアルの設計に使用します。電磁波伝搬と共鳴挙動を短時間に正確にシミュレートするため、電磁場分布、透過、反射、インピーダンス、Q ファクター、S パラメータ、ワット損を計算できる機能が技術者向けに用意してあります。シミュレーションでは、実験では直接測定できない物理的効果を評価し予測する能力を低コストというメリットと結びつけました。

従来の電磁モデル化とは違って、モデルに温度上昇や構造変形、あるいは流量といった効果を組み込んでモデルを拡張できます。複数の物理的効果を連成できます。したがって、電磁デバイスのシミュレーションの間に、組み込んだすべての物理特性を反映させることができます。

ソルバテクノロジー

フードの下で、RF モジュールは有限要素法をベースにしています。マックスウェルの方程式は、条件付けのための最新のアルゴリズムと得られる疎な方程式系の反復解とを組み合わせる数値的に安定したエッジ要素（別名、ベクトル要素）の有限要素法で解きます。繰り返しと直接ソルバのいずれもマルチコアコンピュータで同時実行します。クラスタ計算は、周波数スイープを実行して利用できます。これは高速計算のためにクラスタ内で周波数ごとに複数のコンピュータに分散できます。また、分散メモリ（MPI）を使用し、直接ソルバで大型モデルを解決することもできます。

~~~~~

電磁シミュレーション用の解析オプションです。

### 支配方程式

RF モジュールは 3 次元、2 次元、2 次元軸対象の電磁場のほか、1 次元の伝送回線方程式、および SPICE ネットリストによる回路（無次元）モデル化をシミュレートします。3 次元定式化は、ベクトルエッジ要素を利用してマックスウェルの方程式の全波形に基づいて作成しました。また、誘電体媒体、金属媒体、分散媒体、損失性媒体、異方性媒体、ジャイロトロピック媒体、混合媒体をモデル化する材料特性関係を組み込みました。2 次元定式化では、面内分極と面外分極を同時に、または別々に解決でき、さらに面外伝搬も解決

できます。2次元軸対象の定式化では、方位角場と面内場を同時にまたは別々に解決でき、既知の方位角モードナンバーを解決することもできます。

### 場の定式化

全波定式化と背景波定式化のいずれも利用できます。全波定式化では、モデルにすべてのソースを組み込んで全場を解決します。一方、背景波定式化では、外部ソースの既知の背景場を解決します。これがレーダー断面モデルと電磁散乱モデルの共通の手法です。

### 境界条件

境界条件は、完全な伝導性表面、有限伝導性の表面、モデル内で薄い損失性境界を表す面のモデル化に利用できます。対称性境界条件と周期境界条件では、モデル空間全体のサブセットのモデル化ができます。散乱境界条件と完全整合層（PML）は、境界から自由空間をモデル化するときを使用します。ポートのモデル作成には、各種励起境界条件があり、長方形、円形、周期、同軸、近似集中、ユーザー定義および正確に数値計算されたポート励起を利用できます。集中容量性要素、誘導要素、抵抗要素として、ケーブルの終端処理を表す境界条件を組み込むことができます。線電流と点双極子も、クイックプロタイプ作成に利用できます。

### 解法タイプ

シミュレーションは、固有値問題、周波数領域問題、または完全過渡解析としてセットアップできます。固有問題では、構造の共振と Q ファクターのほか、導波管の伝播定数と損失を発見できます。周波数領域問題では、単一周波数、または周波数範囲の電磁場を計算できます。パデ近似法を使用した高速周波数スイープでは、周波数範囲で挙動を計算するときに大幅に解法時間を短縮できます。過渡シミュレーションは、二次全波ベクトル定式化のほか、メモリ効率の良い、一次非連続ガラキ定式化のいずれにも使用できます。過渡シミュレーションは、非線形材料、信号伝搬、回帰時間のモデル化のほか、非常にブロードバンドのモデル化に使用します。

### マルチフィジックス連成

COMSOL Multiphysics で開発したすべてのモデルの方程式は、他の物理特性に対して電磁場で影響を与え、影響を与えられるように完全に連成できます。特に、マイクロ波加熱の専用ユーザーインターフェースでは、従来の電力堆積解析をはるかに超えて、SAR 計算や正確な温度上昇予測などの機能でシミュレーション機能を拡張しました。周波数領域のマックスウェルの方程式と、定常領域または時間領域の熱伝達方程式を解くことで、長時間の温度上昇を計算できるようになり、温度で変化する材料特性の影響を計算できるようになりました。

## マイクロ波と RF シミュレーションから拡張できる結果

計算結果は、電界と磁場、S パラメータ、電力潮流、電力損失の定義済みのプロットで表示されます。高速後処理ツールでは、ファールフィールド放射パターンの迅速な生成が可能です。さらに、結果は、ユーザーが自由に定義した物理的数量を表す式のプロットとして、あるいは、シミュレーションから得られた導出値の表形式で表示できます。S パラメータマトリックスは Touchstone 形式にエクスポートして、すべてのデータをテーブル、テキストファイル、生データ、画像としてエクスポートできます。

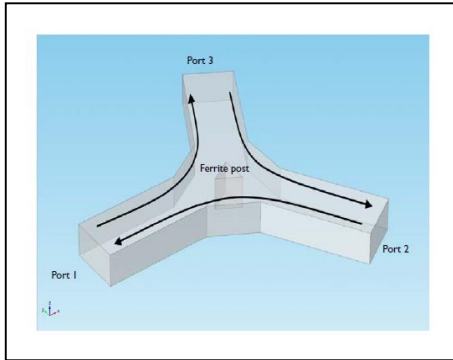
ワークフローは、わかりやすく、以下のステップで記述できます。すなわち、COMSOL ネイティブツールで作成するか、CAD モデルをインポートしてジオメトリを作成し、材料を選択し、適切なユーザーインターフェースと解析タイプを選択し、ポートと境界条件を定義し、有限要素メッシュを自動的に作成し、オプションのメッシュ適合で解決し、視覚化し、結果を後処理します。すべてのステップは COMSOL Desktop®から実行します。ソルバ選択ステップでは、自動的にデフォルト設定を使用します。この設定は固有の RF インタフェースごとに調整されますが、ユーザーが構成することもできます。

## RF とマイクロ波設計のさまざまな例

RF モジュールモデルライブラリでは、インターフェースとそれぞれ固有の機能を、チュートリアルとベンチマークを例に解説しています。ライブラリには、アンテナ、フェライト装置、マイクロ波加熱現象、パッシブ装置、散乱とレーダー断面（RCS）解析、伝送回線、導波管、RF とマイクロ波工学、教育用のチュートリアルモデル、RF インタフェースの検証と妥当性検査のためのベンチマークモデルがあります。

## 2. チュートリアル

### 損失ありフェライト3ポートサーキュレーターのインピーダンス整合



出典：INTRODUCTION TO RF Module p. 15 以降

### 手順

#### モデルウィザード

1. デスクトップの COMSOL アイコンをダブルクリックします。ソフトウェアが起動すると画面にモデルウィザードを使う (COMSOL モデルを新規作成) か ブランクモデルを使う (手動で COMSOL モデルを新規作成) かを選択する画面が表示されます。ここではモデルウィザードを選択します。COMSOL がすでに起動している場合にはファイルメニューで新規を選択後にモデルウィザードを選択します。



2. 空間次元を選択ウィンドウで3Dをクリックします。

3. フィジックスを選択ツリーで高周波を展開し電磁波(周波数領域)をダブルクリックします。すると、追加フィジックス選択リストに表示されます。別の方法として、電磁波周波数領域を選択し、追加ボタンを押す方法があります。

4. スタディをクリックします。

5. プリセットスタディの下のスタディツリーで周波数領域を選択します。

6. 完了をクリックします。

## グローバル定義 - パラメタおよび変数

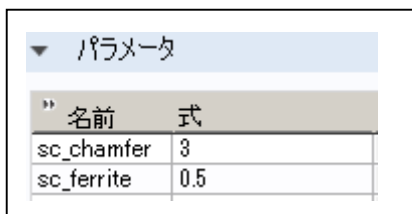
ジオメトリをパラメタ表現で組み上げていきます。こうすることで、2個の形状パラメタを変化させることができ入力インピーダンスと導波路断面の整合を取ることができます。

この章では、2個のパラメタを設定します。

1. ホームツールバーのパラメタボタンをクリック（モデルビルダー上であればグローバル定義を右クリックし、パラメタを選択）します。

Linux および Mac : デスクトップのトップに近いところにあるコントロールを使います。

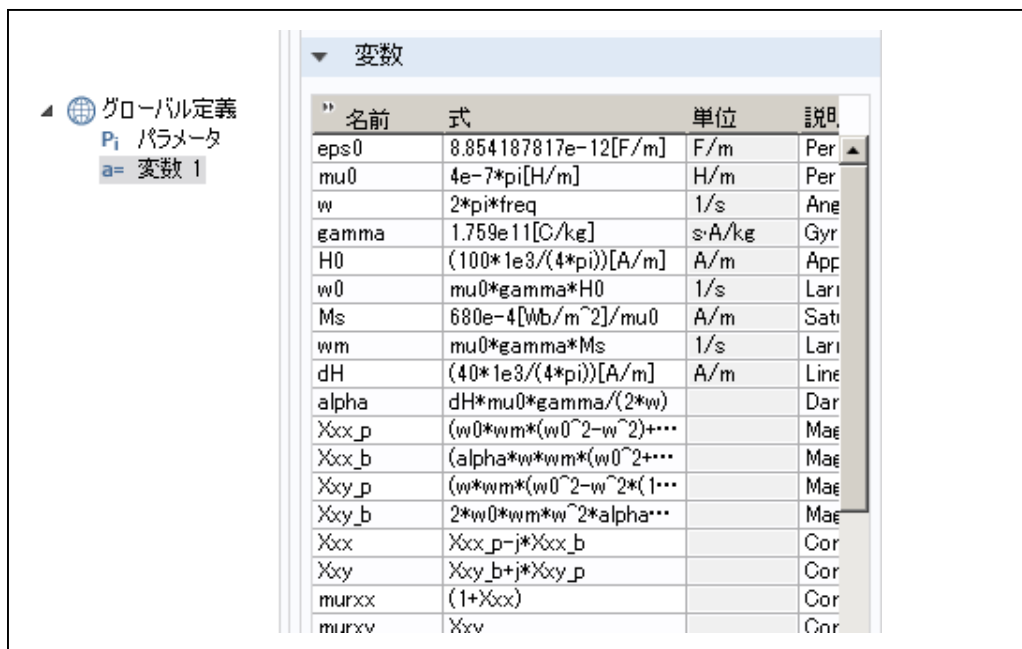
2. パラメタの下の設定ウィンドウで、以下を入力します。



| 名前         | 式   |
|------------|-----|
| sc_chamfer | 3   |
| sc_ferrite | 0.5 |

サーキュレータ形状を描く準備としてファイルから変数を読み込みます。

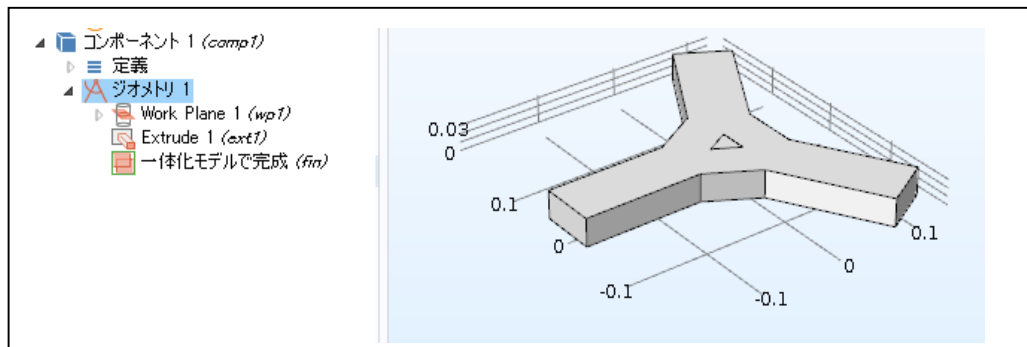
1. ホームツールバーの変数をクリックし、グローバル変数を選択します。
2. 変数の設定ウィンドウに行き、変数の下でファイルからロードをクリックします。
3. アプリケーションライブラリフォルダ¥RF\_Module¥Ferrimagnetic\_Devices をブラウズし、lossy\_circulator\_3d\_parameters.txt をダブルクリックします。変数が読み込まれます。



| 名前    | 式                      | 単位     | 説明   |
|-------|------------------------|--------|------|
| eps0  | 8.854187817e-12[F/m]   | F/m    | Per  |
| mu0   | 4e-7*pi[H/m]           | H/m    | Per  |
| w     | 2*pi*freq              | 1/s    | Ang  |
| gamma | 1.759e11[C/kg]         | s·A/kg | Gyr  |
| H0    | (100*1e3/(4*pi))[A/m]  | A/m    | App  |
| w0    | mu0*gamma*H0           | 1/s    | Lari |
| Ms    | 680e-4[Wb/m^2]/mu0     | A/m    | Sat  |
| wm    | mu0*gamma*Ms           | 1/s    | Lari |
| dH    | (40*1e3/(4*pi))[A/m]   | A/m    | Line |
| alpha | dH*mu0*gamma/(2*w)     |        | Dar  |
| Xxx_p | (w0*wm*(w0^2-w^2)+...  |        | MaE  |
| Xxx_b | (alpha*w*wm*(w0^2+...  |        | MaE  |
| Xxy_p | (w*wm*(w0^2-w^2)*(1... |        | MaE  |
| Xxy_b | 2*w0*wm*w^2*alpha...   |        | MaE  |
| Xxx   | Xxx_p-j*Xxx_b          |        | Cor  |
| Xxy   | Xxy_b+j*Xxy_p          |        | Cor  |
| murxx | (1+Xxx)                |        | Cor  |
| murxy | Xxy                    |        | Cnr  |

## ジオメトリ

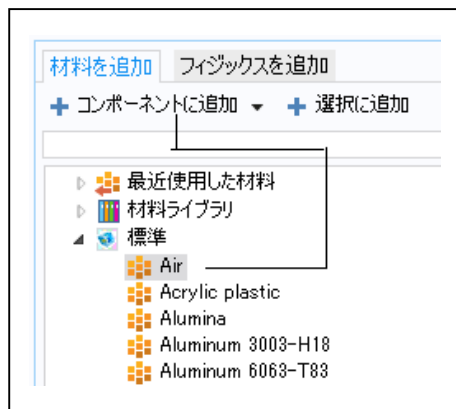
1. ホームツールバー上でウィンドウズをクリックし、アプリケーションライブラリを選択します。
2. アプリケーションライブラリフォルダ¥RF\_Module¥Ferrimagnetic\_Devices をブラウズし、lossy\_circulator\_3d\_geom.mph をダブルクリックします。



注意：一体化モデルで完成をクリックし、全て作成を実行します。

## 材料

1. ホームツールバー上で、「材料を追加」をクリックします。
2. 標準で Air を選択し、コンポーネント 1 に追加します。



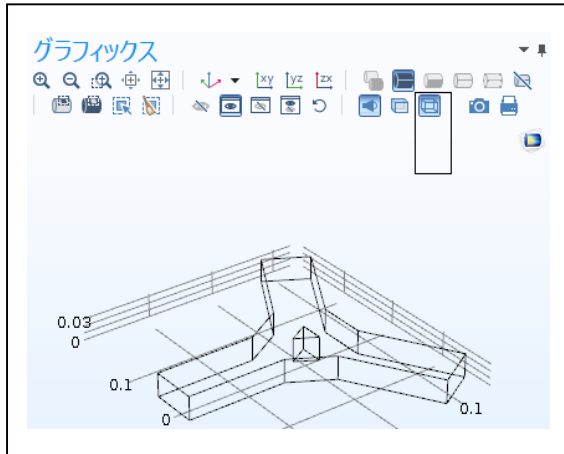
3. 「材料を追加」をクリックし、材料追加ウィンドウを閉じます。

## 電磁波、周波数領域

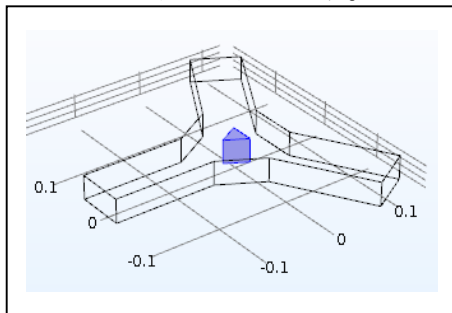
### 波動方程式（電場） 2

1. フィジックスツールバー上でドメインをクリックし波動方程式（電場）を選択します。

2. サーキュレータの内部をみるために、グラフィックツールバー上の「ワイヤーフレームレンダリング」をクリックします。



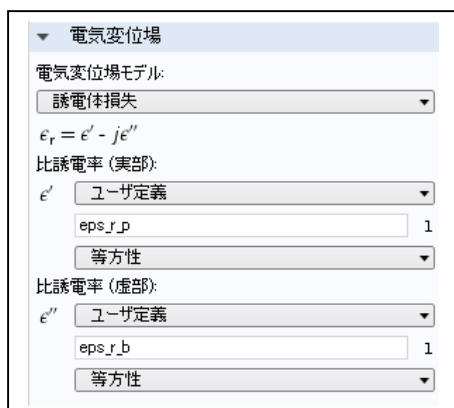
3. ドメイン 2 のみを選択します。



4. 波動方程式電場 2 の設定ウィンドウに行きます。電気変位場の下で以下を行います。電気変位場モデルリストから誘電体損失を選択します。

$\epsilon'$  リストで、ユーザー定義を選択し、編集フィールドに `eps_r_p` を入力します。

$\epsilon''$  リストで、ユーザー定義を選択し、編集フィールドに `eps_r_b` を入力します。





5. 磁場の下で、 $\mu_r$  リストからユーザー定義を選択し、異方性を選択します。

6. Mr テーブルで、

murxx murxy murxz

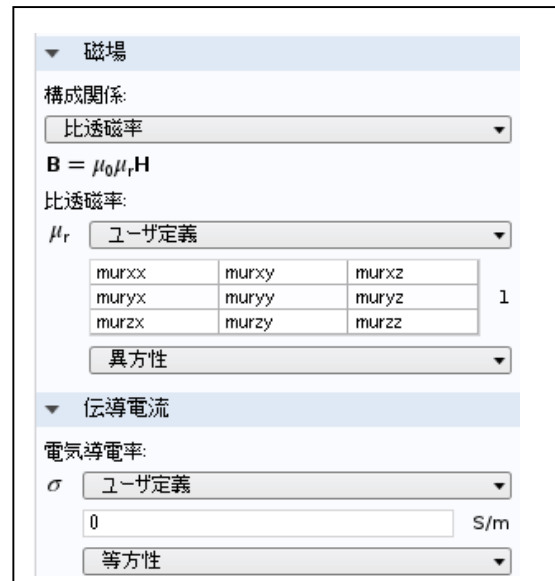
muryx muryy muryz

murzx murzy murzz

を入力します。

7. 伝導電流の $\sigma$ リストから

ユーザー定義を選択し、0 としておきます。

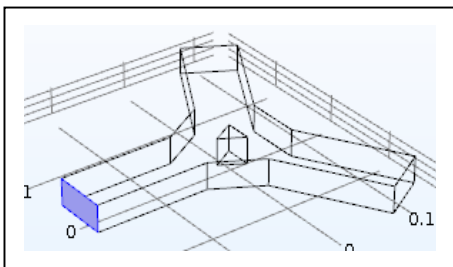


ポート 1、ポート 2、ポート 3

1. フィジックスツールバーで「境界」をクリックし、「ポート」を選択します。

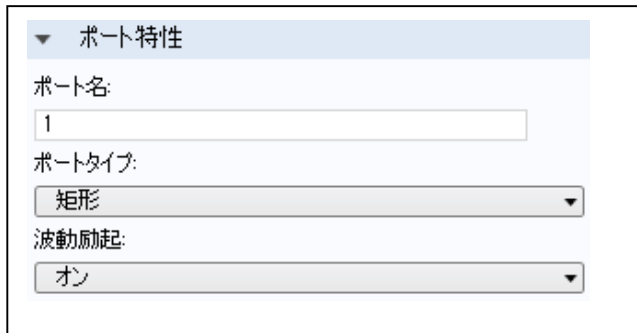


2. 境界 1 のみを選択します。

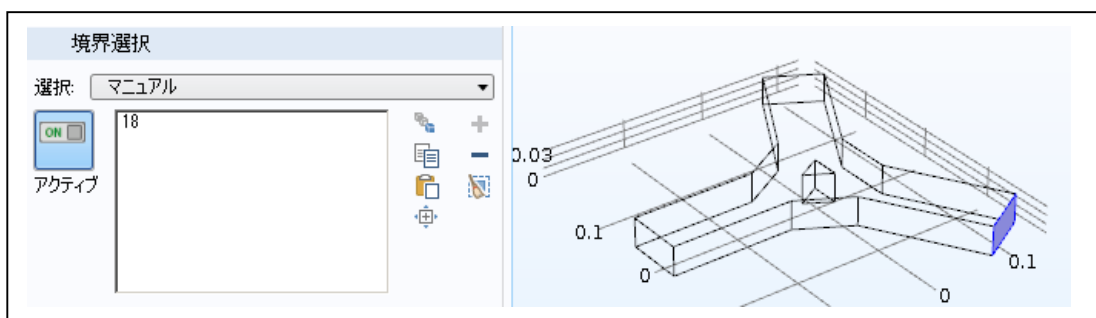


3. ポートの設定ウィンドウに行きます。ポート特性の下でポートタイプリストから矩形を選択します。

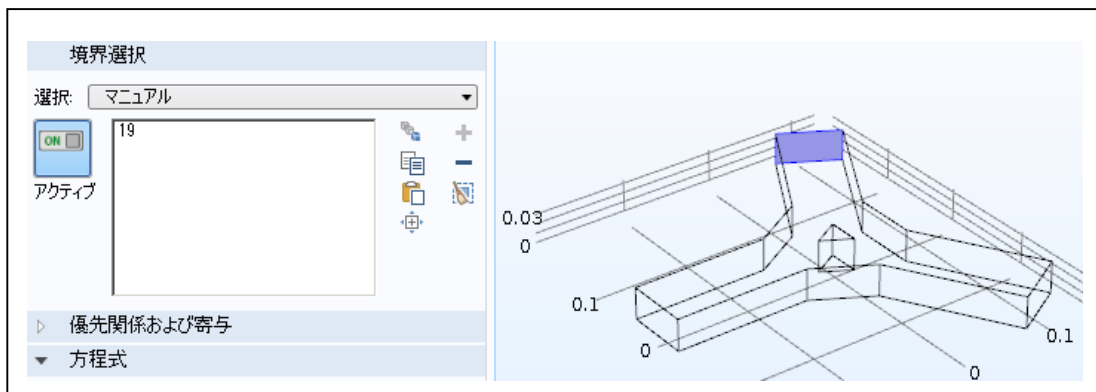
4. このポートを波動励起で、選択をオンにします。



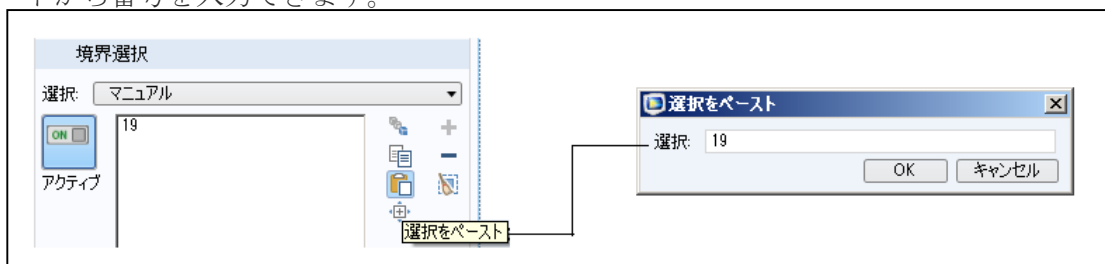
5. フィジックスツールバー上で、「境界」をクリックし「ポート」を選択します。ポート2に対して境界18を選択します。ポートタイプリストから矩形を選択します。



6. ポートを追加し、ポート3に対して、境界19を選択し、ポートタイプリストから矩形を選択します。



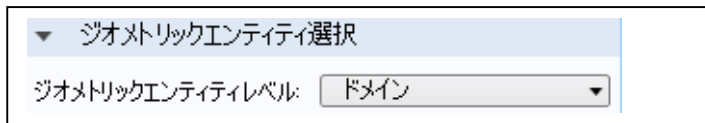
注： 境界選択などの際に番号がわかっている場合には「選択をペースト」を使ってキーボードから番号を入力できます。



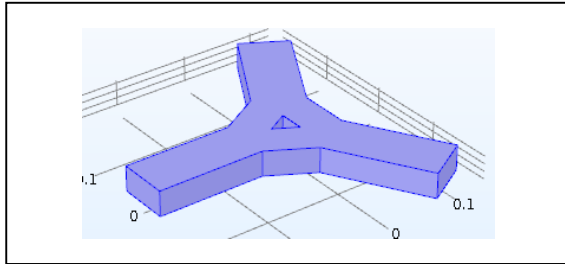
## メッシュ

### フリーメッシュ四面体

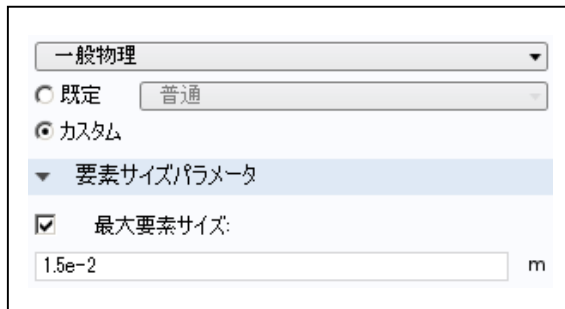
1. メッシュツールバーで「フリーメッシュ四面体」を選択します。
2. フリーメッシュ四面体 1 を右 CLK し、サイズを選択します。
3. サイズの設定ウィンドウに行き、ジオメトリックエンティティ選択でジオメトリックエンティティレベルリストからドメインを選択します。



4. ドメイン 1 のみを選択します。導波路の空気部分です。



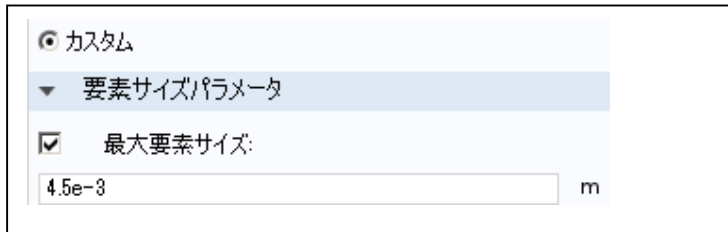
5. 要素サイズの下のカスタムをクリックします。
6. 要素サイズ選択の下で最大要素サイズにチェックを入れ、 $1.5e-2$  を入力します。



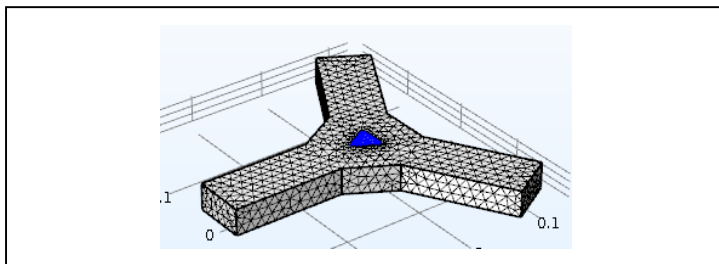
### サイズ 2

1. フリーメッシュ四面体 1 を右クリックし、サイズを選択します。
2. 設定ウィンドウに行きます。ジオメトリックエンティティ選択のジオメトリックエンティティレベルリストでドメインを選択します。
3. ドメイン 2 のみを選択します。これはフェライト柱の部分です。

- 要素サイズの下のカスタムをクリックします。
- 要素サイズパラメタセクションの下の最大要素サイズにチェックを入れ、 $4.5e-3$ を入力します。

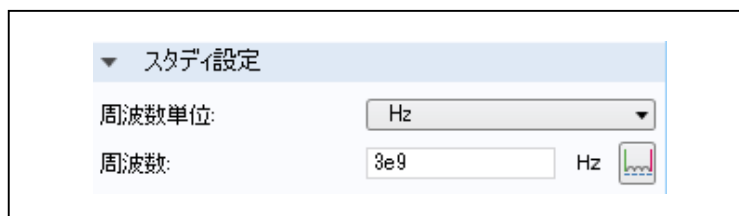


- サイズの設定ウィンドウで、「全て作成」をクリックします。



## スタディ 1

- モデルビルダでスタディ 1 を展開し、ステップ 1 : 周波数領域をクリックします。
- 設定ウィンドウに行き、スタディ設定の下で、周波数入力フィールドに  $3e9$  を入力します。

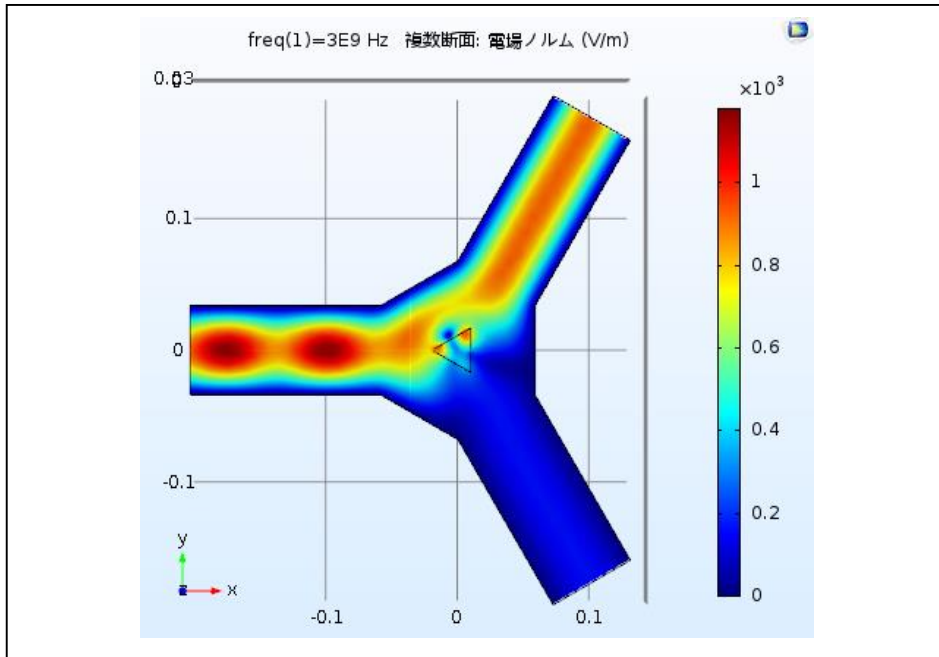


- モデルビルダーで、スタディ 1 を右 CLK し、計算を選択します。

## 結果

### 電場

- 結果 : 電場 (emw) をクリックします。
- グラフィックスで「XY ビューへ」ボタンをクリックします。



以上