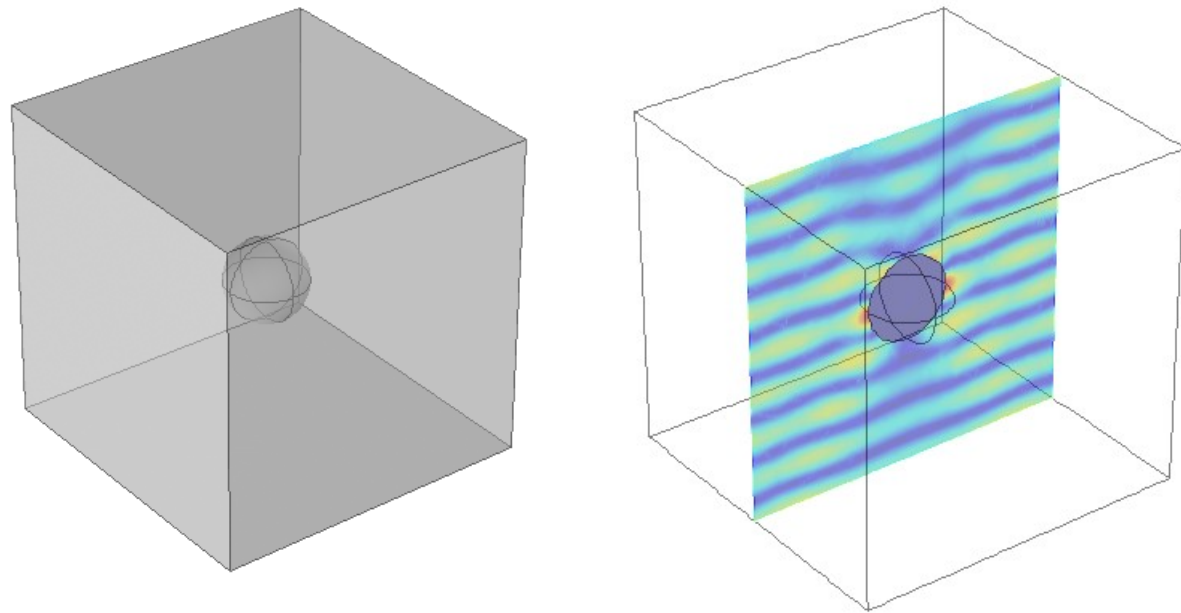


COMSOLによる導体球による平面波散乱の解析

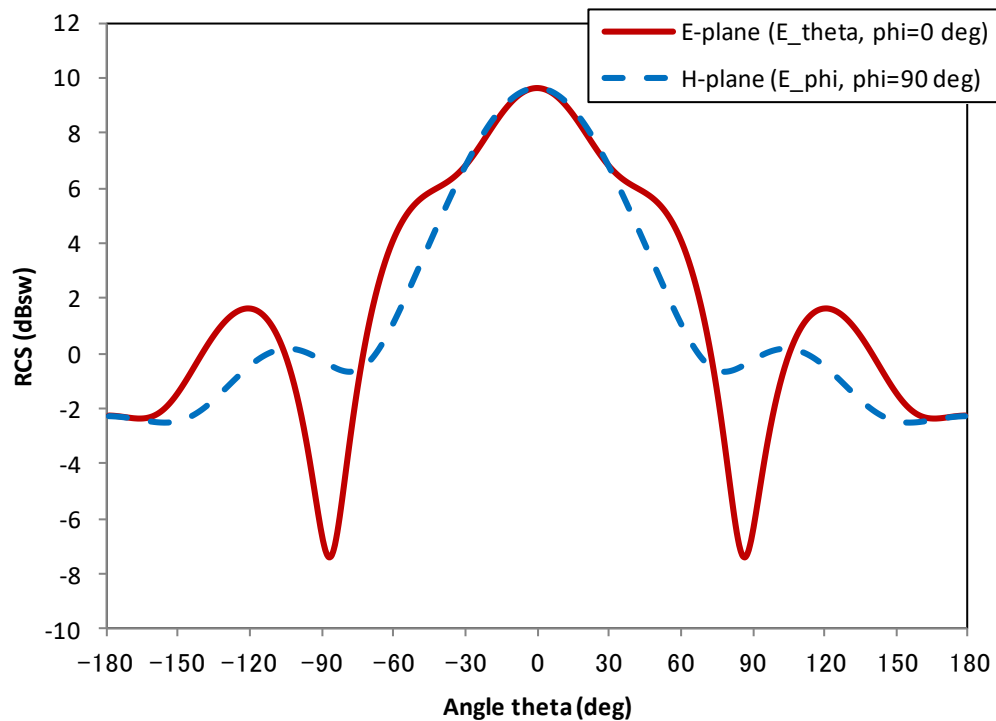
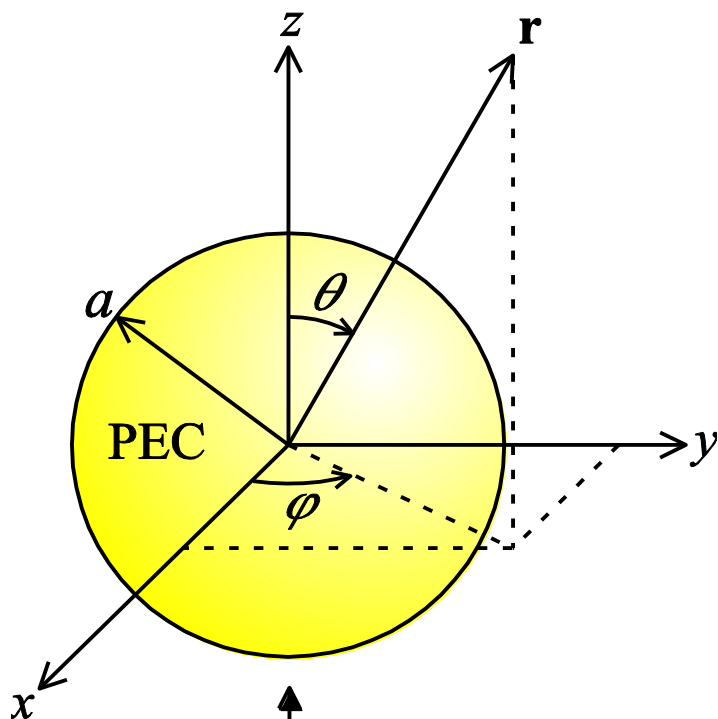


東京工業大学 環境・社会理工学院
平野 拓一

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

1. 平面波散乱の解析(規範問題:厳密解)

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



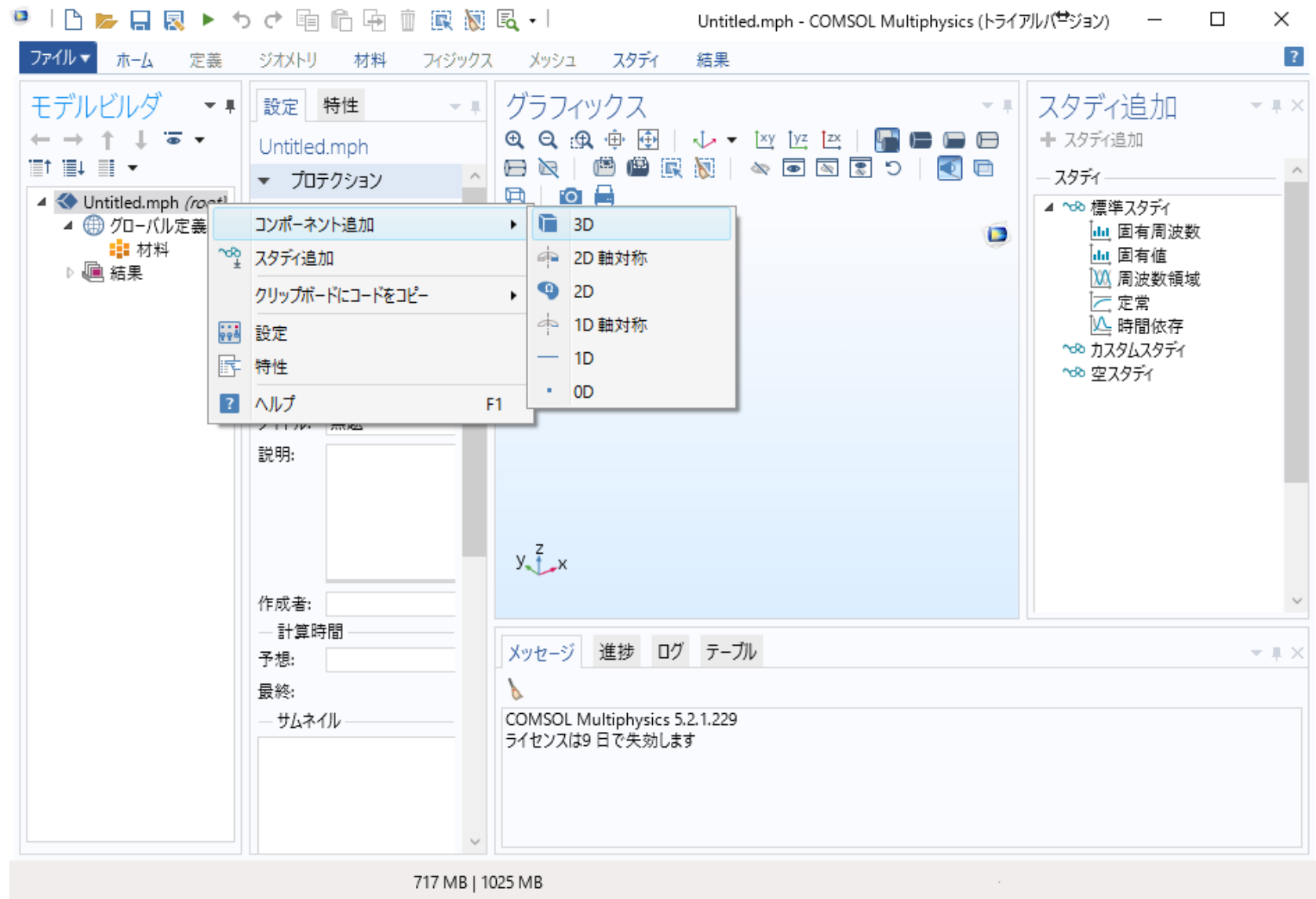
半径 $a=0.5 \lambda_0$, λ_0 : 自由空間波長

$\mathbf{E}^i = \hat{x} e^{-jk_0 z}$

Diagram showing incident electric field E_x (red arrow) and magnetic field H_y (blue arrow) components.



2: モデルの作成の準備



2:モデルの作成の準備

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

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

モデルビルダ

- Untitled.mph (root)
 - グローバル定義
 - 材料
 - コンポーネント 1 (comp1)
 - 定義
 - ジオメトリ 1
 - 一体化モデルで完成 (完了)
 - 材料
 - メッシュ 1
 - 結果

追加された

設定 特性

ジオメトリ

全作成

ラベル: ジオメトリ1

▼ 単位

単位変更時に値を

長さ単位: m

角度単位: 度

▼ 詳細

ジオメトリ表現: CAD カーネル

デフォルト修復トレランス: 自動

自動再構築

グラフィックス

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9日で失効します

スタディ追加

+ スタディ追加

▼ スタディ

- 標準スタディ
 - 固有周波数
 - 固有値
 - 周波数領域
 - 定常
 - 時間依存
 - カスタムスタディ
 - 空スタディ

742 MB | 1006 MB

3: 変数の定義(パラメータ化)

The screenshot displays the COMSOL Multiphysics interface for a model named 'rect_wg.mph'. The 'Global Definitions' (グローバル定義) section is active, and a context menu is open over the 'Parameters' (パラメーター) option. The menu items are:

- パラメーター
- 変数
- 関数
- 荷重グループ
- 拘束グループ
- ジオメトリパーツ
- パーツをメッシュ
- タイプでグループ
- ヘルプ F1

The 'Messages' (メッセージ) window at the bottom displays the following text:

```
COMSOL Multiphysics 5.2.1.229
ライセンスは9日で失効します
開かれたファイル: rect_wg.mph
```

At the bottom of the interface, the memory usage is shown as 786 MB | 1029 MB.

3: 変数の定義(パラメータ化)

pec_sphere_abc_cube.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

モデルビルダ

- pec_sphere_abc_cube.mph (r)
 - グローバル定義
 - パラメーター
 - 材料
 - PEC Sphere (comp1)
 - スタディ 1
 - 結果

設定 特性

パラメーター

パラメーター

名前	式	値	説明
a	0.5[m]	0.5 m	Radius of
w_abc	8*a	4 m	

グラフィックス

メッセージ 進捗 ログ Evaluation 3D

COMSOL Multiphysics 5.2.1.229
 ライセンスは6日で失効します
 開かれたファイル: pec_sphere_abc_cube.mph
 ジオメトリエラー (blk1) 未知のモデルパラメーターです
 2ソリッドオブジェクトから和を形成
 完成ジオメトリは2ドメイン 14境界 24トッジ 14頂点 赤みちま

983 MB | 1202 MB

4: 物体の作成

pec_sphere_abc_cube.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

モデルビルダ

- pec_sphere_abc_cube.mph (r)
 - グローバル定義
 - パラメーター
 - 材料
 - PEC Sphere (comp1)
 - 定義
 - Sphere
 - 球 1 (sph1)
 - ブロック 1 (blk1)
 - 一体化モデルで完成
 - 材料
 - 電磁波 (周波数領域) (f)
 - メッシュ 1
 - スタディ 1
 - 結果

設定 特性

ブロック

選択対象を作成 全オブジェクト作成

ラベル: ブロック 1

オブジェクトタイプ

タイプ: ソリッド

サイズおよび形状

幅: w_abc m

奥行: w_abc m

高さ: w_abc m

位置

ベース: 中心

x: 0 m

y: 0 m

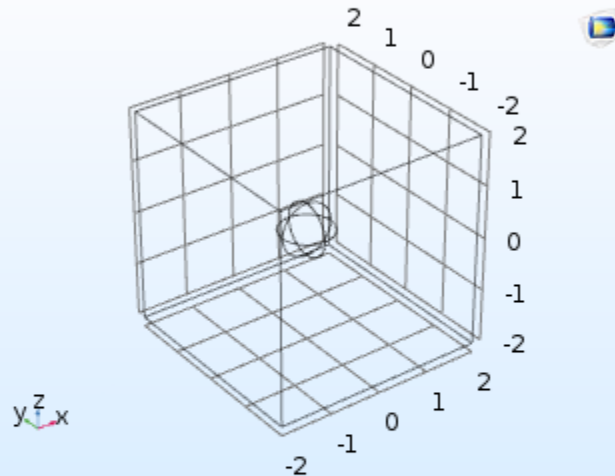
z: 0 m

座標軸

軸タイプ: z 軸

回転角

グラフィックス



メッセージ 進捗 ログ Evaluation 3D

COMSOL Multiphysics 5.2.1.229
 ライセンスは6日で失効します
 開かれたファイル: pec_sphere_abc_cube.mph
 ジオメトリエラー (blk1) 未知のモデルパラメーターです
 2ソリッドオブジェクトから和を形成
 完成ジオメトリは2ドメイン 14境界 24トッジ 14頂点を含みます

999 MB | 1198 MB

5: 材料定数の定義と割り当て

pec_sphere_abc_cube.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

モデルビルダ

- pec_sphere_abc_cube.mph (r)
 - グローバル定義
 - パラメーター
 - 材料
 - PEC Sphere (comp1)
 - 定義
 - Sphere
 - 球 1 (sph1)
 - ブロック 1 (blk1)
 - 一体化モデルで完成
 - 材料
 - Air (mat1)
 - Copper (mat2)
 - 電磁波 (周波数領域) (r)
 - メッシュ 1
 - スタディ 1
 - 結果

設定 特性

材料

ラベル: Copper

ジオメトリックエンティティ選択

ジオメトリックエンティティレベル: ドメイン

選択: マニュアル

2

アクティブ

優先使用

材料特性

材料コンテンツ

特性	名前	値	
<input checked="" type="checkbox"/>	比透磁率	mur	1
<input checked="" type="checkbox"/>	電気導電率	sigma	5.998e7[
<input checked="" type="checkbox"/>	比誘電率	epsilon	1
	熱膨張係数	alpha	17e-6[1/
	定圧比熱容量	Cp	385J/(k.

グラフィックス

メッセージ 進捗 ログ Evaluation 3D

COMSOL Multiphysics 5.2.1.229
 ライセンスは6日で失効します
 開かれたファイル: pec_sphere_abc_cube.mph
 ジオメトリエラー (blk1) 未知のモデルパラメーターです
 2ソリッドオブジェクトから和を形成
 完成ジオメトリは2ドメイン 14境界 24トッジ 14頂点 66面です

997 MB | 1153 MB

6-1: 解析したい物理現象を指定

pec_sphere_abc_cube.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

モデルビルダ

- pec_sphere_abc_cube.mph (root)
 - グローバル定義
 - パラメーター
 - 材料
 - PEC Sphere (comp1)
 - 定義
 - Sphere
 - 球 1 (sph1)
 - ブロック 1 (blk1)
 - 一体化モデルで完成 (fin)
 - 材料
 - Air (mat1)
 - Copper (mat2)
 - 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
 - 結果

設定 特性

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 アクティブ

2

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:

E_x	$\exp(-j \cdot \text{emw} \cdot k_0 \cdot z)$	x	V/m
E_y	0	y	
E_z	0	z	

グラフィックス

メッセージ 進捗 ログ Evaluation 3D

COMSOL Multiphysics 5.2.1.229
ライセンスは6日で失効します
開かれたファイル: pec_sphere_abc_cube.mph
ジオメトリエラー (blk1) 未知のモデルパラメーターです
2ソリッドオブジェクトから和を形成
完成ジオメトリは2ドメイン 14境界 24トッジ 14頂点をもちま

993 MB | 1145 MB

項目1を参照

$$\mathbf{E}^i = \hat{x} e^{-jk_0 z}$$

6-2: 平面波入射の別の設定方法

pec_sphere_abc_cube.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

モデルビルダ

- pec_sphere_abc_cube.mph
 - グローバル定義
 - パラメーター
 - 材料
 - PEC Sphere (comp1)
 - 定義
 - Sphere
 - 材料
 - Air (mat1)
 - Copper (mat2)
 - 電磁波 (周波数領域)
 - 波動方程式 (電)
 - 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
 - データセット
 - ビュー
 - 計算値
 - テーブル
 - 電場 (emw)

設定 特性

電磁波 (周波数領域)

直線偏光の平面波

電場振幅:
 E_0 1[V/m] V/m

ロール角:
pi rad

ピッチ角:
-pi/2 rad

ヨー角:
0 rad

波数:
k emw.k0 rad/m

Initial wave: $E_0 \exp(-jk_x x) \hat{z}$

Roll Pitch Yaw

グラフィックス 収束プロット 1

反転曲要素を防ぐために線形ジオメトリ形状を
 反転曲要素を防ぐために線形ジオメトリ形状を
 求解の自由度数: 111862
 計算時間 (スタディ 1): 40 秒
 保存されたファイル pec_sphere_abc_cube.m
 反転曲要素を防ぐために線形ジオメトリ形状を
 反転曲要素を防ぐために線形ジオメトリ形状を

1.26 GB | 1.4 GB

7: 散乱境界条件の設定

The screenshot displays the COMSOL Multiphysics interface for a model named 'pec_sphere_abc_cube.mph'. The 'Settings' window is open to the 'Scattering Boundary Condition' (散乱境界条件) section. The 'Label' (ラベル) is 'Scattering Boundary Condition 1' (散乱境界条件 1). Under 'Boundary Selection' (境界選択), the 'Selection' (選択) is set to 'Manual' (マニュアル), and a list of boundaries is shown with boundary 1 selected and the 'Active' (アクティブ) checkbox checked. The 'Scattering Wave Type' (散乱波タイプ) is set to 'Plane Wave' (平面波). The 'Graphics' window shows a 3D cube with axes ranging from -2 to 2.

「グラフィックス」ウィンドウで吸収境界条件にしたい面をクリックして選ぶ

8: 遠方界計算領域の設定

The screenshot displays the COMSOL Multiphysics software interface for a 3D model named "pec_sphere_abc_cube.mph". The interface is divided into several panels:

- Model Builder (モデルビルダ):** Located on the left, it shows a hierarchical tree of the model. The "Far-field Domain 1" (遠方場ドメイン 1) is selected under the "Electromagnetic (Frequency Domain)" (電磁波 (周波数領域)) node.
- Settings (設定) - Characteristics (特性):** The central panel shows the configuration for the selected domain. The label is "遠方場ドメイン 1". Under "Domain Selection" (ドメイン選択), "All Domains" (全ドメイン) is selected. A table lists the domains to be included:

Selection	Domains
ON	1
ON	2

The "Active" (アクティブ) checkbox is checked. Below this, the "Priority and Inheritance" (優先関係および寄与) section is partially visible.

- Graphics (グラフィックス) - Convergence Plot 1 (収束プロット 1):** The right panel shows a 3D visualization of a green cube centered at the origin of a Cartesian coordinate system. The axes are labeled x, y, and z, with tick marks at -2, -1, 0, 1, and 2.
- Message (メッセージ) - Progress (進捗) Log (ログ) Evaluation 3D:** The bottom right panel displays a log of the simulation results:

完成ジオメトリは2ドメイン, 14境界, 24エッジ, 14頂点 をもち
反転曲要素を防ぐために線形ジオメトリ形状を3メッシュ要素で
反転曲要素を防ぐために線形ジオメトリ形状を3メッシュ要素で
求解の自由度数: 111862
計算時間 (スタディ 1): 47 秒
保存されたファイル pec_sphere_abc_cube.mph

At the bottom of the interface, the memory usage is shown as "1.01 GB | 1.14 GB".

9: スタディ(解析条件)の設定

The screenshot displays the COMSOL Multiphysics interface for a study named 'pec_sphere_abc_cube.mph'. The 'Study' settings are configured as follows:

- 周波数領域 (Frequency Domain):**
 - ラベル: 周波数領域
 - 周波数単位: MHz
 - 周波数: 300 MHz
 - パラメーター値をロード: ブラウズ... (Browse...)
 - 前のステップから解を再利用: 自動 (Automatic)
- 求解中の結果 (Results during solution):** (Expanded)
- フィジックスおよび変数選択 (Physics and variable selection):**
 - スタディステップに関するフィジックスツリーおよび変数を修 (Edit physics tree and variables for study step):
 - フィジックスインターフェース (Physics interface): 電磁波 (周波数領域) (emw) [checked]
 - 離散化 (Discretization): フィジックス設定 (Physics settings)

The 3D plot window shows a sphere centered in a cube, with axes labeled x, y, and z. The message window at the bottom right displays the following information:

```

メッセージ 進捗 ログ Evaluation 3D
反転曲要素を防ぐために線形ジオメトリ形状を3メッシュ要素で使用
反転曲要素を防ぐために線形ジオメトリ形状を3メッシュ要素で使用
求解の自由度数: 111862
計算時間 (スタディ 1): 40 秒
保存されたファイル: pec_sphere_abc_cube.mph
  
```

At the bottom of the interface, the memory usage is shown as 1.23 GB | 1.36 GB.

10-1: 結果の表示

pec_sphere_abc_cube.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

- 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
 - データセット
 - ビュー
 - 計算値
 - テーブル
 - 電場 (emw)
 - 断面 1
 - 2D 遠方場 (emw)
 - 3次元遠方場 (emw)
 - 極座標プロットグループ 4
 - 1D プロット
 - エクスポート
 - Far(H-plane)
 - Far(E-plane)
 - アニメーション 1
 - レポート

設定 特性

断面

プロット

ラベル: 断面 1

データ

データセット: 親参照

式

式: emw.normEi

単位: V/m

説明: 瞬間的電場ノルム

タイトル

平面データ

平面タイプ: クイック

平面: zx 平面

入力法: 平面数

グラフィックス 収束プロット 1

freq(1)=300 MHz

断面: 瞬間的電場ノルム (V/m)

3D plot showing the electric field magnitude on a cross-section of the sphere. The color scale ranges from 0.5 to 3.5 V/m.

メッセージ 進捗 ログ Evaluation 3D

保存されたファイル pec_sphere_abc_cube.mph
反転曲要素を防ぐために線形ジオメトリ形状を3メッシュ要素で
反転曲要素を防ぐために線形ジオメトリ形状を3メッシュ要素で
求解の自由度数: 111862
計算時間 (スタディ 1): 40 秒

1.21 GB | 1.33 GB

10-2: 結果の表示

The screenshot displays the COMSOL Multiphysics interface for a simulation titled "pec_sphere_abc_cube.mph". The "Model Builder" on the left shows the hierarchy: Model (Wave Equation (Electromagnetic)), PEC 1, Initial Value 1, Scattering Boundary Condition 1, and Far Field Domain 1. The "Settings" panel for "Far Field" is active, showing the plot type as "emw.bRCS3D" with units of m^2 . The plot window, titled "Graphics" and "Convergence Plot 1", shows the bistatic RCS. The y-axis is labeled "Bistatic Radar Cross Section (m²)" and the x-axis is "Angle (deg)". Two curves are plotted: a blue curve and a green curve, both showing a main peak at 0 degrees and smaller side lobes. A data table at the bottom right provides the following information:

項目	値
防くために線形ジオメトリ形状を3メッシュ要素で使用	
防くために線形ジオメトリ形状を3メッシュ要素で使用	
数:	111862
ディ1):	40 秒
イル pec_sphere_abc_cube.mph	
防くために線形ジオメトリ形状を3メッシュ要素で使用	