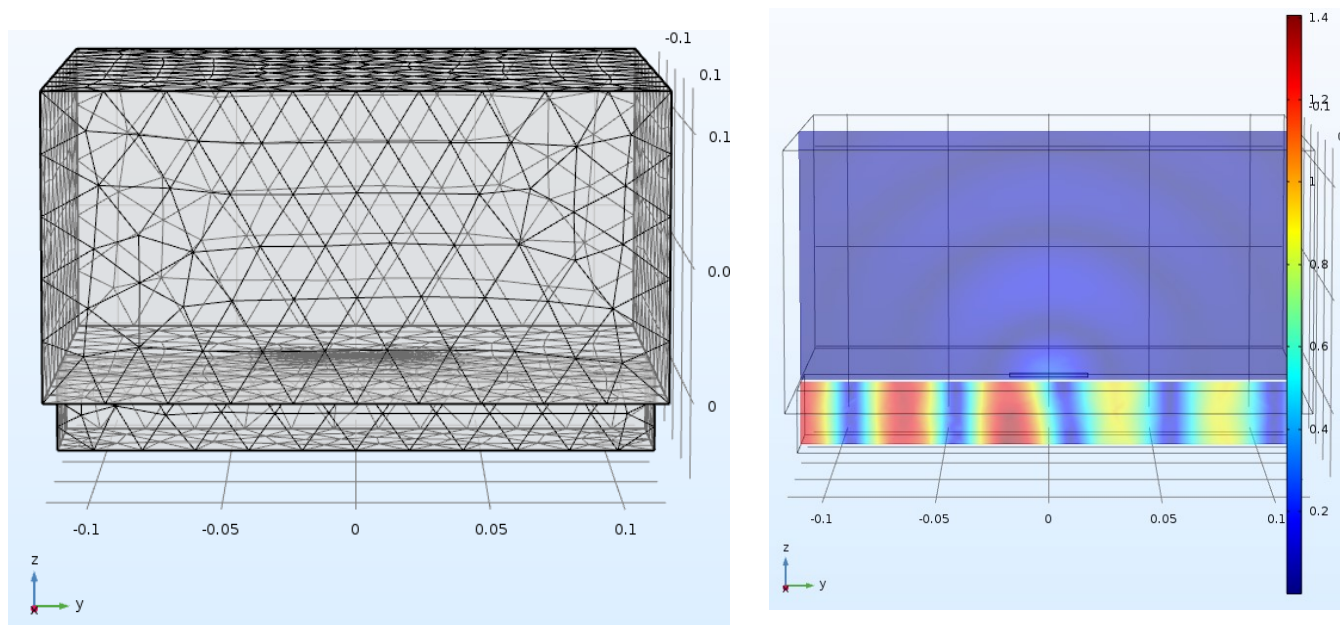


有限要素法による電磁界解析の実際 ～ポート励振の理論とCOMSOLにおける実際～



東京工業大学 環境・社会理工学院
平野 拓一

E-mail: hirano.t.aa@m.titech.ac.jp

これまでのセミナー

有限要素法による電磁界シミュレーション入門

■基礎(ベクトル基底関数)

(2016/1/14)

■プログラム例(導波路モード解析)

(2016/1/26)

■平面波入射・ビーム入射の励振モデル化

(2016/9/29)

■給電部の励振モデル化(集中定数ポート、導波路モードのポート)

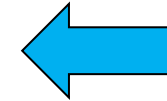
(2016/11/24)

http://www.takuichi.net/em_analysis/fem/fem_j.html



発表の流れ

■電磁界シミュレーションの基礎



■有限要素法の原理

■励振方法の種類

- 集中ポート
- **ポート(導波路モード励振)**
- 平面波入射

■各励振モデルの規範問題

～ COMSOLによる解析例 ～

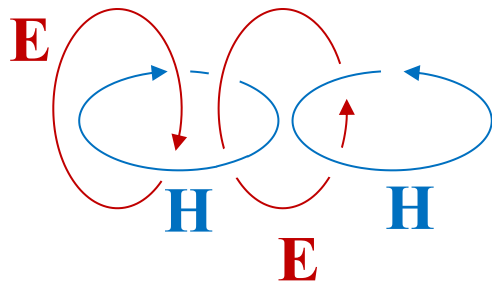
電磁界シミュレーションの基礎 ～ マクスウェルの方程式 ～

微分形

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{i} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \end{cases}$$

積分形

$$\begin{cases} \oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{\partial}{\partial t} \iint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} \\ \oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \iint_S \mathbf{i} \cdot d\mathbf{S} + \frac{\partial}{\partial t} \iint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} \end{cases}$$



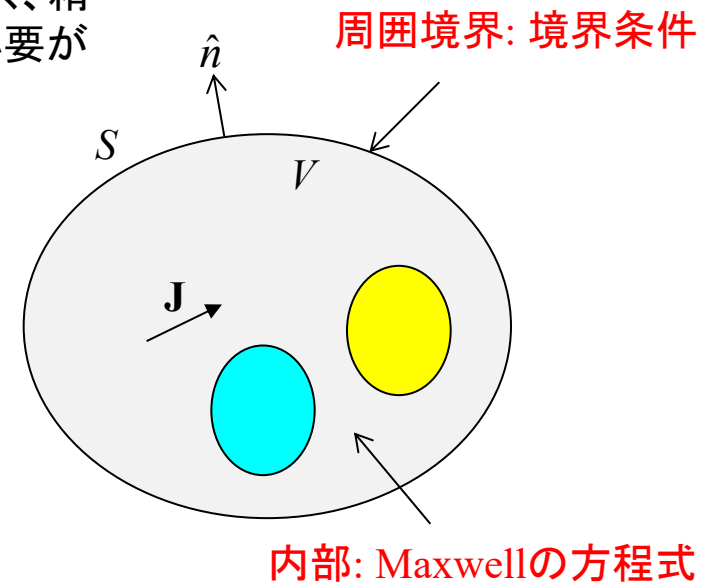
マクスウェルの方程式

$$\begin{cases} \text{ファラデーの法則} & \nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \\ \text{アンペアの法則} & \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{i} + \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \end{cases}$$

電磁界シミュレータの目的は、上のマクスウェルの方程式を速く、精度良く、なるべく一般の構造を解くこと。境界条件を指定する必要がある(→微分方程式論の境界値問題)。

解くために必要な条件(解析の前準備)

1. 構造および媒質(ε, μ, σ)
 2. 境界条件
 3. 励振波源
- 上をまとめて「解析モデル」と呼ぶ



静電界/静磁界/準静電界/準静磁界

マクスウェルの方程式

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} & \text{逆起電力 (ファラデーの法則)} \\ \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{i} + \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} & \text{変位電流 (アンペアの法則)} \end{cases}$$

$\frac{\partial}{\partial t} \cong 0$ 準静電界

変位電流は無視できない (ε : 大)

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{E} = 0 \\ \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{i} + \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \end{cases}$$

時間変化なし $\frac{\partial}{\partial t} = 0$

静電界/静磁界

$\frac{\partial}{\partial t} \cong 0$ 準静磁界

逆起電力は無視できない (μ : 大)

独立

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{E} = 0 & \text{(静電界)} \\ \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{i} & \text{(静磁界)} \end{cases}$$

$$V = -\int_{\Gamma} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} \quad \text{(Voltage)}$$

$$I = \oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} \quad \text{(Current)}$$

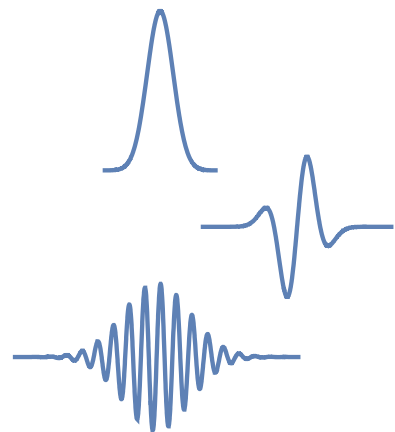
$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{i} \end{cases}$$

コイル・モーター等の解析

時間領域と周波数領域

時間領域

マクスウェルの方程式

境界値問題(空間)
+ 初期値問題(時間)

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{i} + \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \end{cases}$$

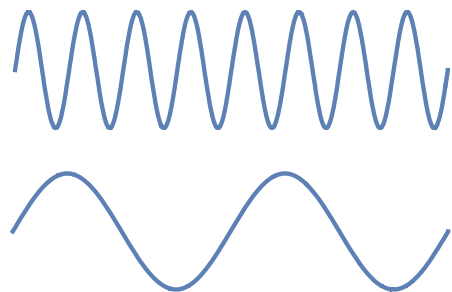
FDTD

周波数領域

$$\frac{\partial}{\partial t} = j\omega \quad \text{フーリエ変換}$$

調和振動

境界値問題(空間)

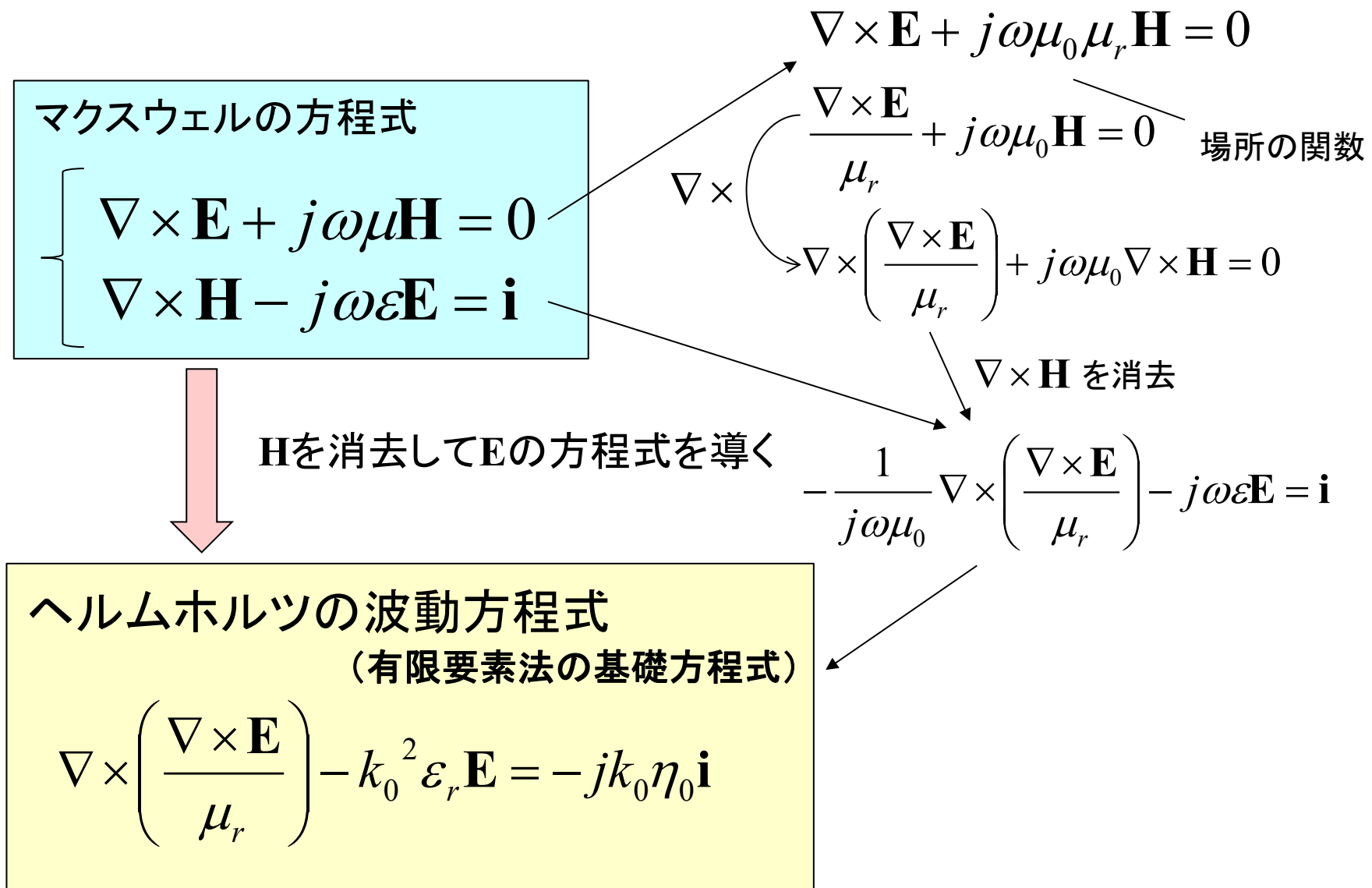


$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{E} = -j\omega\mu\mathbf{H} \\ \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{i} + j\omega\varepsilon\mathbf{E} \end{cases}$$

MoM, FEM, FDFD



波動方程式(EまたはHのみの式)



同様に、Eを消去してHの方程式を導くこともできる



励振問題と非励振問題

ヘルムホルツの方程式

$$\nabla \times \left(\frac{\nabla \times \mathbf{E}}{\mu_r} \right) - k_0^2 \varepsilon_r \mathbf{E} = -jk_0 \eta_0 \mathbf{i}$$

励振波源あり

既知ベクトル(励振)

行列方程式 $A\mathbf{x} = \mathbf{b}$

未知ベクトル



(a) 励振問題

励振波源なし

未知スカラー(固有値)

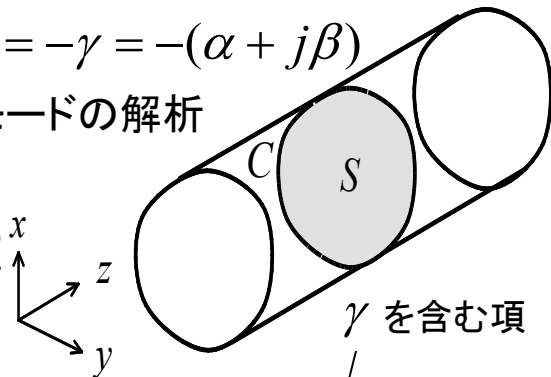
固有値問題 $A\mathbf{x} = \lambda\mathbf{x}$

未知ベクトル(固有ベクトル)

伝搬定数: $\partial / \partial z = -\gamma = -(\alpha + j\beta)$

導波路, モードの解析

2-D構造



(b) 導波路モード解析

$$\nabla_t \times \left(\frac{\nabla_t \times \mathbf{E}_t}{\mu_r} \right) - (k_0^2 \varepsilon_r + \Gamma) \mathbf{E}_t = 0$$

共振器

$$\nabla \times \left(\frac{\nabla \times \mathbf{E}}{\mu_r} \right) - k_0^2 \varepsilon_r \mathbf{E} = 0$$

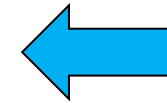
3-D構造

(c) 共振モード解析

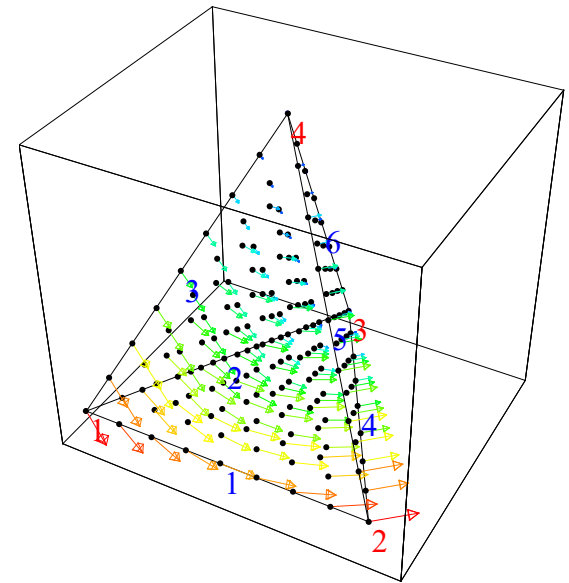
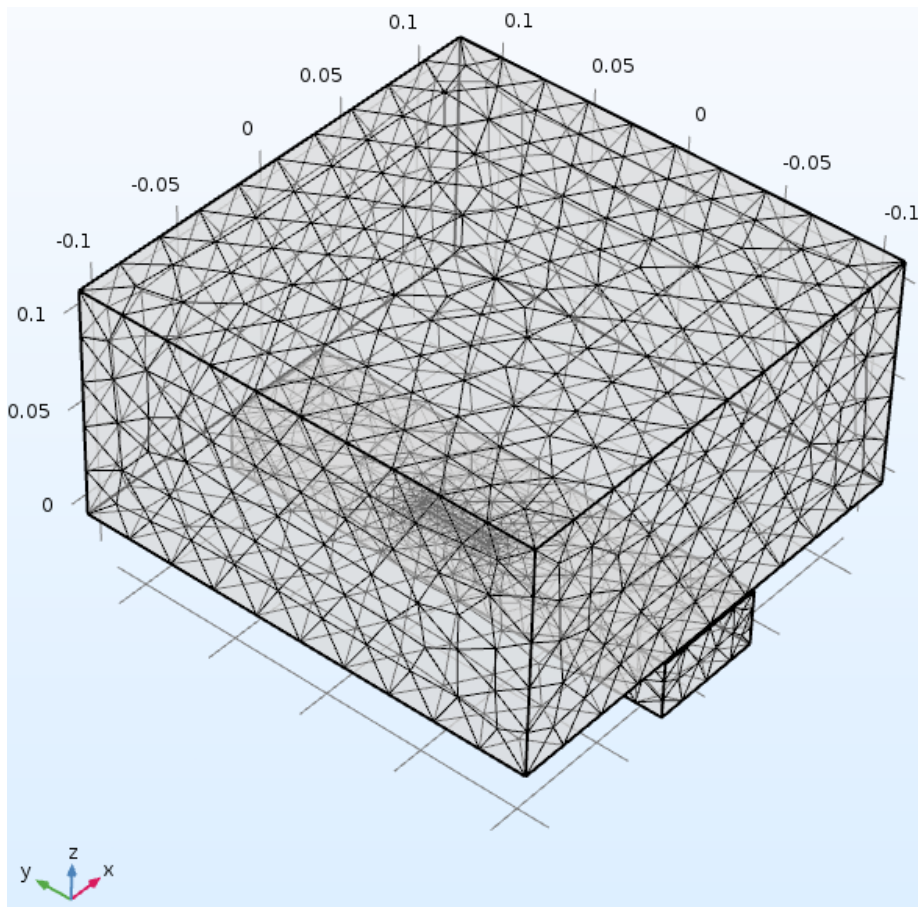
どの周波数でどのような形で共振するのか?

発表の流れ

- 電磁界シミュレーションの基礎
 - 有限要素法の原理
 - 励振方法の種類
 - 集中ポート
 - **ポート(導波路モード励振)**
 - 平面波入射
 - 各励振モデルの規範問題
- ～ COMSOLによる解析例 ～



有限要素法(FEM)の原理



- ① 電界のヘルムホルツの方程式を使う
- ② 空間をメッシュに切り、各セル内部の電界を基底関数(既知の電界分布)の線形結合で表現する(線形結合の重み係数が未知数の問題となる)。
- ③ 重み付き残差法を用いて連立一次方程式を作成
- ④ 行列方程式を解いて重み係数を決定(これで電界分布が求まった)

ヘルムホルツの方程式

$$\nabla \times \left(\frac{\nabla \times \mathbf{E}}{\mu_r} \right) - k_0^2 \epsilon_r \mathbf{E} = -jk_0 \eta_0 \mathbf{i}$$

線形演算子 $L[\mathbf{E}] - \mathbf{b} = 0$

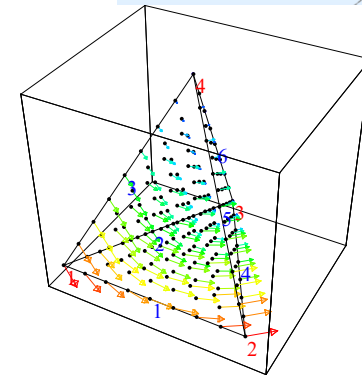
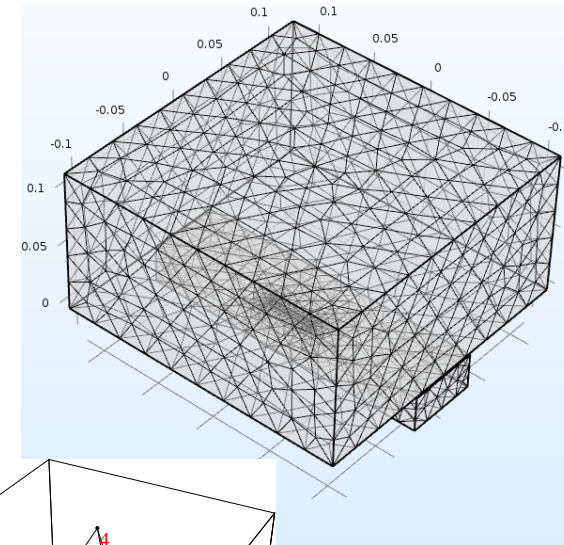
$$\left\{ \begin{aligned} L &= \nabla \times \left(\frac{1}{\mu_r} \nabla \times \right) - k_0^2 \epsilon_r \\ \mathbf{b} &= -jk_0 \eta_0 \mathbf{i} \end{aligned} \right.$$

線形演算子 (線形性)

$$L[a\mathbf{E}_a + b\mathbf{E}_b] = aL[\mathbf{E}_a] + bL[\mathbf{E}_b]$$

$$\mathbf{E} = \sum_{j=1}^N a_j \mathbf{E}_j \quad \text{線形演算子 (線形性)}$$

$$\sum_{j=1}^N a_j L[\mathbf{E}_j] - \mathbf{b} = 0$$



\mathbf{E}_i との内積をとる

$$\mathbf{E}_i \cdot \left[\sum_{j=1}^N a_j L[\mathbf{E}_j] - \mathbf{b} \right] = 0$$

そして、 \mathbf{E}_i の定義領域で積分

$$\iiint_{V_i} \mathbf{E}_i \cdot \left[\sum_{j=1}^N a_j L[\mathbf{E}_j] - \mathbf{b} \right] = 0$$

$$\sum_{j=1}^N a_j \iiint_{V_i \cap V_j} \mathbf{E}_i \cdot L[\mathbf{E}_j] dV - \iiint_{V_i \cap V_j} \mathbf{E}_i \cdot \mathbf{b} dV = 0$$

K_{ij} F_i

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \cdots & K_{1N} \\ K_{21} & K_{22} & \cdots & K_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{N1} & K_{N2} & \cdots & K_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_N \end{bmatrix}$$

a_i が決定される

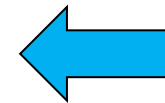


$$\mathbf{E} = \sum_{j=1}^N a_j \mathbf{E}_j$$

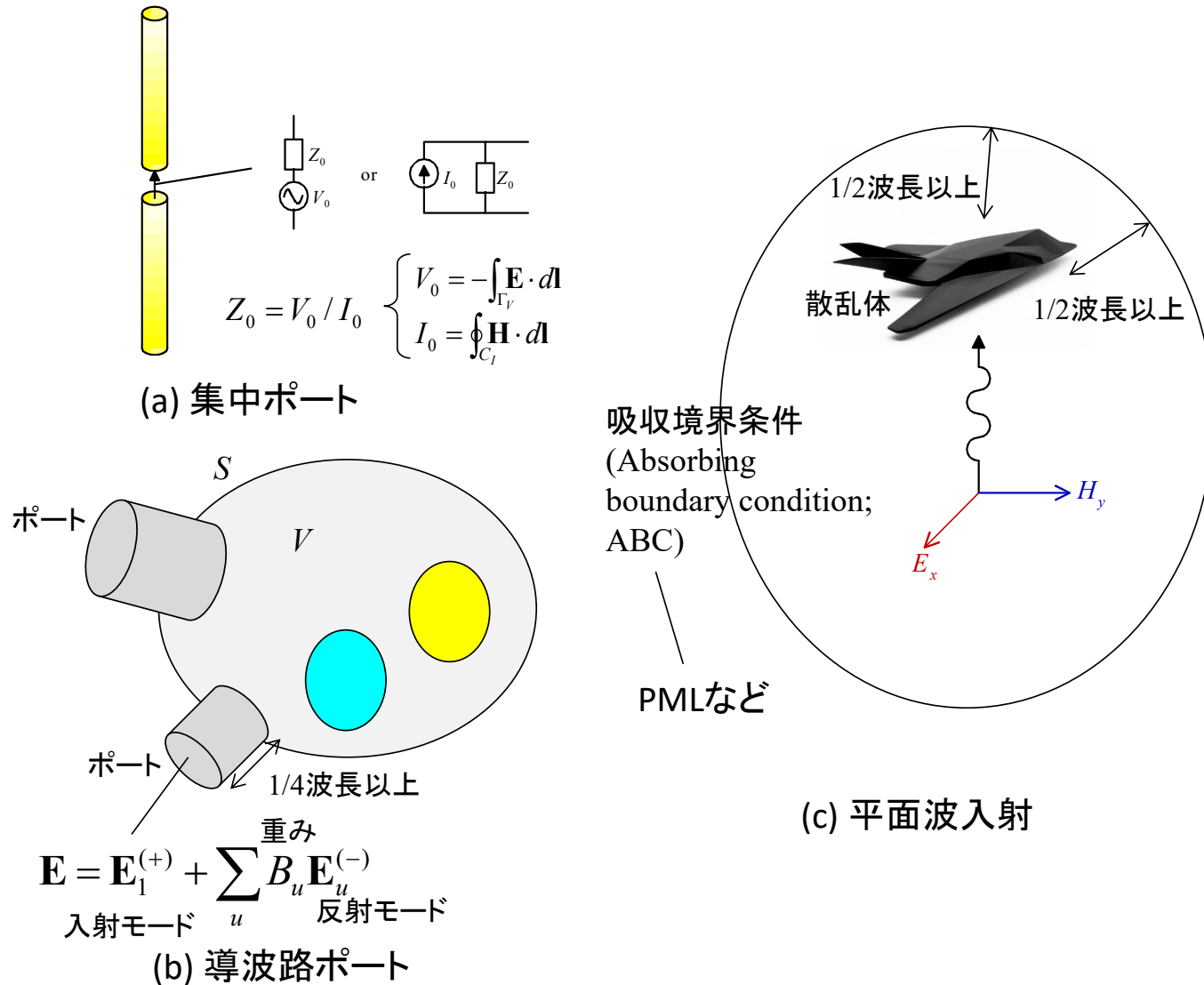
$$\mathbf{H} = -\frac{\nabla \times \mathbf{E}}{j\omega\mu}$$

発表の流れ

- 電磁界シミュレーションの基礎
 - 有限要素法の原理
 - 励振方法の種類
 - 集中ポート
 - **ポート(導波路モード励振)**
 - 平面波入射
 - 各励振モデルの規範問題
- ～ COMSOLによる解析例 ～



励振方法の種類



- 導波路モード励振 (Wave Port, Waveguide Port)
- 集中ポート (Lumped Port, Lump Port)
- 平面波入射 (散乱の解析)

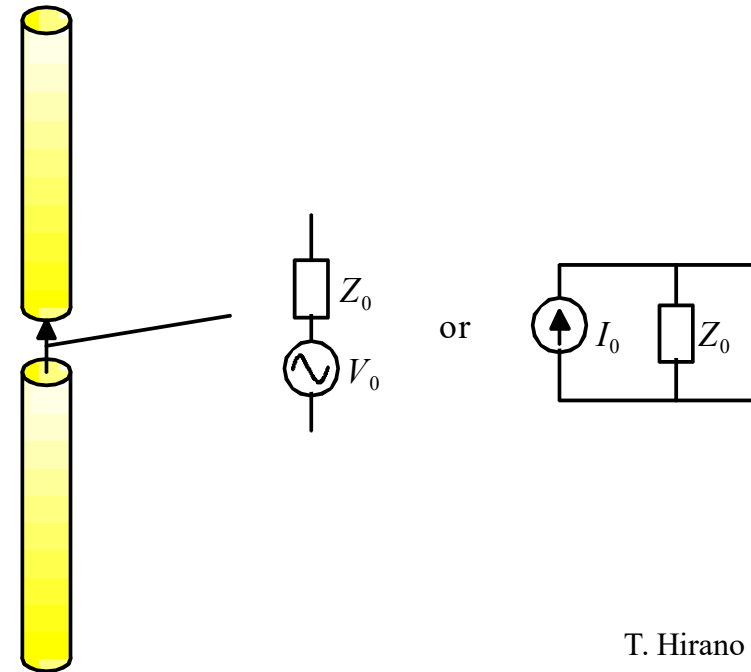
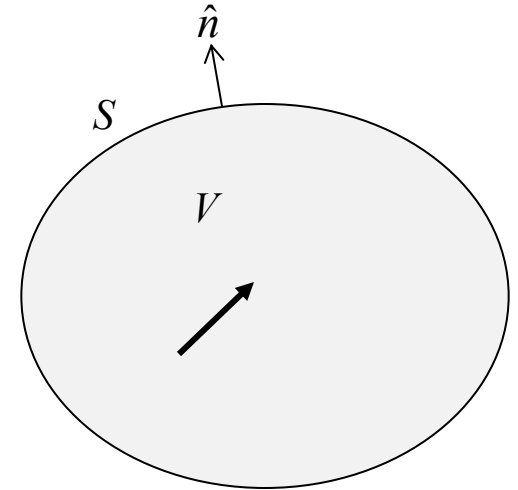
励振部モデル化／境界条件の設定は解析の要
(空間内部のモデル化は誰がやっても同じ
→上手い・下手はない)

励振方法1: 集中ポート

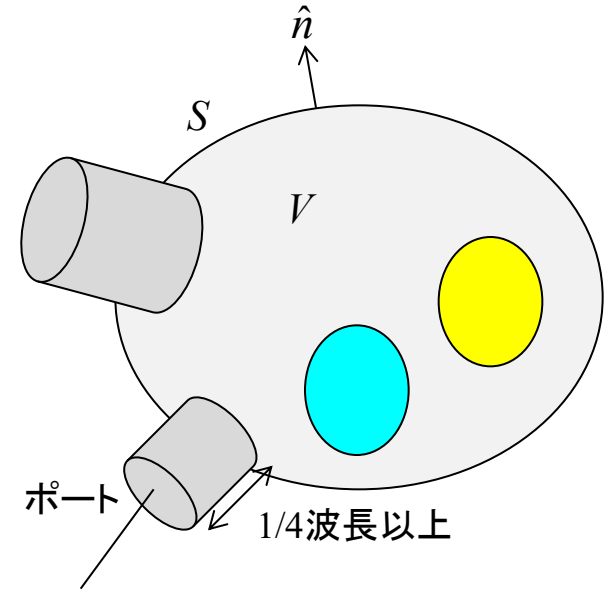
- 電圧・電流源励振は波長に比して微小（集中定数）であることが基本である。
- 微小なので、集中ポートでは印加電磁界分布の形状にはほとんど依存しない。
- 通常、内部インピーダンスを指定する。つまり、電圧（電界）と電流（磁界）の比を指定する。
- 電磁界解析では、実際には表面インピーダンス上に電界あるいは磁界を印加する。

$$Z_0 = V_0 / I_0$$

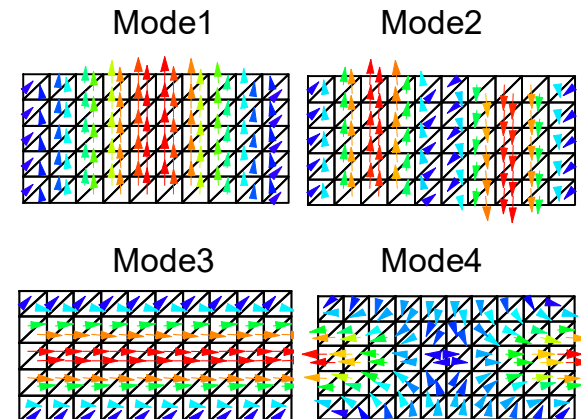
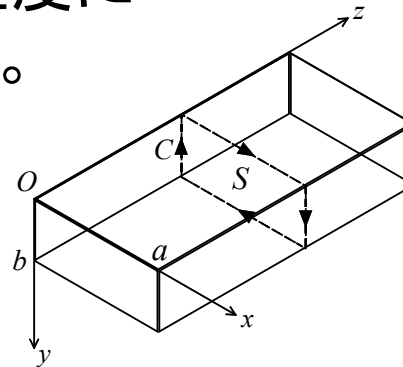
$$\begin{cases} V_0 = -\int_{\Gamma_V} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} \\ I_0 = \int_{\Gamma_I} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} \end{cases}$$



- 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。



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



マクスウェルの方程式

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega\mu\mathbf{H}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = j\omega\varepsilon\mathbf{E}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$$

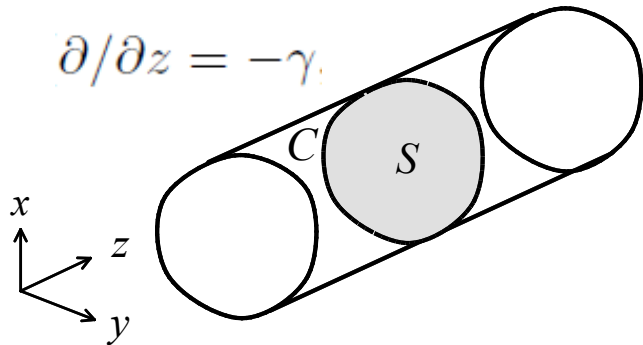
$$\nabla \cdot \mathbf{H} = 0$$

$$\nabla = \nabla_t + \hat{z} \frac{\partial}{\partial z}$$

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_t + \hat{z}E_z$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_t + \hat{z}H_z$$

$$\partial/\partial z = -\gamma$$



$$\begin{cases} \nabla_t \times \mathbf{E}_t = -j\omega\mu\hat{z}H_z & \text{(A)} \\ \nabla_t \times (\hat{z}E_z) - \gamma(\hat{z} \times \mathbf{E}_t) = -j\omega\mu\mathbf{H}_t \end{cases}$$

$$\begin{cases} \nabla_t \times \mathbf{H}_t = j\omega\varepsilon\hat{z}E_z & \text{(B)} \\ \nabla_t \times (\hat{z}H_z) - \gamma(\hat{z} \times \mathbf{H}_t) = j\omega\varepsilon\mathbf{E}_t \end{cases}$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega\mu\mathbf{H} \implies (\nabla_t - \hat{z}\gamma) \times (\mathbf{E}_t + \hat{z}E_z) = -j\omega\mu(\mathbf{H}_t + \hat{z}H_z)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = j\omega\varepsilon\mathbf{E} \implies (\nabla_t - \hat{z}\gamma) \times (\mathbf{H}_t + \hat{z}H_z) = j\omega\varepsilon(\mathbf{E}_t + \hat{z}E_z)$$

$$\begin{cases} \nabla \cdot \mathbf{E} = 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{H} = 0 \end{cases} \implies \begin{cases} (\nabla_t - \hat{z}\gamma) \cdot (\mathbf{E}_t + \hat{z}E_z) = 0 \\ (\nabla_t - \hat{z}\gamma) \cdot (\mathbf{H}_t + \hat{z}H_z) = 0 \end{cases} \implies \begin{cases} \nabla_t \cdot \mathbf{E}_t = \gamma E_z \\ \nabla_t \cdot \mathbf{H}_t = \gamma H_z \end{cases}$$

$$\hat{z} \times \begin{matrix} \mathbf{E}_t, E_z, \mathbf{H}_t \text{ and } H_z \end{matrix} \begin{cases} \nabla \times (V\mathbf{A}) = \nabla V \times \mathbf{A} + V\nabla \times \mathbf{A} \\ \mathbf{A} \times (\mathbf{B} \times \mathbf{C}) = (\mathbf{A} \cdot \mathbf{C})\mathbf{B} - (\mathbf{A} \cdot \mathbf{B})\mathbf{C} \end{cases}$$

$$\text{(C)} \begin{cases} \nabla_t E_z + \gamma \mathbf{E}_t = -j\omega\mu(\hat{z} \times \mathbf{H}_t) & \text{(A)の下} \\ \nabla_t H_z + \gamma \mathbf{H}_t = j\omega\varepsilon(\hat{z} \times \mathbf{E}_t) & \text{(B)の下} \end{cases}$$

$$\downarrow \nabla_t \cdot \quad (\text{一様媒質でしか下の変形は通用しない})$$

$$\begin{cases} \nabla_t^2 E_z + \gamma(\nabla_t \cdot \mathbf{E}_t) = -j\omega\mu \nabla_t \cdot (\hat{z} \times \mathbf{H}_t) \\ \nabla_t^2 H_z + \gamma(\nabla_t \cdot \mathbf{H}_t) = j\omega\varepsilon \nabla_t \cdot (\hat{z} \times \mathbf{E}_t) \end{cases}$$

$$\downarrow \nabla \cdot (\mathbf{A} \times \mathbf{B}) = \mathbf{B} \cdot \nabla \times \mathbf{A} - \mathbf{A} \cdot \nabla \times \mathbf{B}$$

$$\begin{cases} \nabla_t^2 E_z + \gamma^2 E_z = j\omega\mu \hat{z} \cdot (\nabla_t \times \mathbf{H}_t) \\ \nabla_t^2 H_z + \gamma^2 H_z = -j\omega\varepsilon \hat{z} \cdot (\nabla_t \times \mathbf{E}_t) \end{cases} \quad \begin{array}{l} \hat{z} \cdot (\mathbf{A}) \text{ の下} \\ \hat{z} \cdot (\mathbf{B}) \text{ の下} \end{array}$$



$$\begin{cases} \nabla_t^2 E_z + \gamma^2 E_z = -\omega^2 \mu \varepsilon E_z \\ \nabla_t^2 H_z + \gamma^2 H_z = -\omega^2 \mu \varepsilon H_z \end{cases}$$

カットオフ(遮断)波数

$$k_c^2 = k^2 + \gamma^2 \\ (k = \omega \sqrt{\mu \varepsilon})$$



$$\begin{cases} \nabla_t^2 E_z + (\gamma^2 + \omega^2 \mu \varepsilon) E_z = 0 \\ \nabla_t^2 H_z + (\gamma^2 + \omega^2 \mu \varepsilon) H_z = 0 \end{cases}$$

E_z, H_z は独立にヘルムホルツの方程式を満たす

$\hat{z} \times (\mathbf{C})$

$$\mathbf{A} \times (\mathbf{B} \times \mathbf{C}) = (\mathbf{A} \cdot \mathbf{C})\mathbf{B} - (\mathbf{A} \cdot \mathbf{B})\mathbf{C}$$

$$\begin{cases} \hat{z} \times \nabla_t E_z + \gamma (\hat{z} \times \mathbf{E}_t) = j\omega\mu \mathbf{H}_t \\ \hat{z} \times \nabla_t H_z + \gamma (\hat{z} \times \mathbf{H}_t) = -j\omega\varepsilon \mathbf{E}_t \end{cases}$$



(C) を使う

$$\begin{cases} \hat{z} \times \nabla_t E_z + \frac{\gamma}{j\omega\varepsilon} (\nabla_t H_z + \gamma \mathbf{H}_t) = j\omega\mu \mathbf{H}_t \\ \hat{z} \times \nabla_t H_z - \frac{\gamma}{j\omega\mu} (\nabla_t E_z + \gamma \mathbf{E}_t) = -j\omega\varepsilon \mathbf{E}_t \end{cases}$$

$$\begin{cases} j\omega\epsilon\hat{z} \times \nabla_t E_z + \gamma\nabla_t H_z = -(\gamma^2 + \omega^2\mu\epsilon)\mathbf{H}_t \\ j\omega\mu\hat{z} \times \nabla_t H_z - \gamma\nabla_t E_z = (\gamma^2 + \omega^2\mu\epsilon)\mathbf{E}_t \end{cases}$$



$$\begin{cases} \mathbf{H}_t = \frac{1}{\gamma^2 + \omega^2\mu\epsilon} (-j\omega\epsilon\hat{z} \times \nabla_t E_z - \gamma\nabla_t H_z) \\ \mathbf{E}_t = \frac{1}{\gamma^2 + \omega^2\mu\epsilon} (j\omega\mu\hat{z} \times \nabla_t H_z - \gamma\nabla_t E_z) \end{cases}$$

E_z	H_z	
0	0	TEM(Transverse electric and magnetic)波
0	Exist	TE(Transverse electric)波, H波
Exist	0	TM(Transverse magnetic)波, E波
Exist	Exist	ハイブリッド波

$$\begin{cases} H_t = \frac{1}{\gamma^2 + \omega^2 \mu \epsilon} (-j\omega \epsilon \hat{z} \times \nabla_t E_z - \gamma \nabla_t H_z) \\ E_t = \frac{1}{\gamma^2 + \omega^2 \mu \epsilon} (j\omega \mu \hat{z} \times \nabla_t H_z - \gamma \nabla_t E_z) \end{cases}$$

ヘルツ・ベクトルによる表現

ヘルツ・ベクトルはヘルツが微小ダイポールの放射界の計算で初めて導入し、導波管解析にも便利なのでよく用いられる。

$$\mathbf{E} = -j\omega\mu\nabla \times \mathbf{\Pi}_h \quad \text{磁気型ヘルツベクトル}$$

$$\mathbf{A} = j\omega\mu\epsilon\mathbf{\Pi}_e$$

$$\mathbf{H} = j\omega\epsilon\nabla \times \mathbf{\Pi}_e \quad \text{電気型ヘルツベクトル}$$

$$\mathbf{F} = j\omega\mu\epsilon\mathbf{\Pi}_h$$

導波路の電磁界は導波管軸成分しか持たない次のヘルツベクトルで表現可能である。

$$\mathbf{\Pi}_h = \hat{z}\psi_h$$

$$\nabla_t^2 \psi_h + k_c^2 \psi_h = 0$$

$$\mathbf{\Pi}_e = \hat{z}\psi_e$$

$$\nabla_t^2 \psi_e + k_c^2 \psi_e = 0$$

$$\mathbf{E} = -\hat{z}\nabla_t^2 \psi_e - \gamma\nabla_t \psi_e + j\omega\mu\hat{z} \times \nabla_t \psi_h$$

$$\mathbf{H} = -j\omega\epsilon\hat{z} \times \nabla_t \psi_e - \hat{z}\nabla_t^2 \psi_h - \gamma\nabla_t \psi_h$$

$$\psi_h = \frac{1}{\gamma^2 + \omega^2\mu\epsilon} H_z$$

$$\psi_e = \frac{1}{\gamma^2 + \omega^2\mu\epsilon} E_z$$

これはEz, Hzによる表現と等価

$$\nabla_t = \hat{x}(\partial/\partial x) + \hat{y}(\partial/\partial y)$$

$$\nabla_t = \hat{\rho}(\partial/\partial\rho) + \hat{\phi}(1/\rho)(\partial/\partial\phi)$$



モード関数の求め方

TEモード(H波)

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_z}{\partial y^2} + k_c^2 H_z = 0$$

TMモード(E波)

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial y^2} + k_c^2 E_z = 0$$

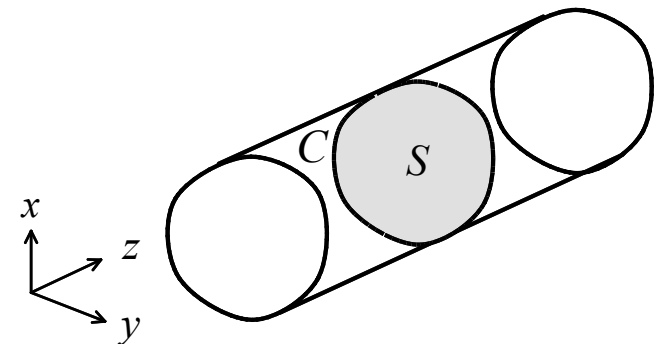
断面の境界値問題を解く。固有値問題なので、無数の固有値(k_c^2)と固有ベクトル(固有関数)の組み合わせが得られる。

H_z または E_z が得られれば、それに対応して伝搬する電磁波の分布(モード)も決定される(励振状態を決定していないので振幅・位相には任意性がある)。

$$\begin{cases} H_t = \frac{1}{\gamma^2 + \omega^2 \mu \epsilon} (-j\omega \epsilon \hat{z} \times \nabla_t E_z - \gamma \nabla_t H_z) \\ E_t = \frac{1}{\gamma^2 + \omega^2 \mu \epsilon} (j\omega \mu \hat{z} \times \nabla_t H_z - \gamma \nabla_t E_z) \end{cases}$$

さらに、固有値問題で k_c 、つまり、そのモードのカットオフ波数も決定されている。⇒周波数がどの程度になると伝搬するかがわかる。

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{k_c^2 - \omega^2 \epsilon \mu}$$



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

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

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

u : モードの番号 (TEM, TE_{mn} , TM_{mn})

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

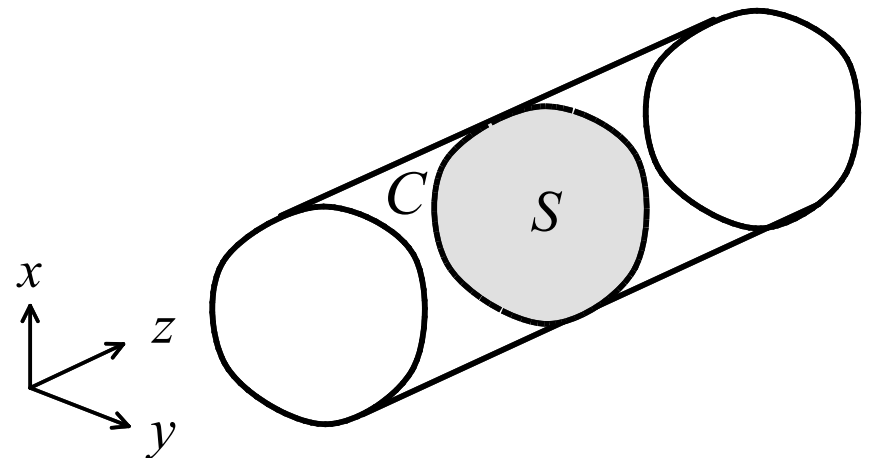
モード関数は導波路問題の固有値問題を解いて得られる。つまり、非励振の問題の解である。モード解析によって、モードの分布とそのモードの伝搬定数が得られる。

モード関数の直交性

$$\iint_S (\mathbf{E}_u^{(\pm)} \times \mathbf{H}_v^{(+)}). d\mathbf{S} = +\delta_{uv} e^{(\mp \gamma_u - \gamma_v)z}$$

$$\iint_S (\mathbf{E}_u^{(\pm)} \times \mathbf{H}_v^{(-)}). d\mathbf{S} = -\delta_{uv} e^{(\mp \gamma_u + \gamma_v)z}$$

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

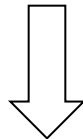


伝搬定数(減衰定数、位相定数)

±z方向に進むモードuの正規化電界モード関数

$$\mathbf{E}_u^{(\pm)}(\mathbf{r}) = \mathbf{e}_{tu}(\mathbf{r}) \exp(\mp \gamma_u z)$$

$$\begin{aligned} \exp(-\gamma z) &= \exp(-(\alpha + j\beta)z) \\ &= \exp(-\alpha z) \exp(-j\beta z) \end{aligned}$$



瞬時値表現

$$\text{Re}[\exp(-\alpha z) \exp(-j\beta z) \exp(j\omega t)]$$

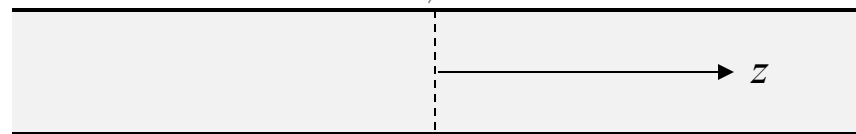
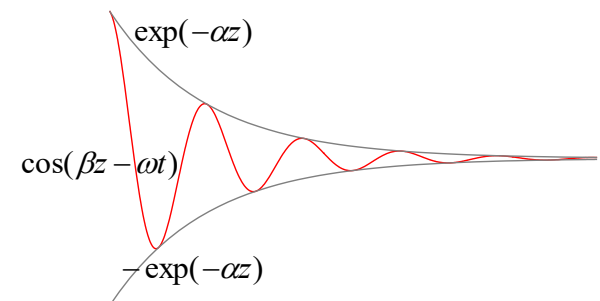
$$= \text{Re}[\exp(-\alpha z) \exp(-j(\beta z - \omega t))]$$

$$= \text{Re}[\exp(-\alpha z) \{ \cos(\beta z - \omega t) - j \sin(\beta z - \omega t) \}]$$

$$= \exp(-\alpha z) \cos(\beta z - \omega t)$$

$$\text{伝搬定数: } \gamma = \underbrace{\alpha}_{\text{減衰定数}} + j \underbrace{\beta}_{\text{位相定数}}$$

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{k_c^2 - \omega^2 \varepsilon \mu} \quad k^2$$



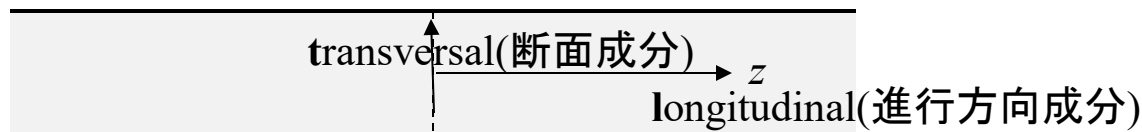
ヘルツベクトルによるTEモード, TMモードの表現

TEモード(H波)

電界の正規化モード関数 磁界の正規化モード関数	$\mathbf{E}_{hu}^{(\pm)}(\mathbf{r}) = \mathbf{e}_{htu}(\mathbf{r}) \exp(\mp \gamma_u z)$ $\mathbf{H}_{hu}^{(\pm)}(\mathbf{r}) = \{\pm \mathbf{h}_{htu}(\mathbf{r}) + \mathbf{h}_{hlu}(\mathbf{r})\} \exp(\mp \gamma_u z)$
断面成分	$\mathbf{h}_{htu}(\mathbf{r}) = -\frac{1}{k_{cu}} \sqrt{Y_{hu}} \nabla_t \psi_{hu}(\mathbf{r})$ $\mathbf{e}_{htu}(\mathbf{r}) = -Z_{hu} \hat{z} \times \mathbf{h}_{htu}(\mathbf{r})$
管軸成分	$\mathbf{h}_{hlu}(\mathbf{r}) = \hat{z} \frac{k_{cu}}{\gamma_u} \sqrt{Y_{hu}} \psi_{hu}(\mathbf{r})$
ヘルツ・ポテンシャル カットオフ波数 伝搬定数 特性インピーダンス 管内波長	$\psi_{hu}(\mathbf{r}): \text{断面構造で決まる(固有関数)}$ $k_{cu}: \text{断面構造で決まる(固有値)}$ $\gamma_u^2 = k_{cu}^2 - \mu_r \varepsilon_r k_0^2$ $Z_{hu} = \frac{1}{Y_{hu}} = \frac{j \mu_r k_0 \eta_0}{\gamma_u}$ $\lambda_g = 2\pi / \beta_u, \quad \beta_u = \sqrt{\mu_r \varepsilon_r k_0^2 - k_{cu}^2}$

TMモード(E波)

電界の正規化モード関数 磁界の正規化モード関数	$\mathbf{E}_{eu}^{(\pm)}(\mathbf{r}) = \{\mathbf{e}_{etu}(\mathbf{r}) \pm \mathbf{e}_{e\ell u}(\mathbf{r})\} \exp(\mp \gamma_u z)$ $\mathbf{H}_{eu}^{(\pm)}(\mathbf{r}) = \pm \mathbf{h}_{etu}(\mathbf{r}) \exp(\mp \gamma_u z)$
断面成分	$\mathbf{e}_{etu}(\mathbf{r}) = -\frac{1}{k_{cu}} \sqrt{Z_{eu}} \nabla_t \psi_{eu}(\mathbf{r})$ $\mathbf{h}_{etu}(\mathbf{r}) = Y_{eu} \hat{z} \times \mathbf{e}_{etu}(\mathbf{r})$
管軸成分	$\mathbf{e}_{e\ell u}(\mathbf{r}) = \hat{z} \frac{k_{cu}}{\gamma_u} \sqrt{Z_{eu}} \psi_{eu}(\mathbf{r})$
ヘルツ・ポテンシャル カットオフ波数 伝搬定数 特性インピーダンス 管内波長	$\psi_{eu}(\mathbf{r}): \text{断面構造で決まる(固有関数)}$ $k_{cu}^2: \text{断面構造で決まる(固有値)}$ $\gamma_u^2 = k_{cu}^2 - \mu_r \varepsilon_r k_0^2$ $Z_{eu} = \frac{1}{Y_{eu}} = \frac{\gamma_u \eta_0}{j \varepsilon_r k_0}$ $\lambda_g = 2\pi / \beta_u, \quad \beta_u = \sqrt{\mu_r \varepsilon_r k_0^2 - k_{cu}^2}$



インデックスの意味



速度(位相速度と群速度)

位相速度

$$v_{pu} = \frac{\omega}{\beta_u} = \frac{\omega}{\sqrt{k^2 - k_{cu}^2}}$$

エネルギー伝送速度

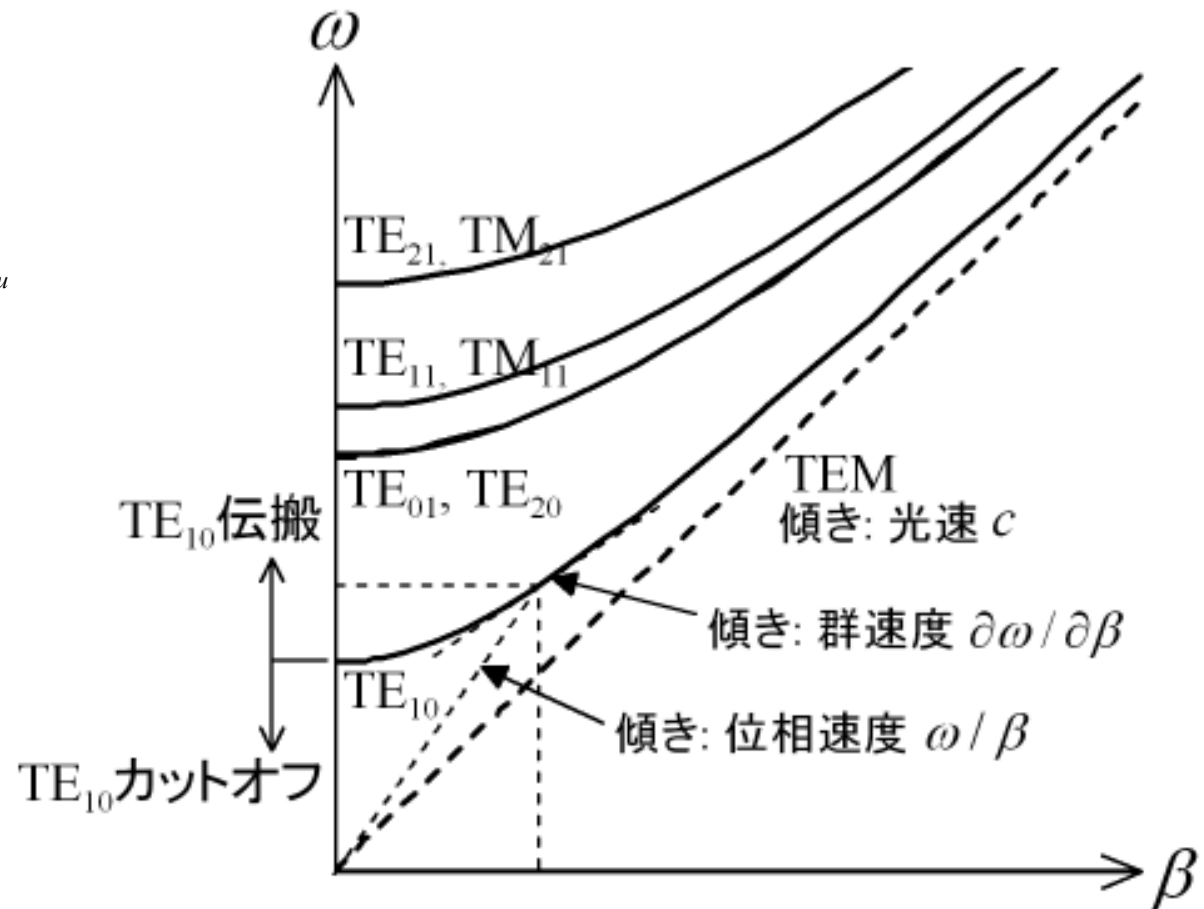
$$W = \frac{1}{2} \iiint_V \varepsilon |\mathbf{E}_u|^2 dv + \frac{1}{2} \iiint_V \mu |\mathbf{H}_u|^2 dv$$

$$v_{eu} = \frac{P}{W}$$

群速度

$$v_g = \frac{\Delta\omega}{\Delta\beta} = \frac{\partial\omega}{\partial\beta}$$

$$v_p v_g = c^2$$

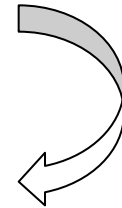


電力

$$P = \operatorname{Re}\left[\frac{1}{2} \iint_S (\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*) \cdot d\mathbf{S}\right]$$

$$P = \operatorname{Re}\left[\frac{1}{2} \iint_S \left(\sum_u A_u \mathbf{E}_{tu}^{(+)}\right) \times \left(-\sum_u A_u^* \mathbf{H}_{tu}^{(-)}\right) \cdot d\mathbf{S}\right]$$

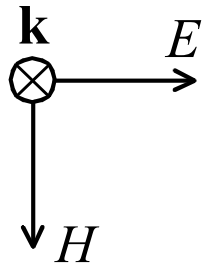
$$= \frac{1}{2} \sum_u |A_u|^2 \quad [W]$$



直交性

様々な伝送線路

波数ベクトル

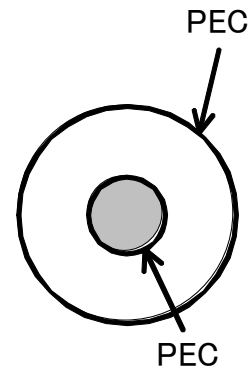


(a) 自由空間

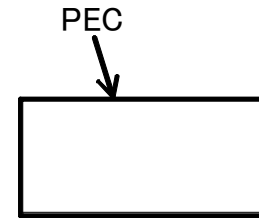
PEC(金属)



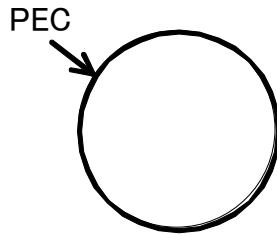
(b) 平行二本線路
(レッヘル線路)



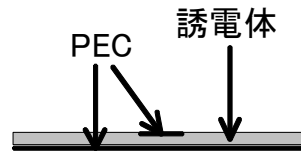
(c) 同軸線路



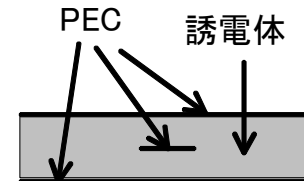
(d) 方形導波管



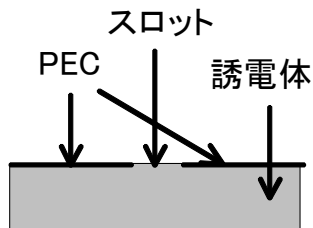
(e) 円形導波管



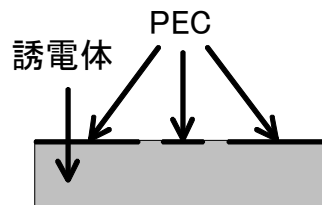
(f) マイクロストリップ線路



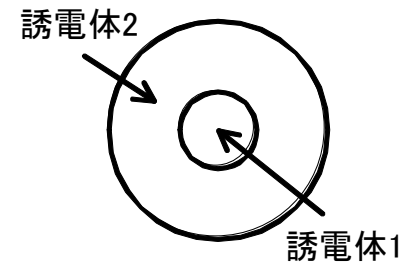
(g) ストリップ線路
(トリプレート線路)



(h) スロット線路



(i) コプレーナガイド



(j) 光ファイバ



変数分離法

$$\psi_h(x, y) = X(x)Y(y)$$

$$\frac{1}{X} \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} + \frac{1}{Y} \frac{\partial^2 Y}{\partial y^2} + k_c^2 = 0$$

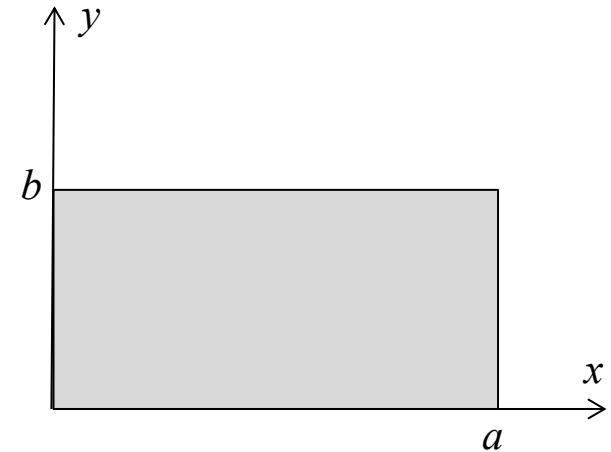
カットオフ波数 $k_c^2 = k_x^2 + k_y^2$

$$\frac{\partial^2 X}{\partial x^2} + k_c^2 X = 0, \quad \frac{\partial^2 Y}{\partial y^2} + k_c^2 Y = 0$$

$$\begin{cases} X = A \cos(k_x x) + B \sin(k_x x) \\ Y = C \cos(k_y y) + D \sin(k_y y) \end{cases}$$

境界条件

$$\begin{cases} B = 0 & (E_y|_{x=0} = 0 \text{より}) \\ D = 0 & (E_x|_{y=0} = 0 \text{より}) \\ k_x = m\pi/a & (E_y|_{x=a} = 0 \text{より}) \\ k_y = n\pi/b & (E_x|_{y=b} = 0 \text{より}) \end{cases}$$



電界の正規化モード関数	$\mathbf{E}_{hu}^{(\pm)}(\mathbf{r}) = \mathbf{e}_{hu}(\mathbf{r}) \exp(\mp \gamma_u z)$
磁界の正規化モード関数	$\mathbf{H}_{hu}^{(\pm)}(\mathbf{r}) = \{\pm \mathbf{h}_{htu}(\mathbf{r}) + \mathbf{h}_{hlu}(\mathbf{r})\} \exp(\mp \gamma_u z)$
断面成分	$\mathbf{h}_{htu}(\mathbf{r}) = -\frac{1}{k_{cu}} \sqrt{Y_{hu}} \nabla_t \psi_{hu}(\mathbf{r})$ $\mathbf{e}_{htu}(\mathbf{r}) = -Z_{hu} \hat{z} \times \mathbf{h}_{htu}(\mathbf{r})$
管軸成分	$\mathbf{h}_{hlu}(\mathbf{r}) = \hat{z} \frac{k_{cu}}{\gamma_u} \sqrt{Y_{hu}} \psi_{hu}(\mathbf{r})$

カットオフ周波数

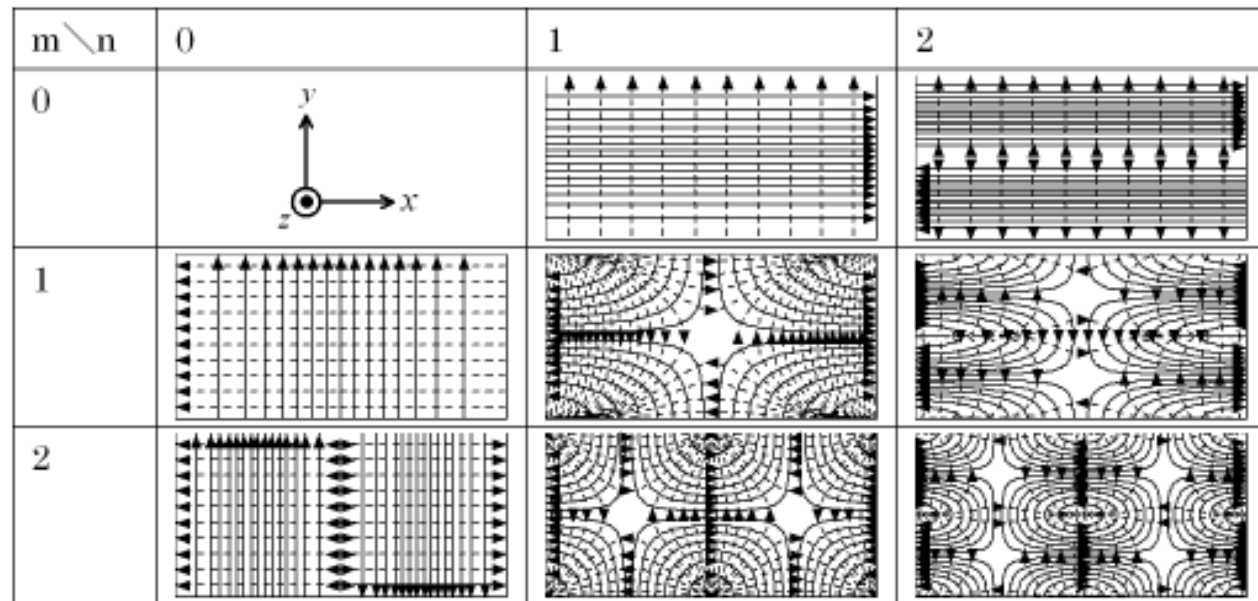
$$\begin{aligned} f_c &= \frac{c}{\lambda_c} = \frac{k_c c}{2\pi} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{k_x^2 + k_y^2} \\ &= \frac{c}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \end{aligned}$$



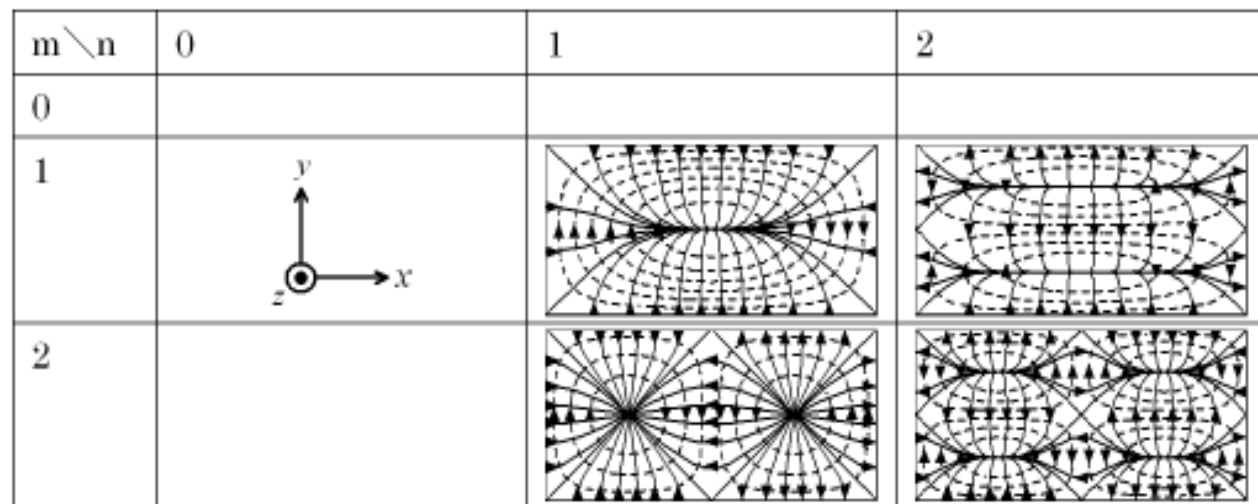
方形導波管の断面内のモード関数分布

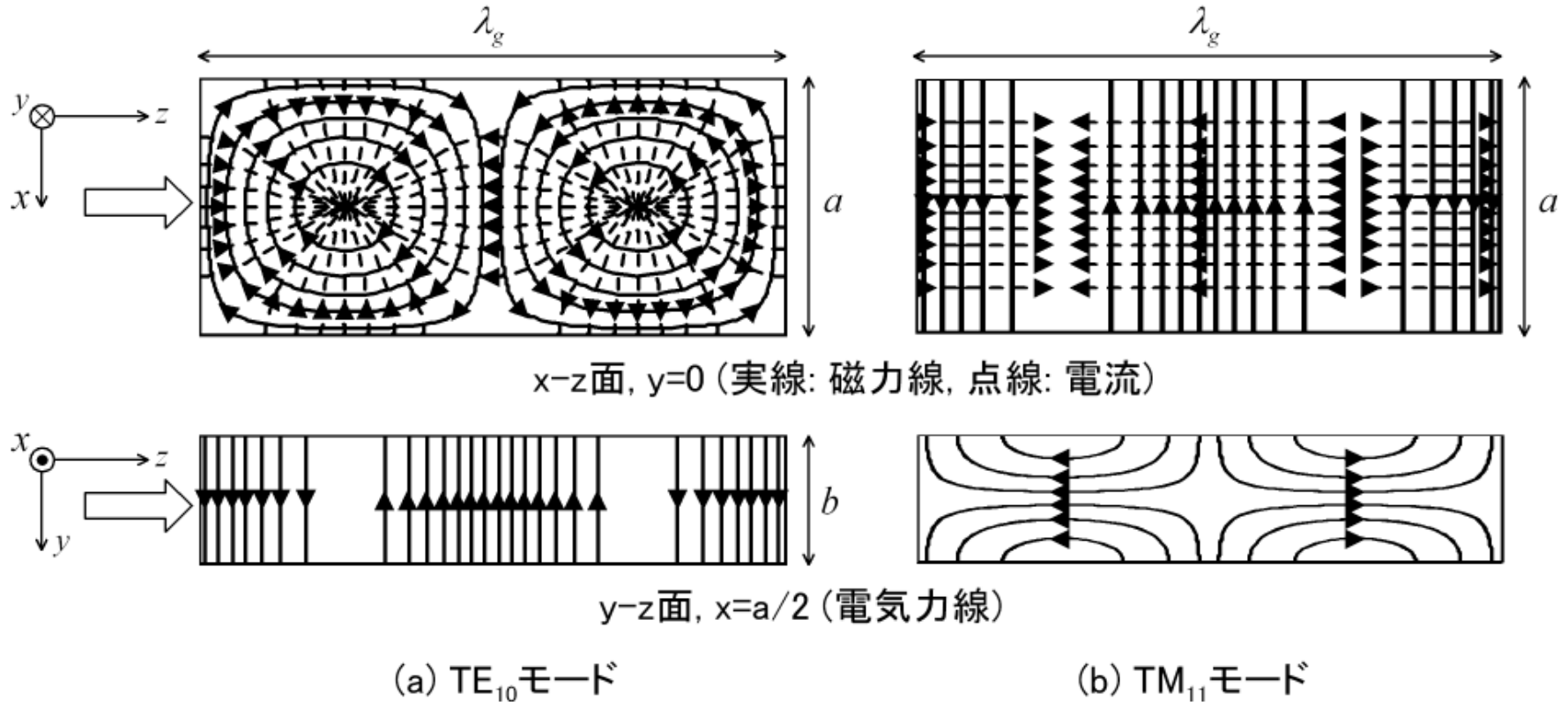
(実線: 電気力線, 点線: 磁力線)

TE_{mn} モード



TM_{mn} モード





カットオフ周波数

fcu (GHz)

Analytic

FEM

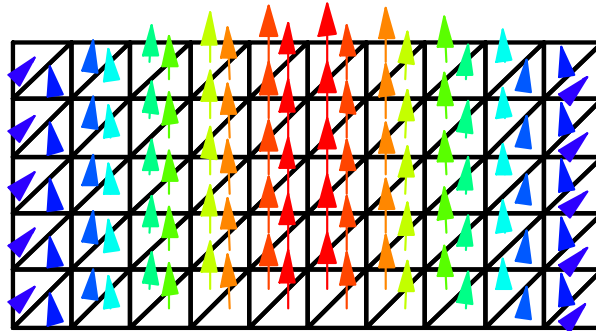
(1,0): 2.58 Mode1: 2.58

(0,1): 5.15 Mode2: 5.13

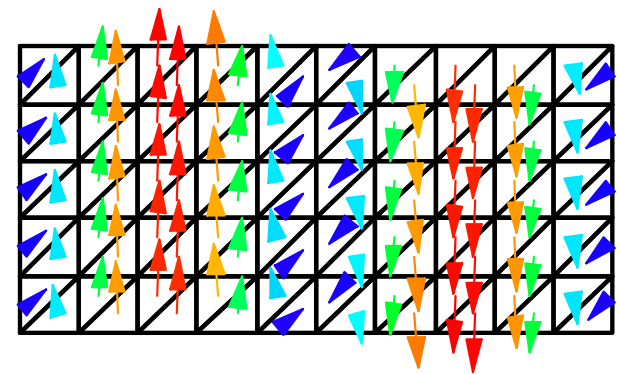
(2,0): 5.16 Mode3: 5.30

(1,1): 5.76 Mode4: 5.92

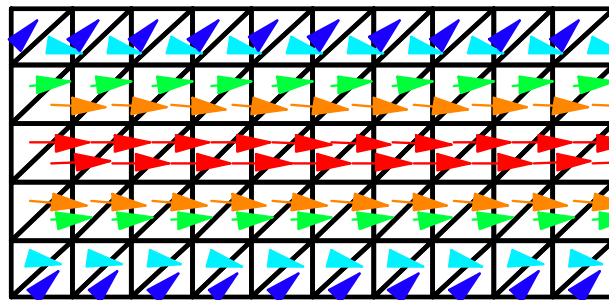
Mode1



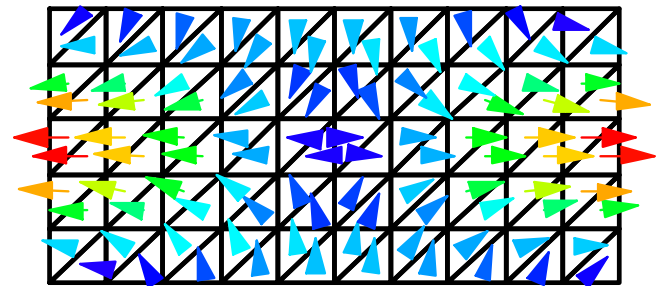
Mode2



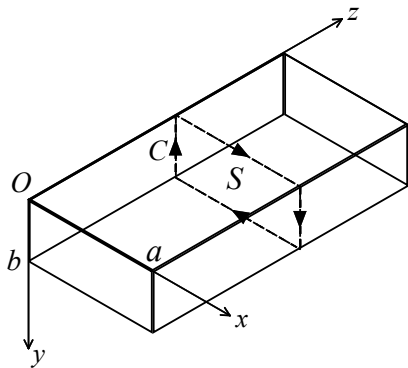
Mode3



Mode4



高次モードではより多くのメッシュ分割が必要



Cの計算

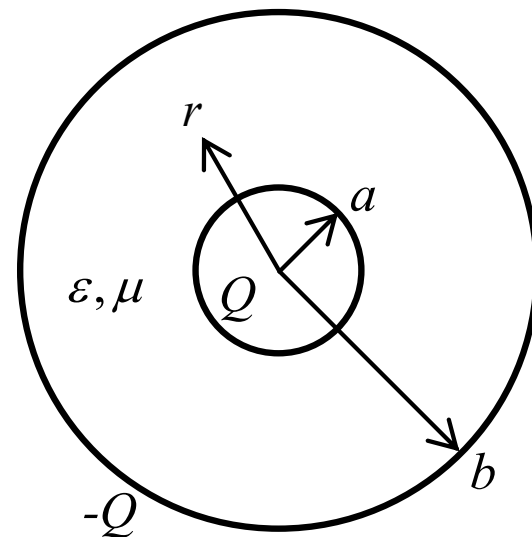
$$\oiint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = \iiint_V \rho dV \quad \text{ガウスの法則}$$

$$\varepsilon E_r \cdot 2\pi r = Q$$

$$E_r = \frac{Q}{2\pi \varepsilon r}$$

$$V = \int_a^b E_r dr = \frac{Q}{2\pi \varepsilon} [\log r]_a^b = \frac{Q}{2\pi \varepsilon} \log \frac{b}{a}$$

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{2\pi \varepsilon}{\log \frac{b}{a}}$$



Lの計算

$$\oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \iint_S \mathbf{i} \cdot d\mathbf{S} + \iint_S \frac{d\mathbf{D}}{dt} \cdot d\mathbf{S} \quad \text{アンペアの法則}$$

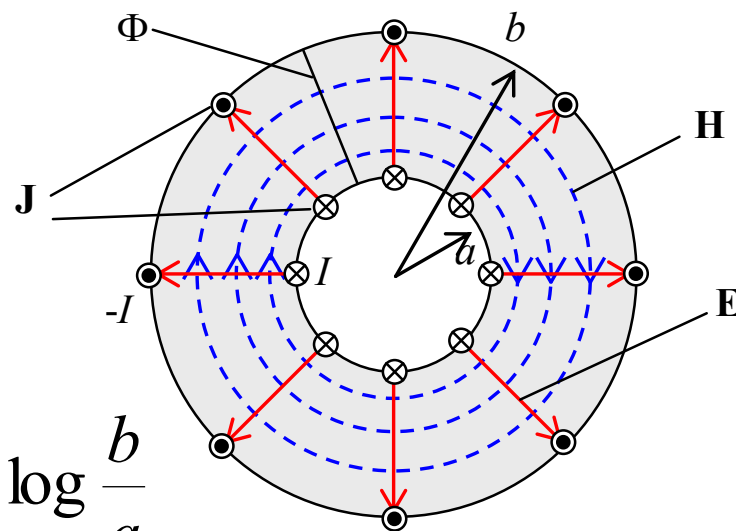
$$H_\varphi \cdot 2\pi r = I \quad H_\varphi = \frac{I}{2\pi r}$$

$$\frac{\Phi}{\mu} = \int_a^b H_\varphi dr = \frac{I}{2\pi} \log \frac{b}{a}$$

$$L = \frac{\Phi}{I} = \frac{\mu}{2\pi} \log \frac{b}{a}$$

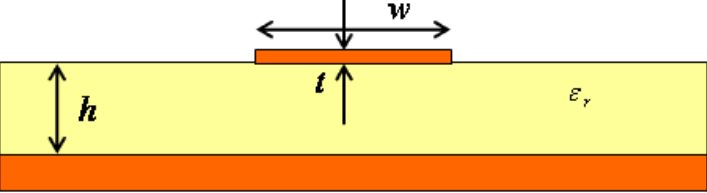
特性インピーダンス

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \frac{\log \frac{b}{a}}{2\pi}$$



Microstrip Line

2010.10.30 Takuichi Hirano



Input

Dielectric constant ϵ_r	<input type="text" value="4"/>
Height of dielectric layer h	<input type="text" value="0.005"/> mm
Width of signal line w	<input type="text" value="0.010"/> mm
Thickness of signal line t	<input type="text" value="0.001"/> mm

Output

Characteristic impedance Z_0	<input type="text"/>	Ohms
Effective relative permittivity ϵ_{eff}	<input type="text"/>	

$$\lambda_g = \lambda_0 / \sqrt{\epsilon_{reff}}$$
$$\beta = 2\pi / \lambda_g$$



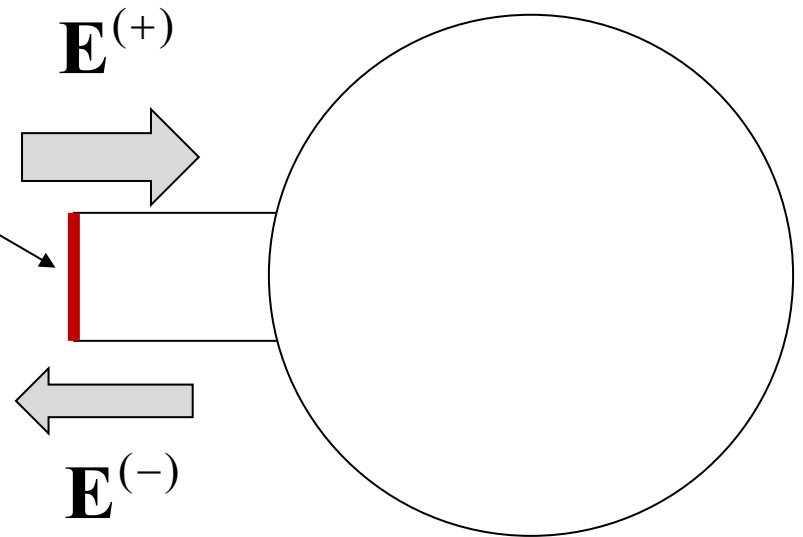
導波路モードの考え方



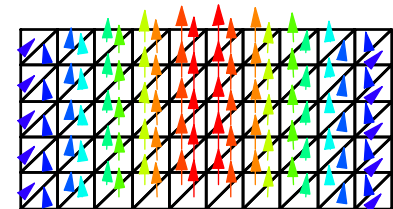
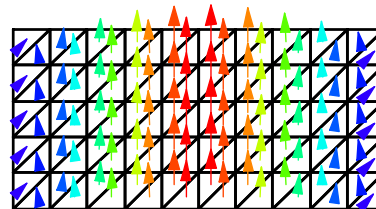
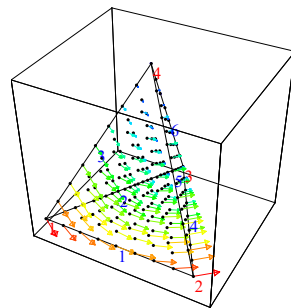
- ✿線路は各ブロックの信号伝送に用いられる。
- ✿不連続部では電磁界の境界条件を満たすように高次モードが発生する。減衰モードはその場所を離れると指数関数的に減衰する。
- ✿線路は普通、シングルモード(単一モード)で用いる。同軸ケーブルも高周波になるほど細くなるのはこのため。マルチモード(多モード)では線路の曲げ方等によって特性は大きく変化するので安定動作しない。
- ✿線路は断面形状が無限に続くものとしてモードを計算しているので、不連続部やコーナ一部では予期しない放射などが生じ得る。
- ✿線路の断面は理想的には2次元の無限に広い面を必要とするので(導波管のような閉構造は別)、線路を近づけると予期しない線路間の結合が起こる。

$$\mathbf{E}_P = \mathbf{e}^{(+)} + B\mathbf{e}^{(-)}$$

↑
反射係数



$$\mathbf{E} = \sum_{j=1}^N a_j \mathbf{E}_j + \left[\mathbf{e}^{(+)} + B\mathbf{e}^{(-)} \right]$$



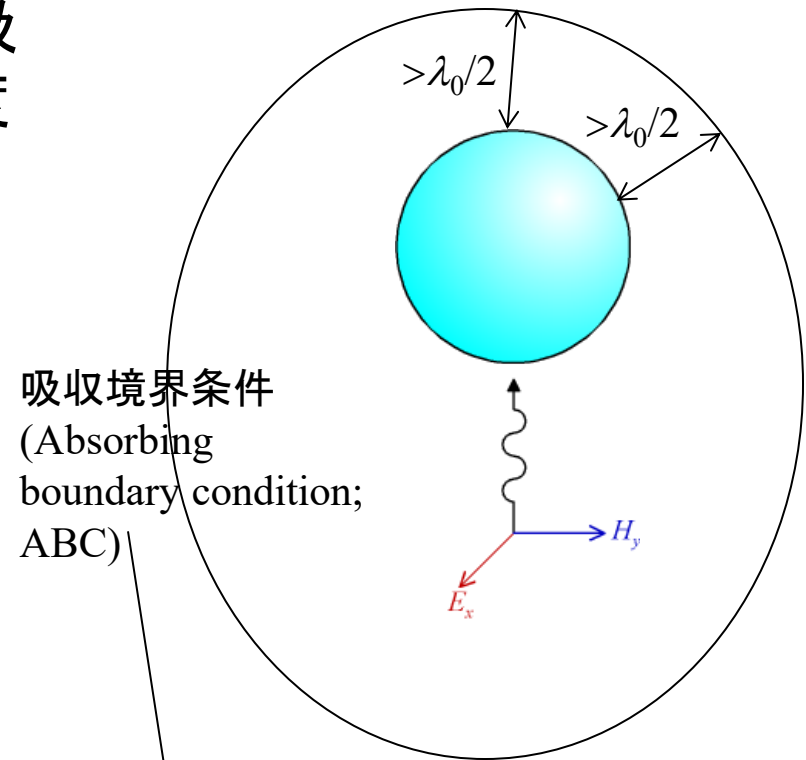
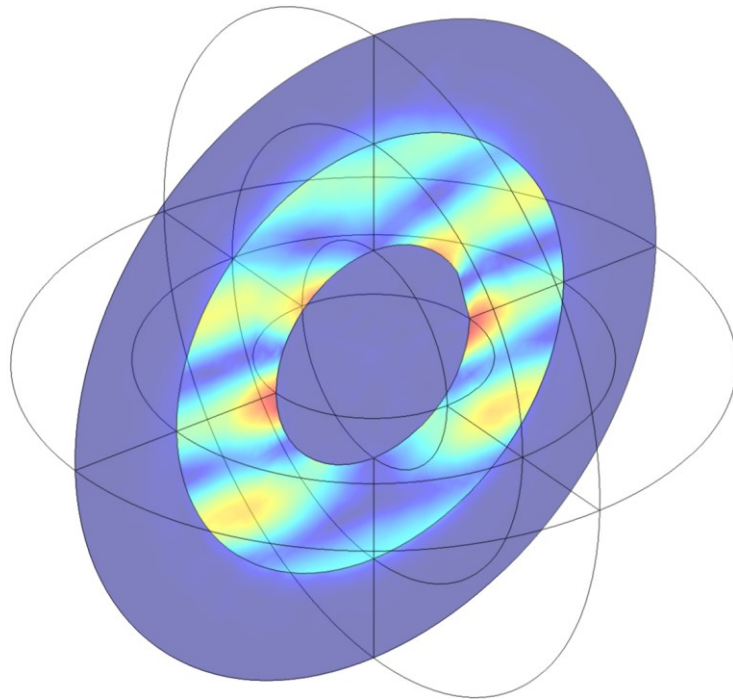
$$\begin{bmatrix}
 K_{11} & K_{12} & \cdots & K_{1N} & * \\
 K_{21} & K_{22} & \cdots & K_{2N} & * \\
 \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & * \\
 K_{N1} & K_{N2} & \cdots & K_{NN} & * \\
 * & * & * & * & *
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 a_1 \\
 a_2 \\
 \vdots \\
 a_N \\
 B
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 F_1 \\
 F_2 \\
 \vdots \\
 F_N \\
 *
 \end{bmatrix}$$

この方程式を生成するためには、モード関数との内積を取る $\mathbf{e}^{(\pm)}$

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。

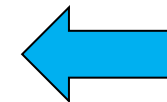


吸収境界条件
(Absorbing
boundary condition;
ABC)

COMSOL: 散乱境界条件 or PML
HFSS: 放射境界 or PML
CST: Open Boundary or PML

発表の流れ

- 電磁界シミュレーションの基礎
- 有限要素法の原理
- 励振方法の種類
 - 集中ポート
 - **ポート(導波路モード励振)**
 - 平面波入射
- 各励振モデルの規範問題
～ COMSOLによる解析例 ～



各励振モデルの規範問題 ～ COMSOLによる解析例 ～

エレクトロニクスシミュレーション研究会の規範問題 No.15

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専門委員会



http://www.ieice.org/es/est/ エレクトロニクス

ファイル(E) 編集(E) 表示(V) お気に入り(A) ツール(I) ヘルプ(H)

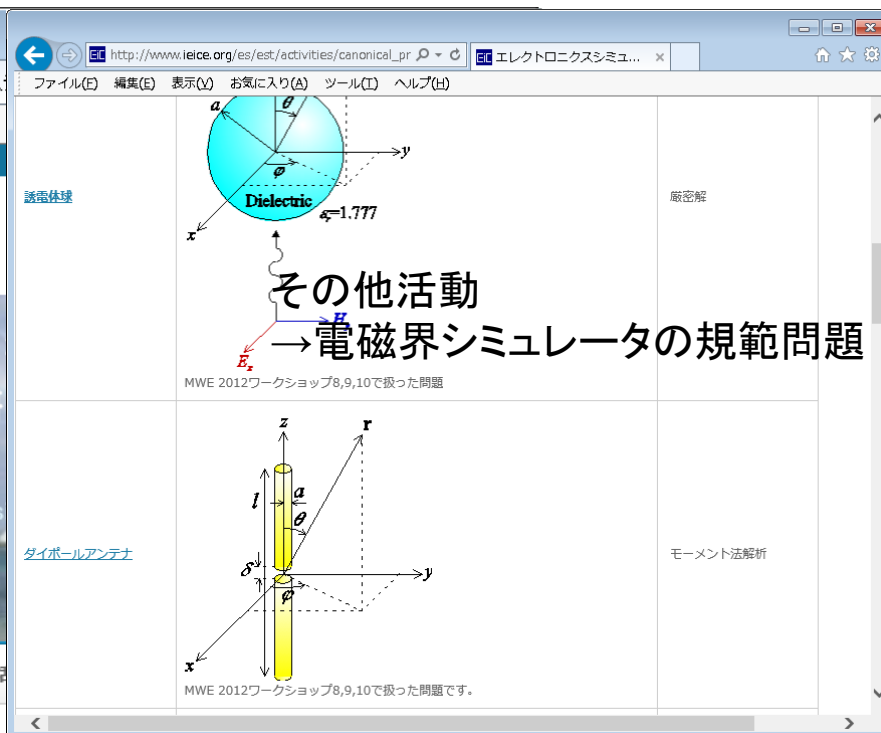
電子情報通信学会 エレクトロニクスソサイエティ エレクトロニクスシミュレーション研究会

EST 電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ
エレクトロニクスシミュレーション研究会

マイクロ波シミュレータ(電磁界解析)、熱解析、流体解
およびエレクトロニクス全般のシミュレーション技術を研

Microwave Simulators (EM Analysis), Thermal Analysis, Fluid Analysis
and All Simulation Technologies in Electronics Field

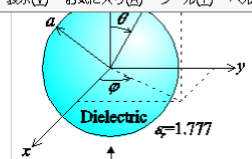
トップページ EST研について 研究会 ワークショップ 講習会 その他



http://www.ieice.org/es/est/activities/canonical_pr... エレクトロニクスシミュ...

ファイル(E) 編集(E) 表示(V) お気に入り(A) ツール(I) ヘルプ(H)

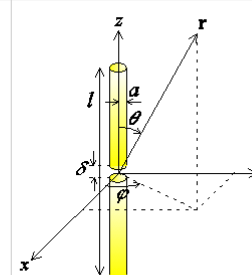
誘電体球



その他活動
→電磁界シミュレータの規範問題

MWE 2012ワークショップ8,9,10で扱った問題

ダイポールアンテナ



モーメント法解析

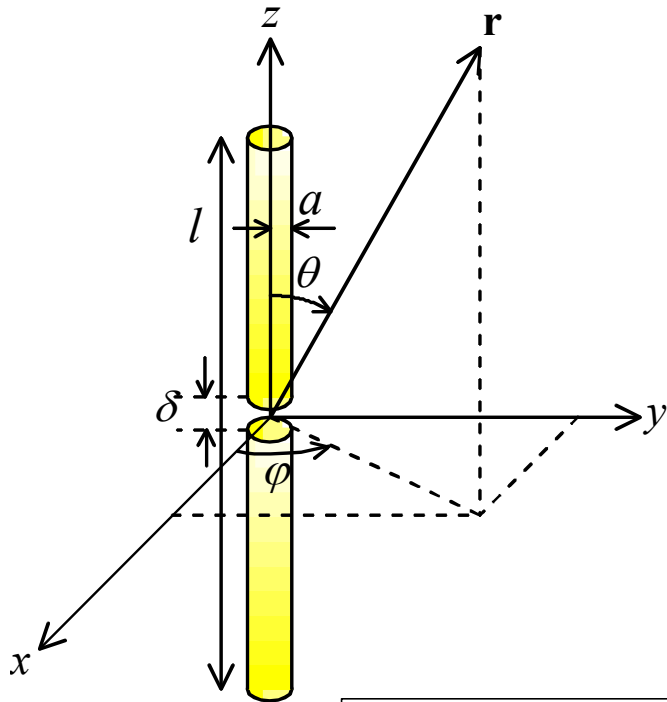
MWE 2012ワークショップ8,9,10で扱った問題です。

NEWS新着情報

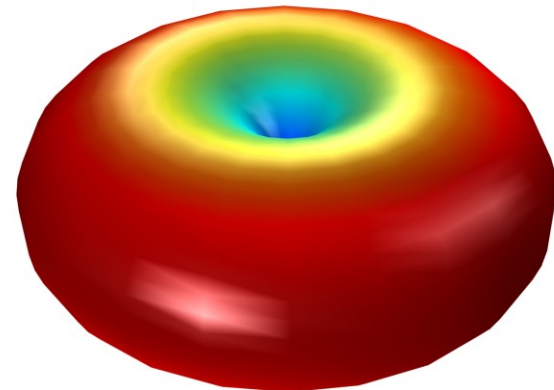
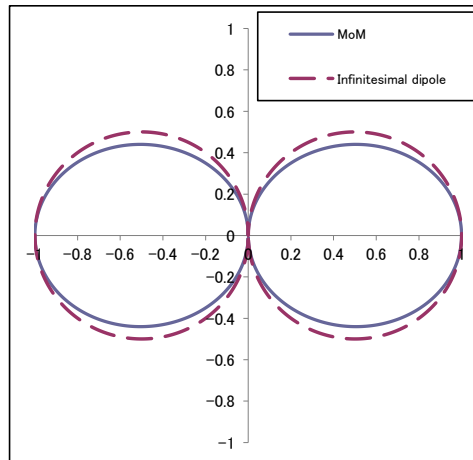
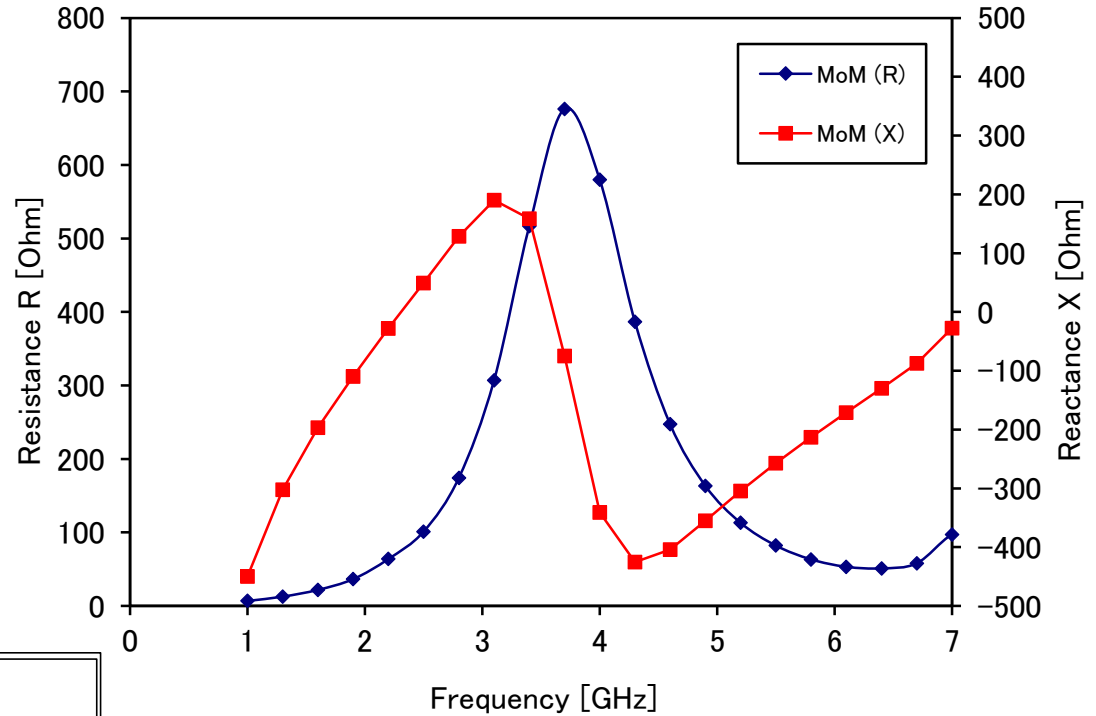
- 2015年6月17日 英文論文誌(C)特集号「エレクトロニクス分野におけるシミュレーション技術とその応用の進展」(2016年7月発行予定)投稿のご案内(投稿締切: 2015年9月16日) **NEW**
- 2015年6月15日 2015年ソサイエティ大会のご案内・ESTセッション案内(申込〆切: 2015年7月1日(水)) **NEW**
- 2015年6月15日 和文論文誌(C)特集号「エレクトロニクス分野におけるシミュレーション技術の進展」(2016年5月発行予定)投稿のご案内(投稿締切: 2015年8月10日) **NEW**
- 2015年5月26日 2015年度 研究専門委員及び委員会内組織の名簿を公開しました。 **NEW**
- 2015年5月22日 現在 2015年9月研究会(石垣島)の発表申込受付中です。お申込みは[こちら](#)からお願いたします(締切7月14日)。 **NEW**



集中ポートの例: ダイポールアンテナ



Input Impedance of Dipole Antenna ($h=30\text{mm}$, $a=0.5\text{mm}$, $d=0.5\text{mm}$)



The screenshot displays the COMSOL Multiphysics software interface for a model named "dipole.mph". The interface is divided into several main sections:

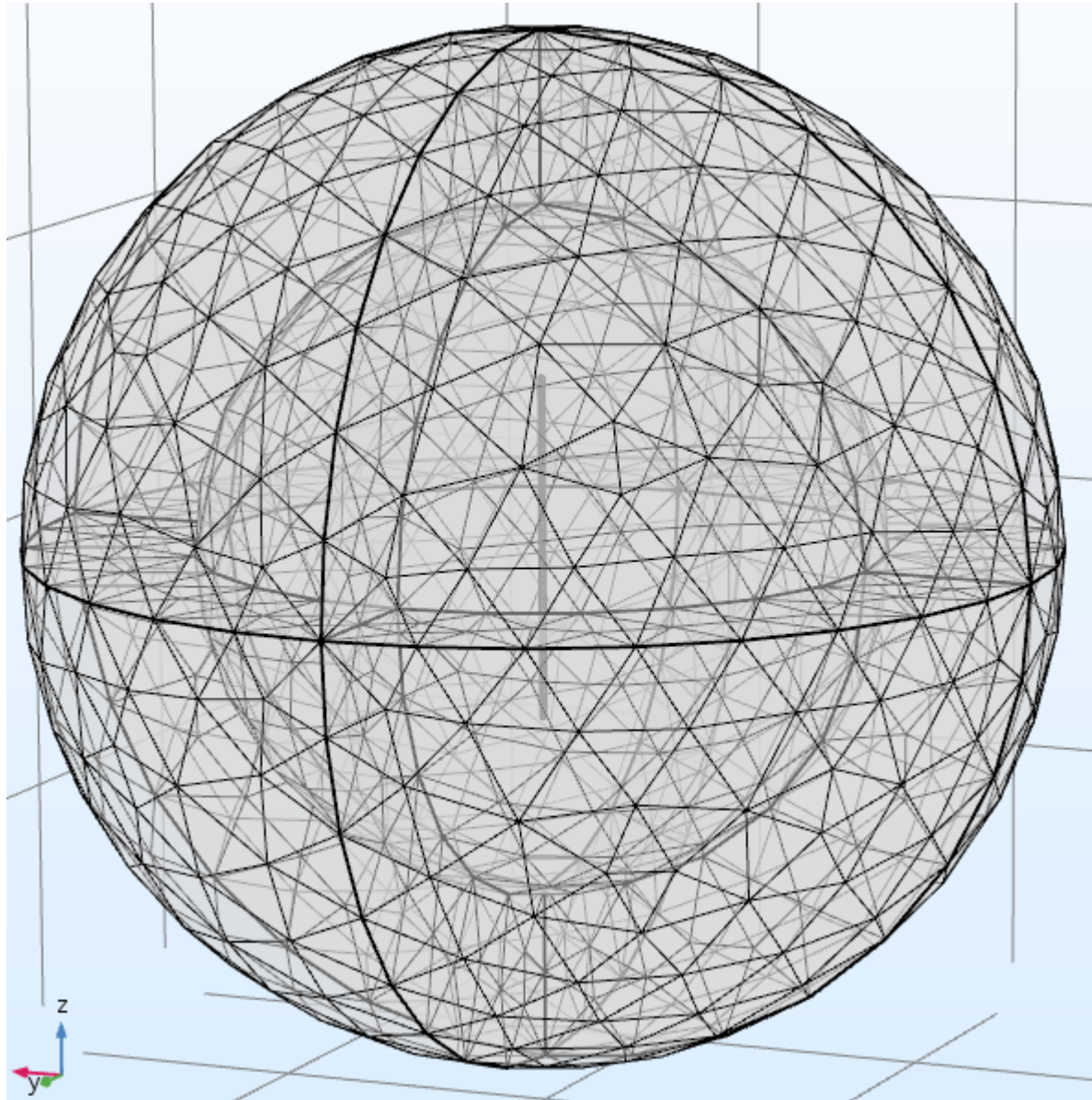
- Model Builder (モデルビルダ):** Located on the left, it shows a hierarchical tree of the model's components. The "Geometry 1" (ジオメトリ 1) section is expanded, showing a sphere (球 1), two cylinders (円筒 1 and 2), and a block (ブロック 1). The "Physics" (電磁波) section is also expanded, showing the "Wave Equation (Electric Field) 1" (波動方程式 (電場) 1) and "Initial Value 1" (初期値 1) settings.
- Settings (設定) - Port (集中ポート):** The central panel shows the configuration for a port. The "Port Name" (集中ポート名) is set to "1". The "Port Type" (集中ポートタイプ) is set to "User-defined" (ユーザー定義). The "Port Height" (集中ポート高さ) is h_{port} and the "Port Width" (集中ポート幅) is w_{port} . The "Direction of Port Terminals" (集中ポートターミナル間の方向) is defined by a table:

0	x
0	y
1	z
- Graphics (グラフィックス):** The right panel shows a 3D visualization of the antenna structure. It consists of a central blue rectangular block (the dipole) positioned between two vertical cylindrical tubes. A coordinate system (x, y, z) is visible in the bottom left of the graphics area.
- Message (メッセージ):** The bottom right panel displays a message from COMSOL Multiphysics 5.2.1.229, stating: "ライセンスは11日で失効します" (License expires in 11 days) and "開かれたファイル: dipole.mph" (Opened file: dipole.mph).

The status bar at the bottom indicates the memory usage: 895 MB | 1067 MB.

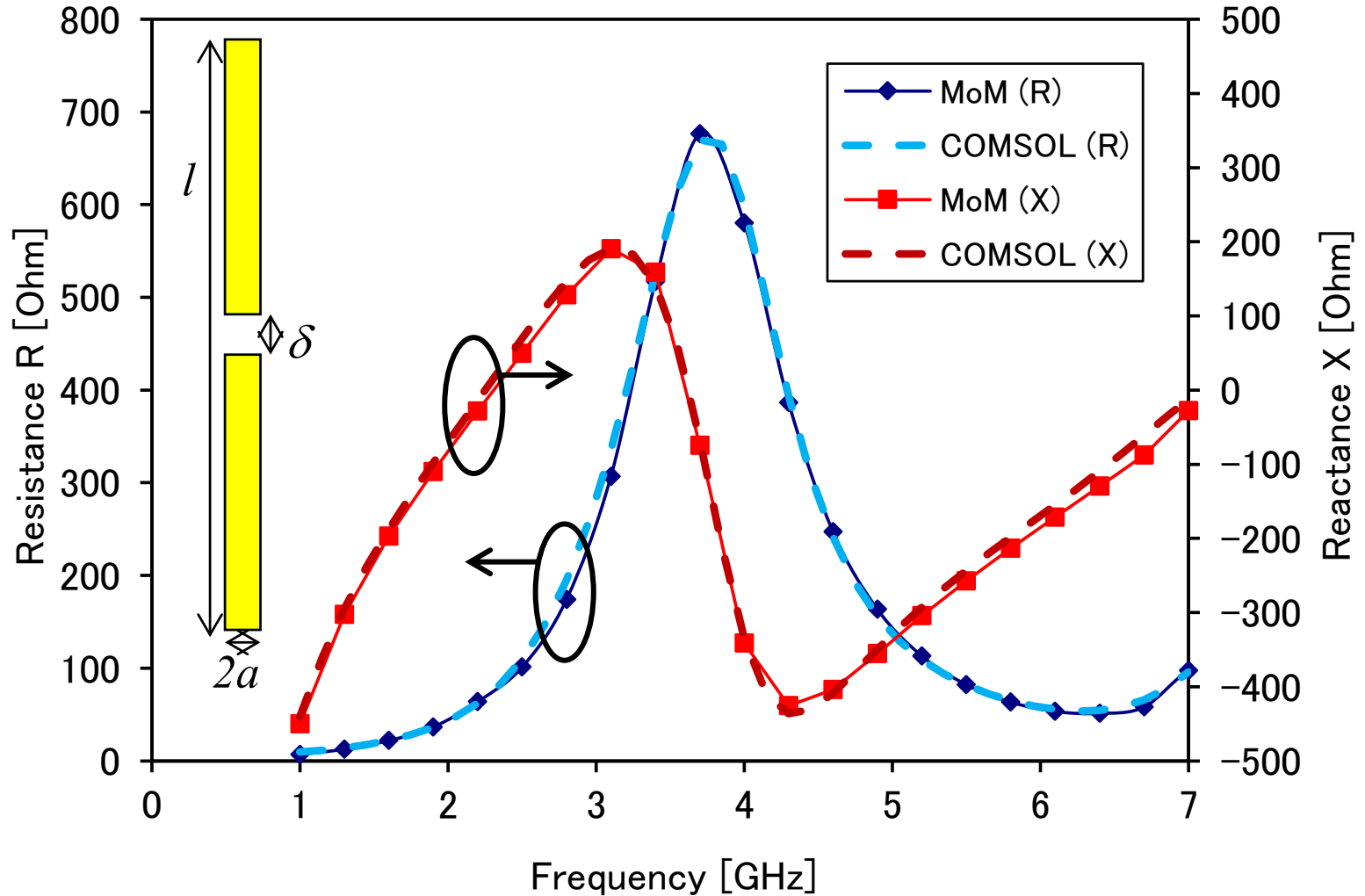
COMSOL (Mesh)

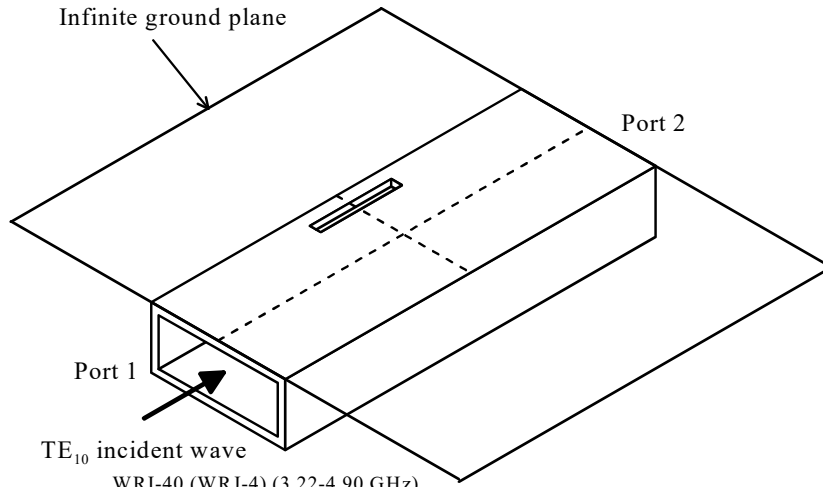
No. 48



集中ポートの例: 比較

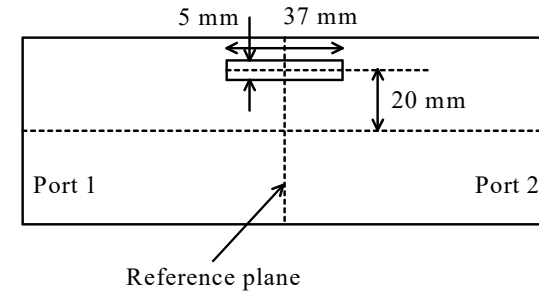
Input Impedance of Dipole Antenna ($l=60.5\text{mm}$, $a=0.5\text{mm}$, $\delta=0.5\text{mm}$)



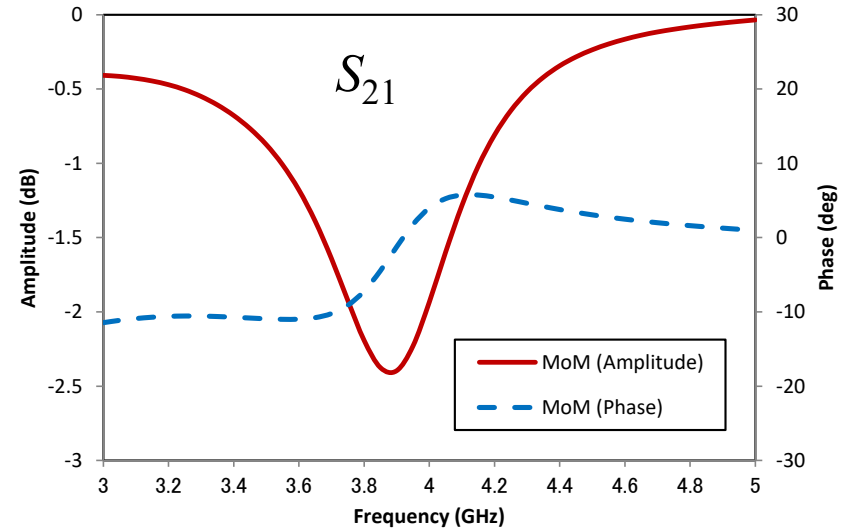
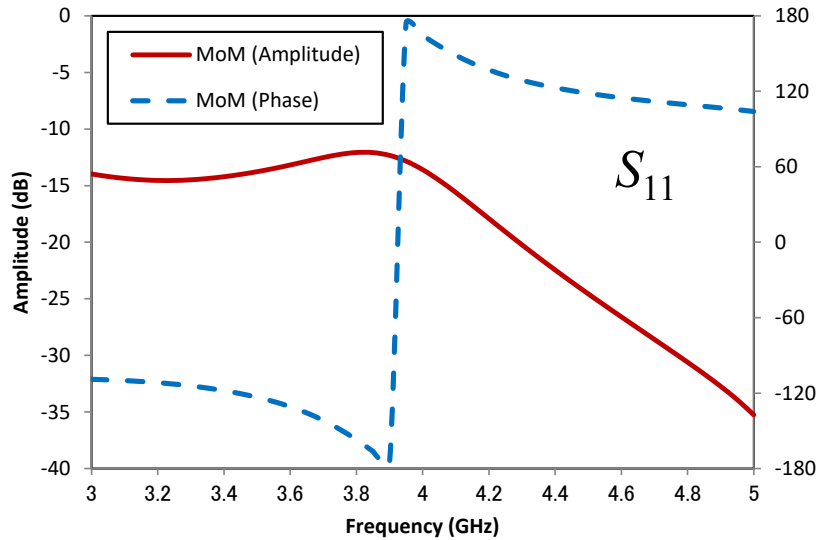


WRI-40 (WRJ-4) (3.22-4.90 GHz)
 58.1 mm x 29.1 mm
 Thickness: 1.6 mm
 Material: Copper (PEC in MoM)

(a) Bird's eye view



(b) Top view



COMSOL (Model)

The screenshot displays the COMSOL Multiphysics software interface for a model named 'wg_slot_antenna.mph'. The interface is divided into several panels:

- Model Builder (モデルビルダ):** Shows a hierarchical tree of the model components. The 'Port 1' (ポート 1) component is selected and highlighted in blue.
- Settings (設定) - Port Properties (ポート特性):** This panel is active and shows the following settings for 'Port 1':
 - ラベル: ポート 1
 - 境界選択 (境界選択): マニュアル
 - アクティブ (アクティブ): ON
 - 優先関係および寄与 (優先関係および寄与):
 - 方程式 (方程式):
 - ポート名 (ポート名): 1
 - ポートタイプ (ポートタイプ): 矩形 (Rectangular)
 - 波動励起 (波動励起): オン (On)
 - 印加パワー指定 (印加パワー指定):
 - ポート入力パワー (ポート入力パワー): P_{in} [W] W
 - 内部ポート境界でスリット条件をアクティブート (内部ポート境界でスリット条件をアクティブート):
 - ポートモード設定 (ポートモード設定):
- Graphics (グラフィックス):** Displays a 3D wireframe model of the slot antenna structure. The structure is a rectangular waveguide with a central slot. The axes are labeled x, y, and z. The z-axis is vertical, and the x and y axes are horizontal. The dimensions of the waveguide are indicated by the grid lines, with values ranging from -0.1 to 0.1.
- Message (メッセージ):** A message box at the bottom right displays the following text:

COMSOL Multiphysics 5.2.1.229
ライセンスは11日で失効します
開かれたファイル: wg_slot_antenna.mph

870 MB | 1085 MB

COMSOL (Port)

矩形

設定 特性

ポート
ラベル: ポート 1

境界選択
選択: マニュアル

7
アクティブ

優先関係および寄与

方程式

▼ ポート特性

ポート名:
1

ポートタイプ:
矩形

波動励起:
オン

印加パワー指定

ポート入力パワー:
 P_{in} 1[W] W

内部ポート境界でスリット条件をアクティブ

▼ ポートモード設定

モードタイプ:
TE

モード数:
10

モード位相:
 θ_{in} 0 rad

数値・・・数値的に2D FEMで導波路モード関数を解析

モデルビルダ

wg_slot_antenna_numerical.mph (root)

- グローバル定義
 - パラメーター
- 材料
- WG_Slot_Antenna (comp1)
 - 定義
 - ジオメトリ 1
 - 材料
 - 電磁波 (周波数領域) (emw)
 - 波動方程式 (電場) 1
 - 電気壁 (PEC) 1
 - 初期値 1
 - 散乱境界条件 1
 - ポート 1
 - ポート 2
 - メッシュ 1
- スタディ 1
 - ステップ 1: 境界モード解析
 - ステップ 2: 境界モード解析 2
 - ステップ 3: 周波数領域
 - ソルバーコンフィギュレーション
 - 結果

設定 特性

ポート
ラベル: ポート 1

境界選択
選択: マニュアル

7
アクティブ

優先関係および寄与

方程式

▼ ポート特性

ポート名:
1

ポートタイプ:
数値

波動励起:
オン

印加パワー指定

ポート入力パワー:
 P_{in} 1[W] W

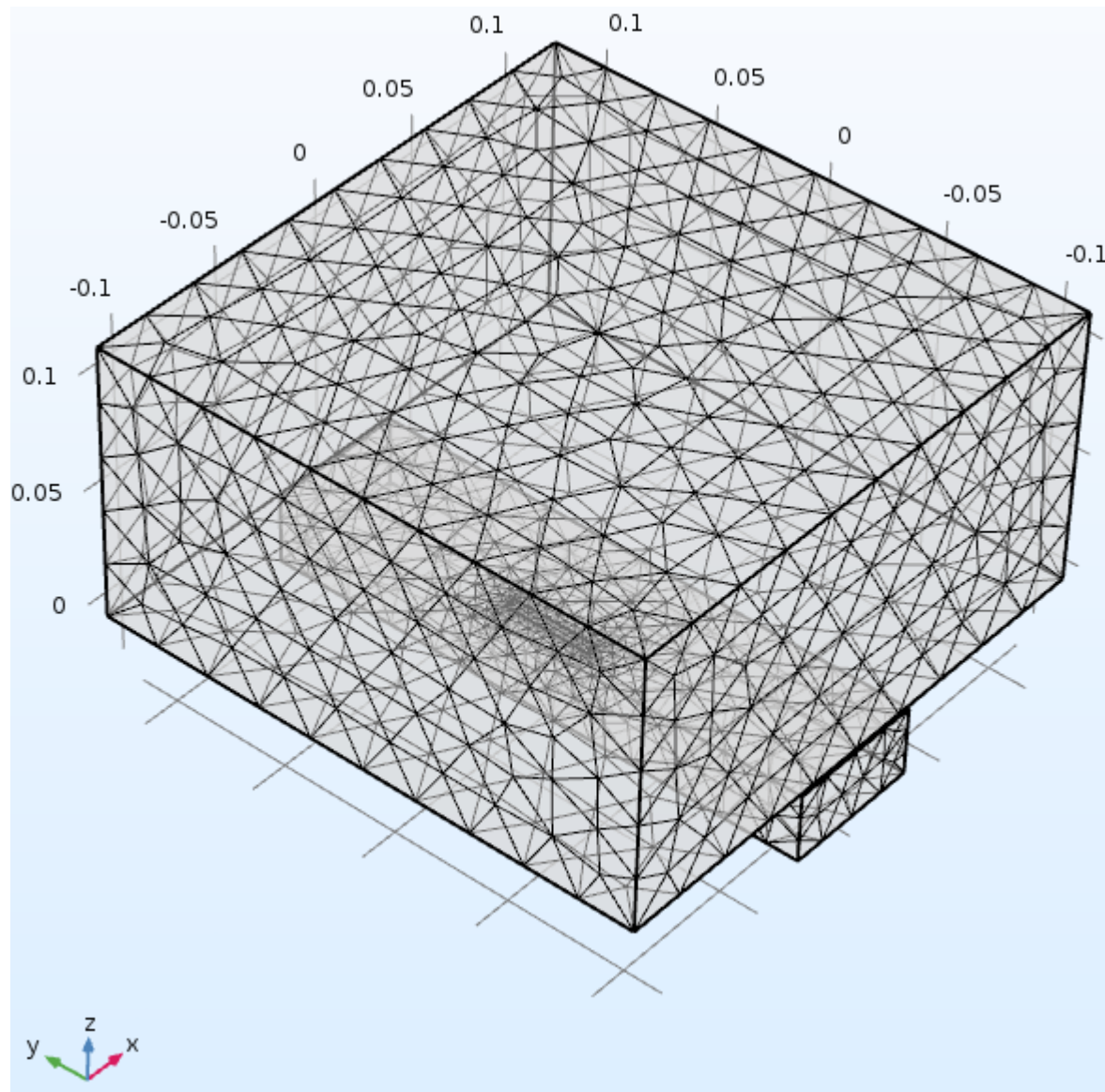
内部ポート境界でスリット条件をアクティブ

TEM 場として解析

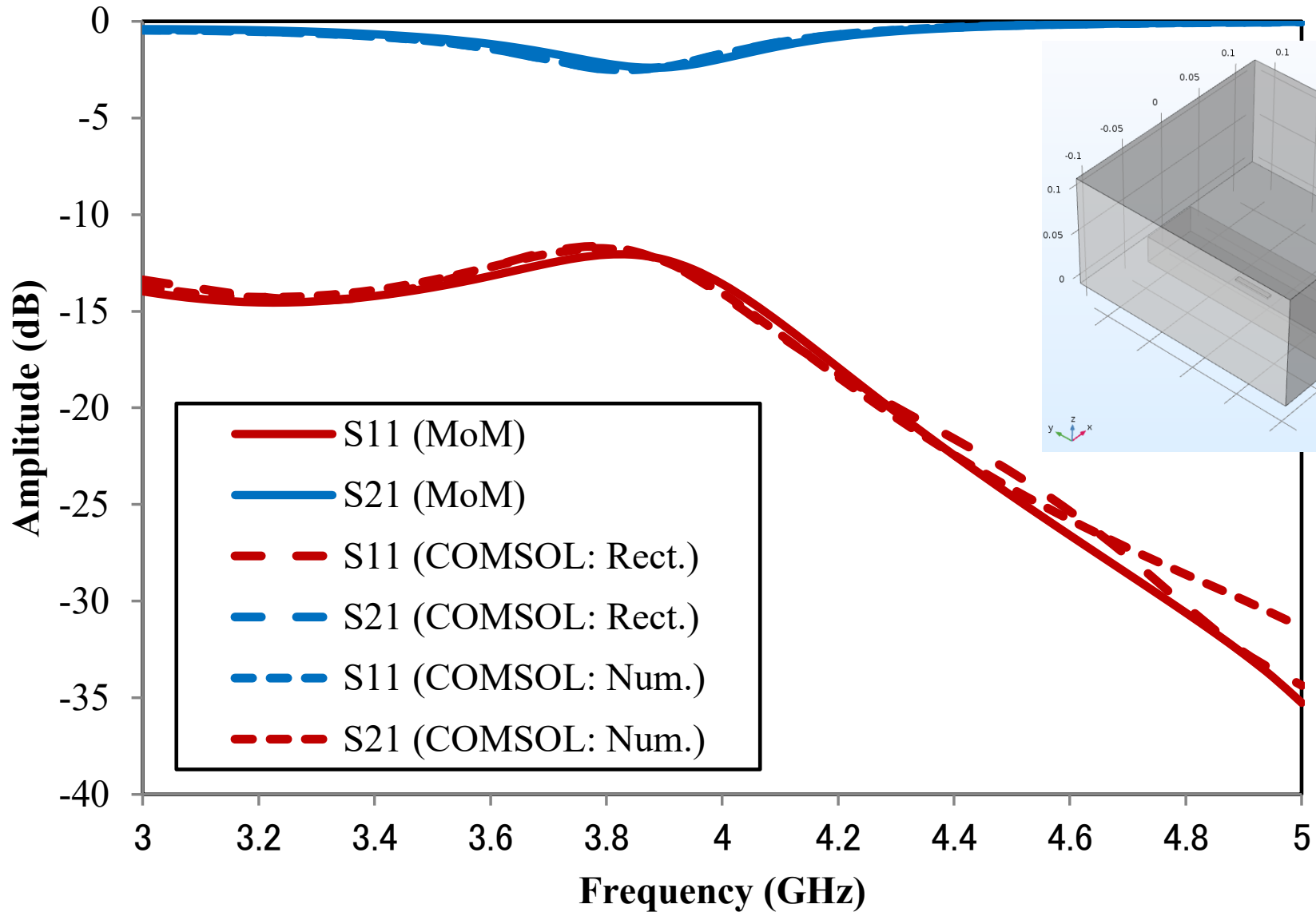
▼ ポートモード設定

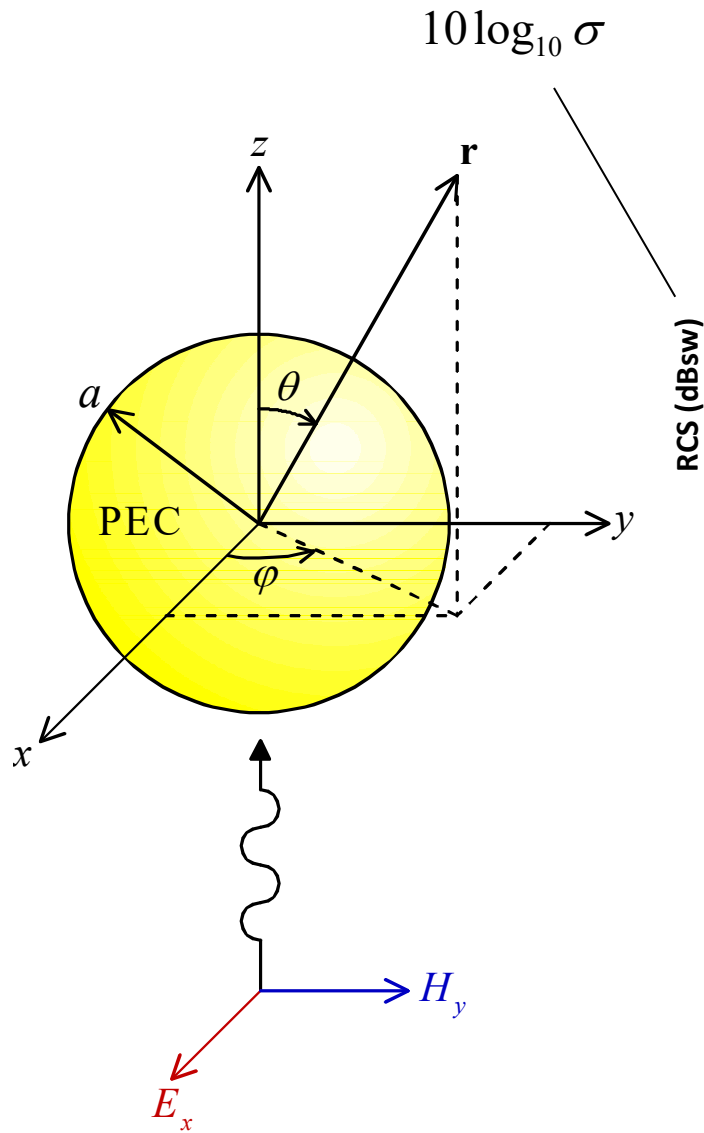
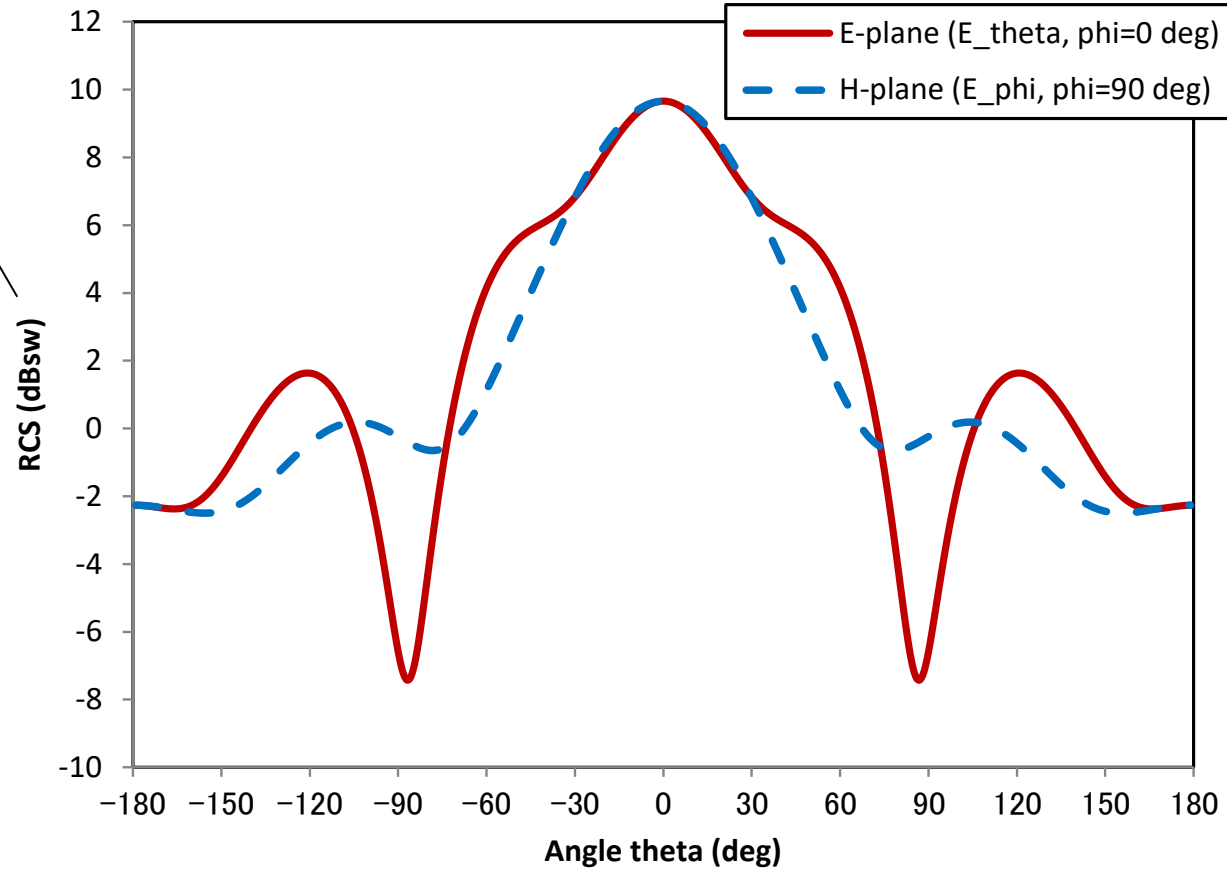
数値ポートは境界モード解析スタディステップを必要とします

モード位相:
 θ_{in} 0 rad



ポートの例: 比較




 $10 \log_{10} \sigma$


Radar Cross Section (RCS):

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} \left[4\pi R^2 \frac{|\mathbf{E}^s|^2}{|\mathbf{E}^i|^2} \right] = \lim_{R \rightarrow \infty} \left[4\pi R^2 \frac{|\mathbf{H}^s|^2}{|\mathbf{H}^i|^2} \right] \quad [\text{m}^2]$$

COMSOL (Model)

The screenshot displays the COMSOL Multiphysics interface for a model named 'sphere.mph'. The left sidebar shows the model tree with components like 'Sphere', '球 1 (sph 1)', and '電磁波 (周波数領域) (emw)'. The central workspace shows a 3D visualization of a sphere within a grid, with a coordinate system (x, y, z) at the bottom left. The right sidebar contains the 'グラフィックス' (Graphics) toolbar and a plot of the radiation pattern. The plot shows the bistatic radar cross-section (m²) versus the angle ϕ (deg), with two curves (blue and green) showing oscillatory behavior. The plot title is '遠方場: バイスタティックレーダ断面積 (m²) 遠方場: バイスタティックレーダ断面積 (m²)'. The bottom status bar indicates '920 MB | 1079 MB'.

設定 特性

電磁波 (周波数領域)

ラベル: 電磁波 (周波数領域)

名前: emw

ドメイン選択

選択: 全ドメイン

1 (pml)
2 (pml)
3 (pml)
4 (pml)
5
6

方程式

設定

計算対象: 散乱場

背景波動タイプ: ユーザー定義

背景電場:

$\exp(-j*emw.k0*z)$	x
0	y
0	z

V/m

ポートスイープ設定

ポートスイープをアクティベート

フィジックス制御メッシュ

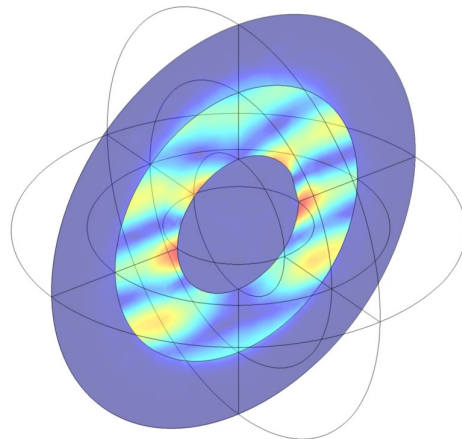
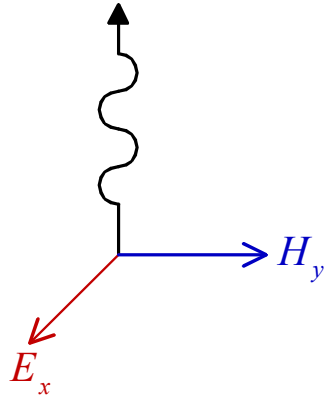
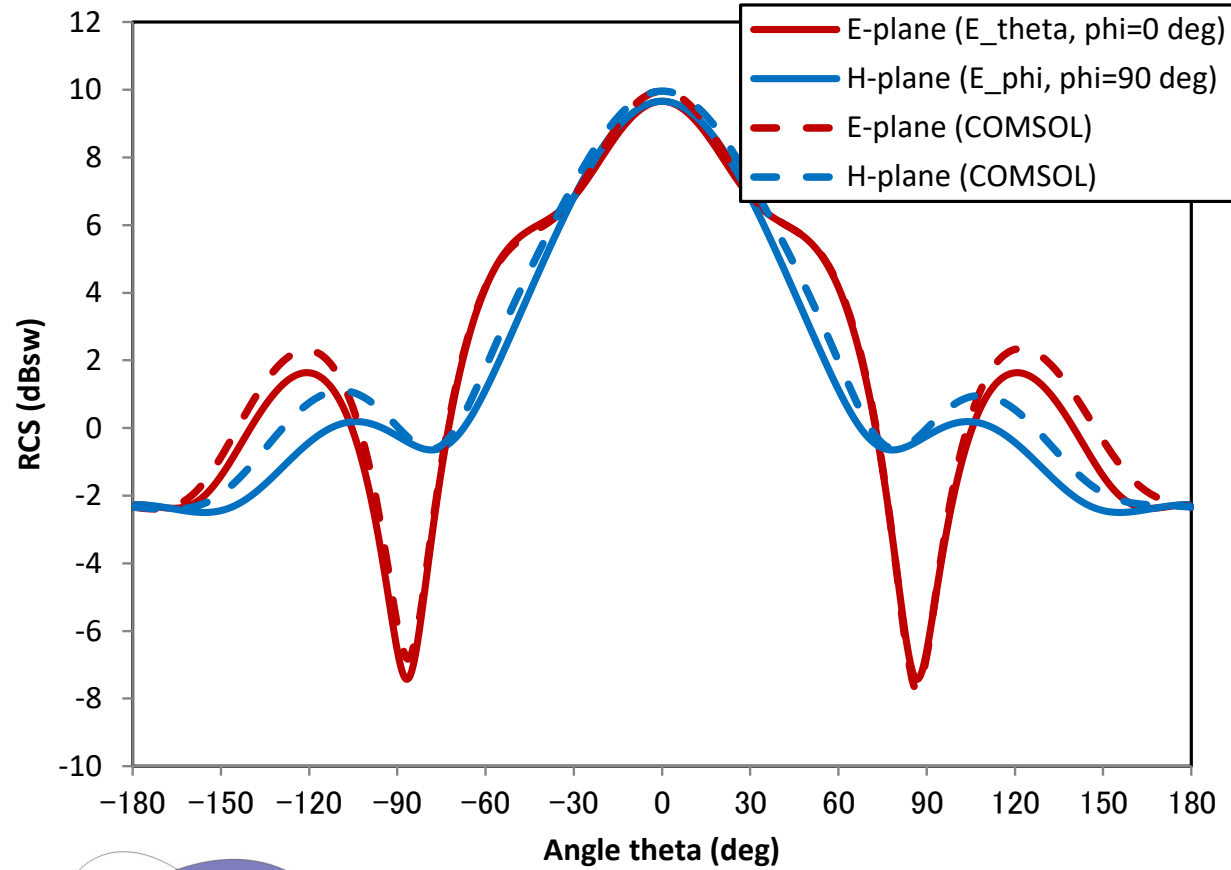
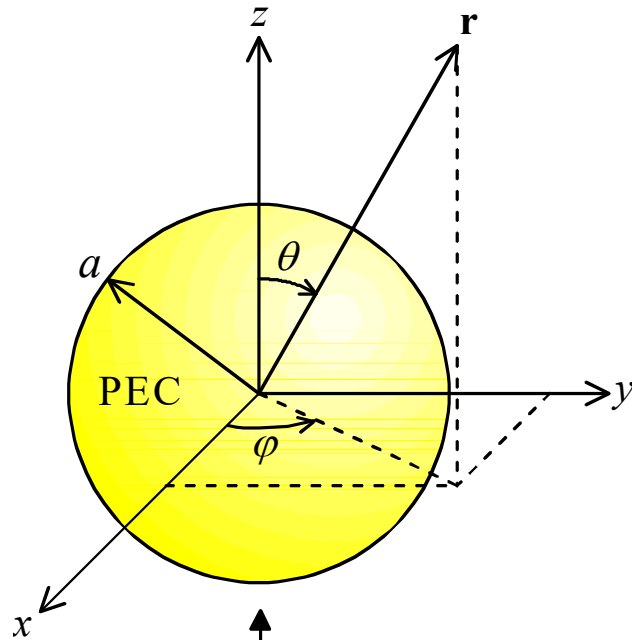
グラフィックス

遠方場: バイスタティックレーダ断面積 (m²) 遠方場: バイスタティックレーダ断面積 (m²)

メッセージ 進捗 ログ Evaluation 3D

COMSOL Multiphysics 5.2.1.229
ライセンスは11日で失効します
開かれたファイル: sphere.mph

920 MB | 1079 MB



おわり

ご清聴どうもありがとうございました。

電磁界解析

http://www.takuichi.net/em_analysis/

電磁界規範問題および市販シミュレータのファイル

