

# 解説

## EMC 技術者教育用電磁界アニメーション

一般財団法人 VCCI協会  
教育研修専門委員会



## **まえがき**

このアニメーションは、一般財団法人VCCI協会が EMC 技術者教育の補足資料として開発したものです。

分かりにくい電磁界の現象を、アニメーションにすることにより、より深く理解してもらうことが目的です。

## 【シート2】

### 解析モデルおよび解析手法

取り扱っているモデルおよび現象は、

半波長ダイポールアンテナ

オープンエンド導波管

マイクロストリップライン

筐体からの漏洩電磁波

ケーブルからの放射

です。アニメーション化するためには電磁波解析を行う必要がありますが、ここでは、ここに記載されているような、それぞれの現象に適した解析手法を用いています。

### 解析モデルおよび解析手法

No.	モデル	解析手法	シート
1	半波長ダイポールアンテナ	モーメント法	3 ~ 9
2	オープンエンド導波管		10 ~ 14
3	マイクロストリップライン	FDTD法	15 ~ 20
4	筐体からの漏洩電磁波	モーメント法	21 ~ 28
5	ケーブルからの放射		29 ~ 35

### [シート3]

## 半波長ダイポールアンテナ……自由空間における放射

半波長アンテナは、CISPRのEMI測定などに使用されるもっとも基準となるアンテナです。アンテナエレメント長が対象とする周波数の波長の1/2なので、半波長ダイポールアンテナと呼ばれています。まず、自由空間に存在する半波長アンテナの放射現象をアニメーション化しています。解析モデルは、

- ・解析周波数[MHz] : 30, 100, 200
- ・アンテナ 長さ[m] : 5.0, 1.5, 0.75
- 直径[mm]: 1.0
- 波源 : 1Vrms 正弦波 内部インピーダンス 50

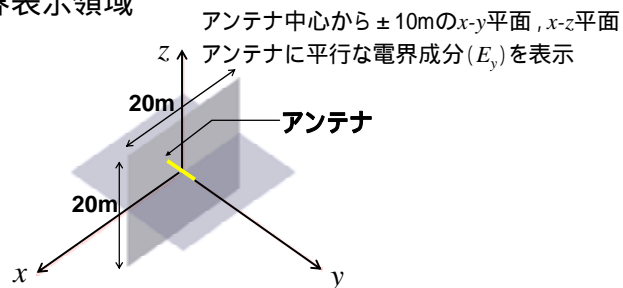
アンテナの長さは、各解析周波数の波長に対して、その1/2になっています。表示領域は、アンテナ中心から±10[m]のx-y平面とx-z平面であり、アンテナに平行な電界成分( $E_y$ )を表示します。

## 1. 半波長ダイポールアンテナ 自由空間における放射

### 解析モデル

- ・解析周波数: 30MHz, 100MHz, 200MHz
- ・アンテナ  
長さ: 5.0m, 1.5m, 0.75m  
直径: 1.0mm  
波源: 1Vrms正弦波 出力インピーダンス50Ω

### 電界表示領域



3

All Rights Reserved Copyright 2005 VCCI

### [シート4]

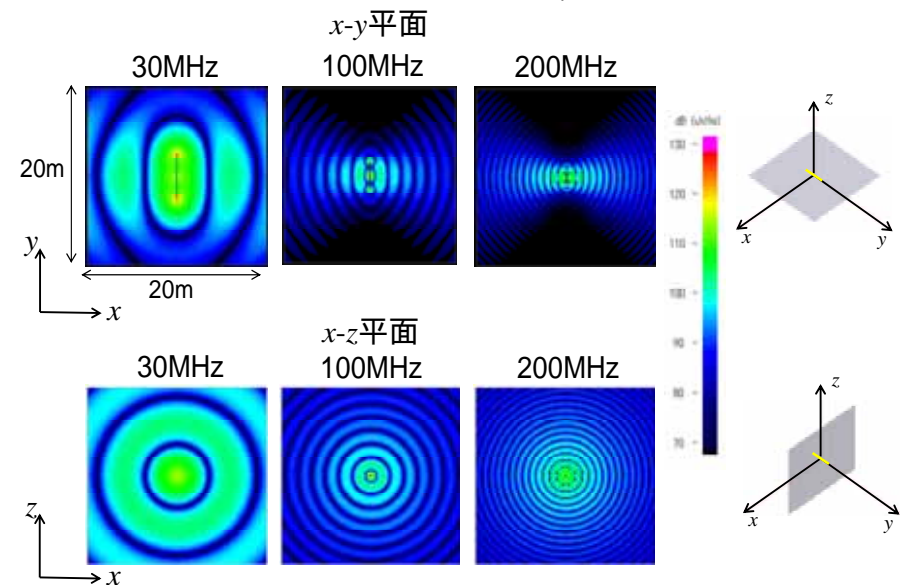
## アンテナ周辺の電界( $E_y$ )

上段のアニメーションは、x-y平面における $E_y$ 成分の電界分布を示しています。電界が波となって、x方向に伝搬していく様子が分かります。また、周波数が高くなるほど波の山と谷の間隔が細かくなっています。

下段のアニメーションは、x-z平面における $E_y$ 成分の電界分布を示しています。この方向から見ると、電界 $E_y$ はアンテナに対して同心円状に伝搬していくことが分かります。

アニメーション

## アンテナ周辺の電界( $E_y$ )



4

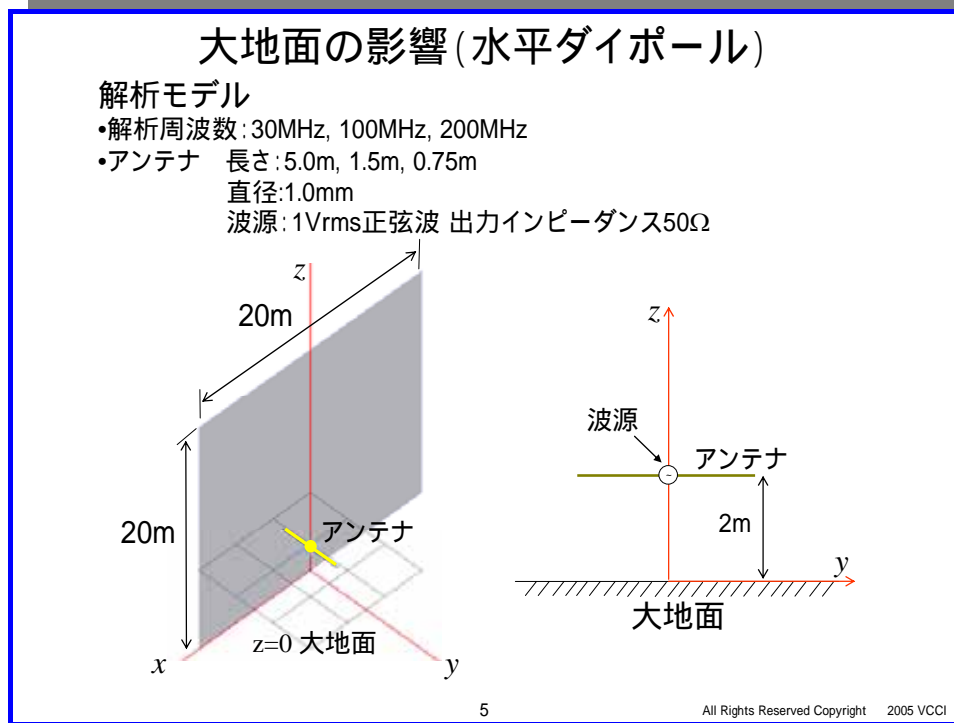
All Rights Reserved Copyright 2005 VCCI

**【シート5】  
大地面の影響(水平ダイポール)**

大地面が存在する場合は、アンテナの放射現象は自由空間の場合と異なってきます。

解析モデルに関して、周波数、アンテナの構造、波源は自由空間の場合と同じです。アンテナは、大地面上 1m の高さに水平に置かれています。このようなアンテナを水平ダイポールアンテナと呼びます。

電界の表示領域は、アンテナの中心を通る  $x - z$  平面です。

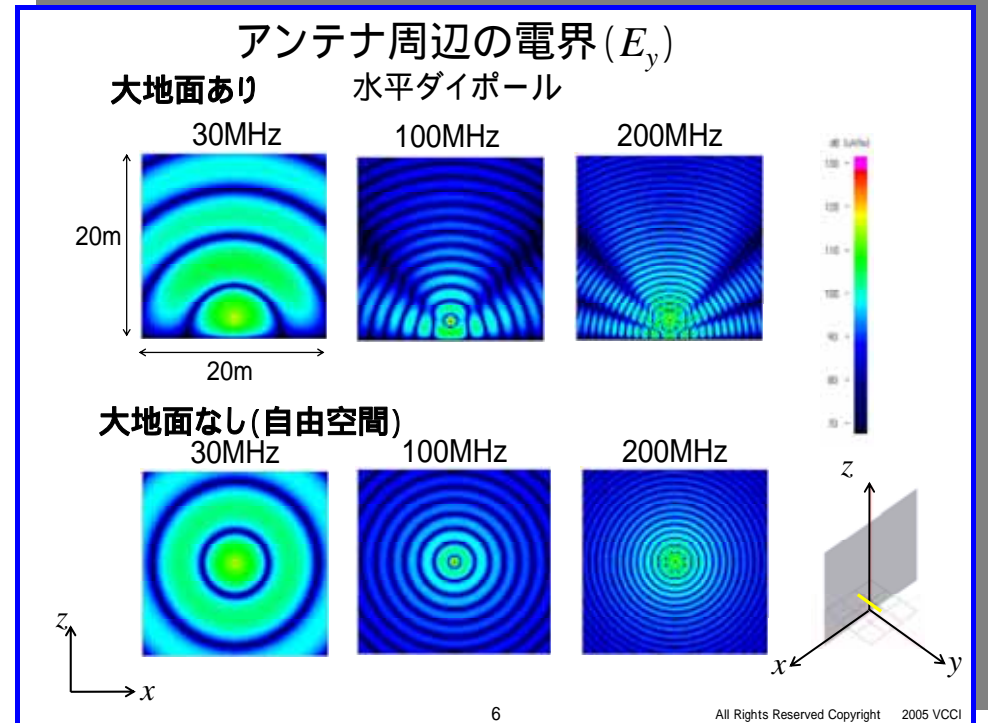


**【シート6】  
アンテナ周辺の電界( $E_y$ ) ……水平ダイポール**

上段に大地面ありの場合の  $x - z$  平面における  $E_y$  成分の電界分布を示しています。

下段には、比較のため、大地面なし(自由空間)の場合を示しています。自由空間の場合、 $E_y$  成分の電界はアンテナに対して同心円状に伝搬します。しかし、大地面ありの場合は、大地面のインピーダンスが低いため、大地面における  $E_y$  成分の電界はゼロになるように、電界が分布します。

アニメーション



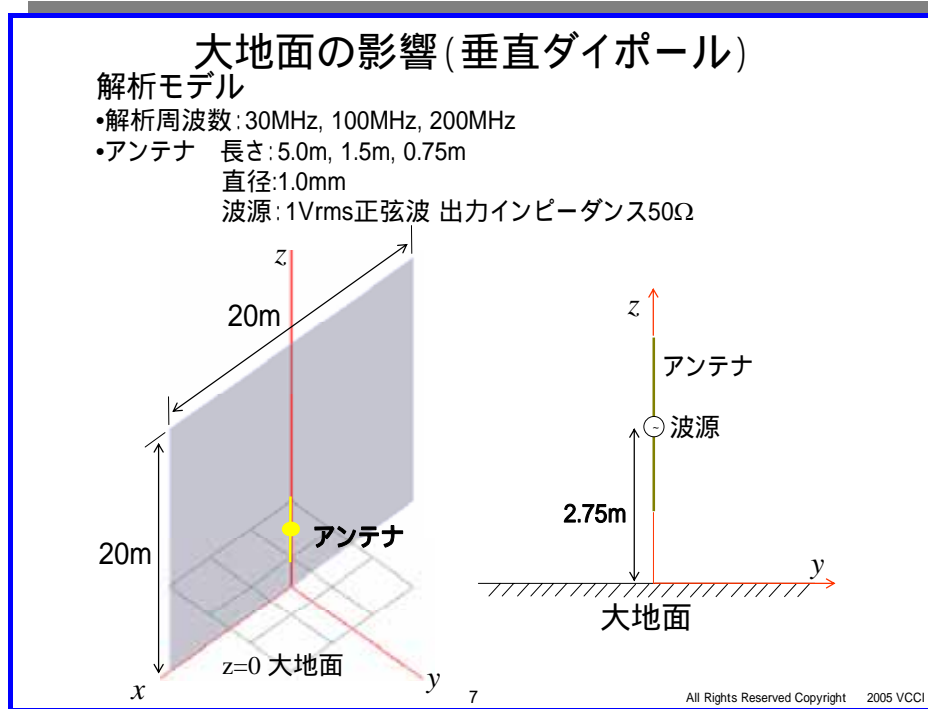
**【シート7】  
大地面の影響(垂直ダイポール)**

大地面が存在する場合で、アンテナの中心点が大地面上 2.75m のところに垂直に置かれている場合について示します。

このようなアンテナを垂直ダイポールアンテナと呼びます。

解析モデルに関して、周波数、アンテナの構造、波源は自由空間および水平ダイポールの場合と同じです。

電界の表示領域は、アンテナを含む  $x - z$  平面です。



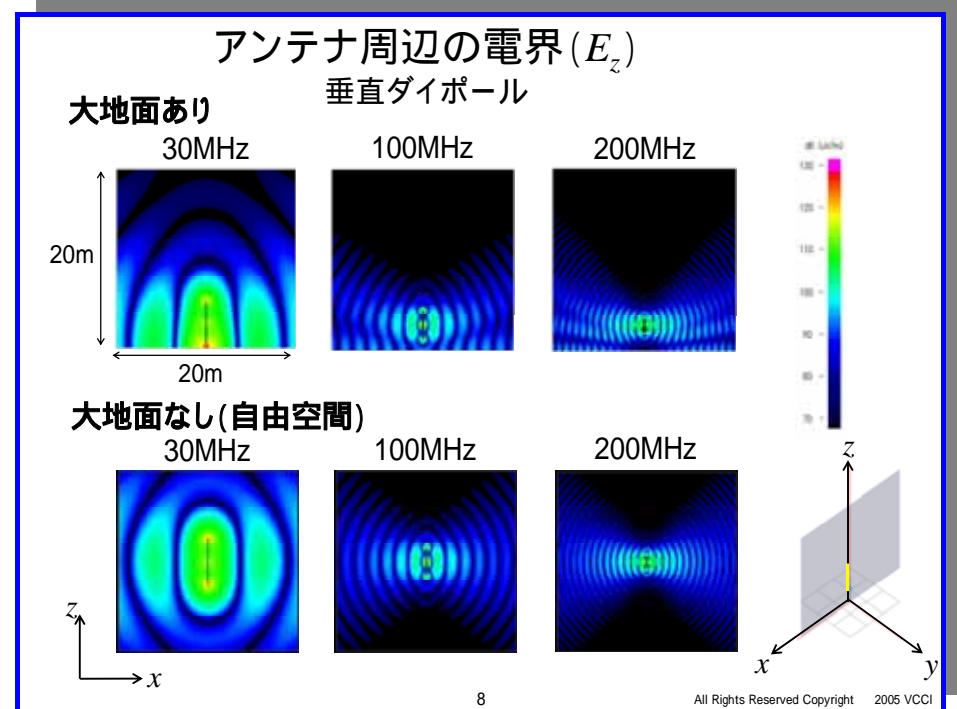
**【シート8】  
アンテナ周辺の電界( $E_z$ )・・・垂直ダイポール**

上段に大地面ありの場合の  $x - z$  平面における  $E_z$  成分の電界分布を示しています。

下段には、比較のため、大地面なし(自由空間)の場合を示しています。

自由空間の場合、 $E_z$  成分の電界はアンテナ中心から上下対称に電界が分布しています。しかし、大地面ありの場合は、大地面の影響により電界の分布が異なります。垂直ダイポールが放射する電界  $E_z$  は、水平ダイポールの場合の  $E_y$  成分とは異なり、大地面上の電界はゼロとはなりません。

アニメーション

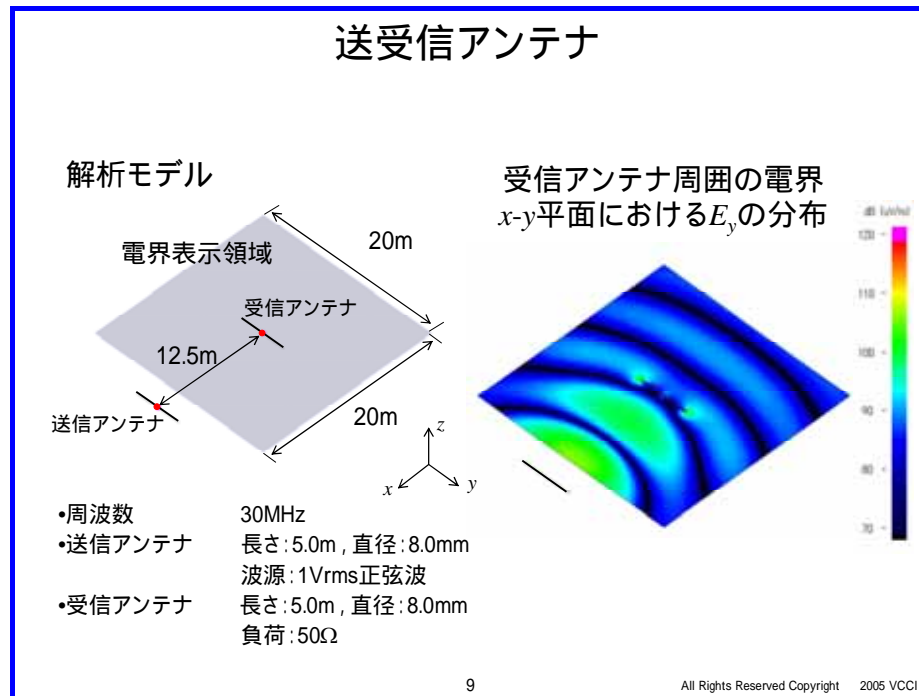


## 【シート9】 送受信アンテナ

条件:周波数 :30MHz、水平偏波  
送信アンテナ :1/2 波長ダイポールアンテナ  
受信アンテナ :1/2 波長ダイポールアンテナ  
アンテナ間距離 :12.5m

電波が受信アンテナにどのように取込まれるかを直感的に理解できるようにアニメーション化します。受信アンテナの先端部に電界が集中している様子がわかります。この様子からも類推できますが、エレメントの先端の形状がアンテナの特性に大いに寄与しています。また、受信アンテナの後方の電波の伝わり方を見ると、半波長程度離れた空間の電界はすでに受信アンテナの影響がなかったかのような状態に回復していることがわかります。

アニメーション



**【シート10】  
オープンエンド導波管**

導波管は、導体でできた長方形の断面をもつ管であり、特定の周波数の電磁波を低損失で伝搬することができます。オープンエンド導波管は、終端が開口されている導波管であり、終端部から漏れる電磁波を利用することにより、1GHz を超える場合の標準電界発生ツールとして使われています。

**【シート11】  
導波管内の電磁界・・・等高線表示**

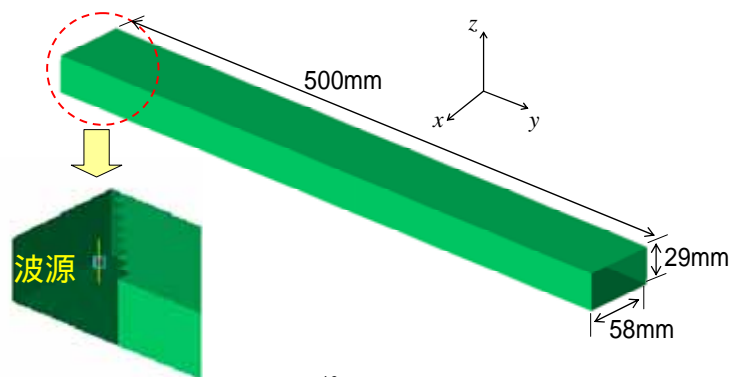
本シートは、電界分布と磁界分布を等高線表示により示した場合のアニメーションです。導波管内を電界と磁界が伝搬していく様子が分かります。

アニメーション

**2. オープンエンド導波管**

解析モデル

- 導波管寸法 : 29mm × 58mm × 500mm  
WRJ-4相当 (遮断周波数2.6GHz)
- 解析周波数 : 3GHz



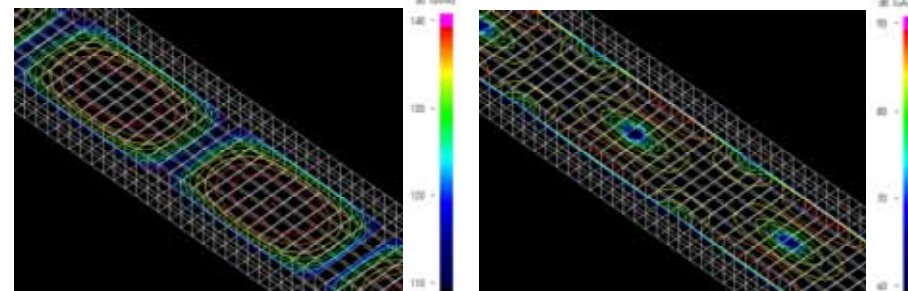
10

All Rights Reserved Copyright 2005 VCCI

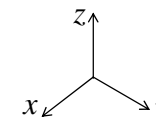
**導波管内の電磁界  
等高線表示**

電界分布

磁界分布



- 導波管寸法 : 29mm × 58mm × 500mm  
WRJ-4相当 (遮断周波数2.6GHz)
- 解析周波数 : 3GHz



11

All Rights Reserved Copyright 2005 VCCI

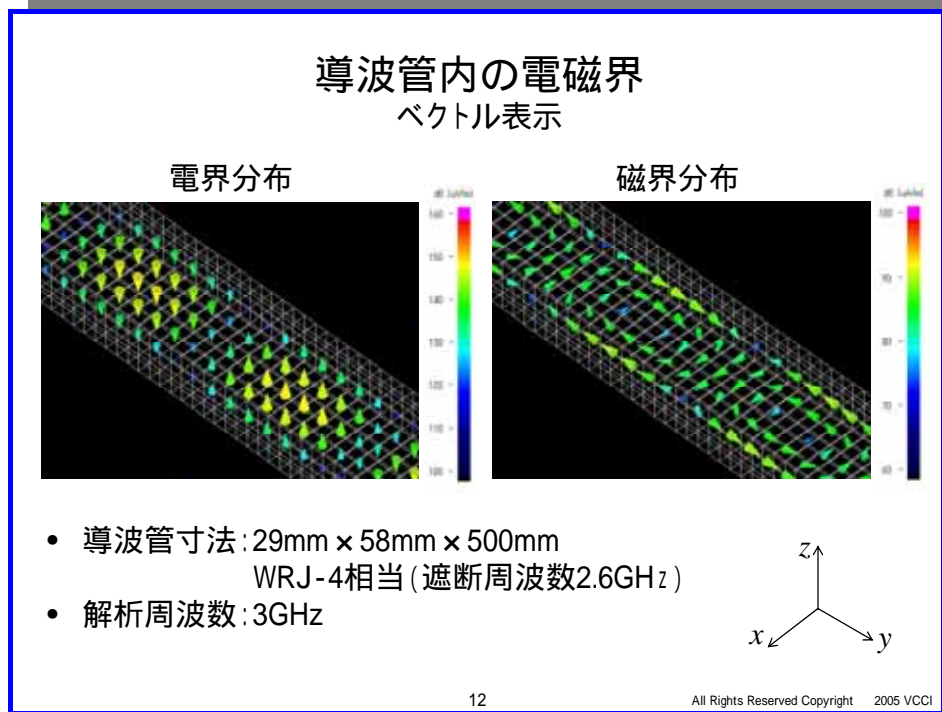


## 【シート12】

### 導波管内の電磁界……ベクトル表示

本シートは、電界分布と磁界分布をベクトル表示により示した場合のアニメーションです。電界は z 方向に発生し、y 方向に伝搬しています。磁界は、電界とループ状に鎖交するように発生しながら、y 方向に伝搬しています。

アニメーション

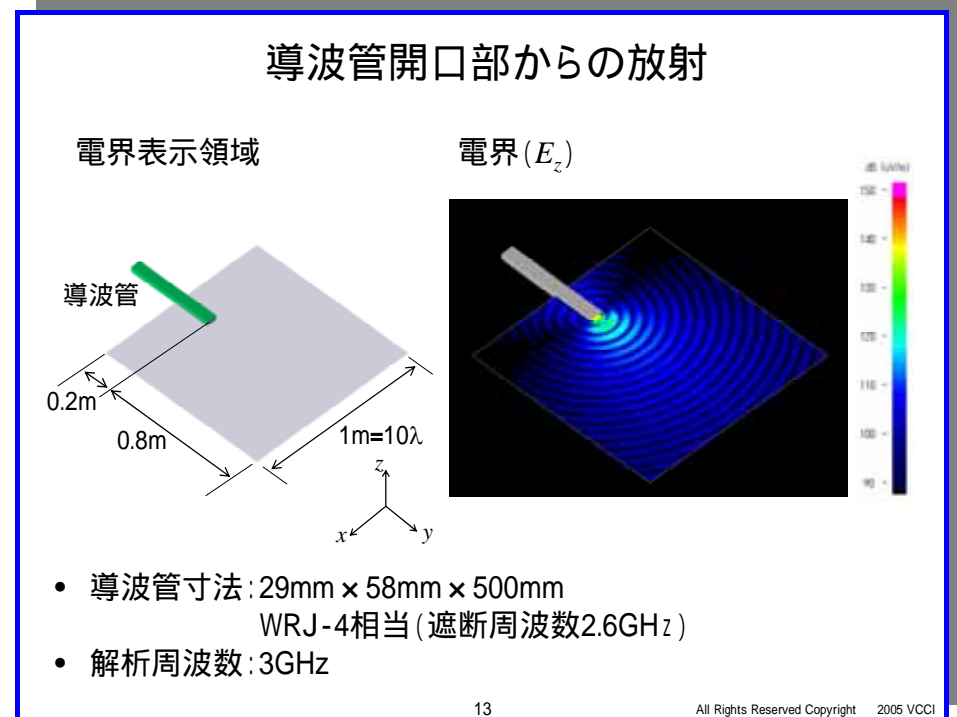


## 【シート13】

### 導波管開口部からの放射

導波管の開口部から電界が漏れる様子が、アニメーションにより示されています。表示領域は、 $10 \times 10$  (  $\lambda$  は波長) です。z 方向の電界( $E_z$ )が、終端部から同心円状に伝搬しています。

アニメーション

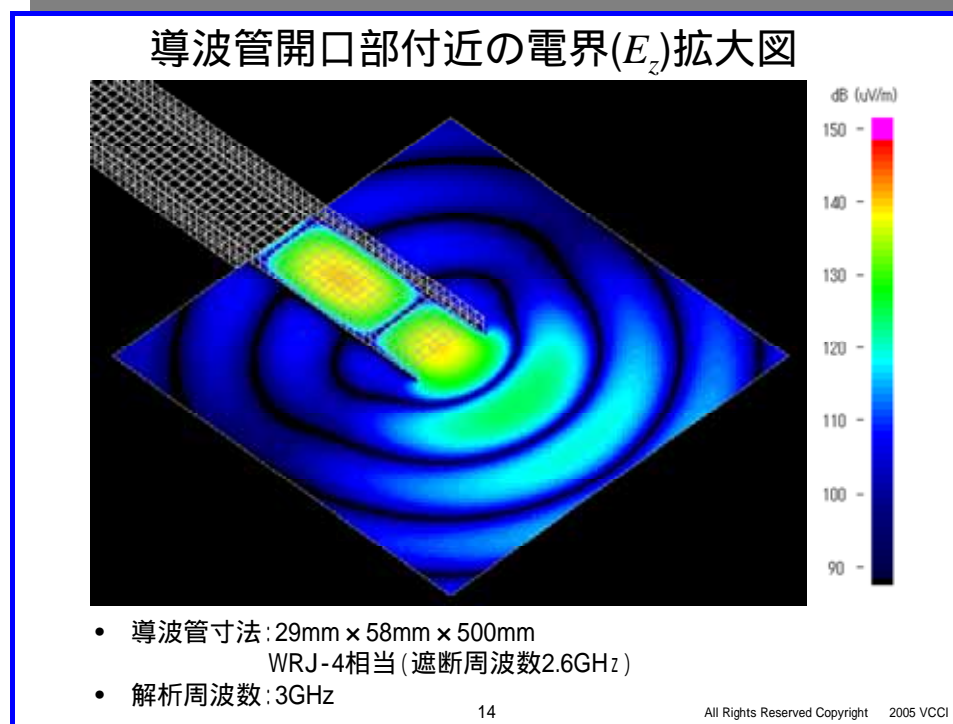


**【シート 14】**

**導波管開口部付近の電界( $E_z$ )拡大図(3 × 3 )**

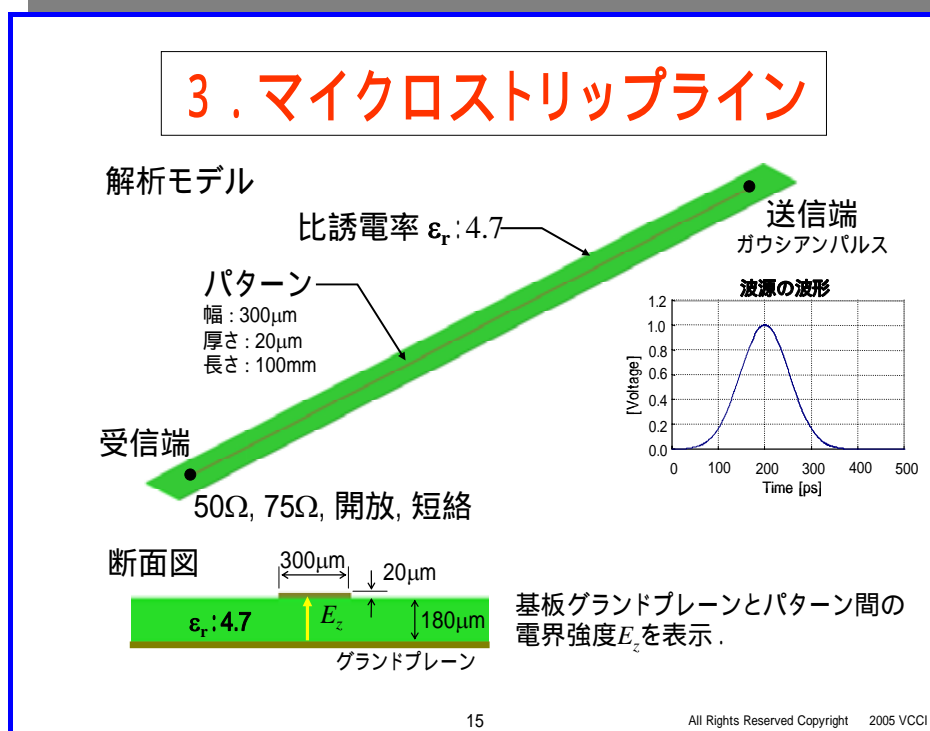
本シートはオープンエンドからの放射を拡大して、アニメーション表示したものです。  
電界( $E_z$ )が漏れる様子が、より詳細に分かります。

アニメーション



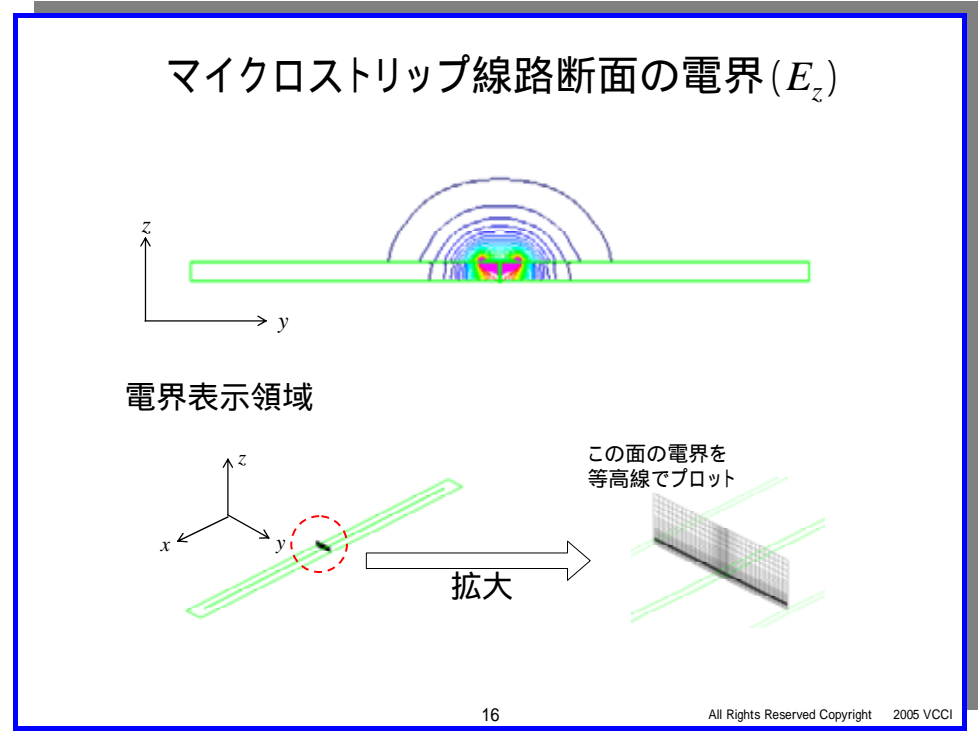
**【シート15】  
マイクロストリップライン**

マイクロストリップライン構造の線路に、波源としてガウシアンパルスを印加した時、負荷側の終端の違い(50Ω (整合)、75Ω、開放、短絡)による反射を FDTD により基板グラウンドとパターン間の電界強度(グラウンドプレーンと垂直方向の電界  $E_z$ ) を計算させたものです。



**【シート16】  
マイクロストリップ線路断面の電界( $E_z$ )**

マイクロストリップ線路の近傍に電界が集中しています。また、線路の端(断面の両側)の電界が高いことがわかります。

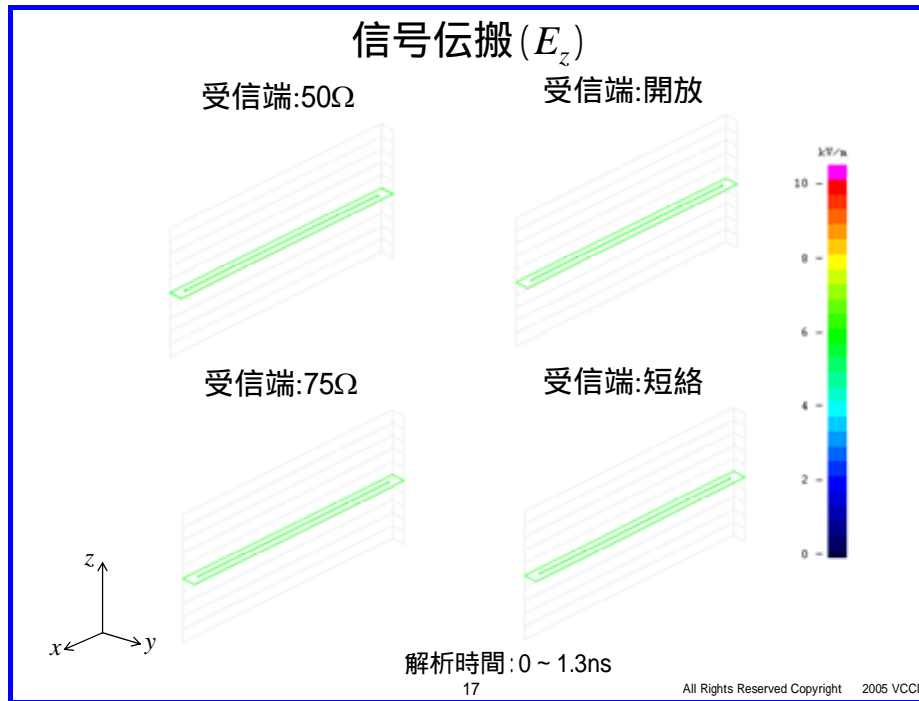


## 【シート17】

### 信号伝播(Ez)

シート15のFDTDによる計算結果です。整合終端(50Ωで終端)の場合、進行波のみが表示され、反射波は観測されません。75Ωで終端した場合、進行波成分の一部が反射波として反対方向に伝播する様子がわかります。負荷側を開放した場合、負荷部での振幅が2倍となり、反射波の振幅は進行波と同じになります。短絡した場合は、負荷部で振幅が0、反射波の振幅は進行波と振幅が同じで極性が逆になります。

### アニメーション

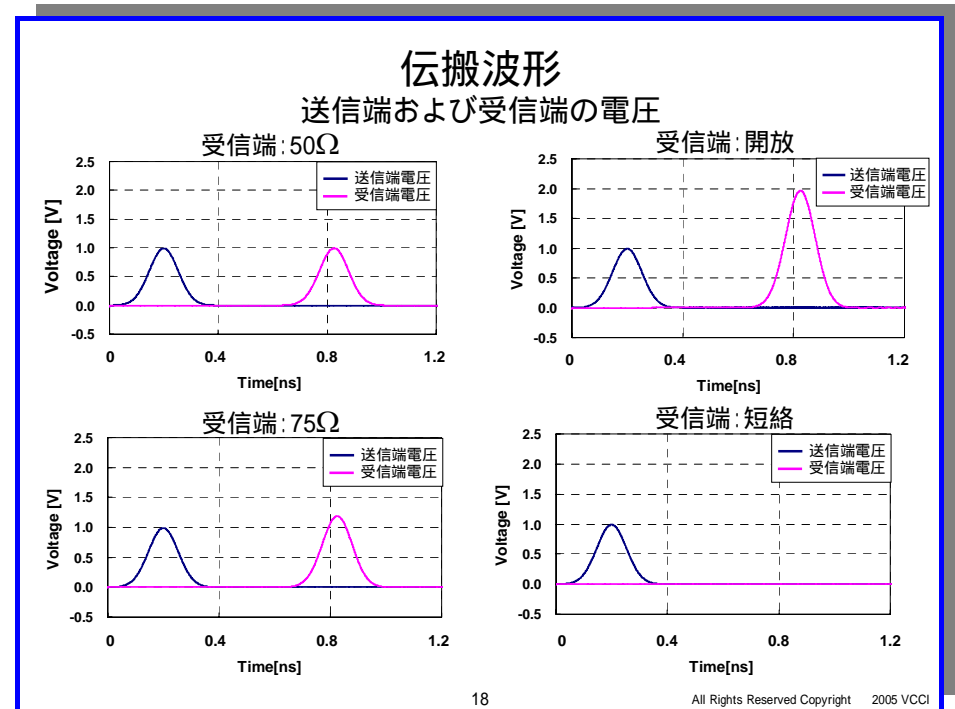


## 【シート18】

### 伝播波形

シート15の各モデルにおける波源と負荷での電圧波形です。単位長さ(1m)あたりの伝搬遅延時間は約7.2(ns/m)です。

75Ωで終端した場合、受信端での電圧は波源電圧の1.2倍になります。



## 【シート 19】

### 線路コーナー部での信号伝播

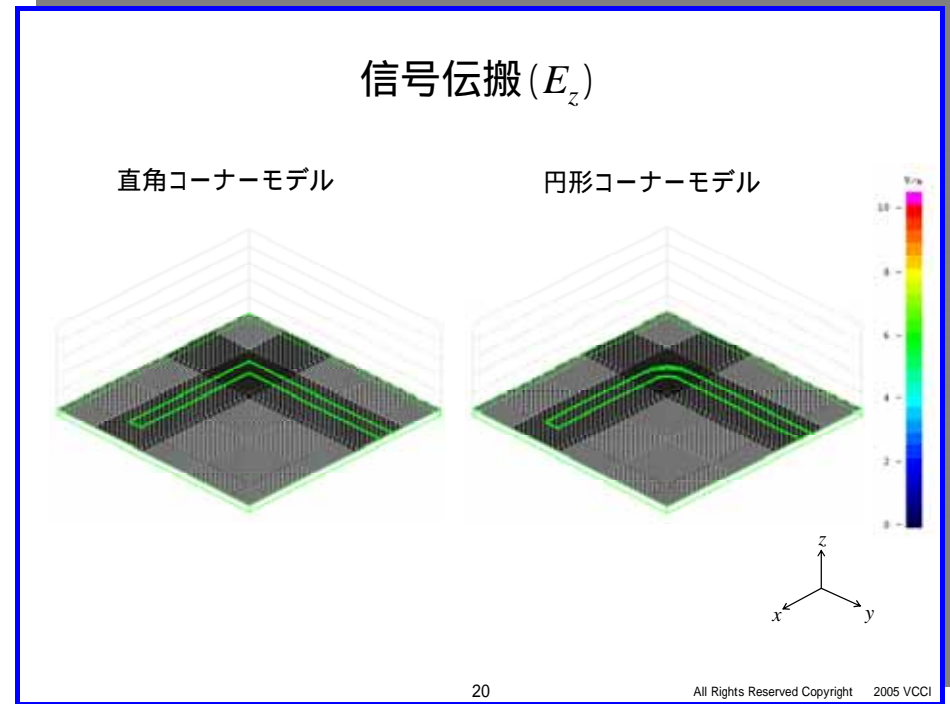
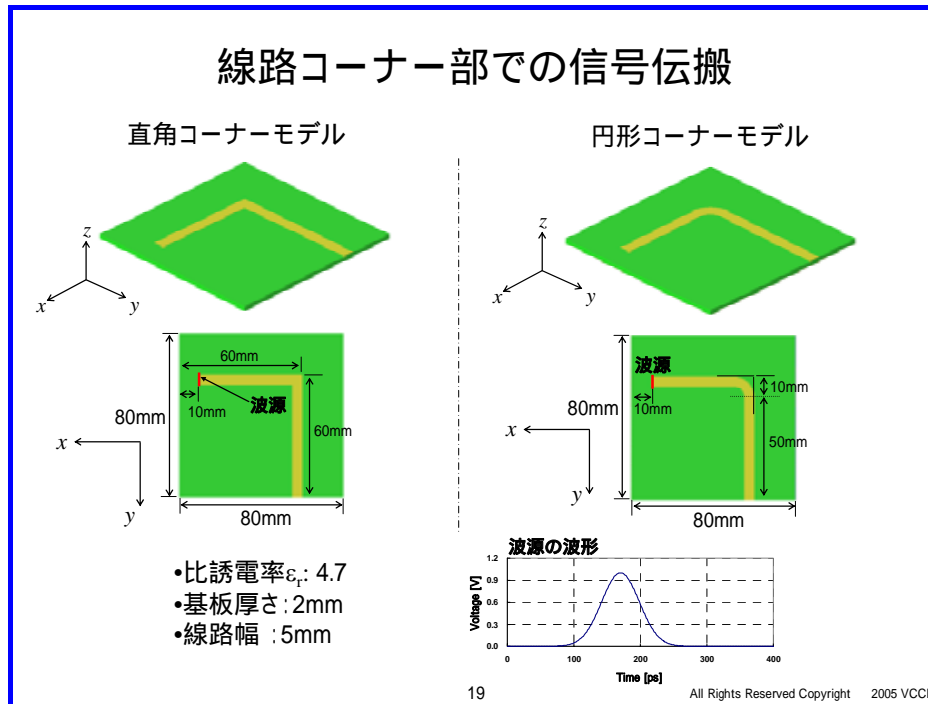
プリント回路基板上のパターンを 90° 曲げる場合、そのコーナーを円形(内側の半径:5mm、外側の半径:10mm)にした場合と直角に曲げた場合について、FDTD で計算します。

## 【シート 20】

### 信号伝播( $E_z$ )

シート 19 のモデルの計算結果です。直角に曲げた場合、円形で曲げた場合と比較して、角の部分で線路のインピーダンスの変化により、電界( $Z$ 方向)が大きくなり、その後、反射が発生している様子がわかります。

アニメーション



## 【シート 21】

### 筐体からの漏洩電磁波……スリット長を変化させる

筐体の接続部分等に隙間がある時のシミュレーションです。隙間の長さが変わると漏洩電磁波が変わる様子を示します。筐体内の波源の偏波面(スリットとの向き関係)によって漏洩が変わることが分かるよう、種々の条件について計算しました。

## 【シート 22】

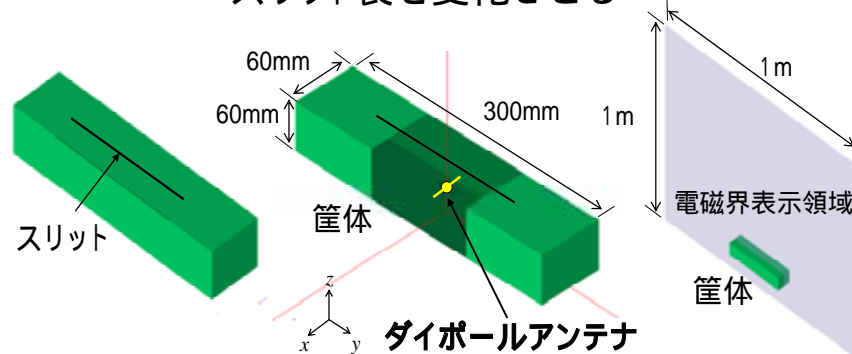
### 漏洩電磁界(H<sub>y</sub>)

シート 21 のモデルの計算結果(磁界分布)です。スリット長が波長の 1/2 の時に共振します。

アニメーション

## 4. 筐体からの漏洩電磁波

スリット長を変化させる

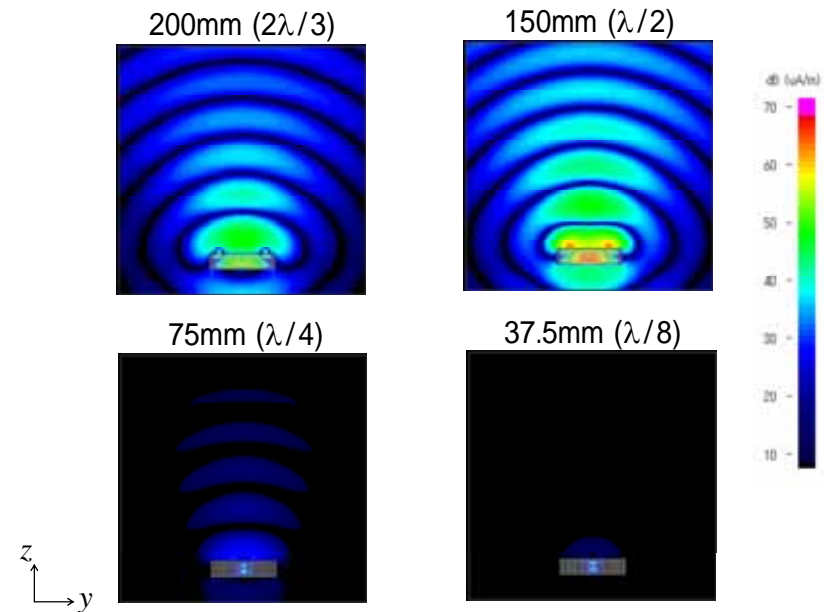


- ダイポールアンテナを筐体内中央に、スリットと直交方向に設置
- 解析周波数: 1000MHz
- 波源 : 1Vrms正弦波
- 筐体寸法: 60mm × 60mm × 300mm
- スリット長: 200mm ( $2/3\lambda$ ), 150mm ( $1/2\lambda$ ), 75mm ( $1/4\lambda$ ), 37.5mm ( $1/8\lambda$ )

21

All Rights Reserved Copyright 2005 VCCI

## 漏洩電磁界(H<sub>y</sub>)



22

All Rights Reserved Copyright 2005 VCCI

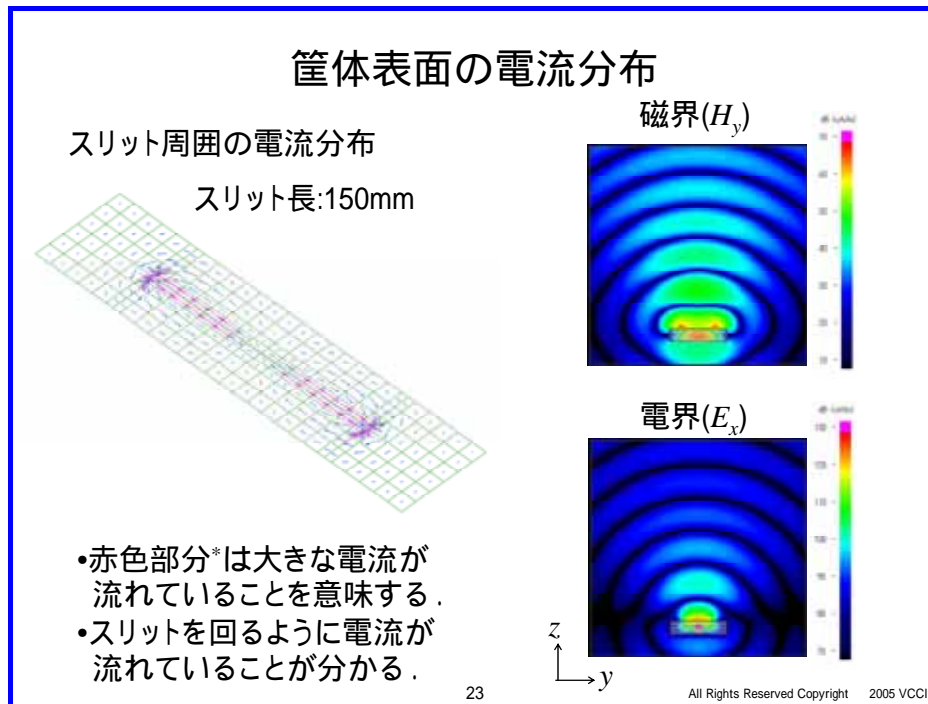
**【シート23】  
筐体表面の電流分布**

共振時におけるスリット部分での電流分布の表示、および磁界・電界分布の表示です。電界の向きはスリットと直交した向きにダイポールアンテナを置いた場合と同じです。

赤色部分\*は大きな電流が流れていることを示しています。スリットの周りを回るように電流が流れていることが分かります。

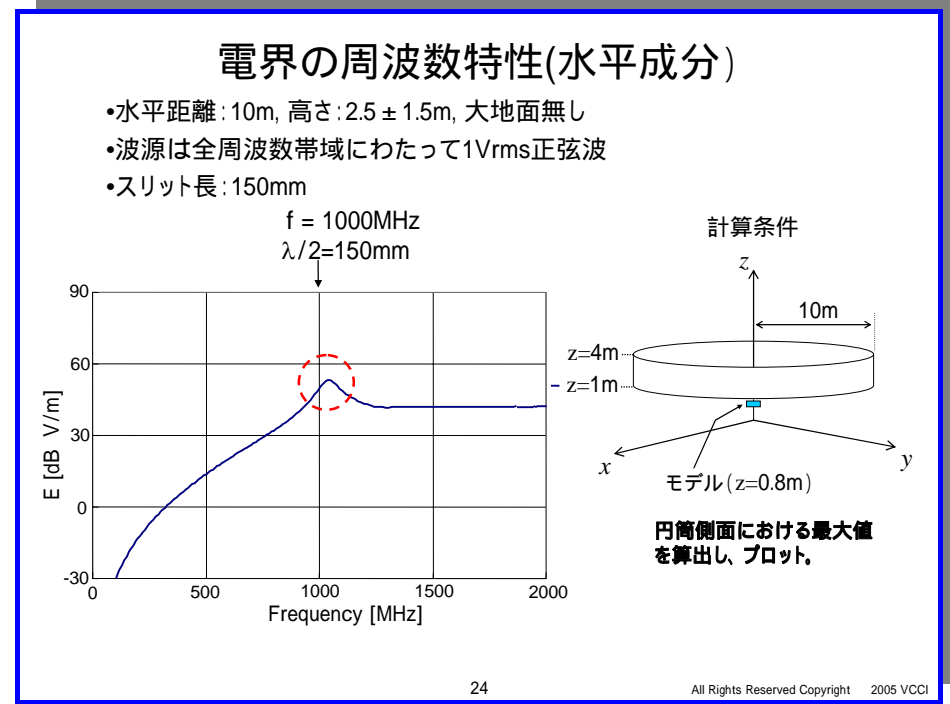
\* CD-ROM を参照

アニメーション



**【シート24】  
電界の周波数特性(水平成分)**

シート21のモデルを高さ  $Z=0.8\text{m}$  に配置し、半径 10m、高さ 1-4m の円筒面(アンテナ距離 10m でアンテナを 1-4m 変化、ターンテーブルを 1 回転させた時を想定して電界強度を計算します。ただし、 $xy$  平面(大地面)は無反射と仮定したときの電界強度(水平成分)の最大値を周波数ごとにプロットしたものです。波源の実効電圧は 1V です。1GHz 付近において、共振がみられます(スリット長が 1/2 波長(150mm)によるもの)。

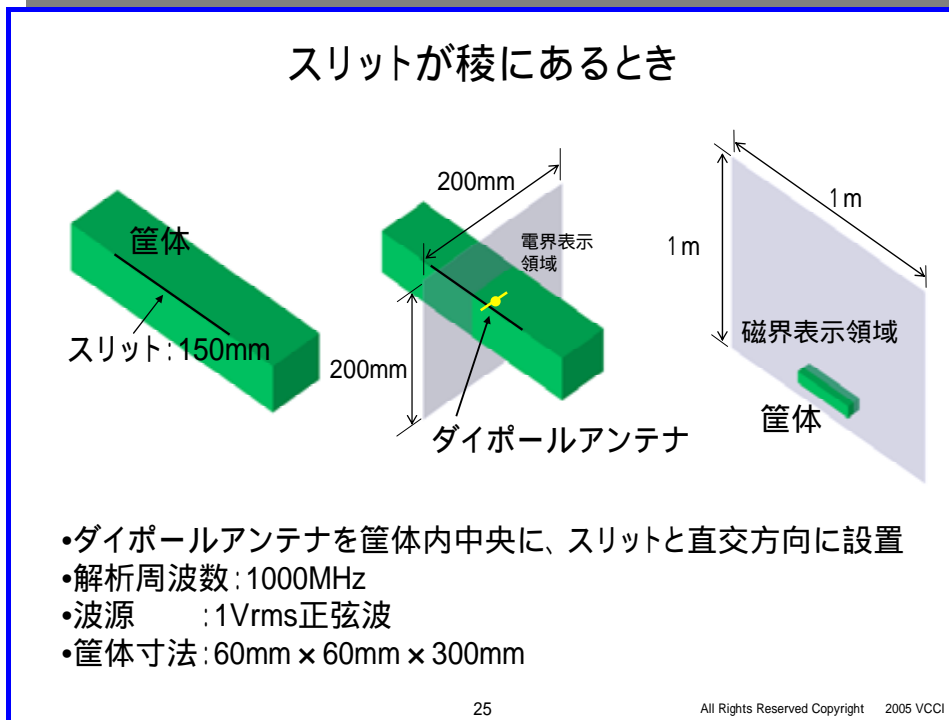




## 【シート25】

### スリット位置が稜にあるとき

シート23のモデルにおいて、スリットの位置を筐体の角(面と面の接合部)とした場合です。筐体寸法、解析周波数、波源の位置に関しては、シート21のモデルと同じです。

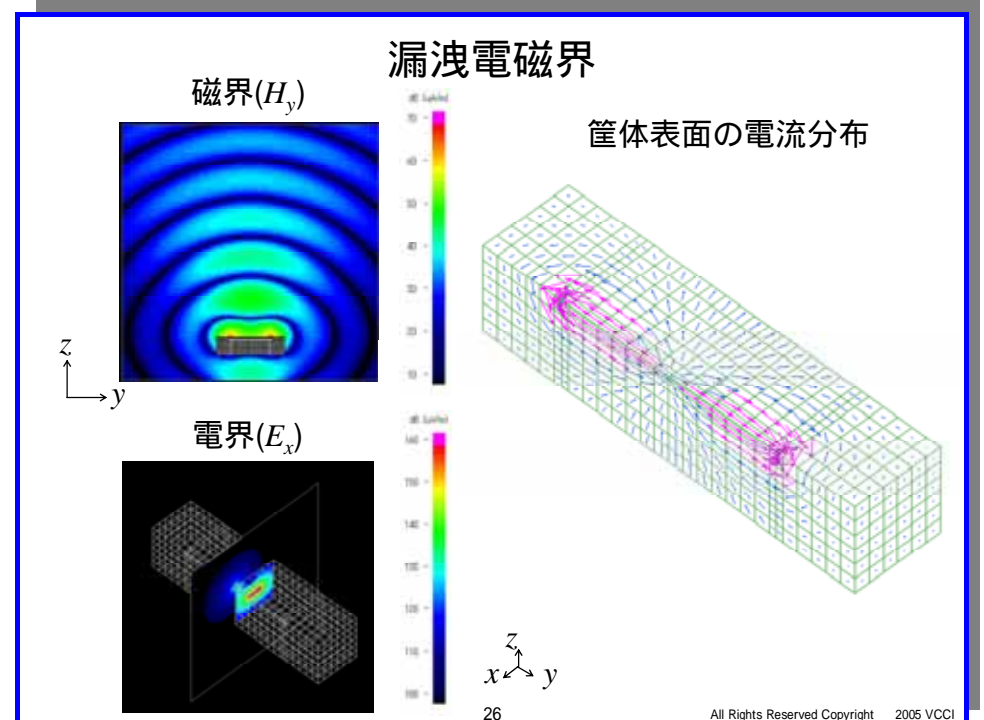


## 【シート26】

### 漏洩電磁界

2つの面の境界にある場合、スリットが筐体のある面の中央にある場合とほぼ同じレベルの放射が観測されます。

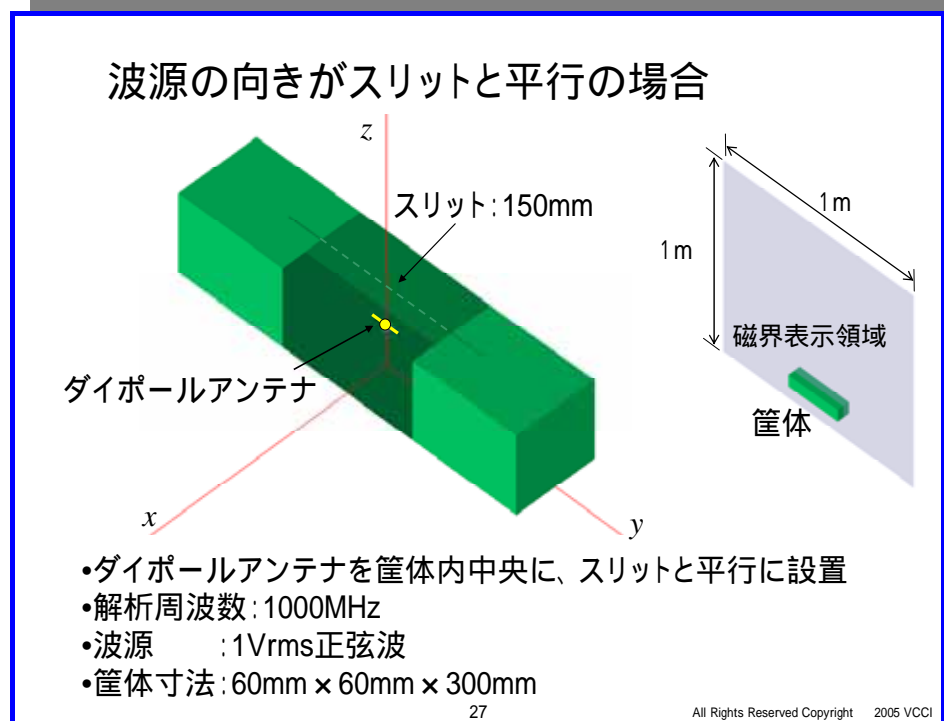
アニメーション





**【シート27】  
波源の向きがスリットと平行の場合**

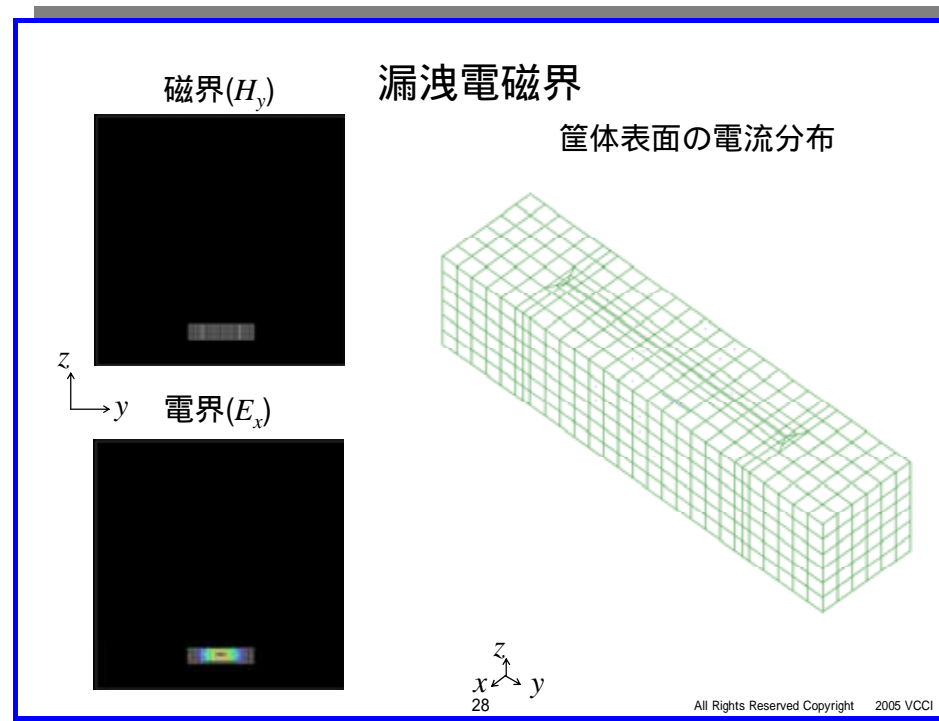
筐体のスリットに対し波源(ダイポールアンテナ)が平行にある場合の電磁界分布と電流を検討します(シート27~28)



**【シート28】  
電磁界分布・電流**

シート22と比較してください。波源のダイポールアンテナが筐体スリットの向きに対して平行な場合は、電磁波が漏れにくくなります。

アニメーション

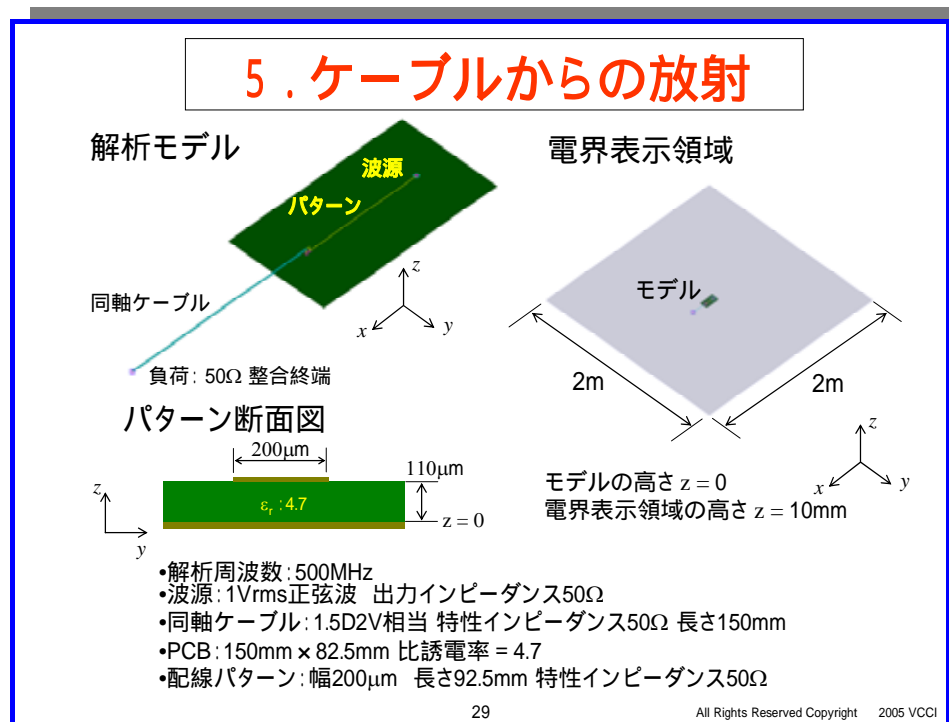


## 【シート29】 ケーブルからの放射

基板からコネクタを介し同軸ケーブルに接続した場合の電磁界放射を検討します (シート29~32)。

同軸ケーブルの長さは  $\lambda/4$ 、また基板の長さも  $\lambda/4$ 相当となっており、合計で  $\lambda/2$ の長さになっています。

電界の様子を表示している領域は、 $2\text{m} \times 2\text{m}$  です。また、アニメーション表示する電界は、基板のグランドパターンを基準として  $10\text{mm}$  の高さの位置で表示します。

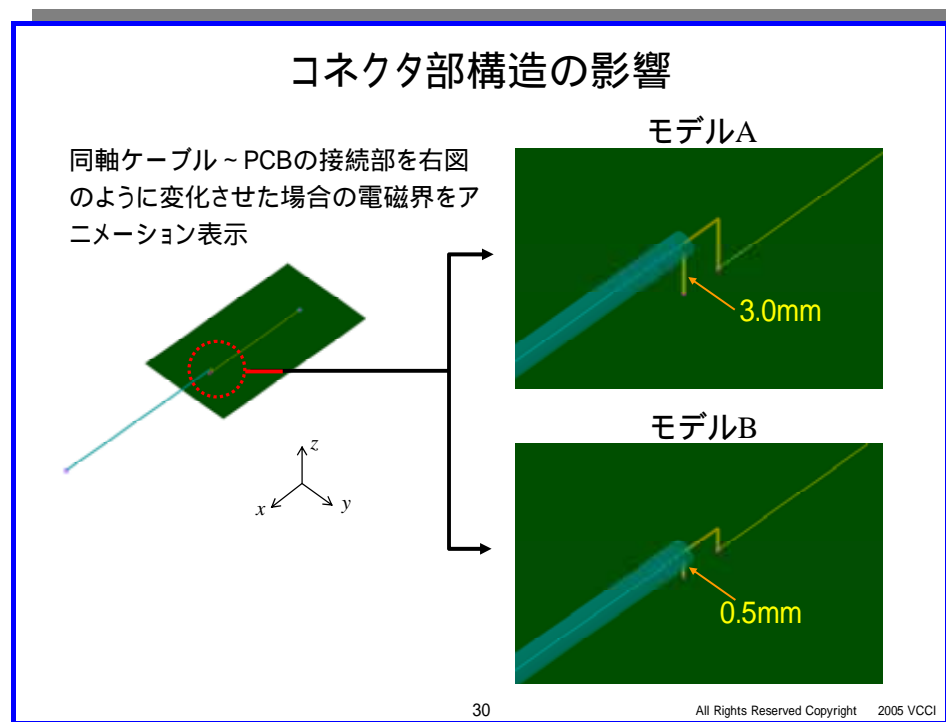


## 【シート30】 コネクタ部構造の影響

本解析では、結線部(コネクタ)が駆動源となり、同軸ケーブルと基板がアンテナ部位となるモデルを想定しています。

このとき、コネクタ高さを変化させたときの影響を調べます。モデルAでは、コネクタピン高さ  $3\text{mm}$  とし、モデルBでは  $0.5\text{mm}$  としています。

このコネクタによる影響を、次のスライドでアニメーション表示します。



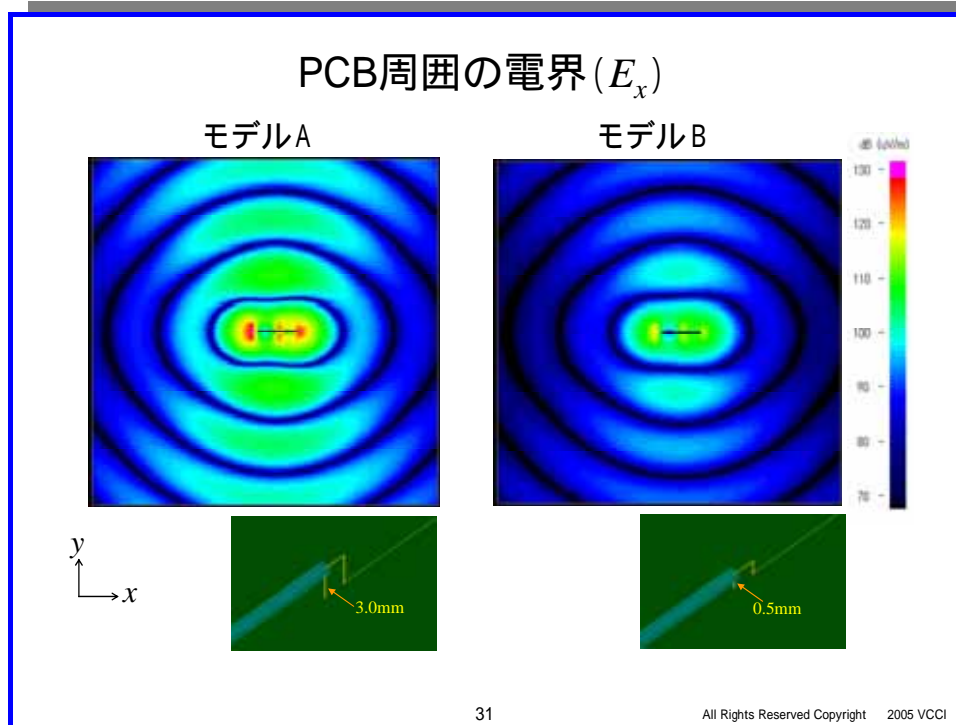
**【シート 31】  
PCB 周囲の電界(Ex)**

前のスライドで定義したモデル A と B の電界をアニメーション表示しています。本解析では、同軸ケーブルと基板が半波長のダイポールアンテナとして電磁波を放射しています。

アンテナ部の駆動源となっているグランド配線が長い方が、より大きな電磁波を放射します。これは、信号電流のリターン電流がグランド配線を通る際、グランド配線のインダクタンス成分により電圧を発生し、アンテナ部を駆動すると考えられます。

上記結果から、ケーブル + 基板の構成では、コネクタ部のインダクタンスが小さい物を選択すべきです。

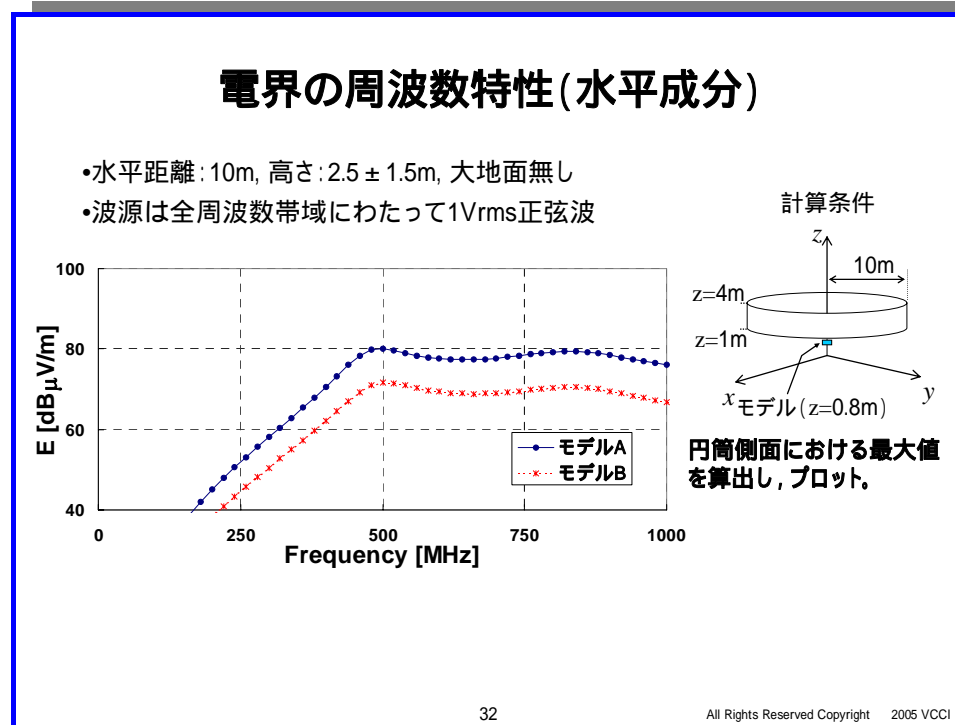
アニメーション



**【シート 32】  
電界の周波数特性(水平成分)**

全周波数帯域にわたって定電圧波源列(実効値1V)を与えた電界強度を示しています。シート31のアニメーションは500MHzですので、本グラフでも電界強度の違いが確認できます。

これから、どの周波数においてもモデル A の方がモデル B よりも電界強度が高くなること、またいずれのモデルも 500MHz 程度までは周波数の上昇に伴って電界強度が上昇していることがわかります。



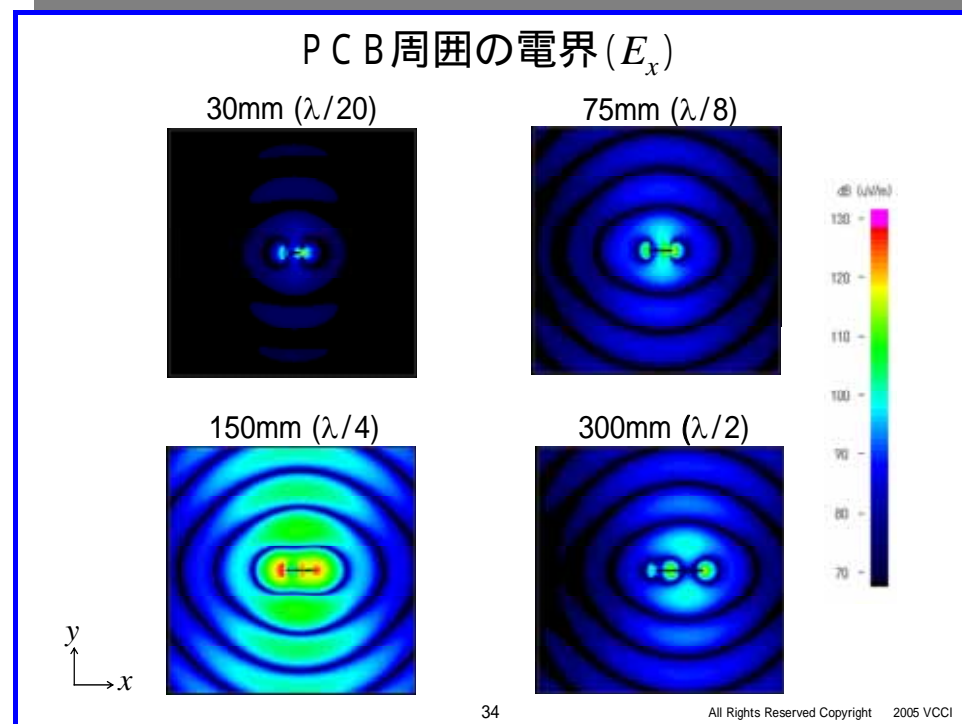
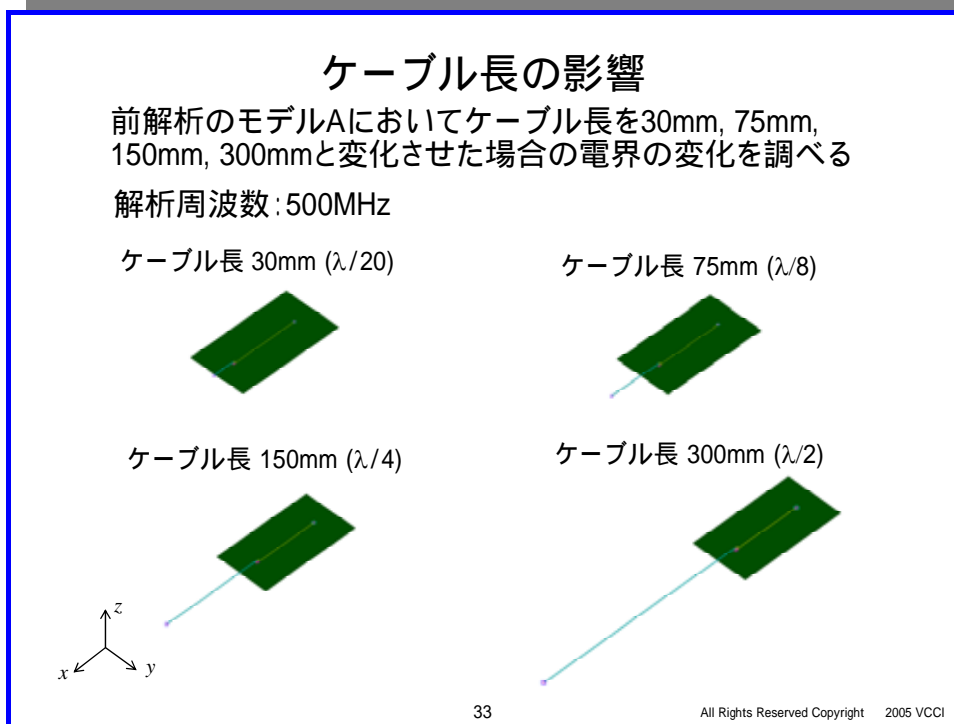
**【シート 33】  
ケーブル長の影響**

シート 29 ~ 32 ではケーブル長を 150mm で計算しましたが、ここではケーブル長を変えた場合の影響について検討します。(シート 33 ~ 35)

**【シート 34】  
PCB 周囲の電界( $E_x$ )**

シート 33 の条件での電界をアニメーション表示しています。ケーブル長が 150mm ( $\lambda/4$ )の 때가、最も放射が大きくなります。このとき、ケーブル長 + 基板配線長の合成で合計  $\lambda/2$  のダイポールアンテナとして振舞っています。

アニメーション

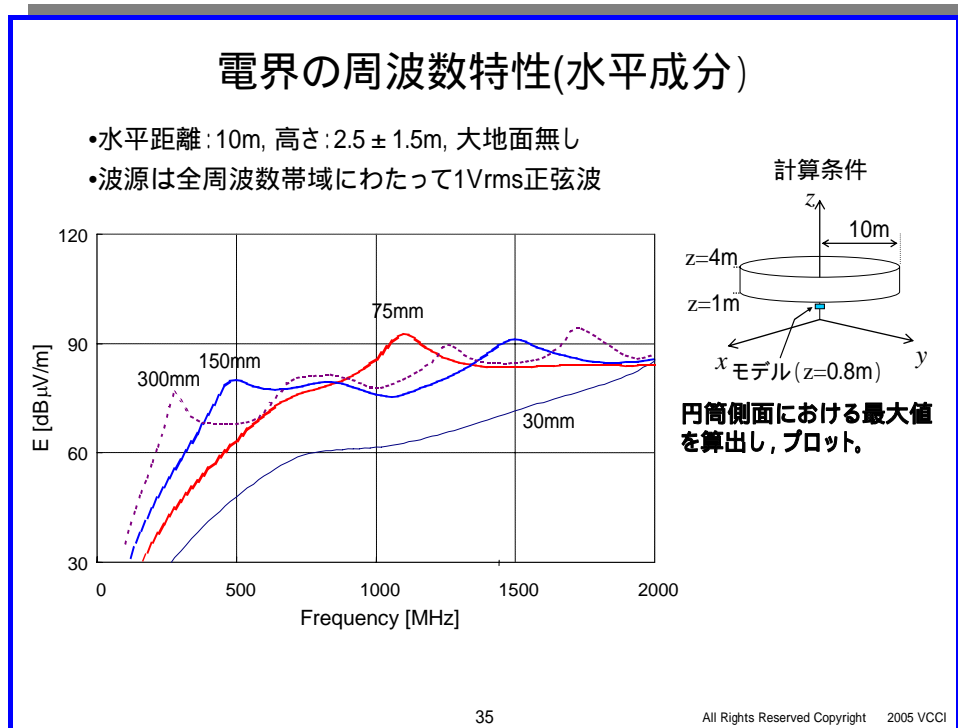


## 【シート 35】

### 電界の周波数特性(水平成分)

ケーブル長の違いを全周波数帯域にわたって定電圧波源列(実効値 1V)を与えた電界強度を計算しています。

ケーブル長 + 基板配線長 <  $\lambda/2$  までは、ケーブルが短い方が電界強度は小さい。それ以上の周波数では電界強度は一定値に近づいてきます。





一般財団法人 VCCI協会