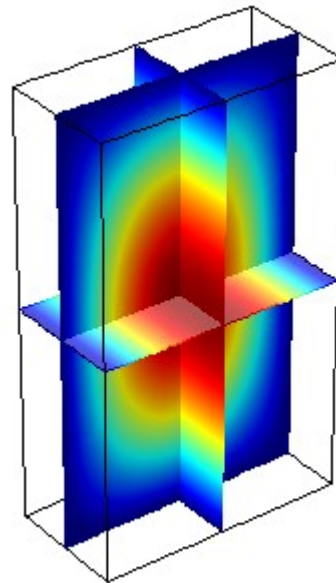


# 有限要素法による電磁界解析の実際

## ～共振器の固有モード解析・集中定数素子などを扱う場合の解析と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](mailto:hirano.t.aa@m.titech.ac.jp)

# 過去のセミナー

## 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

(2017/3/29)

■共振器の固有モード解析・集中定数素子などを扱う場合の解析とCOMSOLにおける実際

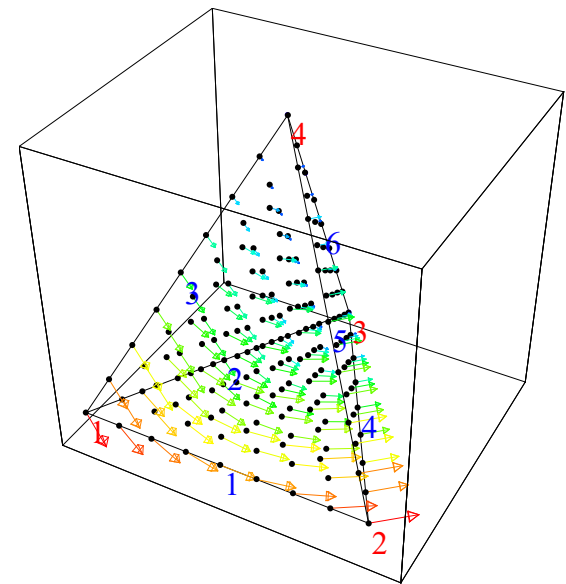
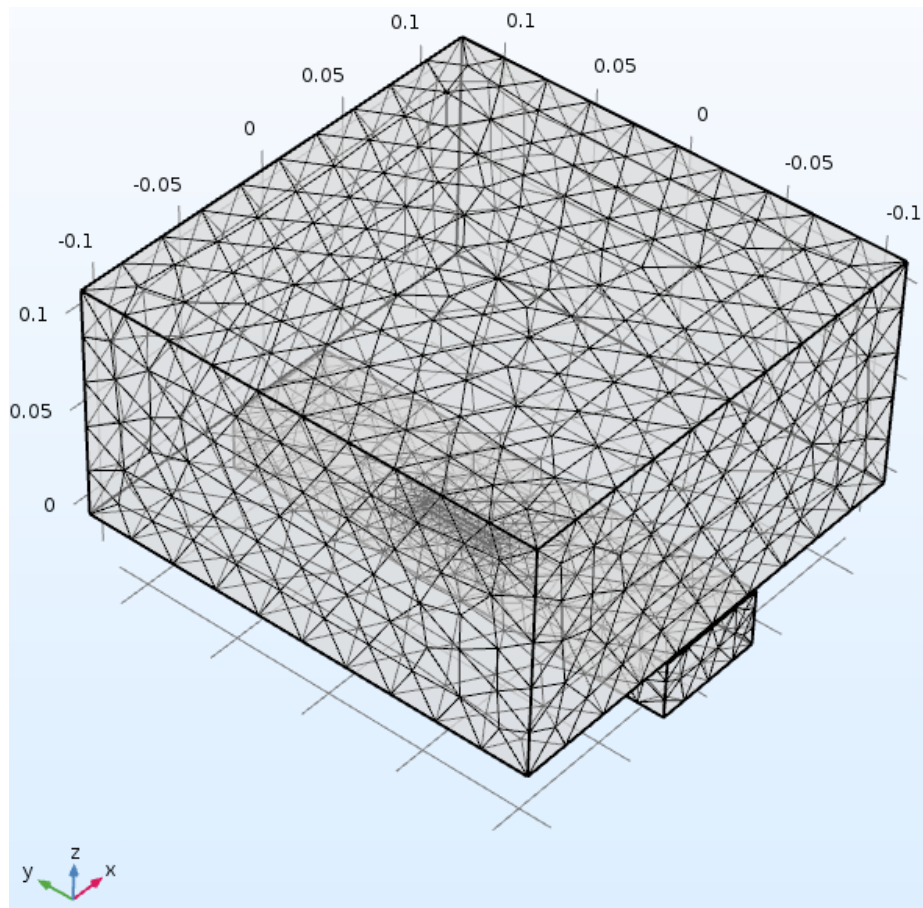
(2017/5/11)

[http://www.takuichi.net/em\\_analysis/fem/fem\\_j.html](http://www.takuichi.net/em_analysis/fem/fem_j.html)



- 有限要素法による電磁界シミュレーション ←
- 励振方法
  - 集中ポート・・・回路シミュレーションとの連成
  - ポート(導波路モード励振)
  - 平面波入射
- 共振器の解析(固有値問題)
- 静磁場との連成解析(サーキュレーター)
- ～ COMSOLによる解析例 ～

# 有限要素法による電磁界シミュレーション



## 有限要素法(FEM; Finite Element Method)

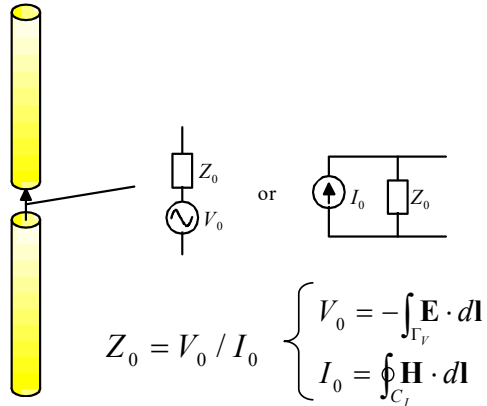
電磁界解析法の1つ。他にモーメント法(MoM; Method of Moments)、FDTD法などがある。全空間に四面体でメッシュを切り、電界を未知数として解析。

## 電磁界シミュレーション

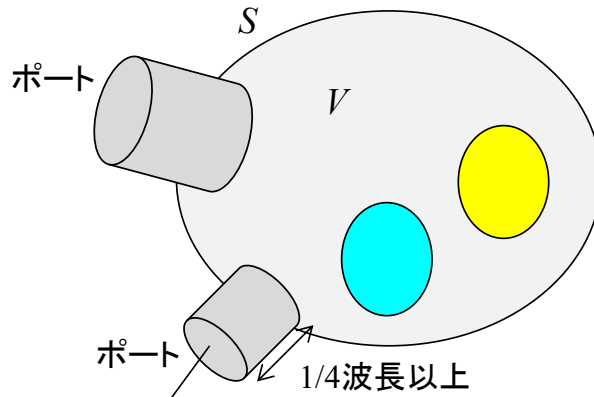
支配方程式のマクスウェルの方程式を数値的に近似計算する。



# 励振方法



(a) 集中ポート



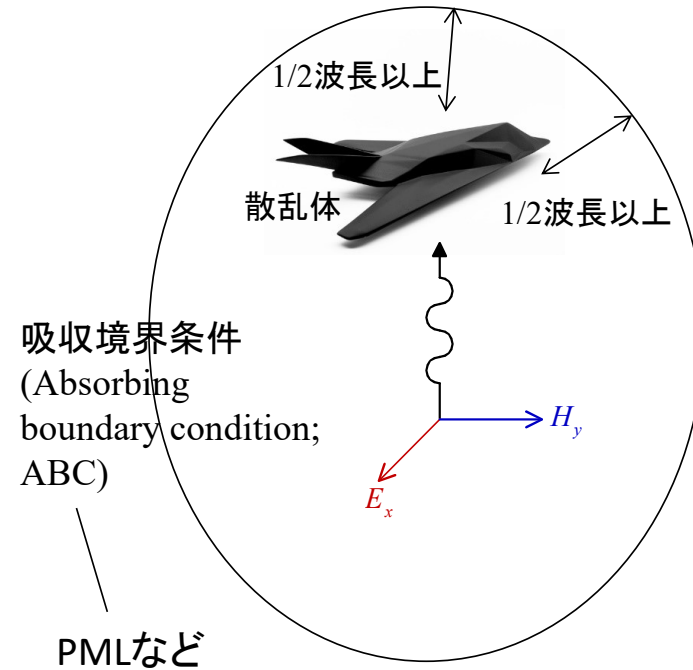
$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1^{(+)} + \sum_u B_u \mathbf{E}_u^{(-)}$$

入射モード

重み

反射モード

(b) 導波路ポート



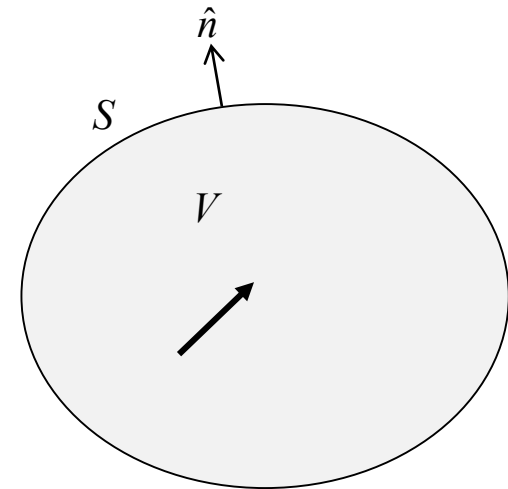
(c) 平面波入射

- 集中ポート (Lumped Port, Lump Port)
- 導波路モード励振 (Wave Port, Waveguide 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)

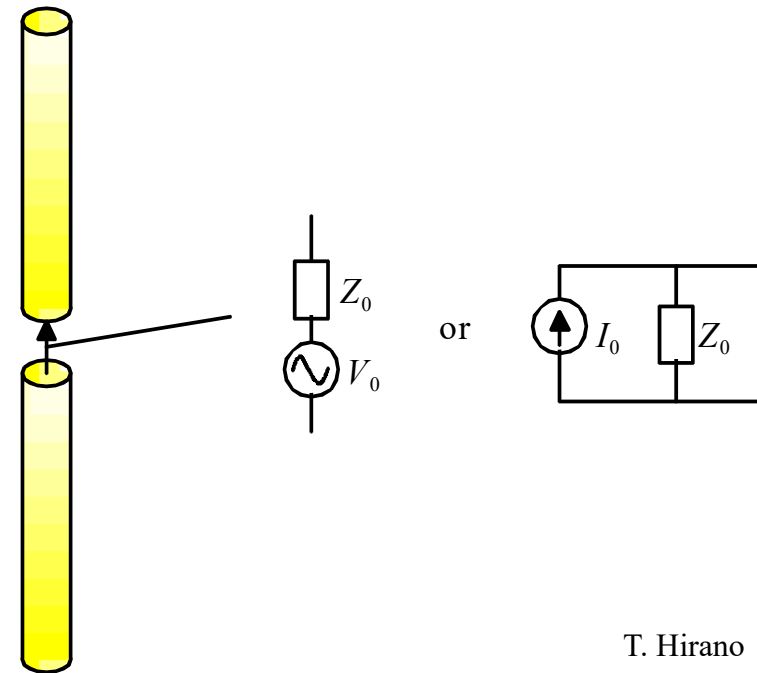
# 励振方法1: 集中ポート

- 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。



$$Z_0 = V_0 / I_0$$

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

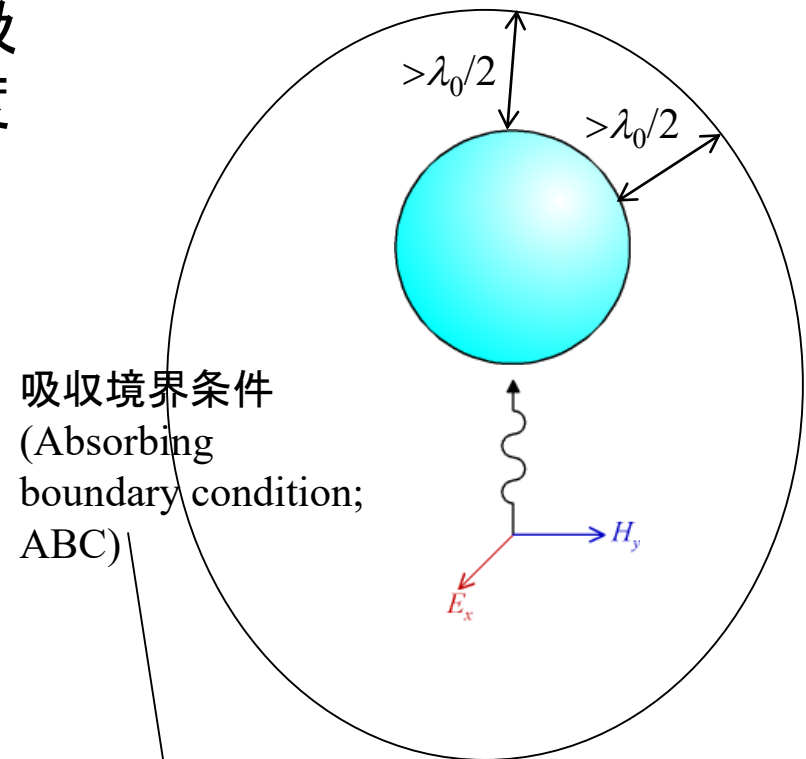
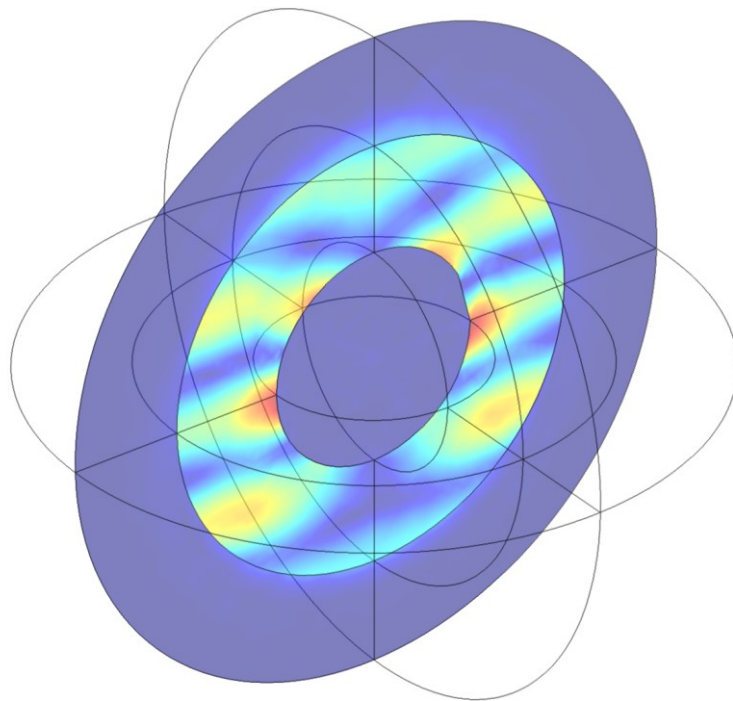




# 励振方法3: 平面波入射

■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。



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

# 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<sup>No.11</sup>

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

Dielectric  $\epsilon_r=1.777$

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

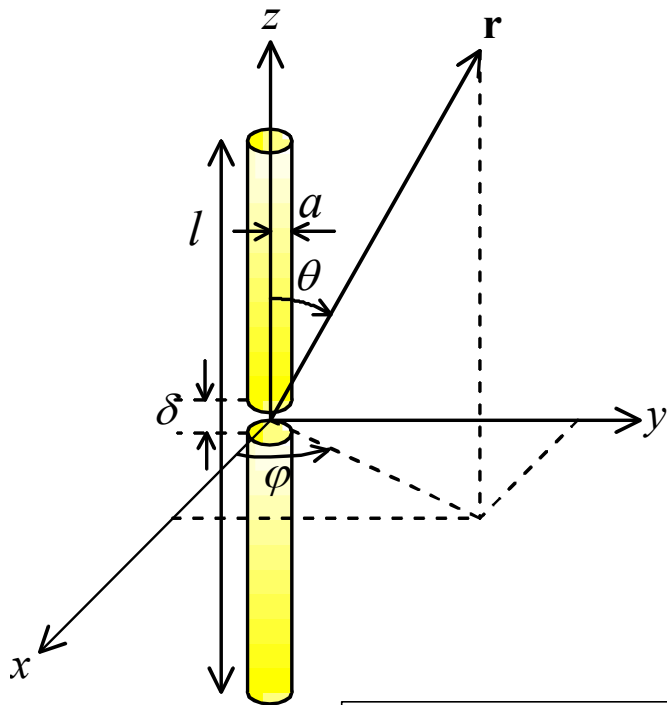
MWE 2012ワークショップ8,9,10で扱った問題です。

## NEWS新着情報

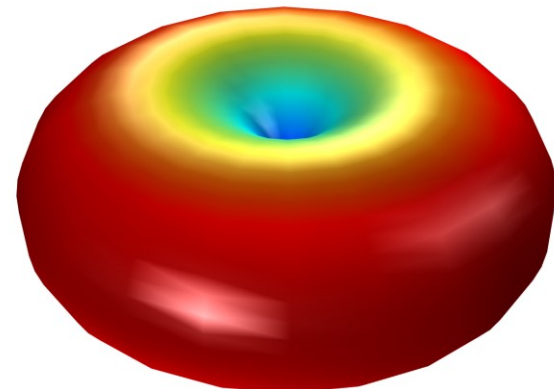
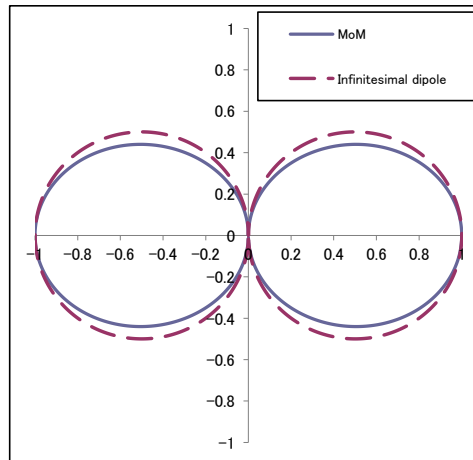
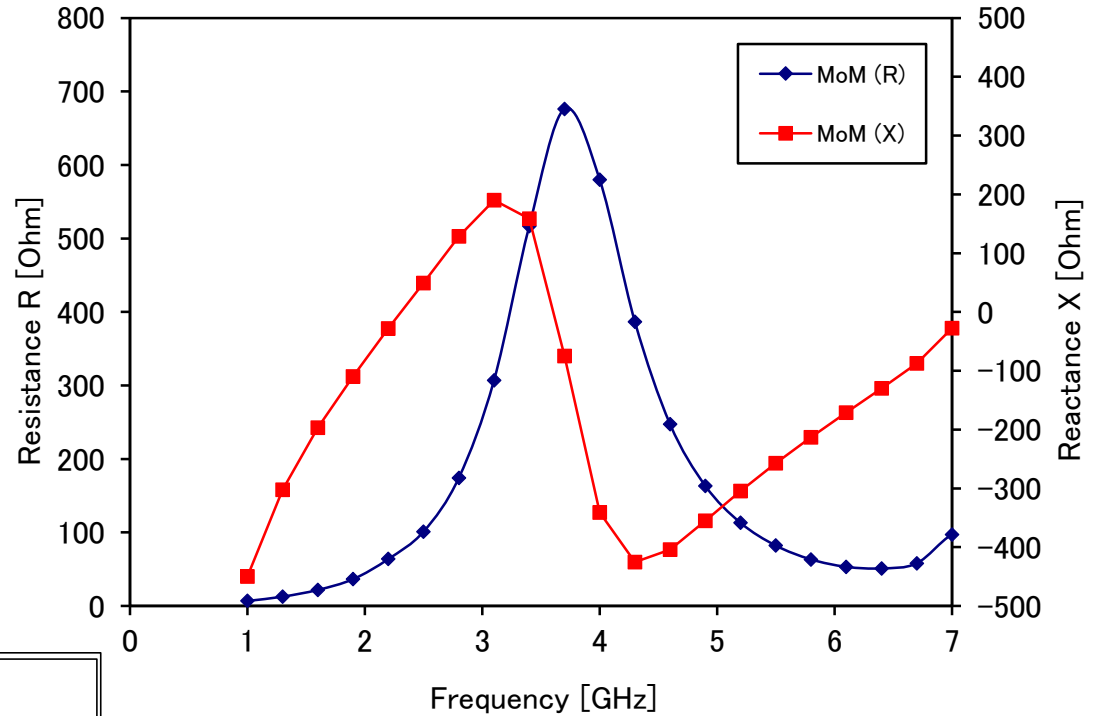
- 2015年6月17日 英文論文誌(C)特集号「エレクトロニクス分野におけるシミュレーション技術とその応用の進展」(2016年7月発行予定)投稿のご案内(投稿締切: 2015年9月16日) **NEW**
- 2015年6月15日 2015年ソサイエティ大会のご案内・ESTセッション案内(申込〆切: 2015年7月1日(水)) **NEW**
- 2015年6月15日 和文論文誌(C)特集号「エレクトロニクス分野におけるシミュレーション技術の進展」(2016年5月発行予定)投稿のご案内(投稿締切: 2015年8月10日) **NEW**
- 2015年5月26日 2015年度 研究専門委員及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 ( $h=30\text{mm}$ ,  $a=0.5\text{mm}$ ,  $d=0.5\text{mm}$ )



# COMSOL (Model)

The screenshot displays the COMSOL Multiphysics interface for a model named 'dipole.mph'. The software is in its trial version. The interface is divided into several main sections:

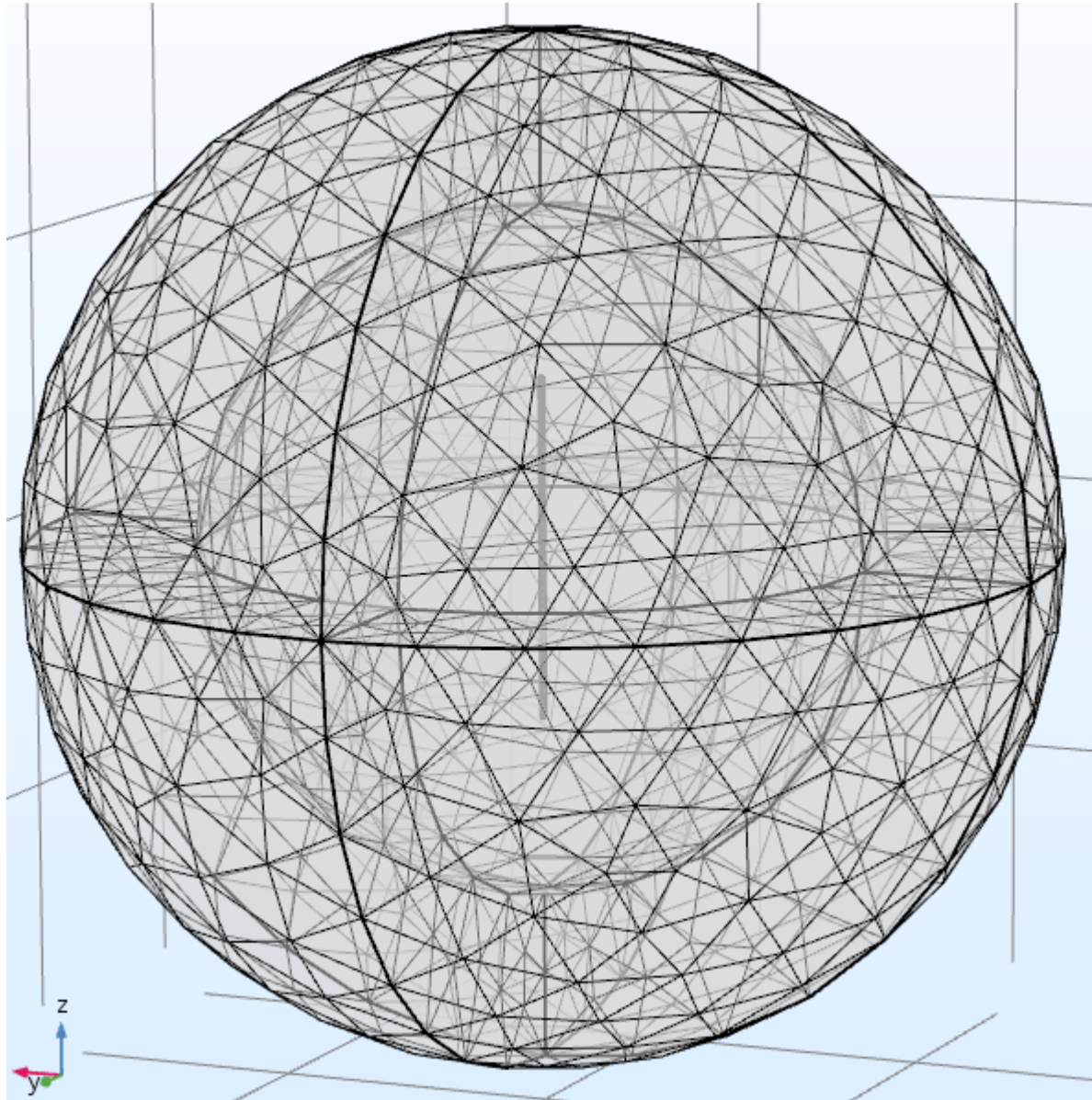
- Model Builder (モデルビルダ):** Located on the left, it shows a hierarchical tree of the model's components. The 'Geometry 1' (ジオメトリ 1) folder is expanded, showing a sphere (球 1), three cylinders (円筒 1, 2, 3), and a block (ブロック 1). The 'Physics' (電磁波) folder is also expanded, showing the 'Wave Equation (Electric Field) 1' (波動方程式 (電場) 1) and 'Initial Value 1' (初期値 1) settings.
- Settings (設定) / Properties (特性):** The central panel shows the configuration for the 'Concentrated Port' (集中ポート). 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 'User-defined' (ユーザー定義). The 'Port Height' (集中ポート高さ) is 'd' and the 'Port Width' (集中ポート幅) is 'a'. 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 model. A blue rectangular block is positioned between two vertical cylindrical structures. A coordinate system with x, y, and z axes is visible in the bottom left of the graphics area.
- Message (メッセージ):** A message box at the bottom right indicates that the COMSOL license is expiring in 11 days and that the file 'dipole.mph' has been opened.

At the bottom of the window, the memory usage is shown as 895 MB | 1067 MB.

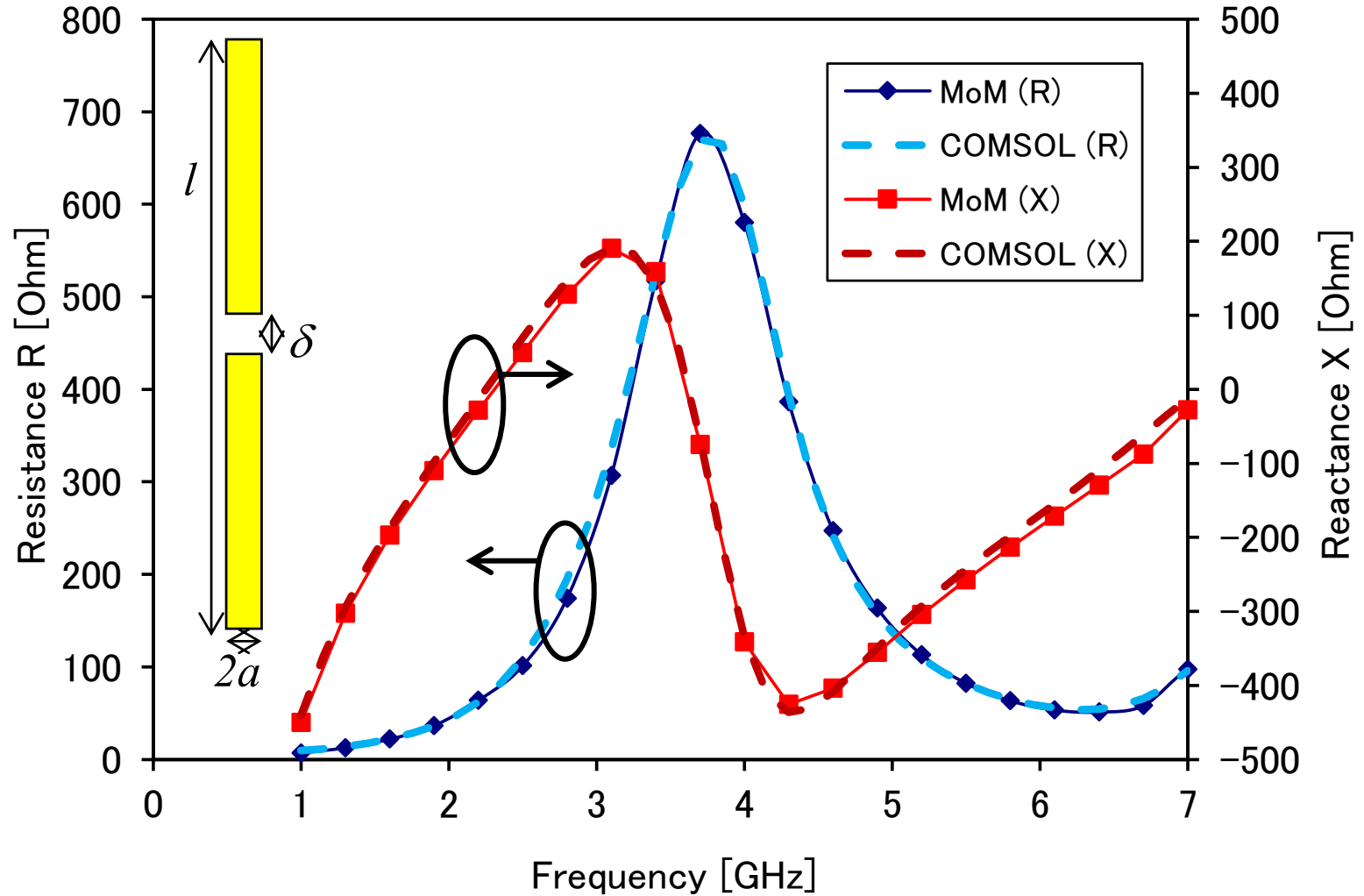
# COMSOL (Mesh)

No. 14



# 集中ポートの例: 比較

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





# 散乱界表示

## ヘルムホルツの方程式

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

$$\mathbf{i} = 0, \mathbf{E} = \mathbf{E}^{scat} + \mathbf{E}^{inc}$$

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

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

入射波が満たす方程式:

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E}^{inc} - k_0^2 \mathbf{E}^{inc} = 0$$

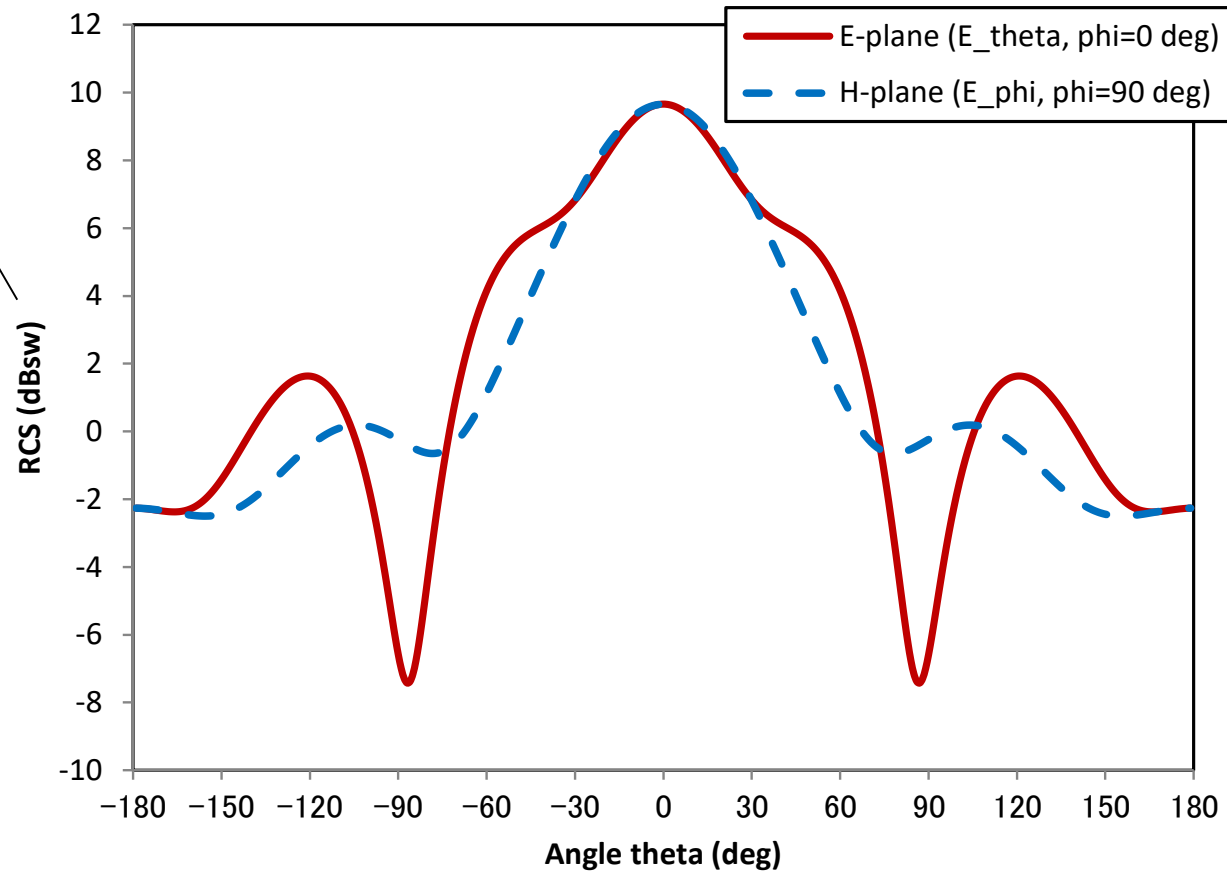
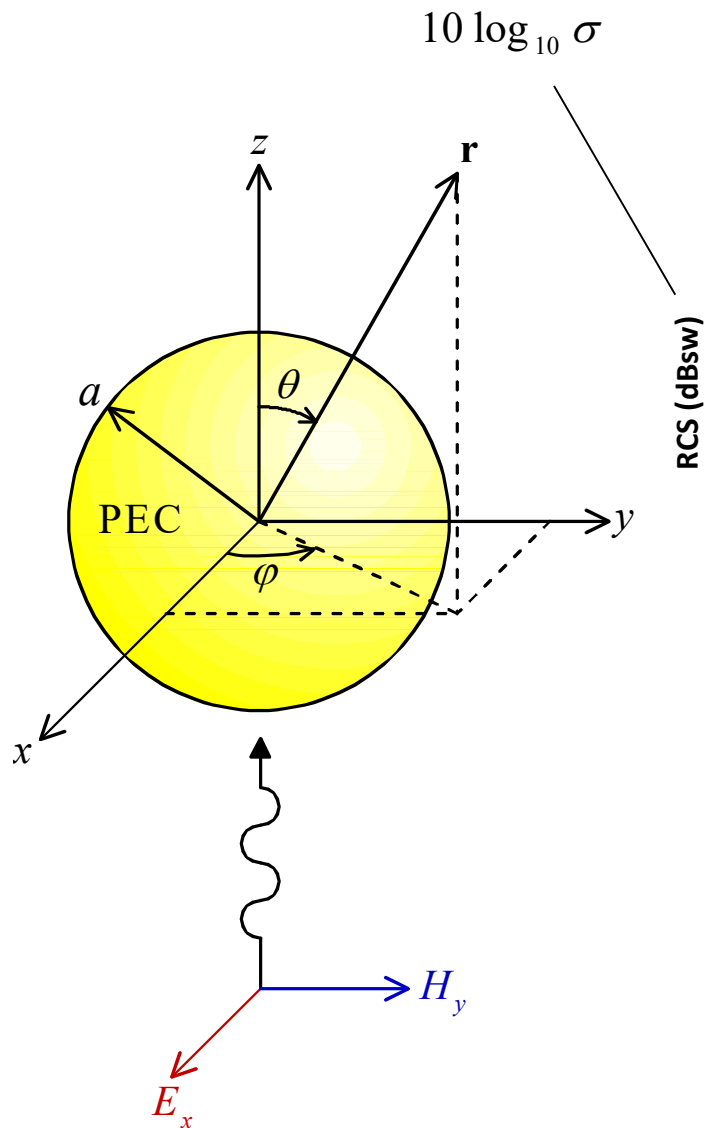
0を右辺から引く

$$\nabla \times \left( \frac{\nabla \times \mathbf{E}^{scat}}{\mu_r} \right) - k_0^2 \varepsilon_r \mathbf{E}^{scat} = -\nabla \times \left( \frac{\nabla \times \mathbf{E}^{inc}}{\mu_r} - \nabla \times \mathbf{E}^{inc} \right) + k_0^2 (\varepsilon_r - 1) \mathbf{E}^{inc}$$

等価電流(しかも、真空中では0)







Radar Cross Section (RCS):

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

## RCSについて

RCS(RADAR Cross Section), レーダー断面積, 散乱断面積

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

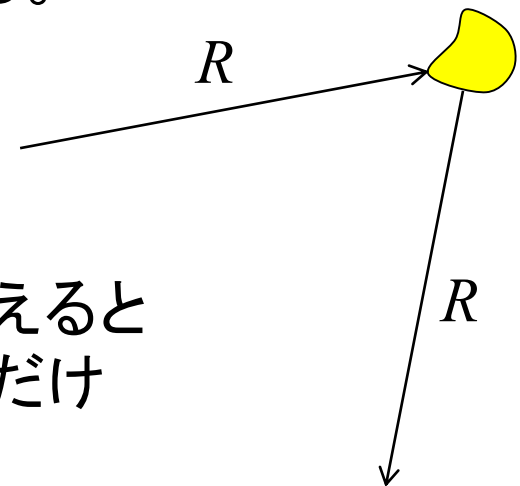
$$\text{デシベル} \rightarrow 10 \log_{10} \sigma \quad [\text{dBsm}]$$

$$10 \log_{10} (\sigma / \lambda_0^2) \quad [\text{dBsw}]$$

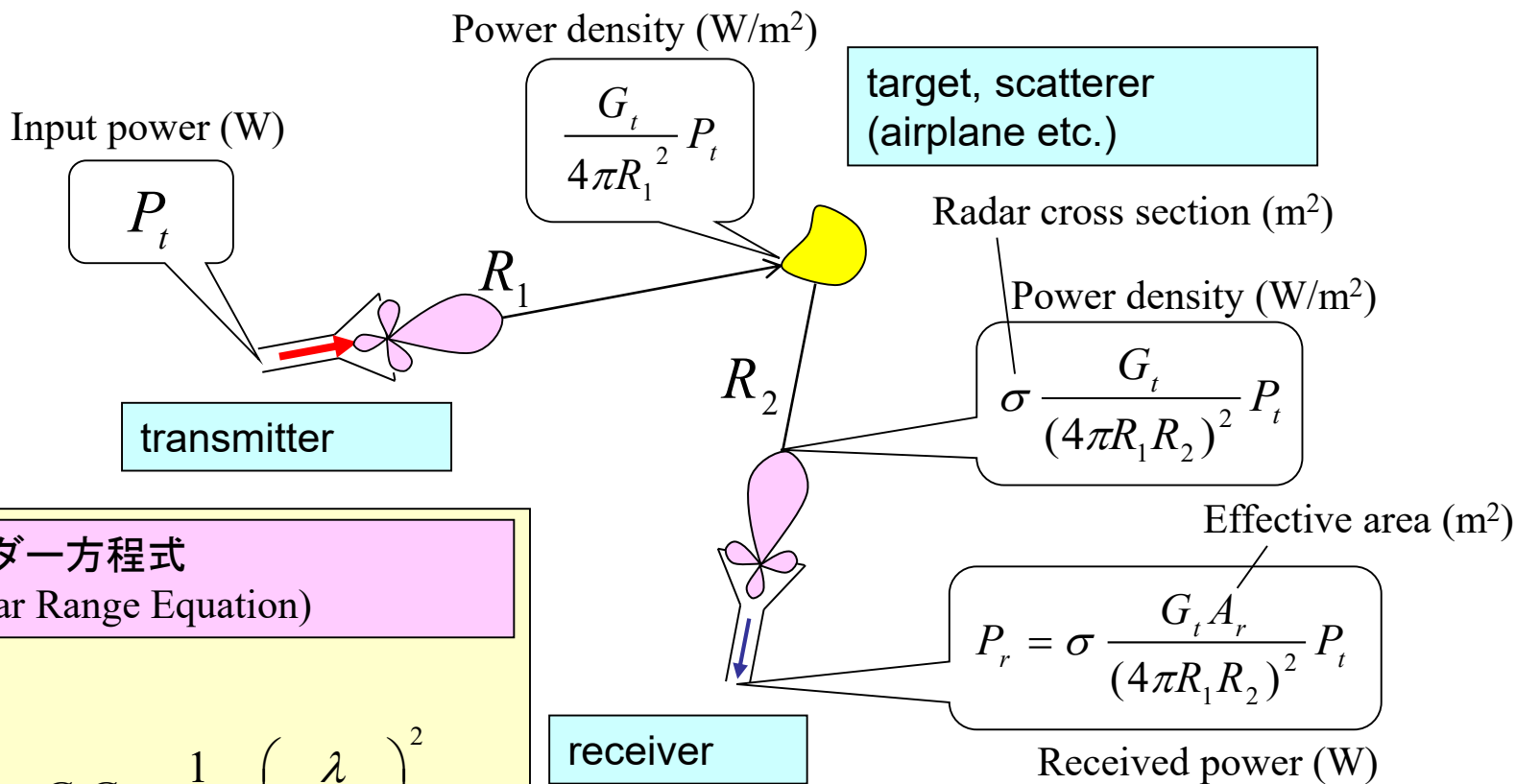
$\sigma$ は入射および散乱角度(方向)の関数となる。

$$|\mathbf{E}^s|^2 = \frac{|\mathbf{E}^i|^2}{4\pi R^2}$$

のとき、等方性となり、全角度の最大値を考えると  
 $\sigma$ は最小の1となる。 $\sigma$ はそれに対して、どれだけ  
 大きいかという指標を与える。



# レーダー方程式 (Radar Range Equation)



## レーダー方程式 (Radar Range Equation)

$$\frac{P_r}{P_t} = \sigma G_t G_r \frac{1}{(4\pi)^3} \left( \frac{\lambda}{R_1 R_2} \right)^2$$

送受信電力の関係

$$A_r = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_r$$

C.A. Balanis: Antenna Theory, John Wiley & Sons, Inc., pp.88-98,1997.

$$P_r|_{dB} - P_t|_{dB} = G_t|_{dB} + G_r|_{dB} + \sigma|_{dB_{sm}} - 10 \log_{10} \left( (4\pi)^3 \left( \frac{R_1 R_2}{\lambda} \right)^2 \right)$$

The screenshot displays the COMSOL Multiphysics interface for a model named 'sphere.mph'. The left sidebar shows the model tree with the following structure:

- sphere.mph (root)
  - グローバル定義
    - パラメーター
  - 材料
  - コンポーネント 1 (comp1)
    - 定義
    - Sphere
      - 球 1 (sph1)
        - 一体化モデルで完成 (fin)
      - 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
        - 遠方場ドメイン 1
      - メッシュ 1
    - スタディ 1
      - ステップ 1: 周波数領域
      - ソルバーコンフィギュレーション
    - 結果

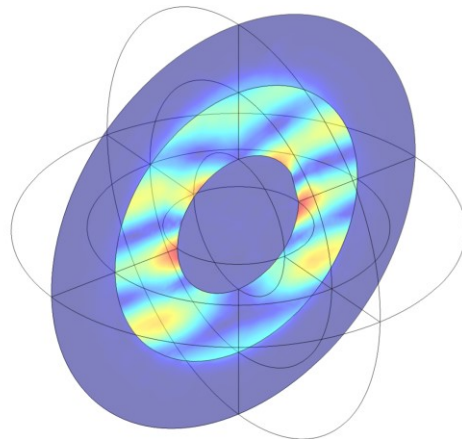
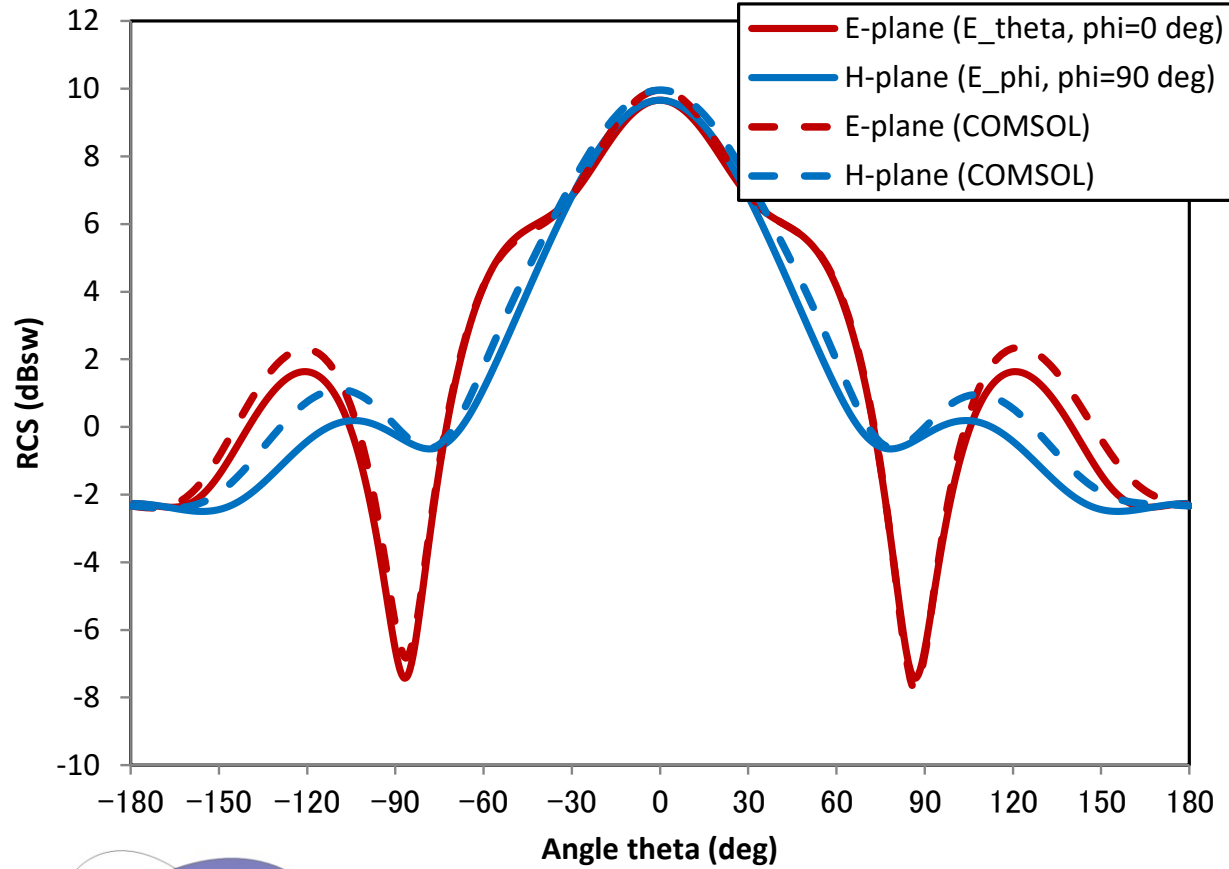
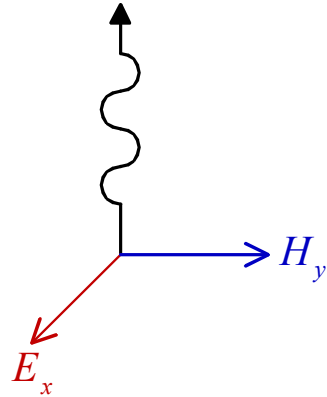
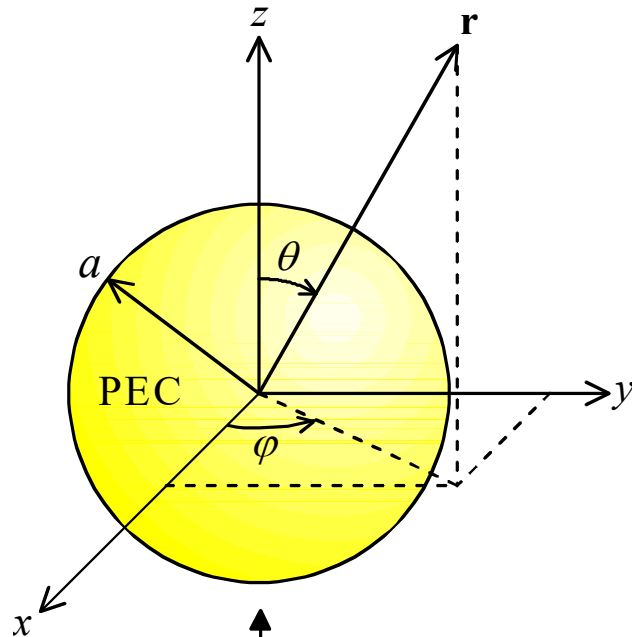
The central '設定' (Settings) pane for the '電磁波 (周波数領域)' (Electromagnetic (Frequency Domain)) component is shown with the following details:

- ラベル: 電磁波 (周波数領域)
- 名前: emw
- ドメイン選択: 全ドメイン
- アクティブ: 1 (pml), 2 (pml), 3 (pml), 4 (pml), 5, 6
- 方程式: 散乱場
- 計算対象: 散乱場
- 背景波動タイプ: ユーザー定義
- 背景電場:  $E_b = \begin{matrix} \exp(-j \cdot emw.k0 \cdot z) & x \\ 0 & y \\ 0 & z \end{matrix}$  V/m
- ポートスイープ設定:  ポートスイープをアクティブ
- フィジックス制御メッシュ

The 'グラフィックス' (Graphics) window shows a 3D visualization of a sphere within a coordinate system (x, y, z). The sphere is centered at the origin and is surrounded by a grid representing the far-field domain. The axes are labeled with values 1, 0, and -1.

Below the 3D view, a 2D plot titled '遠方場: バイスタティックレーダ断面積 (m<sup>2</sup>)' (Far-field: Bistatic Radar Cross Section (m<sup>2</sup>)) is shown. The plot displays two curves (one blue, one green) representing the radar cross section as a function of the angle  $\phi$  (in degrees). The x-axis ranges from -150 to 150 degrees, and the y-axis ranges from 0.2 to 10 m<sup>2</sup>. The curves show a main peak at 0 degrees and several side lobes.

At the bottom of the interface, a message box indicates: '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'.



# 共振器の解析(固有値問題)

## 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)

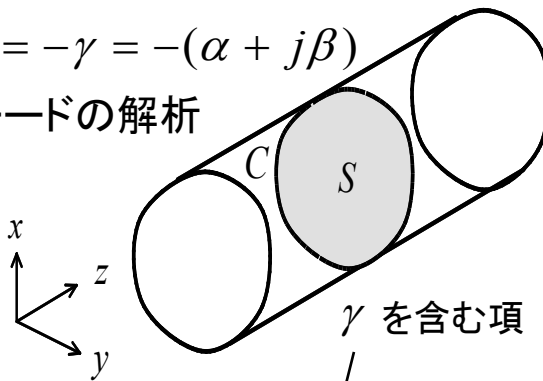
固有値問題  $A\mathbf{x} = \lambda\mathbf{x}$

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?

変数分離法 (導波路モード解析の場合で  $d/dz=0$  としない)

$$\psi_h = X(x)Y(y)Z(z) \quad k = \omega\sqrt{\mu\varepsilon} = \frac{2\pi}{\lambda}$$

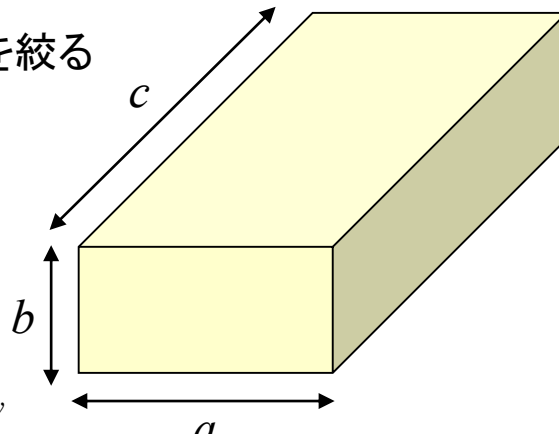
$$\frac{1}{X} \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} + \frac{1}{Y} \frac{\partial^2 Y}{\partial y^2} + \frac{1}{Z} \frac{\partial^2 Z}{\partial z^2} + k^2 = 0$$

共振波数  $k^2 = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2$

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

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

境界条件から自由度を絞る



$$H_z = A_h \cos(k_x x) \cos(k_y y) \sin(k_z z)$$

$$E_x = A_h \frac{j\omega\mu k_y}{k_c^2} \cos(k_x x) \sin(k_y y) \sin(k_z z)$$

$$E_y = -A_h \frac{j\omega\mu k_x}{k_c^2} \sin(k_x x) \cos(k_y y) \sin(k_z z)$$

$$H_x = -A_h \frac{k_x k_z}{k_c^2} \sin(k_x x) \cos(k_y y) \cos(k_z z)$$

$$H_y = -A_h \frac{k_y k_z}{k_c^2} \cos(k_x x) \sin(k_y y) \cos(k_z z)$$

$$k_x = \frac{m\pi}{a}, \quad k_y = \frac{n\pi}{b}, \quad k_z = \frac{p\pi}{c}$$

$$k_c^2 = k_x^2 + k_y^2$$



変数分離法 (導波路モード解析の場合で  $d/dz=0$  としない)

$$\psi_e = X(x)Y(y)Z(z) \quad k = \omega\sqrt{\mu\varepsilon} = \frac{2\pi}{\lambda}$$

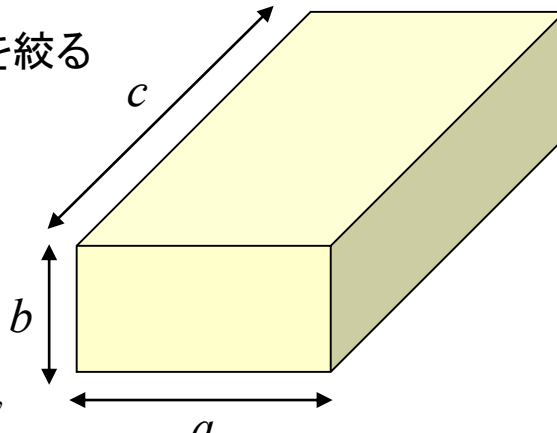
$$\frac{1}{X} \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} + \frac{1}{Y} \frac{\partial^2 Y}{\partial y^2} + \frac{1}{Z} \frac{\partial^2 Z}{\partial z^2} + k^2 = 0$$

共振波数  $k^2 = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2$

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

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

境界条件から自由度を絞る



$$E_z = A_e \sin(k_x x) \sin(k_y y) \cos(k_z z)$$

$$E_x = -A_e \frac{k_x k_z}{k_c^2} \cos(k_x x) \sin(k_y y) \sin(k_z z)$$

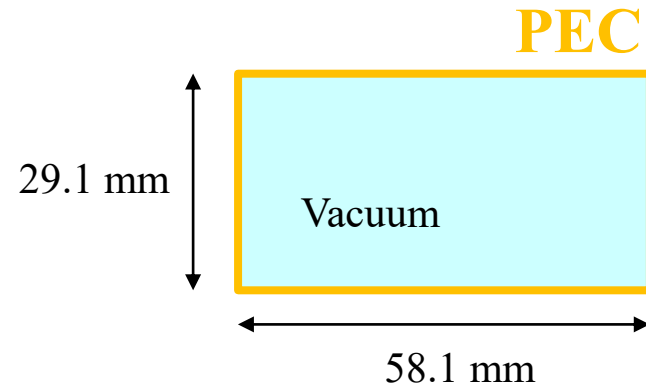
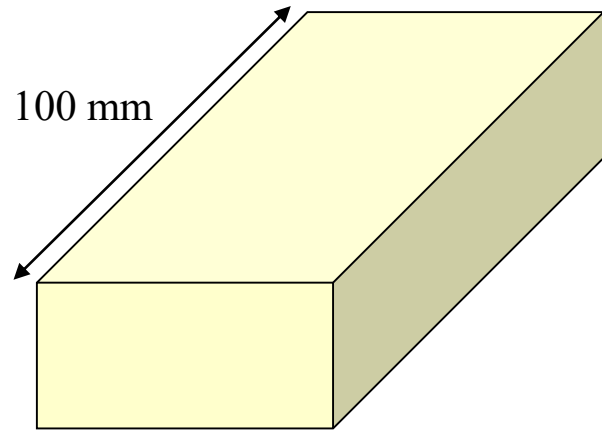
$$E_y = -A_e \frac{k_y k_z}{k_c^2} \sin(k_x x) \cos(k_y y) \sin(k_z z)$$

$$H_x = A_e \frac{j\omega\mu k_y}{k_c^2} \sin(k_x x) \cos(k_y y) \cos(k_z z)$$

$$H_y = -A_e \frac{j\omega\mu k_x}{k_c^2} \cos(k_x x) \sin(k_y y) \cos(k_z z)$$

$$k_x = \frac{m\pi}{a}, \quad k_y = \frac{n\pi}{b}, \quad k_z = \frac{p\pi}{c}$$

$$k_c^2 = k_x^2 + k_y^2$$



標準方形導波管: WRI-4 (WRJ-4)

File Home Define Geometry Materials Physics Meshes Studies Results

Model Builder

- cuboid\_cavity.mph (root)
  - Global Definitions
    - Parameter P1
  - Materials
  - Component 1 (comp1)
    - Study 1
      - Step 1: Eigenfrequency
      - Solver Configuration
      - Results
        - Data Set
        - Computed Values
        - Table
        - Electric Field (emw)
        - Export
        - Report

Settings Properties

Eigenfrequency

Label: Eigenfrequency

Study Settings

Eigenfrequency Search Method: Manual

Required Number of Eigenfrequencies: 6

Unit: Hz

Search for Eigenfrequencies near Next Frequency:  1e9 Hz

Search Method for Eigenfrequencies near Shift: **Large Real Part**

Physics and Variable Selection

Modify physics interfaces and variables for this study step

Physics Interface	Calculation Object	Linearization
Electromagnetic (Frequency Domain) (emw)	<input checked="" type="checkbox"/>	Physics Settings

Multi-physics Calculation Object

Dependent Variable

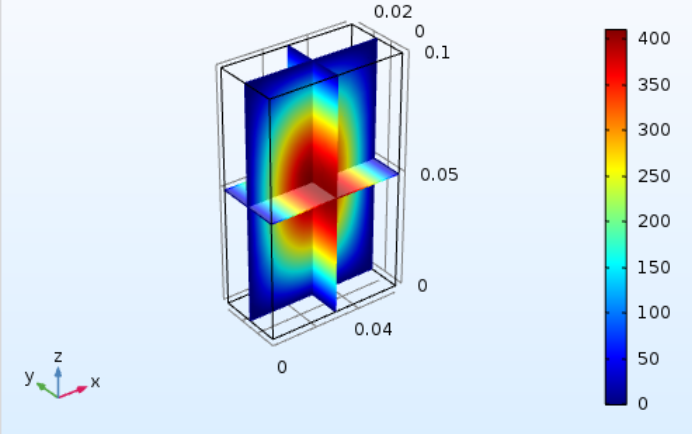
Mesh Selection

Study Expansion

Graphics

Convergence Plot 1

Eigenfrequency = 2.9838E9 Hz Multiple Sections: Electric Field Norm (V/m)



Message

COMSOL Multiphysics 5.2.1.229  
License expires in 7 days  
Opened file: cuboid\_cavity.mph  
Number of degrees of freedom: 17294  
Solution time (Study 1): 5 s  
Number of degrees of freedom: 17294  
Solution time (Study 1): 9 s

961 MB | 1137 MB

お勧め:「大きい実部」

# 解析結果

cuboid\_cavity.mph - COMSOL Multiphysics (トライアルバージョン)

ファイル ホーム 定義 ジオメトリ 材料 フィジックス メッシュ スタディ 結果 電場 (emw)

モデルビルダ

- cuboid\_cavity.mph (root)
  - グローバル定義
    - Pi パラメーター
  - 材料
  - コンポーネント 1 (comp1)
  - スタディ 1
    - ステップ 1: 固有周波数
      - ソルバー-コンフィギュレーション
    - 結果
      - データセット
        - 電場 (emw)
          - 複数断面
          - エクスポート
          - レポート

設定 特性

3D プロットグループ

プロット

ラベル: 電場 (emw)

▼ データ

データセット: スタディ 1/解 1 (sol1)

固有周波数 (Hz): 2.9838E9

▼ タイトル	2.9838E9
▼ プロット設定	3.9553E9
ビュー: 自動	5.1848E9
非表示エンティティ	5.3652E9
非表示を下位次元にも適用	5.3737E9
非表示エンティティ	5.7616E9

非表示エンティティ

非表示を下位次元にも適用

エッジをプロット

カラー: 黒

座標系: 空間 (x, y, z)

▼ カラーレジェンド

レジェンド表示

最大/最小値表示

位置: 右

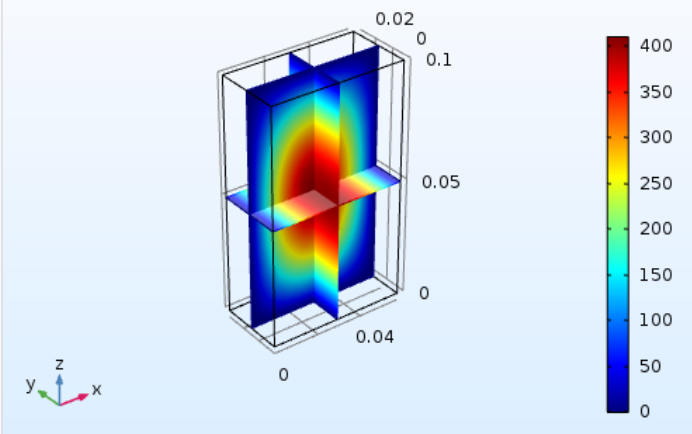
テキスト色: 黒

▼ 数字フォーマット

▼ ウィンドウ設定

グラフィックス 収束プロット 1

固有周波数=2.9838E9 Hz 複数断面: 電場ノルム (V/m)

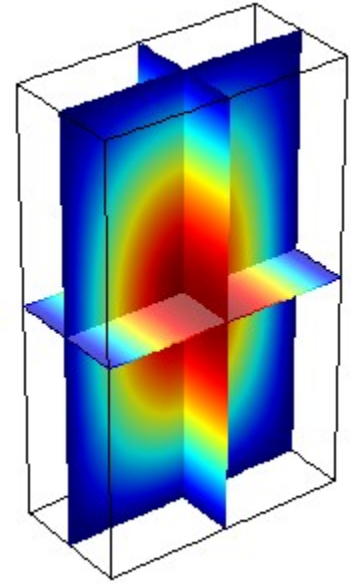


967 MB | 1136 MB

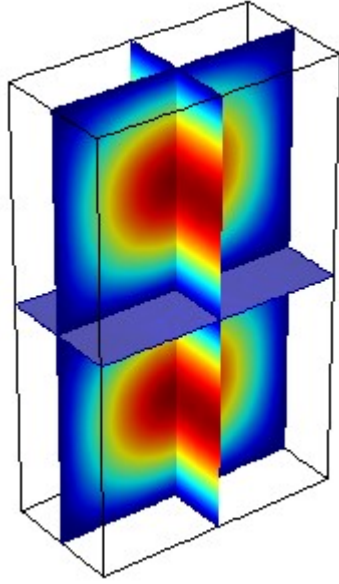
メッセージ 進捗 ログ テーブル

COMSOL Multiphysics 5.2.1.229  
ライセンスは7日で失効します  
開かれたファイル: cuboid\_cavity.mph  
求解の自由度数: 17294  
計算時間 (スタディ 1): 5 秒  
求解の自由度数: 17294  
計算時間 (スタディ 1): 9 秒

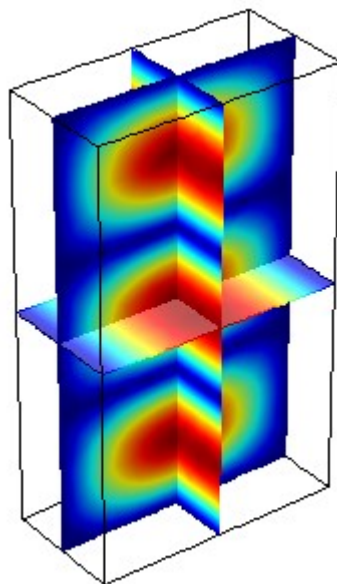




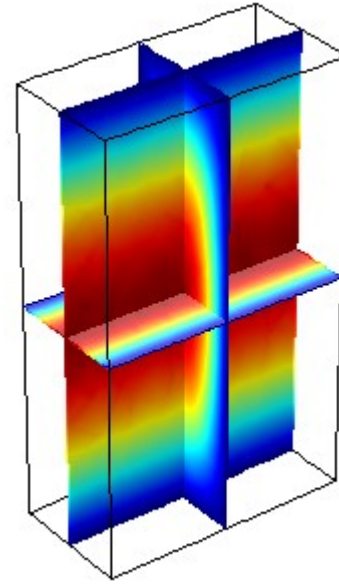
Mode 1



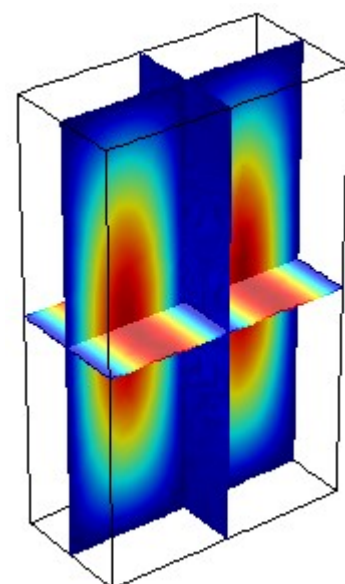
Mode 2



Mode 3

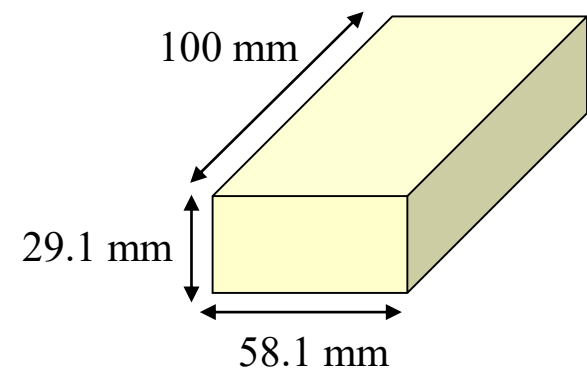


Mode 4



Mode 5

f (GHz)							
p	1						
		n					
			0	1	2	3	4
m	0		1.50	④ 5.36	10.41	15.53	20.66
	1		① 2.98	5.95	10.73	15.74	20.82
	2		⑤ 5.37	7.44	11.62	16.36	21.29
	3		7.88	9.42	12.97	17.35	22.06
	4		10.43	11.63	14.66	18.64	23.09
p	2						
		n					
			0	1	2	3	4
m	0		3.00	5.96	10.73	15.74	20.82
	1		② 3.96	6.49	11.04	15.95	20.98
	2		5.97	7.88	11.91	16.57	21.45
	3		8.30	9.77	13.23	17.54	22.21
	4		10.75	11.92	14.89	18.82	23.24
p	3						
		n					
			0	1	2	3	4
m	0		4.50	6.84	11.24	16.09	21.09
	1		③ 5.18	7.31	11.53	16.30	21.25
	2		6.84	8.57	12.37	16.90	21.71
	3		8.95	10.33	13.65	17.86	22.47
	4		11.26	12.38	15.26	19.12	23.48



$$Q = \omega_0 \frac{W}{P}$$

蓄積エネルギー

1秒当たりの消費エネルギー

損失がない→ $Q=\infty$   
 損失があるほどQは小さい

$$Q = \left| \operatorname{Re}[\omega_c] / (2 \operatorname{Im}[\omega_c]) \right|$$

$$e(t) = \operatorname{Re}[E_0 e^{j\omega_c t}] = \operatorname{Re}[E_0 e^{j\operatorname{Re}[\omega_c]t}] e^{-\operatorname{Im}[\omega_c]t}$$

$$p(t) = p(0) e^{-2\operatorname{Im}[\omega_c]t}$$

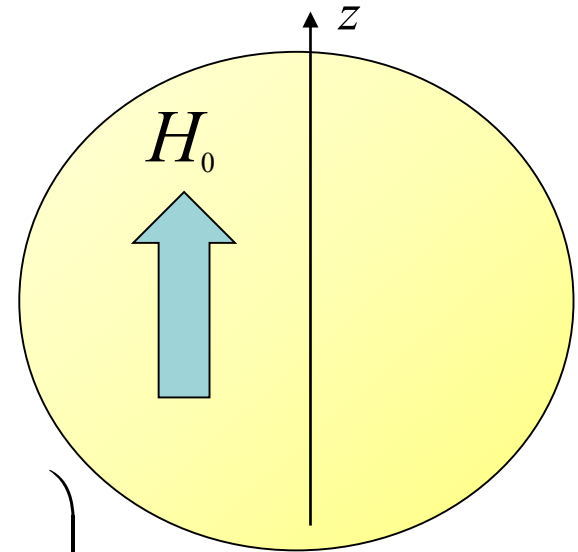
水野 皓司, “今更ながら, Qって何?”, 電子情報通信学会誌, Vol.99, No.12, pp.1191-1192, Dec. 2016.  
 T. Ohira, "What in the World Is Q?," in *IEEE Microwave Magazine*, vol. 17, no. 6, pp. 42-49, June 2016.

# サーキュレーター ～異方性媒質の解析～



# 磁化プラズマ

$$\begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu & -j\kappa & 0 \\ j\kappa & \mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{bmatrix}$$



$$\begin{cases} \mu = \mu_0 + \frac{\gamma^2 H_0 M_s}{\gamma^2 H_0^2 - \omega^2} = \mu_0 \left( 1 + \frac{\omega_0 \omega_m}{\omega_0^2 - \omega^2} \right) \\ \kappa = \frac{\omega_0 \gamma M_s}{\gamma^2 H_0^2 - \omega^2} = -\mu_0 \frac{\omega_0 \omega_m}{\omega_0^2 - \omega^2} \end{cases}$$

$$\omega_0 = -\gamma H_0, \omega_m = -\gamma M_s / \mu_0$$

右旋円偏波(+zに向かって), 正円偏波

$$H_y = -jH_x$$

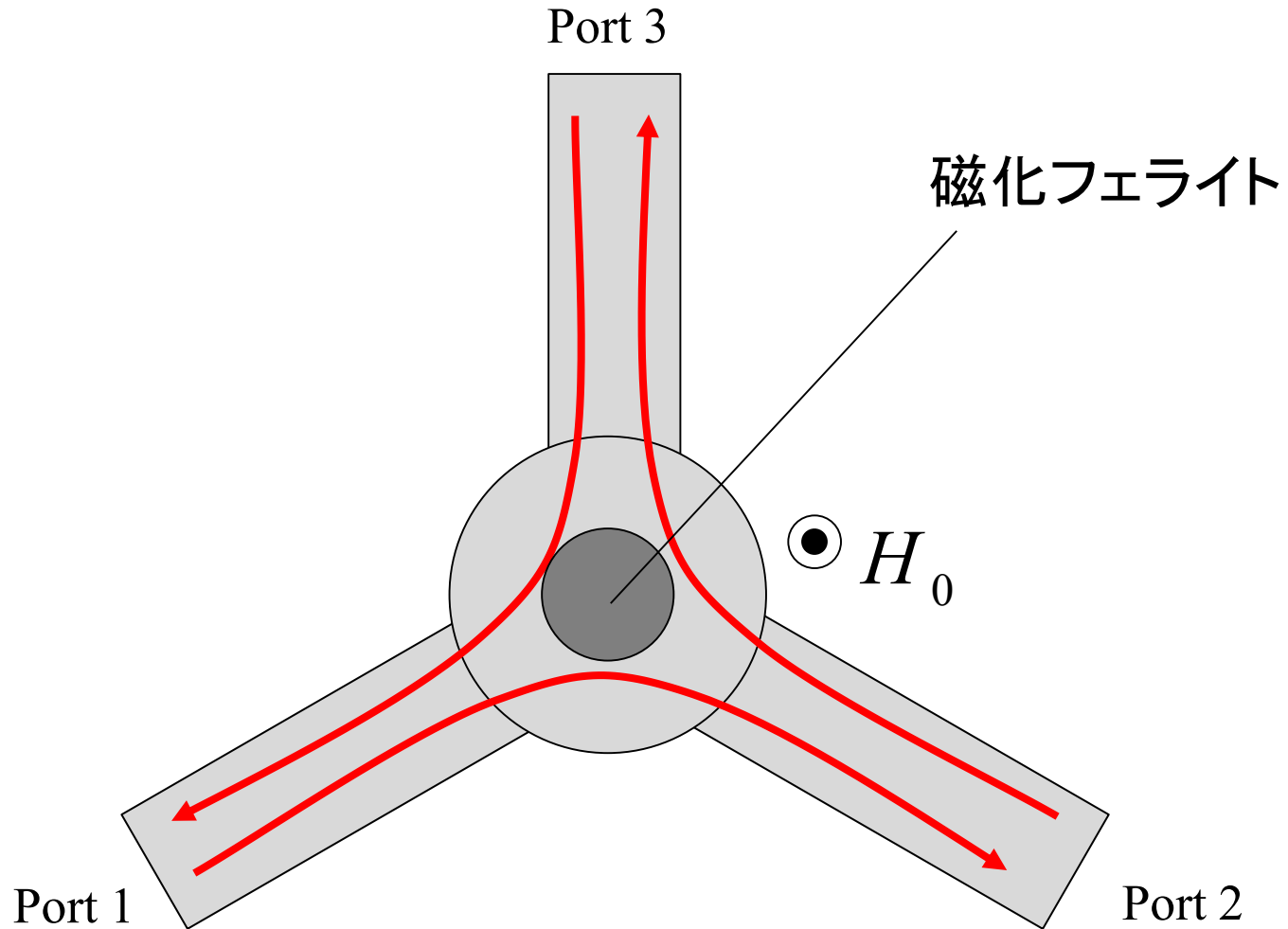
$$\begin{cases} B_x = (\mu - \kappa)H_x = \mu_+ H_x \\ B_y = (\mu - \kappa)H_y = \mu_+ H_y \end{cases} \quad \mu_+ = \mu_0 \left( 1 + \frac{\omega_m}{\omega_0 - \omega} \right)$$

左旋円偏波(+zに向かって), 負円偏波

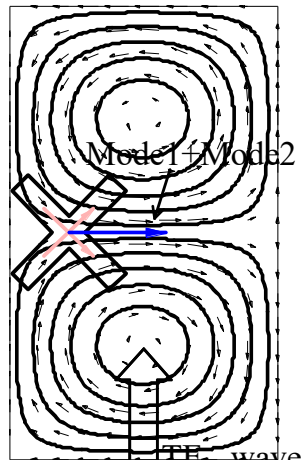
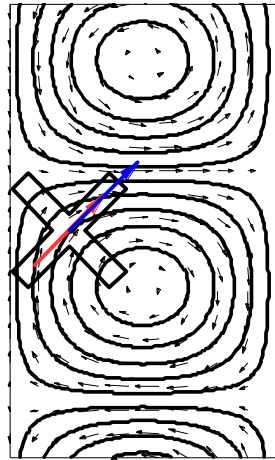
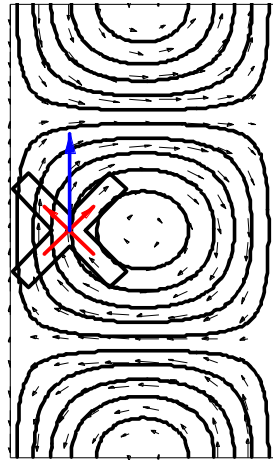
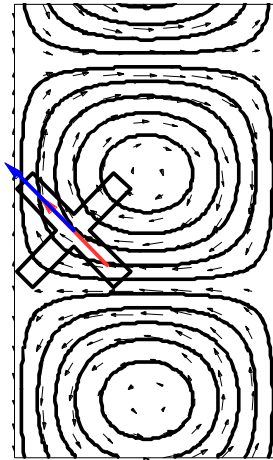
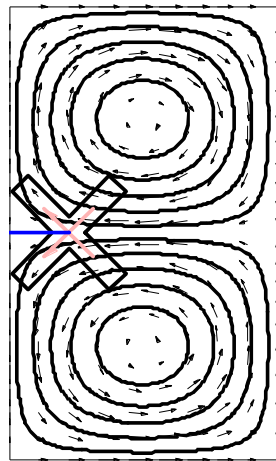
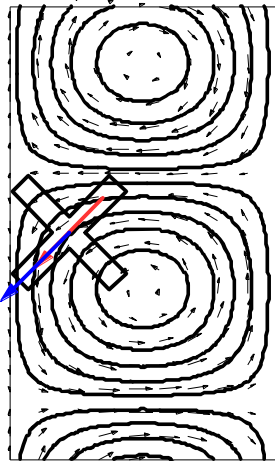
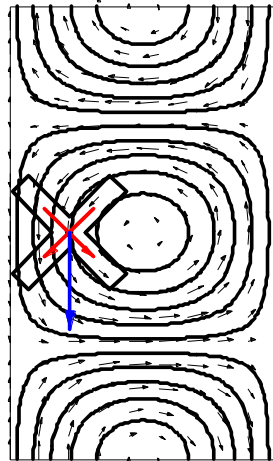
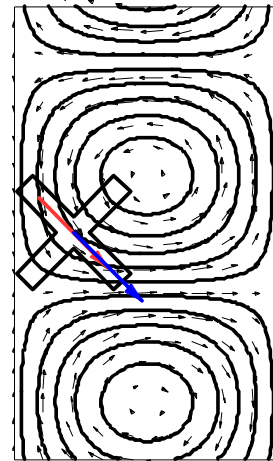
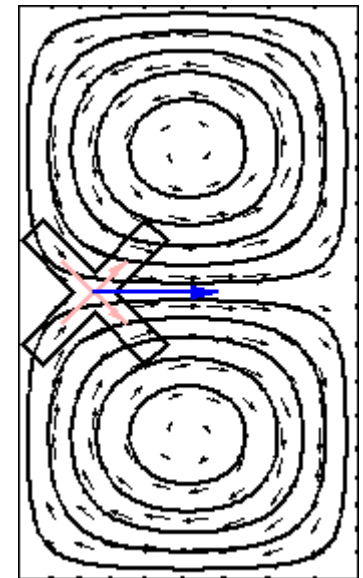
$$H_y = jH_x$$

$$\begin{cases} B_x = (\mu + \kappa)H_x = \mu_- H_x \\ B_y = (\mu + \kappa)H_y = \mu_- H_y \end{cases} \quad \mu_- = \mu_0 \left( 1 - \frac{\omega_m}{\omega_0 - \omega} \right)$$





# 方形導波管の磁界

(a)  $(0/8)T$ (b)  $(1/8)T$ (c)  $(2/8)T$ (d)  $(3/8)T$ (e)  $(4/8)T$ (f)  $(5/8)T$ (g)  $(6/8)T$ (h)  $(7/8)T$ 

Animation

# 参考資料

## アプリケーションギャラリー

<https://www.comsol.jp/models>

## RFモジュール

アプリケーションギャラリーで

Filter by Discipline: Electrical -> RFモジュール  
と選択

<https://www.comsol.jp/models/rf-module>

# 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/](http://www.takuichi.net/em_analysis/)

