

電磁両立性(EMC)セミナー (3)

資料:

平野 fem 

東京都市大学 工学部 電気電子通信工学科
平野 拓一

E-mail: thirano@tcu.ac.jp

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

内容

1. 電磁界シミュレーション概要
 - 1.1 時間／周波数領域解析
 - 1.2 低周波近似について
 - 1.3 電磁界解析手法概要(FEM/MoM/FDTD)
 - 1.4 電磁界解析の種類(励振問題、固有値問題)
 - 1.5 電磁界シミュレーションの勘所
2. EMC対策の解析事例(ミリ波帯オンチップ素子の電磁界解析)
 - 2.1 素子のモデル化
 - 2.2 ボンディングワイヤとパッケージの接続
 - 2.3 RFボード設計の注意点(線路コーナー、スルーホールなど)
 - 2.4 パッドの励振モデル化

3. 他機関によるEMC対策のためのシミュレーション活用事例の紹介
自動車、航空機の対策事例など(※当日内容が変更となる場合がございます)
4. まとめ
 - 4.1 シミュレーションの有用性
 - 4.2 シミュレーションと実験の差異について(モデル化)

15:30-15:40: 休憩

15:40-16:10: COMSOL MultiphysicsのRFモジュールと事例の紹介

16:10-16:30: 質疑応答

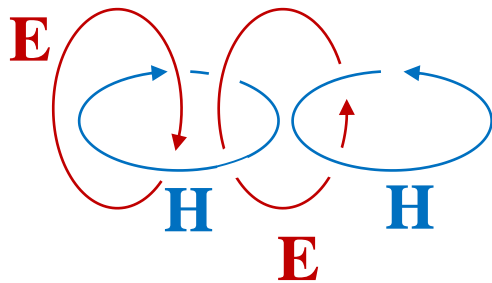
1. 電磁界シミュレーション概要

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と電磁界シミュレータの役割⁴

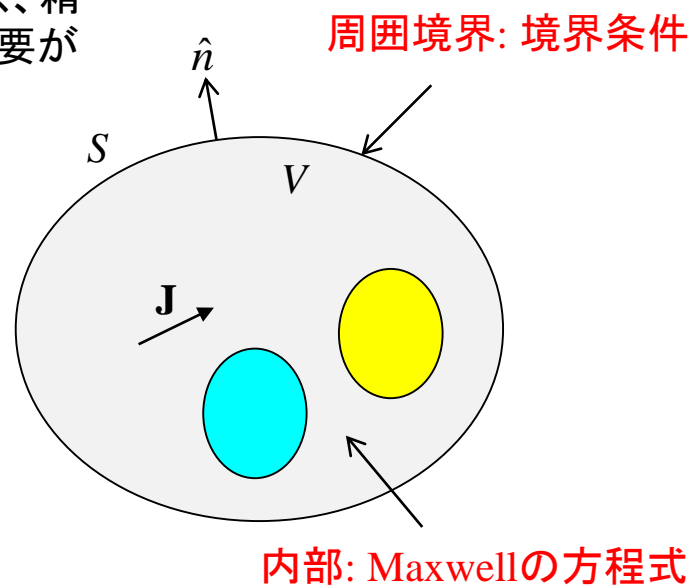
マクスウェルの方程式

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

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

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

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

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

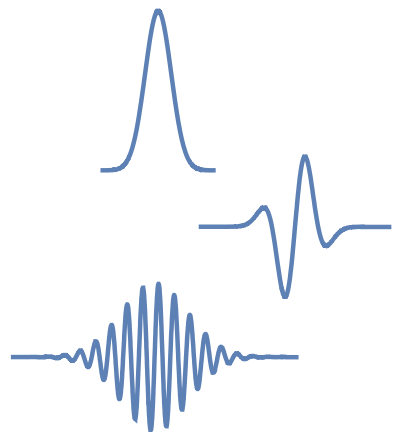
$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{i} \end{cases}$$

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)

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

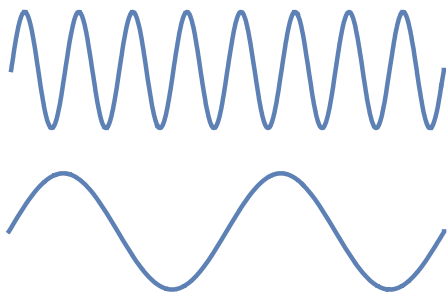
FDTD

周波数領域

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

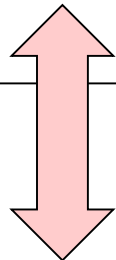
調和振動

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)

マクスウェルの方程式

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{E} + j\omega\mu\mathbf{H} = 0 \\ \nabla \times \mathbf{H} - j\omega\varepsilon\mathbf{E} = \mathbf{i} \end{cases}$$

$$\nabla \times \mathbf{E} + j\omega\mu_0\mu_r\mathbf{H} = 0$$

$$\frac{\nabla \times \mathbf{E}}{\mu_r} + j\omega\mu_0\mathbf{H} = 0 \quad \text{場所の関数}$$

$$\nabla \times \left(\frac{\nabla \times \mathbf{E}}{\mu_r} \right) + j\omega\mu_0\nabla \times \mathbf{H} = 0$$

∇ × H を消去

$$-\frac{1}{j\omega\mu_0} \nabla \times \left(\frac{\nabla \times \mathbf{E}}{\mu_r} \right) - j\omega\varepsilon\mathbf{E} = \mathbf{i}$$

Hを消去してEの方程式を導く

ヘルムホルツの波動方程式
(有限要素法の基礎方程式)

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

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

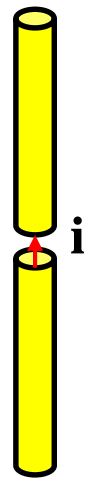
$$\nabla \times \left(\frac{\nabla \times \mathbf{E}}{\mu_r} \right) - k_0^2 \epsilon_r \mathbf{E} = -jk_0 \eta_0 \mathbf{i}$$

励振波源あり

既知ベクトル(励振) \downarrow

行列方程式 $A\mathbf{x} = \mathbf{b}$

\uparrow 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) \downarrow

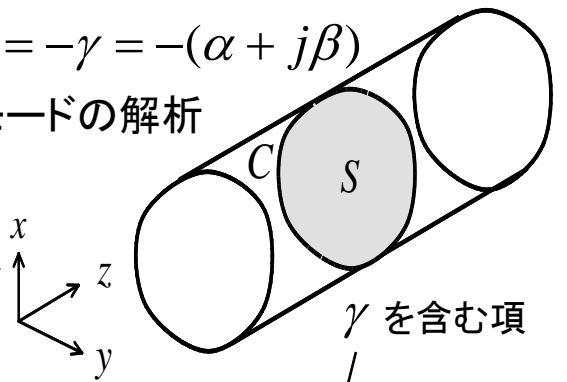
固有値問題 $A\mathbf{x} = \lambda\mathbf{x}$

\uparrow 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

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

共振器

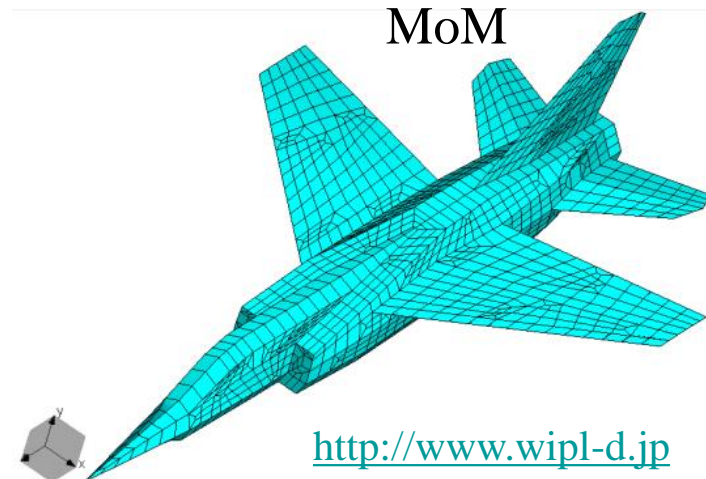
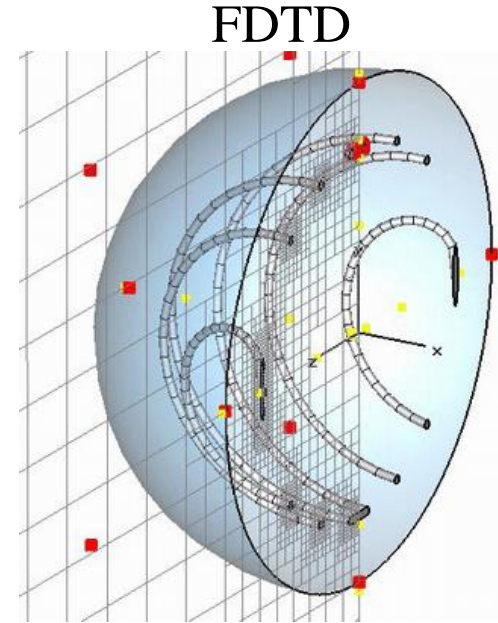
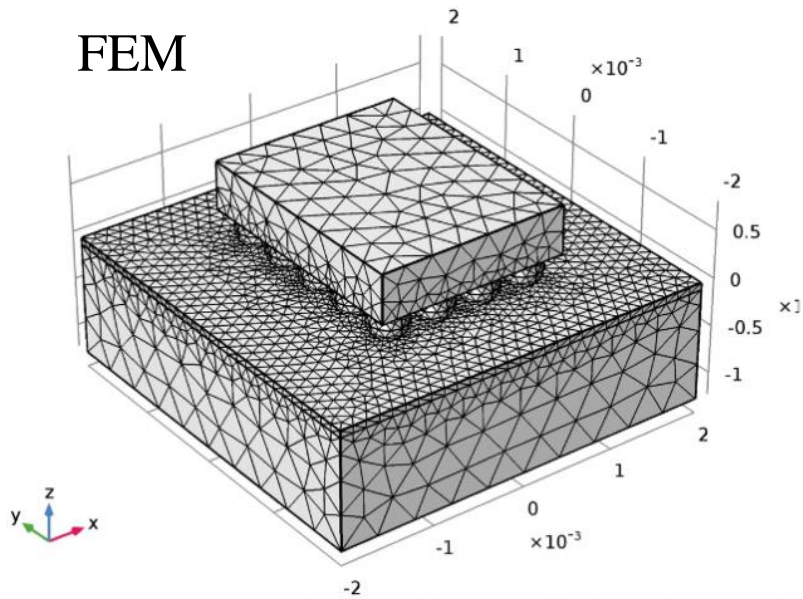
$$\nabla \times \left(\frac{\nabla \times \mathbf{E}}{\mu_r} \right) - k_0^2 \epsilon_r \mathbf{E} = 0$$

3-D構造

どの周波数でどのような形で共振するのか?

(c) 共振モード解析

- FDTD法
- モーメント法 (MoM)
- 有限要素法 (FEM)



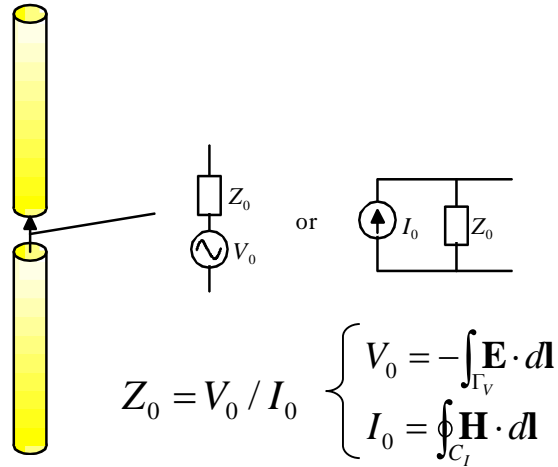
各種電磁界解析法の比較

	FDTD	MoM	FEM
メッシュ分割	3D (空間全体)	2D (物体表面)	3D (空間全体)
解法	陽解法(安定条件必須)	陰解法(安定)	陰解法(安定)
行列の疎密	N/A	密	疎 (高速化可。メモリも節約可)
周波数／時間領域	時間領域	周波数領域	周波数領域
得意な問題	人体解析	RCS解析	マイクロ波・ミリ波回路
その他特徴	開放問題では吸収境界条件が必須	開放問題は最初から厳密に組み込まれている	開放問題では吸収境界条件が必須

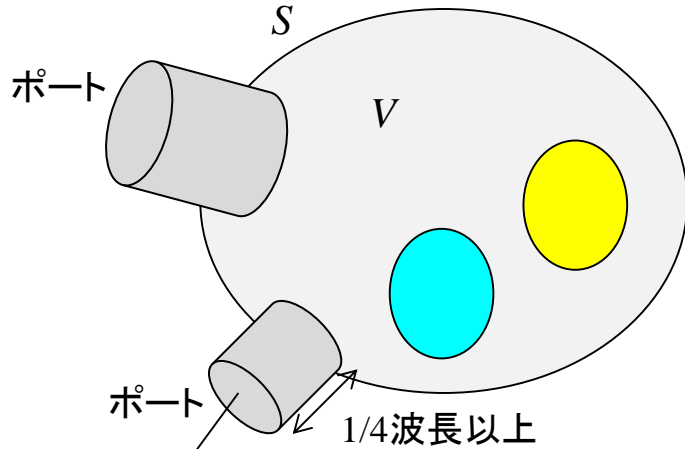
備考: 行列方程式をまともに解くには $O(N^2)$ のメモリ、 $O(N^3)$ の計算時間が必要となる。

- 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



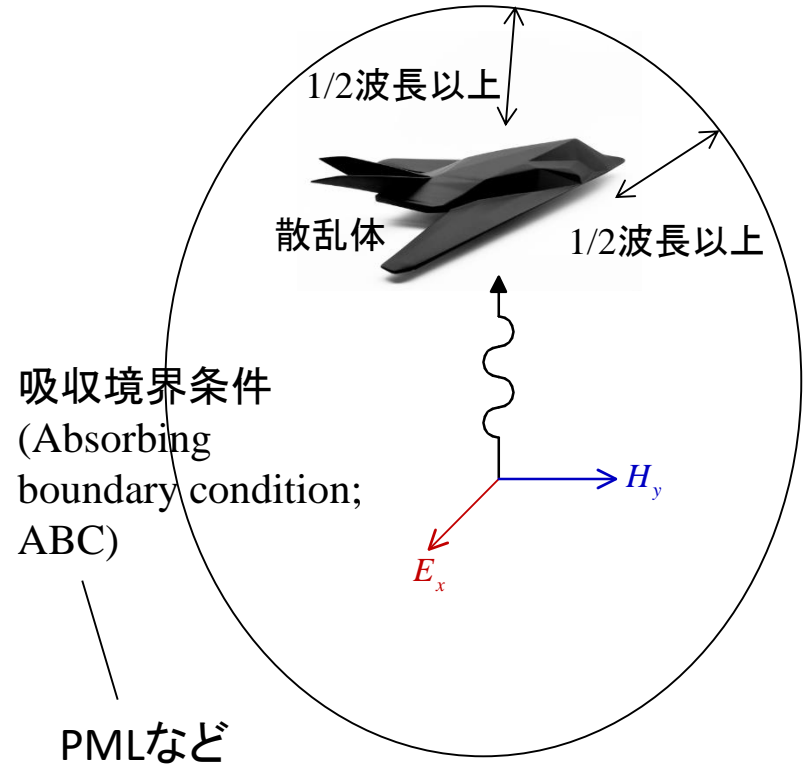
(a) 集中ポート



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

入射モード
反射モード

(b) 導波路ポート



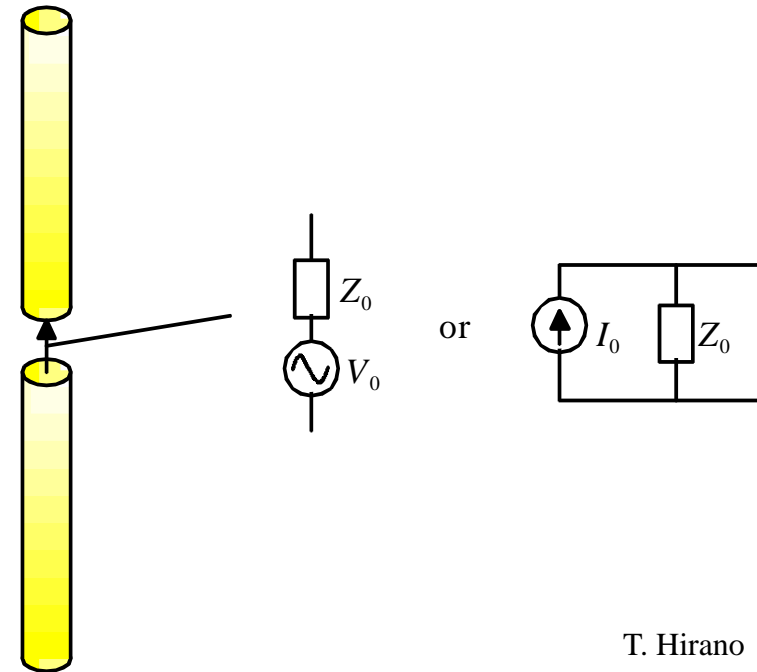
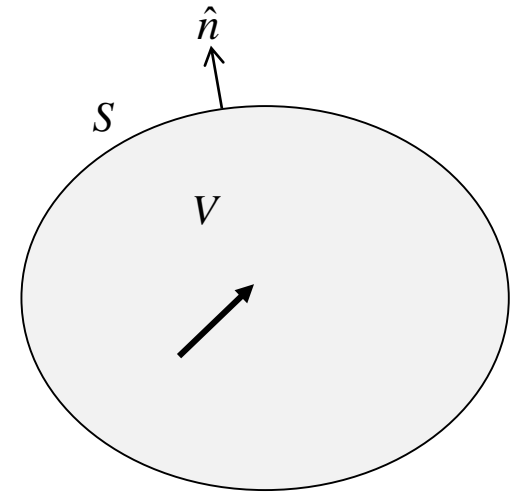
(c) 平面波入射

励振方法1: 集中ポート

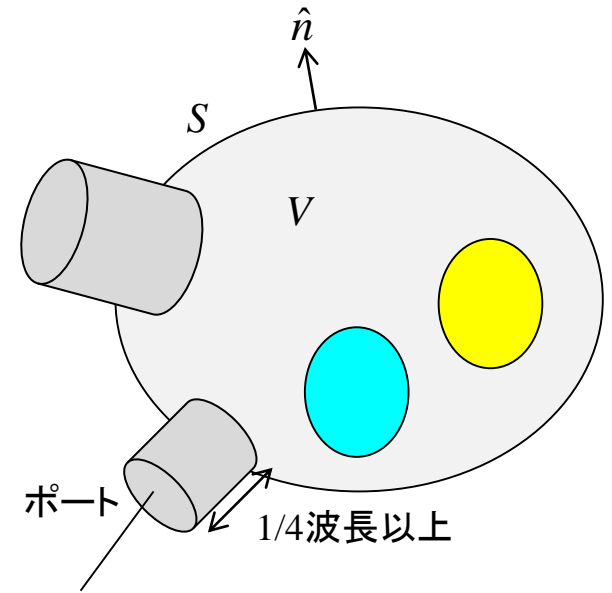
- 電圧・電流源励振は波長に比して微小（集中定数）であることが基本である。
- 微小なので、集中ポートでは印加電磁界分布の形状にはほとんど依存しない。
- 通常、内部インピーダンスを指定する。つまり、電圧（電界）と電流（磁界）の比を指定する。
- 電磁界解析では、実際には表面インピーダンス上に電界あるいは磁界を印加する。

$$Z_0 = V_0 / I_0$$

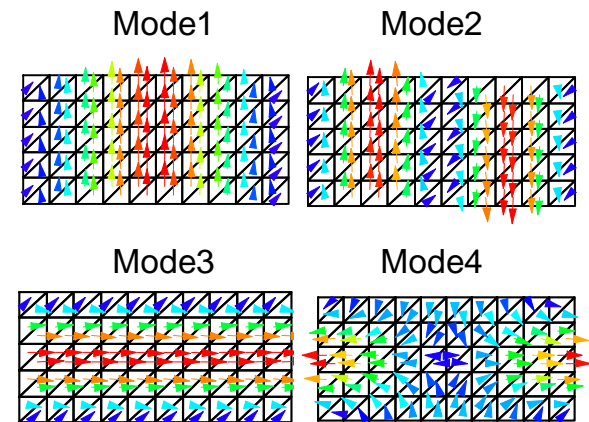
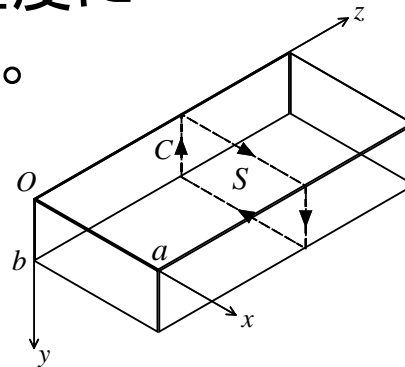
$$\begin{cases} V_0 = -\int_{\Gamma_V} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} \\ I_0 = \int_{\Gamma_I} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} \end{cases}$$



- 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。

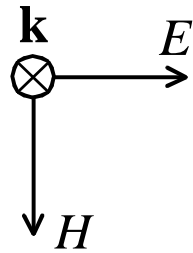


$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1^{(+)} + \sum_u B_u \mathbf{E}_u^{(-)}$$



様々な伝送線路

波数ベクトル



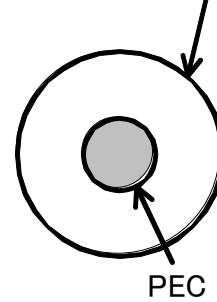
(a) 自由空間

PEC(金属)



(b) 平行二本線路
(レツヘル線路)

PEC



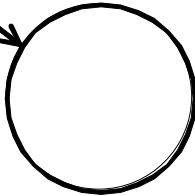
(c) 同軸線路

PEC



(d) 方形導波管

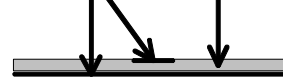
PEC



(e) 円形導波管

誘電体

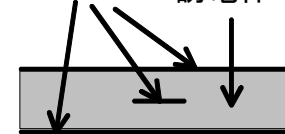
PEC



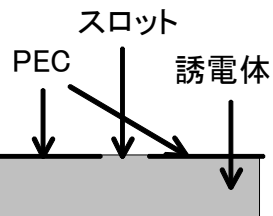
(f) マイクロストリップ線路

PEC

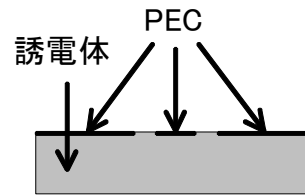
誘電体



(g) ストリップ線路
(トリプレート線路)

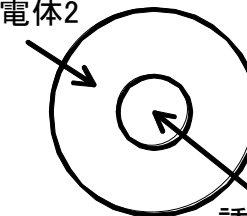


(h) スロット線路



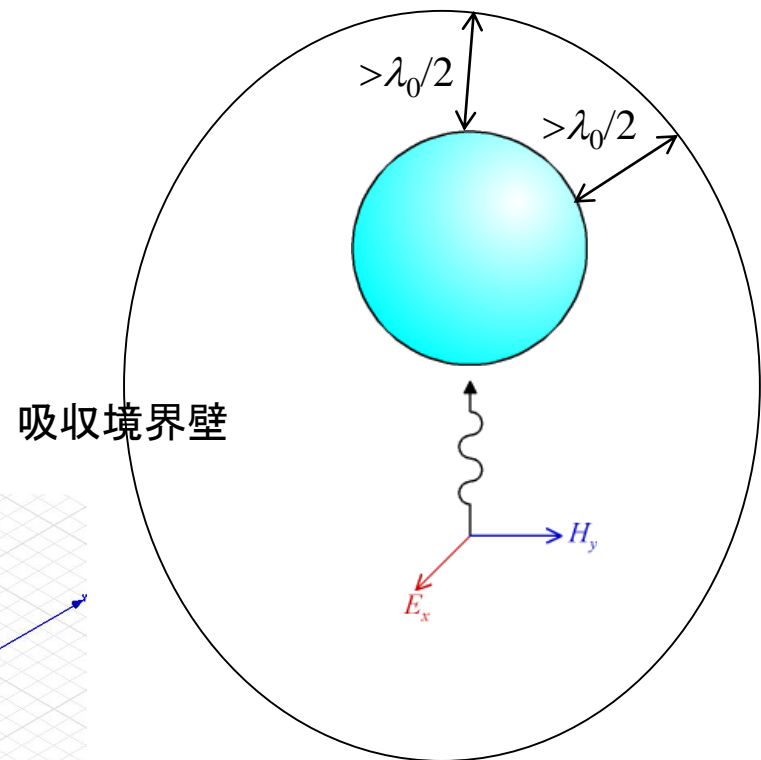
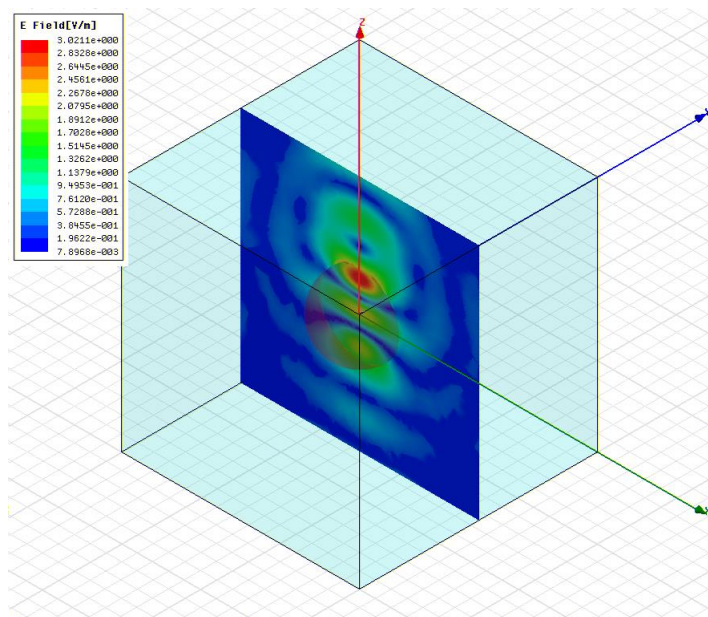
(i) コプレナガイド

誘電体2



(j) 光ファイバ

- 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。

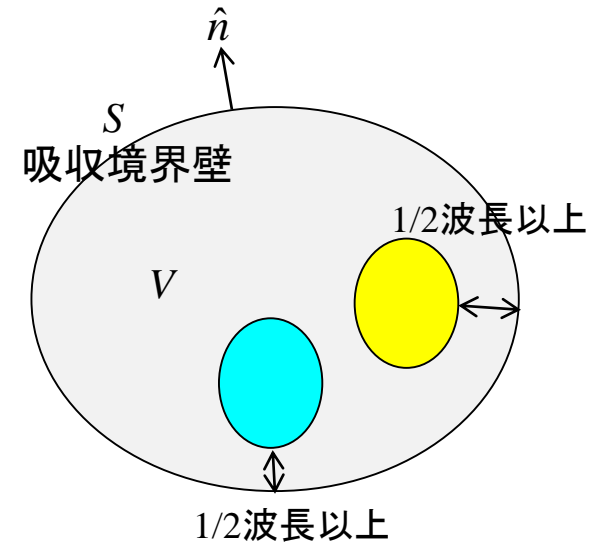


吸収境界条件

■吸収境界条件(ABC, Absorbing Boundary Condition) : FEM, FDTDはこのように全空間にメッシュを切るため、開放空間を模擬する。

■物体からABCまでの距離: 1/2波長以上

■ABCは垂直入射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。ただし、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。



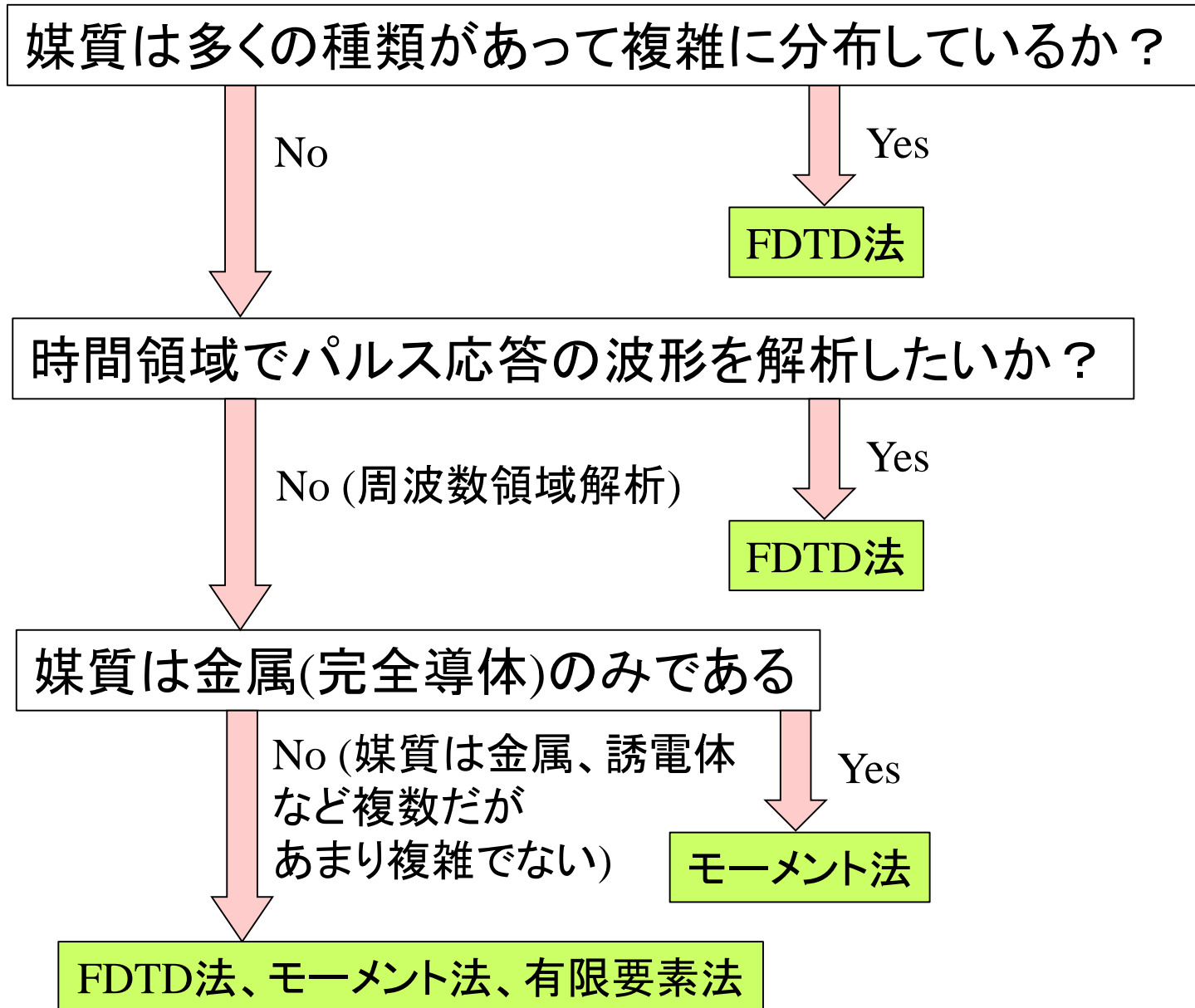
その他境界条件

- 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

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

- ・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。
- 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。

シミュレータの検討



規範問題から同じ励振構造で練習し、結果が正しいことを確認した後で解析したい対象をモデル化することをお勧めします。

エレクトロニクスシミュレーション研究会の規範問題²¹

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

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

誘電体球
Dielectric
 $\epsilon=1.777$

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。お申込みはこれからお願いします(締切7月14日)。 **NEW**

シミュレーションと実測の結果が合わないときの考察 No. 22

実験の精度・再現性は十分か？

Yes

No

実験の精度を上げる

解析モデルは正しくできているか？

・構造、媒質定数、放射境界との距離、励振部のモデル化（これは難しい）

変化なし

変化あり

製作制度を厳密に調べる

製作誤差の影響がある可能性を検討。シミュレータで考えられるパラメータを変化させて、結果に大きな影響があるか調べる

変化なし

変化あり

製作制度を厳密に調べる

材料定数(ϵ , μ , σ)は正しいか？考えられる値としてシミュレータで変化させた値を入力して、結果に大きな影響があるか調べる

Yes

完了

2. EMC対策の解析事例 (ミリ波帯オンチップ素子の電磁界解析)

2.1 素子のモデル化

2.2 ボンディングワイヤとパッケージの接続

2.3 RFボード設計の注意点(線路コーナー、スルーホールなど)

2.4 パッドの励振モデル化

Sパラメータの基礎

<http://www.takuichi.net/hobby/edu/em/em-j.html>

上記HPにてSパラメータ(波の進行方向で分類して表現)の基礎について解説しています。

電磁界理論

← → ↻ ① 保護されていない通信 | takuichi.net/hobby/edu/em/em-j.html ☆ ○ | T ⋮

5. モード解析

[モード解析](#)
導波路のモード解析

6. マイクロ波回路

[分布定数線路と電圧・電流/進行波の各種行列表現 \(Distributed Constant Line and Various Matrix for Voltage, Current, and Travelling Waves\)](#)
分布定数線路と電信方程式の導出と解法、電圧・電流/進行波の各種行列表現について説明します

[伝送線路 \(Transmission Lines\)](#)
マイクロ波回路の基本となる伝送線路について説明します

[アンテナ素子 \(Antenna Elements\)](#)
電磁波を放射する種々のアンテナについて説明します

[導波管と伝送線路モデルおよび導波管内の散乱体とその等価回路](#)
方形導波管を例として、伝送線路モデルと等価回路モデルを説明します

[チョークとスタブの原理](#)
チョークとスタブの原理を解説します

7. 種々の電磁界解析法

[モーメント法入門](#)
境界要素法の一つ。
[スペクトル領域法によるMoMリアクションの計算 \(PDF\)](#)

[有限要素法\(FEM, finite element method\)による電磁界解析入門](#)

2.1 素子のモデル化

De-embeddingについて、PADのモデル化、線路の解析

T. Hirano, K. Okada, J. Hirokawa, and M. Ando, "Accuracy Investigation of De-embedding Techniques Based on Electromagnetic Simulation for On-wafer RF Measurements," InTech Open Access Book, Numerical Simulation - From Theory to Industry, ISBN 978-953-51-0749-1, Chapter 11, pp.233-258, September 19, 2012. (Open Access)

<http://www.intechopen.com/books/numerical-simulation-from-theory-to-industry/accuracy-investigation-of-de-embedding-techniques-based-on-electromagnetic-simulation-for-on-wafer-r>

The screenshot shows a web browser window displaying the IntechOpen website. The page has a red header with navigation links: Books, Publish, About, News, Contact, Author Panel Sign in, and a search box. The main content area is white and features the following text:

Open access peer-reviewed chapter

Accuracy Investigation of De-Embedding Techniques Based on Electromagnetic Simulation for On-Wafer RF Measurements

By Takuichi Hirano, Kenichi Okada, Jiro Hirokawa and Makoto Ando

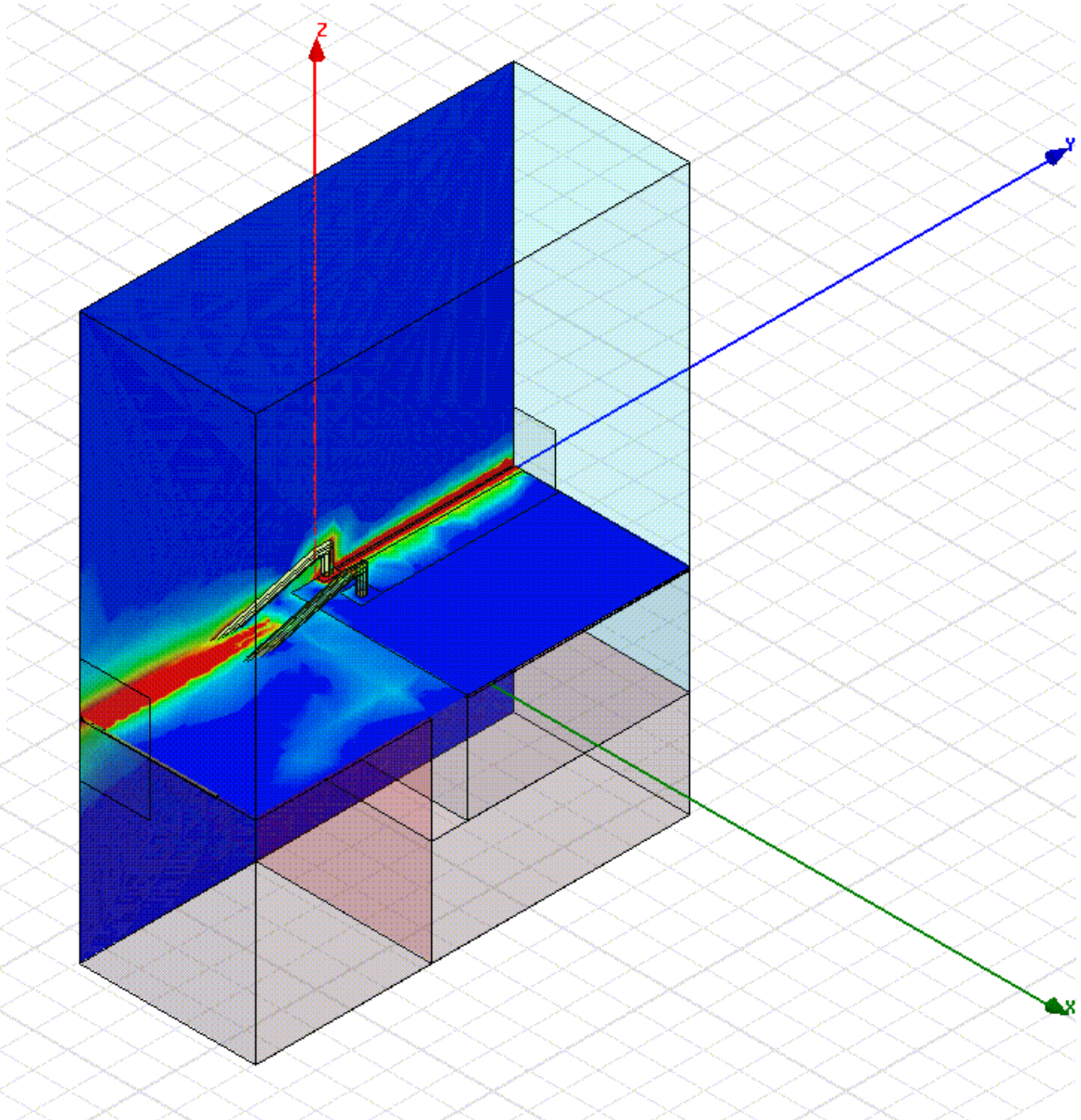
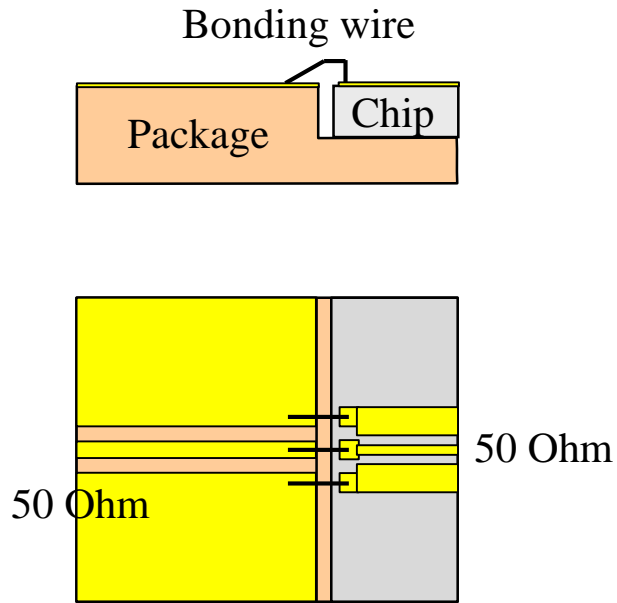
Submitted: November 28th 2011 Reviewed: May 9th 2012 Published: September 19th 2012

DOI: 10.5772/48431

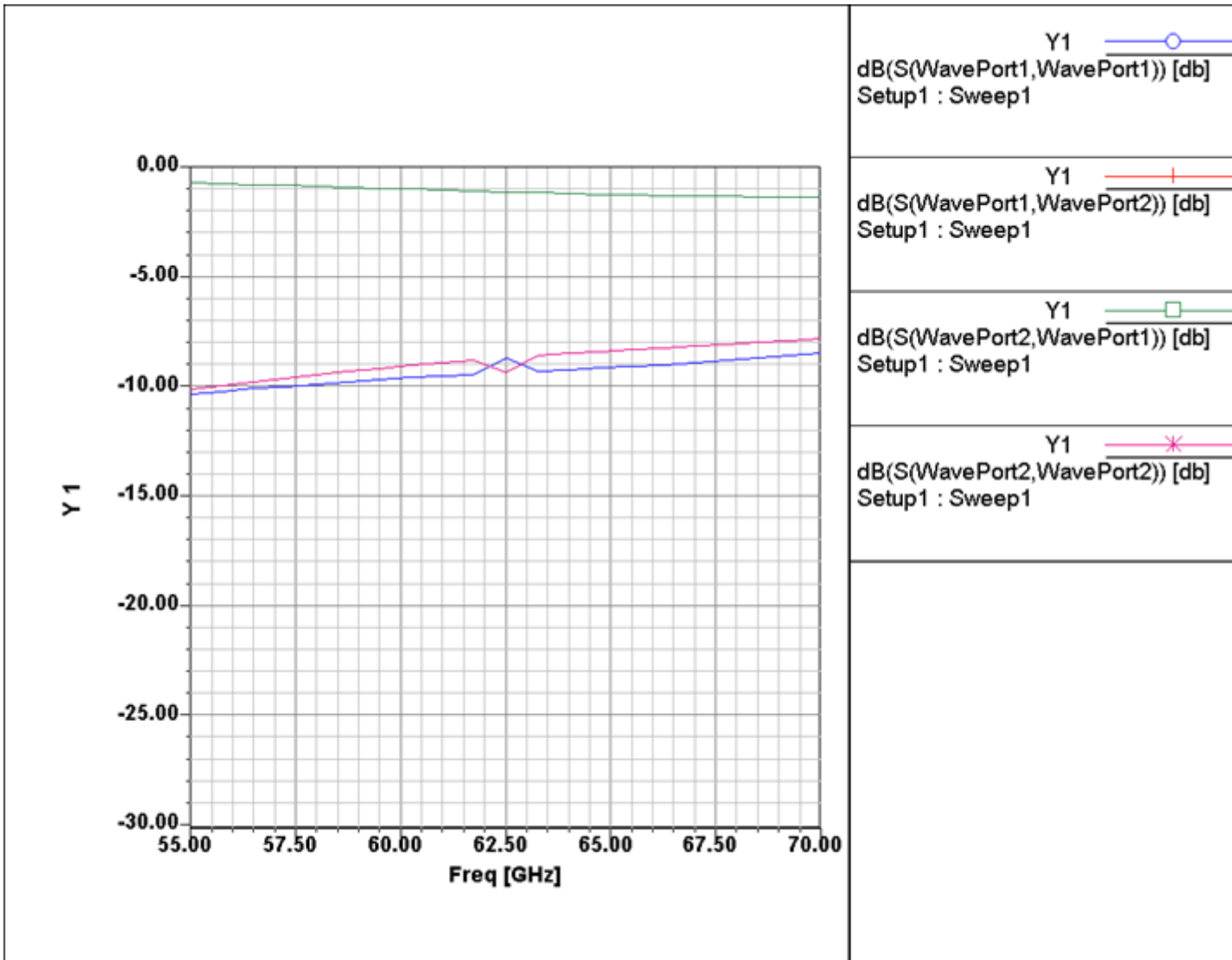
Home > Books > Numerical Simulation - From Theory to Industry

IntechOpen uses cookies to offer you the best online experience. By continuing to use our site, you agree to our Privacy Policy [Got it!](#)

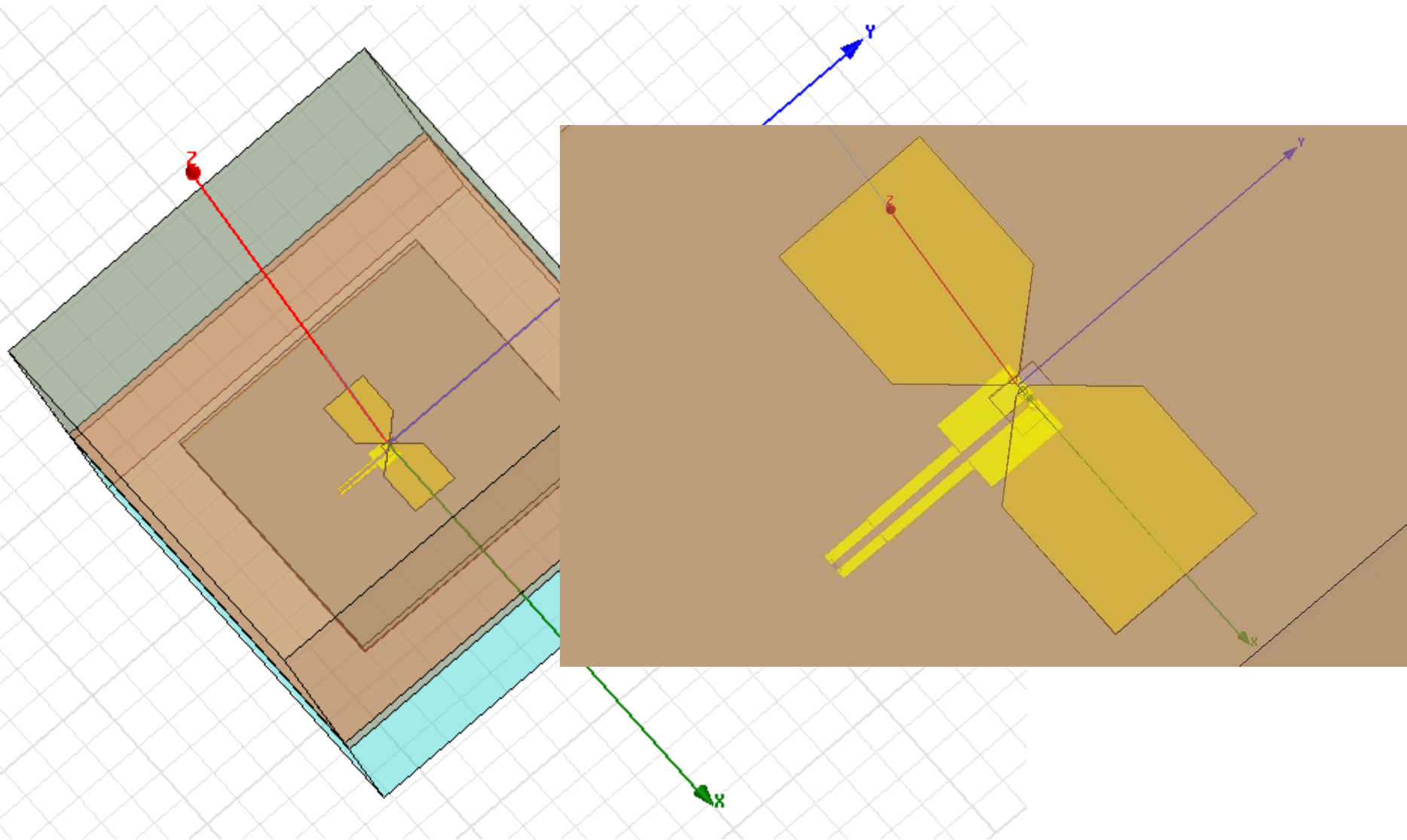
2.2 チップのワイヤボンディングからの不要放射の例

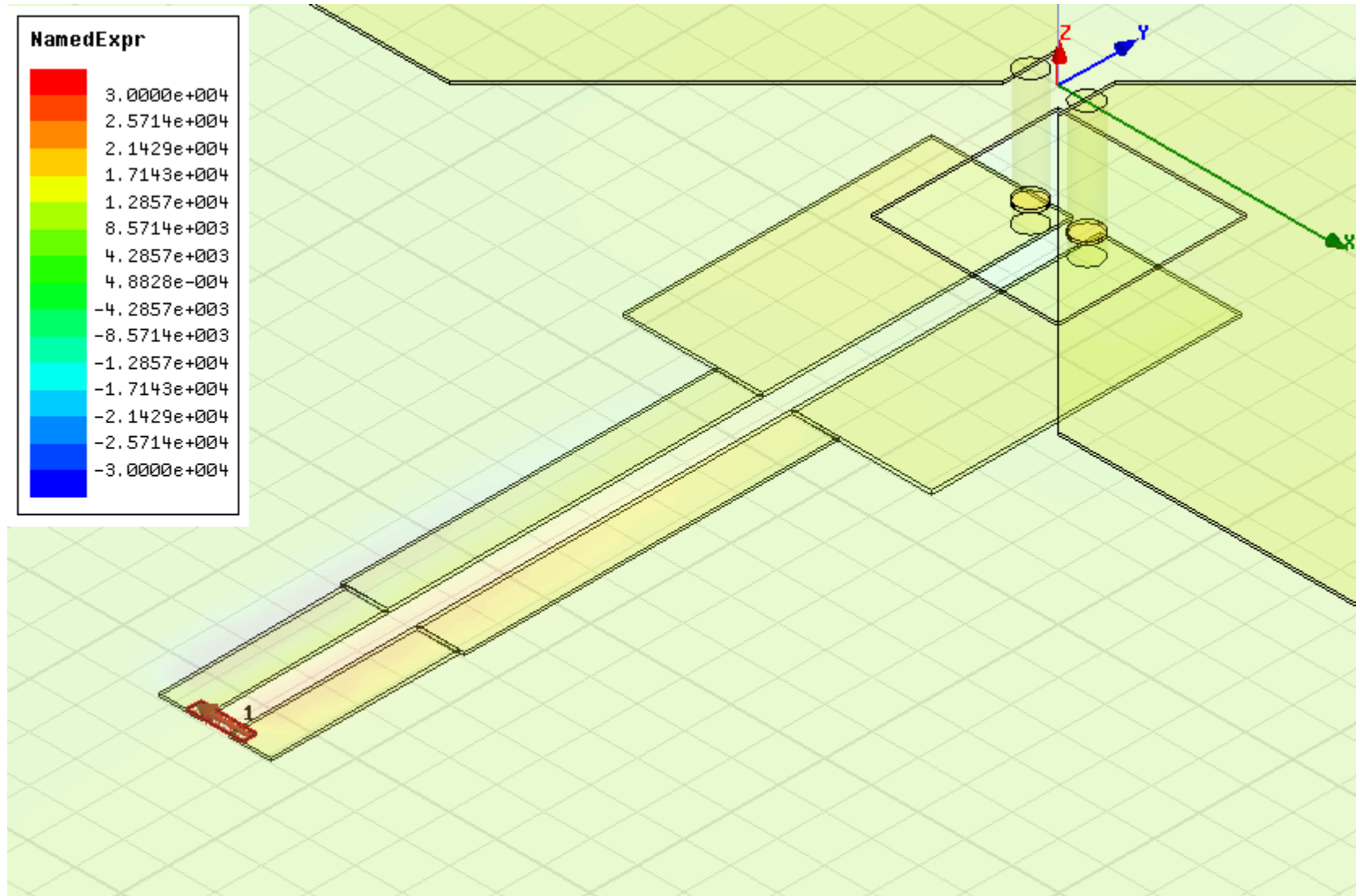


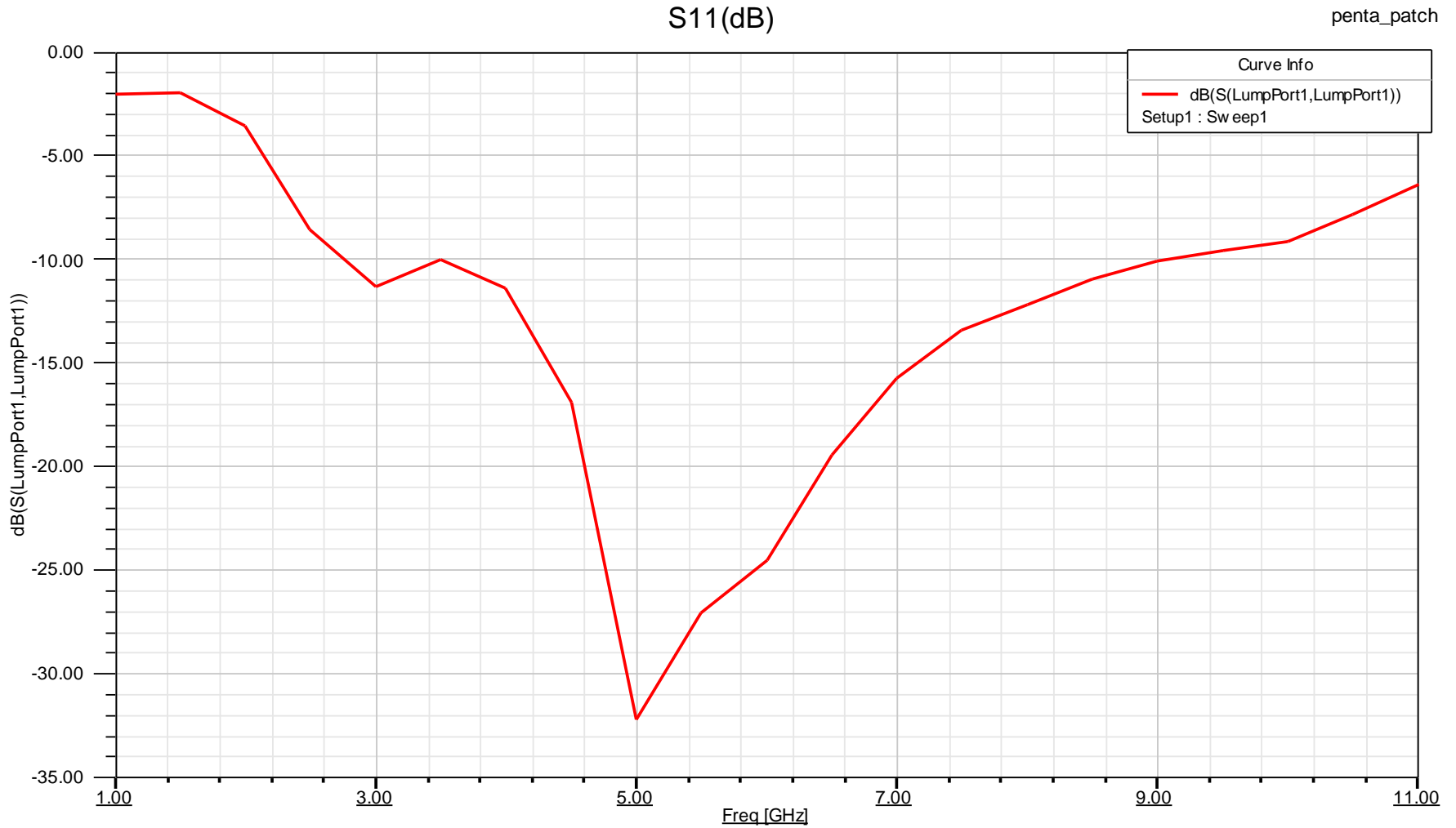
2.2 チップのワイヤボンディングからの不要放射の例

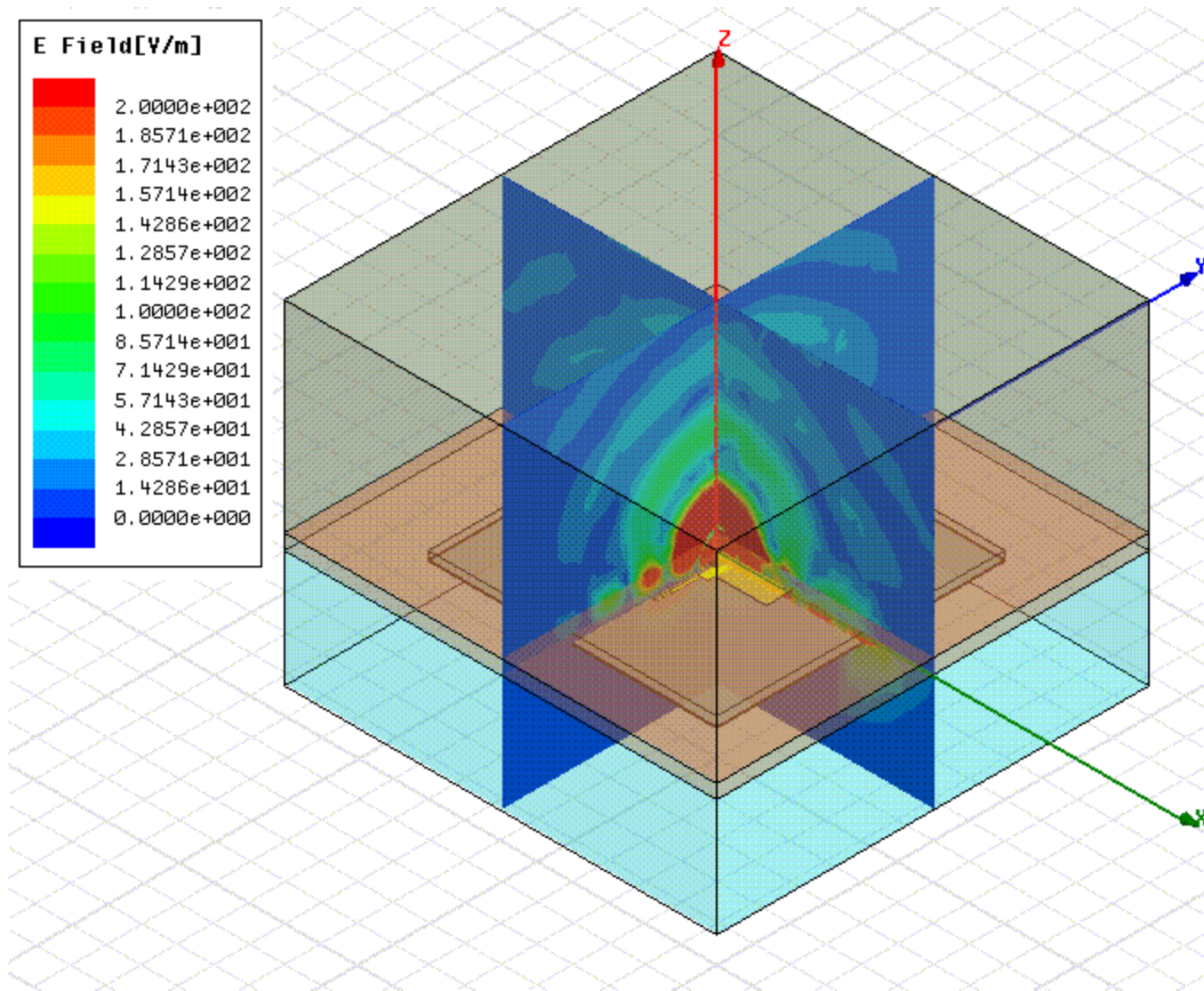


2.3 接続部／変換部の不要放射の例: Model^{No. 28}

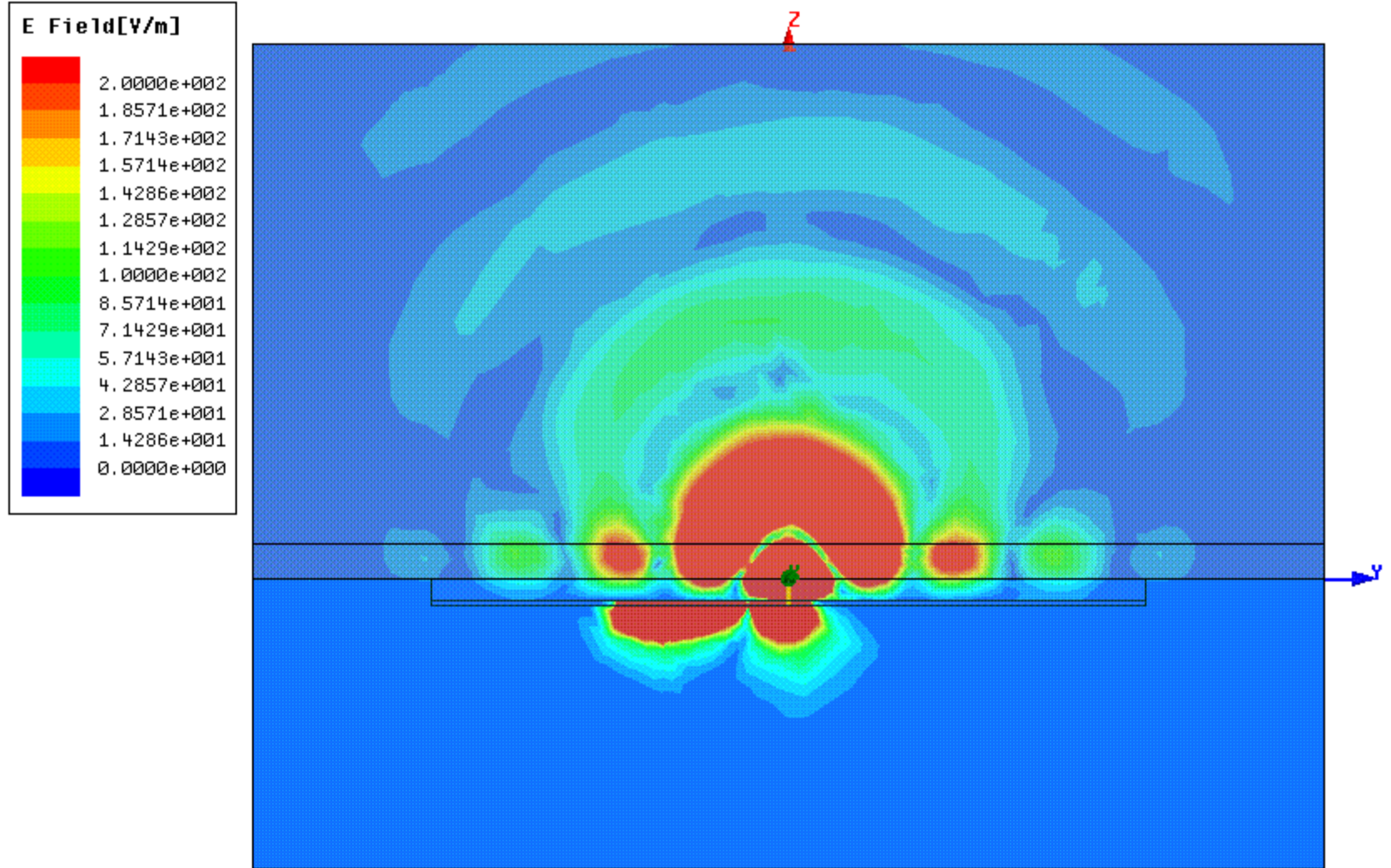




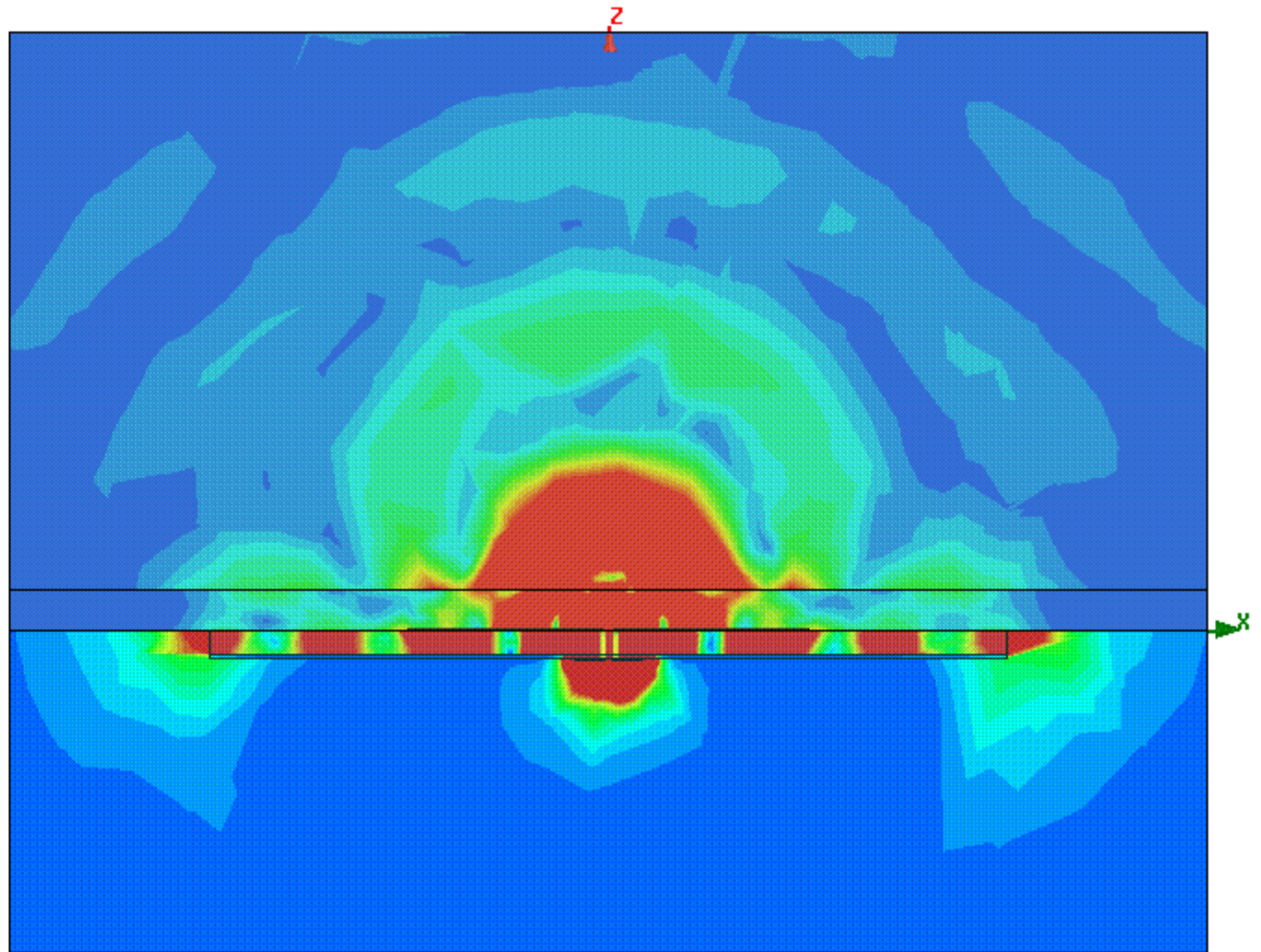
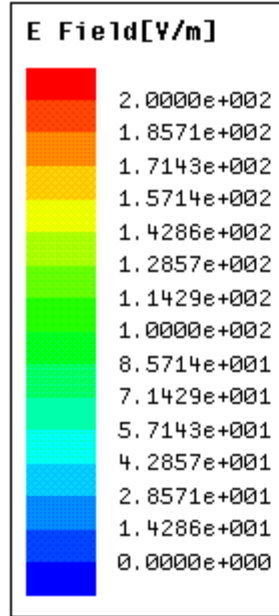




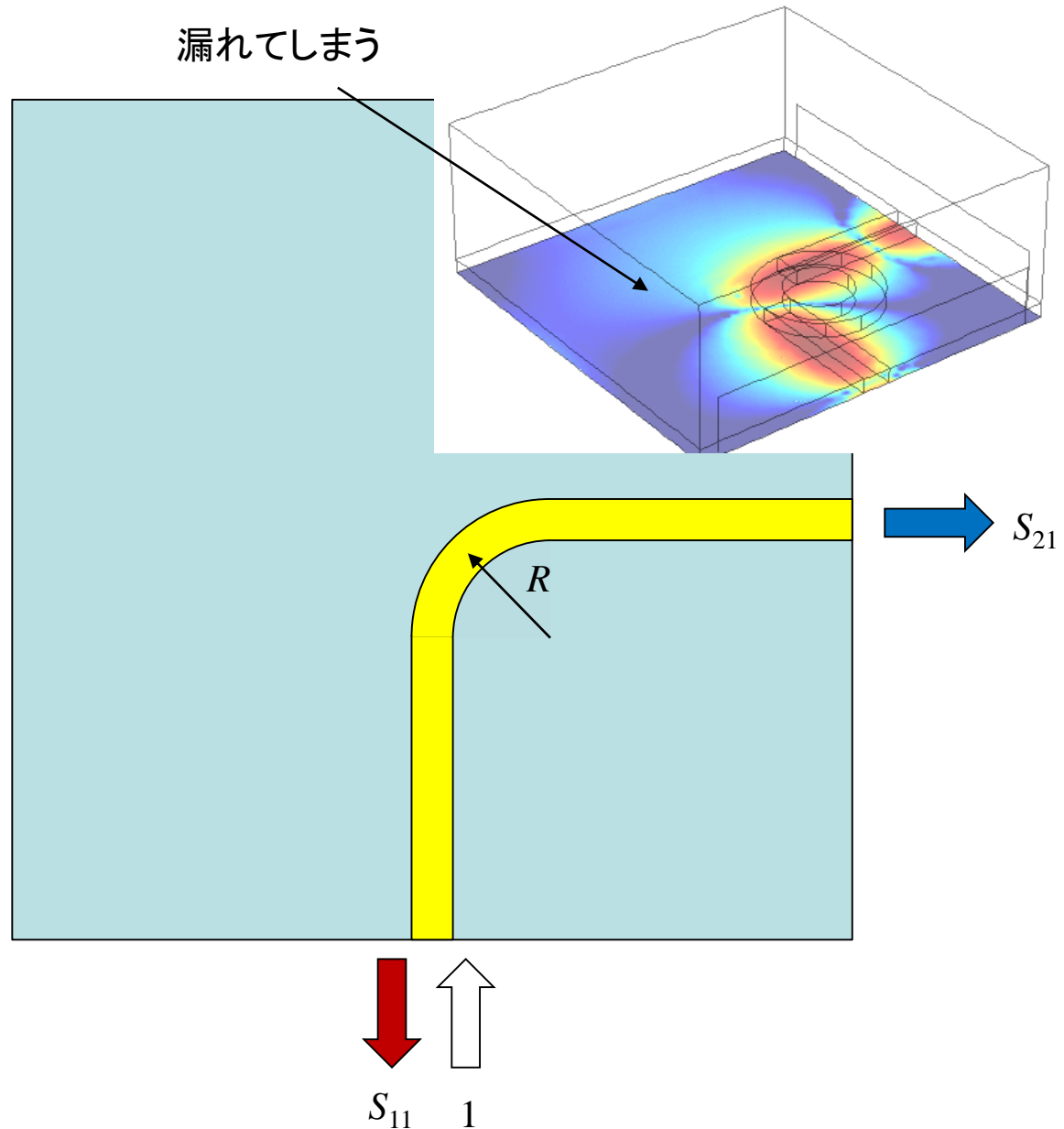
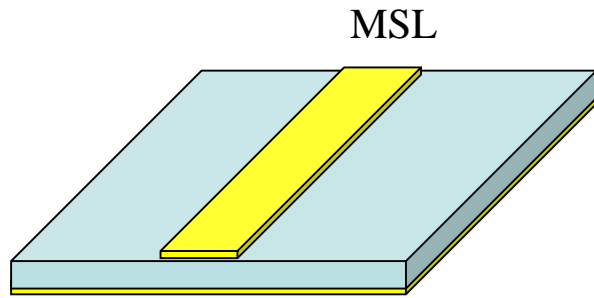
E-field Animation (y-z plane)



E-field Animation (x-z plane)



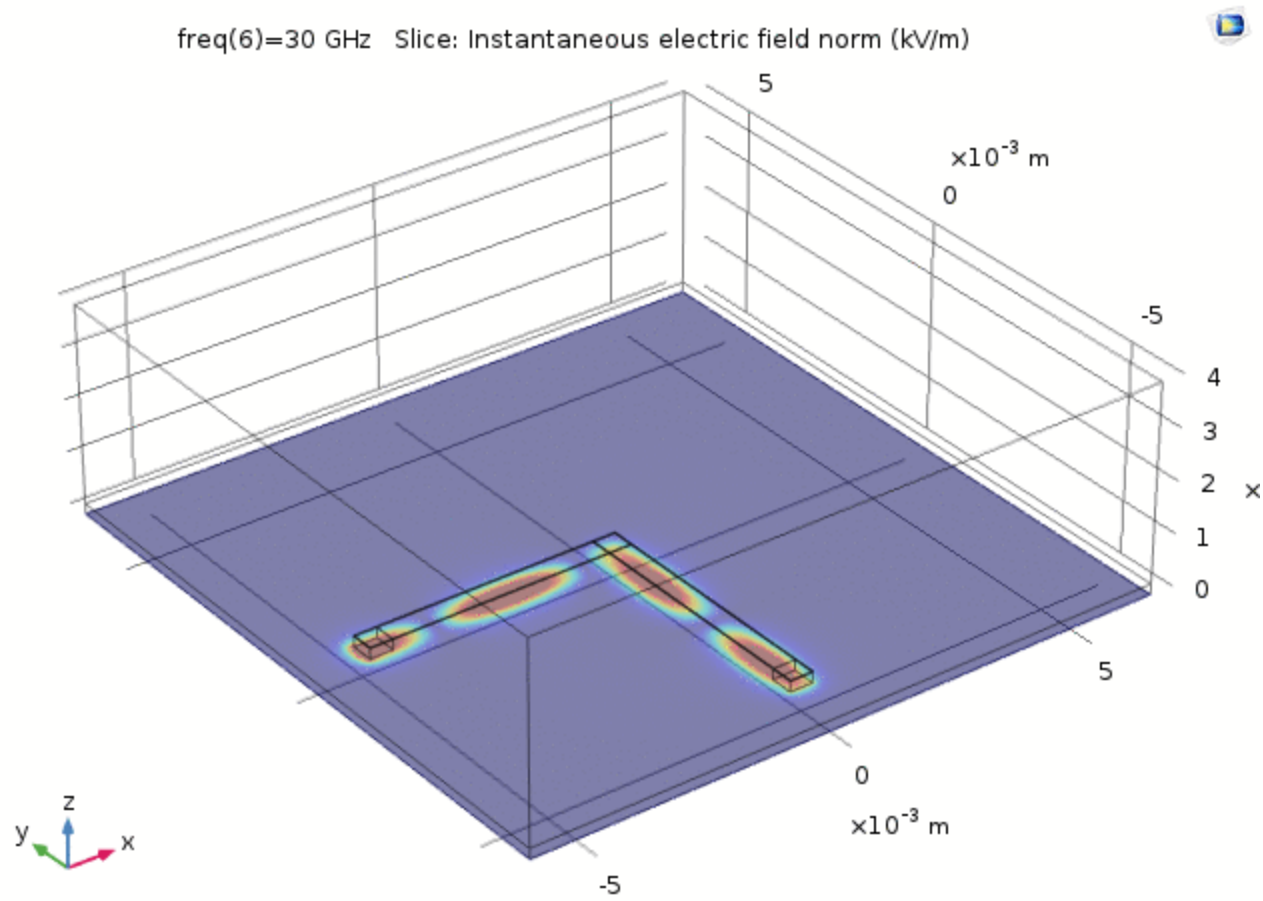
2.3 MSLコーナーからの不要放射の例



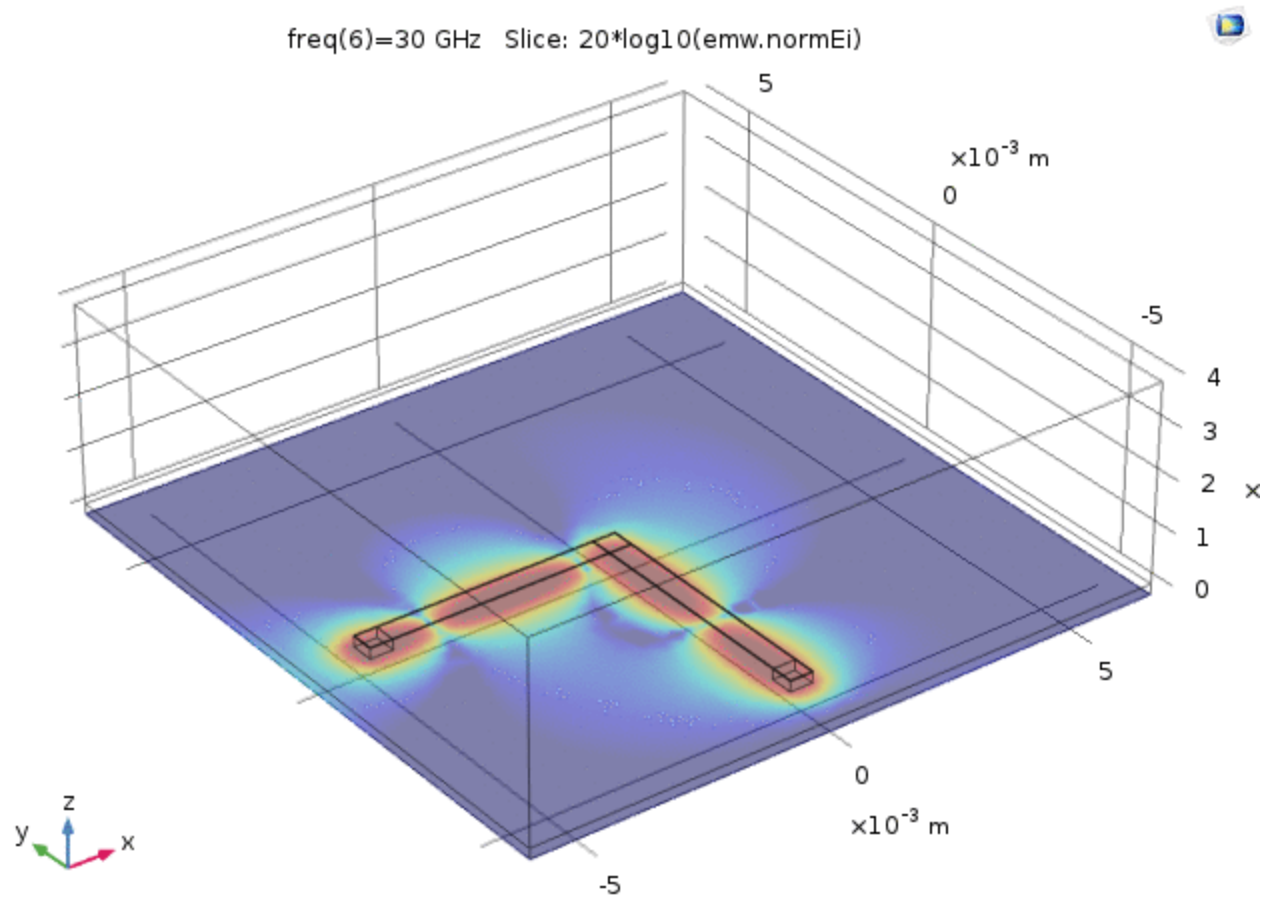
入力電力: 1

出力電力: $|S_{11}|^2 + |S_{21}|^2$

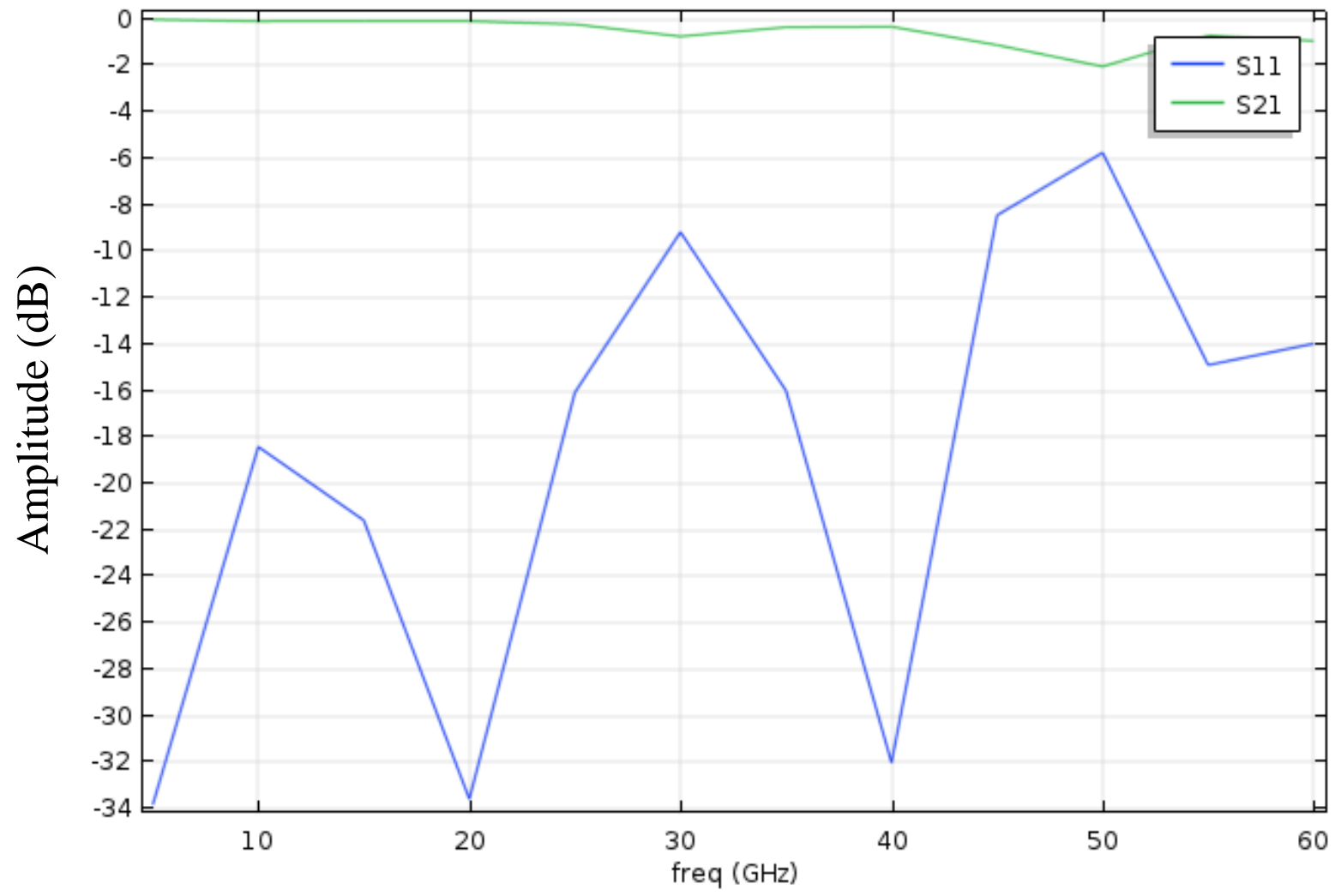
損失電力: $1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2$



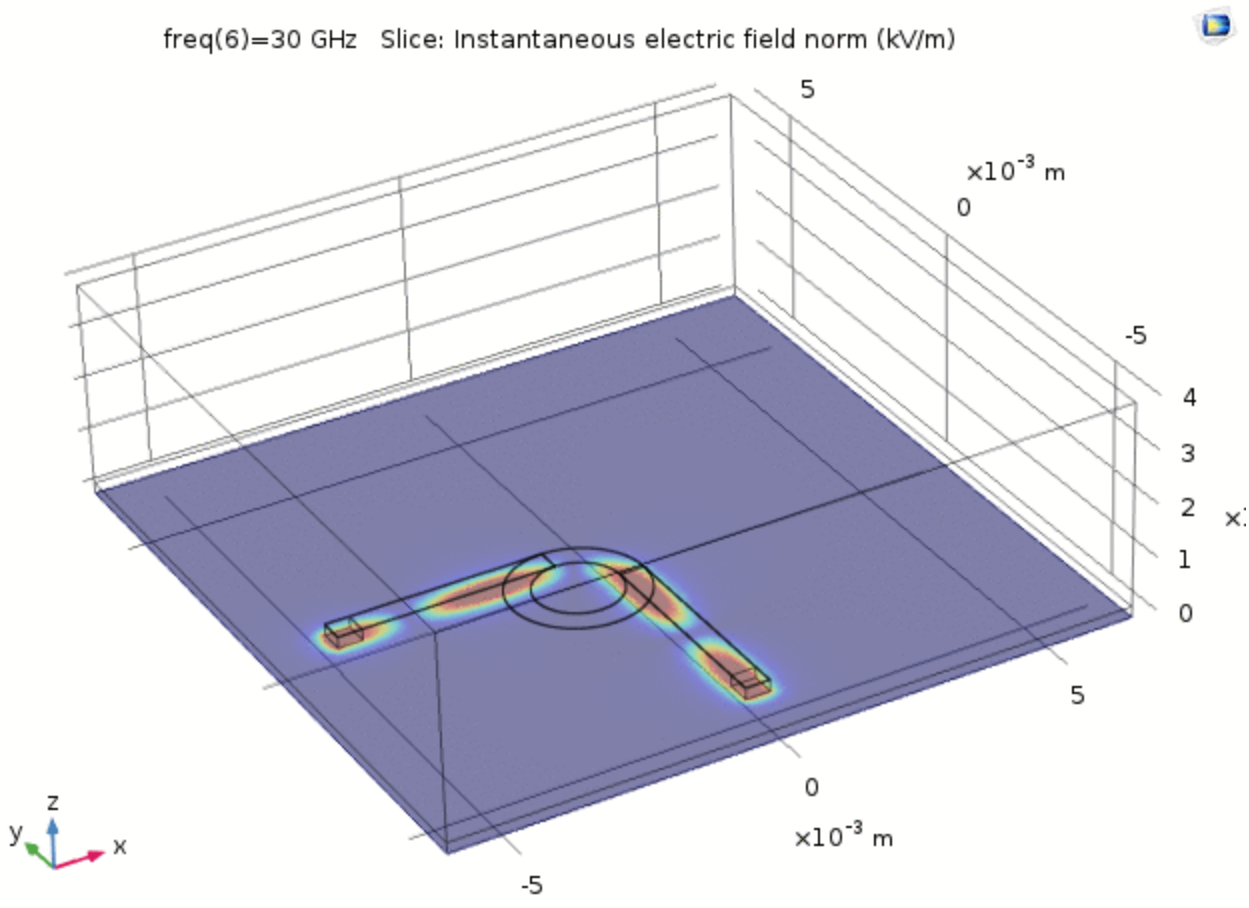
直角コーナー



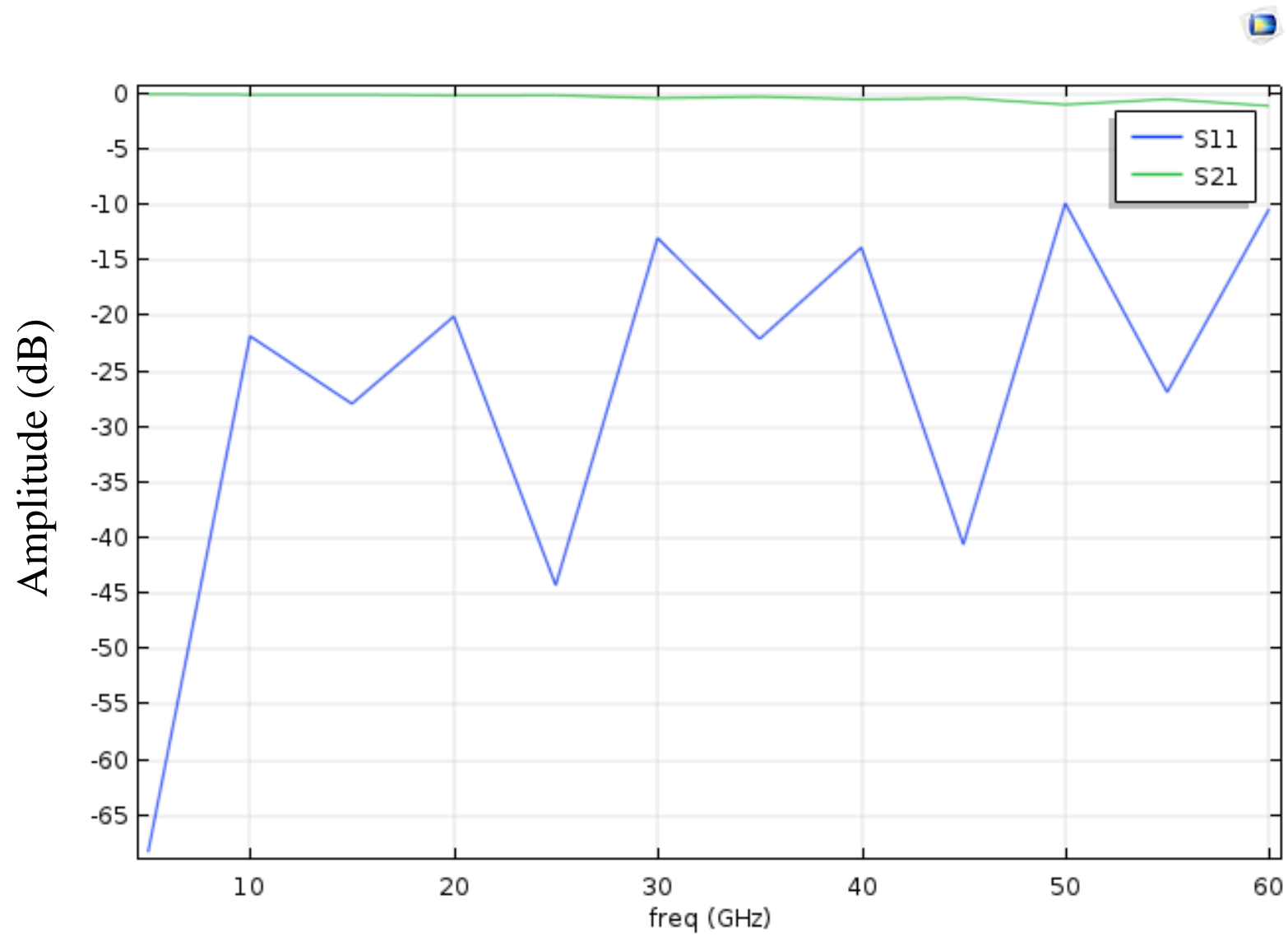
直角コーナー



円弧コーナー

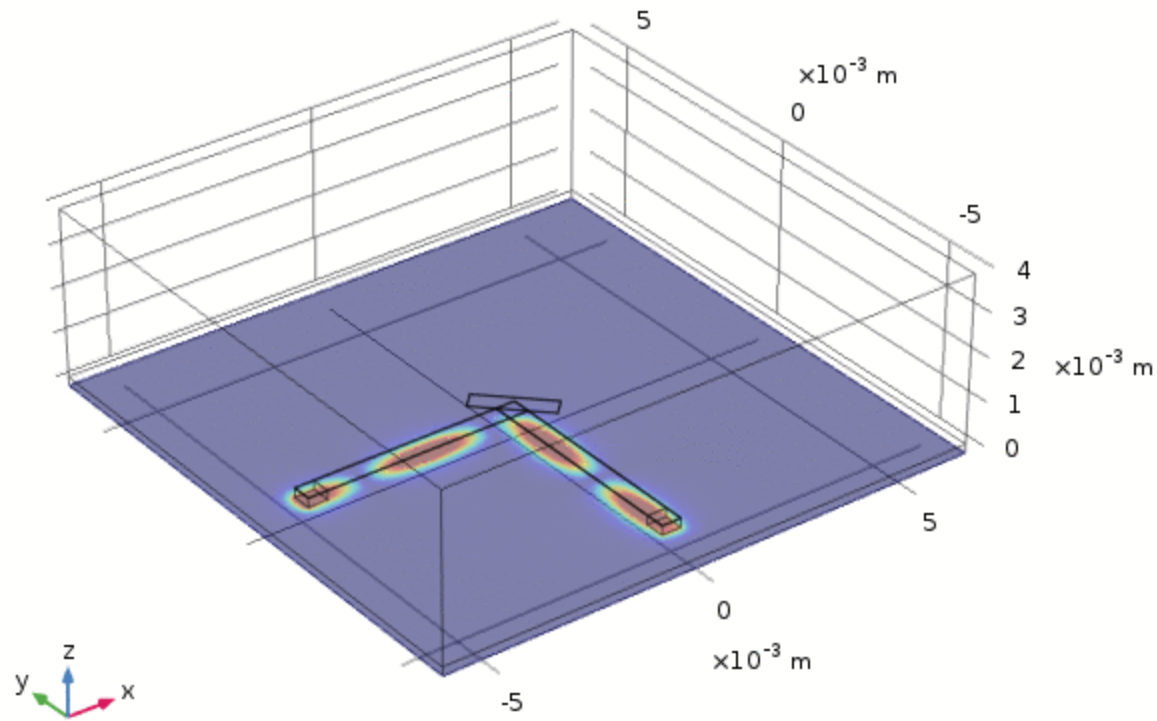


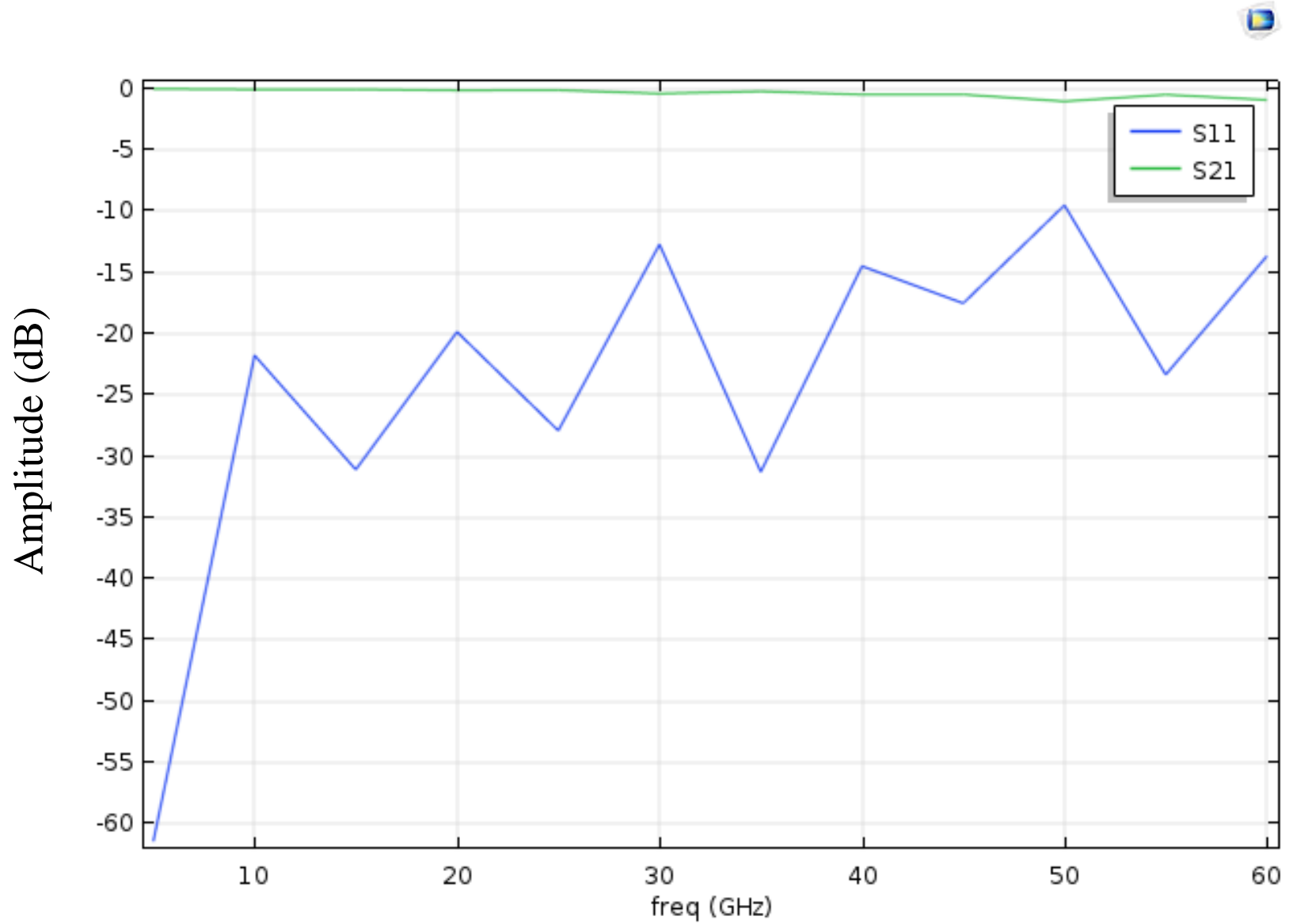
円弧コーナー

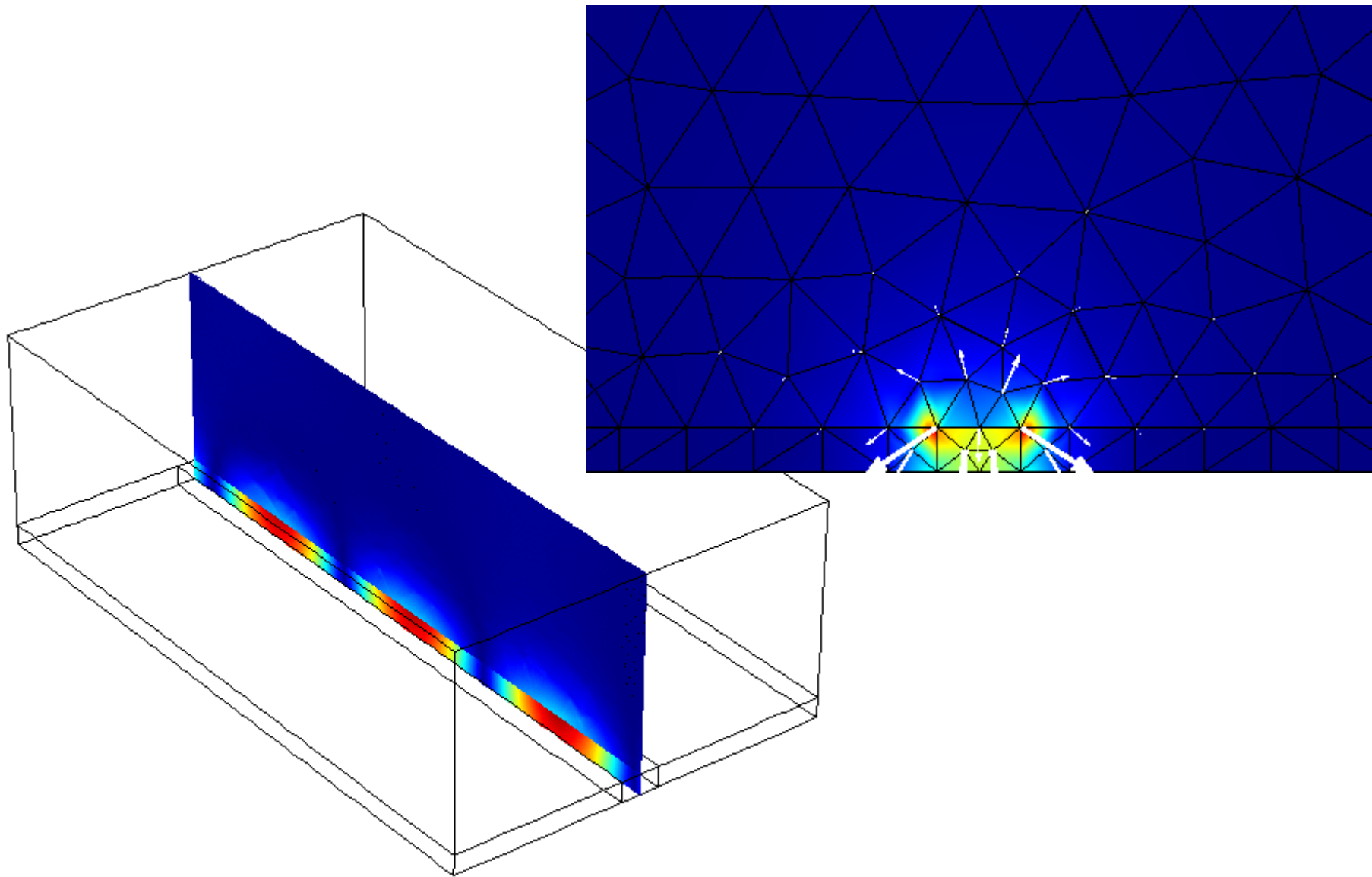


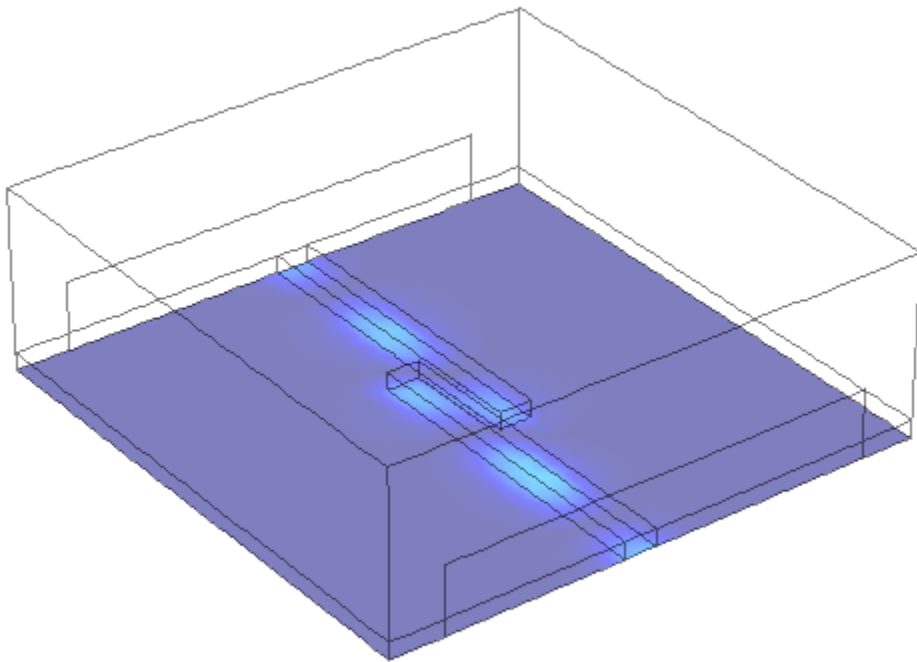
切り欠けコーナー

freq(6)=30 GHz Slice: Instantaneous electric field norm (kV/m)

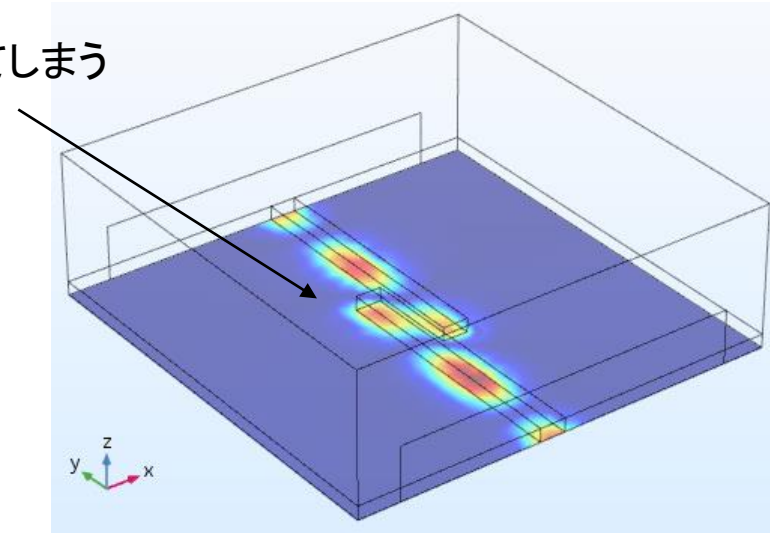








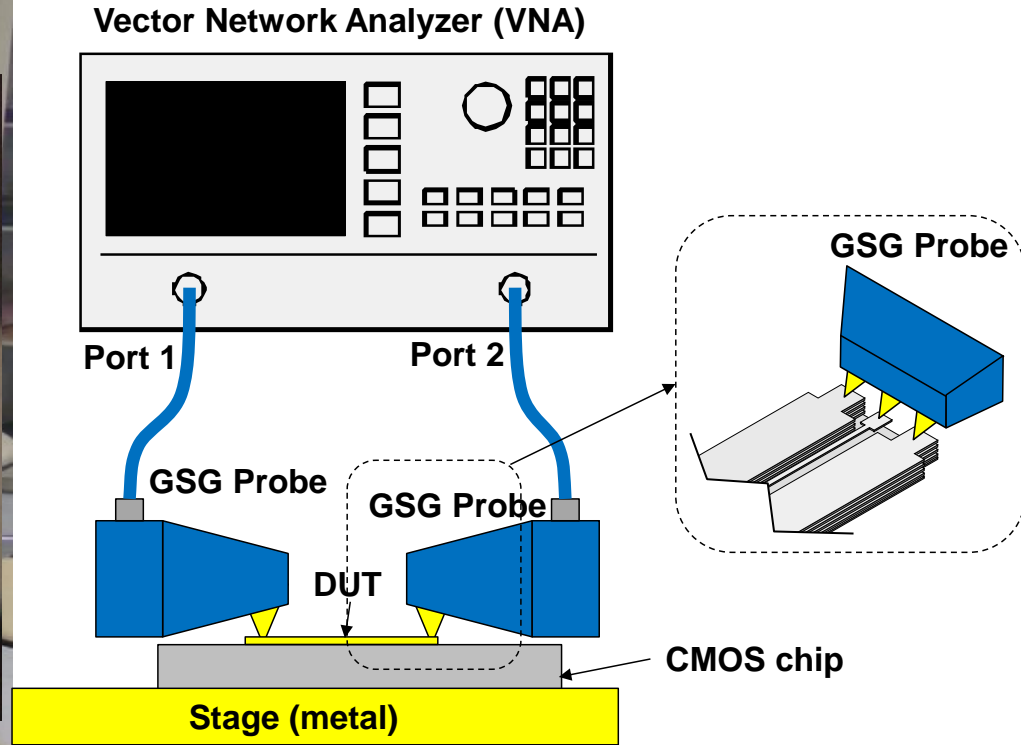
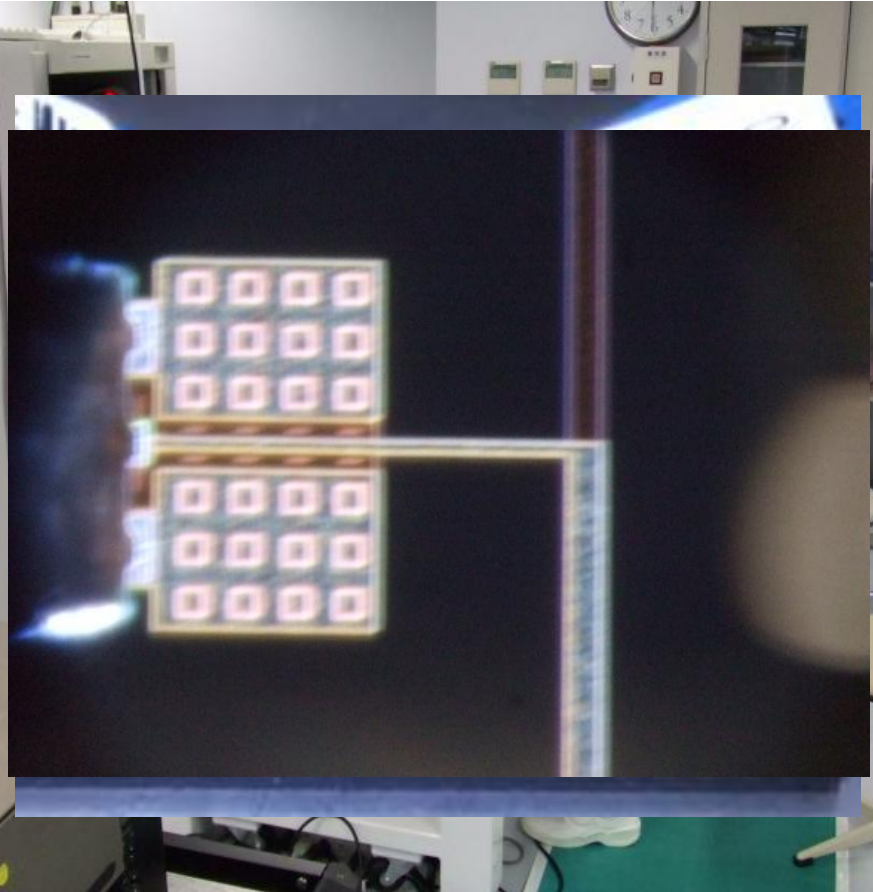
結合してしまう



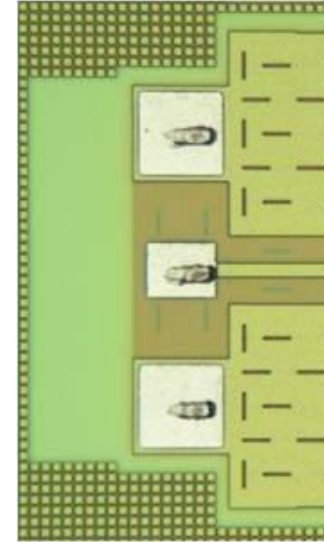
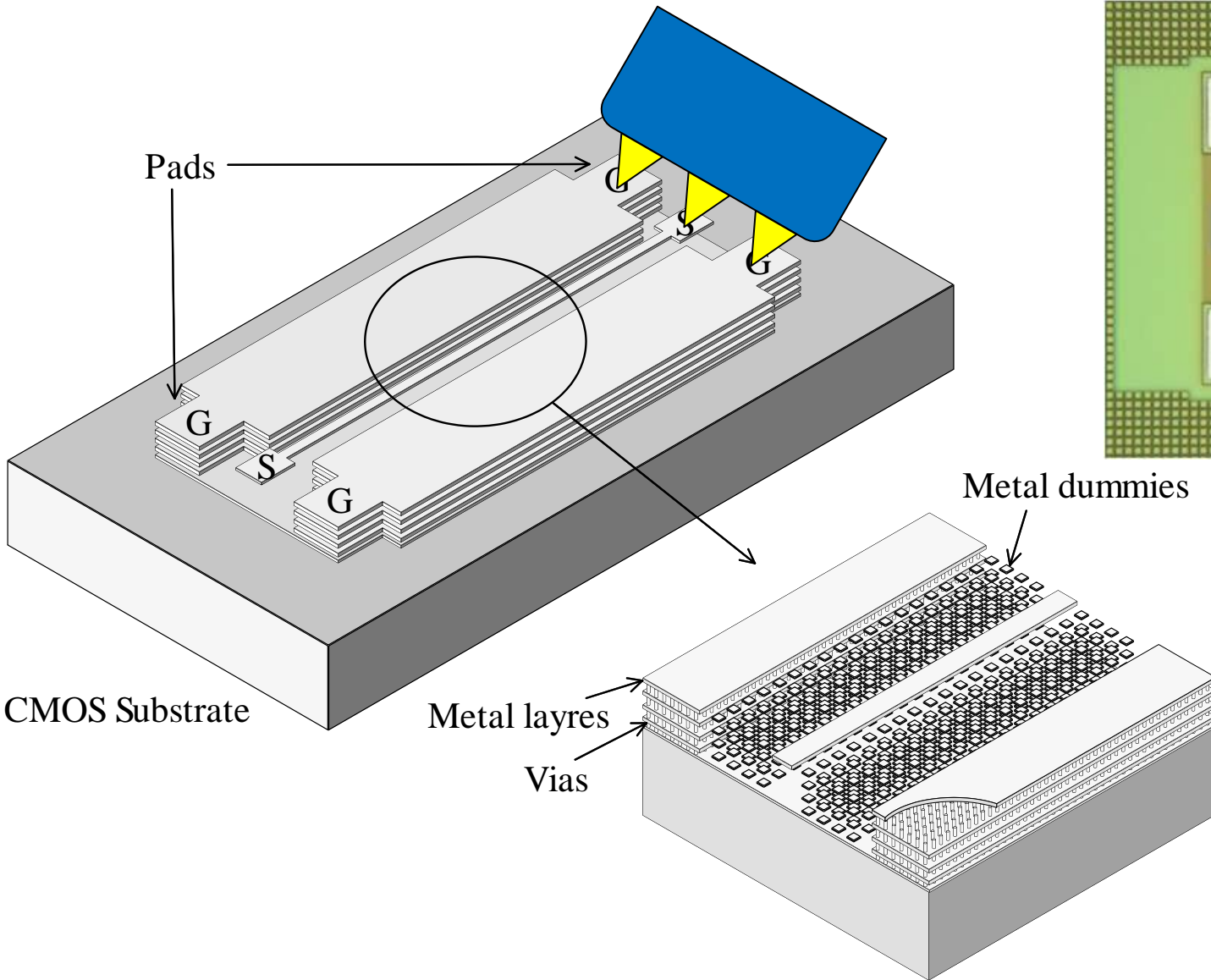
結合線路

2.4 GSGパッドの励振モデル

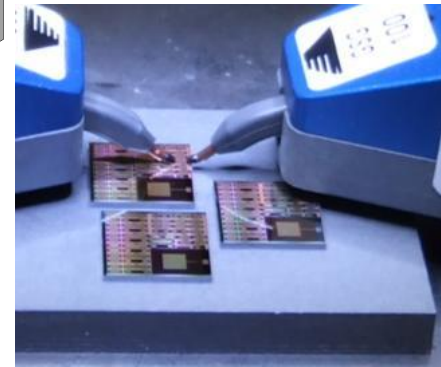
プローブ測定



GSGパッドの構造

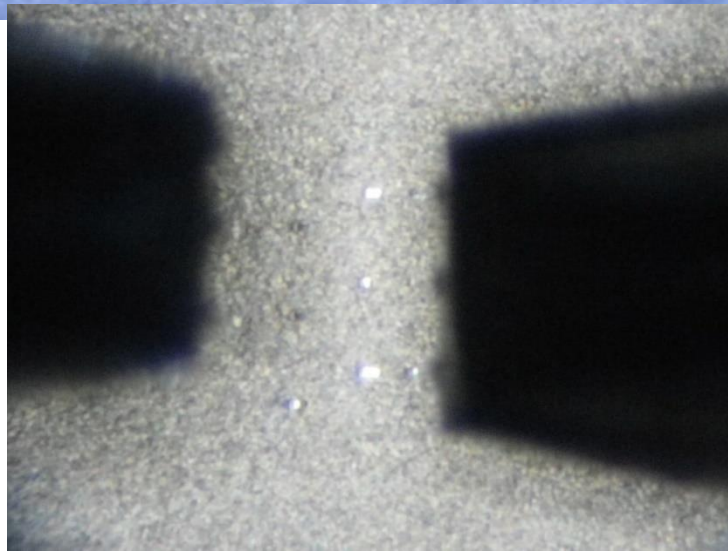
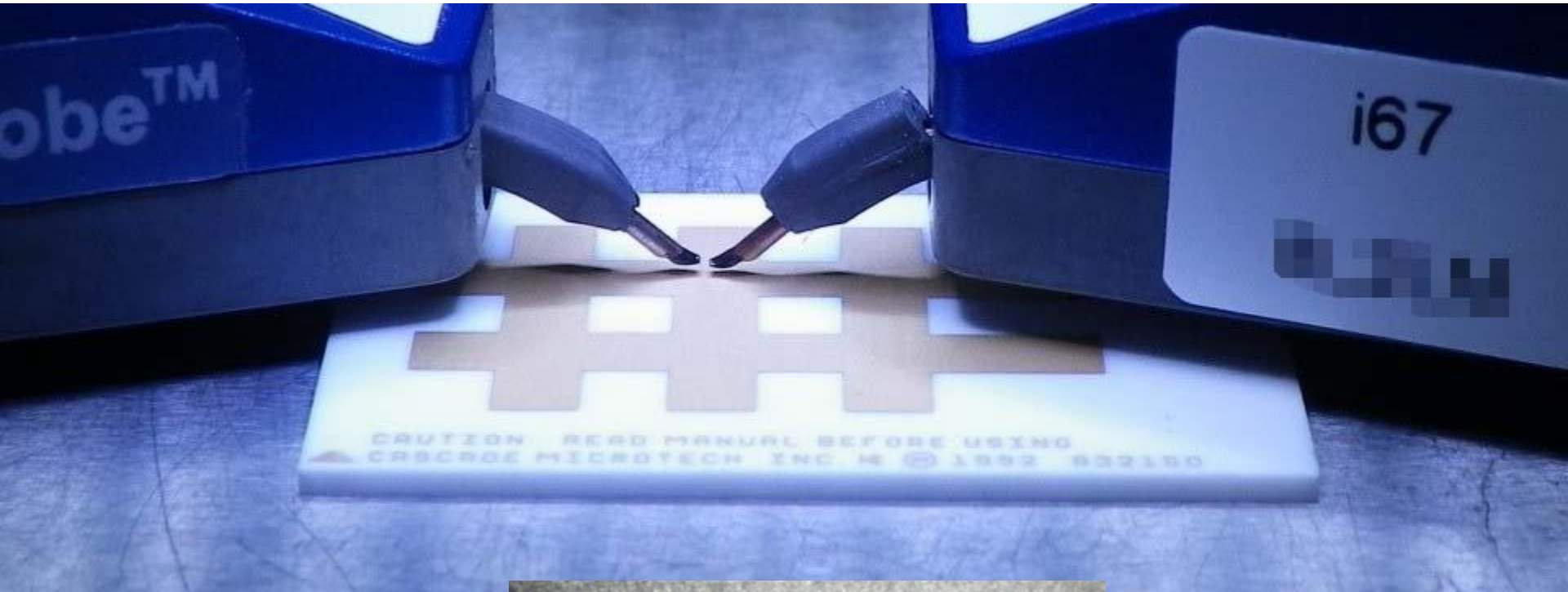


Cascade Microtech
Infinity Probe



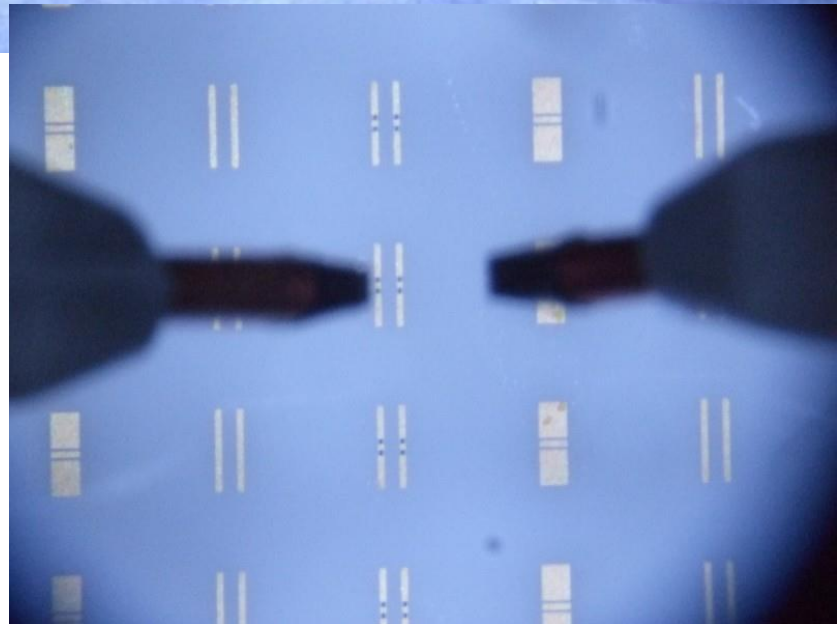
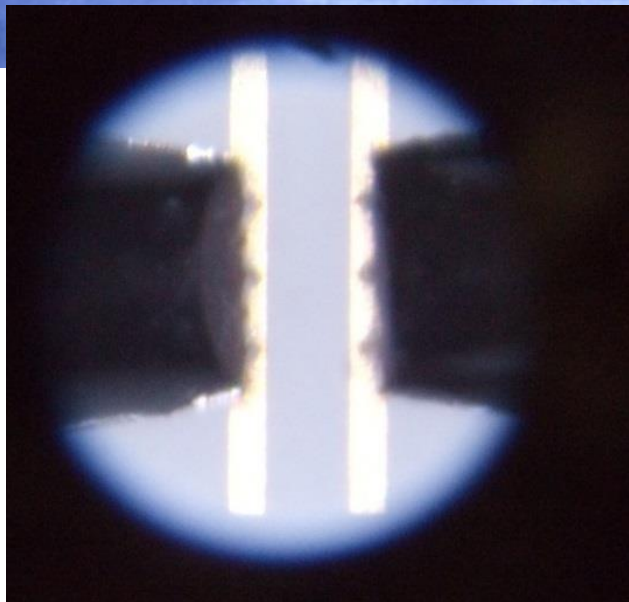
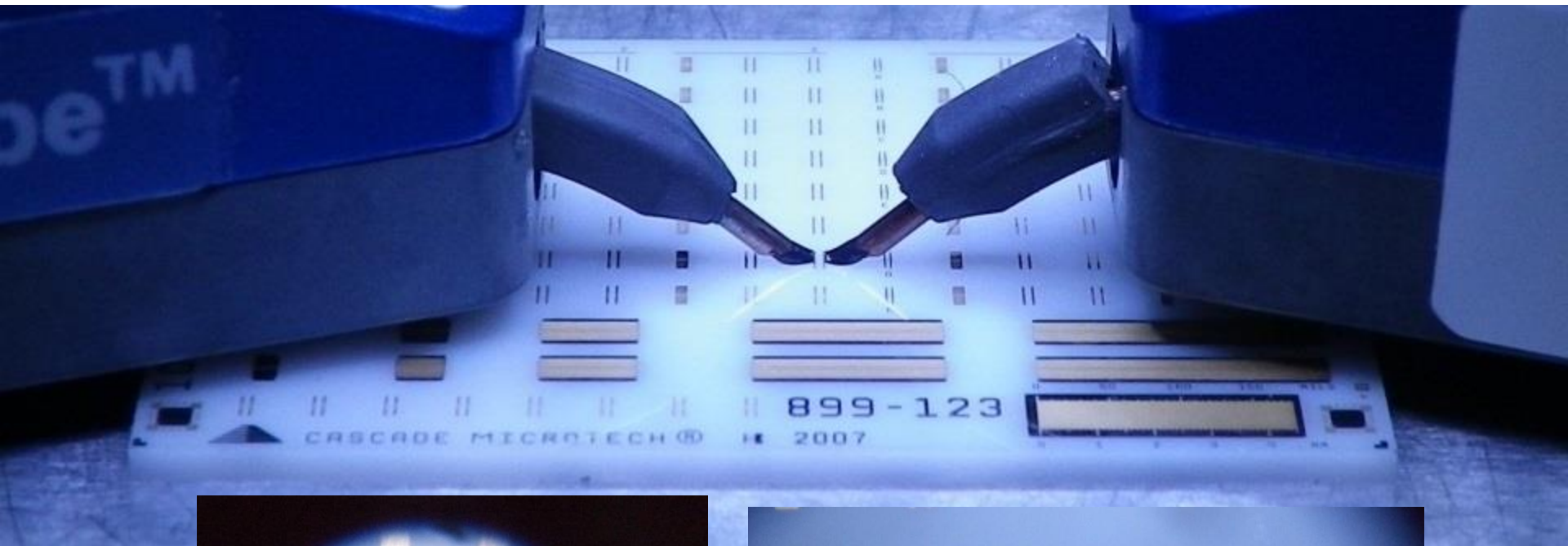
GSGプローブの写真(コンタクト基板)

No. 46

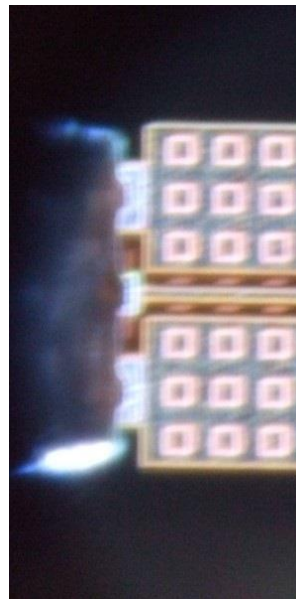
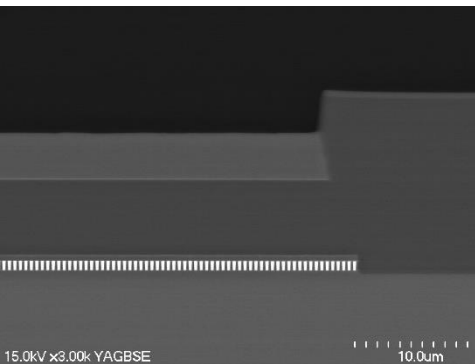
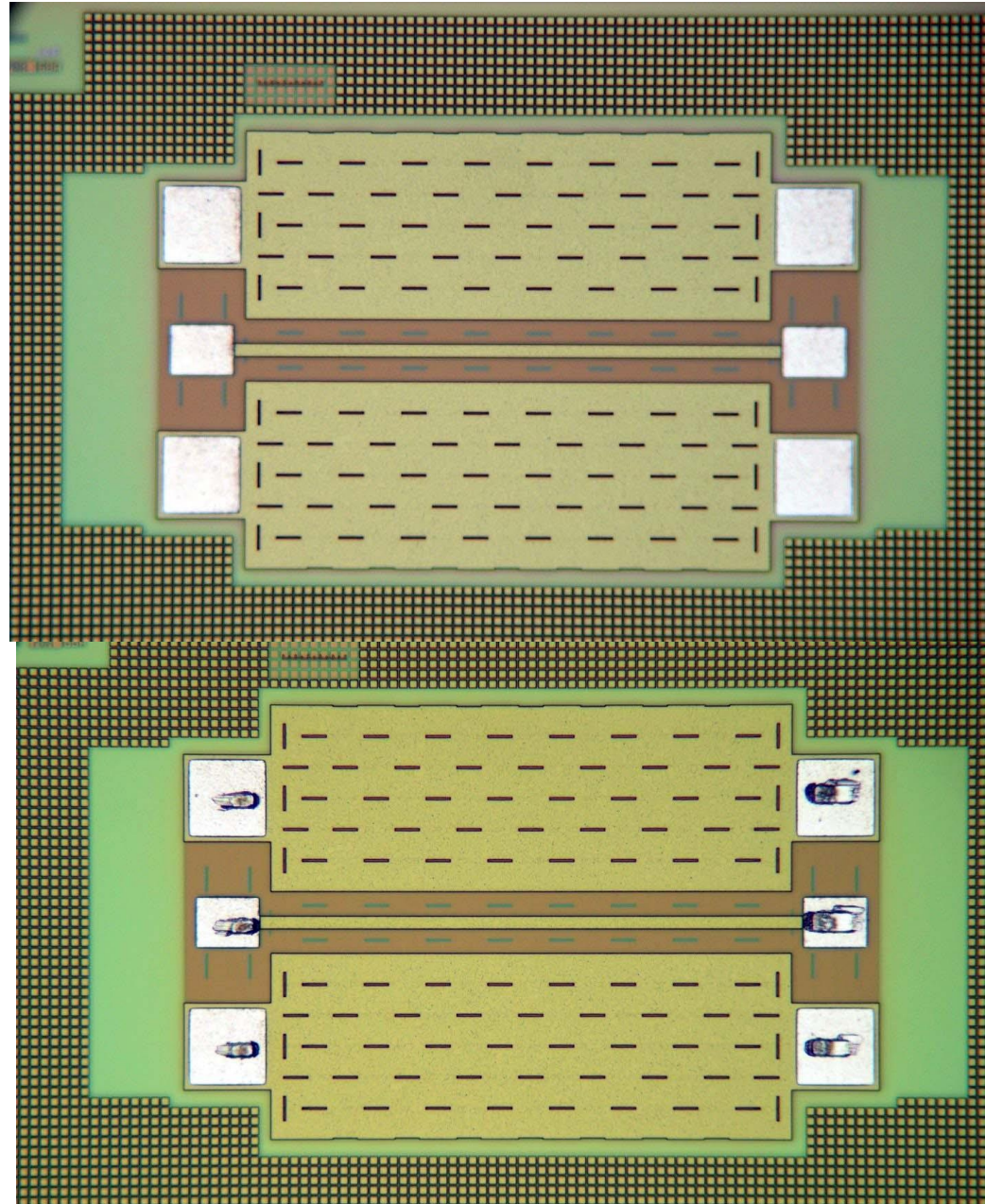
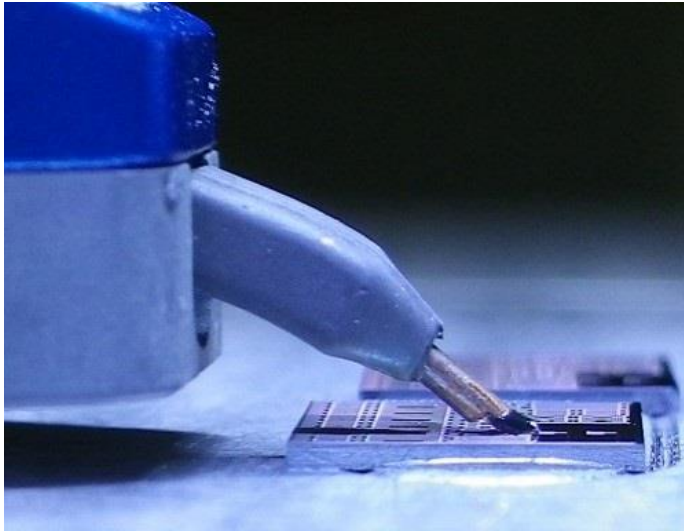


GSGプローブの写真(ISS; 校正基板)

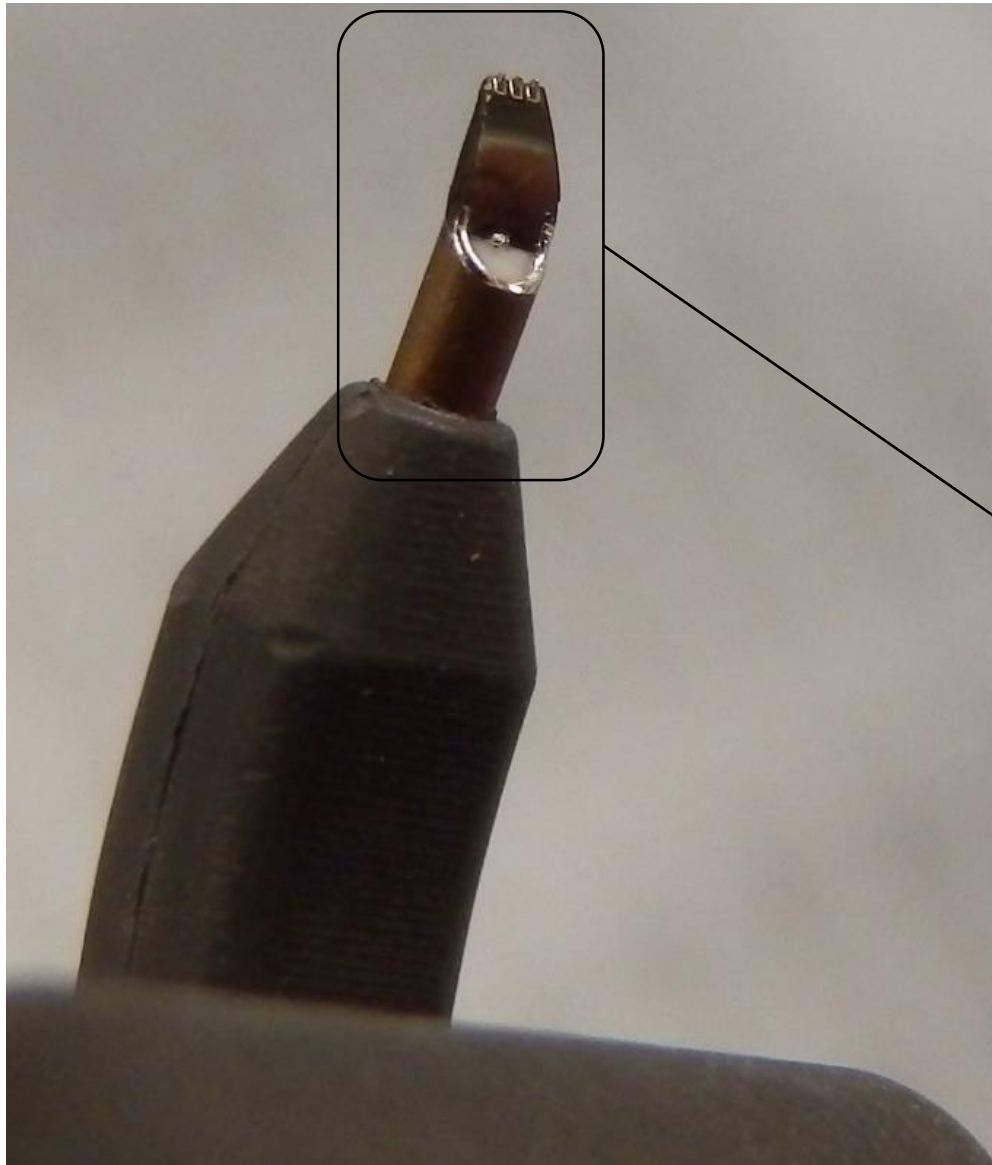
No. 47

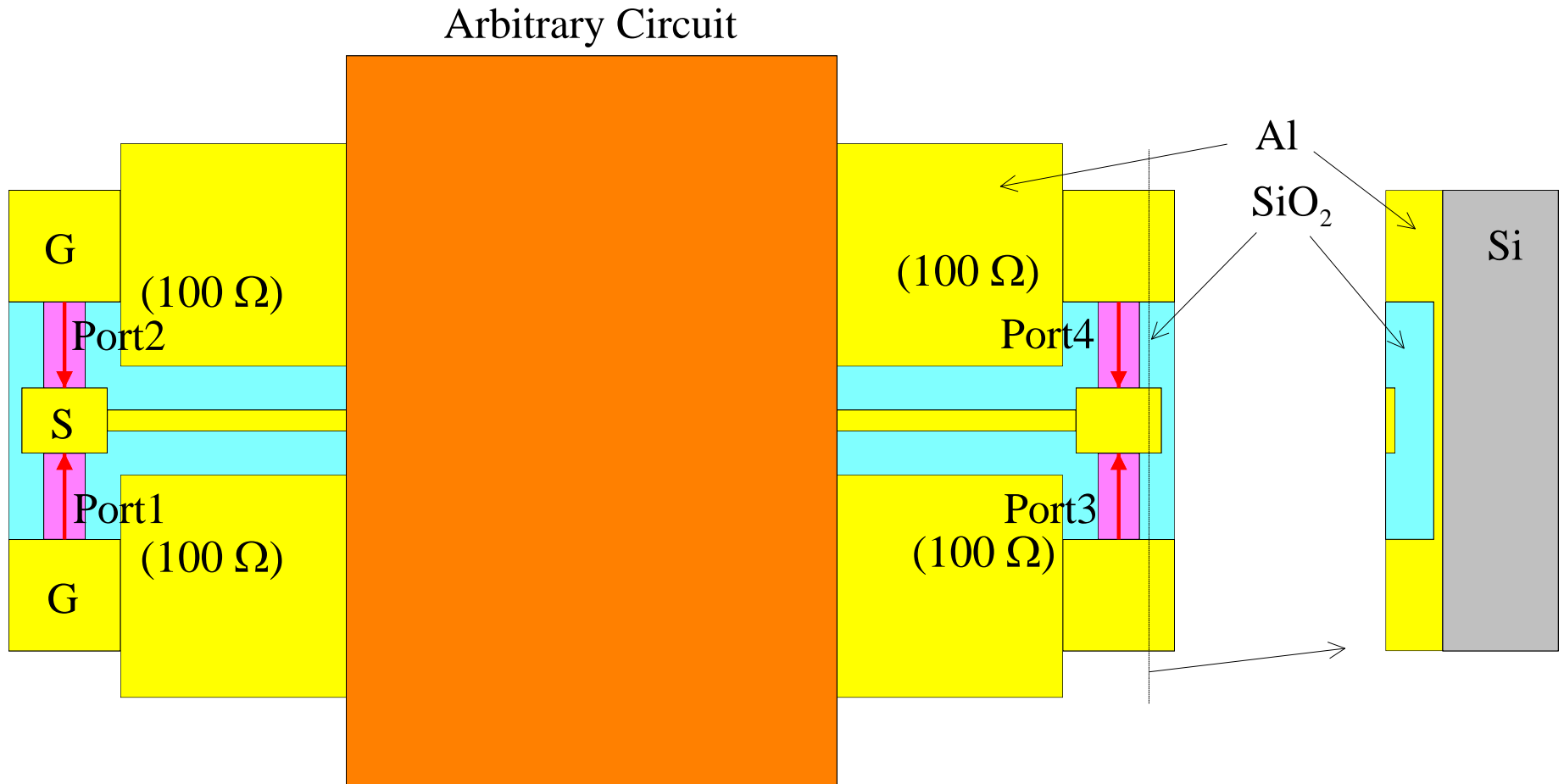


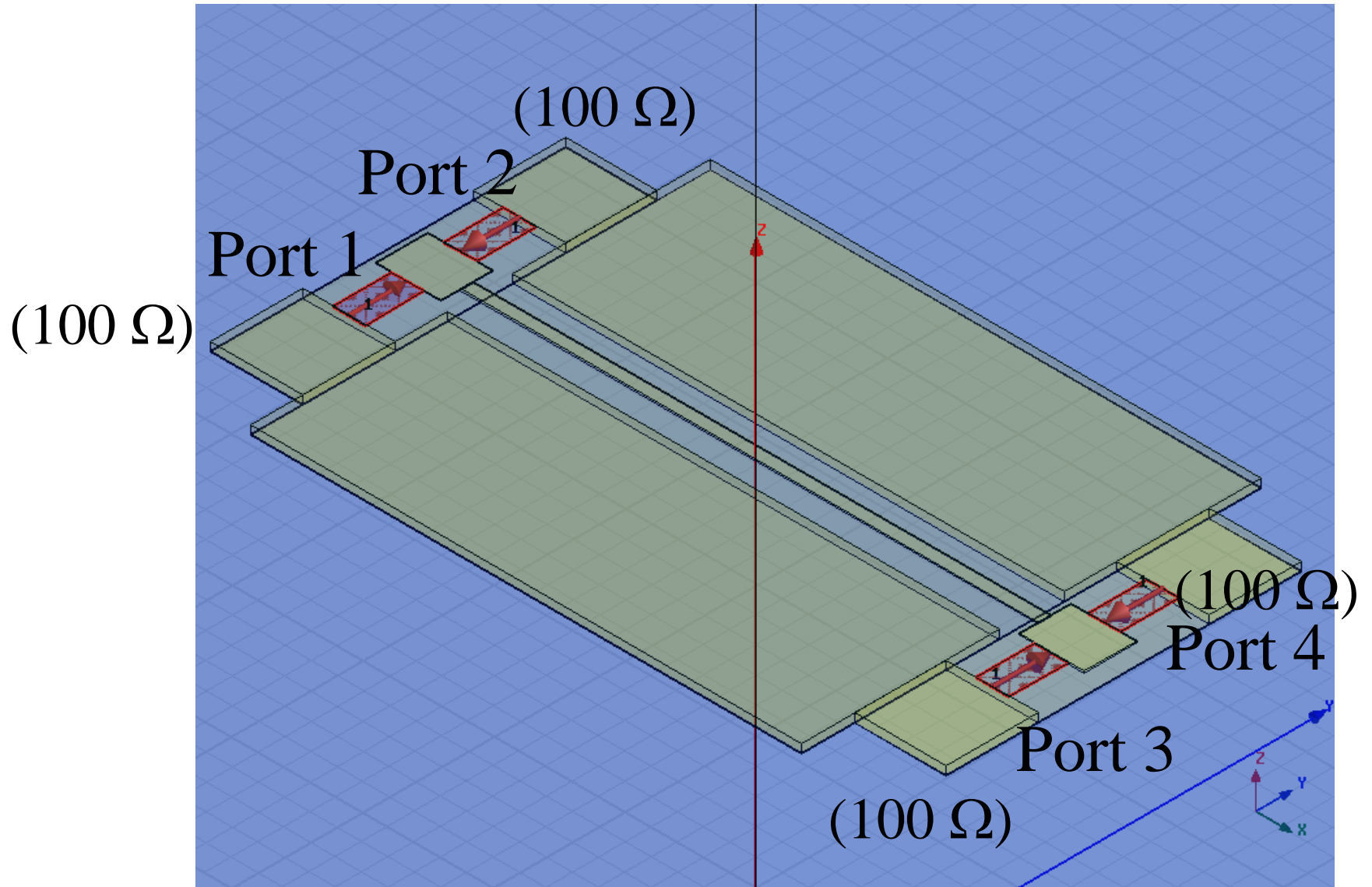
GSGプローブの写真(パッド)



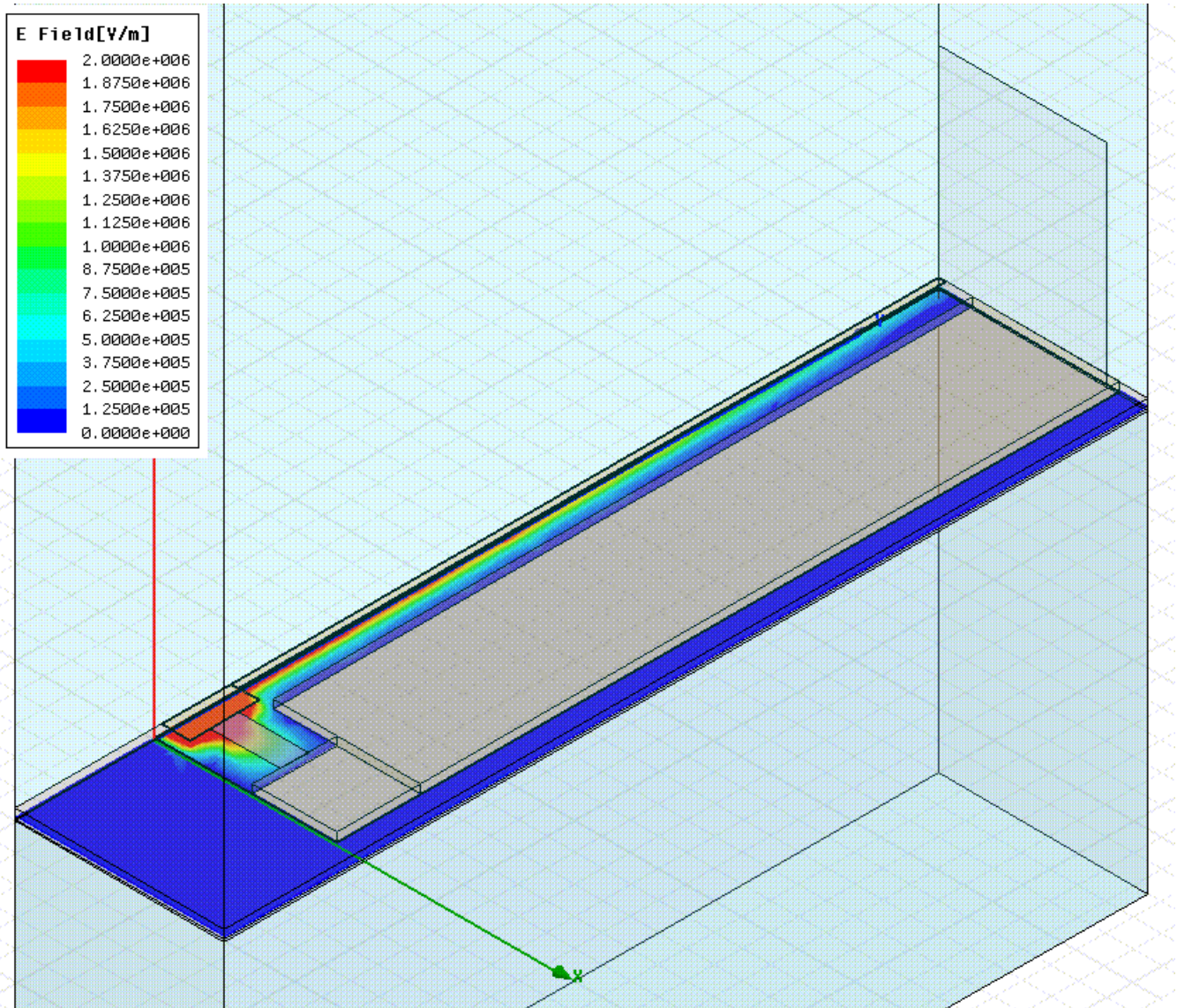
GSGプローブ先端の写真

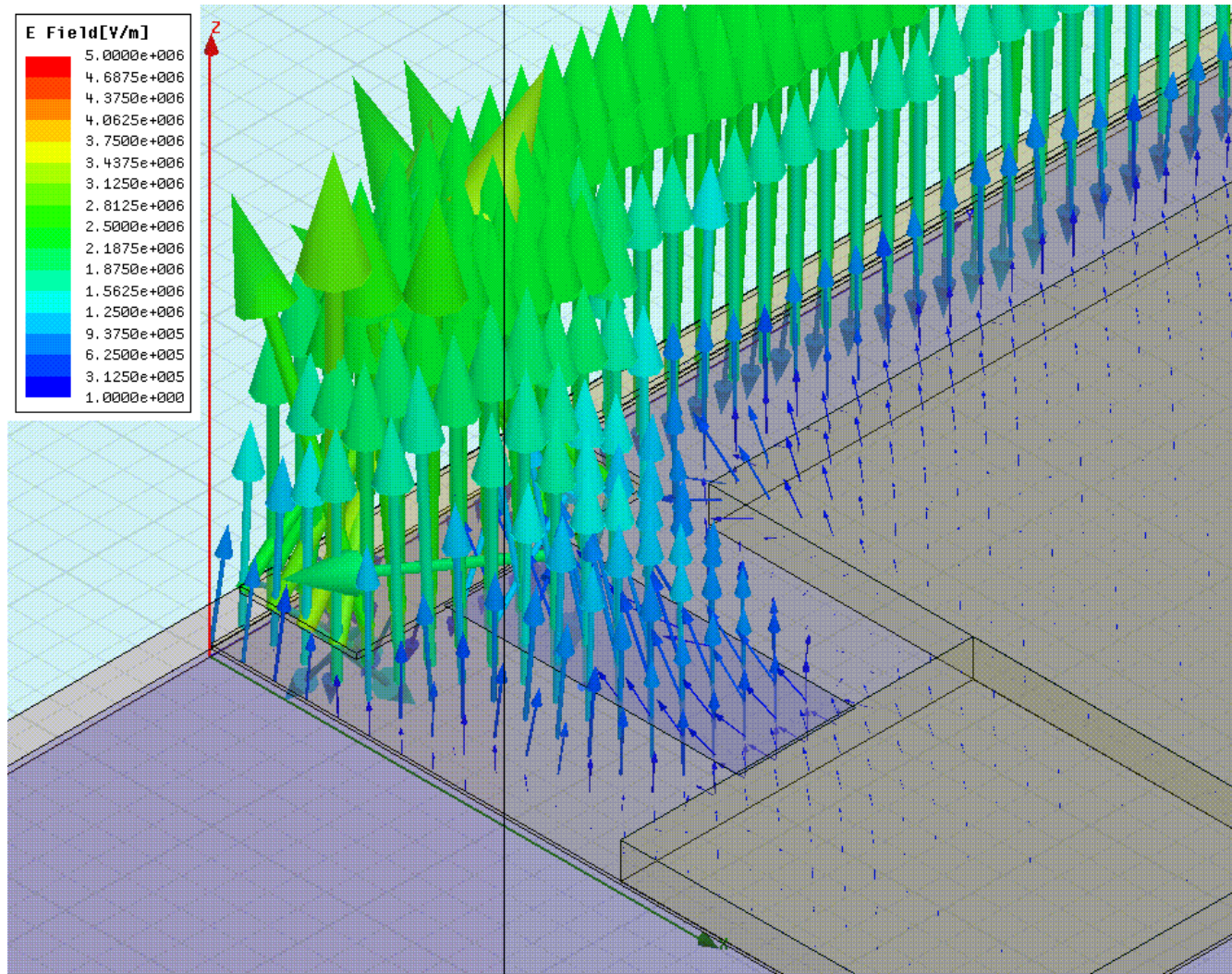


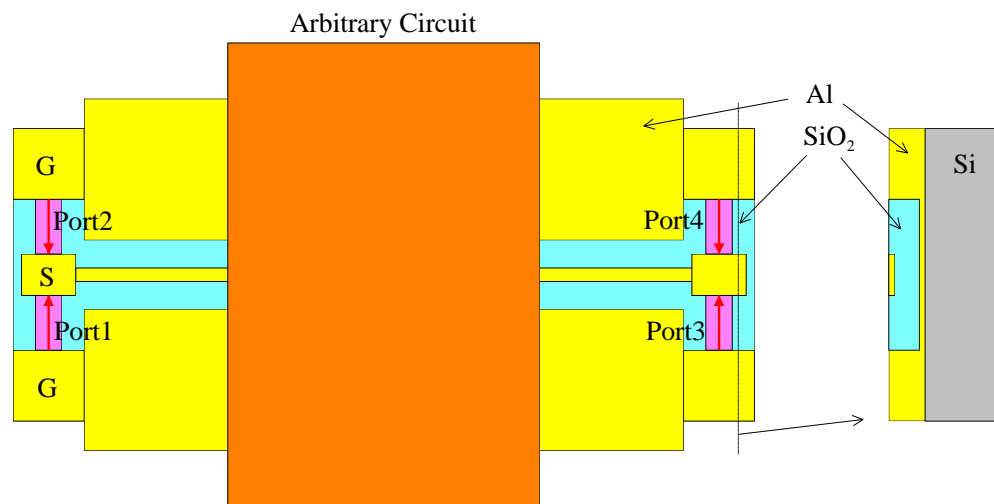




E-Field Animation







$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \cdots \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \cdots \\ a_3 \\ a_4 \end{bmatrix}$$

プローブ部の導波路はシングルモードなので、次の条件が成り立つ

$$a_1 = a_2 = a'_1 \quad a_3 = a_4 = a'_2$$

$$b_1 = b_2 = b'_1 \quad b_3 = b_4 = b'_2$$

$$\begin{bmatrix} b'_1 \\ b'_1 \\ b'_2 \\ b'_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a'_1 \\ a'_1 \\ a'_2 \\ a'_2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} b'_1 = (S_{11} + S_{12})a'_1 + (S_{13} + S_{14})a'_2 \\ b'_1 = (S_{21} + S_{22})a'_1 + (S_{23} + S_{24})a'_2 \\ b'_2 = (S_{31} + S_{32})a'_1 + (S_{33} + S_{34})a'_2 \\ b'_2 = (S_{41} + S_{42})a'_1 + (S_{43} + S_{44})a'_2 \end{cases}$$

パッド部の構造の対称性より、

$$S_{11} = S_{22} \quad S_{12} = S_{21} \quad S_{13} = S_{14} = S_{23} = S_{24}$$

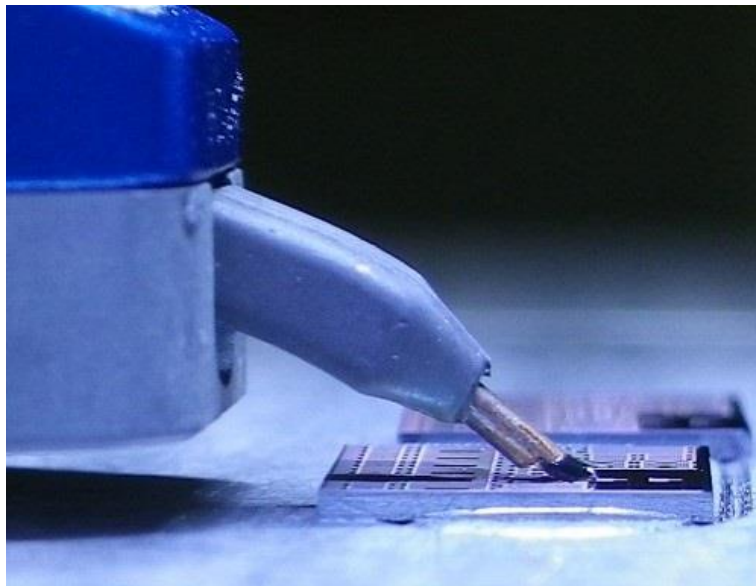
$$S_{31} = S_{32} = S_{41} = S_{42} \quad S_{33} = S_{44} \quad S_{34} = S_{43}$$

$$\begin{bmatrix} S'_{11} & S'_{12} \\ S'_{21} & S'_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} + S_{12} & S_{13} + S_{14} \\ S_{31} + S_{32} & S_{33} + S_{34} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}$$

プローブ部の導波路はシングルモードなので、次の条件が成り立つ

$$a_1 = a_2 = a$$



$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ a \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} b_1 = (S_{11} + S_{12})a \\ b_2 = (S_{21} + S_{22})a \end{cases}$$

単モードとパッド部の構造の対称性より、

$$S_{11} = S_{22} \quad S_{12} = S_{21}$$

$$b_1 = b_2 (= b)$$

反射係数

$$\Gamma = \frac{b}{a} = S_{11} + S_{12} = S_{21} + S_{22}$$

2 Lumped Portから差動GSSG 1ポートへの変換 ⁵⁶

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}$$

プローブ部の導波路はシングルモードなので、次の条件が成り立つ

$$a_1 = -a_2 = a$$

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ -a \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} b_1 = (S_{11} - S_{12})a \\ b_2 = (S_{21} - S_{22})a \end{cases}$$

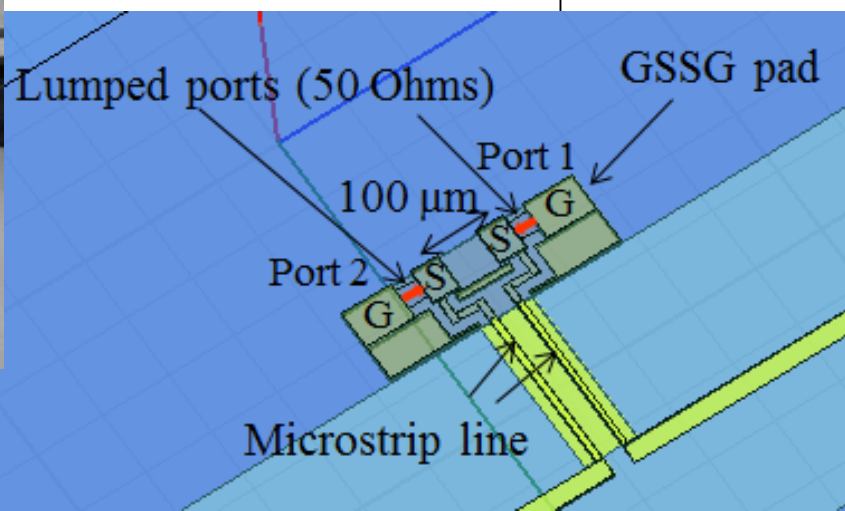
単モードとパッド部の構造の対称性より、

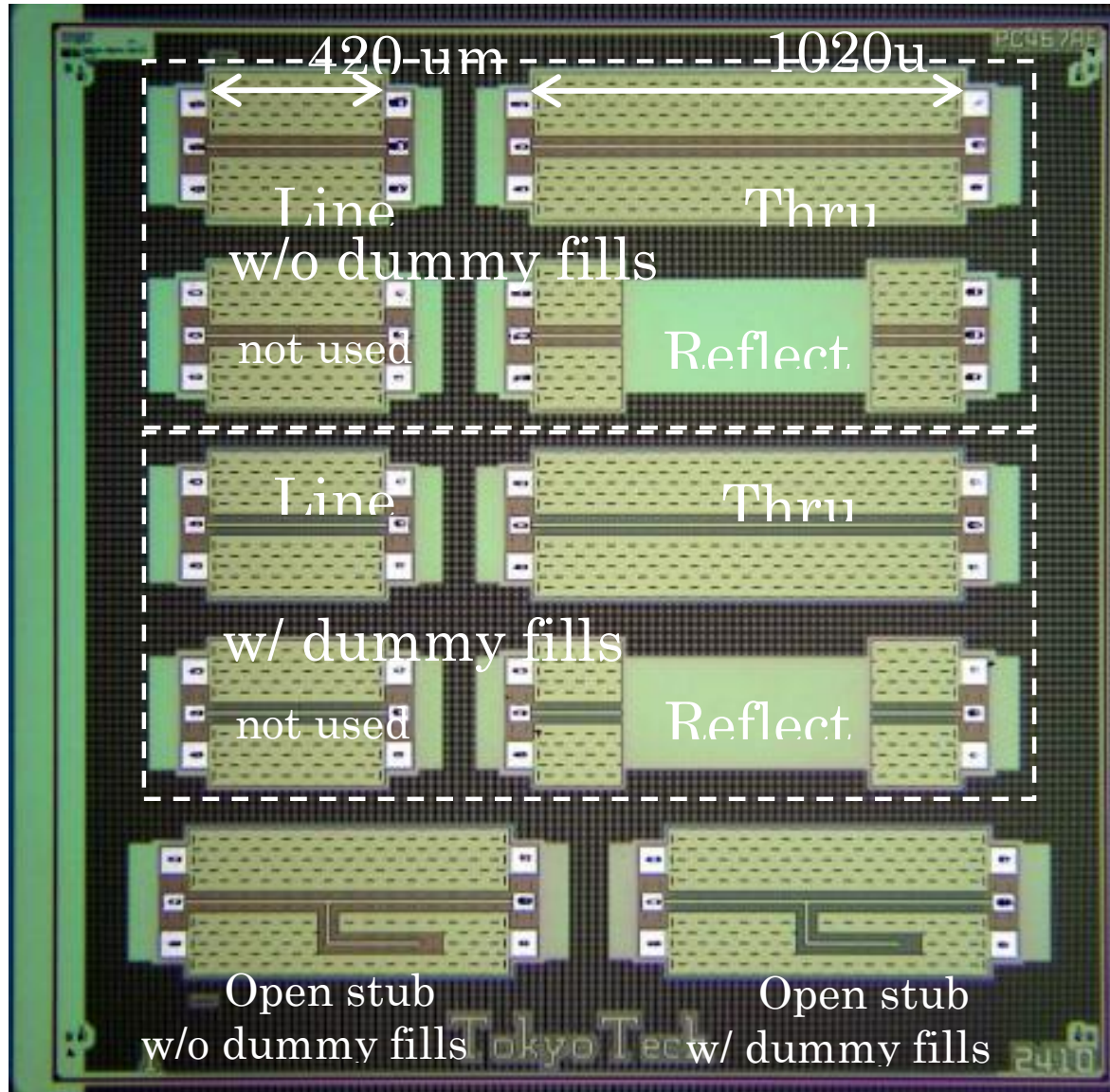
$$S_{11} = S_{22} \quad S_{12} = S_{21}$$

$$b_1 = -b_2 (= b)$$

反射係数

$$\begin{aligned} \Gamma &= \frac{b}{a} = S_{11} - S_{12} \\ &= S_{22} - S_{21} \end{aligned}$$

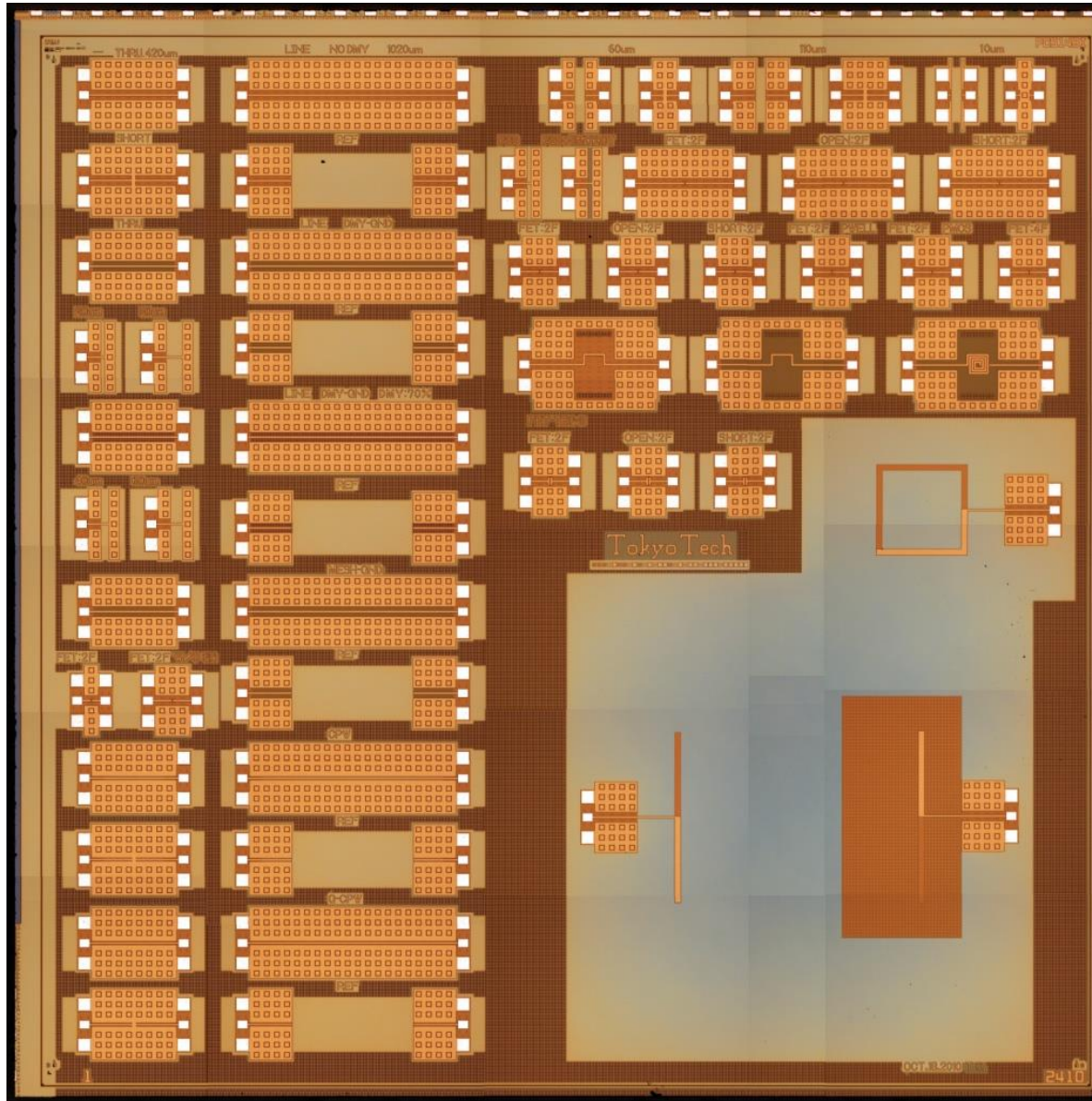




2.5 mm x 2.5 mm
CMOS 0.18 μm

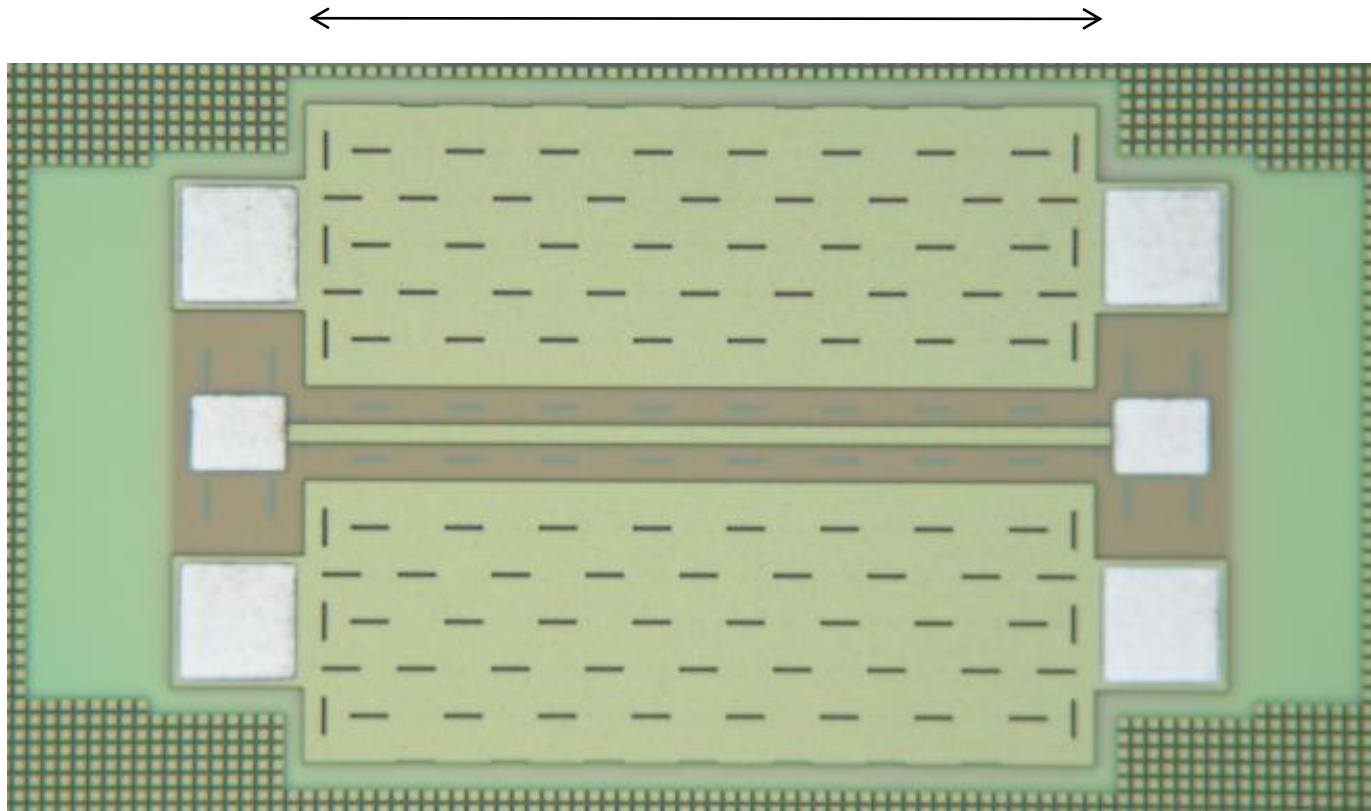
チップ写真2

No. 58

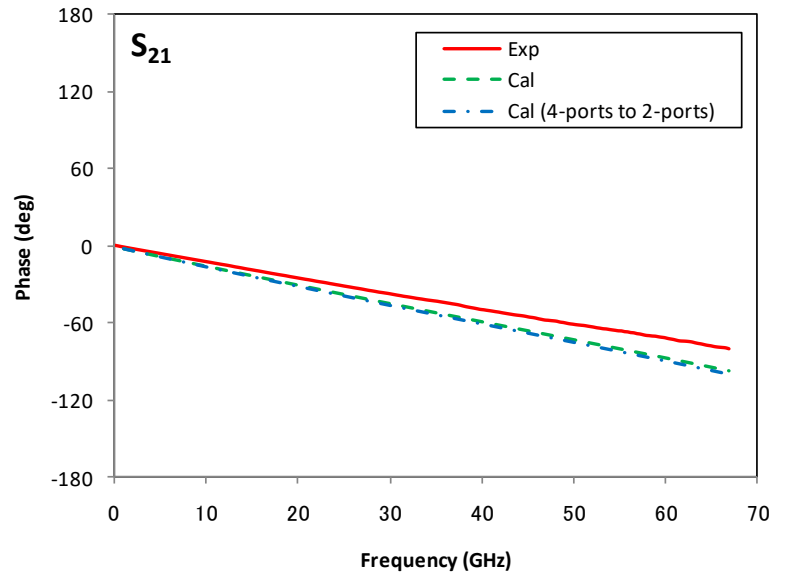
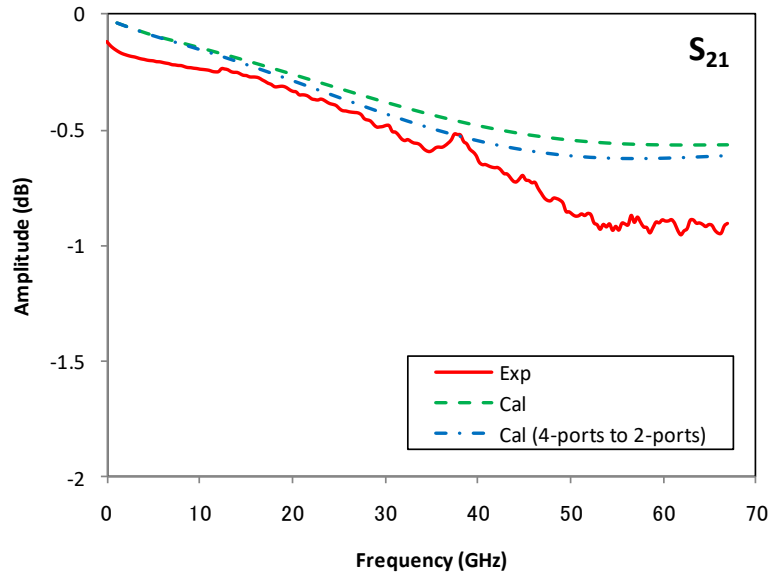
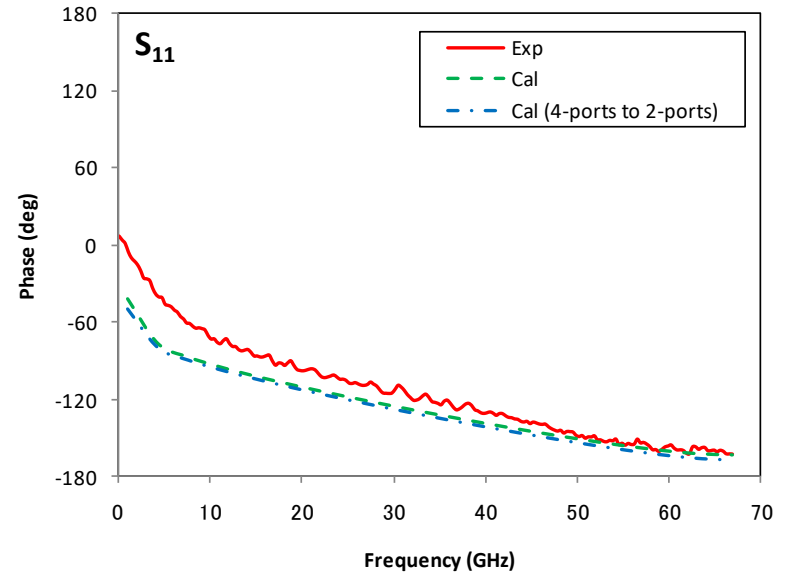
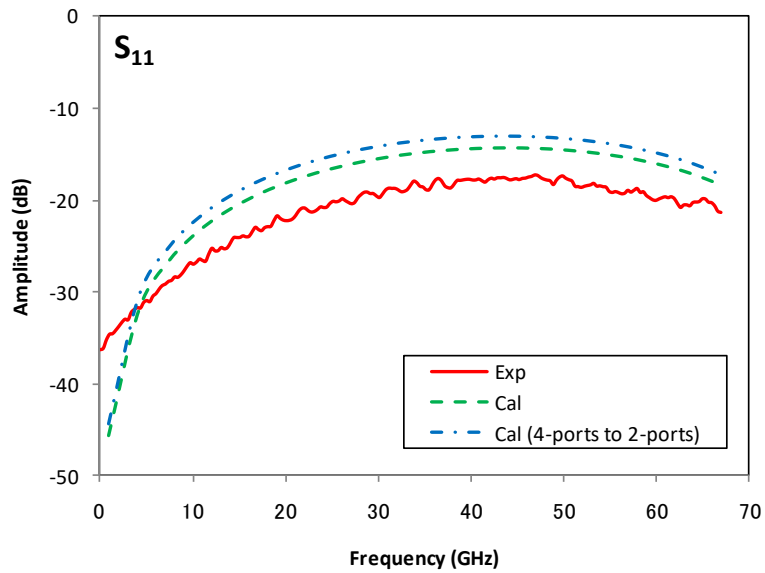


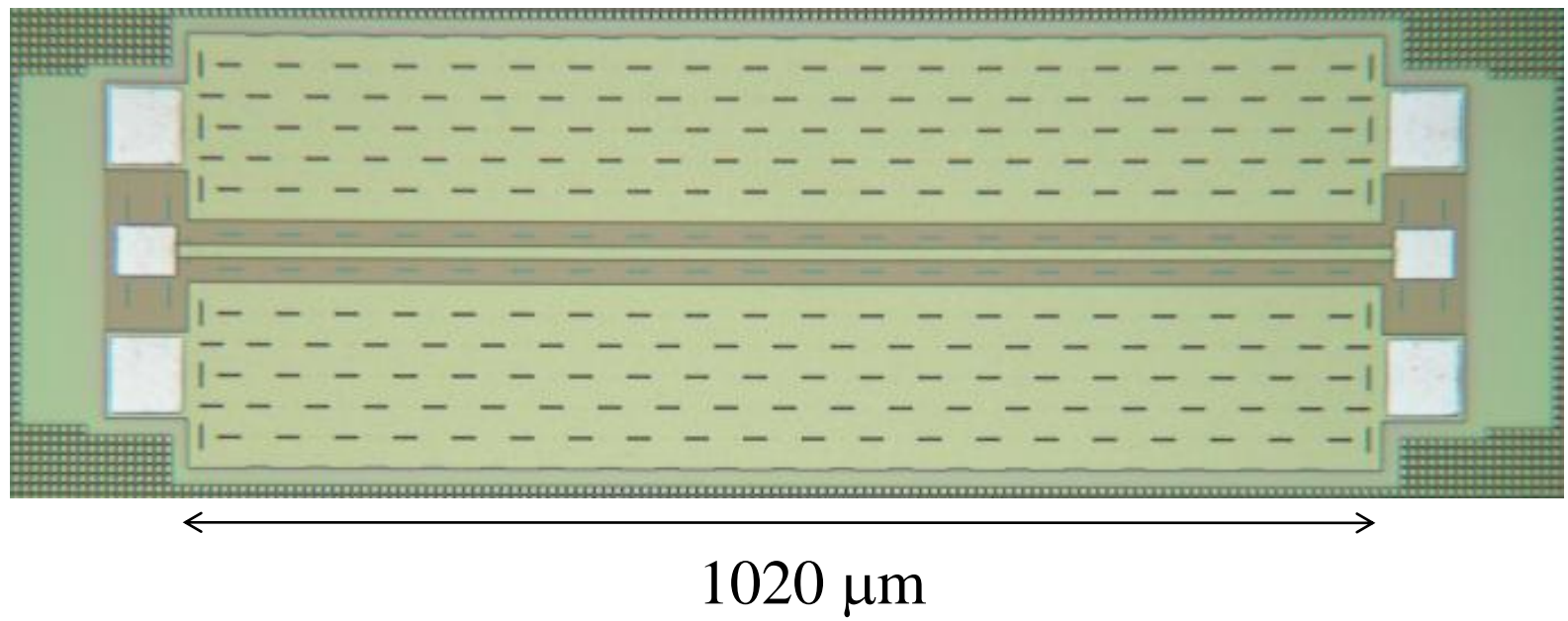
5 mm x 5 mm
CMOS 0.18 μm

420 μm

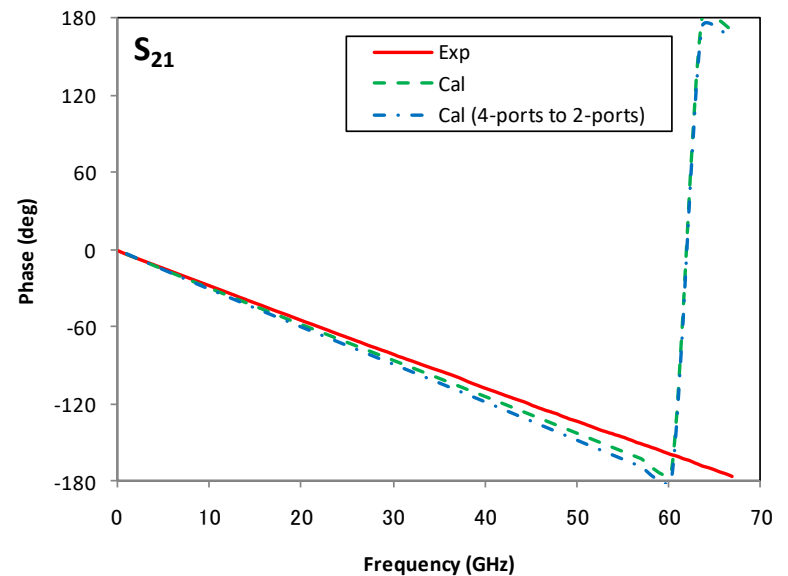
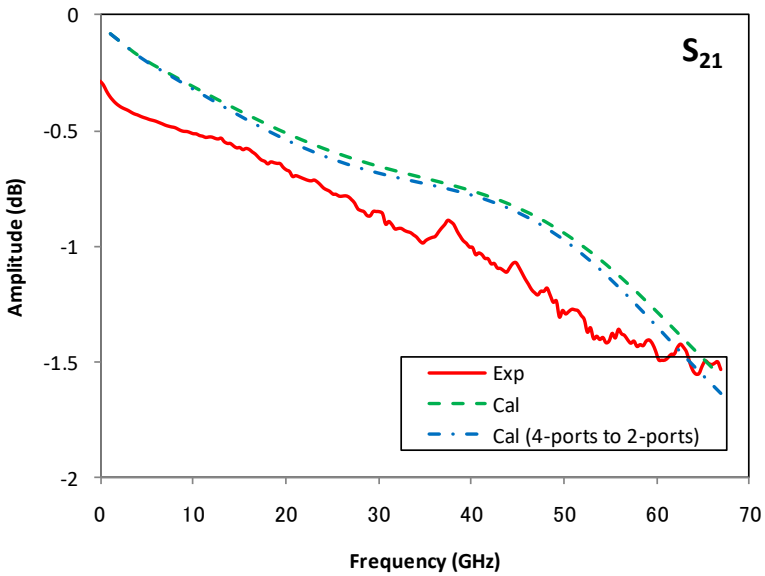
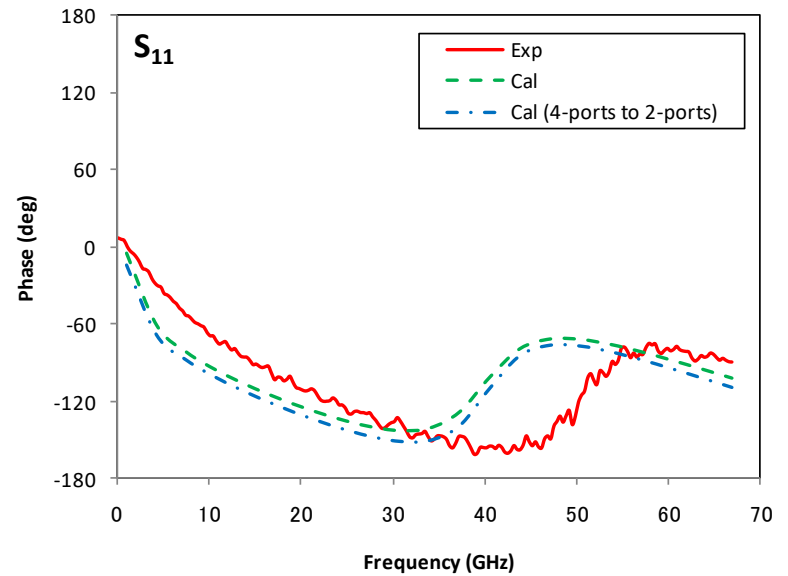
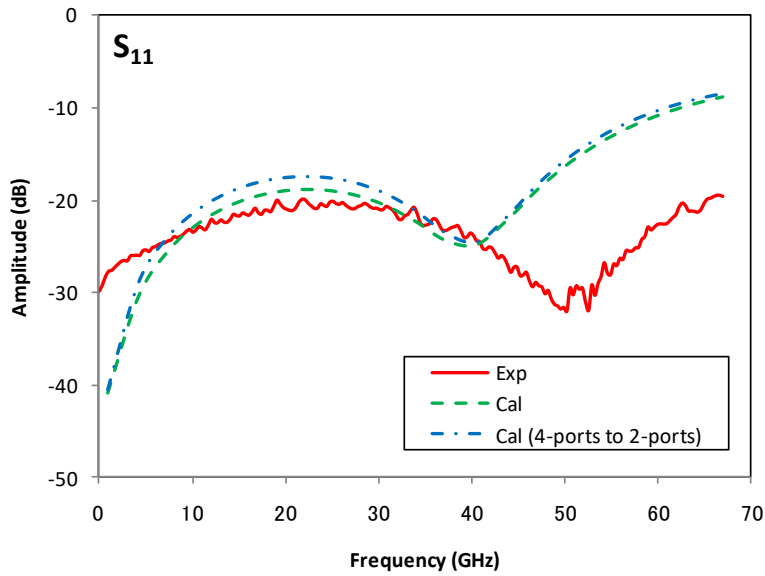


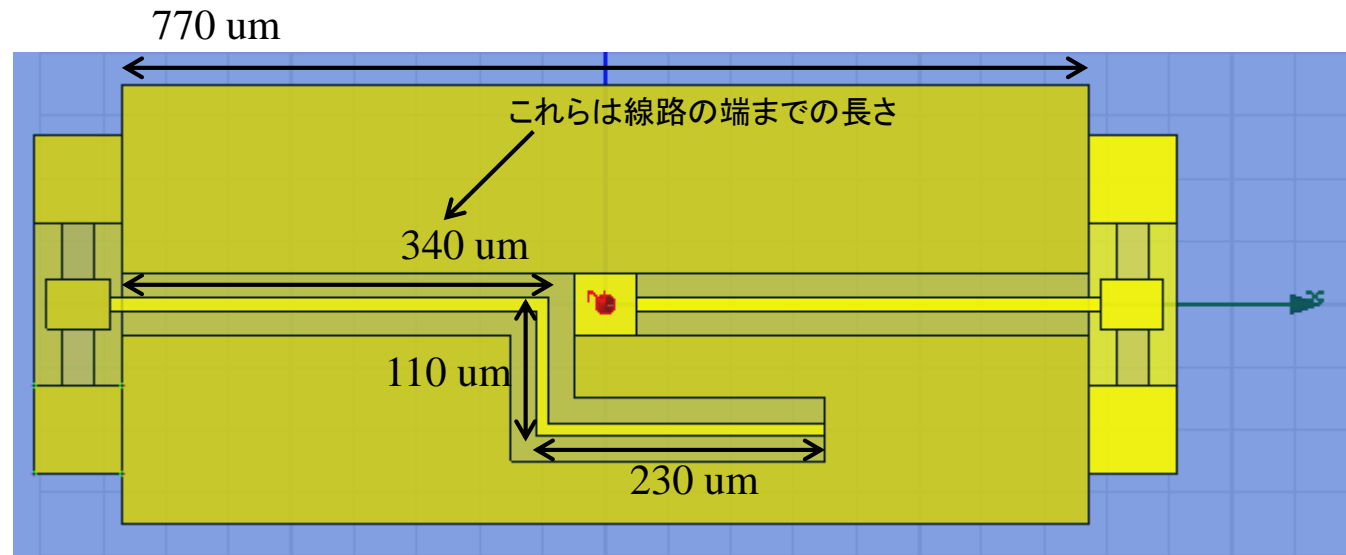
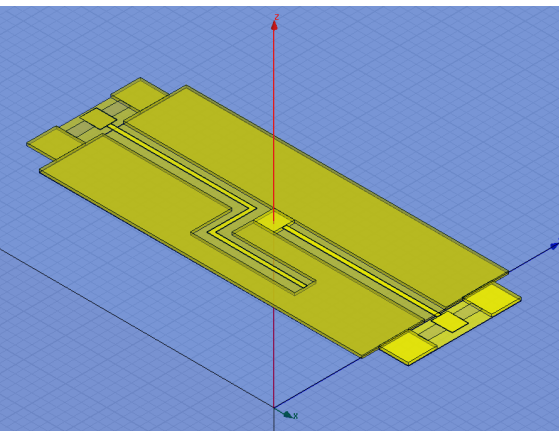
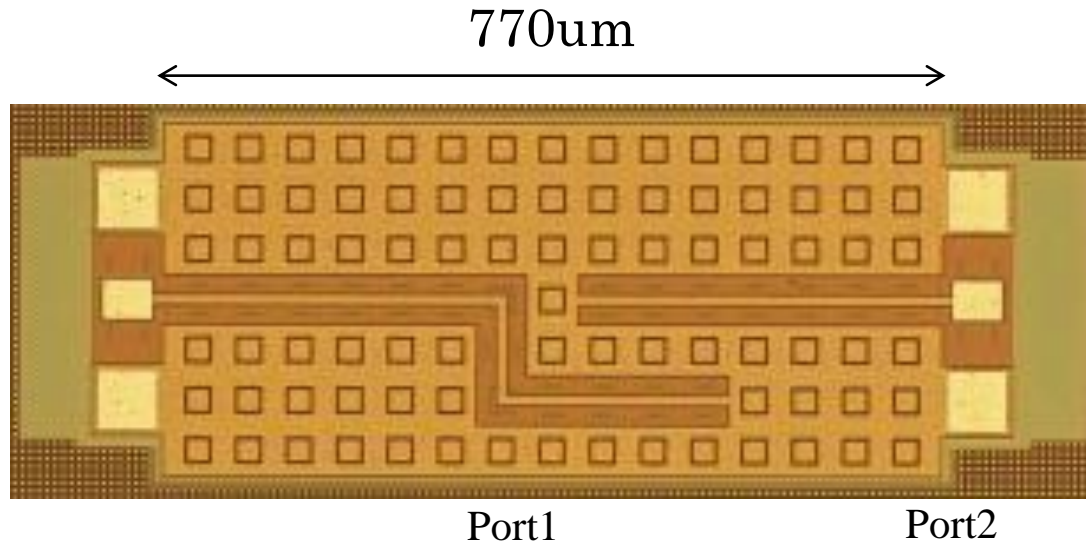
Thruパターン (Sパラメータ)



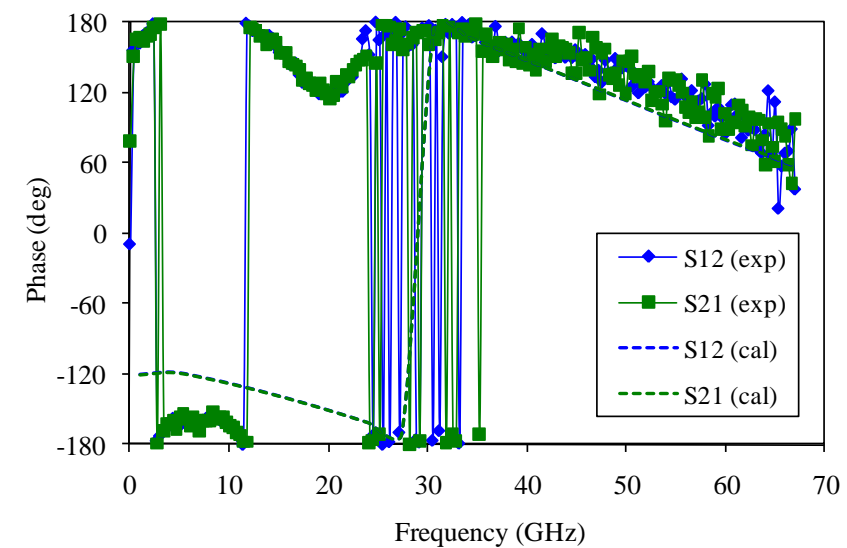
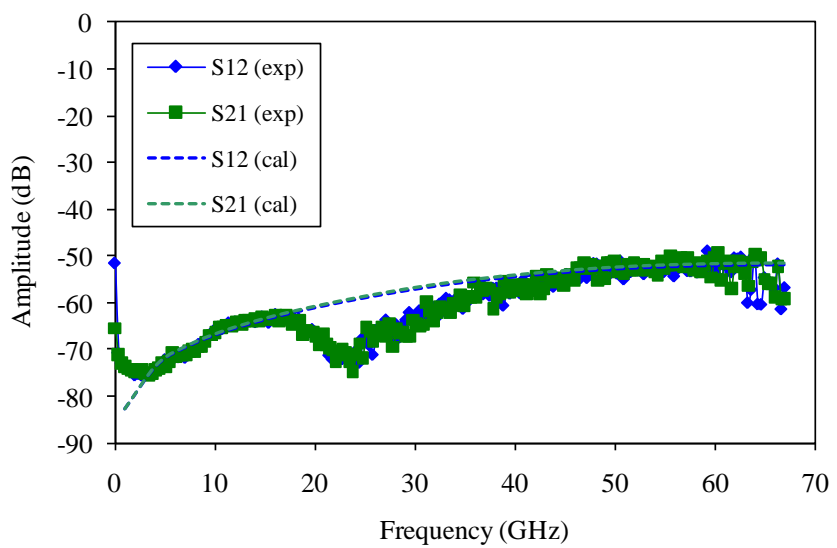
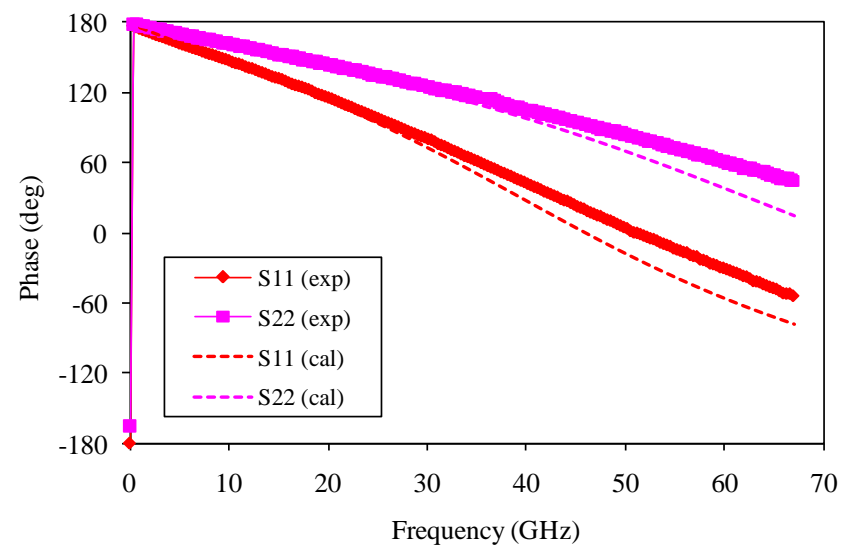
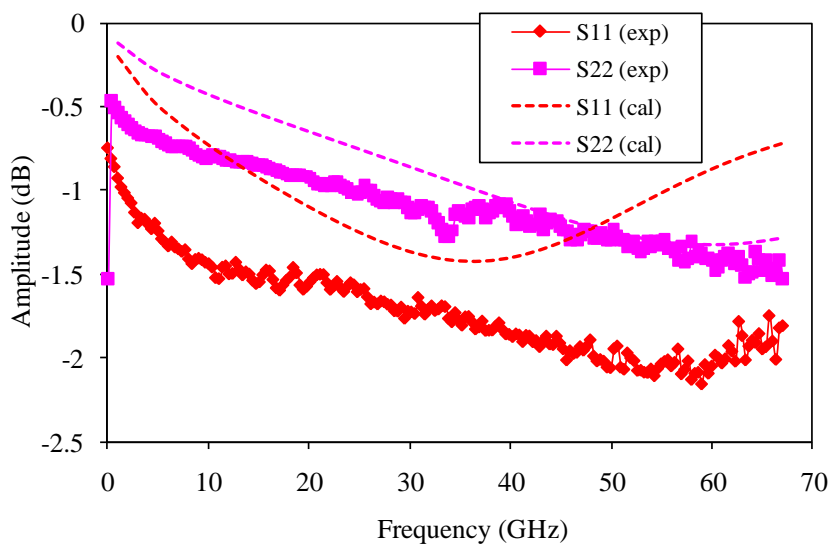


Lineパターン (Sパラメータ)



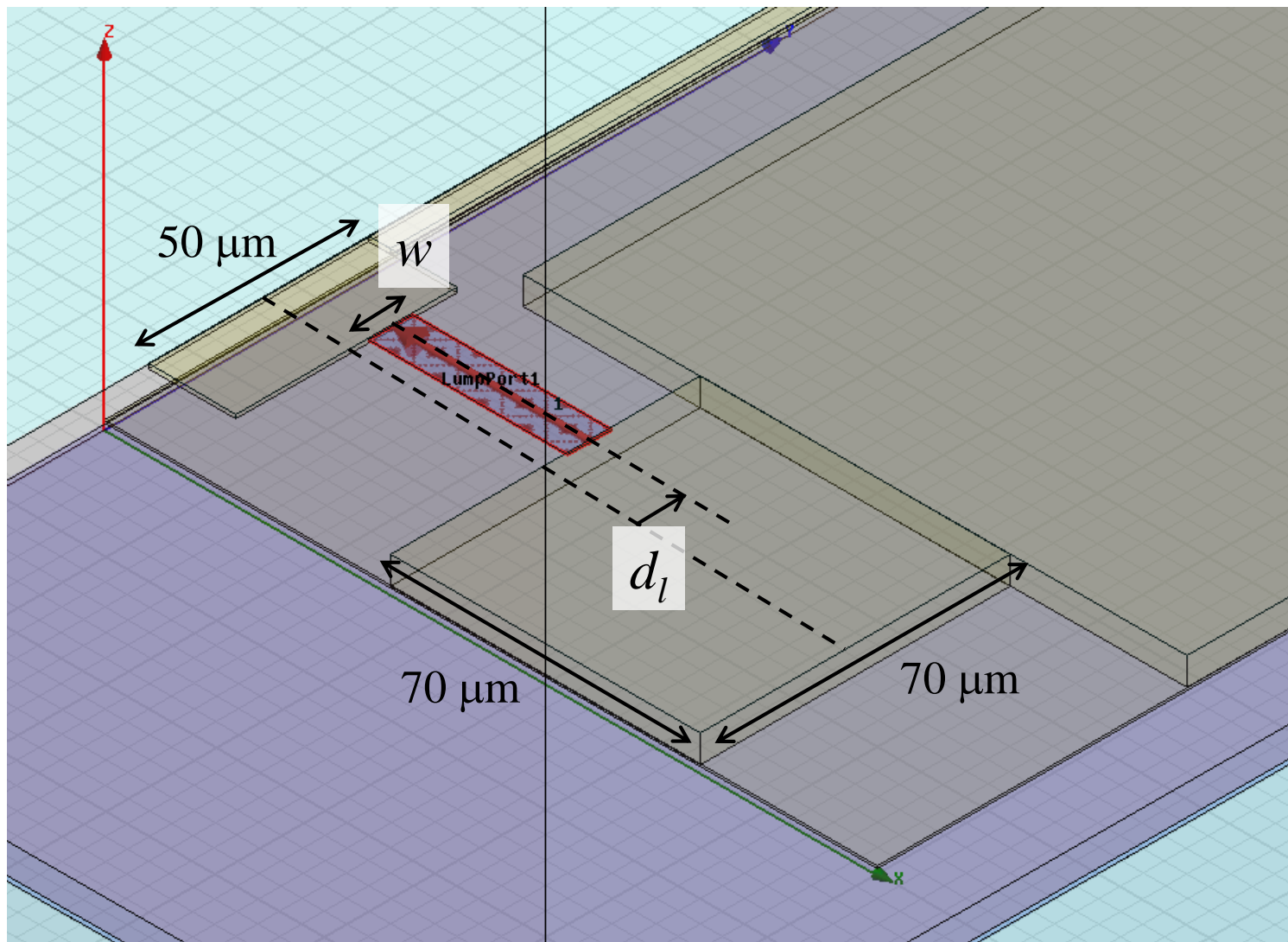


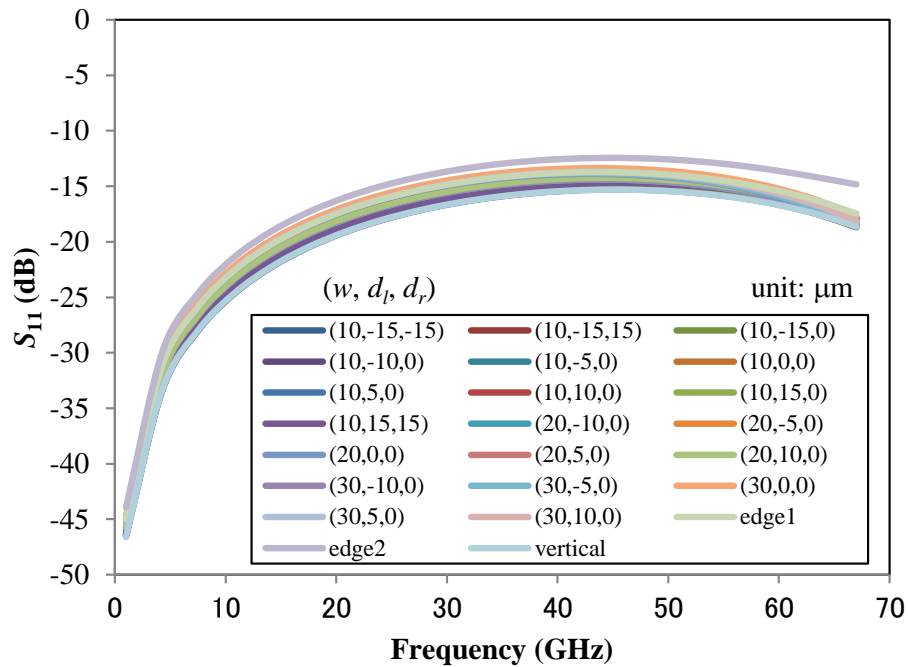
クロストークによる結合量評価パターン(Sパラメータ)



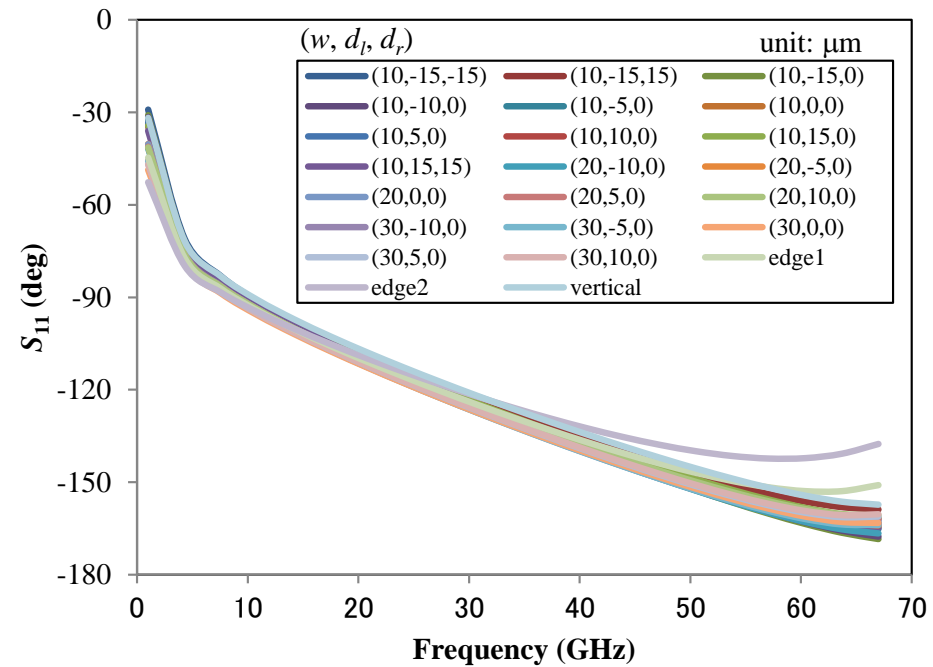
Lumped Portの位置 d_l および幅 w 依存性

No. 65

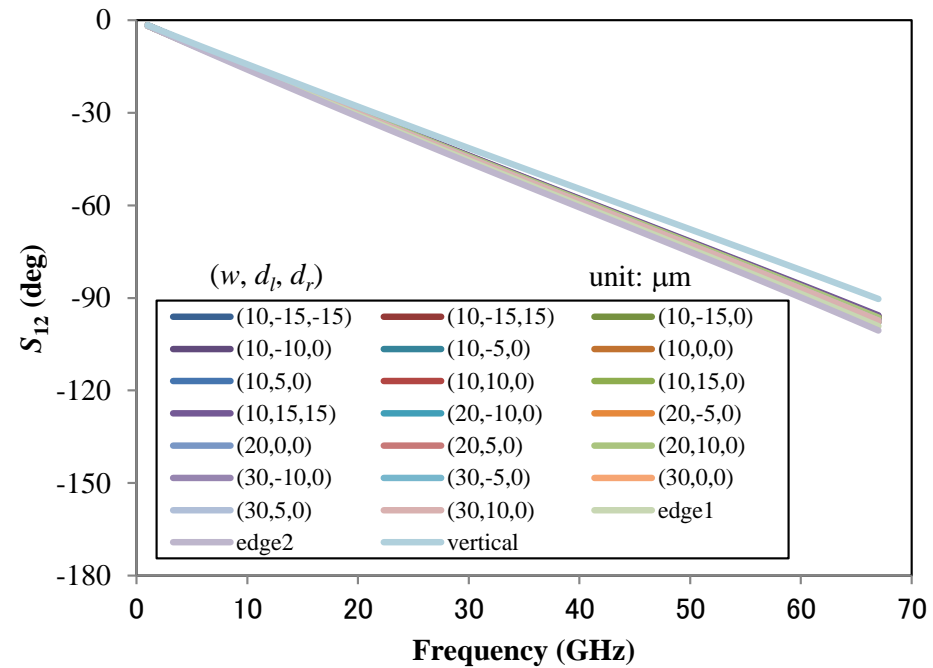
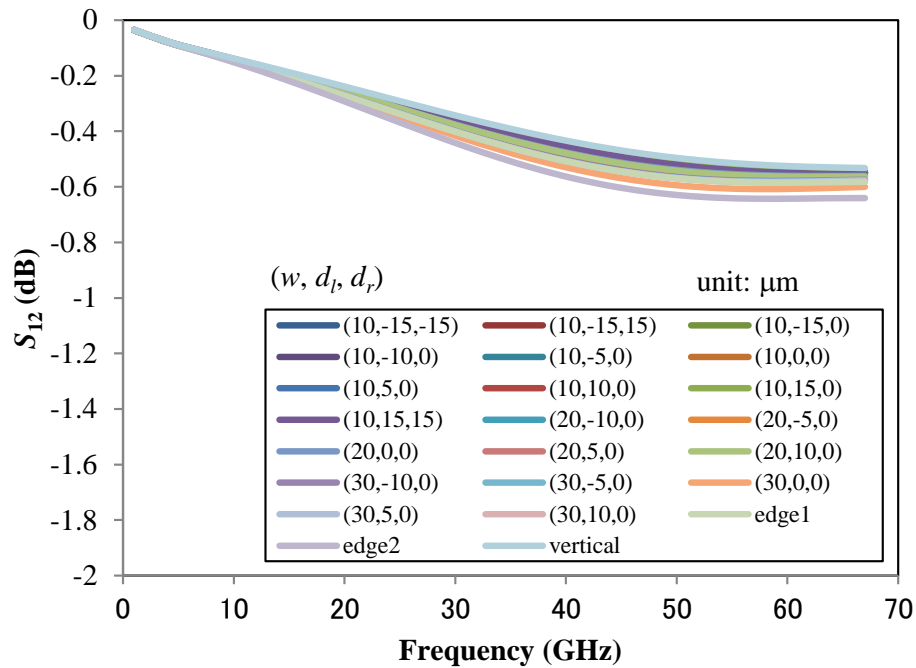




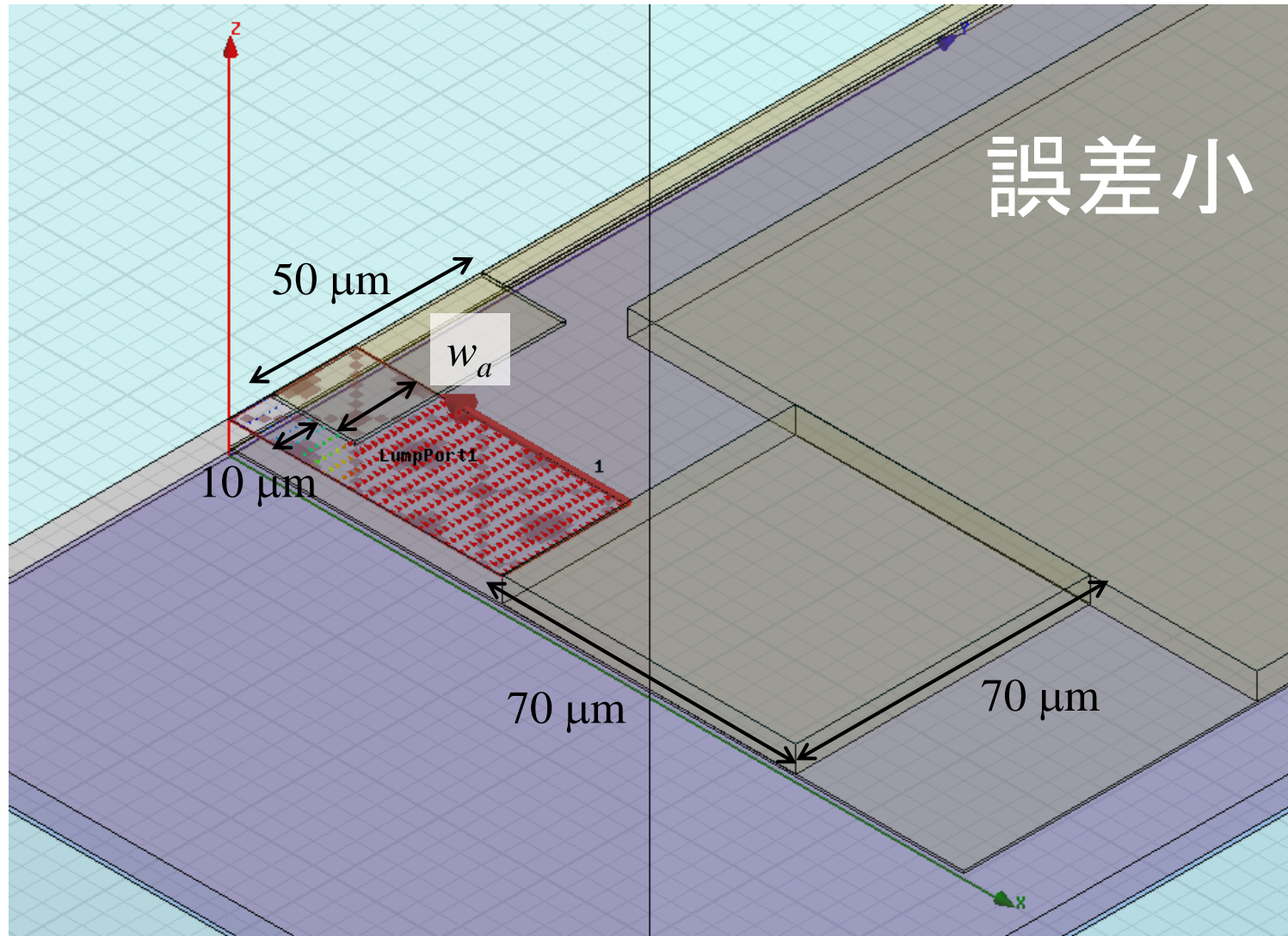
(a) Amplitude

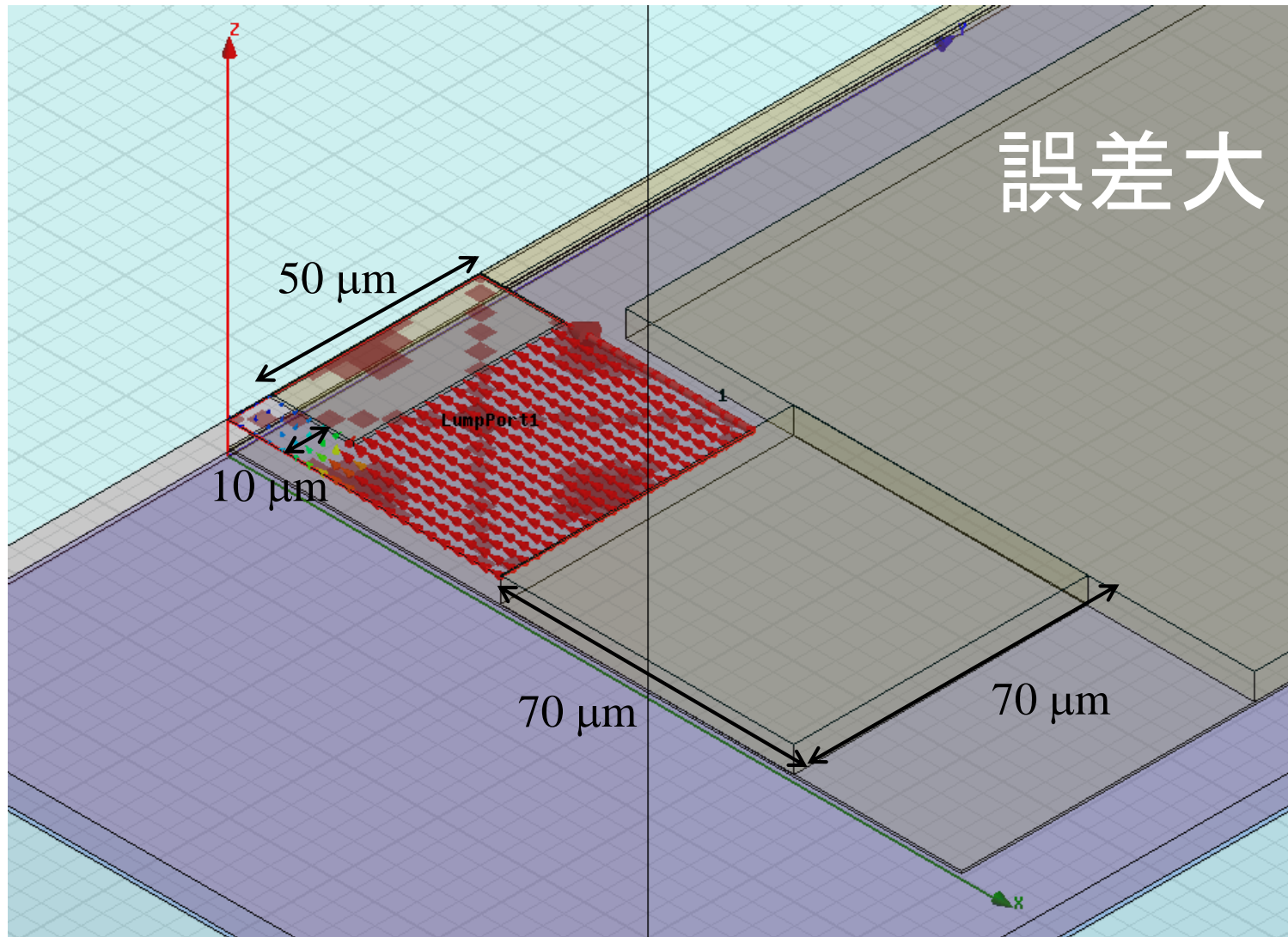


(b) Phase

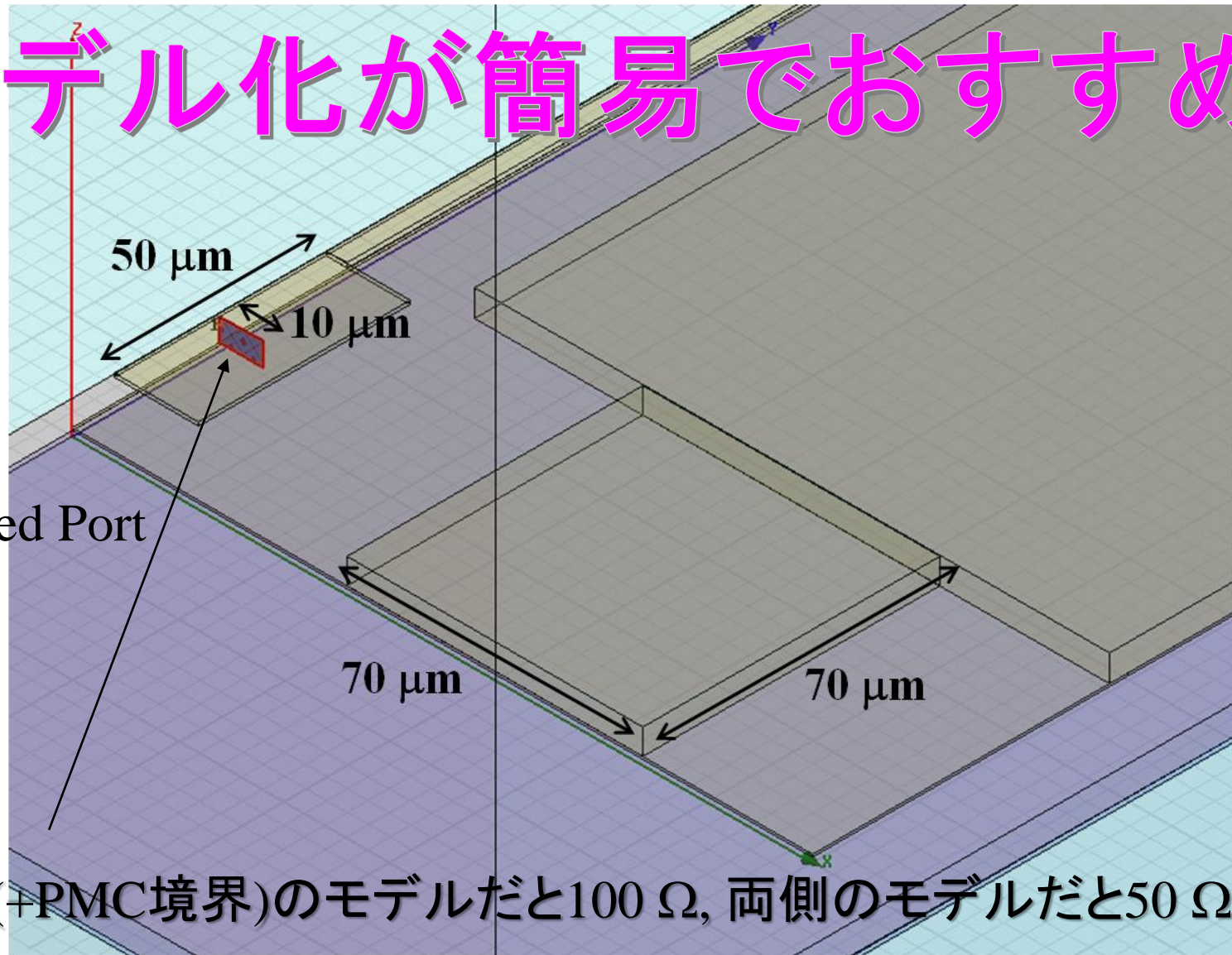


位置ずれおよび幅の影響は小さい

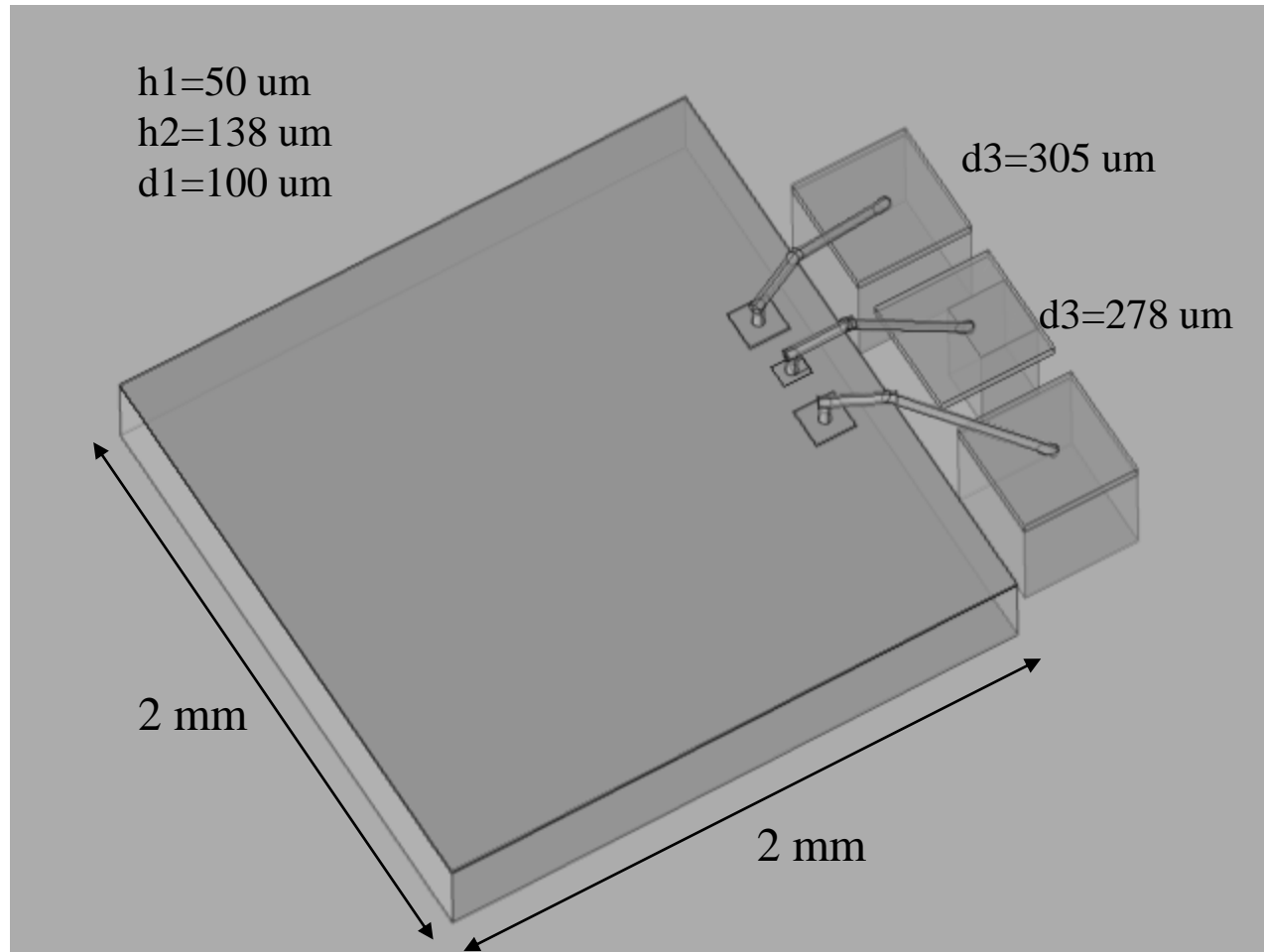




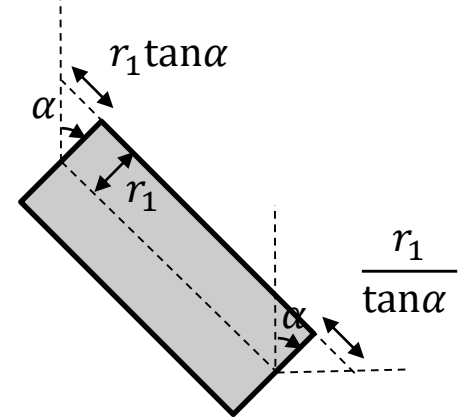
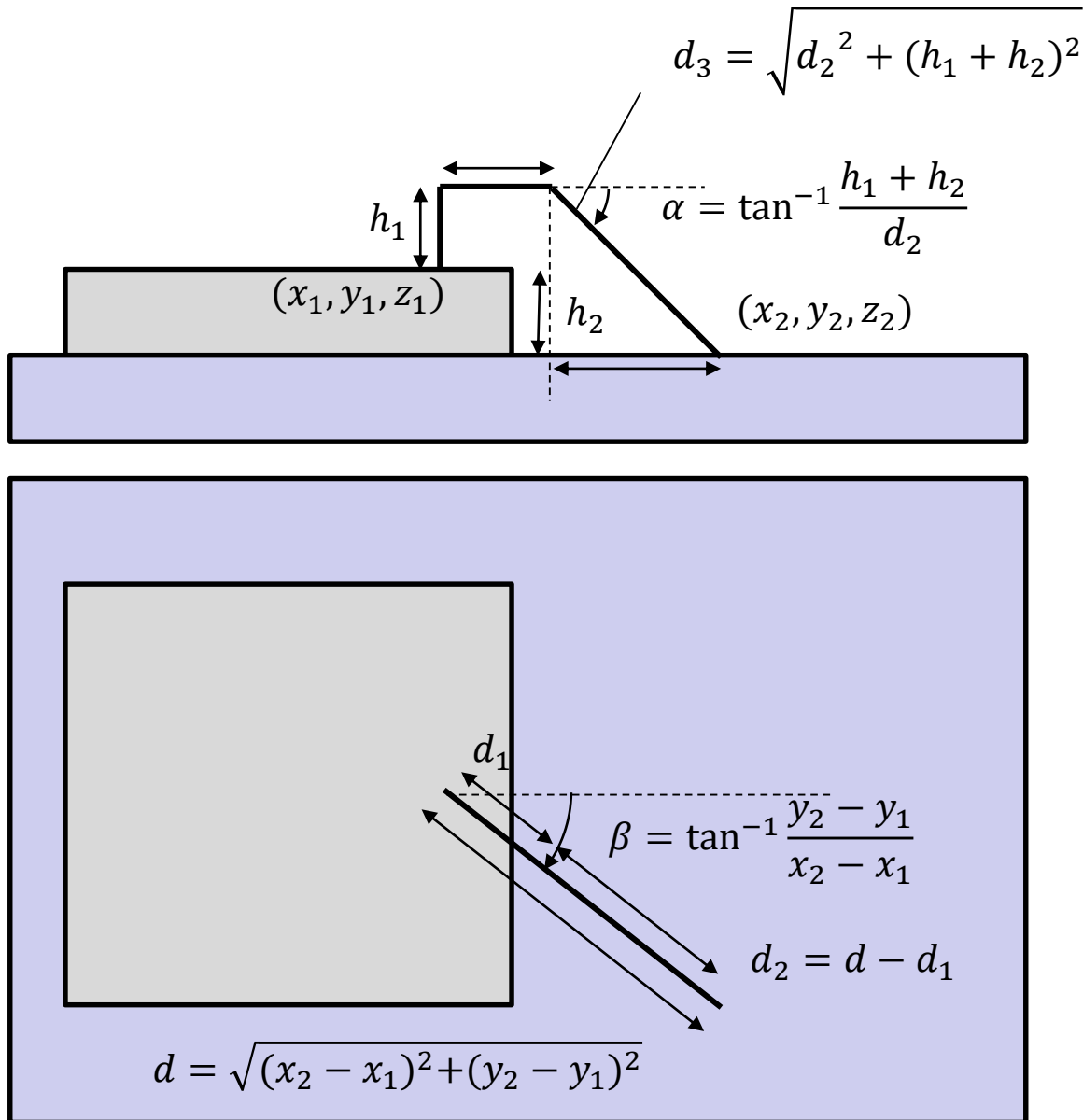
モデル化が簡易でおすすめ！

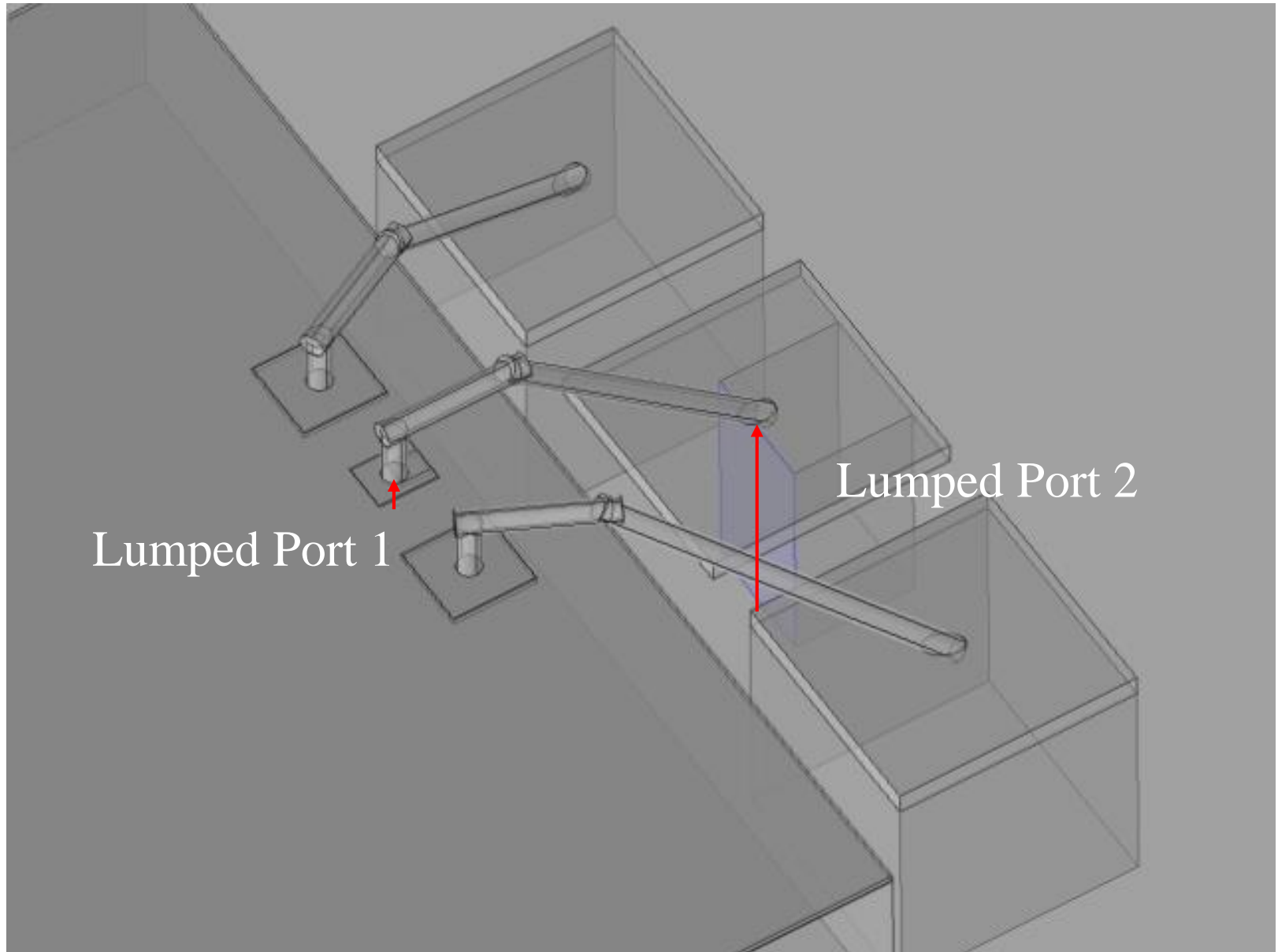


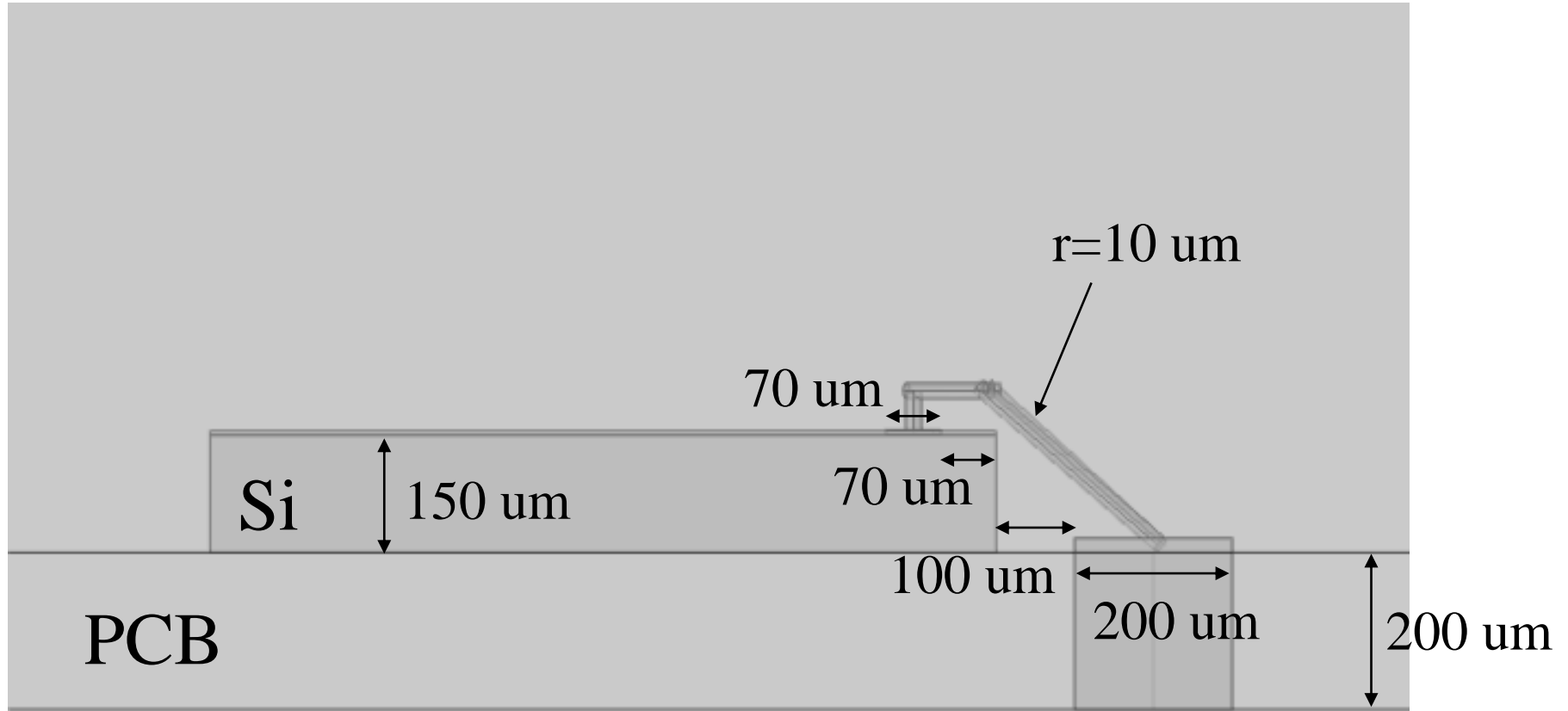
片側(+PMC境界)のモデルだと $100\ \Omega$, 両側のモデルだと $50\ \Omega$



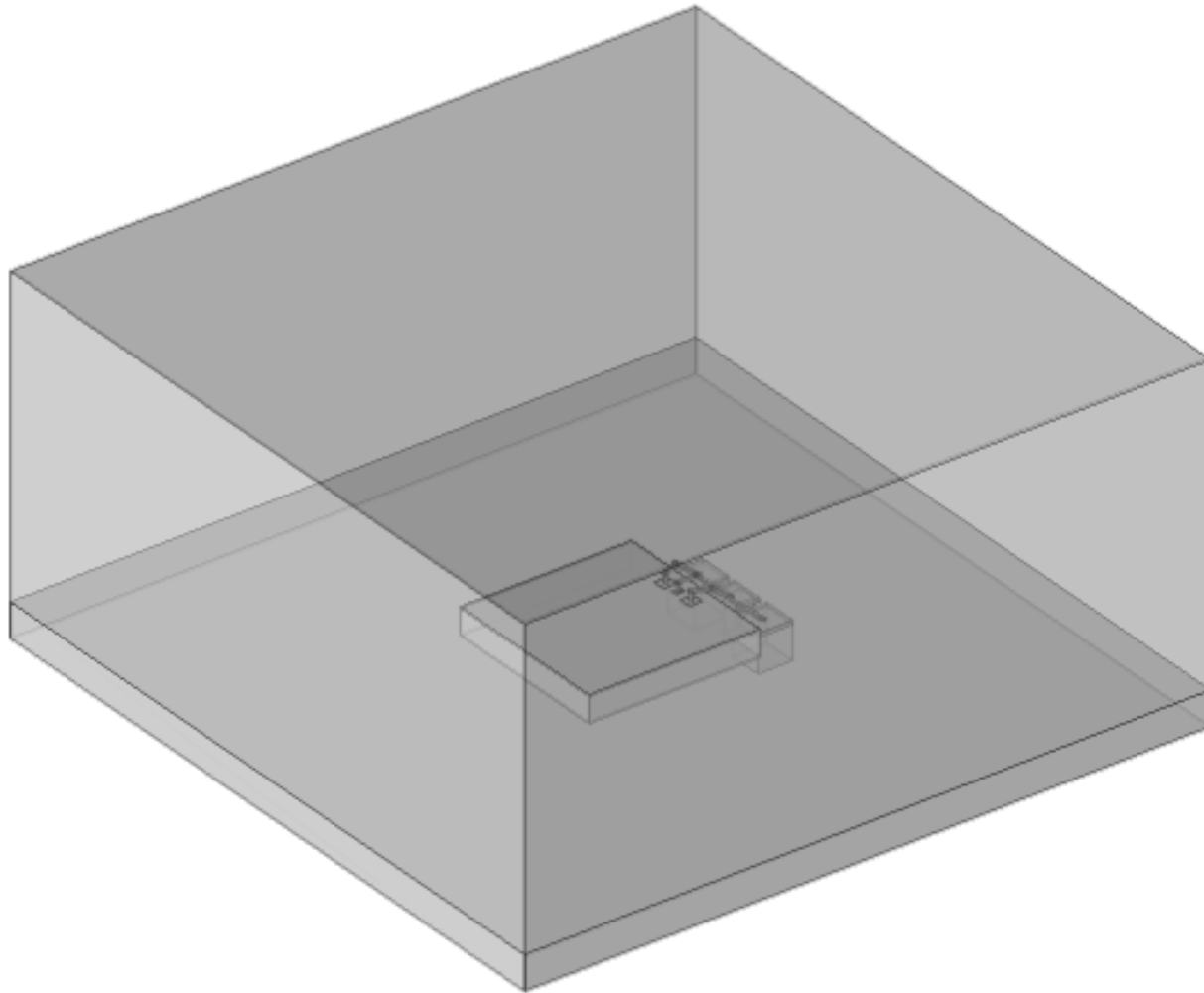
ボンディングワイヤの長さ: 400 um-450 um

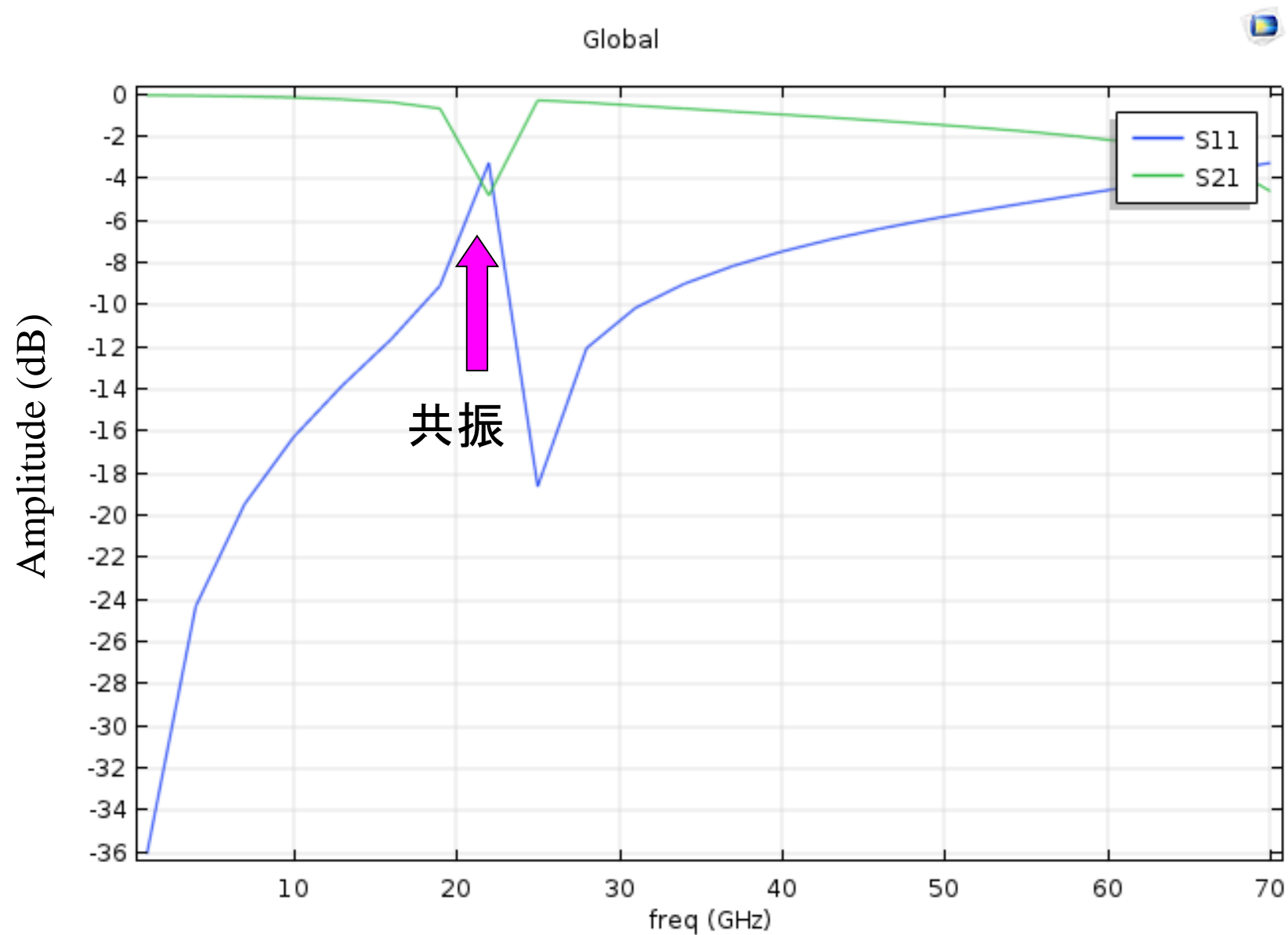


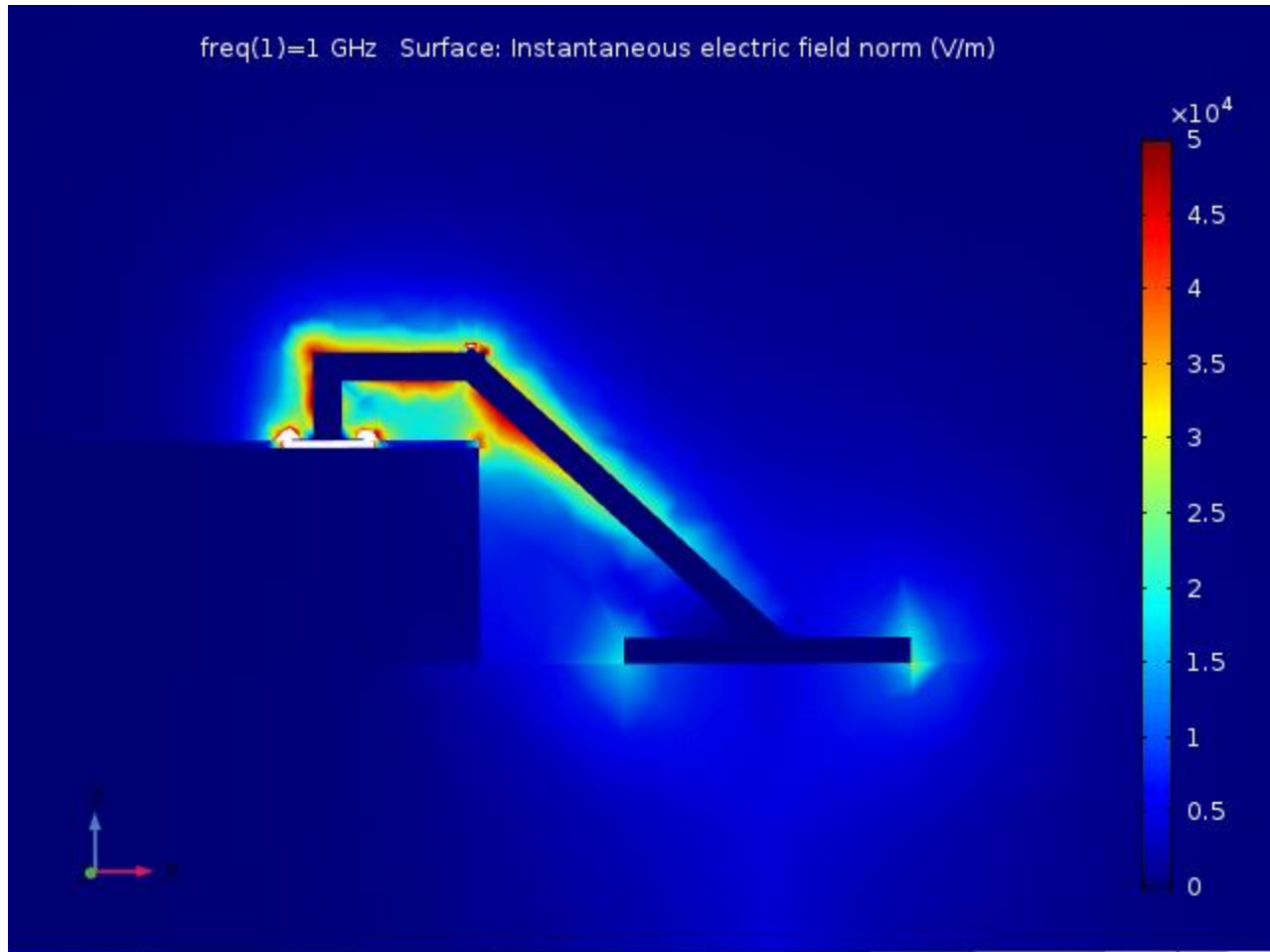


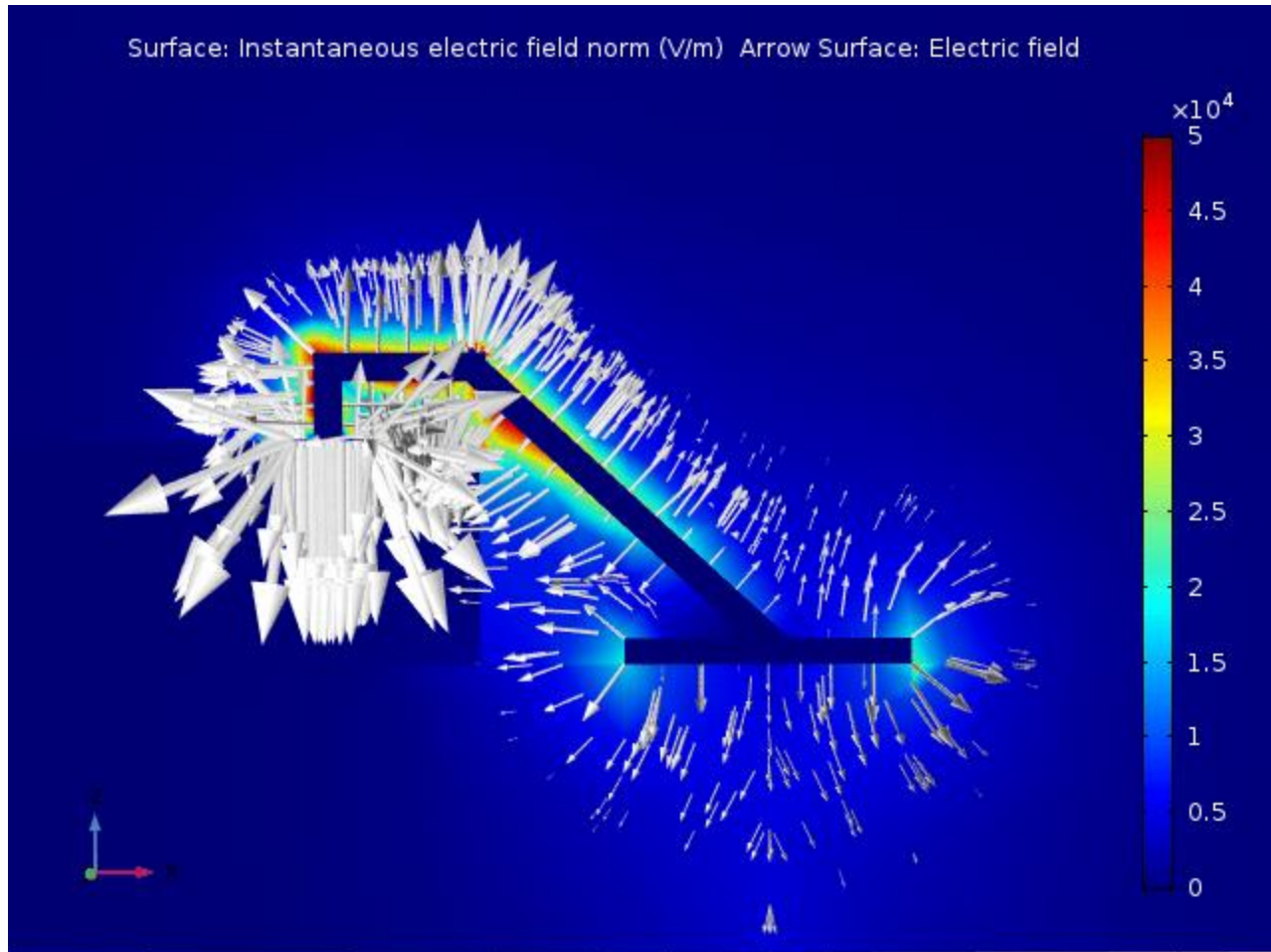


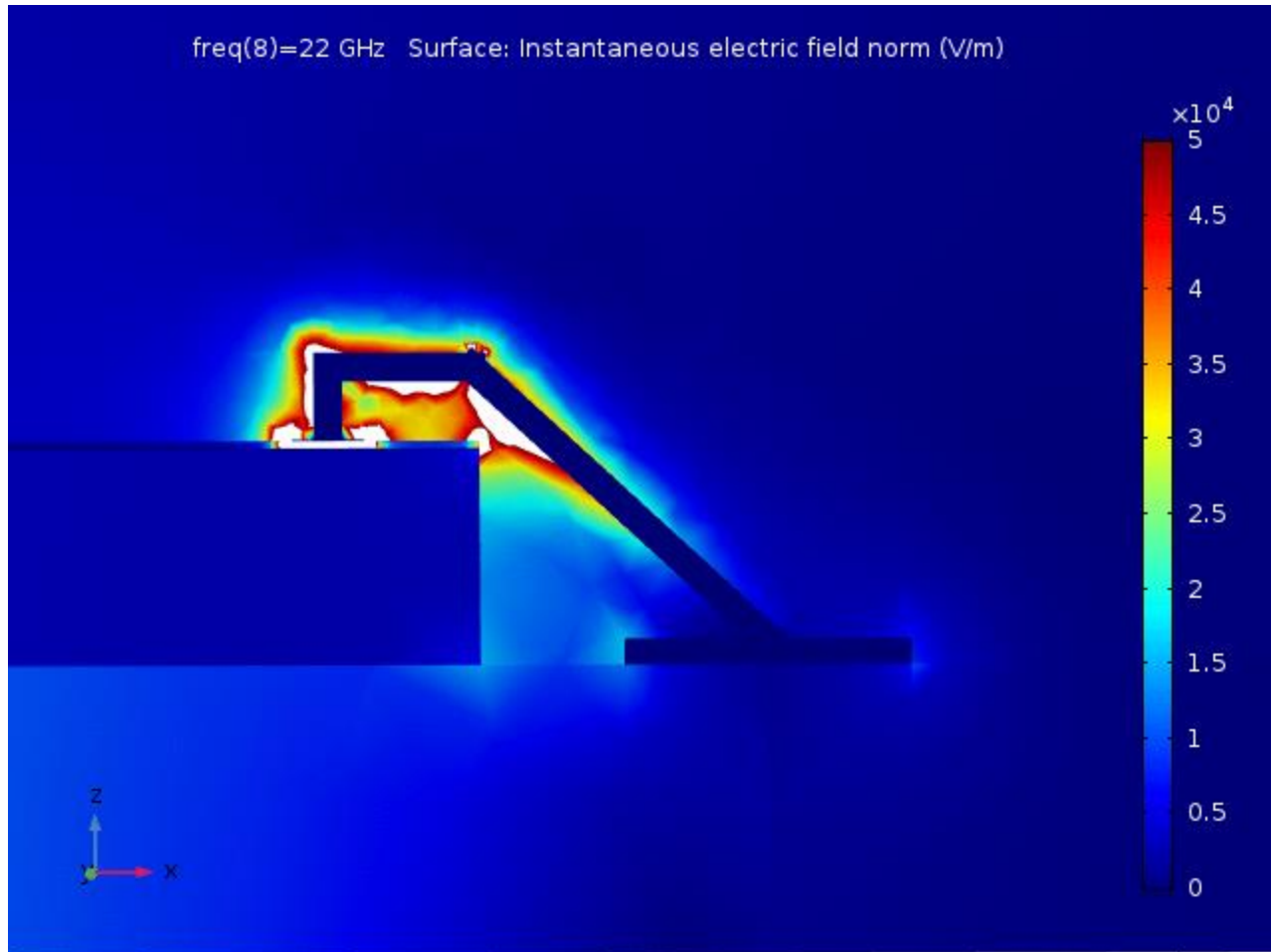
全体解析モデル

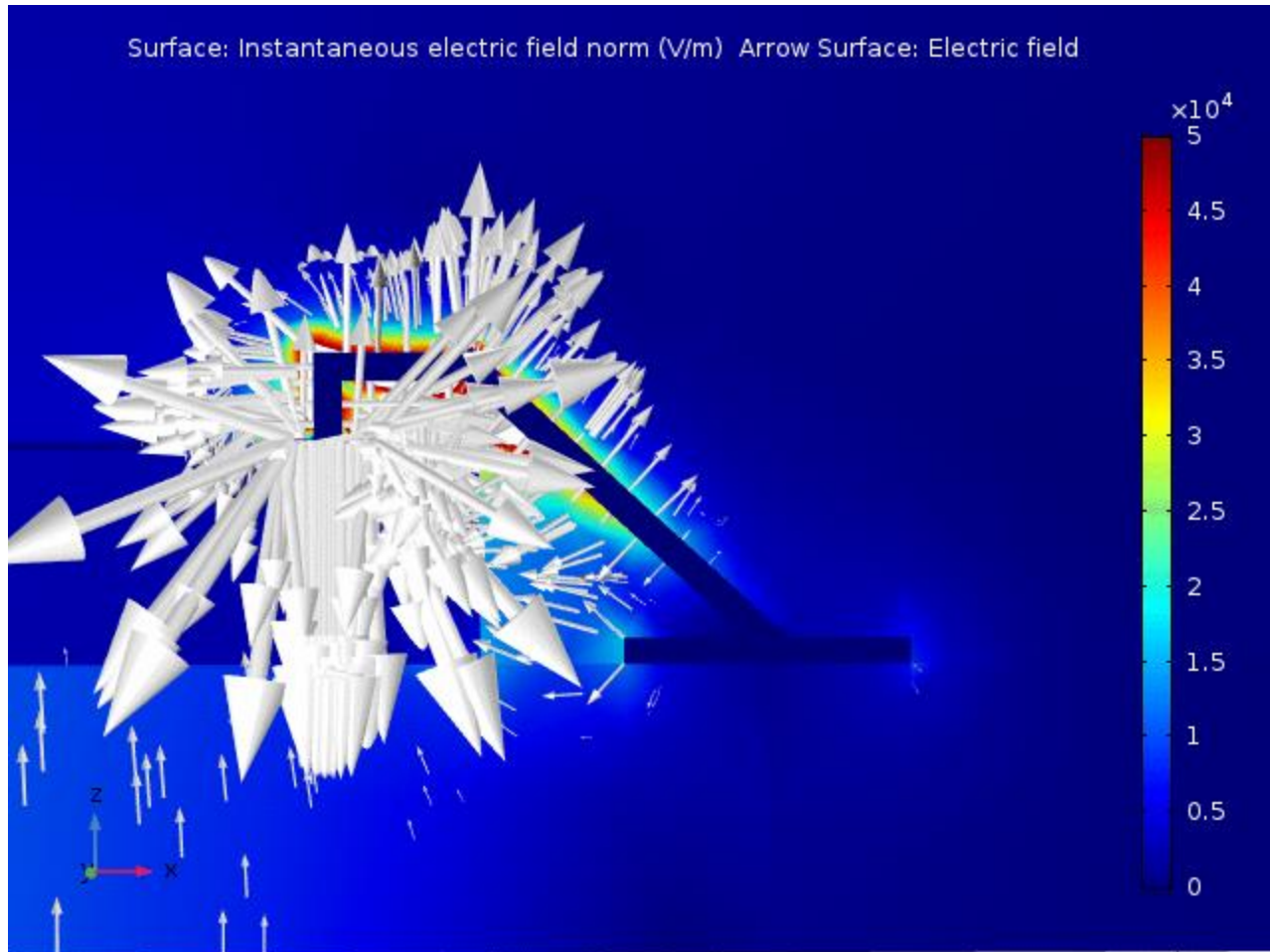


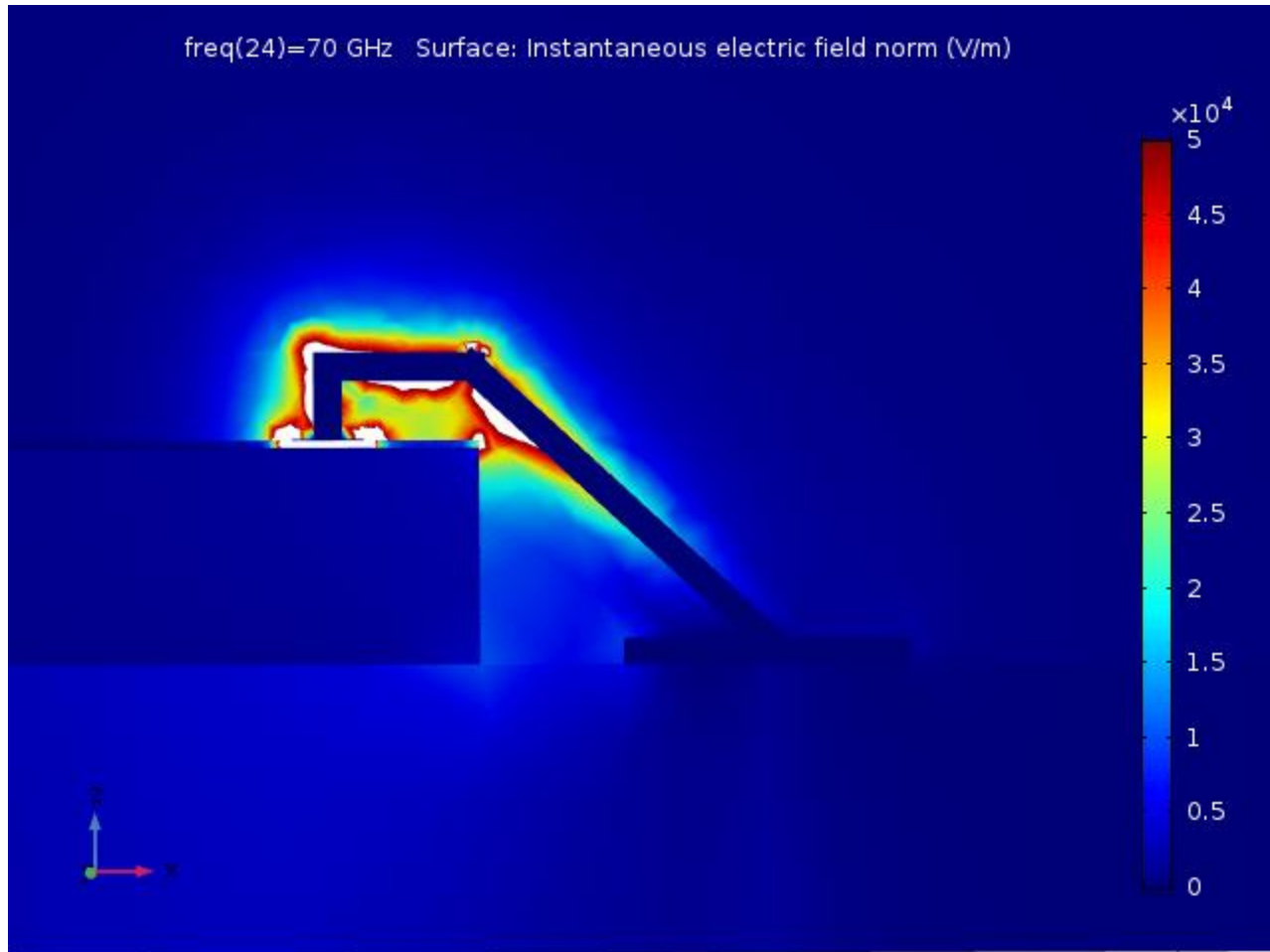


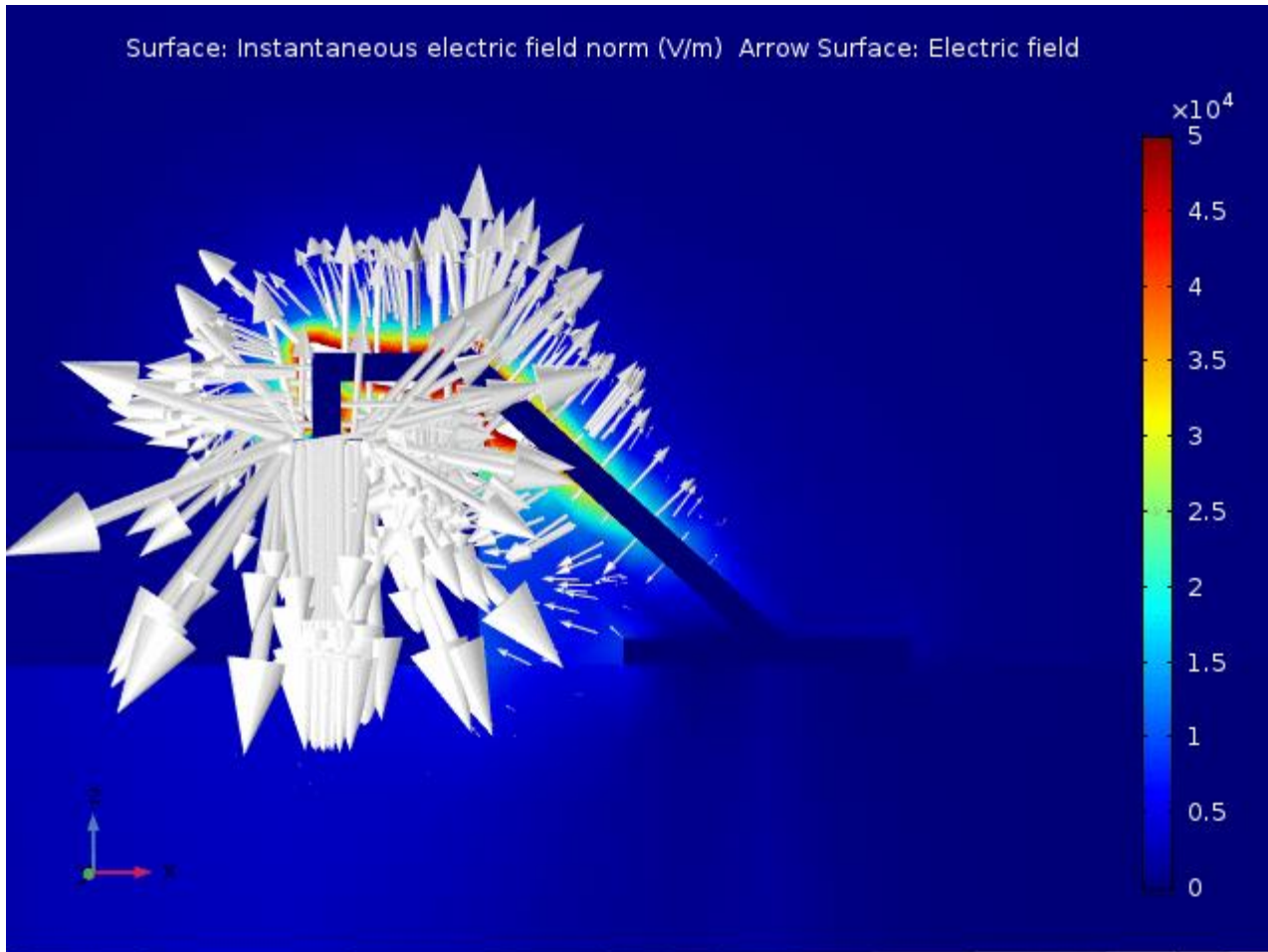








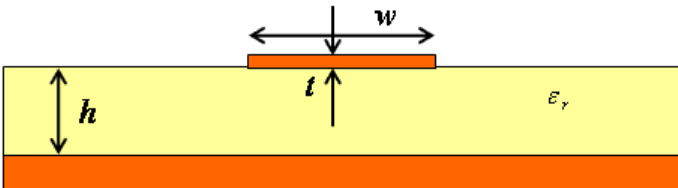




http://www.takuichi.net/hobby/edu/em/mw_circuit/transmission_lines/msl/

Microstrip Line

2010.10.30 Takuichi Hirano



Input

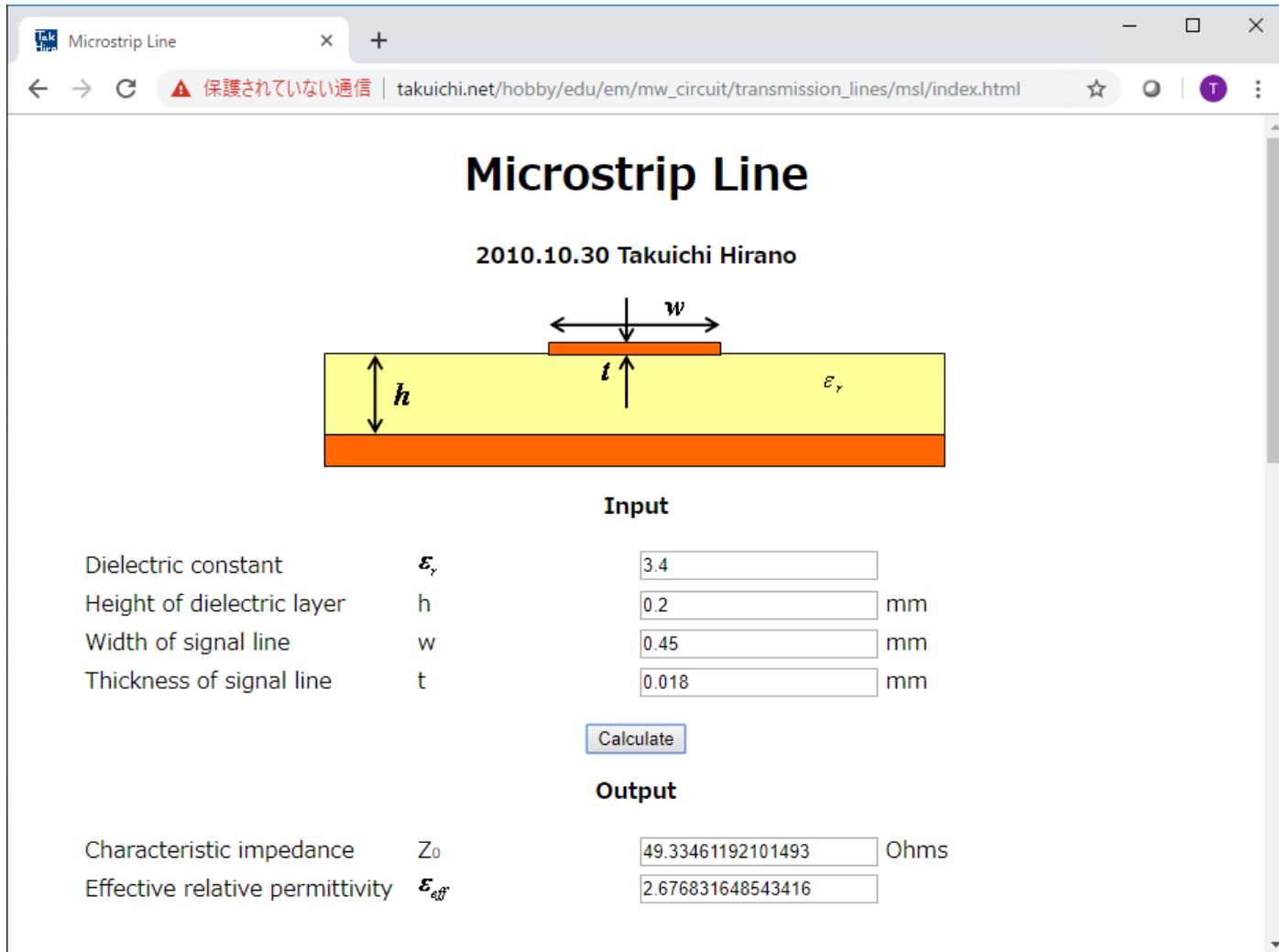
Dielectric constant	ϵ_r	<input type="text" value="4"/>
Height of dielectric layer	h	<input type="text" value="0.005"/> mm
Width of signal line	w	<input type="text" value="0.01"/> mm
Thickness of signal line	t	<input type="text" value="0.001"/> mm

Calculate

Output

Characteristic impedance	Z_0	<input type="text" value="48.32501916626361"/> Ohms
Effective relative permittivity	ϵ_{eff}	<input type="text" value="3.0669467095138407"/>

http://www.takuichi.net/hobby/edu/em/mw_circuit/transmission_lines/msl/



Microstrip Line

2010.10.30 Takuichi Hirano

Diagram illustrating the parameters of a microstrip line: w (width), t (thickness), h (height), and ϵ_r (dielectric constant).

Input

Dielectric constant	ϵ_r	<input type="text" value="3.4"/>
Height of dielectric layer	h	<input type="text" value="0.2"/> mm
Width of signal line	w	<input type="text" value="0.45"/> mm
Thickness of signal line	t	<input type="text" value="0.018"/> mm

Calculate

Output

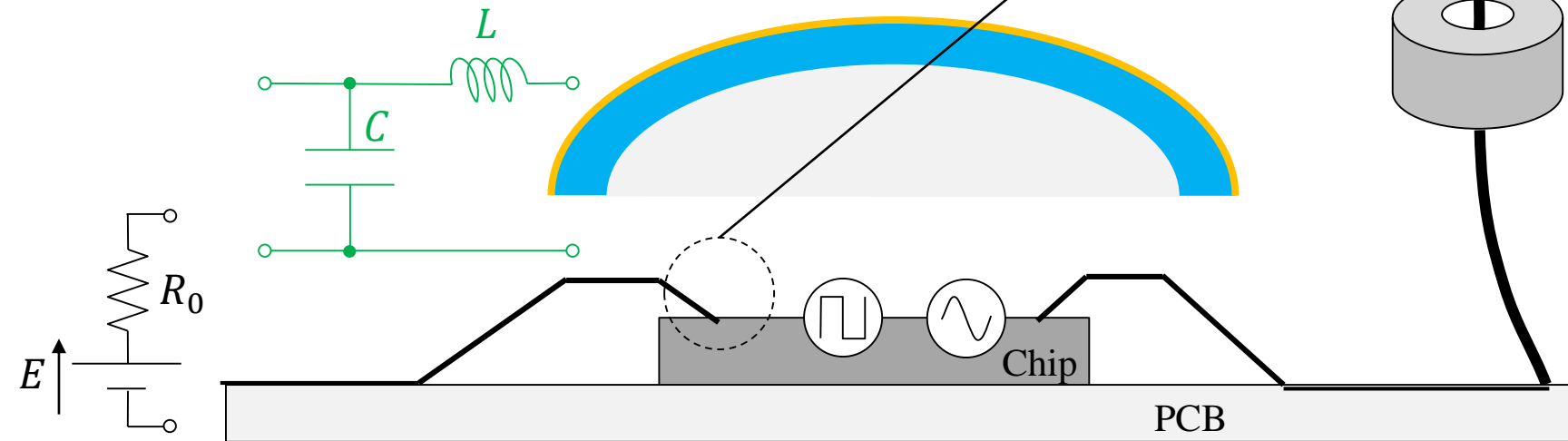
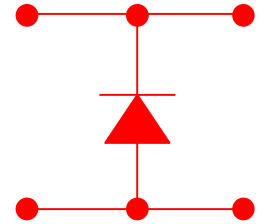
Characteristic impedance	Z_0	<input type="text" value="49.33461192101493"/> Ohms
Effective relative permittivity	ϵ_{eff}	<input type="text" value="2.676831648543416"/>

3. 他機関によるEMC対策のための シミュレーション活用事例の紹介

EMC対策例

絶縁破壊電圧: 空気 30 kV/cm

1. ESD(静電気放電、サージ)
ダイオード(、バリスタ、ガスアレスタ)
2. ノイズ抑圧(信号線)
フィルタ、フェライトコア
3. 直流電源安定化
バイパスコンデンサ、チョークコイル
4. 不要放射抑圧、外乱ノイズ遮断
電波吸収材料、シールド(金属)



評価アンテナ設計

1. 張間 他, “近接放射イミュニティ試験に用いるTEMホーンプロトタイプの評価”, IEICE総大, B-4-45, 2019年3月.

車載

1. 松沢 他, “車室内ワイヤレス給電システムのSAR評価”, IEICE総大, B-4-35, 2019年3月.

電源安定化

1. 三井 他, “車載通信システムのイミュニティ評価用BAN(Broadband Artificial Network)の高周波化に向けた改良”, IEICE総大, B-4-25, 2019年3月.
2. 小林 他, “両側磁気結合を用いたノイズフィルタのIC動作状態における性能検証”, IEICE総大, B-4-21, 2019年3月.

ノイズ除去

1. 松井 他, “フェライトコアを用いた6.6kV分岐架空配電系統のTDRパルス経路選択手法”, IEICE総大, B-4-30, 2018年9月.

航空機・鉄道

1. T. Sekiguchi et al. “Numerical estimation of propagation path loss for wireless link design of WAIC systems installed on outside aircraft cabin based on large-scale FDTD simulation,” IEICE ComEx, Vol.8, No.5, pp.129-134, 2018.
2. 酒井 他, “複数台車を考慮した磁気浮上鉄道による沿線の通信線の鎖交磁束の周波数スペクトル解析”, IEICEソ大, B-4-29, 2018年9月.

IC設計

1. 渡邊 他, “ICチップによる電磁輻射のパッケージング依存性”, IEICEソ大, B-4-1, 2018年9月.
2. 相本 他, “ICチップによる電磁輻射と移動通信干渉の評価”, IEICEソ大, B-4-2, 2018年9月.
3. 高橋 他, “複合磁性ペーストを用いたノイズ抑制体の実装方法”, IEICEソ大, B-4-1, 2017年3月.

実際に使用されるケーブル

外部からのノイズ受信の検討モデル

モデル

平面波入射

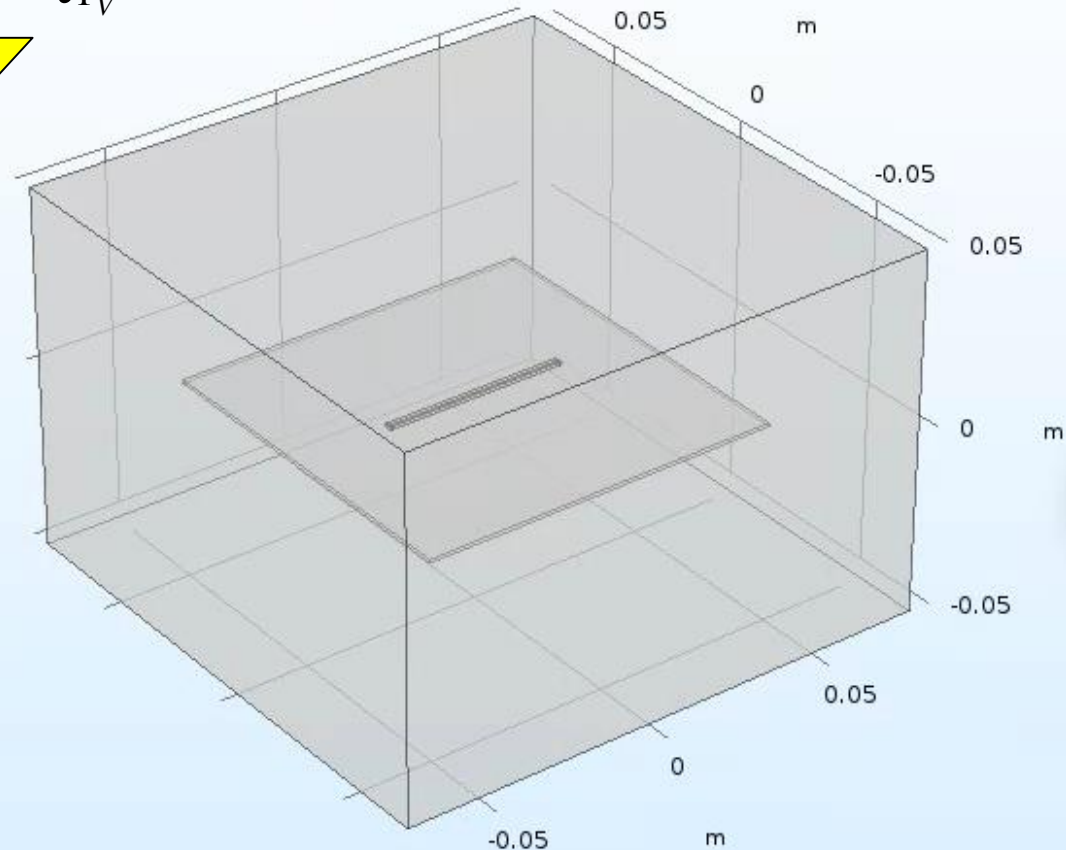
車載(CAN)を想定したシミュレータの使い方

ハーネスで接続した線路の特性、ノイズ受信の影響解析のための基礎検討モデル。

$$V_0 = -\int_{\Gamma_V} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}$$

電圧測定

Lumped Portを設定



実際使用するデバイス(チップ等)の入力/出カインピーダンスを有するLumped Portでモデル化



兩端 Lumped Port

No. 94

The screenshot displays the COMSOL Multiphysics interface for a simulation titled "diff_common_port_port.mph". The left sidebar shows the Model Builder with a tree structure including Global Definitions, Component 1 (comp1), Electromagnetic Waves, Frequency Domain, and Results. The central Properties window is set to "Global Evaluation" for the "S-Parameter (emw)" data set, showing a table of expressions and their units.

Expression	Unit	Description
$20 \cdot \log_{10}(\text{abs}(\text{emw.S11}))$		
$\text{arg}(\text{emw.S11})$	rad	
$20 \cdot \log_{10}(\text{abs}(\text{emw.S21}))$		
$\text{arg}(\text{emw.S21})$	rad	

The right side of the interface shows a 3D visualization of the electric field norm (V/m) on the surface of the structure at 1 GHz. A color scale on the right indicates field values from 350 to 750 V/m. Below the plot, a "Messages" window displays a table of simulation results.

freq (GHz)	$20 \cdot \log_{10}(\text{abs}(\text{emw.S11}))$	$\text{arg}(\text{emw.S11})$ (rad)	$20 \cdot \log_{10}(\text{abs}(\text{emw.S21}))$	$\text{arg}(\text{emw.S21})$ (rad)
1.0000	-3.6596	0.31862	-5.3360	-1.2880

Lumped Port と Lumped Element

No. 95

diff_common_port_elem.mph - COMSOL Multiphysics

File Home Definitions Geometry Materials Physics Mesh Study Results Developer

Model Builder

- diff_common_port_elem.mph (root)
 - Global Definitions
 - Parameters
 - Materials
 - Component 1 (comp1)
 - Definitions
 - Geometry 1
 - Materials
 - Electromagnetic Waves, Frequency Domain
 - Wave Equation, Electric 1
 - Perfect Electric Conductor 1
 - Initial Values 1
 - Scattering Boundary Condition 1
 - Lumped Port 1
 - Perfect Electric Conductor 2
 - Lumped Element 1
 - Mesh 1
 - Study 1
 - Results
 - Data Sets
 - Views
 - Derived Values
 - S-Parameter (emw)
 - Induced Voltage
 - Tables
 - Electric Field (emw)
 - Export
 - Reports

Settings Properties

Global Evaluation

Label: S-Parameter (emw)

Data

Data set: Study 1/Solution

Parameter selection (freq): All

Expressions

Expression	Unit	Description
$20 \cdot \log_{10}(\text{abs}(\text{emw.S11}))$		
$\text{arg}(\text{emw.S11})$	rad	
$20 \cdot \log_{10}(\text{abs}(\text{emw.Velement}_1))$		
$\text{arg}(\text{emw.Velement}_1)$	rad	

Graphics Convergence Plot 1

freq(1)=1 GHz Surface: Electric field norm (V/m)

0 0.05

750 700 650 600 550 500 450 400 350

Expression:

Description:

Data Series Operation

Operation: None

Messages Progress Log Table 2

freq (GHz)	$20 \cdot \log_{10}(\text{abs}(\text{emw.S11}))$	$\text{arg}(\text{emw.S11})$ (rad)	$20 \cdot \log_{10}(\text{abs}(\text{emw.Velement}_1))$	$\text{arg}(\text{emw.Velement}_1)$ (rad)
1.0000	-3.6596	0.31862	-5.3360	-1.2880

Lumped Element (50 Ω)の受信電圧
はLumped PortのSパラと同じ

954 MB | 1098 MB

Lumped Port の設定

No. 96

Settings Properties

Lumped Port

Label: Lumped Port 1

Boundary Selection

Selection: Manual

20

Active

Override and Contribution

Equation

Lumped Port Properties

Lumped port name: 1

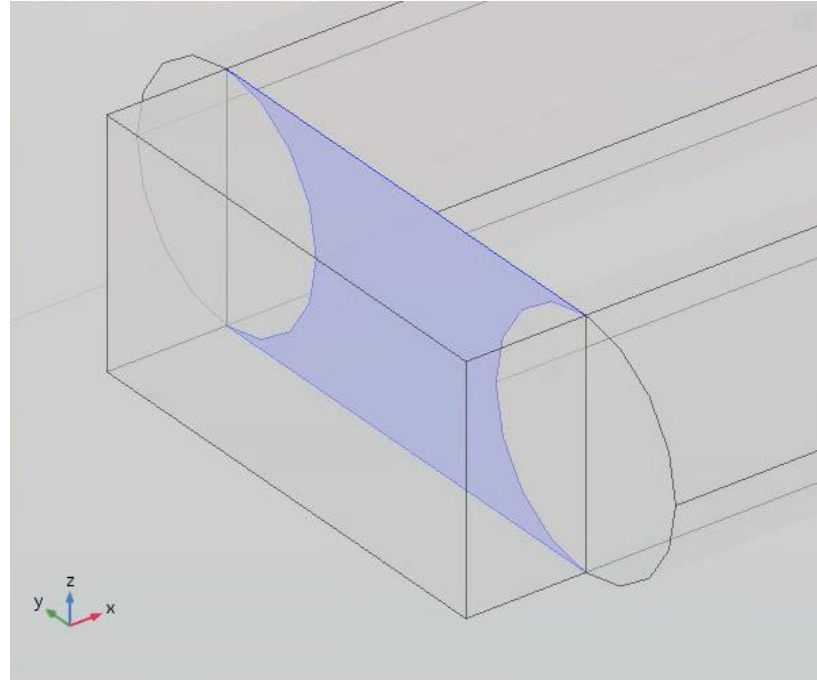
Type of lumped port: Uniform

Terminal type: Cable

Wave excitation at this port: Off

Settings

Characteristic impedance: Z_{ref} 50[ohm] Ω



Lumped Elementの設定

No. 97

Settings Properties

Lumped Element

Label: Lumped Element 1

▼ Boundary Selection

Selection: Manual

32
Active

▶ Override and Contribution

▶ Equation

▼ Lumped Element Properties

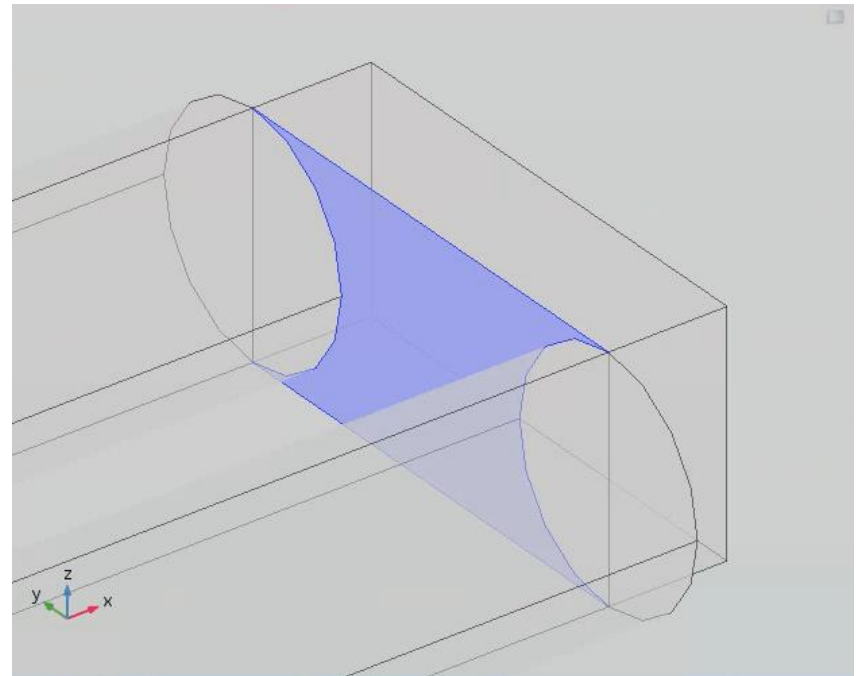
Lumped element name:
1

Type of lumped element:
Uniform

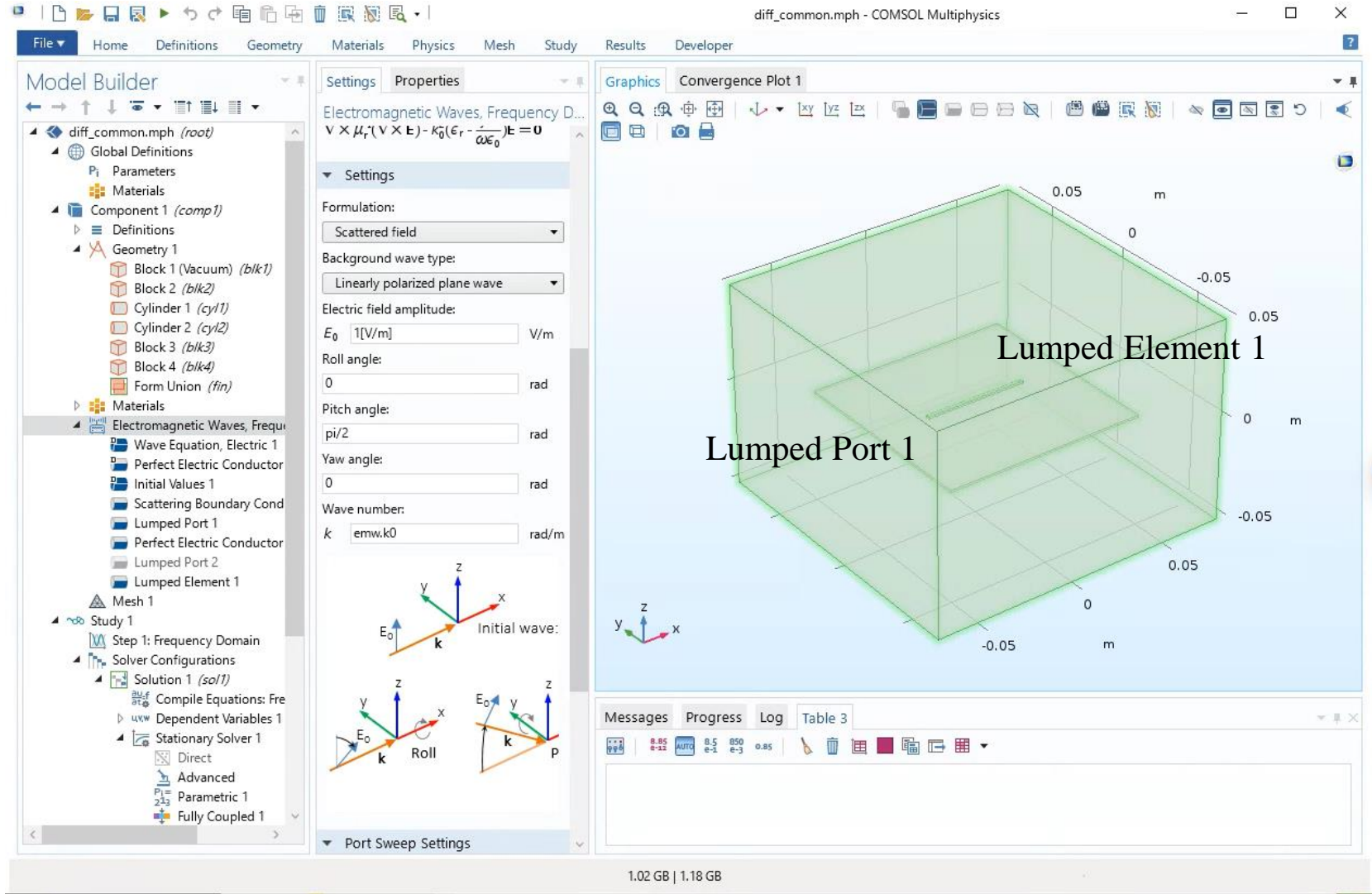
▼ Settings

Lumped element device:
User defined

Lumped element impedance:
 $Z_{\text{element}} = 50[\text{ohm}] \quad \Omega$



平面波入射 (Scattered Field)



平面波入射による受信電圧

diff_common_scatter_field.mph - COMSOL Multiphysics

File Home Definitions Geometry Materials Physics Mesh Study Results Developer

Model Builder

- diff_common_scatter_field.mph (root)
 - Global Definitions
 - Parameters
 - Materials
 - Component 1 (comp1)
 - Definitions
 - Geometry 1
 - Materials
 - Electromagnetic Waves, Frequency Domain
 - Wave Equation, Electric 1
 - Perfect Electric Conductor 1
 - Initial Values 1
 - Scattering Boundary Condition 1
 - Lumped Port 1
 - Perfect Electric Conductor 2
 - Lumped Element 1
 - Mesh 1
 - Study 1
 - Results
 - Data Sets
 - Views
 - Derived Values
 - S-Parameter (emw)
 - Induced Voltage
 - Tables
 - Electric Field (emw)
 - Export
 - Reports

Settings Properties

Global Evaluation

Evaluate

Label: Induced Voltage

Data

Data set: Study 1/Solution 1 (sol1)

Parameter selection (freq): All

Expressions

Expression	Unit	Description
abs(emw.Velement_1)	V	

Expression:

Description:

Data Series Operation

Operation: None

Graphics

0.05 m

0

-0.05

0.05

0

-0.05

0

-0.05 m

z

y

x

Messages Progress Log Table 3

freq (GHz)	abs(emw.Velement_1) (V)
1.0000	4.6970E-5

850 MB | 1038 MB

diff_common_scat_field_shield_pec.mph - COMSOL Multiphysics

File Home Definitions Geometry Materials Physics Mesh Study Results Developer

Model Builder

- diff_common_scat_field_shield_pec.mph (root)
 - Global Definitions
 - Parameters
 - Materials
 - Component 1 (comp1)
 - Definitions
 - Geometry 1
 - Materials
 - Electromagnetic Waves, Frequency Domain
 - Mesh 1
 - Study 1
 - Results
 - Data Sets
 - Views
 - Derived Values
 - S-Parameter (emw)
 - Induced Voltage
 - Tables
 - Electric Field (emw)
 - Export
 - Reports

Settings Properties

Global Evaluation

Label: Induced Voltage

Data

Data set:

Parameter selection (freq): A

Expressions

Expression	Unit
abs(emw.Velement_1)	V

Expression:

Description:

Data Series Operation

Operation: None

Graphics

Messages Progress Log Table 3

freq (GHz)	abs(emw.Velement_1) (V)
1.0000	3.4269E-8

833 MB | 1029 MB

上部だけ金属カバー

No. 101

The screenshot shows the COMSOL Multiphysics interface for a simulation titled "diff_common_scatter_field_shield_pec2.mph". The Model Builder on the left shows a hierarchy of components: Global Definitions, Component 1 (comp1) with sub-components for Electromagnetic Waves, Frequency Domain, Mesh 1, Study 1, and Results. Under Results, "Induced Voltage" is selected. The Properties window in the center shows the "Global Evaluation" settings for "Induced Voltage", with the expression $\text{abs}(\text{emw.Velement}_1)$ and unit "V". The Graphics window on the right displays a 3D visualization of the "Instantaneous electric field norm (V/m)" at $\text{freq}(1)=1$ GHz. The plot shows a color-coded field distribution within a rectangular cavity, with a color bar on the right ranging from 1 to 7. Below the plot, a "Messages" window shows a table with the following data:

freq (GHz)	abs(emw.Velement_1) (V)
1.0000	9.6865E-7

1.01 GB | 1.17 GB

ダイポールアンテナへの平面波照射(受信) No. 102

Electromagnetic Waves, Frequency Domain

Settings

Formulation: Scattered field

Background wave type: Linearly polarized plane wave

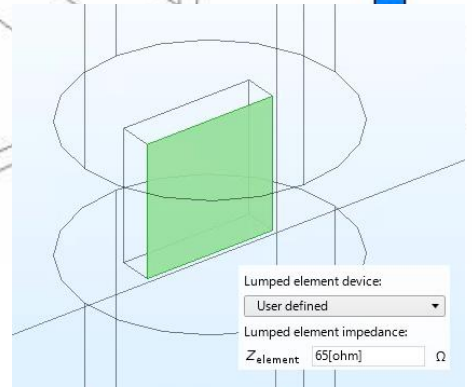
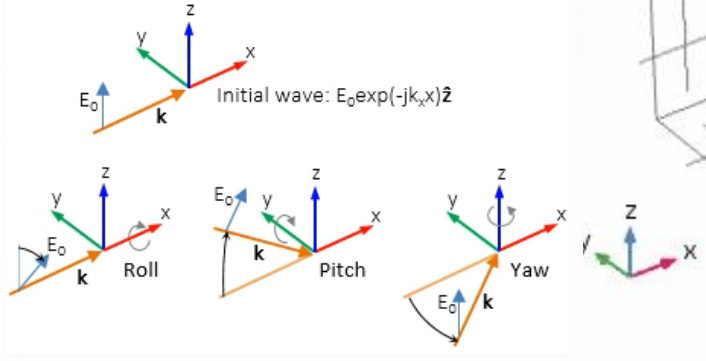
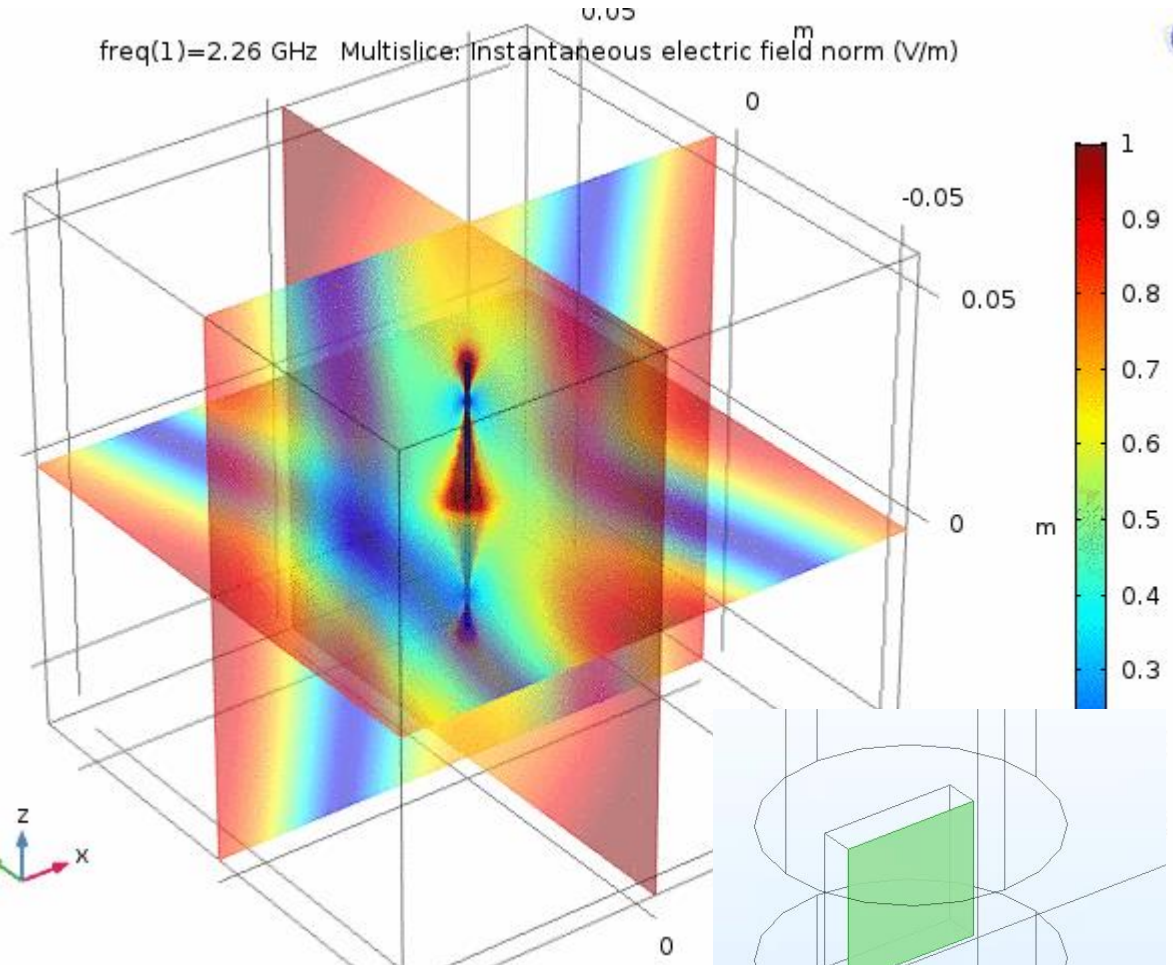
Electric field amplitude: E_0 1[V/m] V/m

Roll angle: 0 rad

Pitch angle: 0 rad

Yaw angle: 0 rad

Wave number: k emw.k0 rad/m



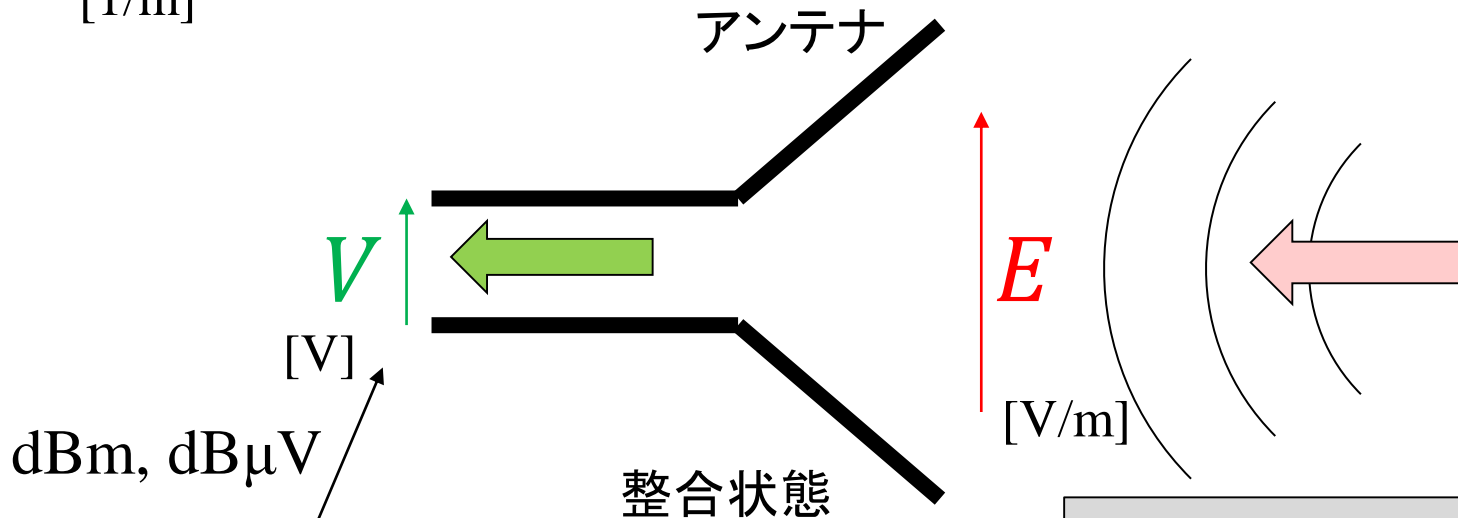
freq (GHz)	abs(emw.Velement_1) (V)	Effective Length (m)
2.2600	0.020510	0.042224

$$V = V_0/2$$

理論通り!

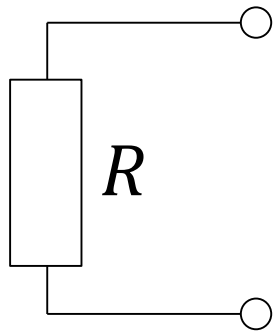
A_f : アンテナファクタ、アンテナ係数

[1/m]



dBm, dB μ V

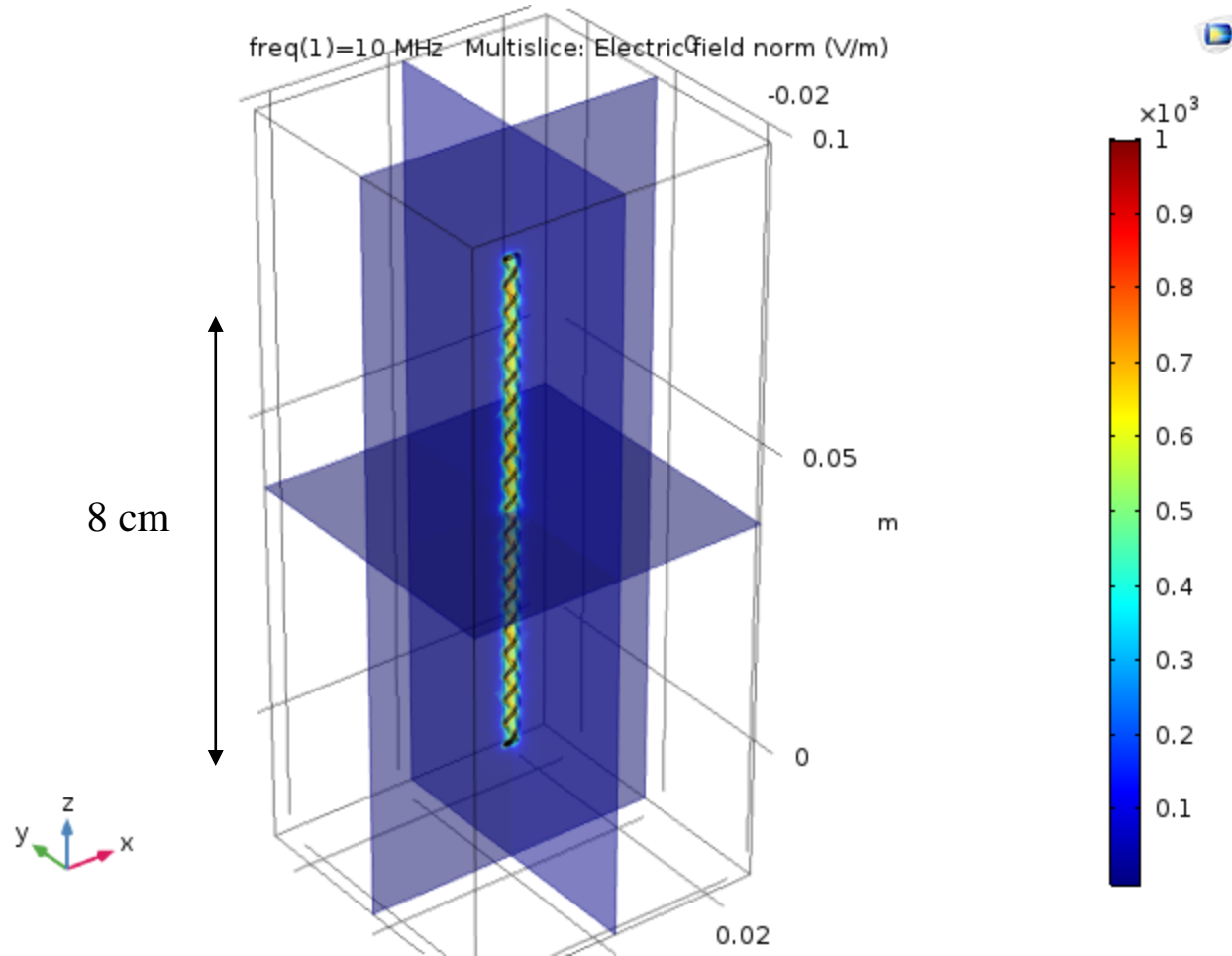
$$E = V A_f$$

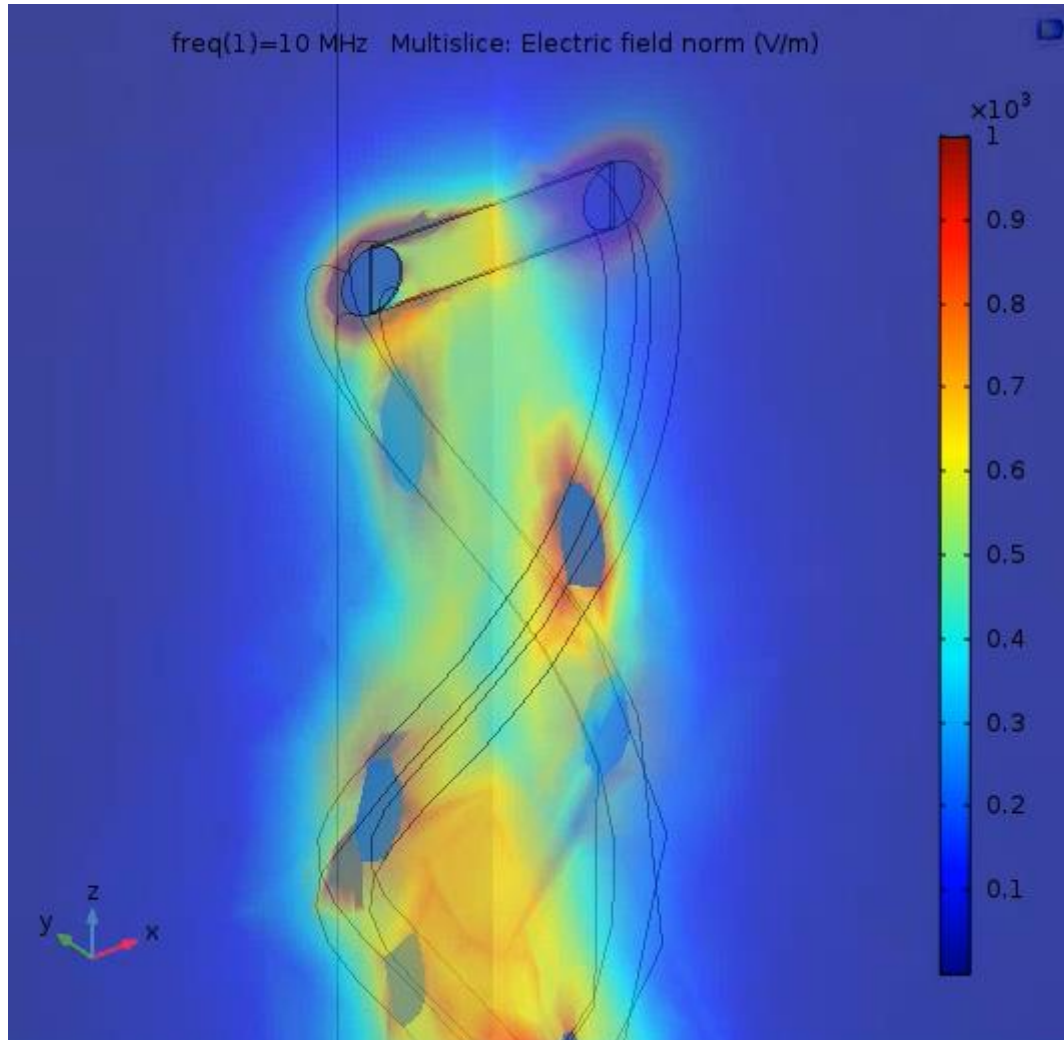


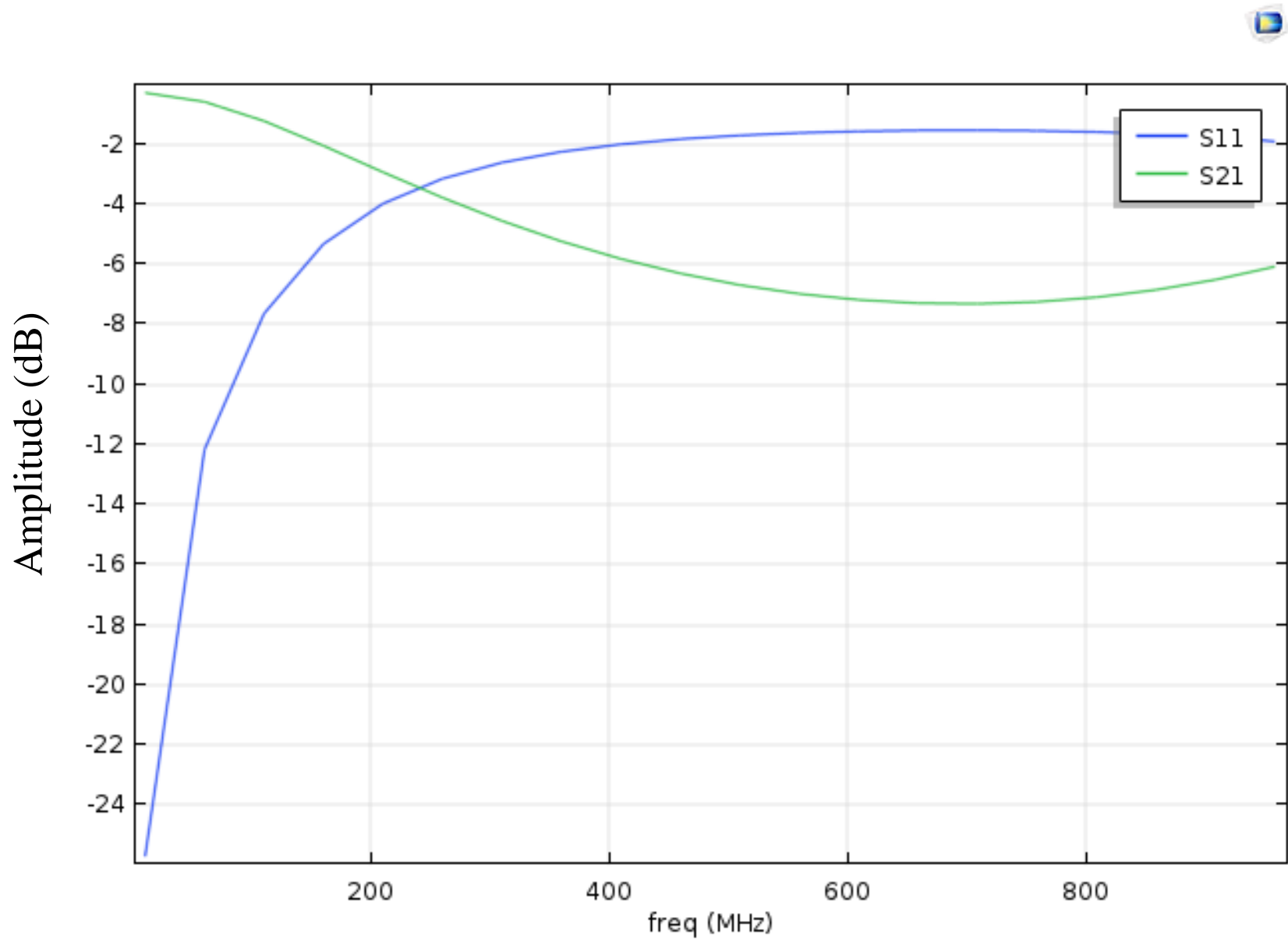
$$P = \frac{V^2}{R}$$

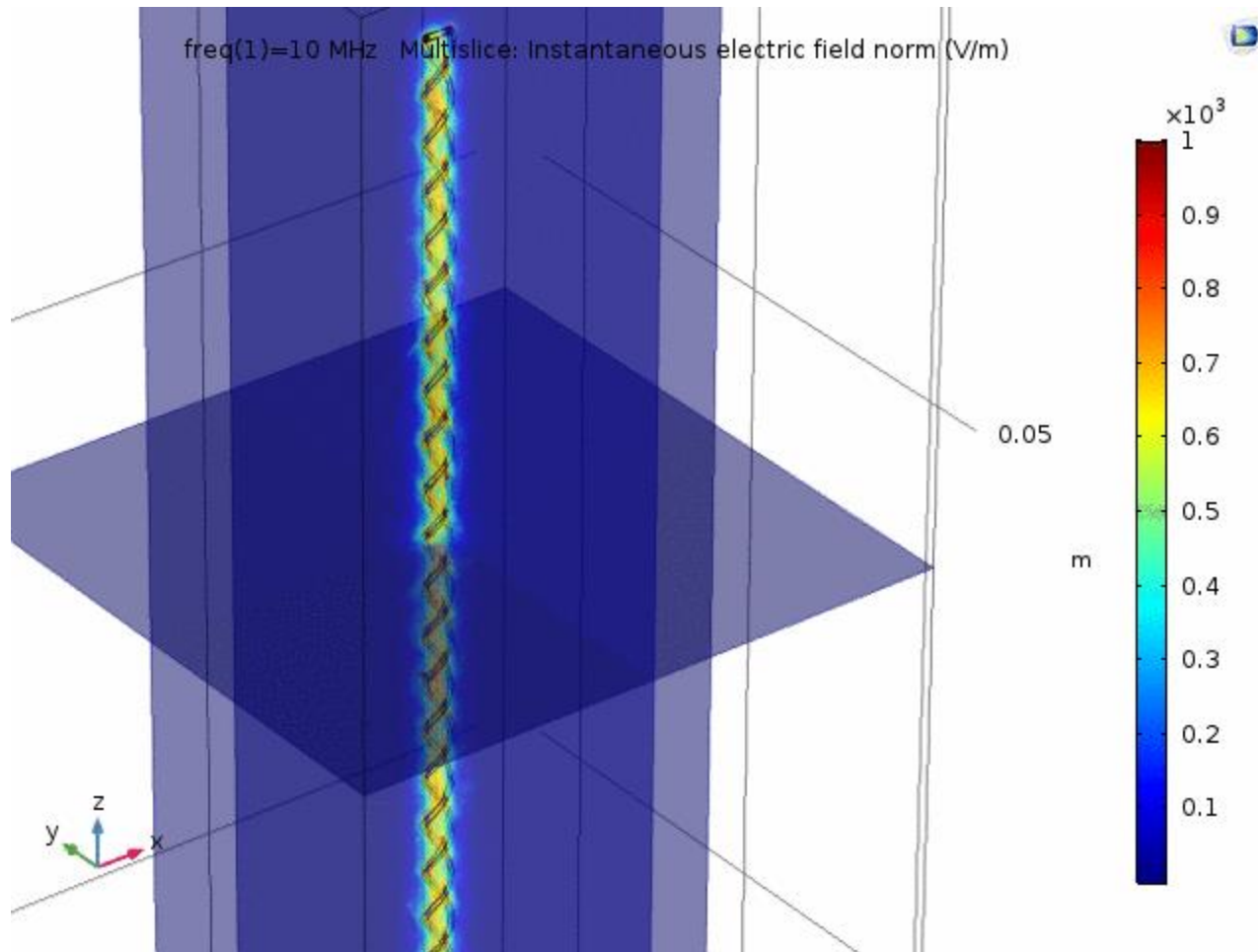
[m]
 l_e : 実効長
開放状態

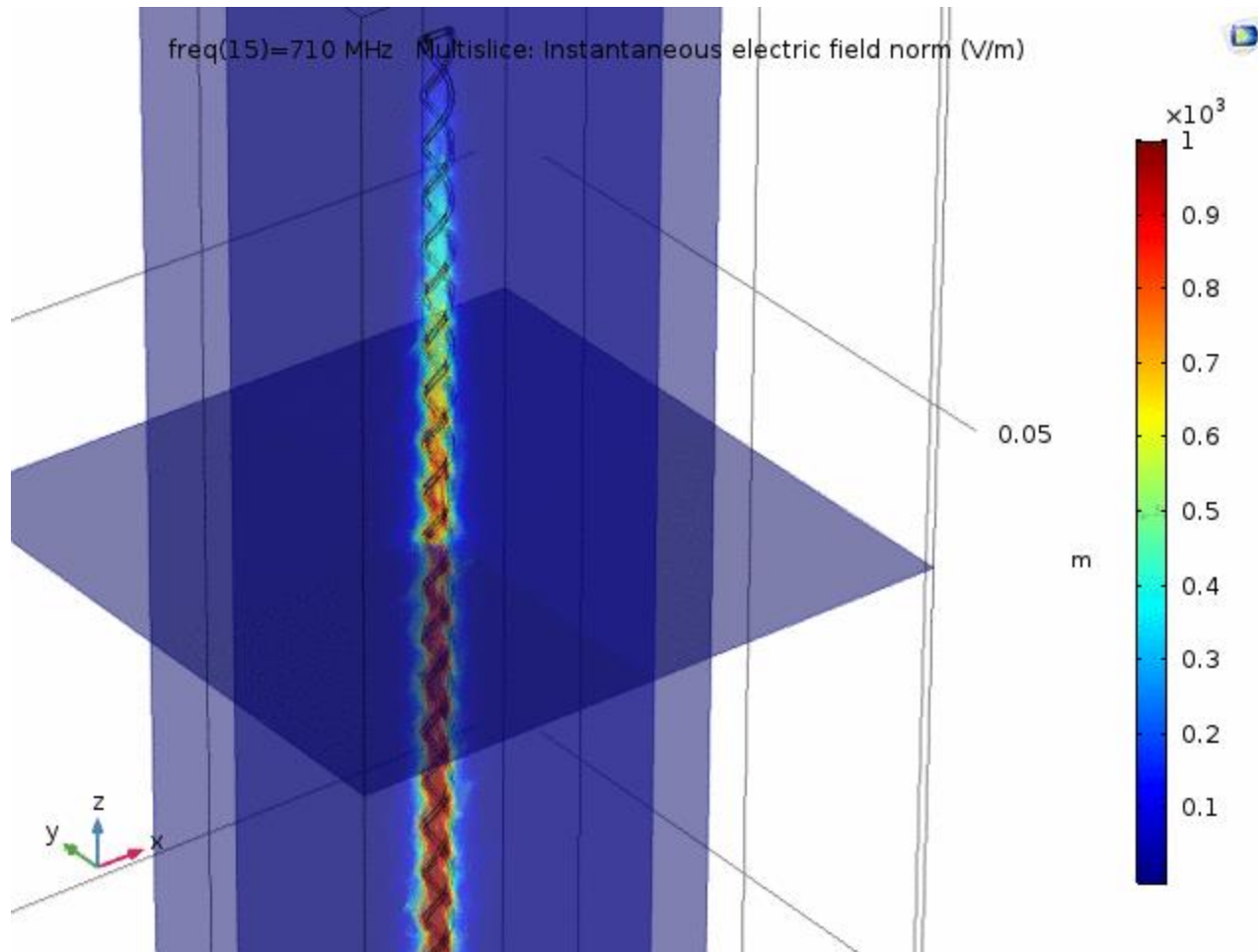
$$V_0 = l_e E$$
$$V = V_0 / 2$$
$$l_e = 2 / A_f$$



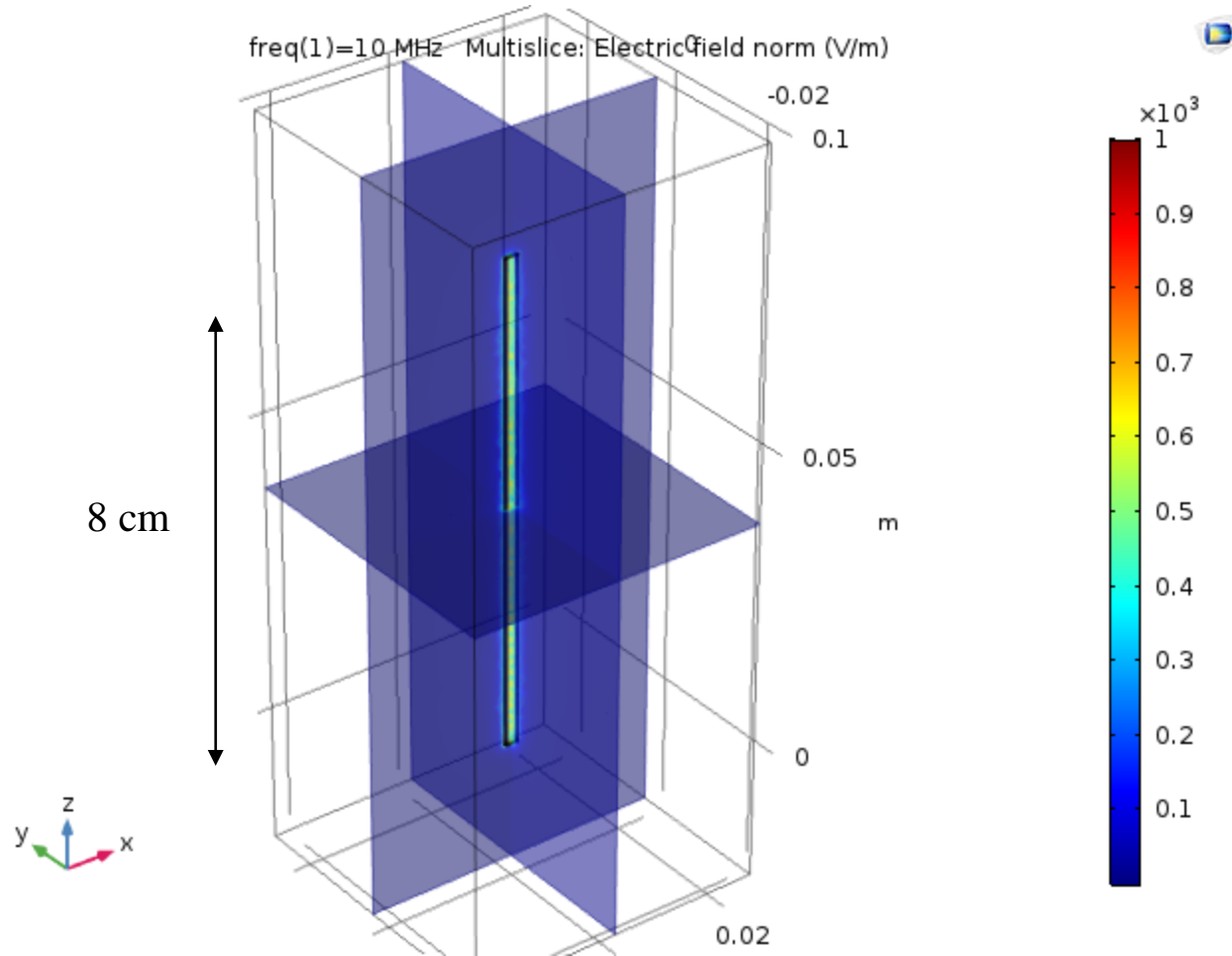


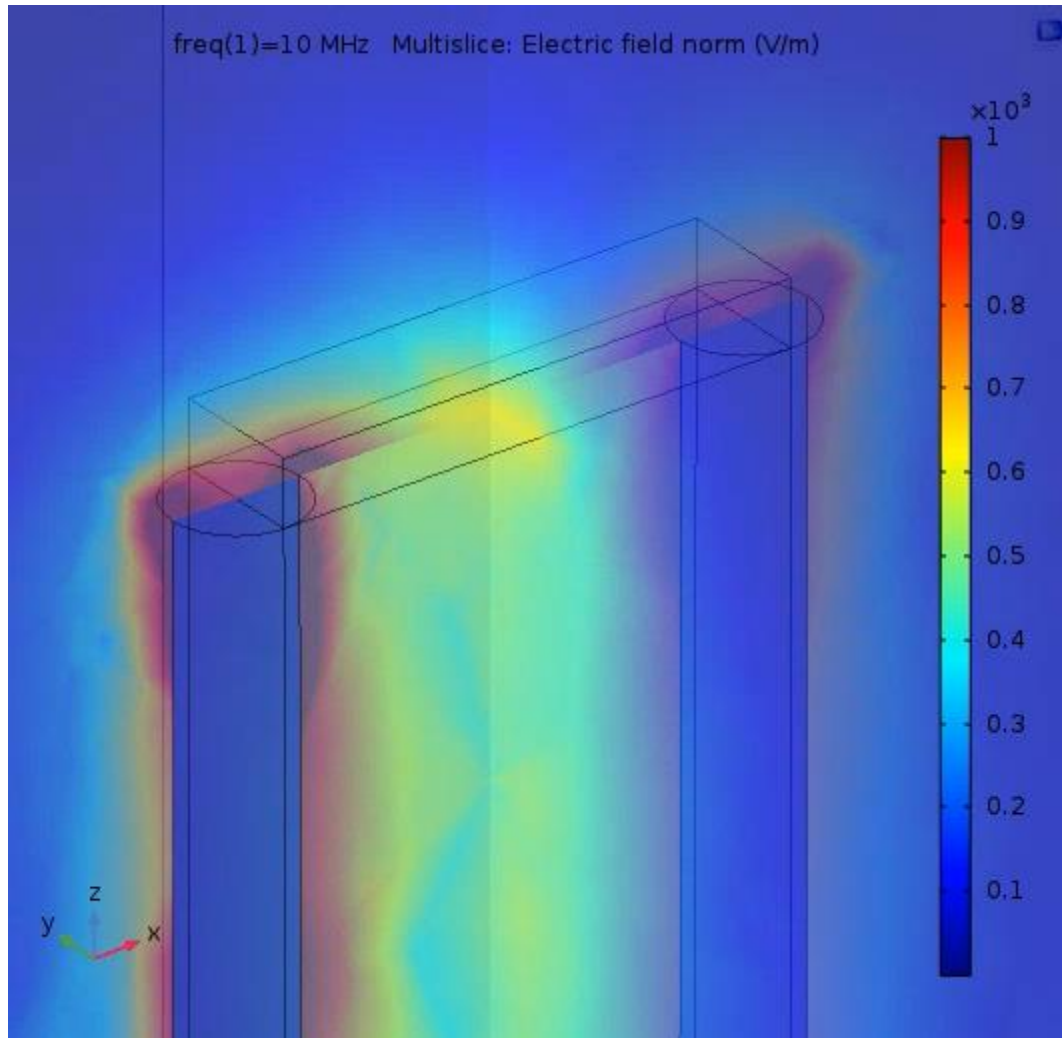


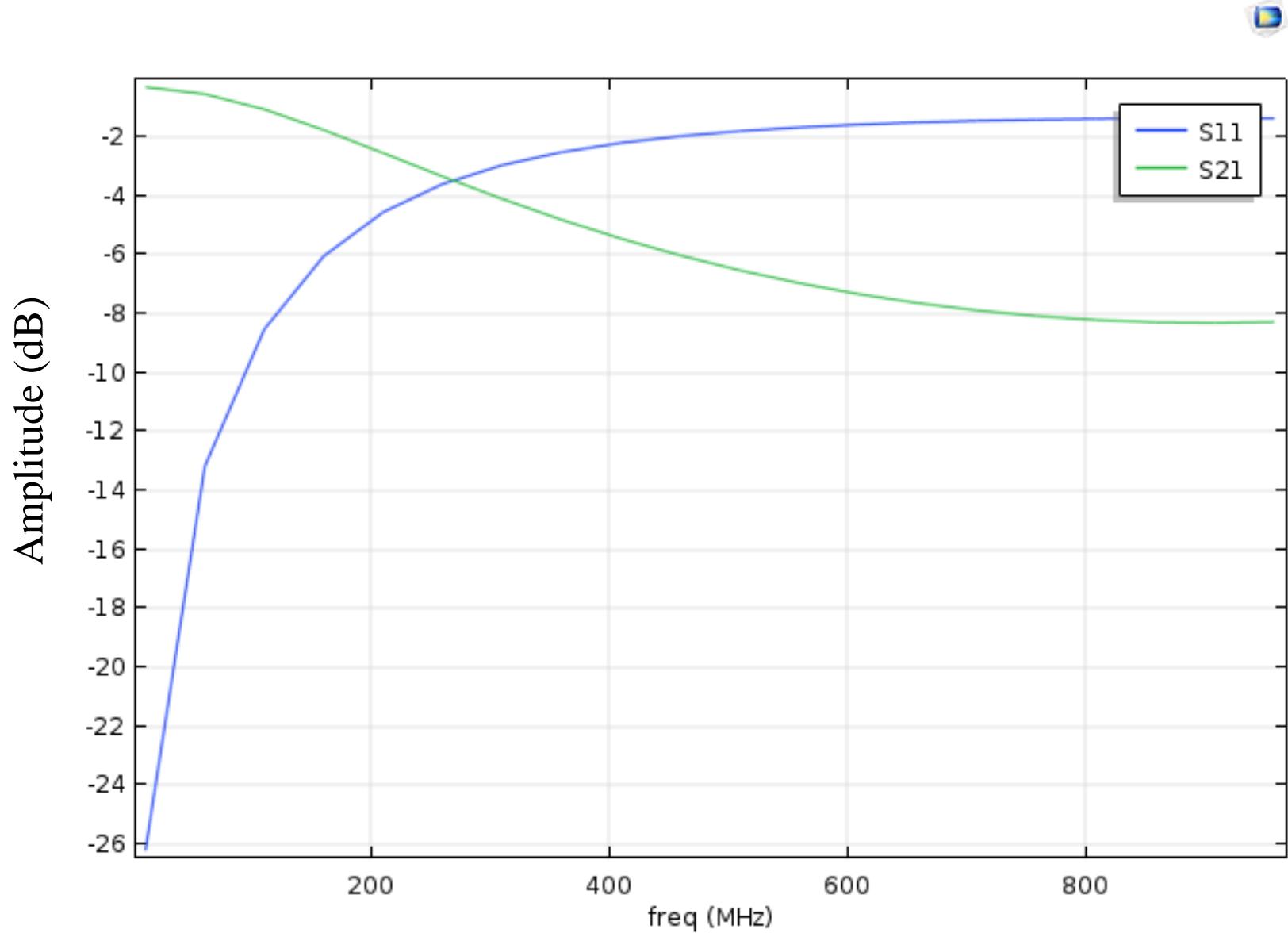


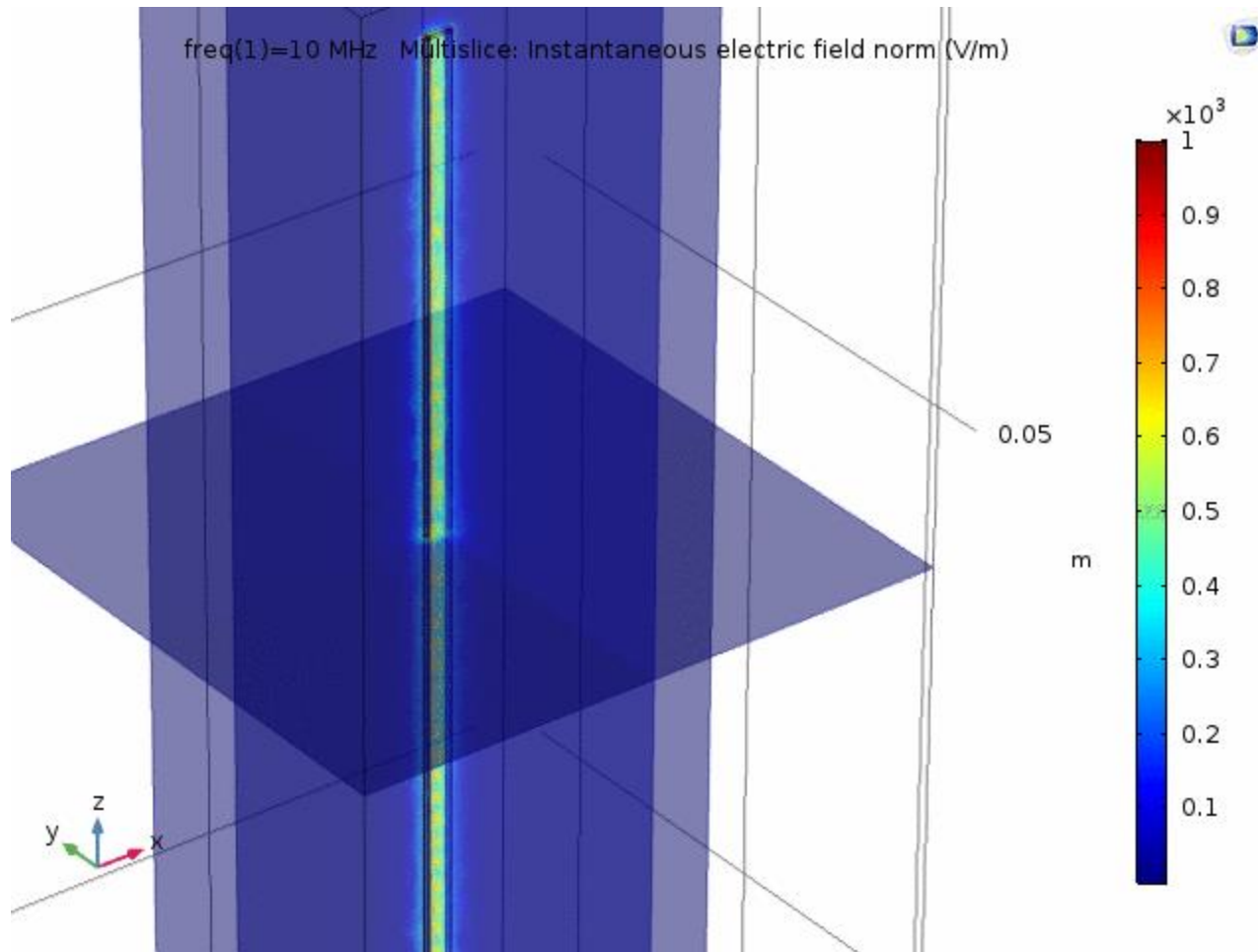


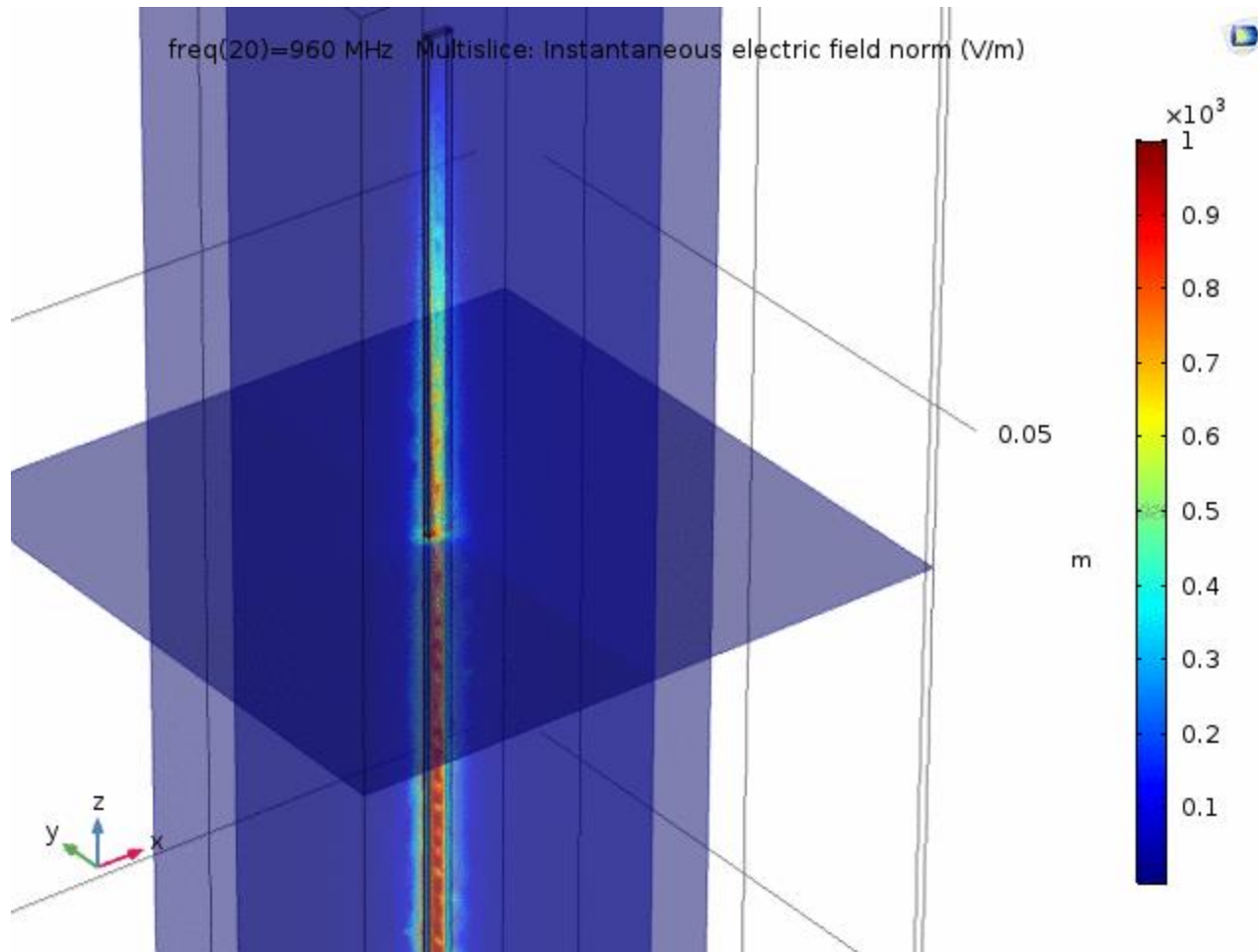
平行2本線路





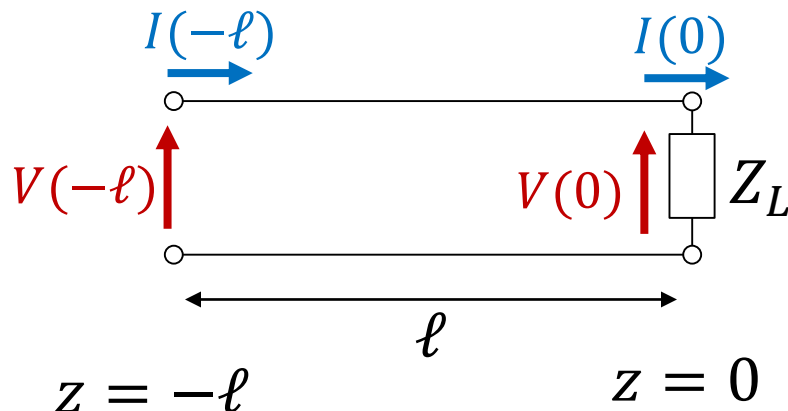






$$\begin{aligned}
 Z_{in} &= Z_0 \frac{Z_L + j Z_0 \tan(\beta \ell)}{Z_0 + j Z_L \tan(\beta \ell)} \\
 &= Z_L \frac{Z_0 + j(Z_0^2/Z_L) \tan(\beta \ell)}{Z_0 + j Z_L \tan(\beta \ell)} \\
 &= Z_L \frac{1 + j(Z_0/Z_L) \tan(\beta \ell)}{1 + j(Z_L/Z_0) \tan(\beta \ell)}
 \end{aligned}$$

$$\beta \ell = 2\pi \frac{\ell}{\lambda} \cong 0 \quad \longrightarrow \quad Z_{in} \cong Z_L$$



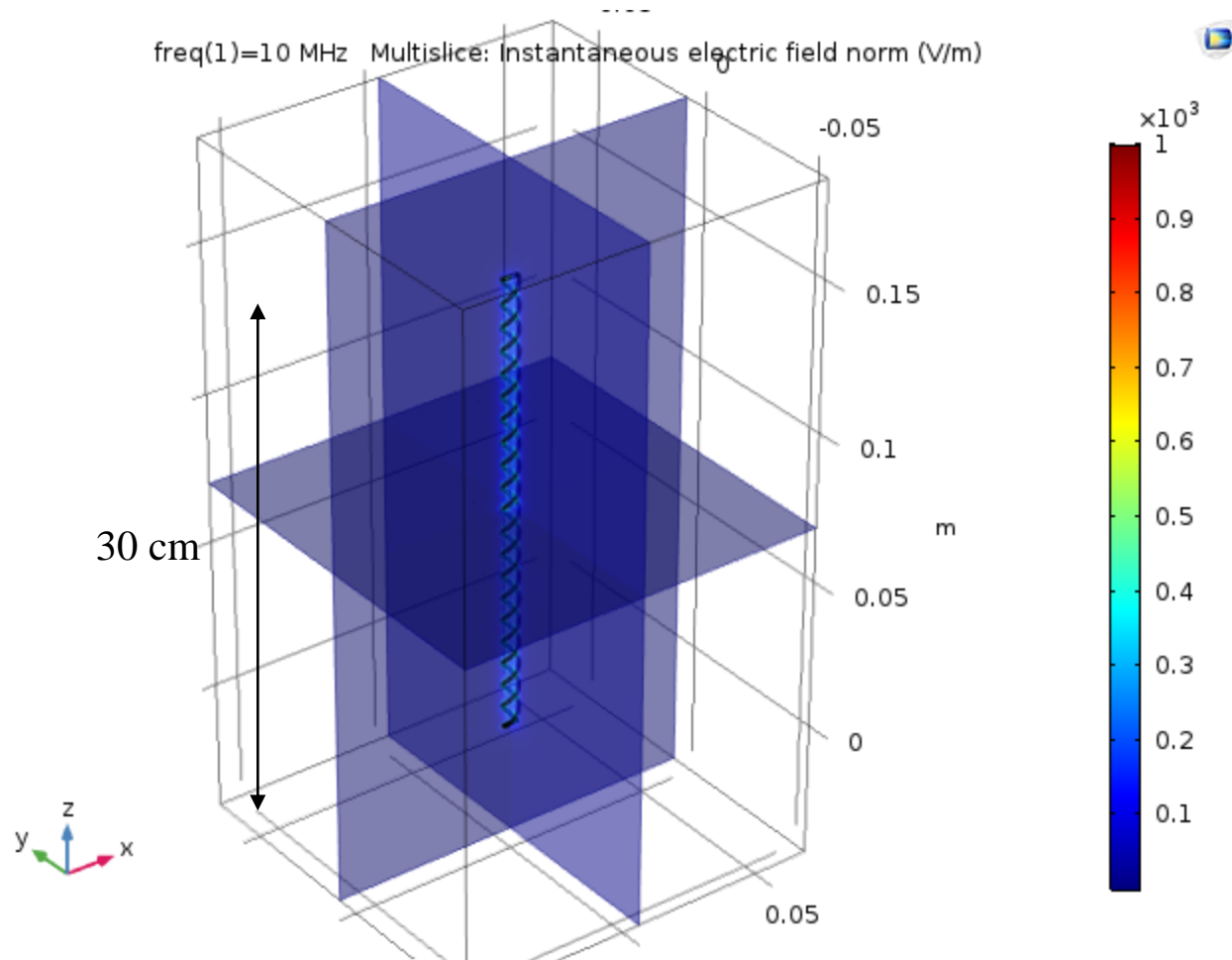
300 THz	1 μ m

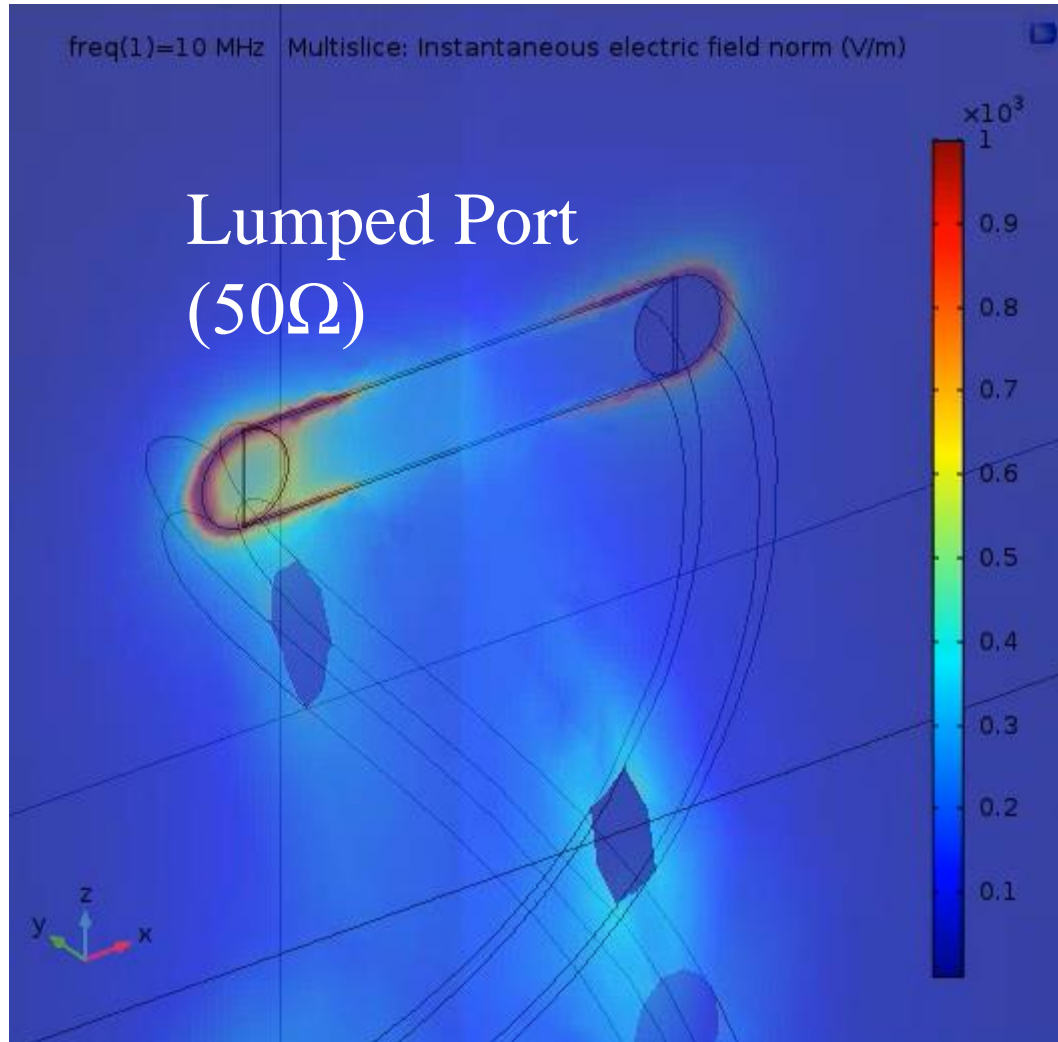
3 THz	100 μ m
300 GHz	1 mm
30 GHz	1 cm
3 GHz	10 cm
300 MHz	1 m
30 MHz	10 m
10 MHz	30 m
3 MHz	100 m
1 MHz	300 m

線路長が波長に比して小さいと終端負荷がそのまま見える

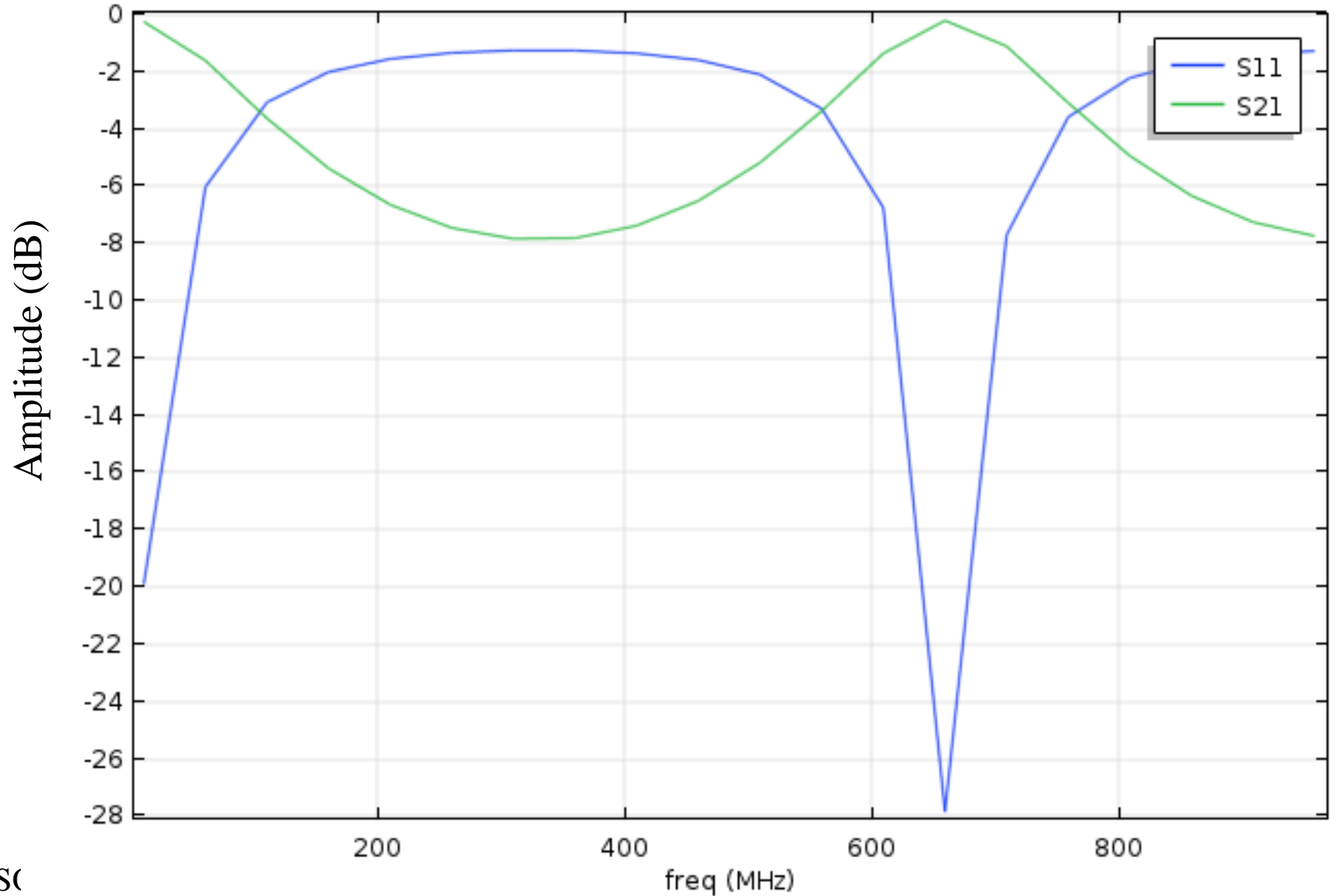
($\tan(\beta \ell) = 0$ ならいいので、 $\beta \ell = n\pi$; $\ell = \frac{n\lambda}{2}$ でもOK)

ツイストペアケーブル(間隔:大)



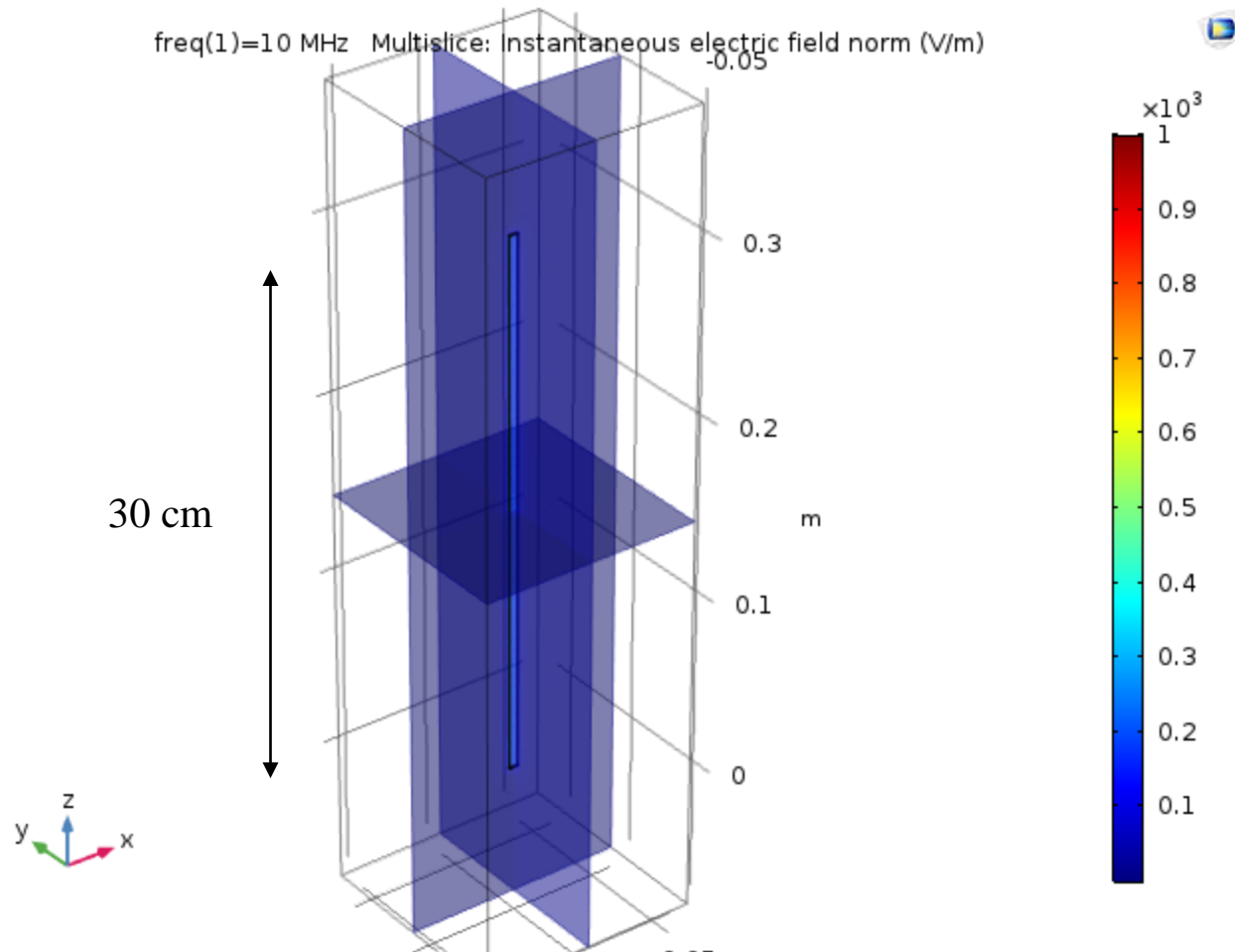


ツイストペアケーブル(間隔:大)

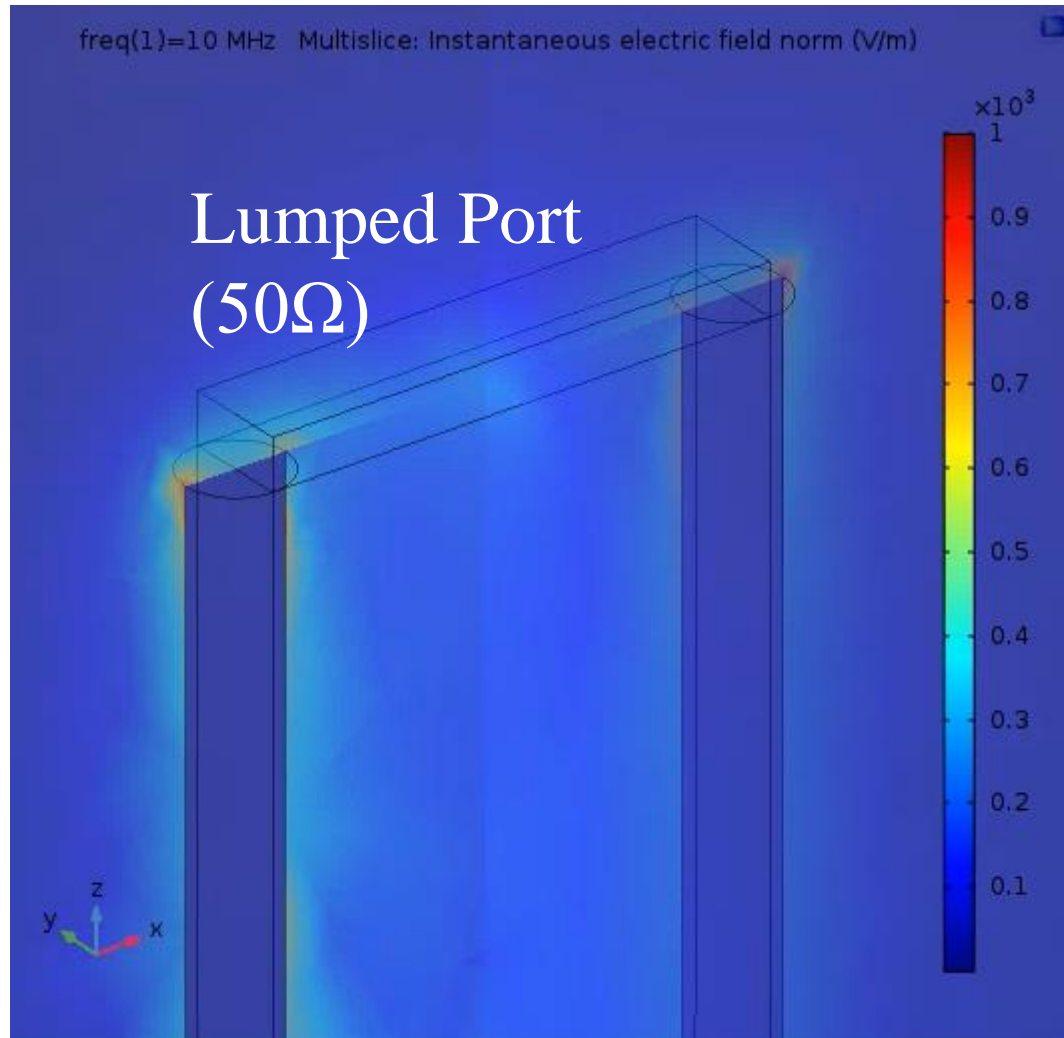


S11
S21

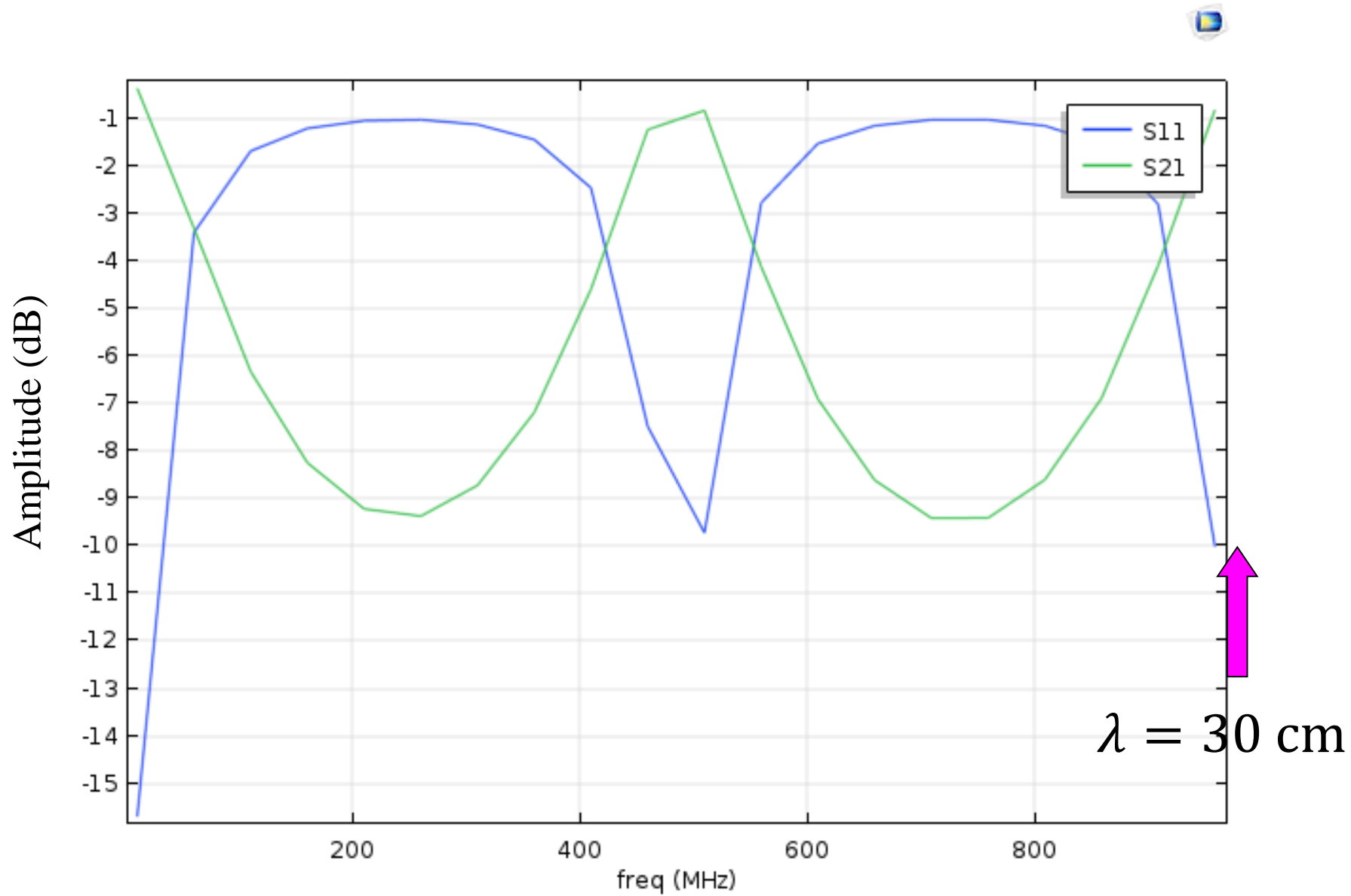
平行2本線路(間隔:大)



平行2本線路(間隔:大)



平行2本線路(間隔:大)

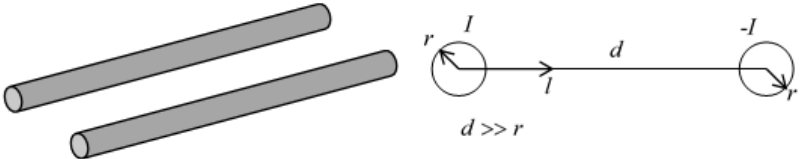


平行2本線路(間隔:大)

http://www.takuichi.net/hobby/edu/em/mw_circuit/transmission_lines/

Two Parallel Lines

2019.9.2 Takuichi Hirano



Input

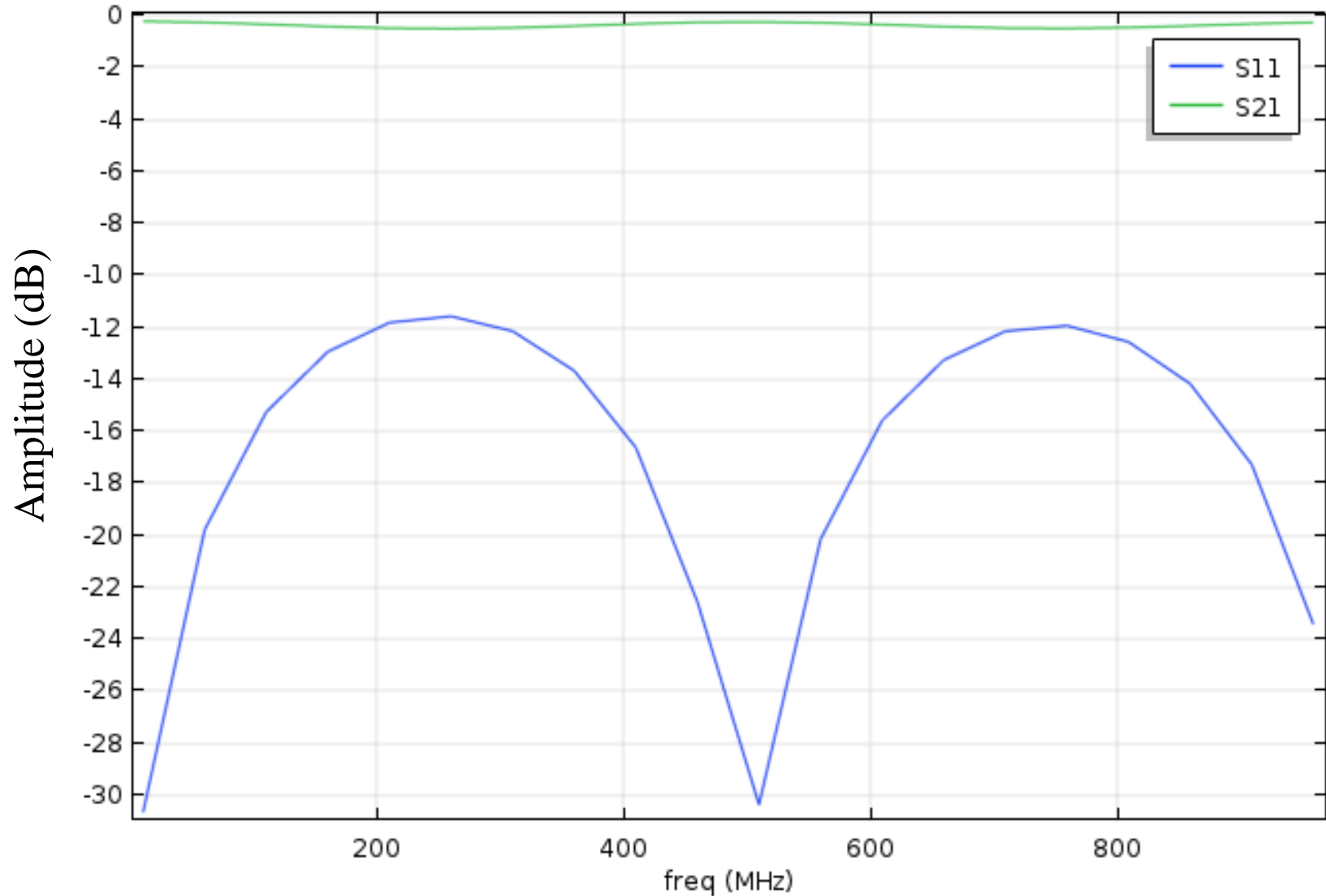
Relative permittivity (Dielectric constant)	ϵ_r	<input type="text" value="1"/>
Relative permeability	μ_r	<input type="text" value="1"/>
Radius of cable	r	<input type="text" value="0.25"/> mm
Distance between two conductors	d	<input type="text" value="5"/> mm

Output

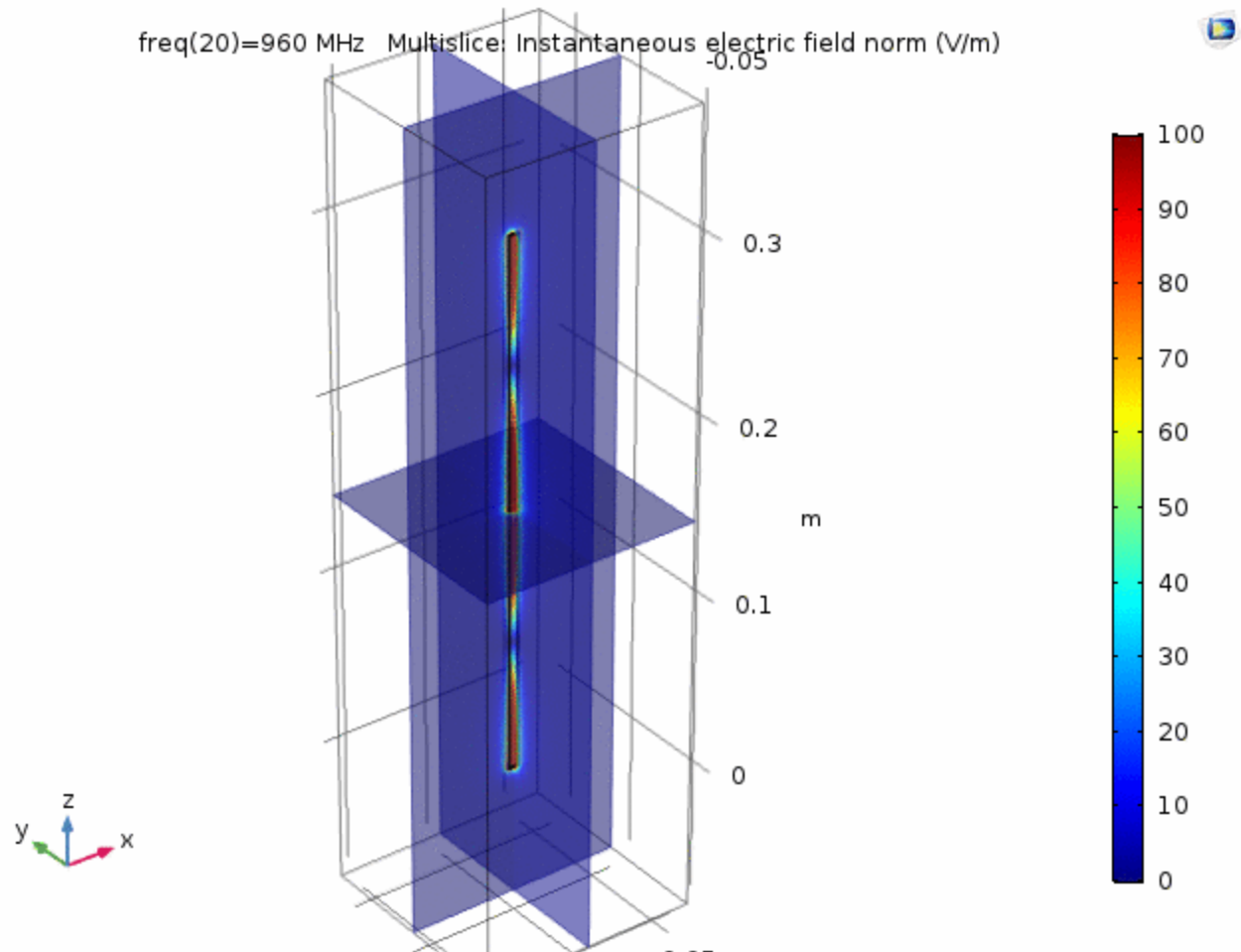
Capacitance per unit length	C	<input type="text" value="9.285095868024575e-12"/> F/m
Inductance per unit length	L	<input type="text" value="0.0000011976854259842916"/> H/m
Characteristic impedance	$Z_0 = \sqrt{L/C}$	<input type="text" value="359.15191493720226"/> Ohms

平行2本線路(間隔:大)

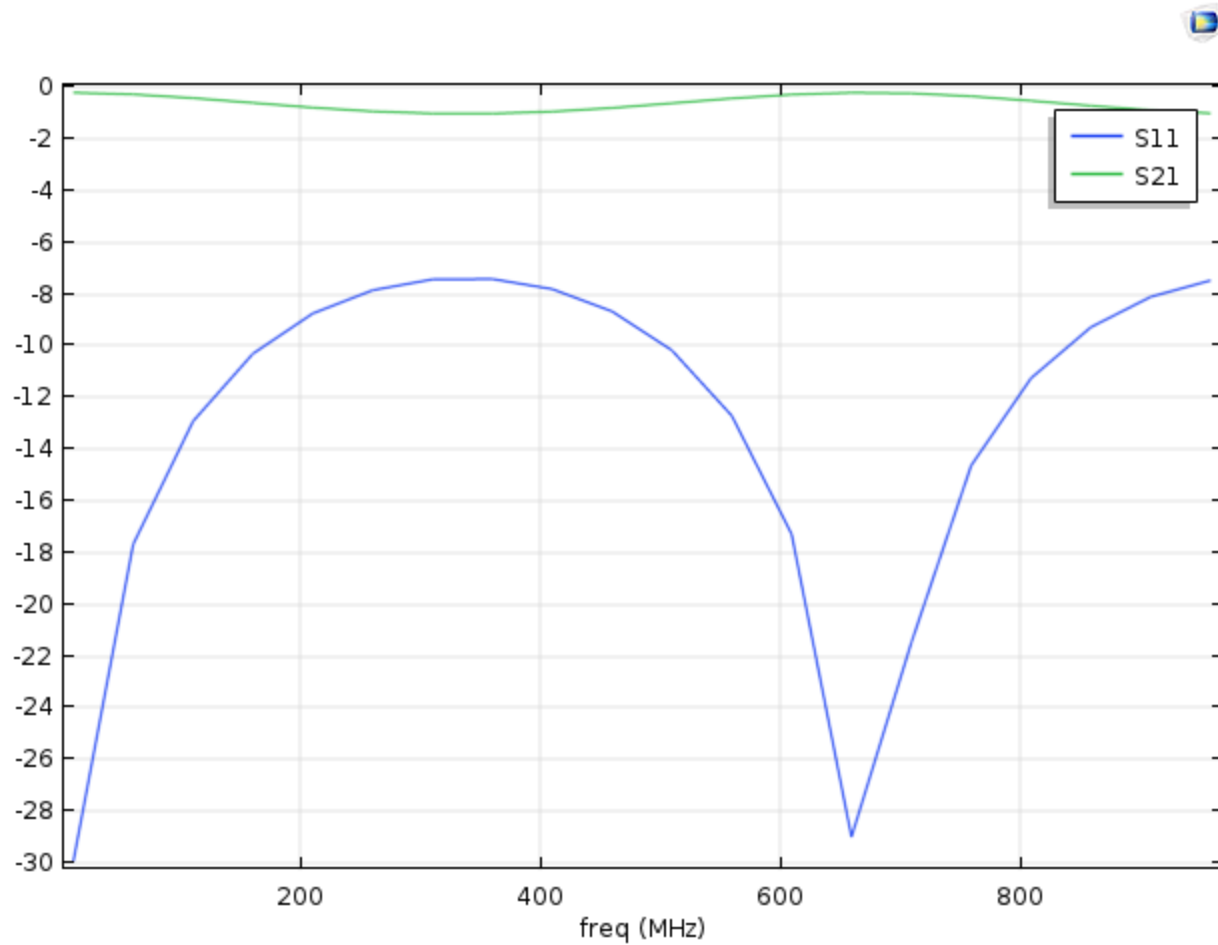
359Ωで終端(整合)



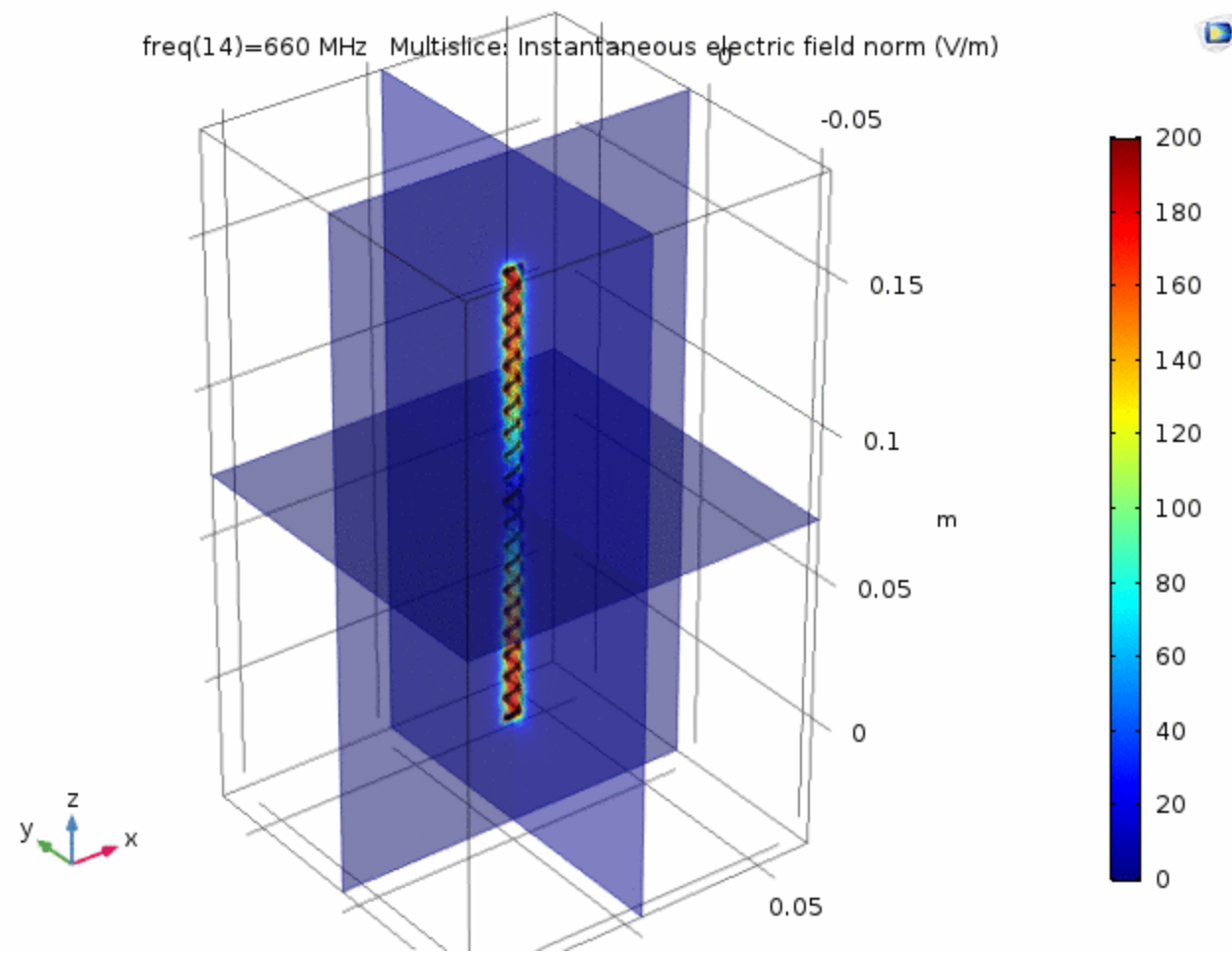
平行2本線路(間隔:大)



359Ωで終端(整合)



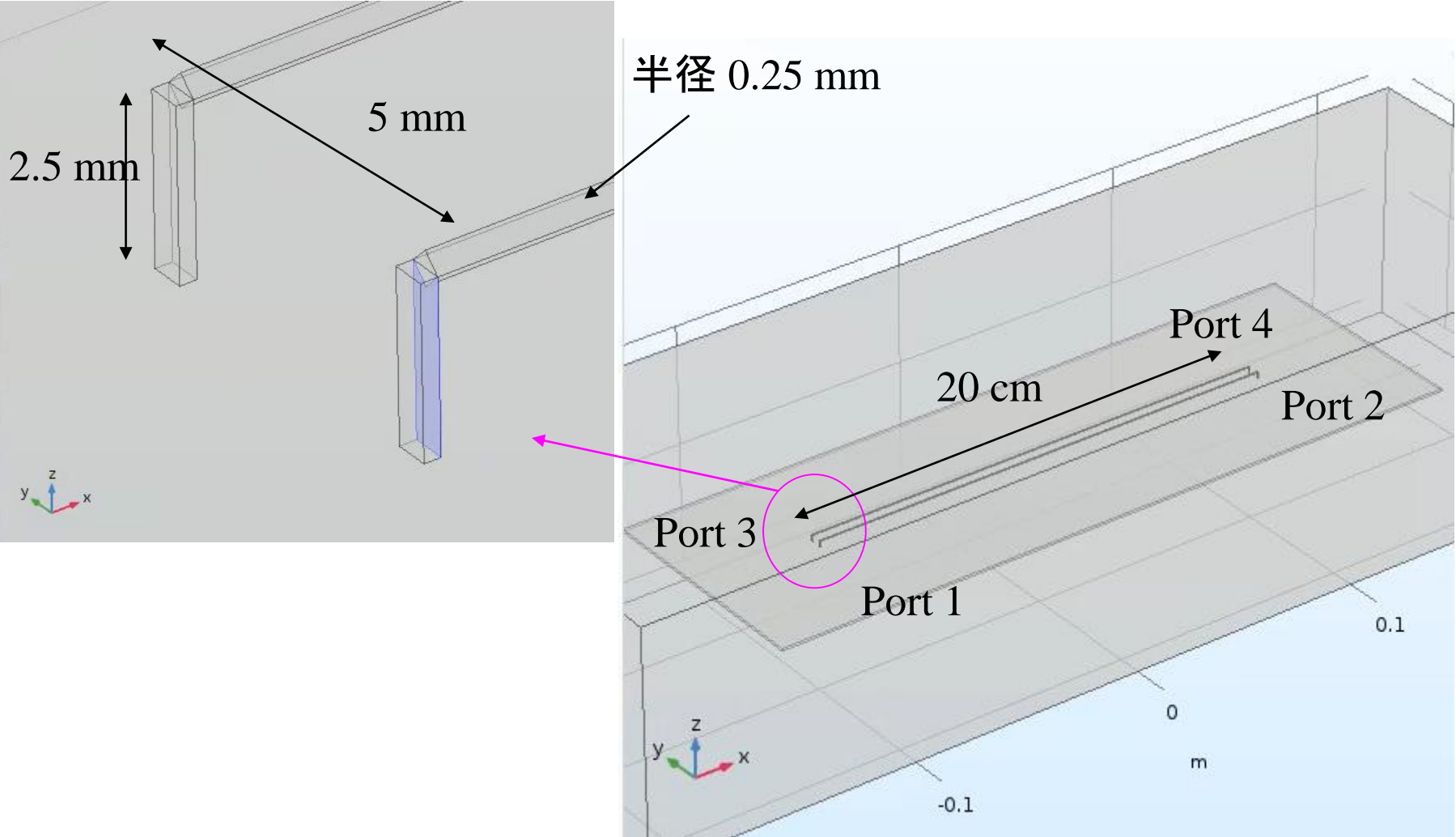
ツイストペアケーブル



コモンモードとディファレンシャルモード

導体上の平行2本線路 (4ポート)

No. 127

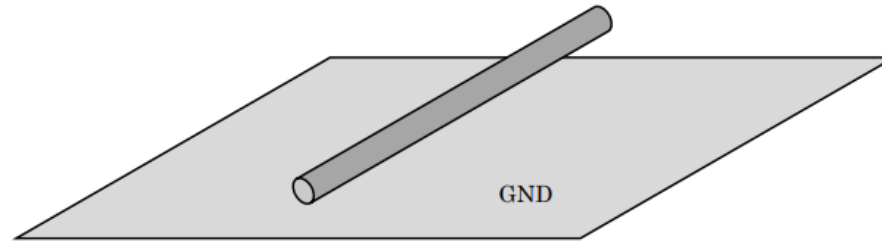


導体上の1本線路

http://www.takuichi.net/hobby/edu/em/mw_circuit/transmission_lines/parallel/

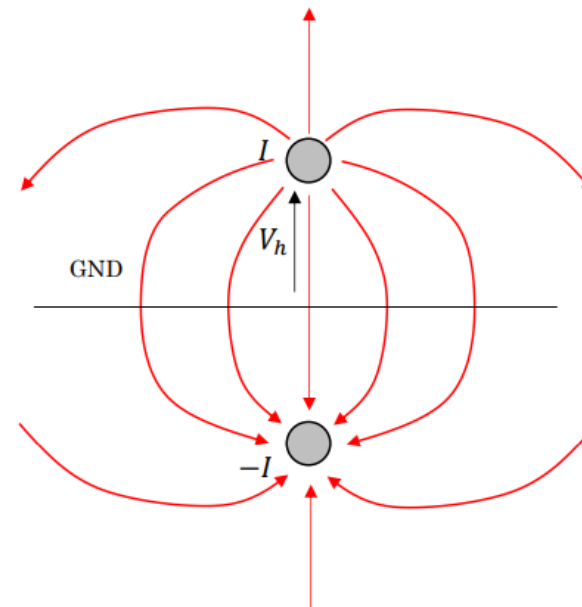
2019.9.2 T. Hirano

グラウンドの上の1本線路



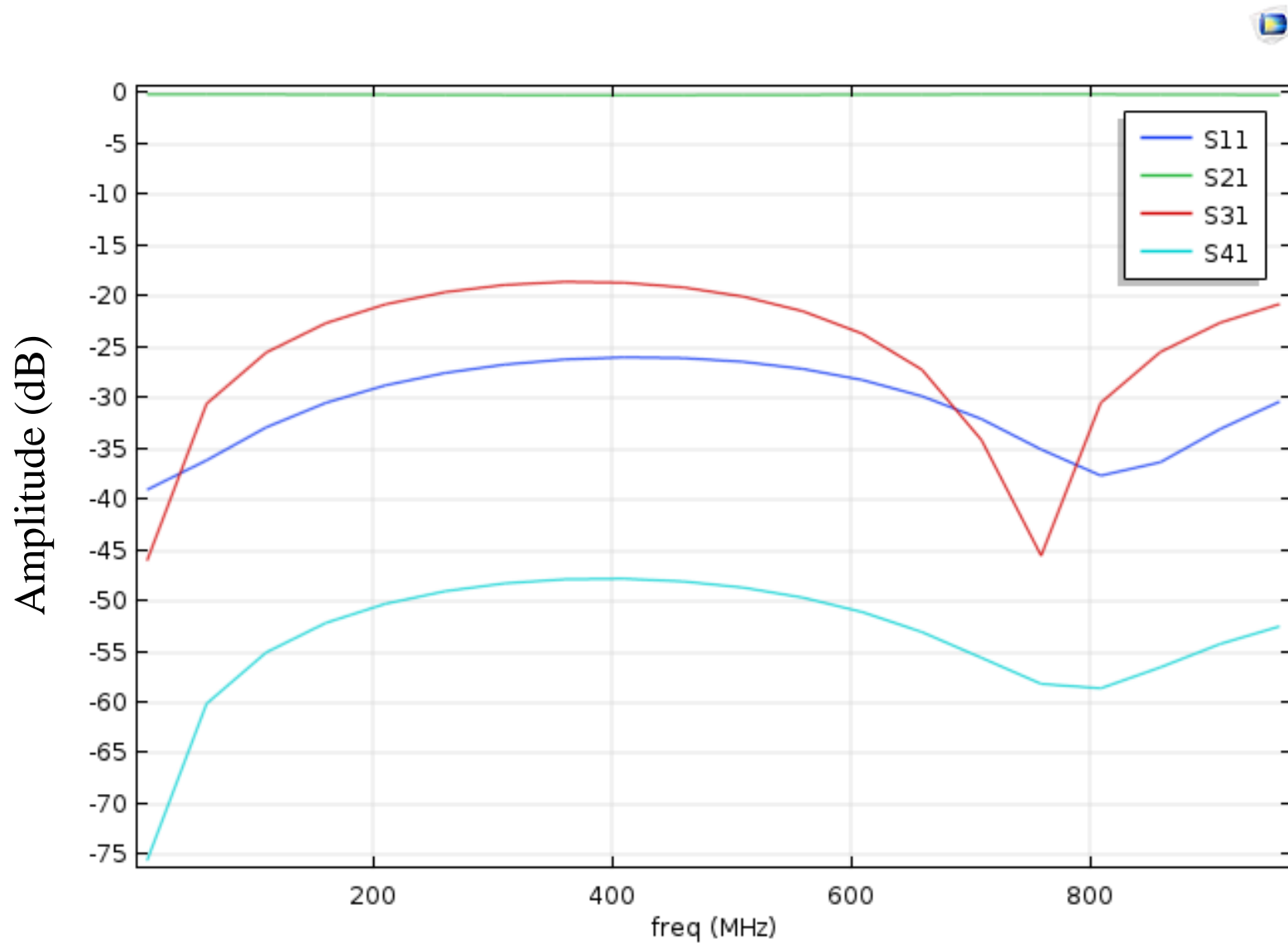
グラウンド（無限に広いと仮定）の上の1本線の特性インピーダンスは、鏡像の原理を用いて平行2本線路の結果から導出することができる。

電界は右図のようになっており、GND面に垂直に入っているので、電磁界分布は変わらない（解の一意性）。GNDから上の空間のみを考えると、電流は同じでありながら（GNDにも磁界の接線成分に比例する電流が流れる）、電圧は電界の接線線積分なので、半分になっている。すなわち、特性インピーダンス $Z=V/I$ は平行2本線路の1/2の値となる。



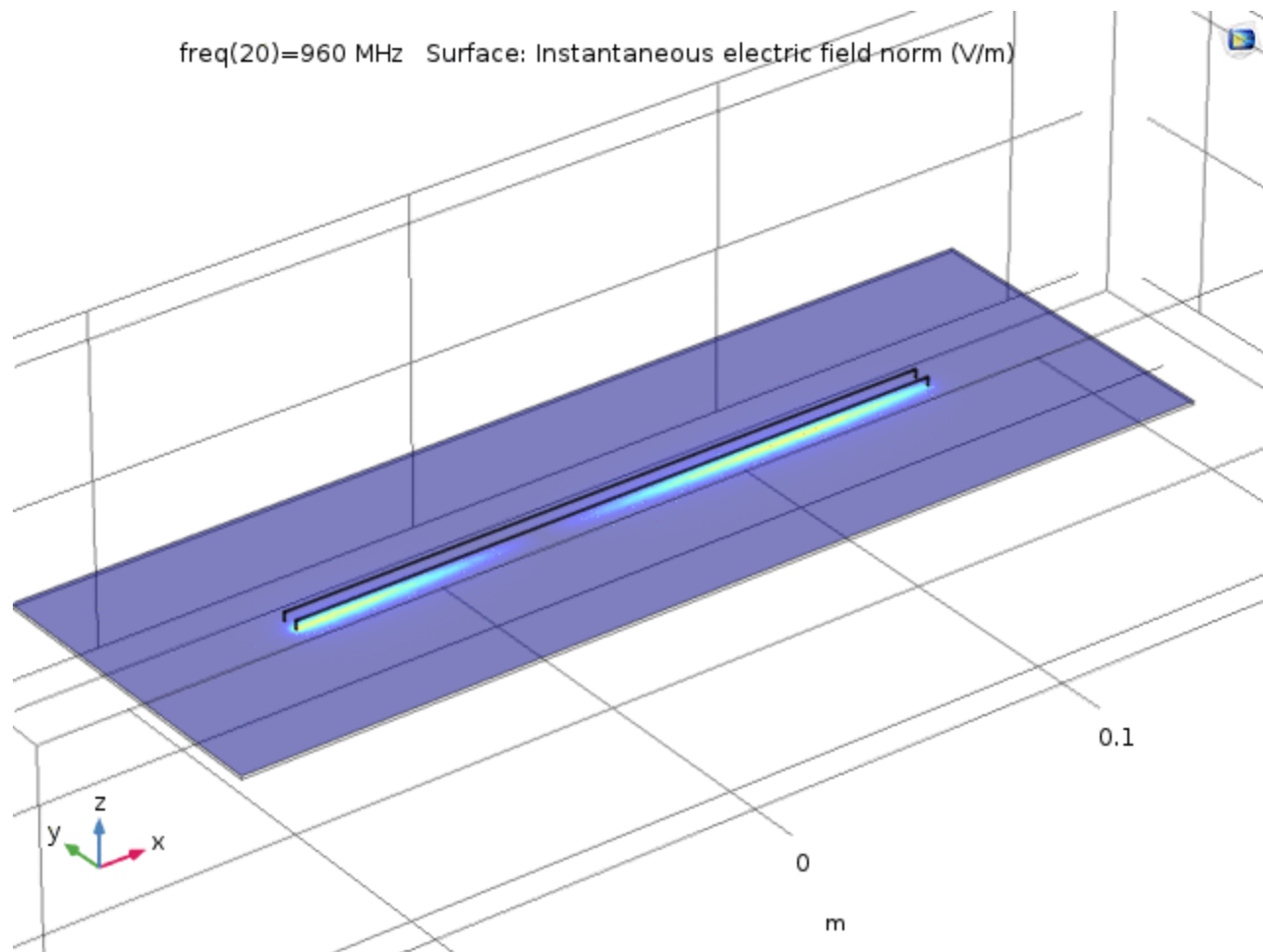
導体上の平行2本線路 (4ポート)

No. 129



導体上の平行2本線路 (4ポート)

No. 130



http://www.takuichi.net/em_analysis/canonical/coaxial_cable/comsol_coaxial_cable.pdf

- 高次モードが伝搬しない条件で用いる。
- 高次モードが伝搬可能な場合、不連続部などで高次モードにエネルギーが移ってしまうと波形がひずんだり、不要放射が生じたりする恐れがある。

4. シミュレーションの有効性

4.1 シミュレーションの有用性

4.2 シミュレーションと実験の差異について(モデル化)

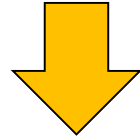
4.1 シミュレーションの有用性

- シミュレーション(シミュレータの使用)には最初は多くの予算と時間がかかる。
- (勉強したくないのに)勉強する必要が生じる。
- 素子、材料定数などの評価、モデル化の検証などに最初は多くの時間がかかる。



- 最初だけ苦労すれば、あとはパラメータを変更してシミュレーションするだけ。
- 現象を部分に分解して物理的に解釈できる。(問題が生じたときに原因、全容が把握できる)
- 実験とのダブルチェックができる。
- 試作回数を減らせて、結果的に経費・時間が削減できる。

- 実験と合わないとき。シミュレータが悪いのか？



- 実験が悪いかも。
- 実験の校正が悪いかも。それがうまくできている場合は、シミュレーションで実験に対応したモデル化がうまくできていない。→ 励振部、境界条件が難しい。また、材料定数についても、特に高周波ではカタログ値を信頼してはいけない。
- シミュレータでメッシュの細かさが十分か(さらに細かくした場合にも結果が変わらないことを確認)