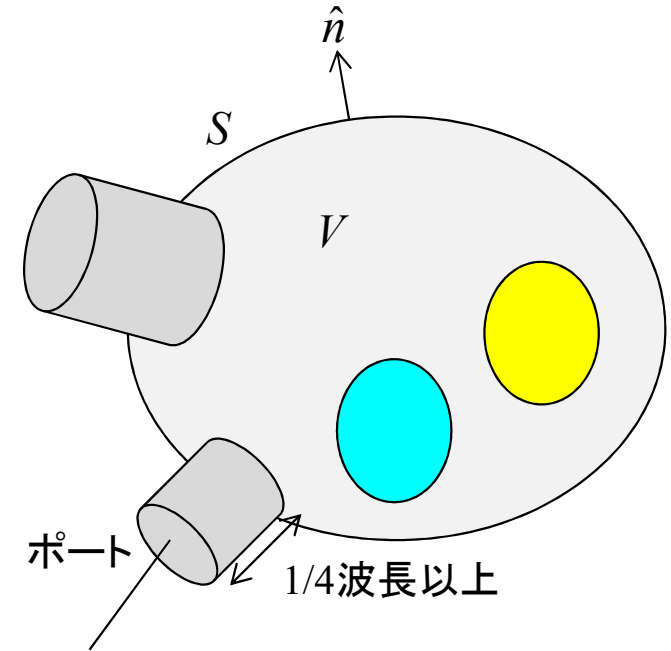


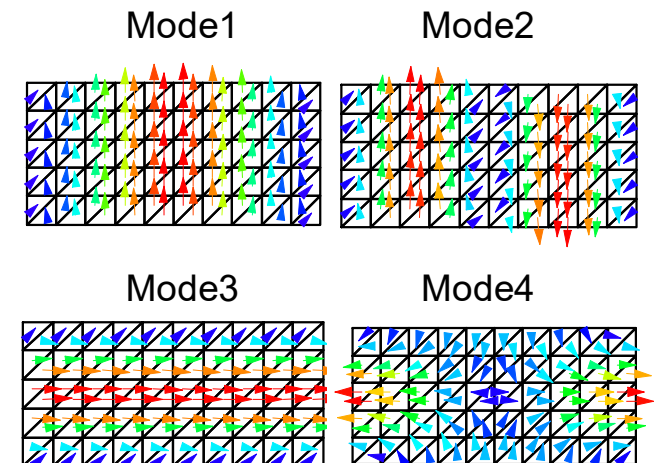
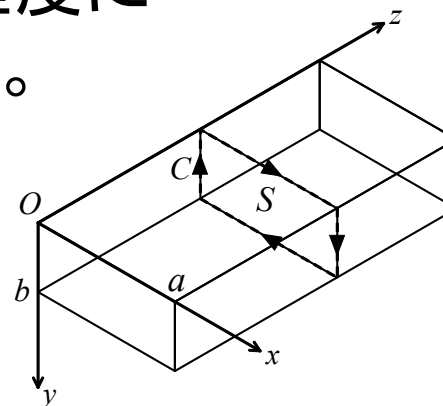
モデリングの勘所

励振と境界条件について

- 導波路モード励振は境界にて行う。
- 導波路モード給電では、導波路部分は少なくとも1/2波長以上はモデル化する。(不連続部で発生した高次モードが十分減衰するように)
- 単一モード条件であるかどうかを確認する。多モードならば、それらも考慮して解析する。
- 開放型線路の場合には電磁界モードが端で十分減衰する程度に広い面積でポートを定義する。



$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1^{(+)} + \sum_u B_u \mathbf{E}_u^{(-)}$$



モード関数の表現

導波路内の電磁界はモードの和で表現できる

$$\begin{cases} \mathbf{E} = \sum_u \left(A_u \mathbf{E}_u^{(+)} + B_u \mathbf{E}_u^{(-)} \right) \\ \mathbf{H} = \sum_u \left(A_u \mathbf{H}_u^{(+)} + B_u \mathbf{H}_u^{(-)} \right) \end{cases}$$

u : モードの番号 (TEM, TE_{mn} , TM_{mn})

モード関数

$$\begin{cases} \mathbf{E}_u^{(\pm)}(\mathbf{r}) = \mathbf{e}_{tu}(\mathbf{r}) \exp(\mp \gamma_u z) \\ \mathbf{H}_u^{(\pm)}(\mathbf{r}) = \left\{ \pm \mathbf{h}_{tu}(\mathbf{r}) + \mathbf{h}_{lu}(\mathbf{r}) \right\} \exp(\mp \gamma_u z) \end{cases}$$

モード分布

伝搬定数

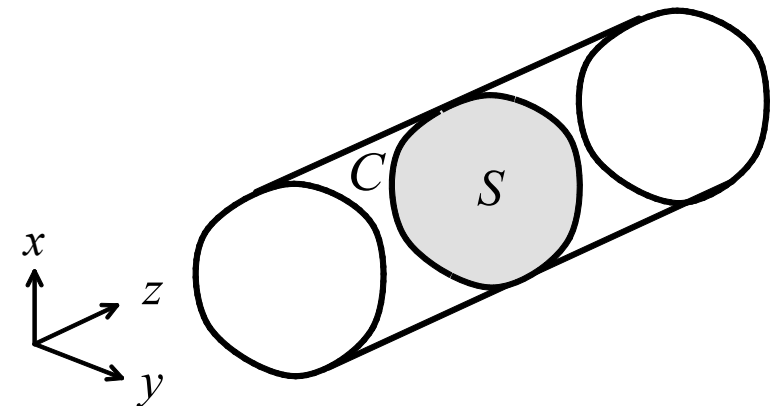
t : transversal (断面方向) ... xy 成分
 l : longitudinal (軸方向) ... z 成分

モード関数は導波路問題の固有値問題を解いて得られる。つまり、非励振の問題の解である。モード解析によって、モードの分布とそのモードの伝搬定数が得られる。

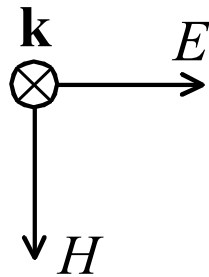
モード関数の直交性

$$\begin{cases} \iint_S \left(\mathbf{E}_u^{(\pm)} \times \mathbf{H}_v^{(+)} \right) \cdot d\mathbf{S} = +\delta_{uv} e^{(\mp \gamma_u - \gamma_v)z} \\ \iint_S \left(\mathbf{E}_u^{(\pm)} \times \mathbf{H}_v^{(-)} \right) \cdot d\mathbf{S} = -\delta_{uv} e^{(\mp \gamma_u + \gamma_v)z} \end{cases}$$

$$\delta_{uv} = 1 (u = v), 0 (u \neq v)$$



波数ベクトル

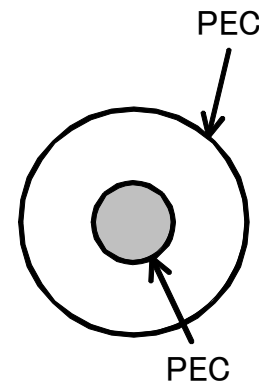


(a) 自由空間

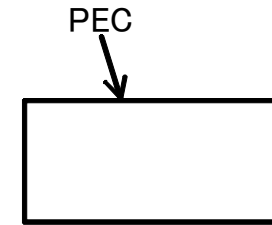
PEC(金属)



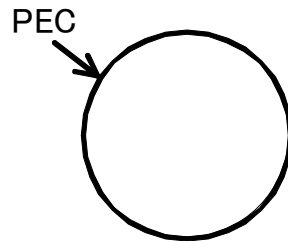
(b) 平行二本線路
(レッヘル線路)



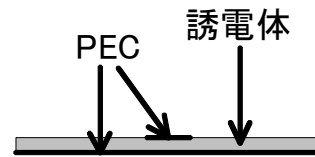
(c) 同軸線路



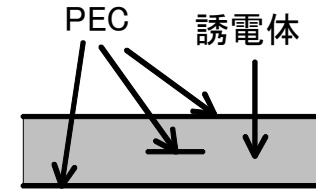
(d) 方形導波管



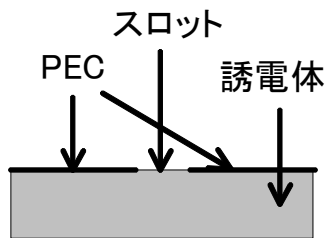
(e) 円形導波管



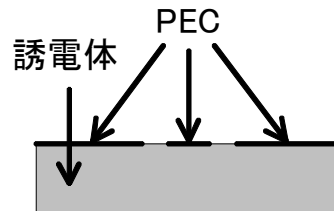
(f) マイクロストリップ線路



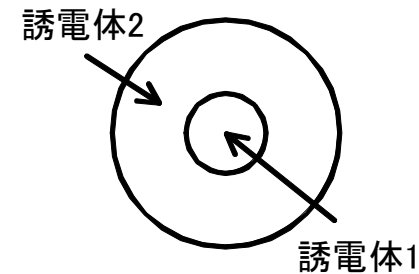
(g) ストリップ線路
(トリプレート線路)



(h) スロット線路



(i) コプレーナガイド



(j) 光ファイバ

導波路モードの考え方



- ✿線路は各ブロックの信号伝送に用いられる。
- ✿不連続部では電磁界の境界条件を満たすように高次モードが発生する。減衰モードはその場所を離れると指数関数的に減衰する。
- ✿線路は普通、シングルモード(単一モード)で用いる。同軸ケーブルも高周波になるほど細くなるのはこのため。マルチモード(多モード)では線路の曲げ方等によって特性は大きく変化するので安定動作しない。
- ✿線路は断面形状が無限に続くものとしてモードを計算しているので、不連続部やコーナー部では予期しない放射などが生じ得る。
- ✿線路の断面は理想的には2次元の無限に広い面を必要とするので(導波管のような閉構造は別)、線路を近づけると予期しない線路間の結合が起こる。

カットオフ周波数

fcu (GHz)

Analytic

FEM

(1,0): 2.58 Mode1: 2.58

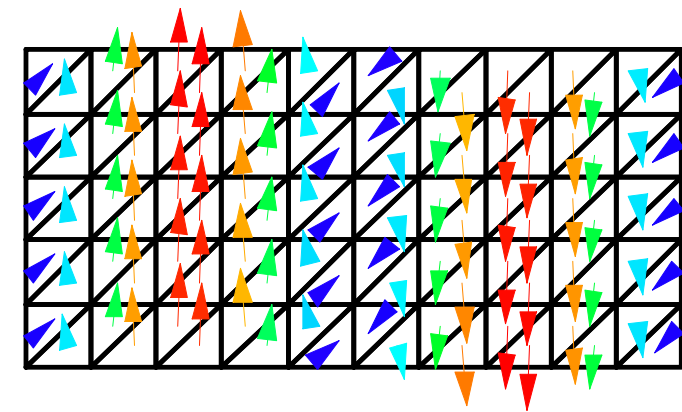
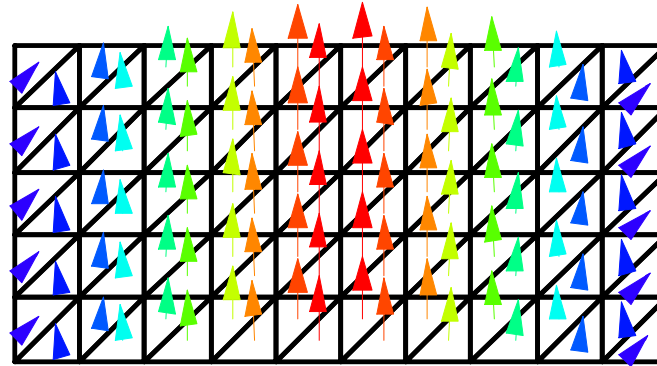
(0,1): 5.15 Mode2: 5.13

(2,0): 5.16 Mode3: 5.30

(1,1): 5.76 Mode4: 5.92

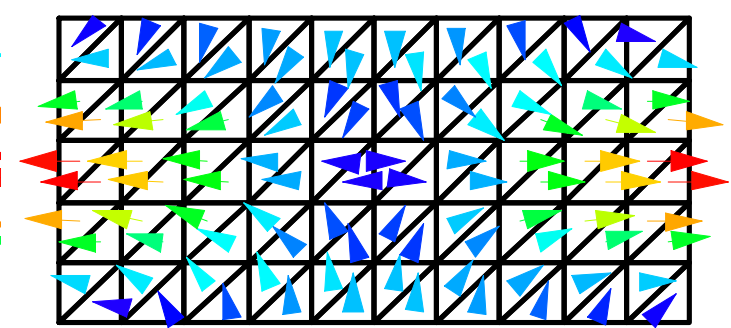
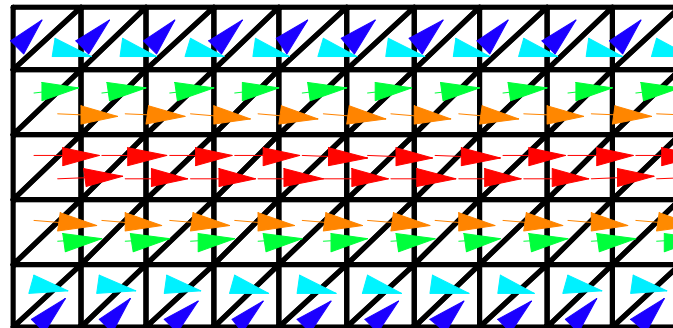
Mode1

Mode2

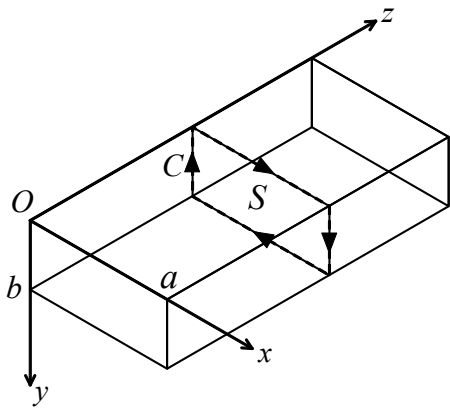


Mode3

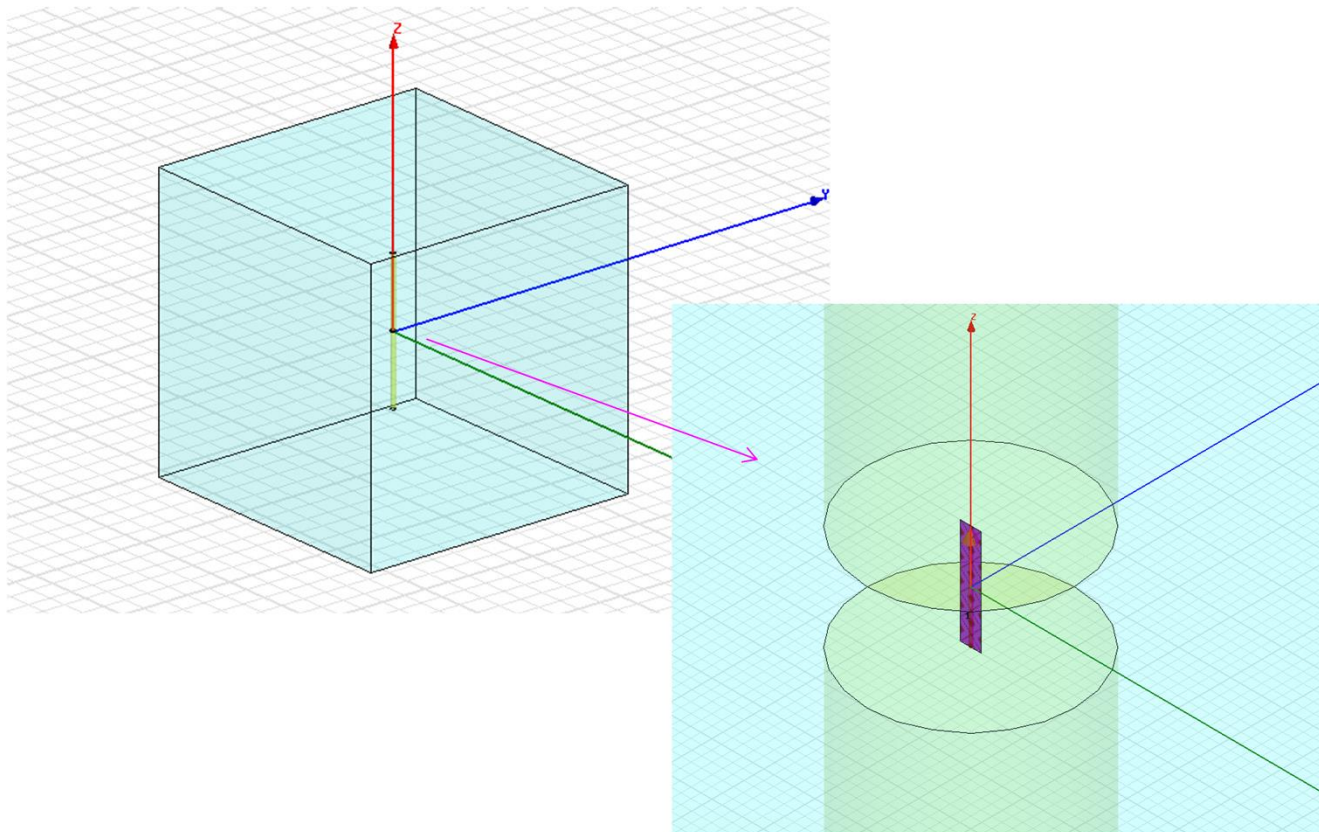
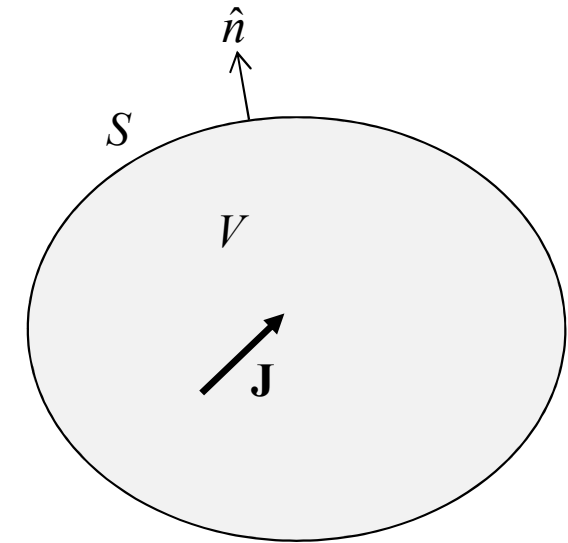
Mode4



高次モードではより多くのメッシュ分割が必要

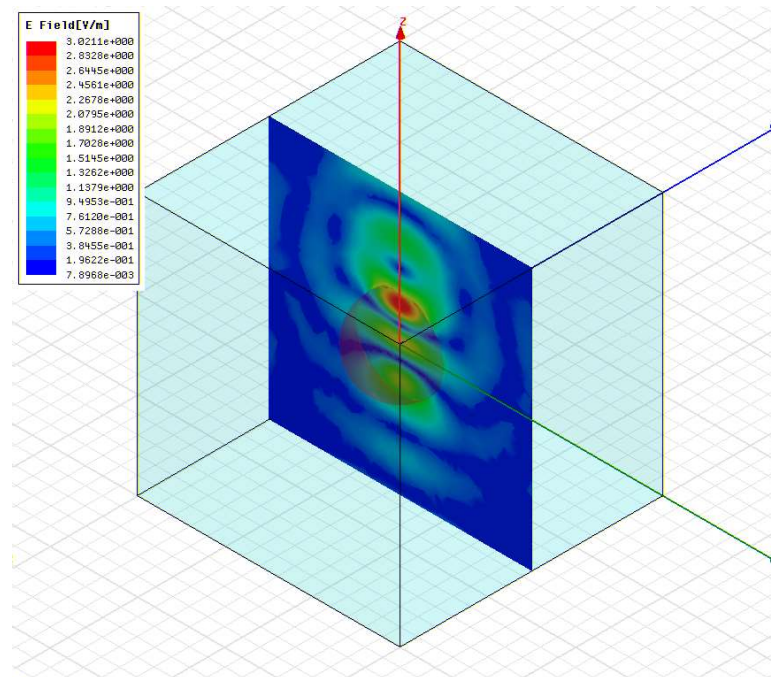
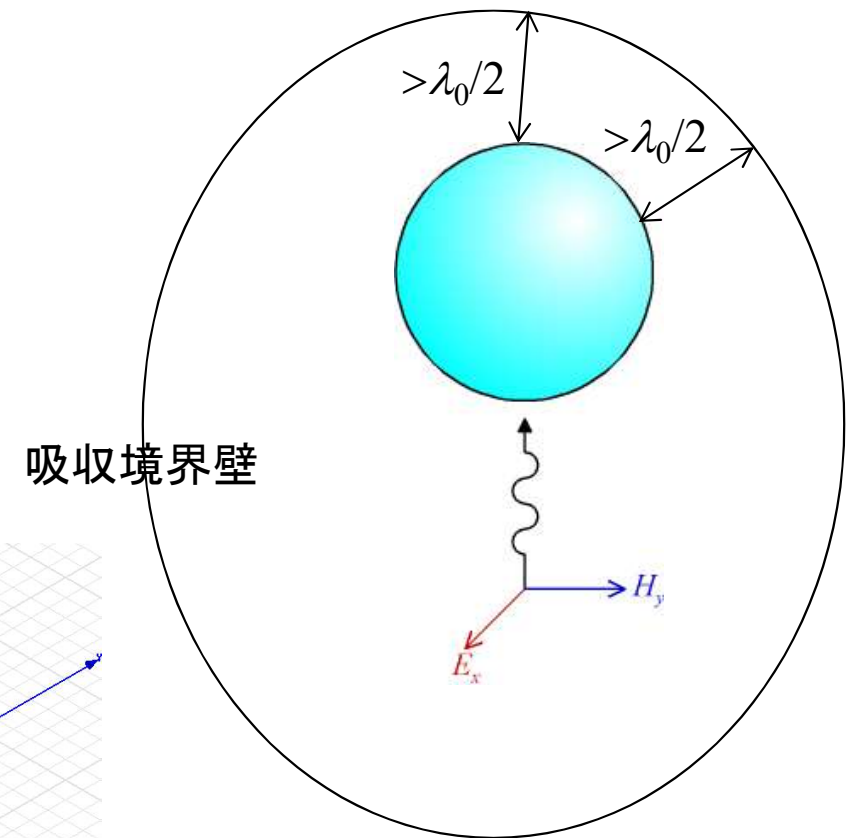


- 電圧・電流源励振は体積内にて行う。
- 電圧・電流源励振は波長に比して微小であることが基本である。



励振方法3: 平面波入射

- 平面波入射の場合は、物体から吸収境界壁までの距離は1/2波長程度以上離す。
- RCS (Radar Cross Section)解析に使われる。

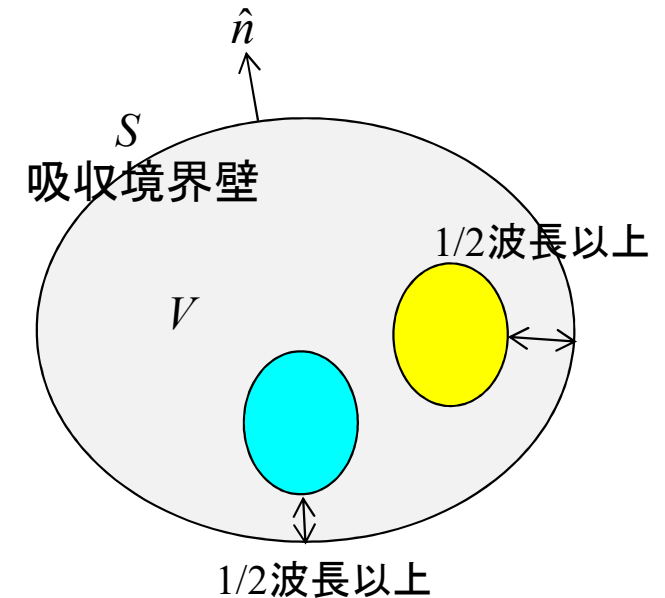


吸収境界条件

■ FEMはこのように全空間にメッシュを切るのので、放射するような開放空間を扱うには吸収境界条件(ABC, Absorbing Boundary Condition)を用いる必要がある。

■ 物体からABCまでの距離は1/2波長以上離す必要がある。

■ ABCは平面波をうまく吸収するように出来ているので、なるべく離れた方が良いが、あまり空間を大きくすると無駄に計算時間がかかるのでトレードオフとなる。



その他境界条件

- 電気壁 (PEC)・・・電界の接線成分が0
- 磁気壁 (PMC)・・・磁界の接線成分が0
 - ・対称構造の解析領域の削減などで用いる
- 表面インピーダンス

・導電率が大きな有限値で、表皮厚が薄くて波長が非常に短い導体内部を解析するかわりに表面インピーダンス近似を用いる。

・波長に比して微小なコルゲーション構造などの解析に用いる。

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad R_s = \frac{2}{\delta\sigma}$$

■ 周期境界壁

- ・周期構造の1周期の解析に用いる。
- ・大規模アレーアンテナ、EBG構造、メタマテリアル構造などの解析でよく用いられる。



1. モデリング(解析モデルを描く)。
どこまで詳細にモデル化すべきか？
⇒(吸収境界を適用できる条件を満たす、
あるいは(放射以外の)電磁界が広がる
範囲まで
2. 媒質を指定する。
3. 境界条件(全境界で指定)、励振モデルを指定する。
解の一意性より、モデル境界周囲の全ての境界条件を指
定しなければならない。
4. 解析周波数、収束条件、周波数スイープ範囲を指定する。
メッシュサイズは波長に比して十分小さく(1辺1/10波長程
度以下)なければならないため、メッシュを自動生成する周
波数よりも高い周波数の結果は信頼できない可能性がある
る。また、共振現象があり、共振周波数を境に電磁界分布
が大きくことなる場合は注意が必要である。(場合によつて
は、周波数スイープを分ける)
5. 後処理。必要に応じて、Sパラメータ、指向性、利得、電磁
界分布などを表示したり出力したりする。

1. ユーザーが描いたモデルに従ってメッシュを自動生成する。
2. 各要素に媒質定数や境界条件を設定し、励振の条件も読み込む。
3. Portの2-D FEMモード解析(伝搬定数とモード関数)を行い、3-D FEM解析の準備をする。
4. 3-D FEM解析を行い、電磁界分布を得る。
5. 収束条件を計算し、収束条件に達していなかったら電磁界の強い部分をさらに細かいメッシュに変更し、ステップ3に戻る。収束条件を満たしていたら次のステップへ。
6. 周波数スイープが指定されている場合は、今のメッシュを用いて最初の周波数から順番に解析する。最後の周波数の解析が終わったら終了。



シミュレータをうまく使うコツ

1. まずは、ダイポールアンテナ、方形導波管、マイクロストリップ線路などの規範問題でシミュレータの動作を確認。
(参考: 電子情報通信学会エレクトロニクスシミュレーション研究会のホームページにある規範問題)
<http://www.ieice.org/~est/>
2. 収束が単調減少しているかどうか確認。単調減少でない場合、偶然収束条件を満たしてしまった可能性がある。この解決法は次の手動メッシュが有効。
3. 最初から電磁界が集中するとわかっているところ、あるいは微細な構造で細かくメッシュを切らなければならないところは、メッシュオペレーションを使って手動で細かい初期メッシュになるように指定する。場合によっては、ダミーのオブジェクトを描いて細かいメッシュの部分指定する。
4. エラーが出て、何かよくわからないときは、エラーが出なくなるまでオブジェクトなどを少しずつ削除していき、原因となるオブジェクト近傍を発見する。
5. 後処理で電磁界分布をビジュアルに描き、アニメーションを表示して、期待した通りの動きをしているか確認する。特に吸収境界壁はしっかりと放射するように電磁界が吸い込まれているかどうか、など。



