

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

波動光学モジュール

光学的に大規模な構造における
電磁波伝搬のシミュレーション用

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 11.23

1. 波動光学モジュールの概要

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

光学設計構成要素のシミュレーション

波動光学モジュールには、正確な構成要素をシミュレートし光学設計を最適化するための、線形光媒体と非線形光媒体における電磁波伝搬の専用ツールがあります。このモジュールで、高周波数電磁波のシミュレーションを、光学構造の周波数領域と時間領域のいずれかでモデル化できます。さらにこのモジュールでは、不均質で完全に異方性の材料と、増幅または減衰特性の光媒体をサポートして、光媒体のモデル化を実現しています。波動光学モジュールでは、固有周波数モード解析、周波数領域および時間領域の電磁シミュレーションに、いくつかの 2 次元定式化と 3 次元定式化を利用できます。現象は、伝達係数と反射係数の計算などの後処理ツールで、計算、視覚化、解析できます。

あらゆるタイプの光媒体の解析

光学センサー、メタマテリアル、光ファイバー、双方向カップラー、プラズモン装置、光通信における非線形光学的プロセス、そしてレーザービーム伝搬をシミュレートするのは簡単です。これは、2 次元、2 次元軸対象、3 次元空間領域で実行できます。ポートは入出力に定義できるほか、複数のポートが存在する可能性のある、光学的構造の完全透過特性と反射特性を含む S パラメータマトリックスの自動抽出にも定義できます。散乱、周期、連続境界の条件のシミュレートにはさまざまな異なる境界条件を適用できます。完全整合層 (PML) は、無限の自由空間に対する電磁波伝搬のシミュレーションに理想的であり、一方で計算コストは節約できます。場と導出量の数学式を自由に作成できるので、後処理機能では、どのような数量でも、視覚化、評価、インテグレーションできます。

~~~~~

### 光学シミュレーションをシンプルにしたさまざまなツール

波動光学モジュールでは、伝導性、屈折率、誘電率、あるいは透過性など、不均質で異方性の非線形な分散的材料特性の光媒体をシミュレートできます。そのため、COMSOL Multiphysics では、特性が異方性の場合や、これらの材料特性を非線形、不均質、あるいは分散的材料として任意の代数方程式を入力した場合、関連する 3x3 テンソルをアクセスできます。波長や周波数のスイープでは、周波数や波長変数に式を取り込んだ材料特性を定義できます。材料特性を記述する基本方程式や数学をアクセスできるこの柔軟性のおかげで、波動光学モジュールは、磁気回転や、工学的特性メタマテリアルといった、記

述が困難な材料のモデル化にとって完璧なモジュールになっています。また、高次回折モードとグレーデッドインデックス材料でフロケ-周期構造をシミュレートできる重要な機能も組み込まれています。

## 波動光学のその他現象の効果

すべての COMSOL 製品と同様に、波動光学モジュールは COMSOL Multiphysics やその他のアドオンモジュールとシームレスに統合できます。このモジュールとのインテグレーションにより、他の物理特性を電磁波の伝搬と連成できます。たとえば、レーザー加熱、光学装置や構成要素による光の伝搬に対する構造応力と変形の影響をモニタリングできます。

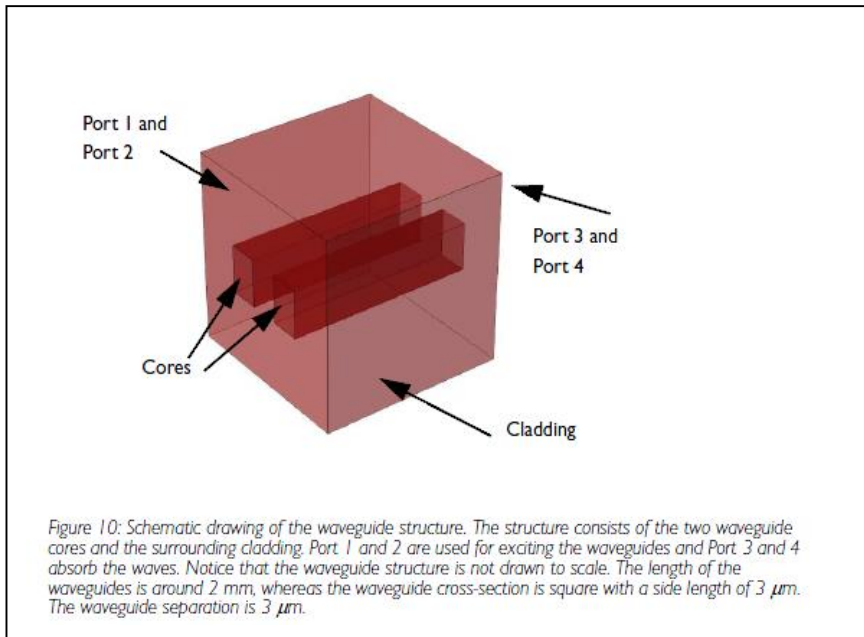
## 革新的ビーム包絡手法による正確な光学モデル化

電磁波伝搬の時間依存性のスタディでは、時間内のすべての変化が、正弦曲線信号として発生することを前提とし、周波数領域で時間調和的な問題を想定するのが普通です。波動光学モジュールには、これらの減少をシミュレートするさまざまなインタフェースが組み込まれています。また、モジュールに組み込まれた一定の機能のおかげで信号の歪みが小さい、非線形問題もシミュレートできます。非線形の影響が強い場合、装置の時間依存性の全面的なスタディが必要です。

従来法で光学伝搬問題を解決すると、伝搬波ごとの解決にかなりの数の要素が必要です。光の伝搬をシミュレートすると、小さな波長が必ず関わってきます。通常、波長に比べて大きな構成要素や装置をモデル化しようとする、大量の計算リソースが必要になります。波動光学モジュールでは、これらのタイプのシミュレーションに革新的なビーム包絡線方式で対応しました。

この新方式の電磁全波伝搬では、マクスウェルの方程式の直接離散化により、従来の近似化の必要性を克服しました。ここで、電界は、ゆっくり変化する包絡関数と急速に変化する指数関数の積を表します。これで、幾何学的寸法が、波長よりはるかに大きく、光波を光線に近似できない光学的に大規模なシステムでも、正確なシミュレーションが可能になります。従来の電磁全波伝搬方式は、波動光学モジュールでも有効であり、小さいジオメトリであれば適切に使用できます。

## 2. チュートリアル 方向性カップラー



出典：INTRODUCTION TO Wave Optics Module p.24 以降

### 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光学を展開し波動光学の下で、電磁波（ビームエンベロープ）(ewbe) 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（ビームエンベロープ）(embe) 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境界モード解析を選択します。

6. 完了をクリックします。

## グローバル定義—パラメータ

1. ホームツールバーで、パラメータをクリックします。
2. パラメータの設定ウィンドウで以下を入力します。

| ▼ パラメータ |            |               |
|---------|------------|---------------|
| 名前      | 式          | 値             |
| wl      | 1.15[um]   | 1.15E-6 m     |
| f0      | c_const/wl | 2.6069E14 1/s |
| a       | 3[um]      | 3E-6 m        |
| d       | 3[um]      | 3E-6 m        |
| len     | 2.1[mm]    | 0.0021 m      |
| width   | 6*a        | 1.8E-5 m      |
| height  | 4*a        | 1.2E-5 m      |
| ncl     | 3.47       | 3.47          |
| dn      | 0.005      | 0.005         |
| nco     | ncl+dn     | 3.475         |

注：ファイルからロードで読み込むこともできます。その場合、directional\_coupler.txt を読み込みます。

## ジオメトリ 1

### ブロック 1

1. ジオメトリツールバーで、「ブロック」をクリックします。
2. ブロックの設定ウィンドウに行き、サイズセクションで

|    |        |
|----|--------|
| 幅  | len    |
| 深さ | width  |
| 高さ | height |

3. 位置セクションで、ベースを中心とします。
4. 「ここを作成」をクリックします。

### ブロック 2

1. ジオメトリツールバーで、「ブロック」をクリックします。
2. 設定ウィンドウで、サイズセクションに以下を入力します。

|    |     |
|----|-----|
| 幅  | len |
| 深さ | a   |
| 高さ | a   |

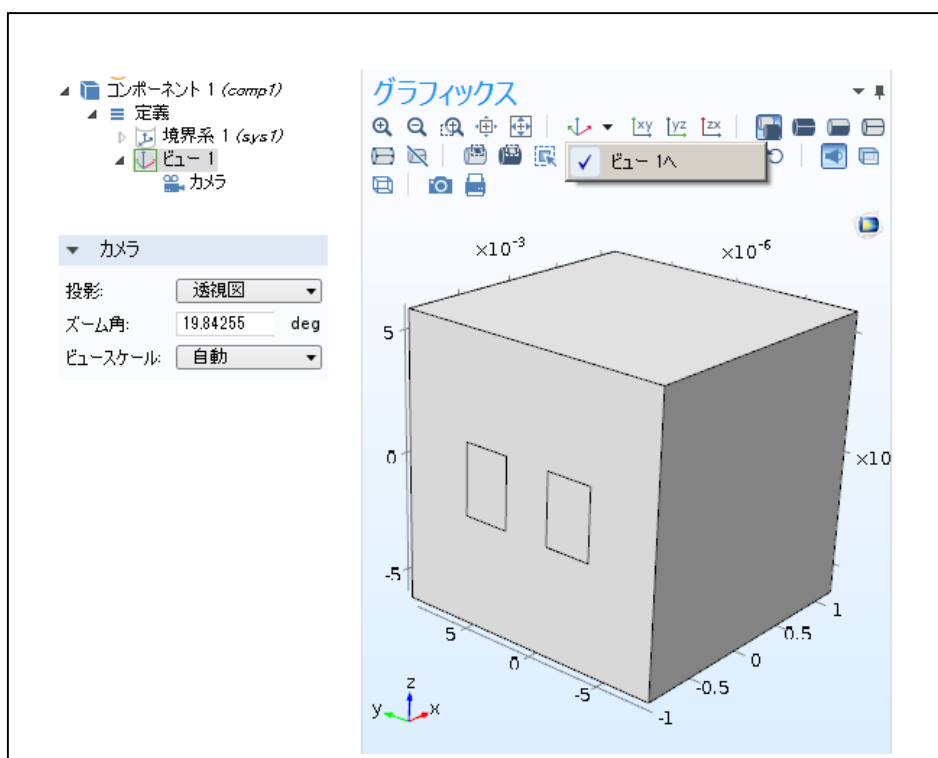
3. 位置セクションで、ベースを中心とします。
4. y に -d を入力します。
5. 「ここを作成」をクリックします。

### ブロック 3

1. ブロック 2 を右クリックし、複製を選択します。
2. 設定ウィンドウに行き、位置セクションで y に d を入力します。
3. 「全オブジェクト作成」をクリックします。

### 定義

1. モデルビルダで、コンポーネント 1 : 定義 : ビュー 1 を展開し、カメラをクリックします。
2. 設定ウィンドウで、カメラセクションに行き、ビュースケールリストから自動を選択します。
3. グラフィックスツールバーで、「ビュー 1 へ行く」



### 材料

#### 材料 1

1. 材料ツールバーで、「ブランク材料」をクリックします。
2. 材料コンテンツセクションで、次の設定をします。

|        |     |
|--------|-----|
| 屈折率、実部 | ncl |
| 屈折率、虚部 | 0.0 |

#### 材料 2

1. 材料ツールバーで、「ブランク材料」をクリックします。
2. 設定ウィンドウにき、ラベルに **Implanted GaAs core** を設定します。
3. ドメイン 2、3 のみを選択します。(Waveguide core のみを選択します。)
4. 材料コンテンツで、下記の設定をします。

|        |     |
|--------|-----|
| 屈折率、実部 | nco |
| 屈折率、虚部 | 0.0 |

### 電磁波、ビーム包絡

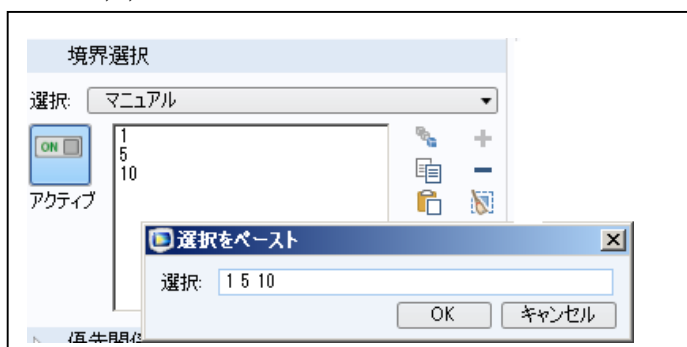
1. 電磁波（ビームエンベロップ）をクリックします。
2. 設定ウィンドウの波動ベクトルセクションで方向の数リストで、単方向を選択します。
3.  $k_1$  の x 成分に `ewbe.beta_1` を入力します。

注：この設定によって、最低次の導波路モードの波数ベクトルを指定しています。この設定で、電場の位相は完全に最低次数のモードと整合がとれますが、励起された高次モードとは若干ずれています。

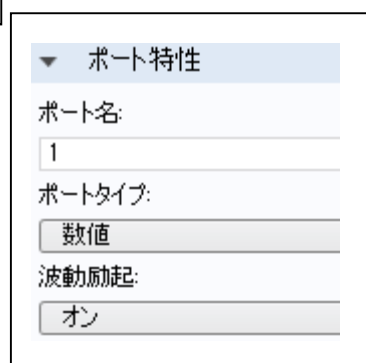
### ポート 1

入力境界で波を励起し、出力境界で波を吸収するために、各境界毎に数値ポートを使います。最初の 2 個のポートで波を励起します。各数値モードでは境界モード解析スタディステップでの計算が行われます。境界モード解析は固有値計算が行われ、そのポートに対応するモード場と伝播定数が計算されます。

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 1,5,10 を選択します。



3. 設定ウィンドウに行き、ポート特性セクションで、ポートタイプリストで、数値を選択します。
4. このポートを励起リストで、オン を選択します。



## ポート 2

1. ポート 1 を右クリックし、複製を選択します。

## ポート 3

1. フィジックツールバーで、「境界」をクリックし、「ポート」を選択します。
2. 境界 16-18 を選択します。
3. 設定ウィンドウに行き、ポート特性セクションで、ポートタイプリストで、数値を選択します。

## ポート 4

1. ポート 3 を右クリックし、複製を選択します。

## メッシュ

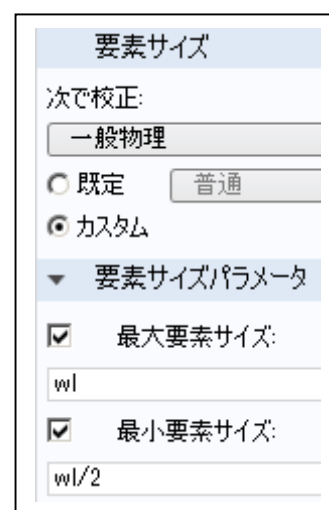
### フリーメッシュ三角形 1

1. メッシュツールバーで、「境界」をクリックし、「フリーメッシュ三角形」を選択します。
2. 境界 1,5,10 のみを選択します。

### サイズ 1

1. フリーメッシュ三角形 1 を右クリックし、サイズを選択します。
2. 要素サイズセクションに行き、カスタムにチェックを入れます。
3. 要素サイズパラメタセクションで、最大要素サイズにチェックを入れ、wl(ダブリューエル)を入力します。
4. 最小要素サイズにチェックを入れ、wl/2 を入力します。

注：ビーム包絡を使う場合には、最大要素サイズは1波長あれば十分です。



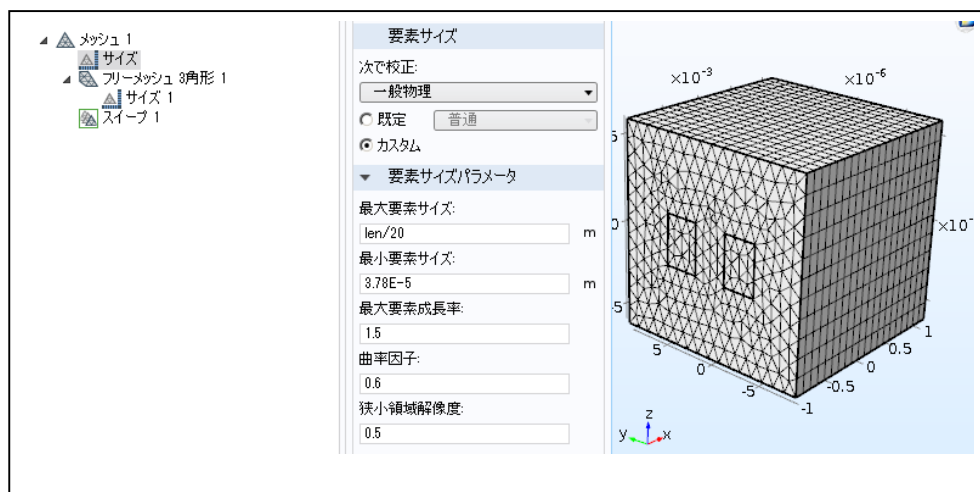
### スweep 1

1. メッシュツールバーで、「スweep」をクリックします。

### サイズ

1. メッシュ 1 の下の、サイズをクリックします。
2. 設定ウィンドウで、要素サイズセクションに行き、カスタムにチェックを入れます。
3. 最大要素サイズにチェックを入れ、len/20 を入力します。
4. 「全て作成」をクリックします。





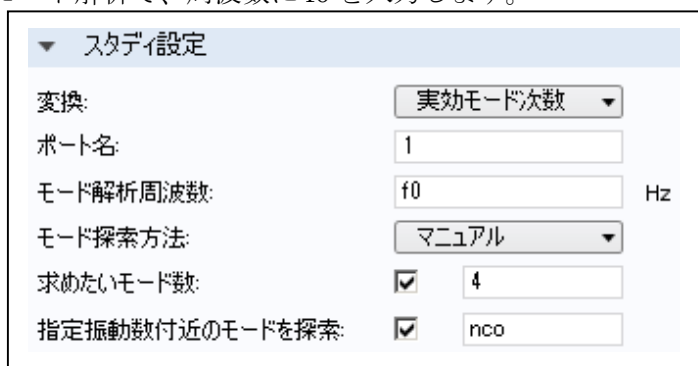
## スタディ 1

1. スタディ 1 をクリックします。
2. 設定ウィンドウで、デフォルトプロットを生成のチェックを外します。

## ステップ 1 : 境界モード解析

ここでは 4 つの低次モードを計算します。最初の二つのモードは対称です。導波路の断面が正方形で有る場合には z 方向に偏向するモードと、y 方向に偏向するモードがあります。3 番目と 4 番目のモードは、z 方向に偏向するモードと、y 方向に偏向するモードがあります。

1. スタディ 1、ステップ 1:境界モード解析をクリックします。
2. 設定ウィンドウで、求めたいモード数にチェックを入れ、4 を入力します。これは最低次のモードを 4 個見つけることを意味します。
3. 指定振動数付近のモードを探索にチェックを入れ、nco を入力します。これは導波路のコアの屈折率に近い実効モード次数をもつモードを探索することを意味しています。
4. モード解析で、周波数に f0 を入力します。

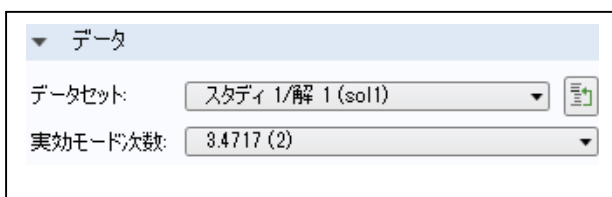


5. 境界モード解析ステップのみを計算するために、ステップ 1:境界モード解析を右クリックし、「このステップを計算」を選択します。

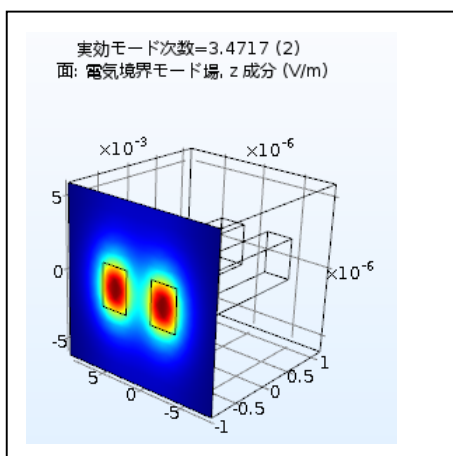
## 結果

### 3Dプロットグループ 1

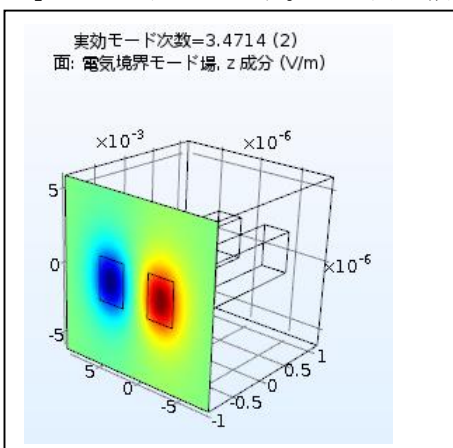
1. ホームツールバーで、「表示グループの追加」をクリックし、「3Dプロットグループ」を選択します。
2. 3Dプロットグループツールバーで、「面」を選択します。
3. 設定ウィンドウで、式に  $ewbe.tEbm1z$  を入力します。
4. 3Dプロットグループ 1 をクリックします。
5. 設定ウィンドウで、データセクションに行き、実効モード次数で最大のものを選択します。これらのモードはペアとなって縮退しているため、3.4717(2)を選びます。



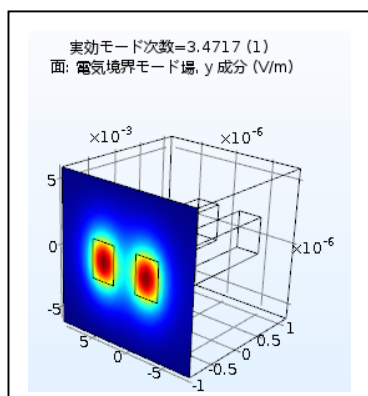
6. 「plot」をクリックします。z方向に偏向する対称モードが表示されます。



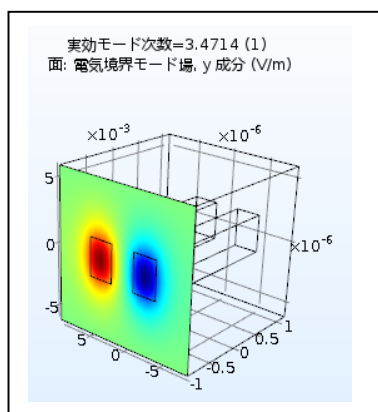
7. 有効モード次数から、3.4714(2)を選択します。
8. 「plot」をクリックします。z方向に偏向する反対称モードが表示されます。



9. 3Dプロットグループ1の面1をクリックします。
10. ewbe.tEbm1yを入力します。
11. 3Dプロットグループ1をクリックします。
12. 3.4717(1)をクリックします。
13. 「plot」をクリックします。y方向に偏向する対称モードが表示されます。



14. 3.4714(1)をクリックします。
15. 「plot」をクリックします。y方向に偏向する反対称モードが表示されます。

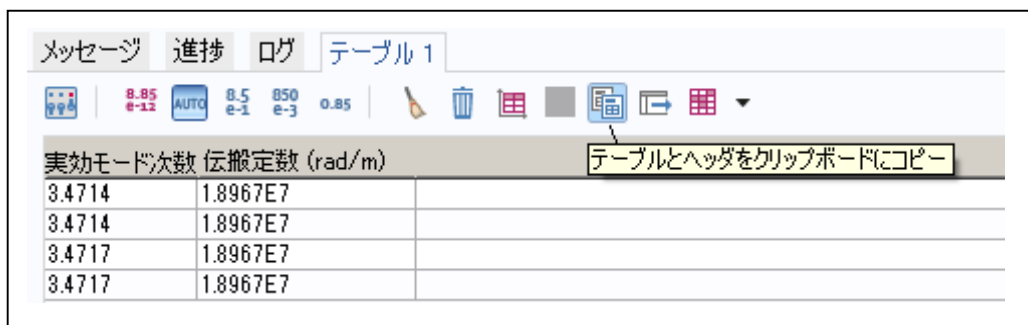


### 計算値

1. 結果ツールバーで、「グローバル評価」をクリックします。
2. 設定ウィンドウで、ewbe.beta\_1を入力します。ポート1における伝播定数です。
3. 「=評価」をクリックします。
4. テーブルウィンドウで、「フル精度」をクリックします。

| 実効モード  | フル精度 定数 (rad/m) |
|--------|-----------------|
| 3.4714 | 1.8967E7        |
| 3.4714 | 1.8967E7        |
| 3.4717 | 1.8967E7        |
| 3.4717 | 1.8967E7        |

5. テーブルウィンドウで、「テーブルとヘッダーをクリップボードにコピー」をクリックします。



6. メモ帳にペーストします。(あるいは適当なエディタ)



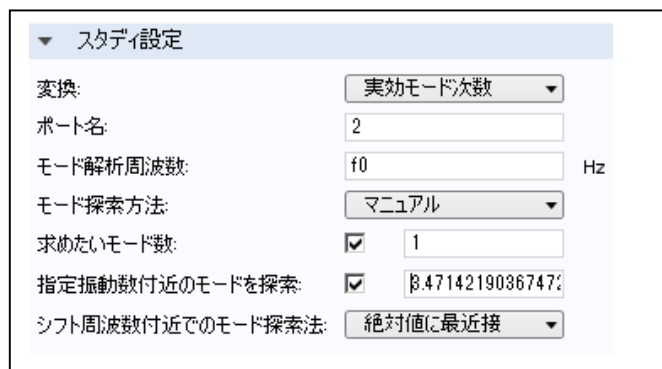
## スタディ 1

### ステップ 1 : 境界モード解析

1. スタディ 1 の下のステップ 1:境界モード解析をクリックします。
2. 設定ウィンドウに行き、求めたいモード数を 1 にします。
3. 指定振動数付近のモードを探索に、3.471671696036896 を入力します。  
(先ほどペーストしたエディタの数値をコピー&ペーストしてもよい)

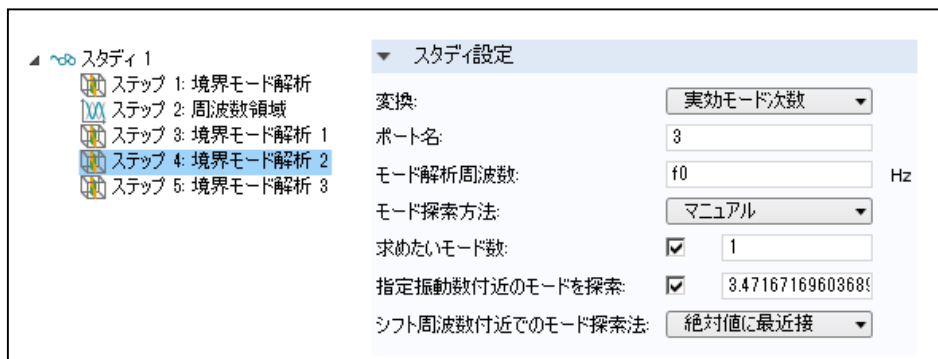
### ステップ 3 : 境界モード解析 1

1. ステップ 1 : 境界モード解析を右クリックし、複製を選択します。
2. 設定ウィンドウに行き、指定振動数付近のモードを探索に、3.471421903674721 を入力します。
3. ポート名を 2 にします。



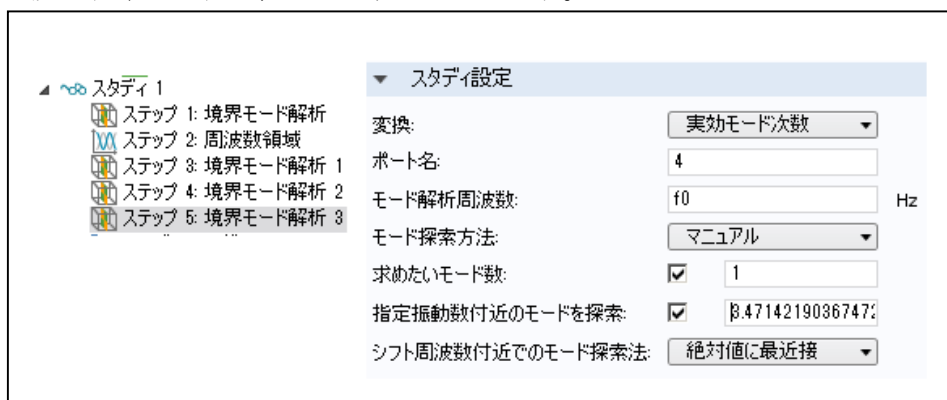
#### ステップ 4. 境界モード解析 2

1. ステップ 1 : 境界モード解析と、ステップ 3 : 境界モード解析 1 の両方を選択します。
2. ステップ 1 : 境界モード解析を右クリックし、複製を選択します。
3. ステップ 4 : 境界モード解析 2 をクリックし、ポート名を 3 にします。



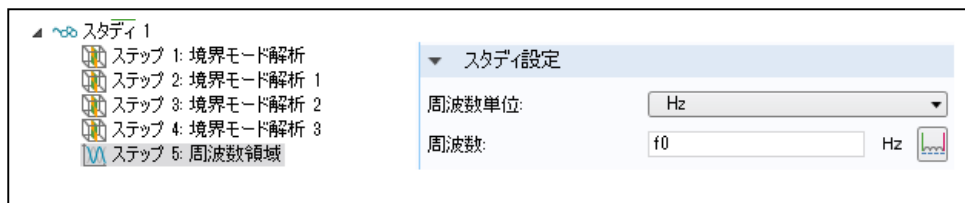
#### ステップ 5 : 境界モード解析 3

1. ステップ 5 : 境界モード解析 3 をクリックします。
2. 設定ウィンドウで、ポート名を 4 にします。



#### ステップ 2 : 周波数領域

1. スタディ 1 : ステップ 2 : 周波数領域をクリックします。
2. 設定ウィンドウで、周波数に f0 を入力します。
3. ステップ 2 : 周波数領域をマウスでドラッグして、ステップ 4 : 境界モード解析 3 の下に移動させます。

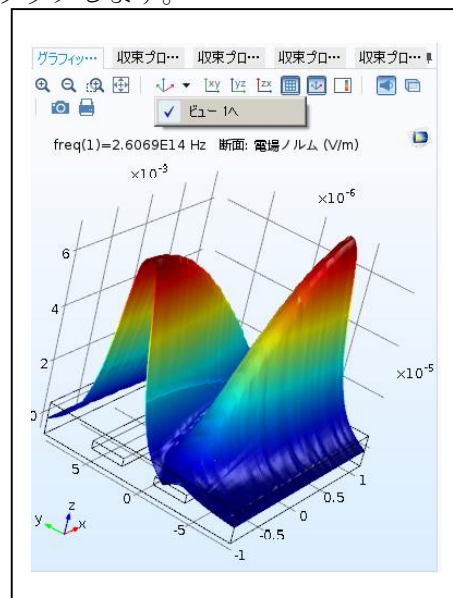


4. スタディ 1 を右クリックし、「計算 =」をクリックします。

## 結果

### 3Dプロットグループ1

1. 3Dプロットグループ1の下の方1を右クリックし、削除を選択し、Yesをクリックします。
2. 3Dプロットグループ1ツールバーから「断面」をクリックします。
3. 設定ウィンドウで、xy面を選択します。
4. 平面数に1を入れます。
5. 断面1を右クリックし、変形を選択します。
6. 設定ウィンドウで、z方向の変位に、 $ewbe.normE$ を入力します。
7. 「plot」をクリックします。
8. グラフィックスウィンドウで、「ビュー1」へ行く。
9. 「画面にわたってズーム」をクリックします。



## 電磁波 (ビームエンベロープ)

### ポート2

1. 電磁波、ビーム包絡で、ポート2を選びます。
2. 設定ウィンドウで、位相を  $\pi$  にします。

### スタディ1

1. ホームツールバーで、「計算=」をクリックします。

## 結果

他の導波路が励起されている様子が分かります。

