

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

# AC/DCモジュール

電磁気シミュレーションのモデリング

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 11.20

## 1. ACDC モジュールの概要

出典：<https://www.comsol.jp/acdc-module>

### キャパシタ、インダクタ、絶縁体、コイル、モータ、センサのモデリング

AC/DC モジュールでは、直流から低周波までのアプリケーションの電場・磁場・電磁場のシミュレーションが可能です。典型的なアプリケーションとして、抵抗、静電容量、インダクタンス、インピーダンス、力、トルクのようなパラメータの抽出専用ツールが内蔵され、典型的なアプリケーションとしてキャパシタ、インダクタ、絶縁体、コイル、モータ、アクチュエータ、およびセンサが含まれています。

材料と構成則は、誘電率、透磁率、誘電率、残留フィールドにより定義されます。材料プロパティでは、空間的变化、時間的依存、異方性そして残留フィールドが使用可能になります。電磁媒体には、B-H カーブのような非線形が含まれ、また与えられた方程式により定義可能です。

### 境界条件と無限要素

AC/DC モジュールの実装で、電位および磁位、電気的および磁氣的絶縁、ゼロ電荷、フィールド値、電流値へのアクセスが可能になります。更に、SPICE 回路の端子条件、浮遊電位、対称条件、周期条件、表面インピーダンス、表面電流、分布抵抗、キャパシタンス、インピーダンスや接触抵抗といったような広範囲で高度な境界条件も含まれます。無限あるいは大規模ドメインのモデリングにおいては、電場と磁場の両方で、無限要素が使用可能です。無限要素レイヤーが有限サイズのモデリングドメインの外側に追加された場合、場の方程式は、自動的に引きのばされます。これにより、無限領域を有限サイズのモデルで表すことが出来、モデリング境界に発生する可能性がある人工的な領域切り出しの影響を防ぐことが可能になります。

.....

### 2D、3D シミュレーション回路とレイアウトの組み合わせ

各自の電気部品を大規模システムの一部として考えた場合、AC/DC モジュールは、SPICE 回路表を含んだインタフェースを提供します。その回路一覧では、更なるモデリングを対象とした回路素子が選択可能です。複雑なシステムのモデルは、回路ベースのモデリングを使用して設定されます。一方で、回路内の重要なデバイスに関する完全場のモデリングとのリンクを維持することも可能です。これにより両方のレベルにおいて、イノベーションと最適化設計が可能になります。電子回路のレイアウトは、ECAD Import Module を介

した AC/DC モジュール解析で提供可能です。そのようなシミュレーションは、電磁気関係に限られず、多様な分野で可能です。

### CAD、MATLAB®、 および Excel®との結合

CAD モデルの電磁場特性解析をより容易に行うために、COMSOL は、有名な CAD システムのための製品である ECAD インポートモジュール、CAD Import Module, LiveLink™を提供します。LiveLink 製品は、パラメータで表現された CAD モデルを本来の環境で使用するという状況を可能にし、また、その一方で、COMSOL Multiphysics®からのジオメトリディメンションも操作することができます。それと共に、複数のモデルパラメータ上にあるパラメータスイープも同時に作成することができます。これに関連したモデリングタスクとして、MATLAB® スクリプトや MATLAB®機能と同時に COMSOL® を稼働させる LiveLink™ for MATLAB® があります。COMSOL Desktop® 上で可能な操作は、MATLAB コマンドを介してアクセスすることができます。すでに使用している MATLAB コードを使用して、MATLAB 環境内で COMSOL コマンドを組み込むこともできます。スプレッドシートから操作する電磁場シミュレーションのために、LiveLink™ for Excel® は、COMSOL 環境で定義されたパラメータとスプレッドシートデータを COMSOL Desktop で同期できる便利なオプションを提供します。

### 非線形磁性体データベース

165 種類の強磁性体とフェリ磁性体の材料データベースが AC/DC もじるに含まれています。データベースは BH 曲線と HB 曲線を含んでおり、磁場解析に使うことができます。曲線データは細かくサンプルされたデータであり、ヒステリシス効果を除去する前処理をしています。実験データの範囲外では、線形補外を使うことで、数値計算の安定化を行っています。

### 設計時におけるマルチフィジックスの活用

デバイスは主に電磁場により支配されますが、他の種類のフィジックスによっても影響を受けます。例えば、材料の電気特性は熱の影響によって変化します。また発電機の電気機械的たわみ、振動は全ての設計プロセスで把握されている必要があります。COMSOL 環境に包括的に統合されている AC/DC モジュールは、幅広いフィジックスのモデリングに対応可能です。

## 電磁気シェル

AC/DC モジュールでは、極めて薄い構造に対して、電磁気シミュレーションを適切に実装するために構造物の厚みについての特殊な定式化が内蔵されています。ジオメトリモデル内では、フィジカルな厚さとしてではなく、シェルとして定義されます。そのような薄いシェル構造は、直流、静電場、静磁場および誘導シミュレーション内で使用可能です。特に重要となるのが、電磁適合性（EMC）および電磁妨害（EMI）アプリケーションでの電磁しゃへいです。

## 電磁気学のモデリングための確実なワークフロー

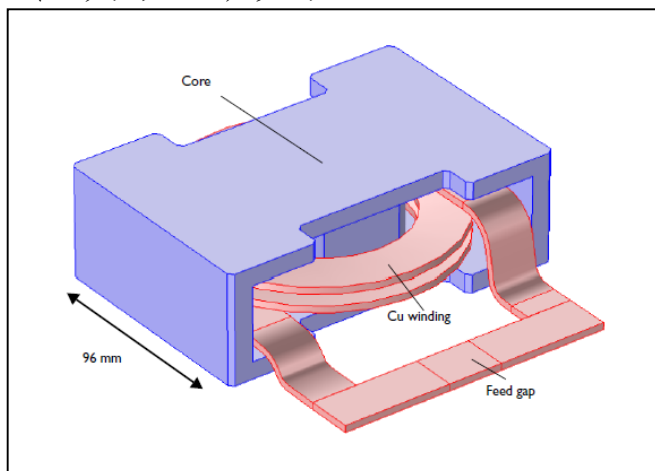
以下に、モジュールの簡単なワークフローのステップを説明します：ジオメトリの定義、材料選択、適切な AC/DC インタフェースの選択、境界と初期条件定義、そして自動的に有限要素メッシュを作成し、解析を行い、結果を可視化します。これら全てのステップは、COMSOL Desktop®からアクセス可能です。AC/DC モジュールのシミュレーションは、プリセットされたマルチフィジックス連成やユーザ定義の連成により、自由自在に全 COMSOL 製品との連成が可能です。典型的なプリセット連成は、AC/DC モジュールと粒子トレーシングモジュールですが、質量の有無にかかわらず電気や磁場は荷電粒子に影響を及ぼし、最適化モジュールは、電圧あるいは電流励起、材料プロパティ、ジオメトリ寸法等の最適化のために、AC/DC モジュールと連成可能です。

## 柔軟性とロバスト

AC/DC モジュールには、2D、3D の定常および動的な電場と磁場が含まれています。AC/DC モジュールは、材料プロパティと境界条件と共に Maxwell 方程式を定式化、解析します。その方程式の解析では、最先端ソルバを活用した数値的に安定したエッジ要素の離散化にもとづき、有限要素を使用して解くことが可能です。異なる定式化では、定常、周波数領域そして時間領域のシミュレーションが可能です。結果は、グラフィック画面上で電磁場、電流と電圧のプリセットプロットを使用して表示されます。もしくはユーザが自由に定義することが可能なフィジックス量と同様、表形式で算出された量が表示されます。

## 2. チュートリアル

### 3Dインダクタのモデリング



出典：INTRODUCTION TO ACDC Module p. 17 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 ACDC を展開し磁場 (mf) 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、磁場を選択し、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定常を選択します。
6. 完了をクリックします。

## ジオメトリ 1

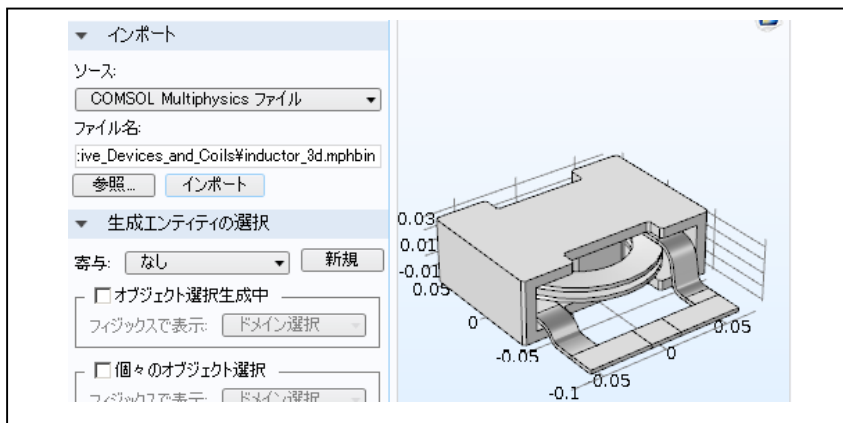
### インポート 1

1. ホームツールバーで、インポートをクリックします。
2. インポートの下で「参照」をクリックし、inductor\_3d.mphbin を選択し、開きます。

注：インストールフォルダ¥COMSOL52¥Multiphysics¥applications

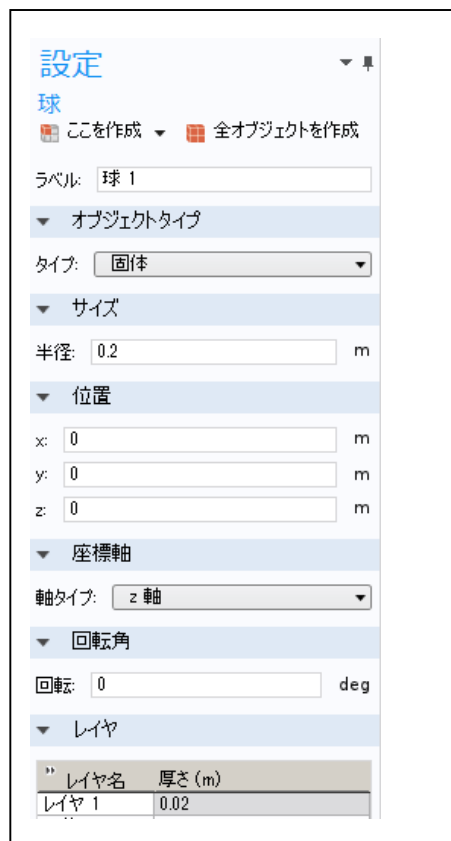
¥ACDC\_Module¥Inductive\_Devices\_and\_Coils¥inductor\_3d.mphbin

3. 「インポート」 ボタンをクリックします。



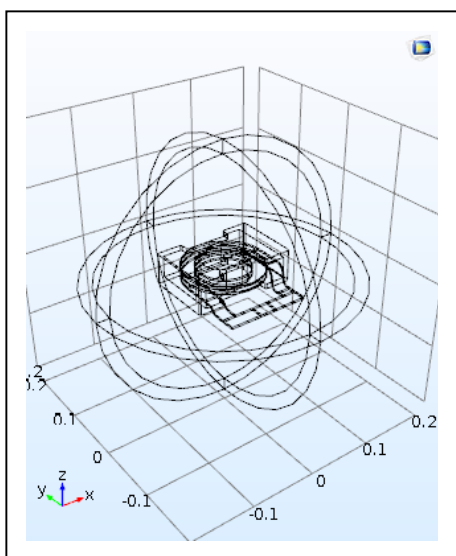
### 球 1

1. ジオメトリツールバーで、球をクリックします。
2. 設定ウィンドウで、半径 0.2 を入力します。
3. 同じ設定ウィンドウでレイヤーセクションに行き、厚みに 0.02 を入力します。
4. 「全オブジェクト作成」 をクリックします。



ユニオンで一体化

1. ジオメトリ 1 の下の、一体化モデルで完成 をクリックします。
2. 設定ウィンドウの「全て作成」をクリックします。
3. グラフィックスウィンドウツールバーで、「画面にわたってズーム」をクリックし、「ワイヤフレームレンダリング」もクリックします。



### 定義－選択

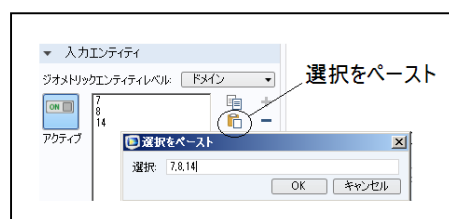
1. 定義ツールバーで、「明示的」をクリックします。
2. ステップ 1) を繰り返して、6 個の明示的ノードを追加します。
3. モデルビルダで明示的ノードをクリックし、設定ウィンドウを開きます。

下記テーブルのようにします。

デフォルトノード名	選択するドメイン名	新規名
明示的 1	7,8,14	Winding
明示的 2	9	Gap
明示的 3	6	Core
明示的 4	1-4, 10-13	Infinite Elements
明示的 5	1-6, 9-13	Non-conducting
明示的 6	5,6,9	Non-conducting without IE

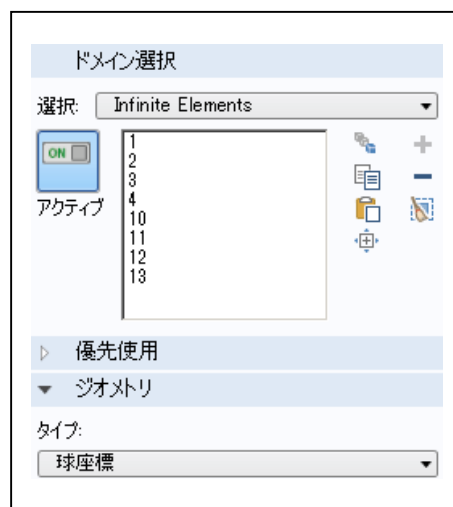
注：「選択をペースト」ボタンをクリックし、番号をキーボードから入力します。

注：1-4 は 1,2,3,4 と書くことの省略形です。



## 定義—無限要素

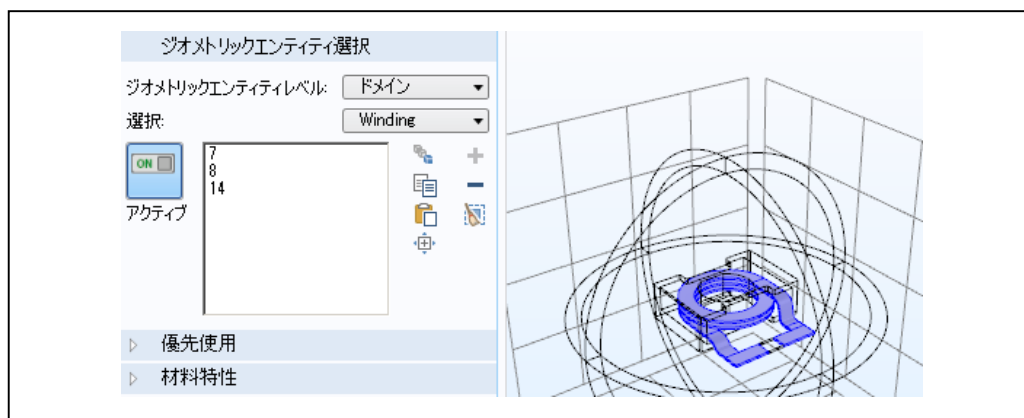
1. 定義ツールバーで「無限要素ドメイン」をクリックします。
2. 設定ウィンドウに行き、ドメイン選択の下で、**Infinite Elements** を選択します。
3. ジオメトリセクションのタイプリストで 球座標 を選択します。



## 材料

### 銅

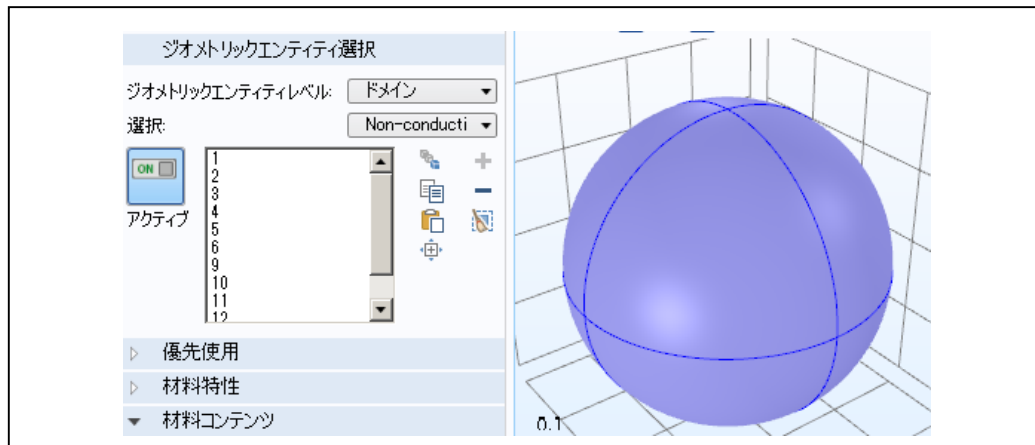
1. ホームツールバーで「材料を追加」をクリックします。
2. 材料追加ウィンドウで、AC/DC の下で **Copper** を選択し、「コンポーネントに追加」をクリックします。
3. モデルビルダで **Copper** をクリックします。
4. 材料設定ウィンドウへ行き、ジオメトリックエンティティセクションの下の選択リストで **Winding** を選択します。



### Air

1. 材料を追加ウィンドウに行きます。標準の下で、**Air** を右クリックし、コンポーネントへ追加を選択します。
2. 材料追加ウィンドウを閉じます。
3. モデルビルダーで **Air** をクリックします。
4. 材料設定ウィンドウへ行き、ジオメトリックエンティティ選択の下で、**Non-conducting** を選択します。

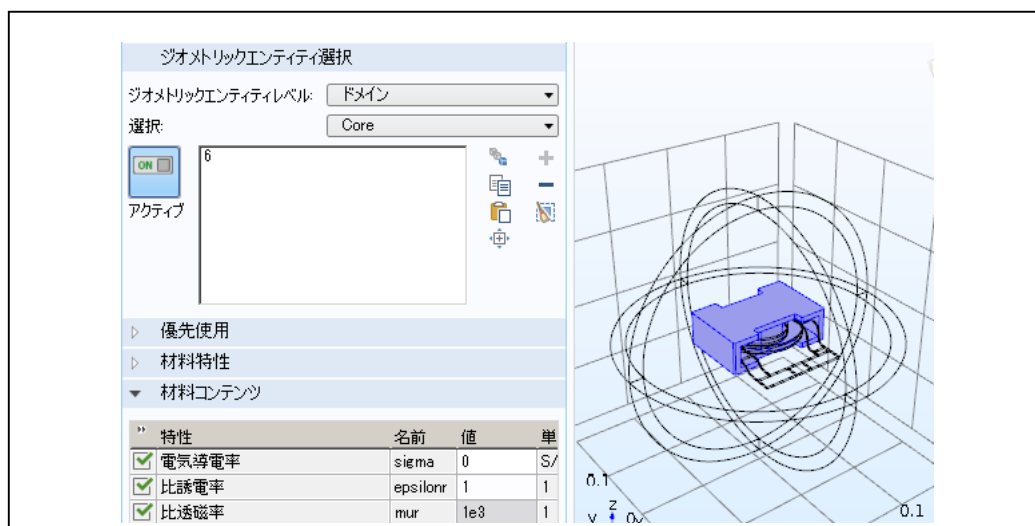




### ユーザー定義 材料3

1. 材料ツールバーで「空白材料」をクリックします。
2. 材料設定ウィンドウでラベルに Core を入力します。
3. ジオメトリックエンティティ選択で、選択リストで Core を選択します。
4. 材料コンテンツのテーブルに、以下を設定します。

電気導電率 0  
 比誘電率 1  
 比透磁率 1e3

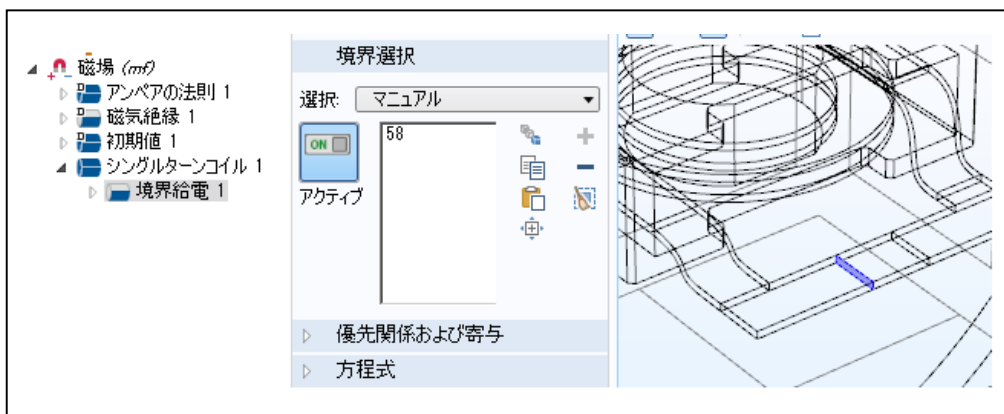


### 磁場(mf)

1. モデルビルダの磁場(mf)をクリックします。
2. ドメイン 1-8、10-14 を選択します。(全ドメインを選択後、9のみを削除しても良い)

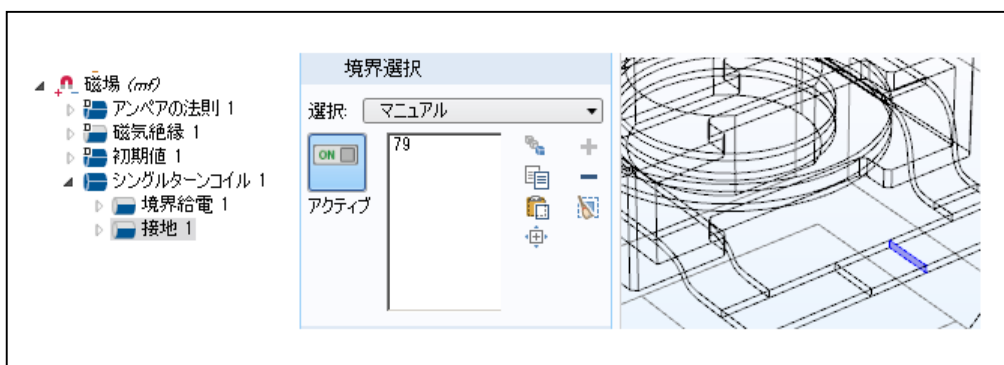
### シングルターンコイル1と境界給電1

1. フィジックスツールバーで「ドメイン」をクリックし、「シングルターンコイル」を選択します。
2. 設定ウィンドウで、ドメイン選択の下で、選択リストから **Winding** を選択します。
3. シングルターンコイル1を右クリックし、境界レベルで、境界給電を選択します。
4. 境界フィードの設定ウィンドウで、「ペーストで選択」をクリックし、58を入力します。
5. OKをクリックします。



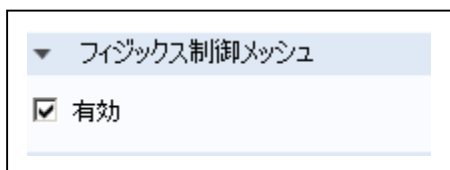
### 接地1

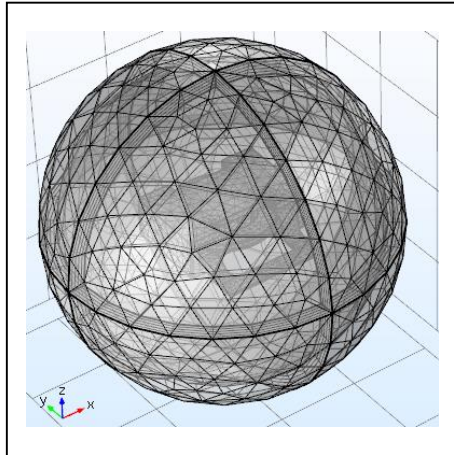
1. シングルターンコイル1を右クリックし、境界条件の接地を選択します。
2. 「ペーストを選択」をクリックし、79を入力します。
3. OKをクリックします。



### メッシュ1

1. モデルビルダーの磁場をクリックします。
2. 設定ウィンドウで、フィジックス制御メッシュセクションに行きます。
3. 適用するにチェックを入れます。
4. メニューツールバーで「メッシュを作成」をクリックします。





### スタディ 1

1. スタディツールバーで、「計算=」をクリックします。

### 結果

#### 磁束密度

