

# S-NAP Wireless 紹介資料

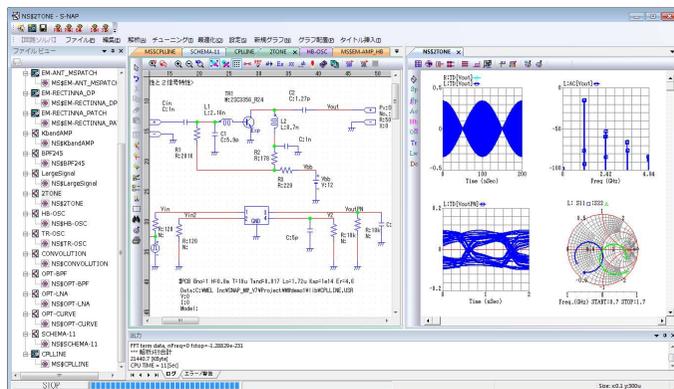
## アンテナ解析

株式会社 エム・イー・エル

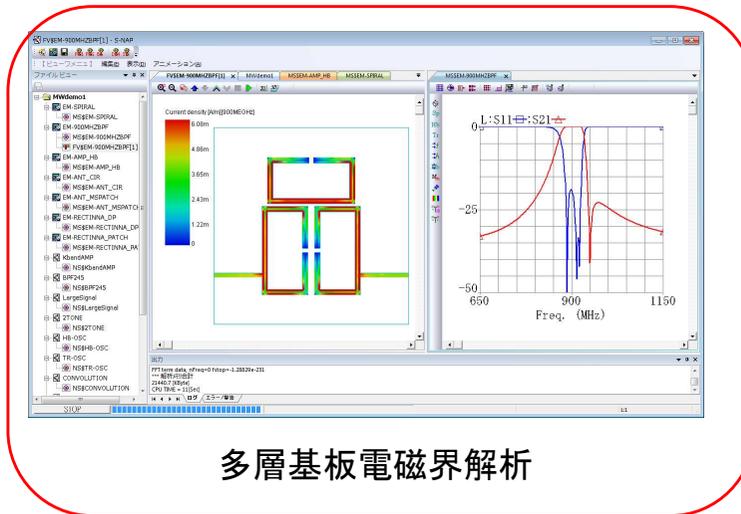
2024/3

# S-NAP Wireless Suite

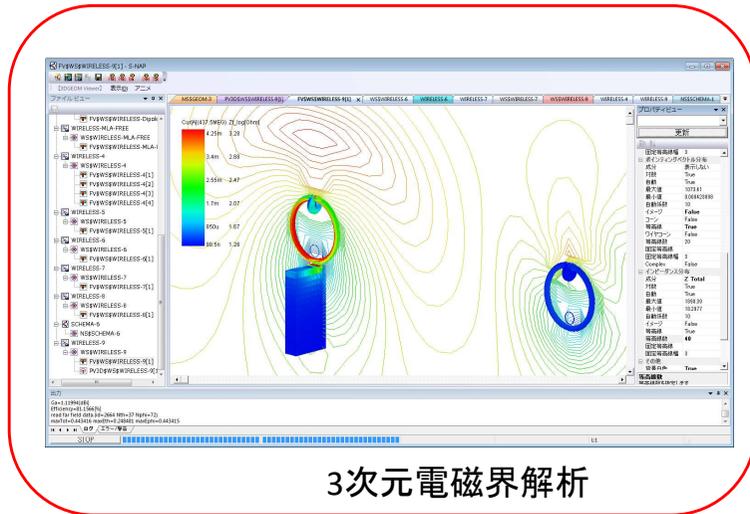
- ワイヤレス電力伝送
- IoT組み込みアンテナ
- 3次元EMC問題



回路解析



多層基板電磁界解析



3次元電磁界解析

↑  
← アンテナは  
これらの機能です

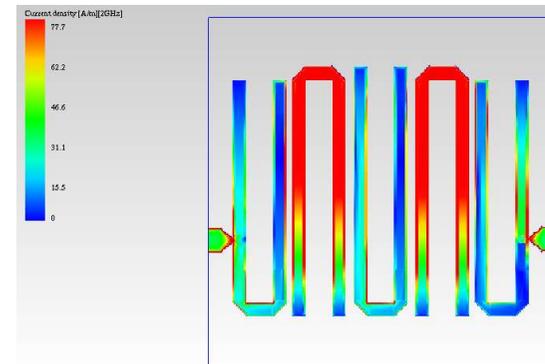
# S-NAP Wirelessの電磁界機能

多層基板解析では、2種類のソルバを実装

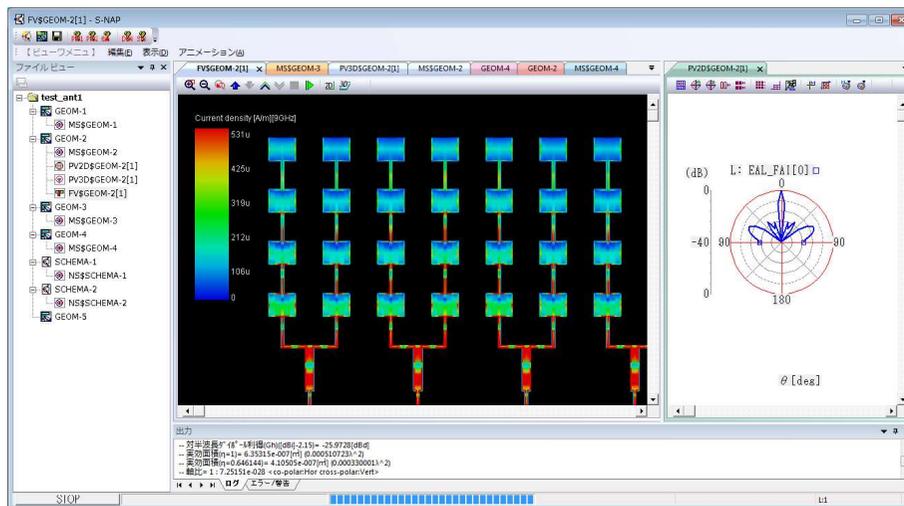
2.5D電磁界

シールド領域グリーン関数、オープン領域グリーン関数

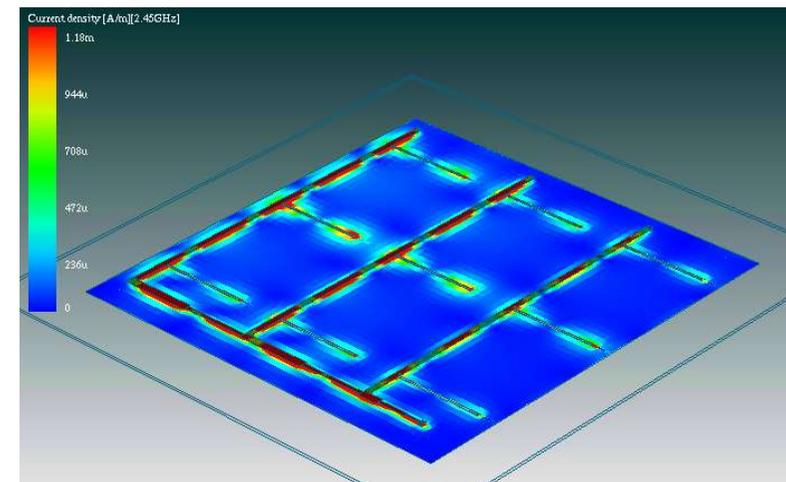
プリント基板用電磁界を用いた比較的大規模な解析例



平面回路



パッチアレイアンテナ



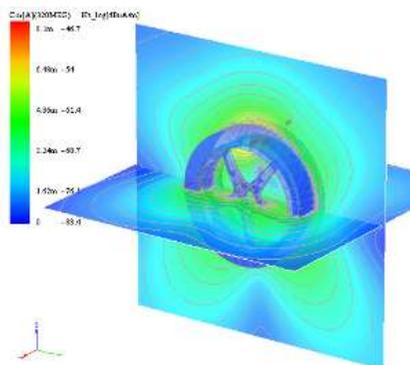
スロットアレイアンテナ

# S-NAP Wirelessの電磁界機能

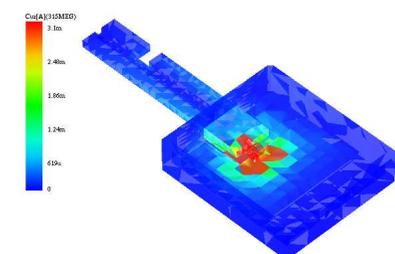
## 3D電磁界

自由空間グリーン関数、半空間グリーン関数、Sommerfeldグリーン関数

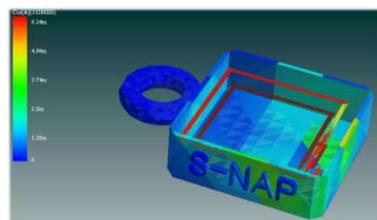
アンテナ系サンプル(小型アンテナ、組み込みアンテナ、線状アンテナ、パラボラ等)



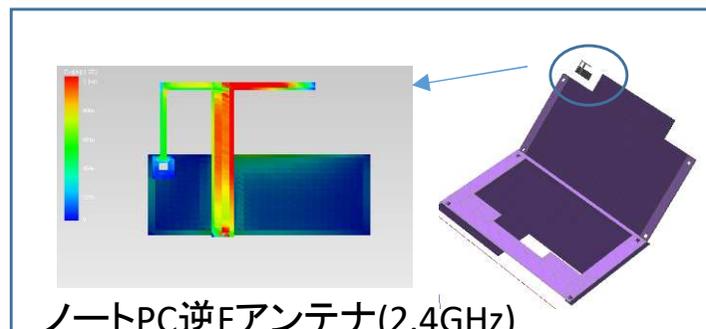
空気圧センサ



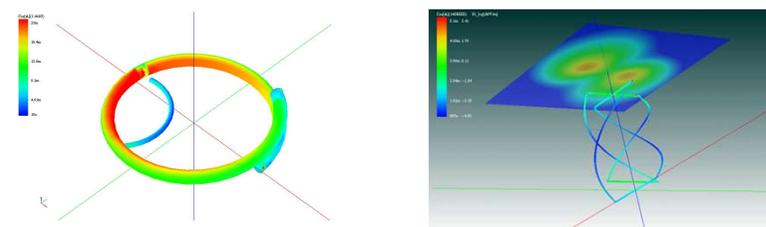
キーアンテナ(315MHz)



キーホルダーアンテナ(315MHz)



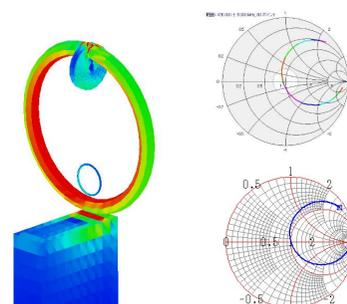
ノートPC逆Fアンテナ(2.4GHz)



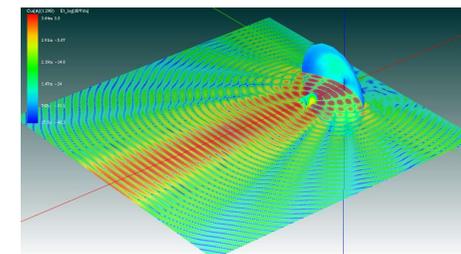
ループアンテナ(2.4GHz) QFH円偏波(145MHz)



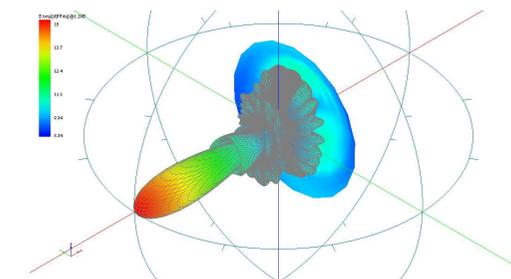
435MHz MLA



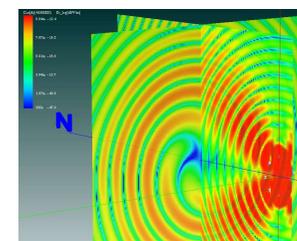
実測(上)とシミュレーション(下)



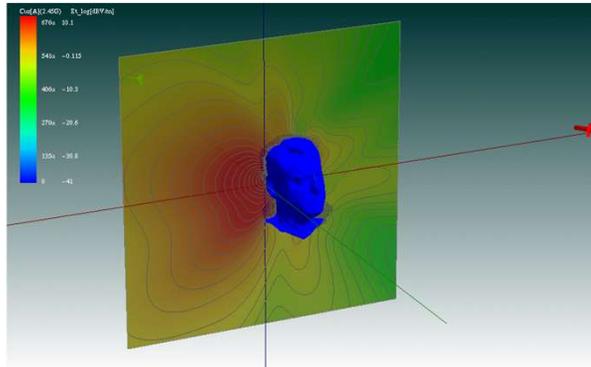
パラボラ電界分布↑  
指向性↓



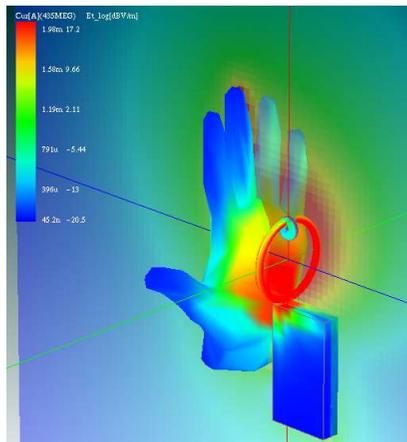
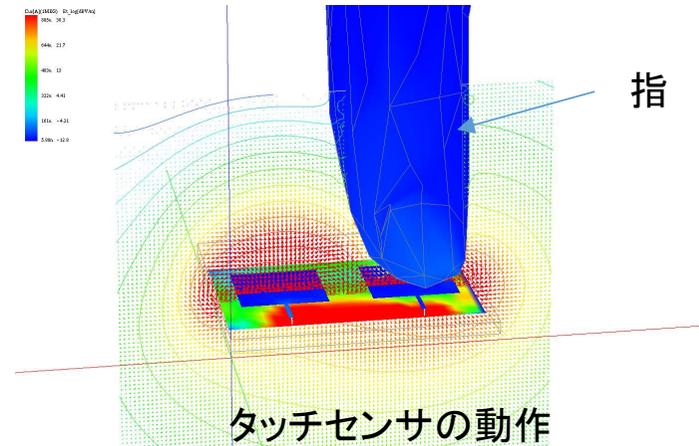
OAM(空間多重)電界分布



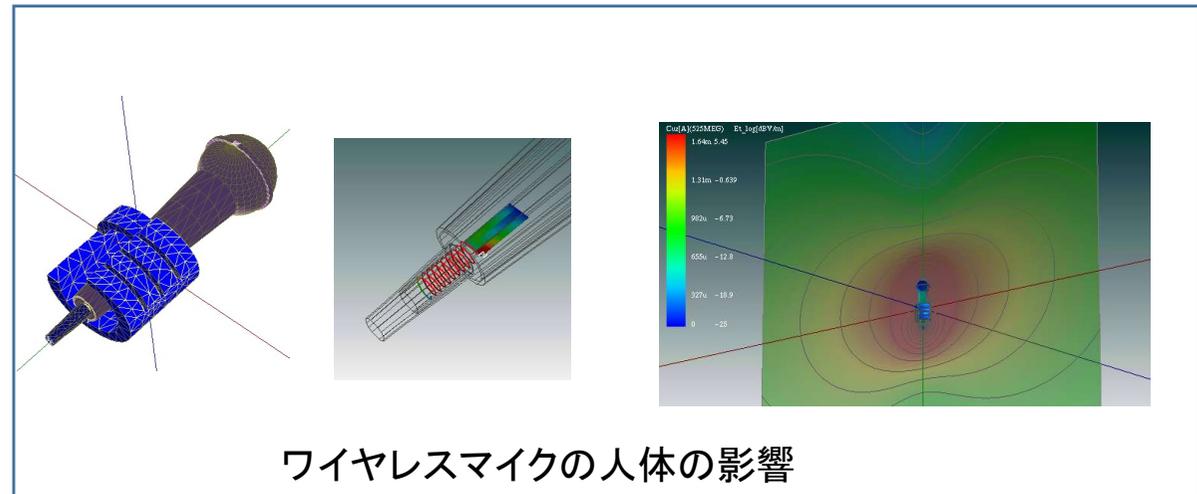
## 3D電磁界 人体の影響サンプル



BlueTooth人体の影響

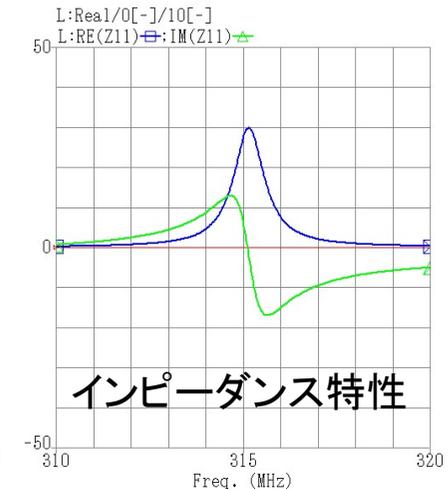
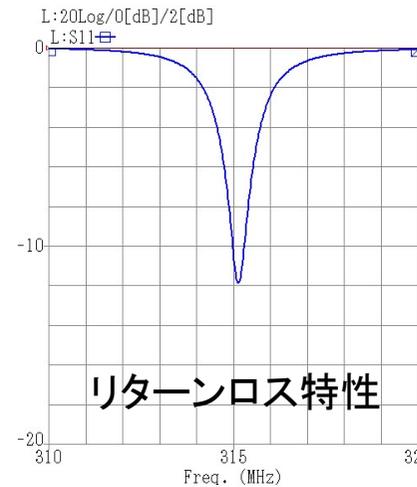
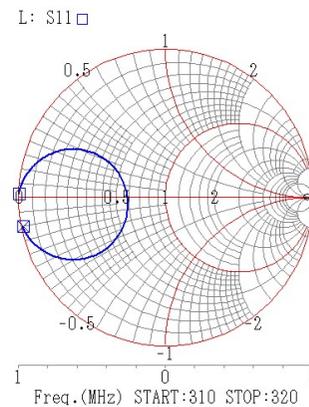
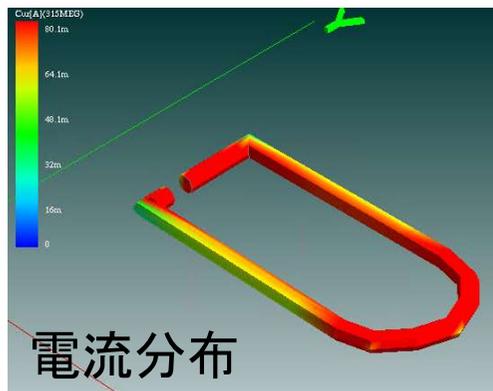


ループアンテナの人体の影響

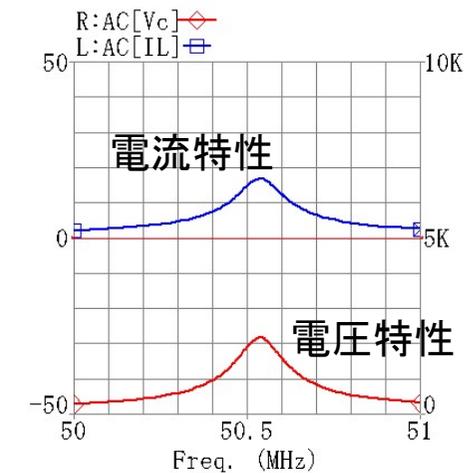
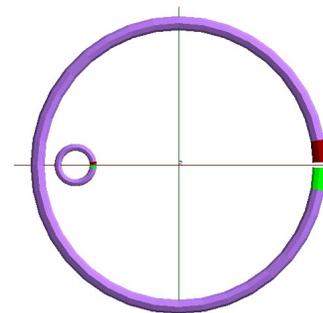


# アンテナ解析項目

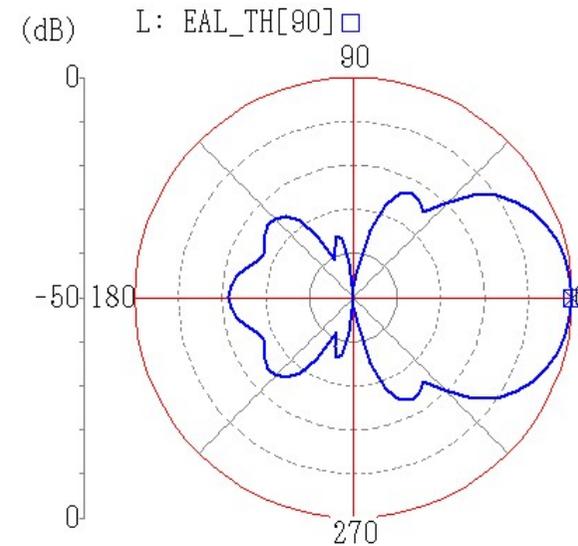
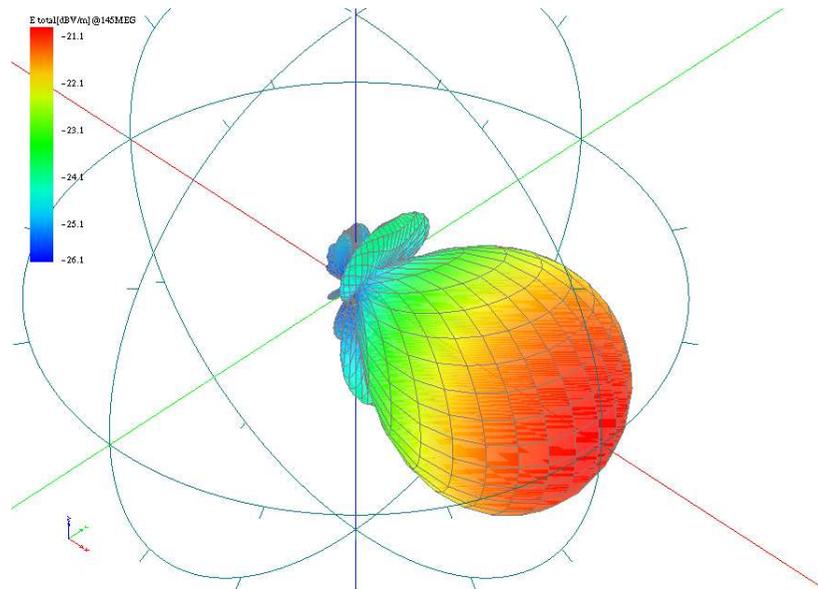
# アンテナ解析時の主な表示項目



- ・電流分布、電圧分布
- ・Sパラメータ特性
- ・SWR、リターンロス等
- ・インピーダンス特性
- ・電流、電圧特性など
- ・放射特性
- ・電界磁界分布
- ・ポインティングベクトル
- ・インピーダンスマップ



# 遠方界パターン、放射効率



--- Far field analysis ---

Frequency 145MEG Hz

Direction : th=90,phi=0 <=最大放射方向

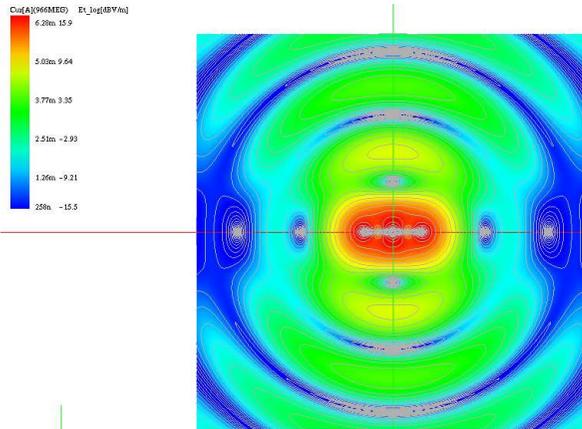
Gd=12.9432[dBi] <=指向性利得

Ga=12.8642[dBi] <=絶対利得

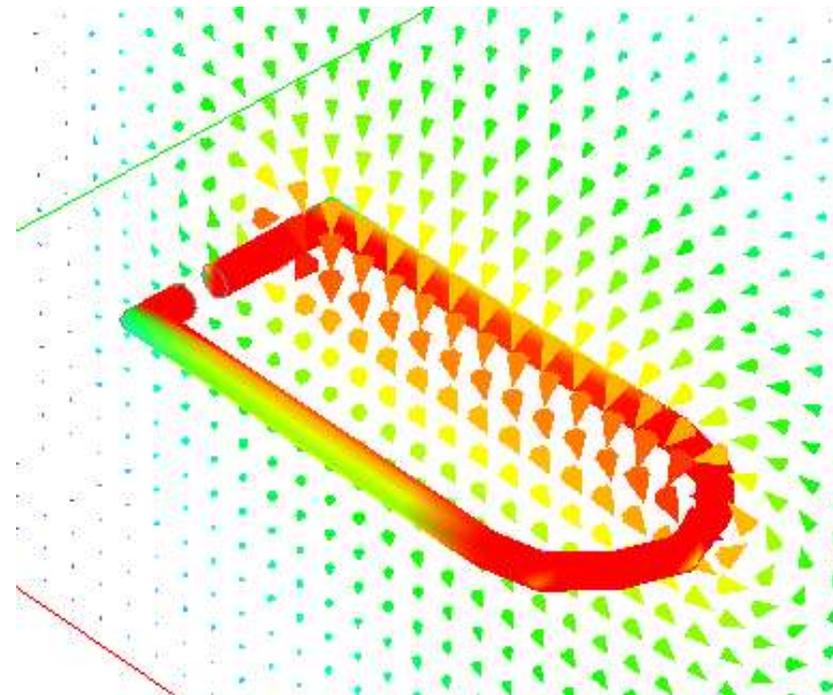
Efficiency=98.197[%] <=放射効率

Axis ratio= 1:5.8379e-08 <=軸比

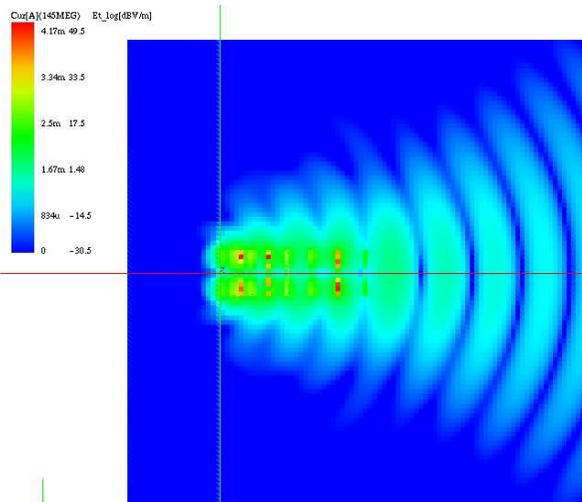
# 電界分布、磁界分布



ダイポールの近傍電界

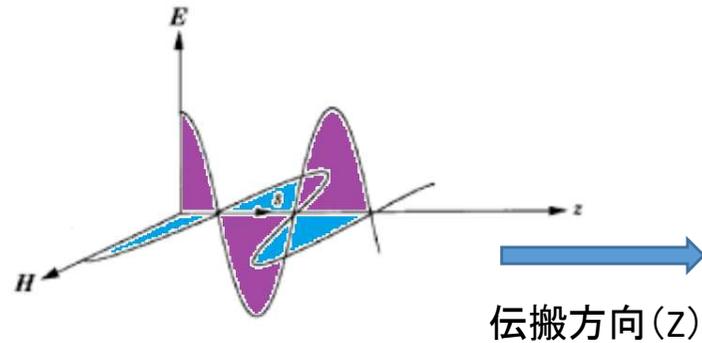


ループアンテナの近傍磁界



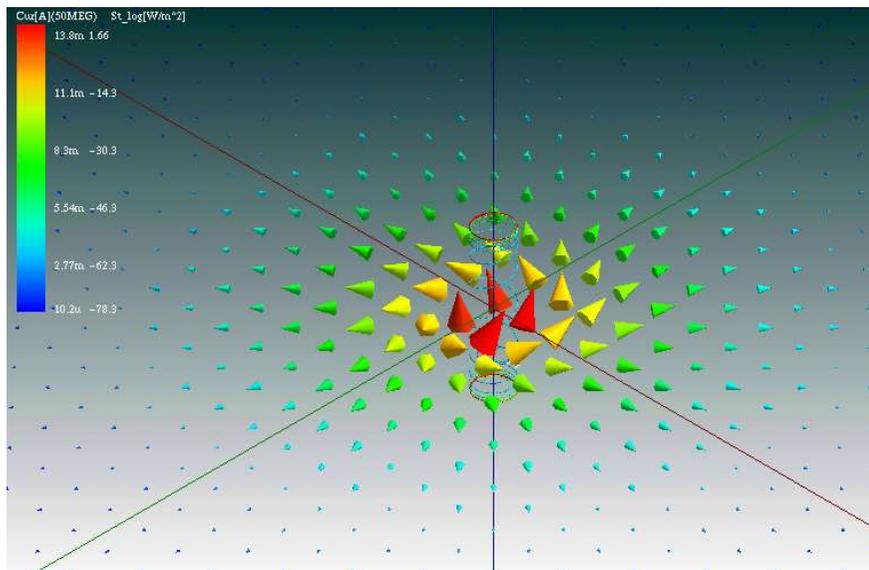
八木アンテナの近傍電界

# ポインティングベクトル、インピーダンスマップ

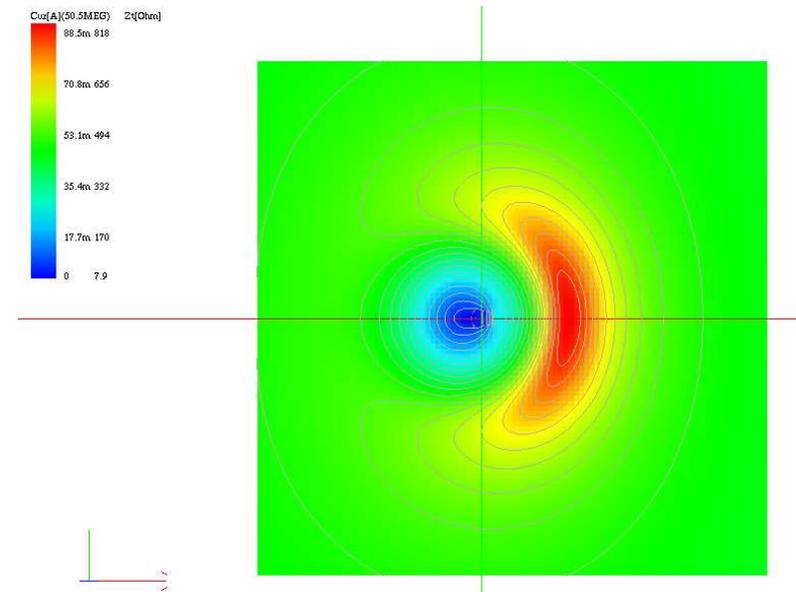


ポインティングベクトル:  $\mathbf{E} \times \mathbf{H}$   
インピーダンスマップ :  $\mathbf{E}/\mathbf{H}$

$$P_z = \iint \mathbf{E} \times \mathbf{H}^* \cdot \mathbf{u}_z ds$$



ヘリカルアンテナのポインティングベクトル



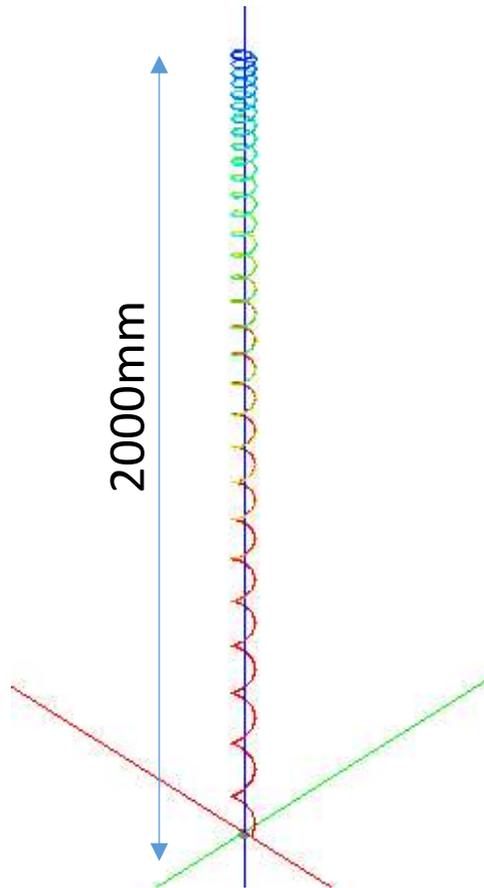
ループアンテナのインピーダンスマップ

# モーメント法の特徴

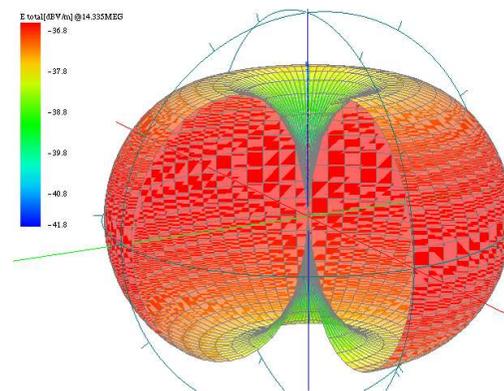
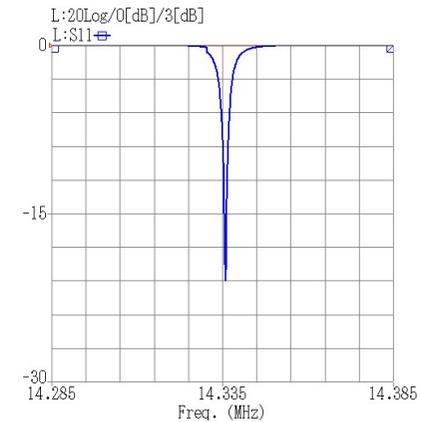
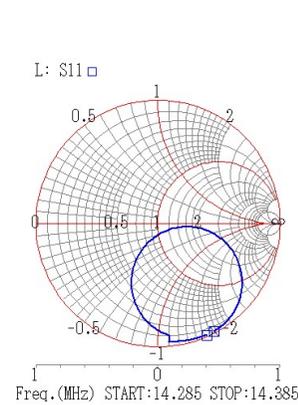
- <一般的な特徴>
- 境界面の変数のみなので必要な変数が少ない  
マトリックスが小さくて済む(ただし密行列)
- 結合問題が高精度に解析可能  
磁界共鳴方式などのHi-Q問題に適している
- 数十波長離れている遠方のオブジェクト間の解析が容易(1km程度まで可能)  
ワイヤレス電力伝送など送受信ペアで解析する問題の解析
- 極大、極小問題の解析が容易  
小型アンテナと車などの大規模な筐体との同時解析など
- <MPIE(Mixed Potential Integral Equation)>
- 超低周波から超高周波まで対応できる(kHz~ミリ波まで)  
85kHzのワイヤレス電力伝送の解析も容易
- ポートを単独で設定できる

# 一般的なアンテナ例

# 14MHzノンラジアルヘリカルホイップ

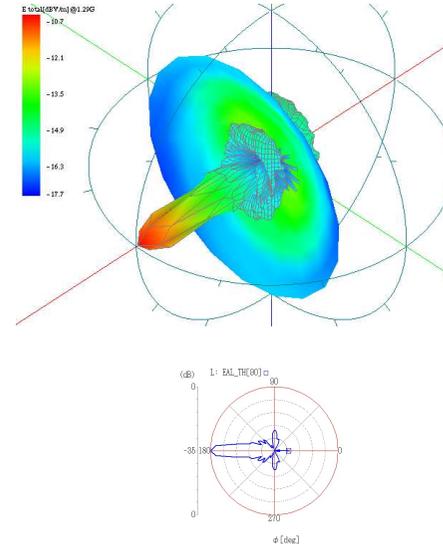
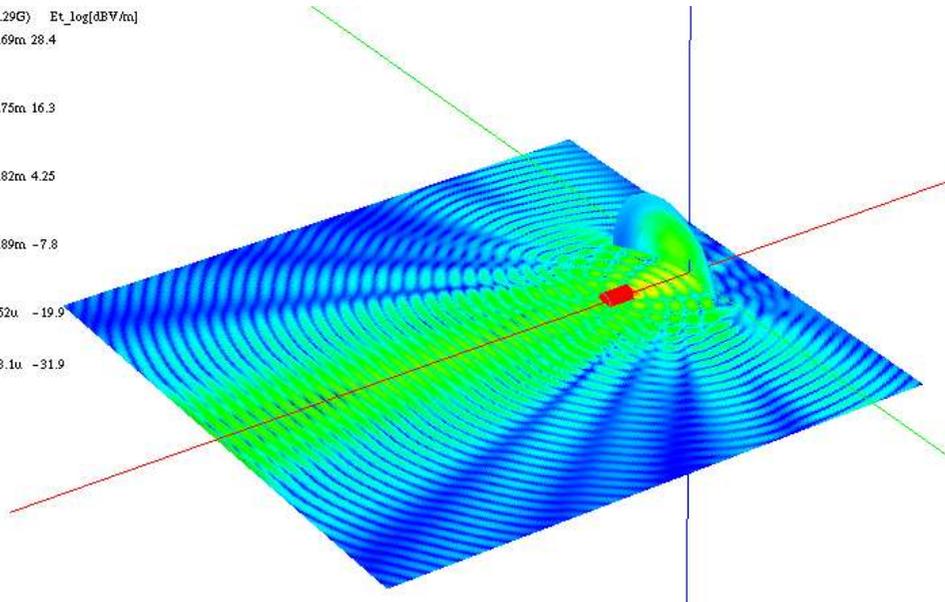
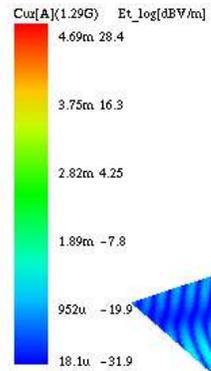
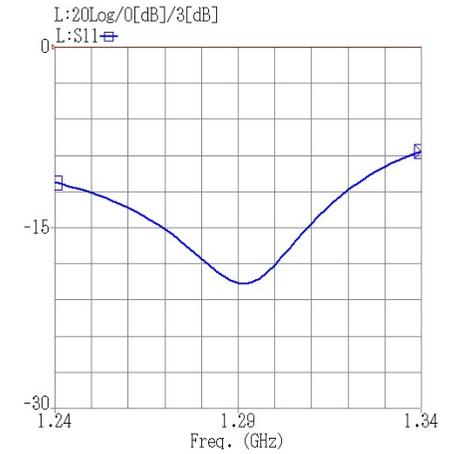
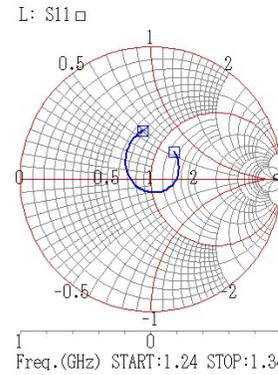
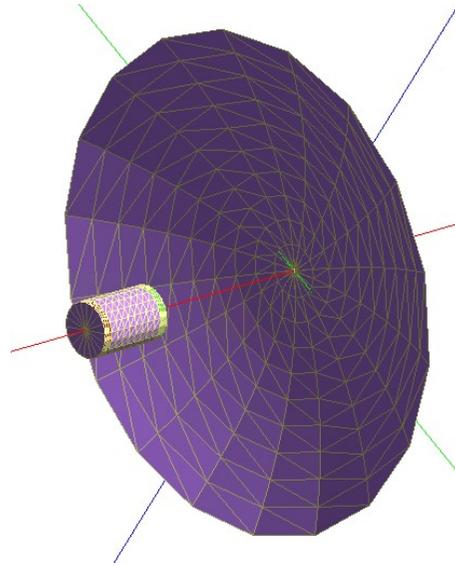


40秒/1周波数  
205秒/1000周波数(VFモードスイープ)



--- Far field analysis ---  
Active port imp.=50  
Pt=0.0060108[W] include refraction  
VSWR=2.63387  
Direction : th=90,phi=255  
Srm=0.000208834[W]  
Gd=1.84047[dBi]  
Ga=-3.59921[dBi]  
Efficiency=28.578[%]  
Axis ratio= 1: 3.13539e-05

# パラボラアンテナ



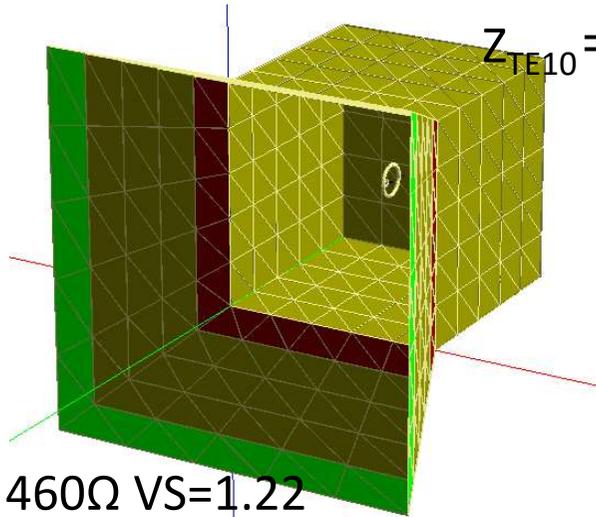
--- Far field analysis ---  
Active port imp.=50  
Pt=0.00505411[W] include  
refraction  
VSWR=1.23221  
Direction : th=90,phi=180  
Srm=0.084712[W]  
Gd=23.3431[dBi]  
Ga=23.2351[dBi]  
Efficiency=97.5438[%]  
Axis ratio= 1: 1.22687e-06

4秒/1周波数  
157秒/51周波数

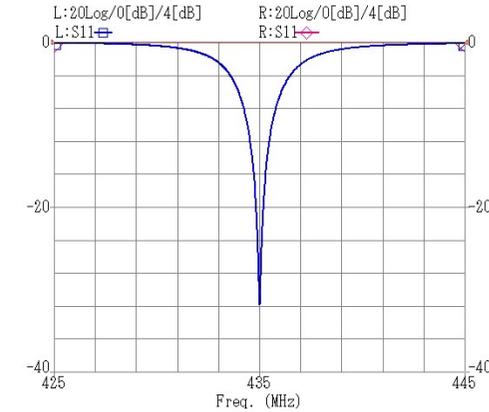
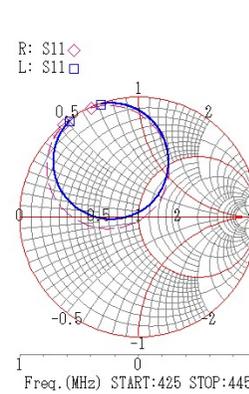
# MLAホーンアンテナ

$F_c = 416.3 \text{ MHz}$

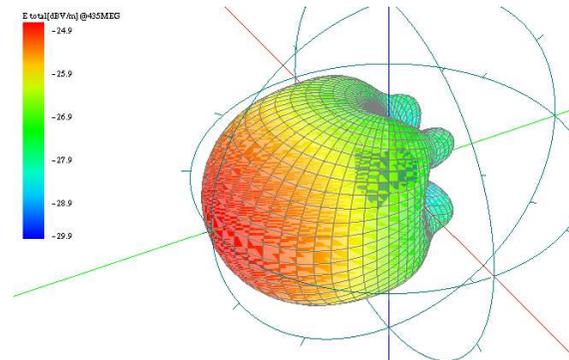
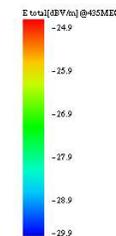
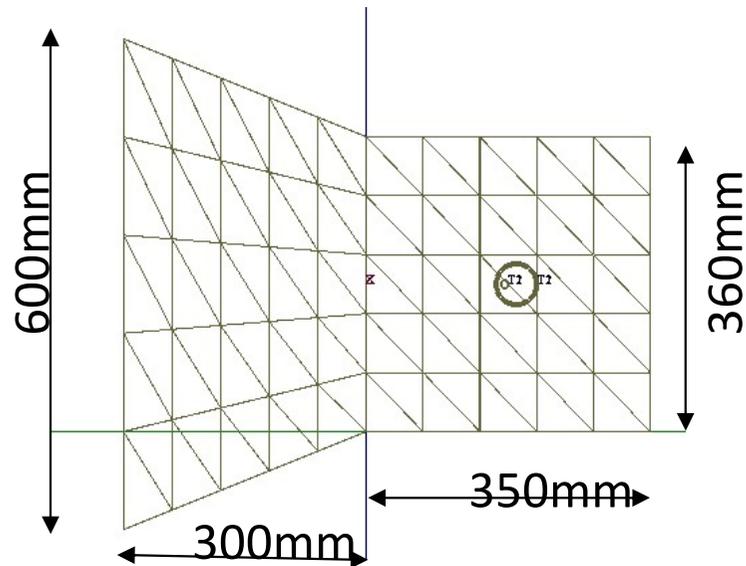
$Z_{TE10} = 1300 \Omega$



$Z_{TE10} = 460 \Omega$  VS=1.22



SパラはMPとほぼ同じ



--- Far field analysis ---

VSWR=1.0631

Direction :

th=90, phi=270

Gd=9.19231[dBi]

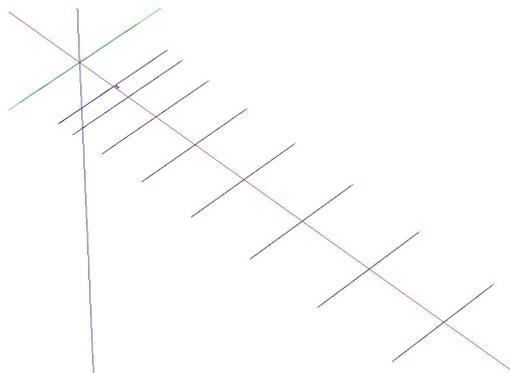
Ga=9.13917[dBi]

Efficiency=98.7839[%]

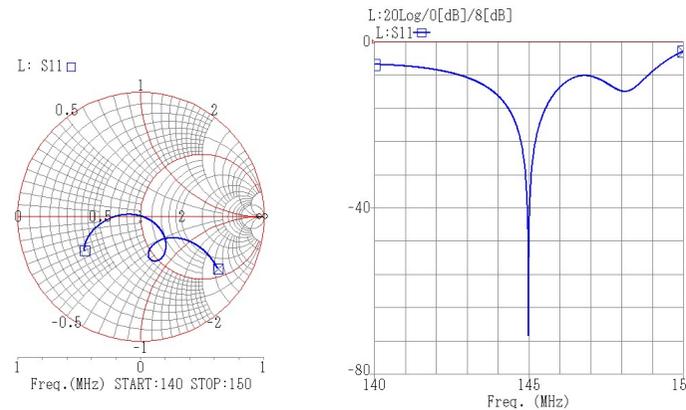
22秒/1周波数

114秒/1000周波数(VFモードスイープ)

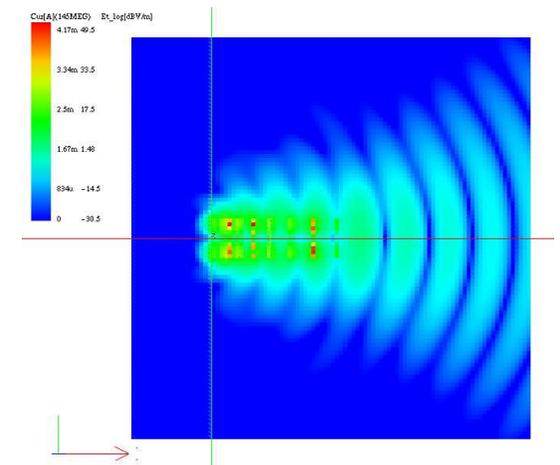
# 八木アンテナ (9エレメント)



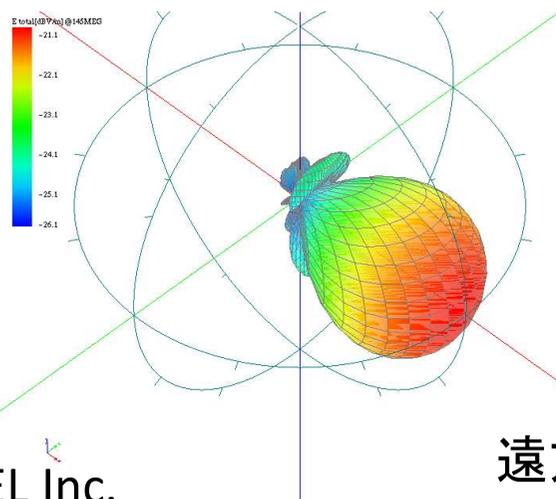
145MHz  
20秒/周波数



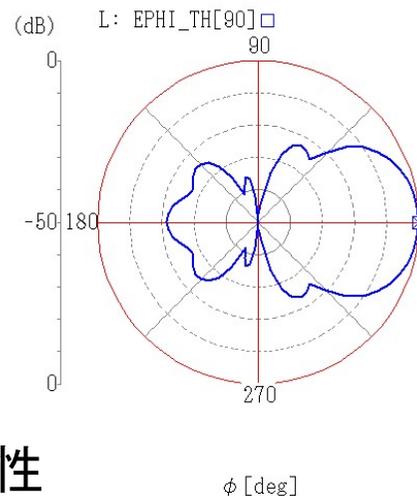
Sパラ特性



近傍電界分布



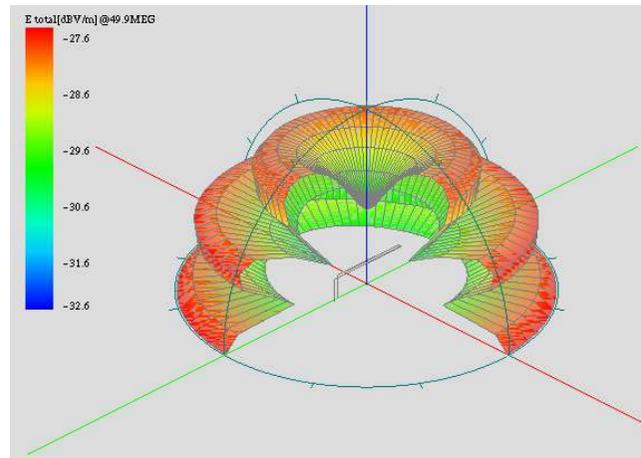
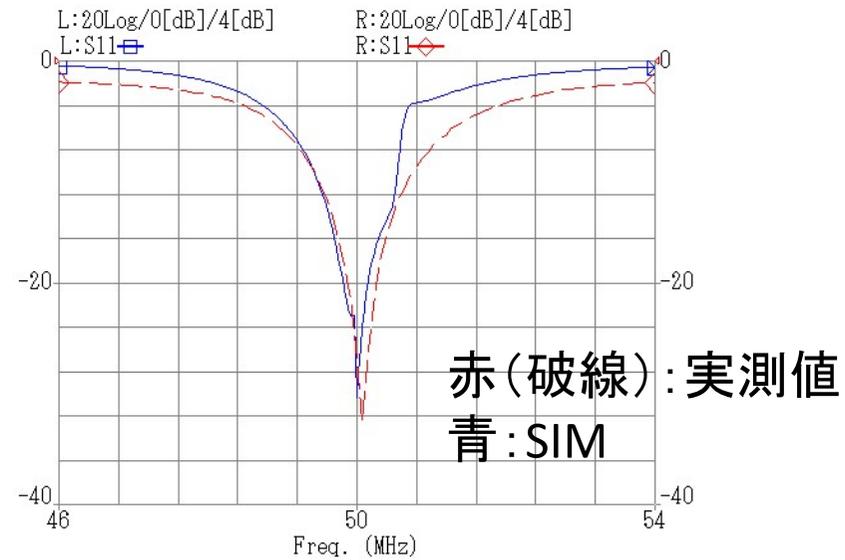
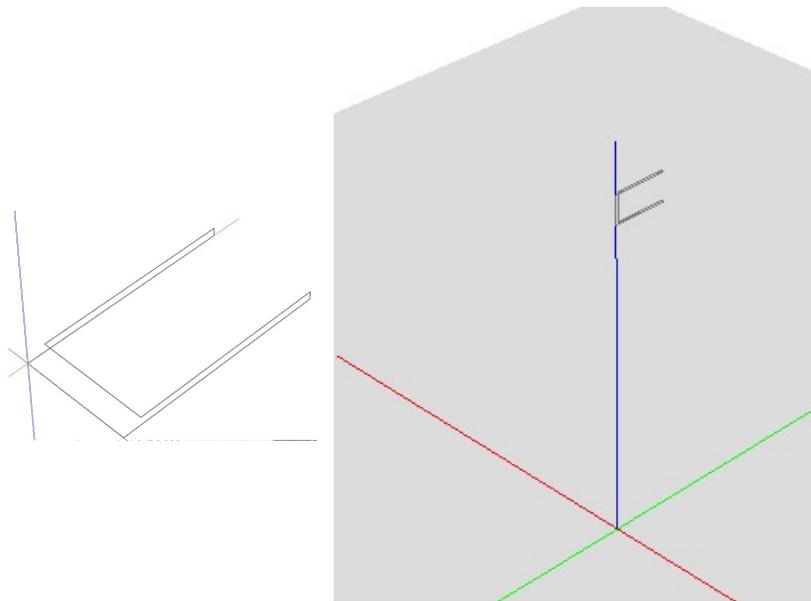
遠方界特性



--- Far field analysis ---  
Frequency 145MEG Hz  
Direction : th=90,phi=0  
Gd=12.9432[dBi]  
Ga=12.8642[dBi]  
Efficiency=98.197[%]  
Axis ratio= 1:5.8379e-08

利得、効率等

# Folded UNE ANT 実測比較



--- Far field analysis ---

Active port imp.=50

Pt=0.00502754[W] include refraction

VSWR=1.16034

Direction : th=90,phi=10

Srm=0.00175423[W]

Gd=7.38525[dBi]

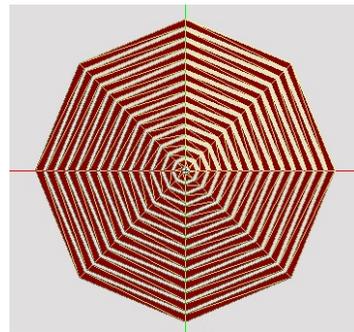
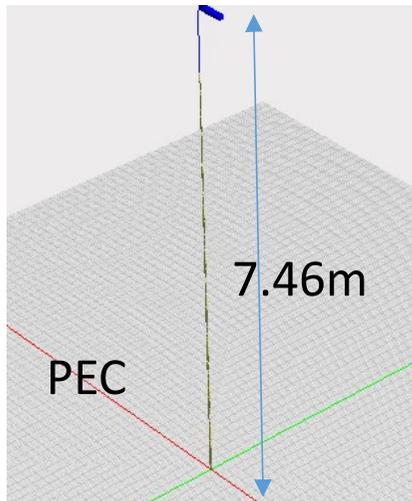
Ga=6.4194[dBi]

Efficiency=80.0598[%]

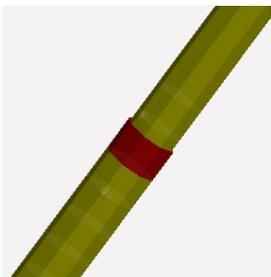
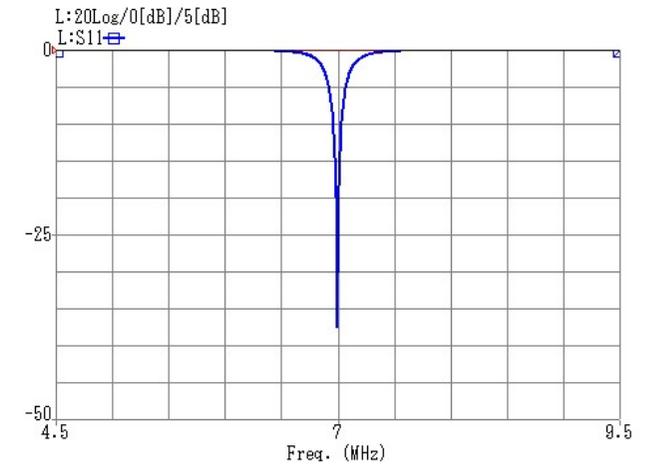
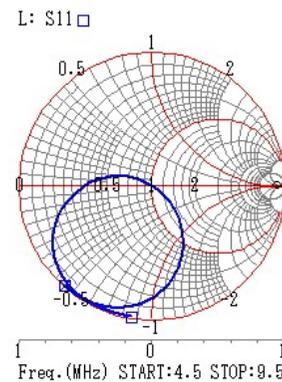
# カーボンロッドアンテナ(7MHz)

カーボンロッド 14段  
全長=7.46m 重なり=45mm  
外形:  $\phi 21\text{mm} \sim \phi 1.5$   
体積抵抗率  $\rho = 0.6\text{m}\Omega \cdot \text{m}$

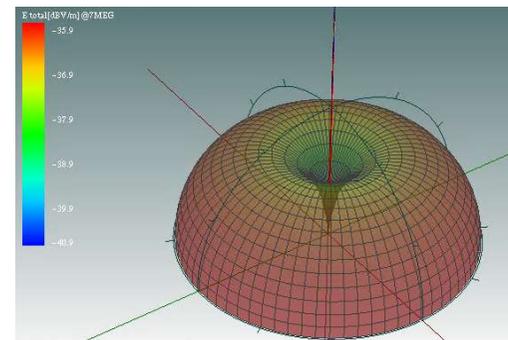
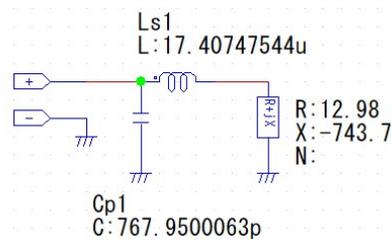
カーボン製の釣り竿アンテナの解析例です  
各段は非接触で、容量結合しています



Top view



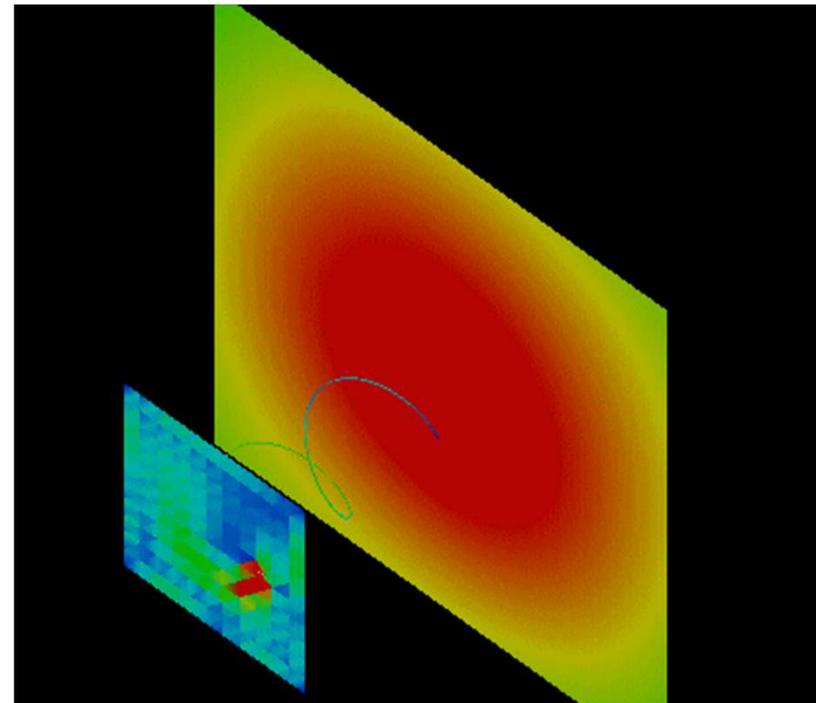
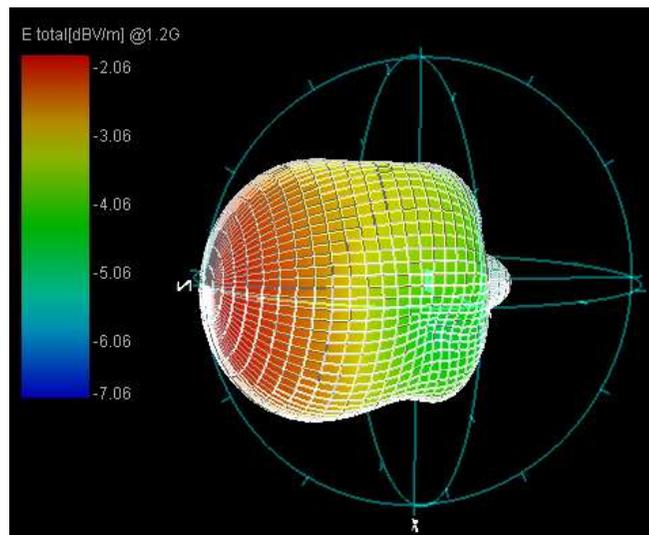
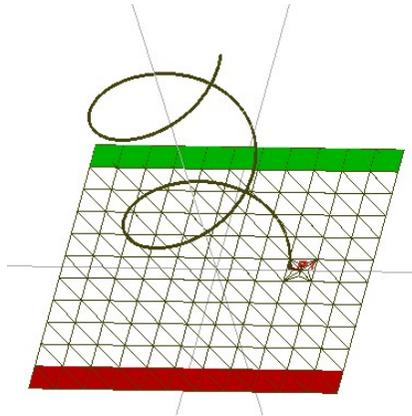
つなぎ目



--- Far field analysis ---  
VSWR=1.02682  
Direction :  $\theta=90, \phi=300$   
Gd=5.54447[dBi]  
Ga=-1.87863[dBi]  
Efficiency=18.1005[%]  
Axis ratio= 1: 1.93641e-15

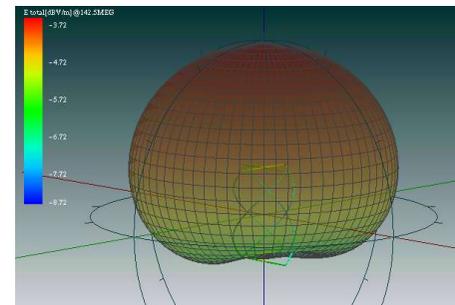
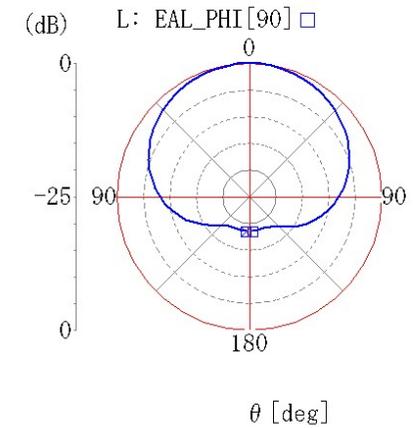
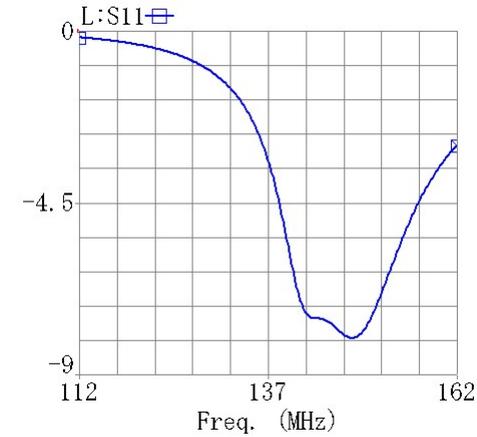
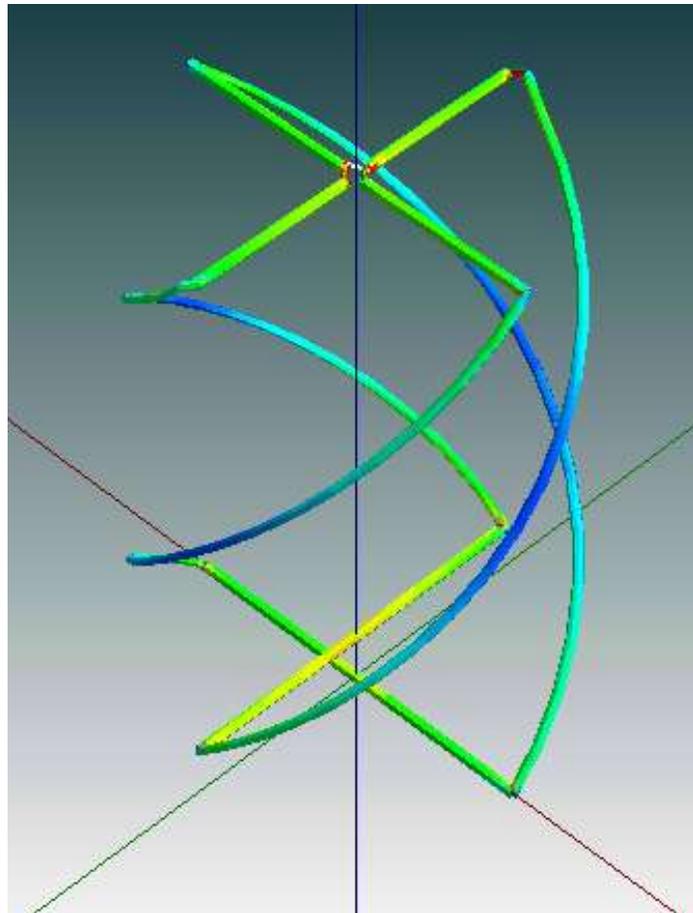
# 円偏波アンテナ

エンドファイアヘリカル

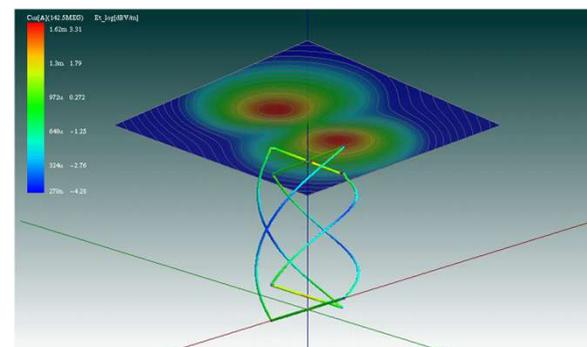


# QFHアンテナ

QFHアンテナは天頂方向に指向性を持つ円偏波アンテナで、衛星の受信などに用いられています



Gd=5.44475[dBi]  
Ga=4.52631[dBi]  
Efficiency=80.93[%]



近傍電界分布

# IoT機器小型アンテナ

# IoT 組み込みアンテナ色々

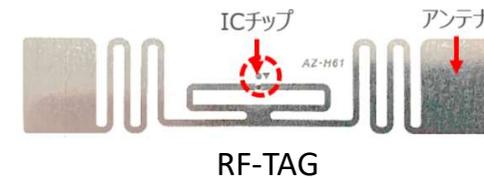
IoT化で筐体への組み込みが必須

- ・アンテナ導体のサイズは制約される
- ・筐体の影響を受ける
- ・人体の影響を受ける

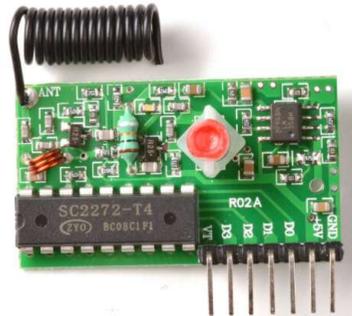
300MHz (微弱機器)

2.45GHz ISM (Wi-Fi, Bluetooth, etc.)

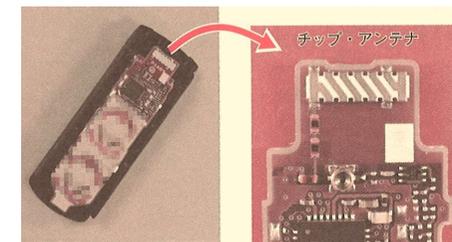
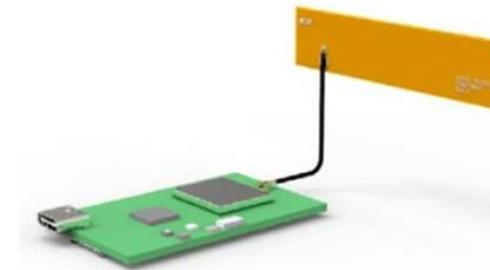
900MHz (RF-TAG)



パッチアンテナ



微弱機器(315MHz)[2]



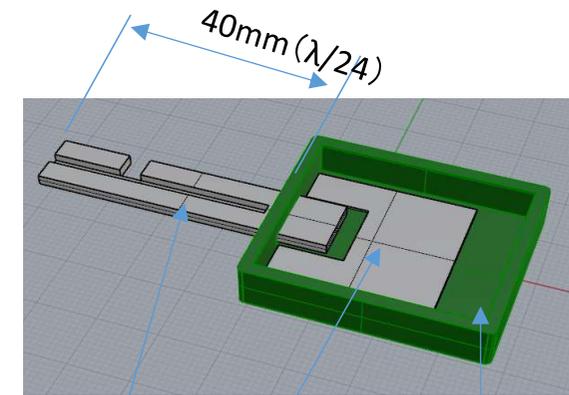
チップアンテナ[1]

[1]RFワールド No.44

[1][2]以外の画像はWEB上のデータです

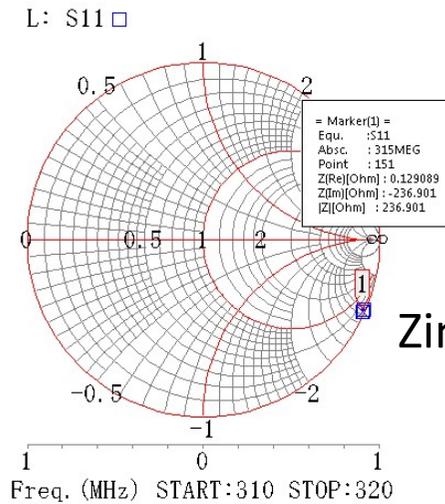
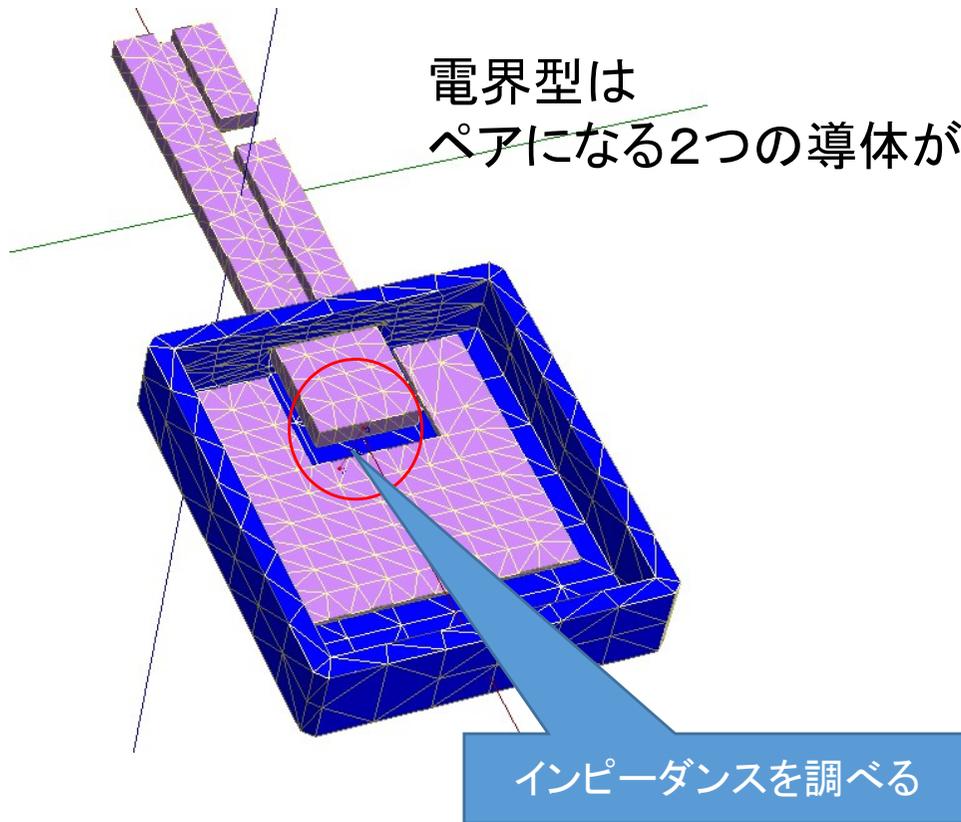
# 電界型小型アンテナ (315MHz)

約40mmの金属鍵部を持つキーを315MHzのワイヤレス化する場合のアンテナ設計例



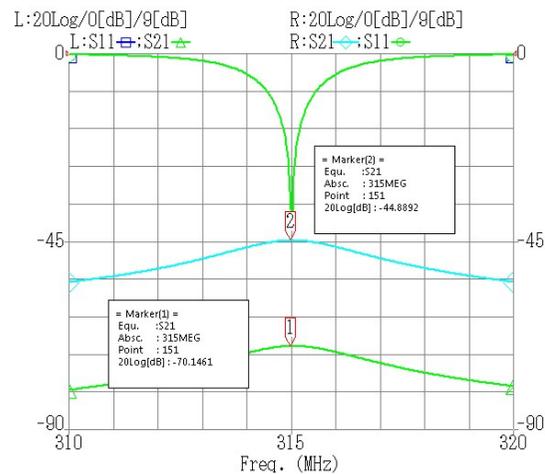
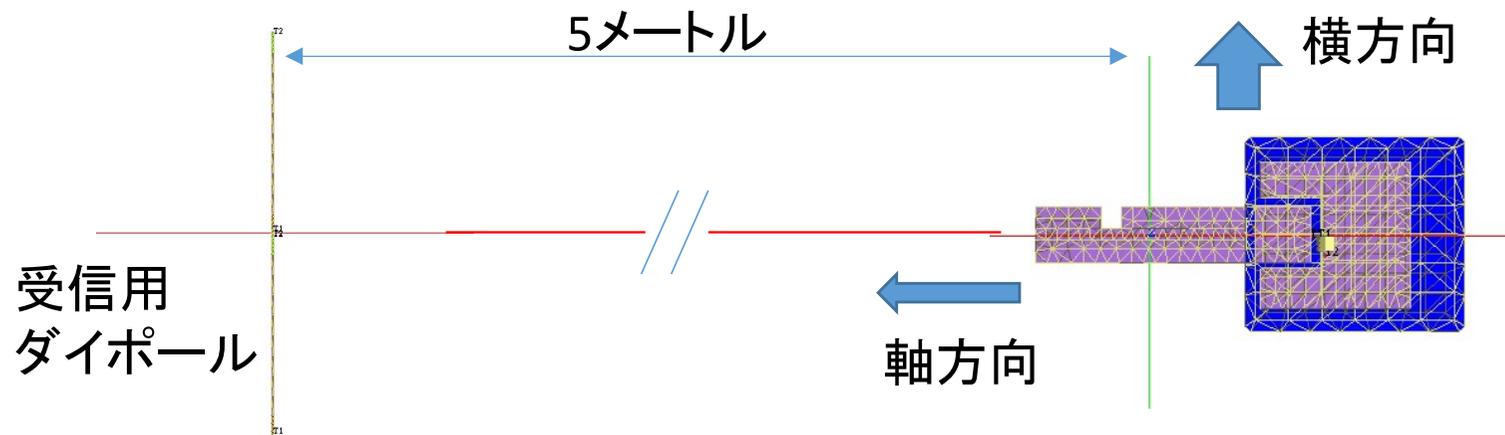
アンテナ グランド板 樹脂ケース

電界型は  
ペアになる2つの導体が必要

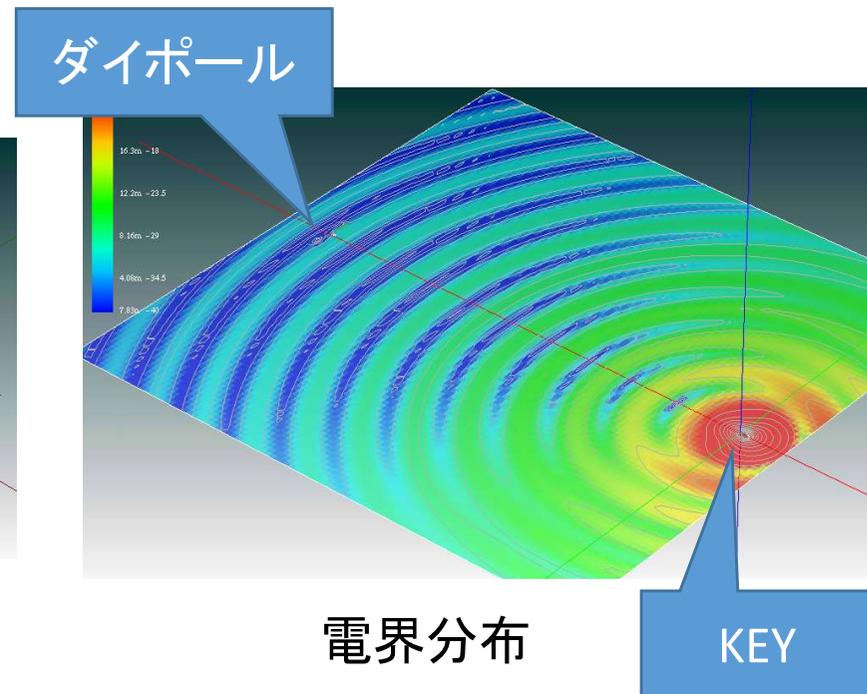
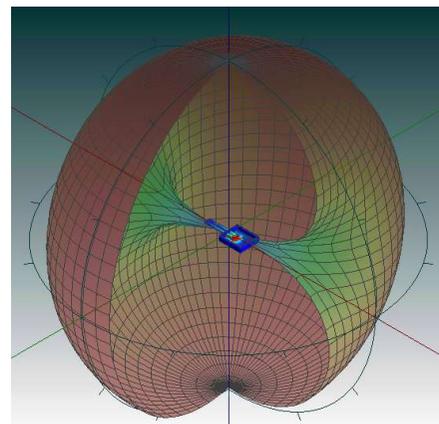


$Z_{in} = 0.13 - j236 [\Omega]$

# 到達距離を調べる



S21=-70dB 軸方向  
S21=-45dB 横方向

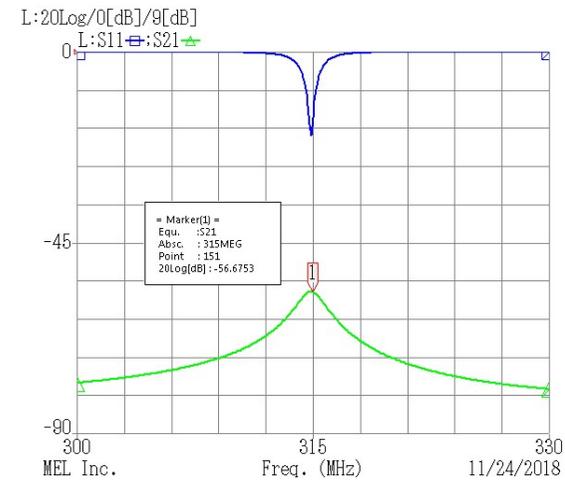
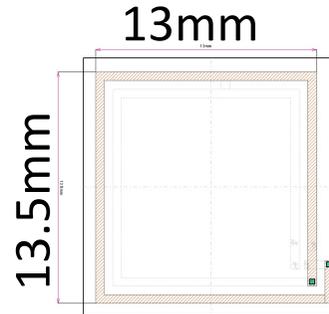
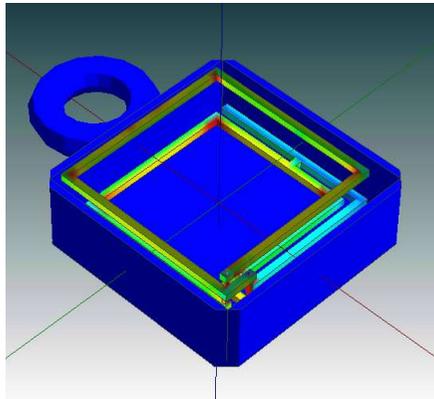


電界分布

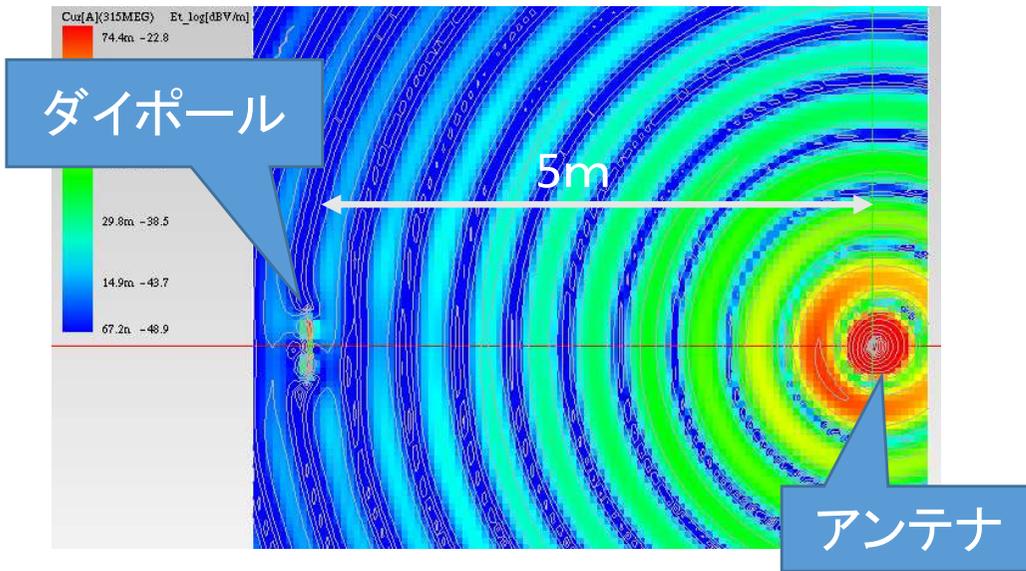
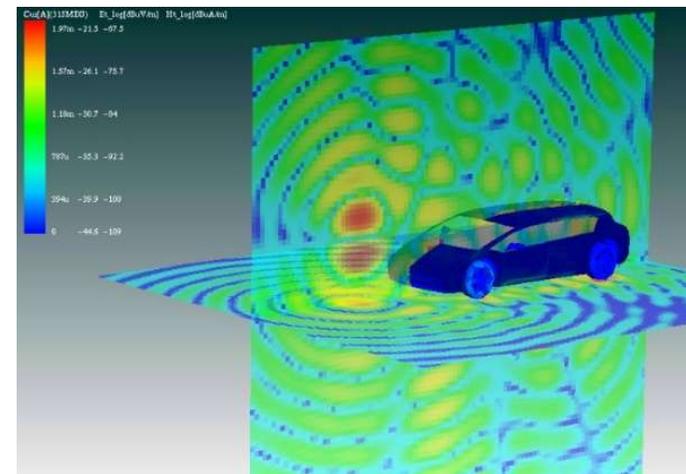
KEY

# 磁界型アンテナ例 (315MHz MLA)

約15mm□の樹脂ケースに入った315MHzのワイヤレスキーのアンテナ設計例



S21=-56.6dB @315MHz

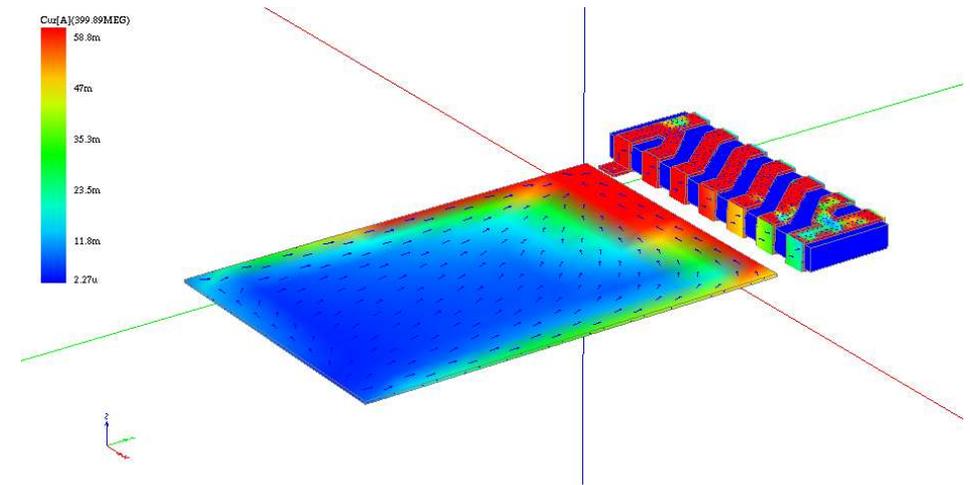
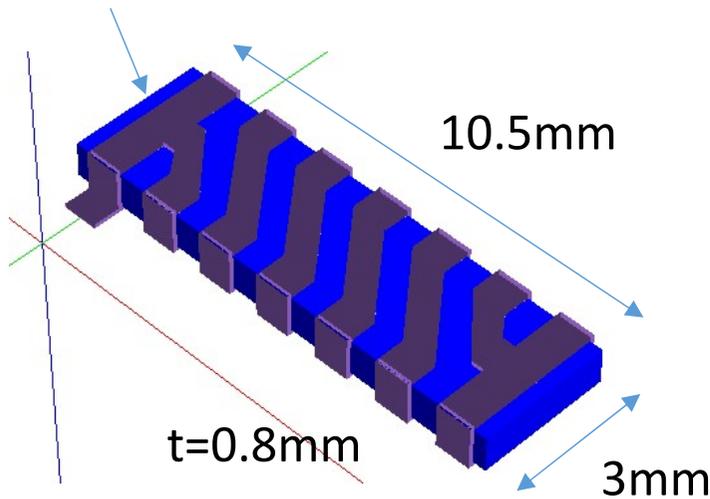


電界分布

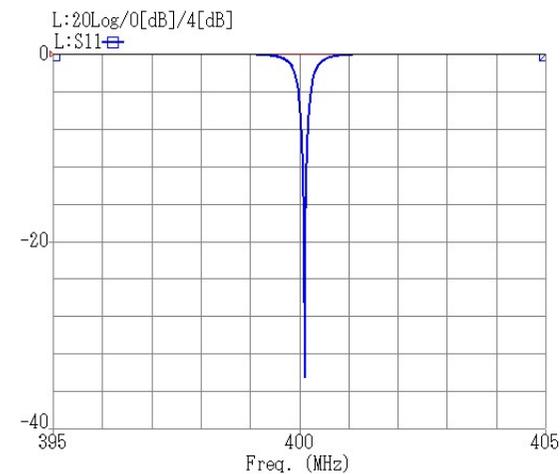
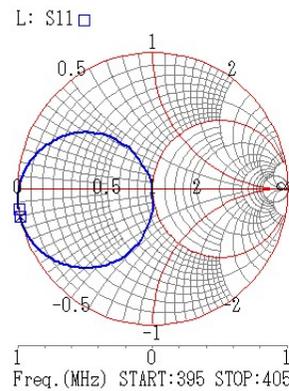
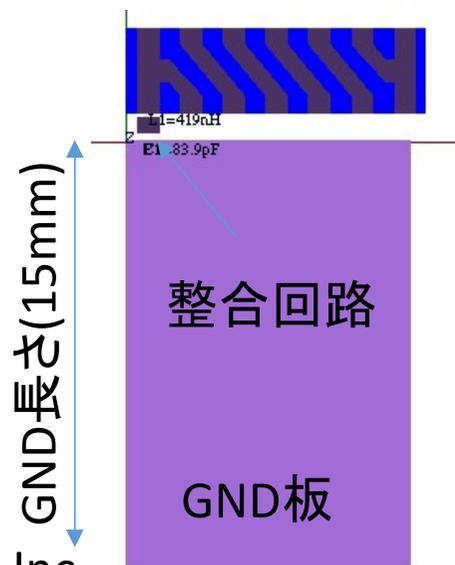
小型アンテナと車が混在して解析可能

# チップアンテナ(400MHz)

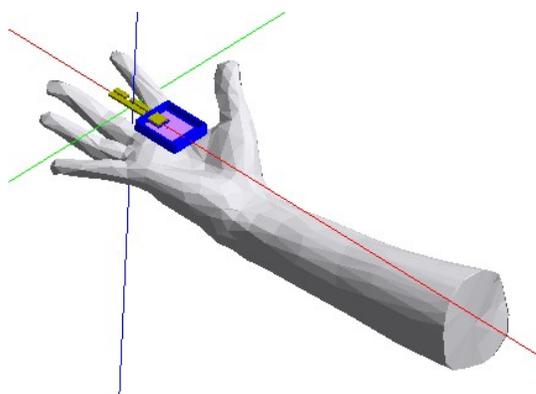
誘電体  $\epsilon_r=10.5$



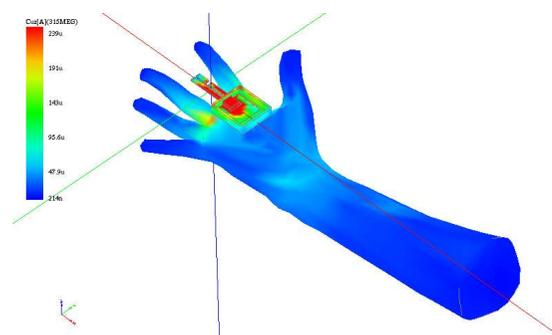
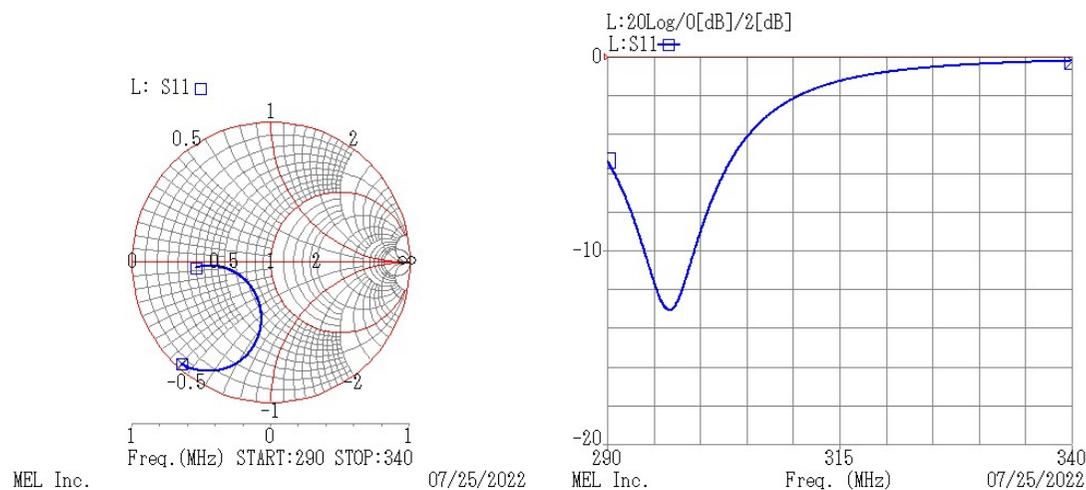
電流分布 @400MHz



# 人体の影響



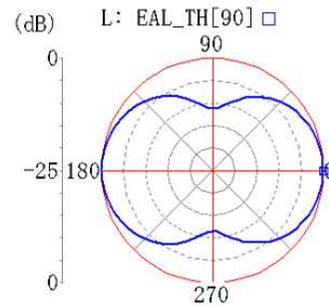
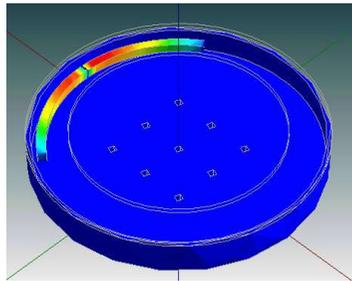
人体を考慮した設計が必要



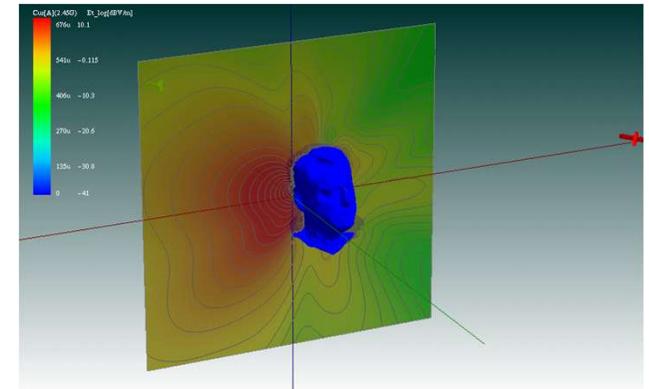
--- Far field analysis ---  
 VSWR=13.6476  
 Direction : th=140,phi=300  
 Gd=3.09672[dBi]  
 Ga=-10.8248[dBi]  
**Efficiency=4.05363[%]**  
 Axis ratio= 1: 0.00843472

# 人体の影響を解析

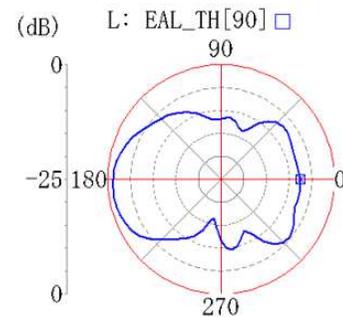
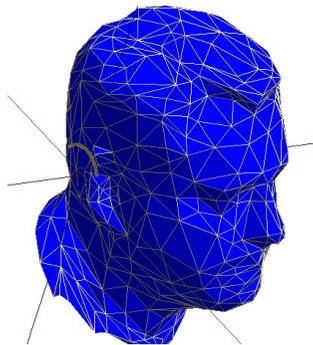
人体の影響を考慮した2.4GHzヘッドホン特性の解析



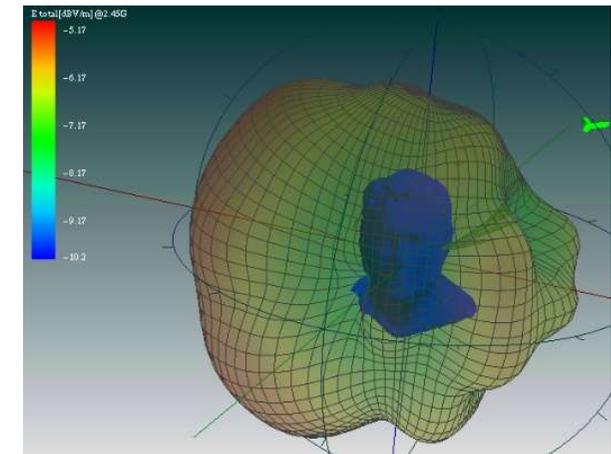
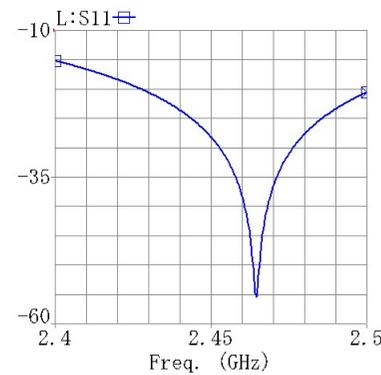
単体の指向性



近傍電界



頭部モデルを含めた指向性

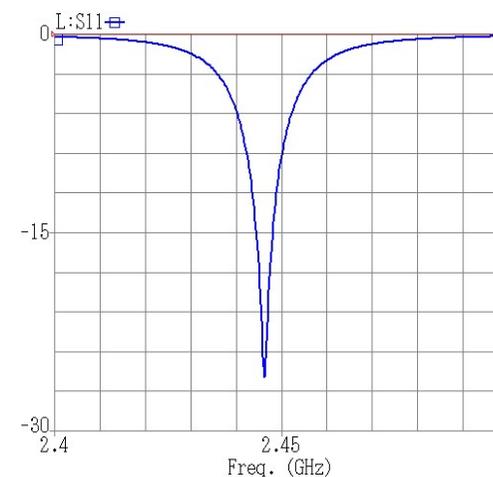
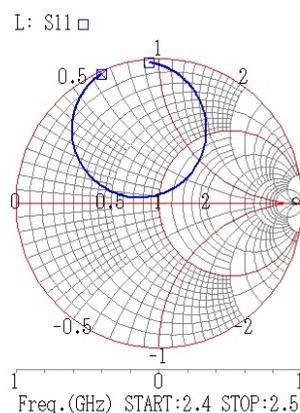
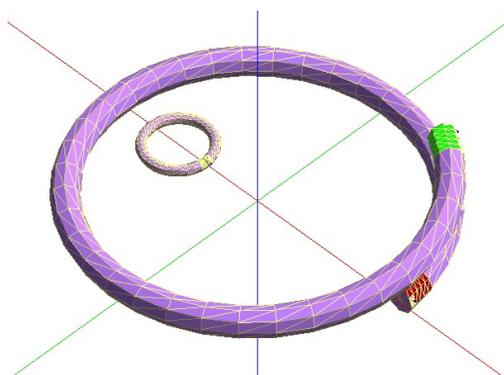


3D指向性

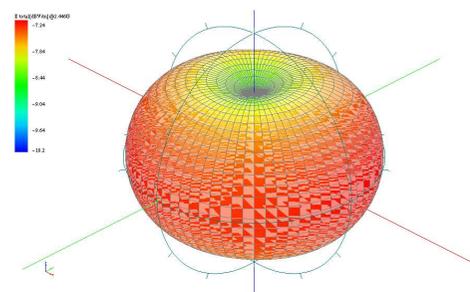
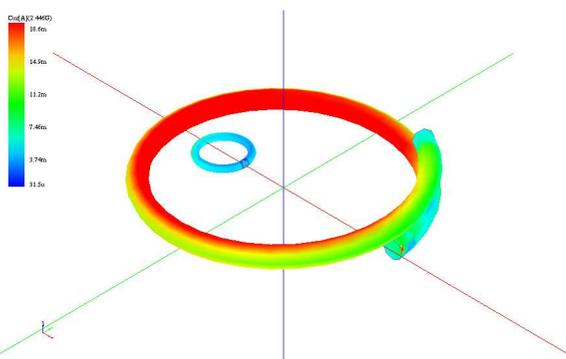
# 2.45GHzマグネティックループ

D=10mm  $\phi=0.8$ mm

巻き数: 1.17T



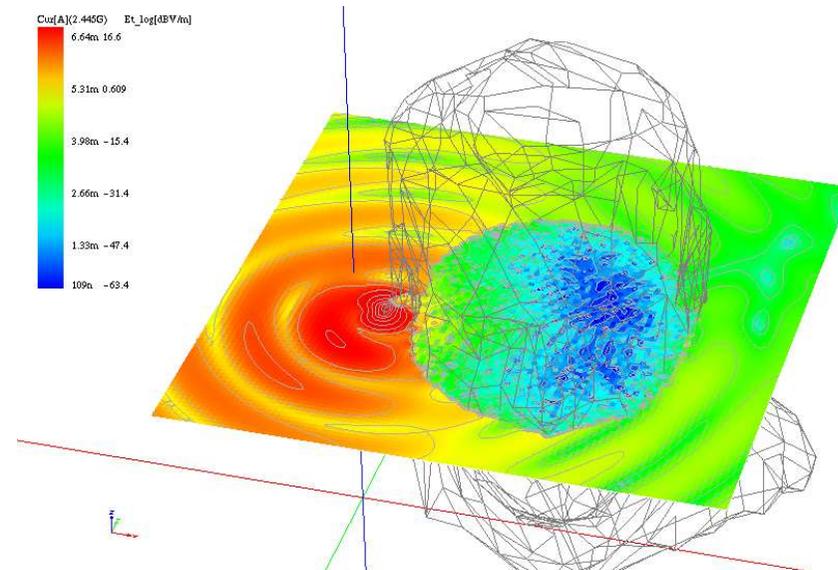
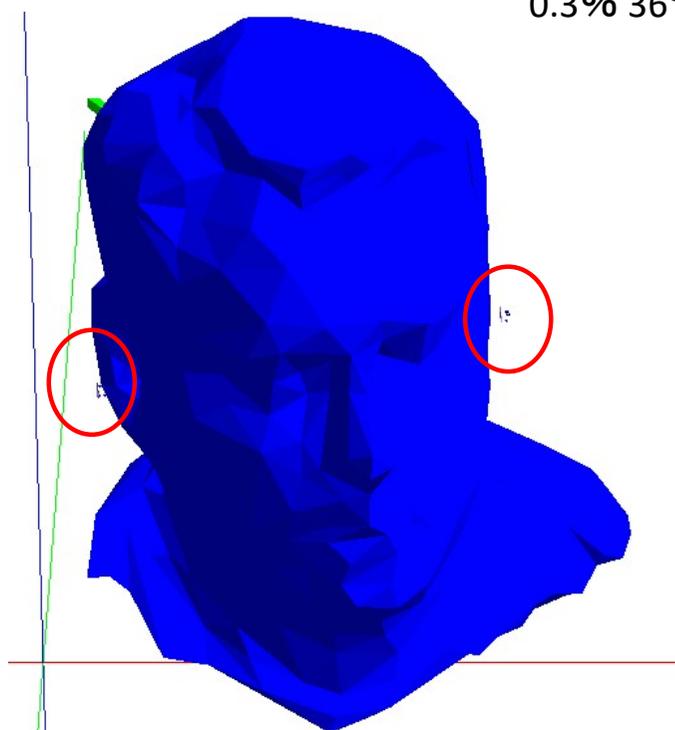
共振容量は0.17pF程度になるので、部分的に重ねて自己共振を用いる方がよい



Active port imp.=50  
VSWR=1  
Direction :  $\theta=90, \phi=30$   
 $S_r=0.000501588$ [W]  
 $G_d=1.73852$ [dBi]  
 $G_a=1.00587$ [dBi]  
Efficiency=84.4764[%]

# 人体の影響と左右の伝送特性

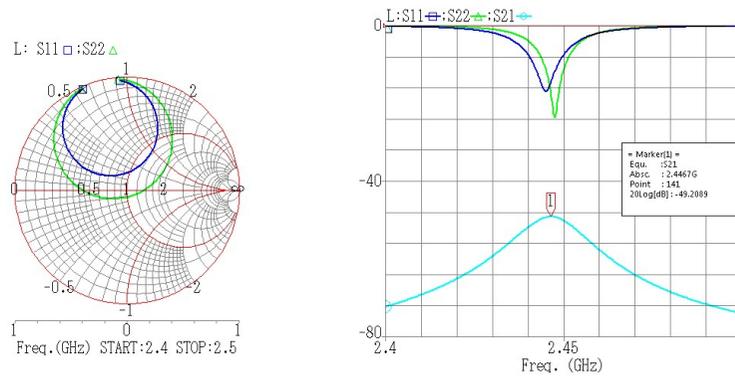
人体モデル：  
0.3% 36°C塩水



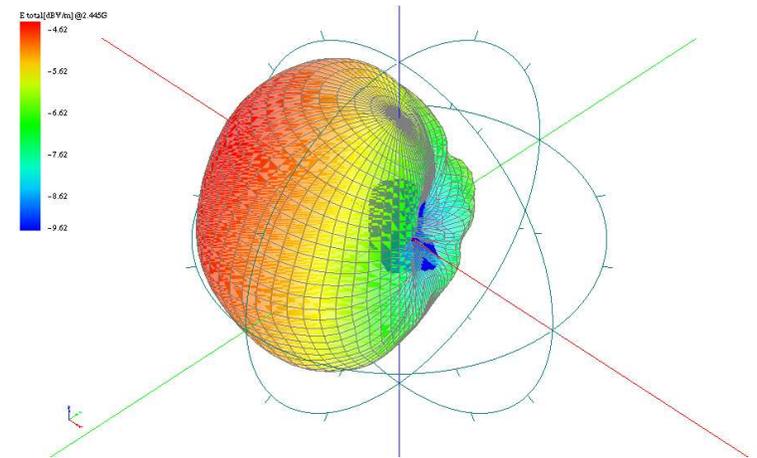
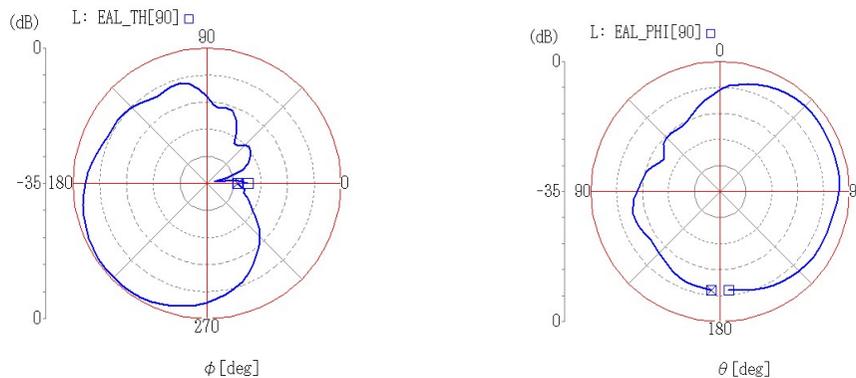
# 人体の影響と左右の伝送特性 MEL Microwave & Electronics Laboratory

リターンロス、伝達特性、指向性

人体による周波数変動は少ない



左右の伝達特性: -50dB

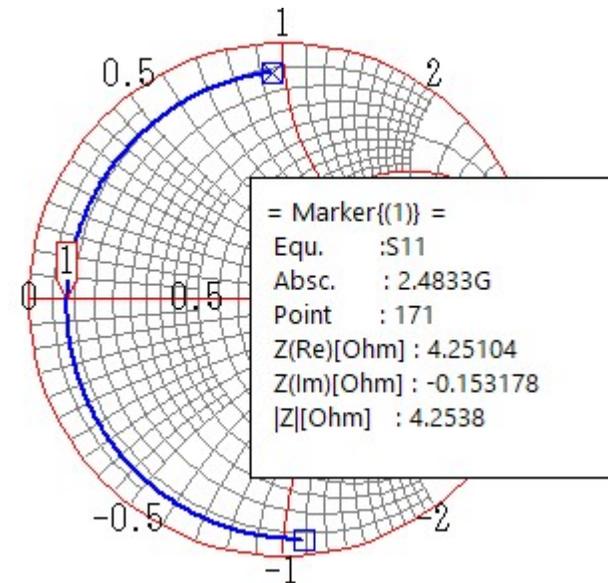
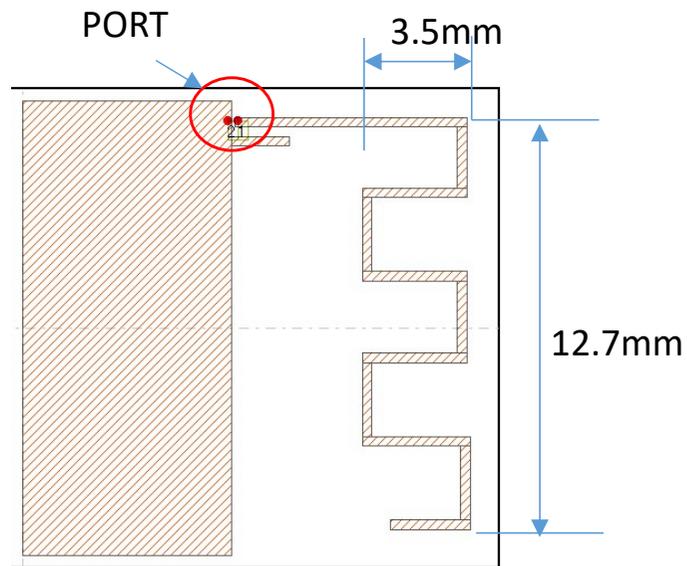


Active port imp.=50  
 VSWR=1  
 Direction :  $\theta=55, \phi=220$   
 $S_r=0.000916654$  [W]  
 $G_d=6.11958$  [dBi]  
 $G_a=3.62445$  [dBi]  
 Efficiency=56.2973 [%]

放射効率 は 28% 減少

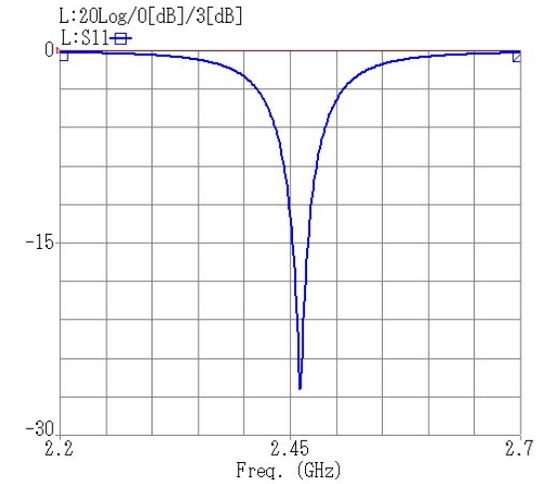
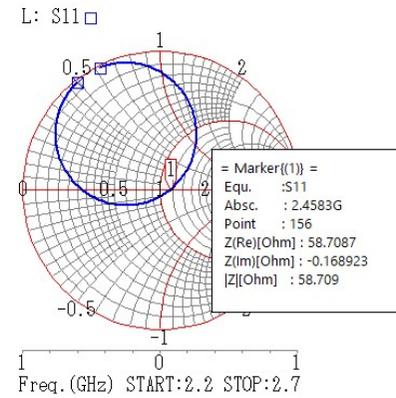
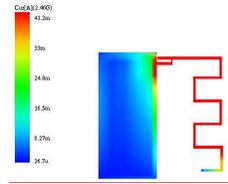
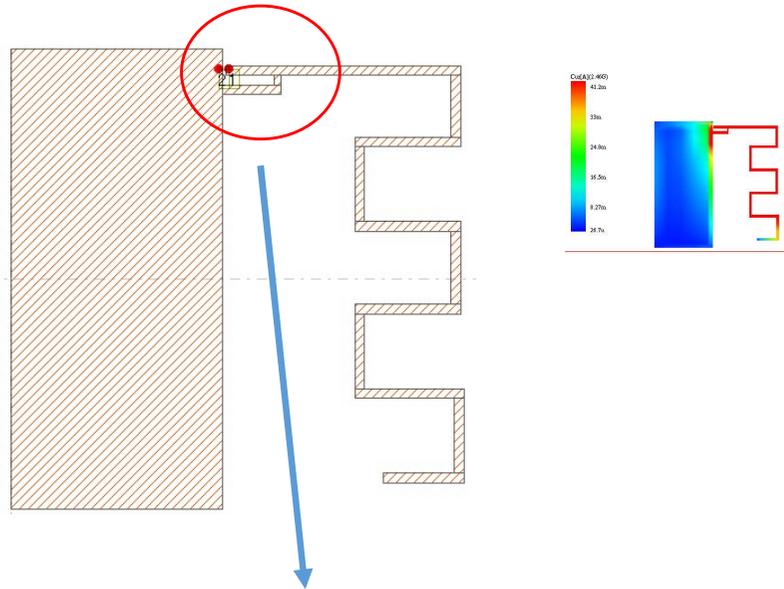
# プリント板アンテナ

# 2.45GHzプリントアンテナ

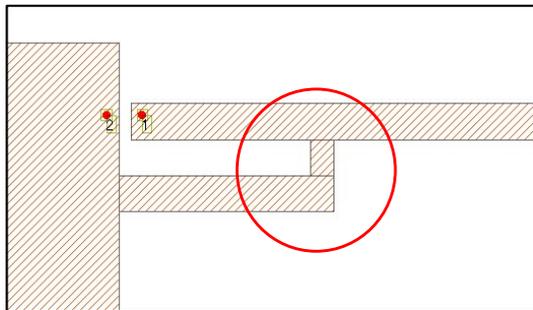


- ・パターン長を調整して2.45GHzに合わせる
- ・メアンダはあまり密にしない

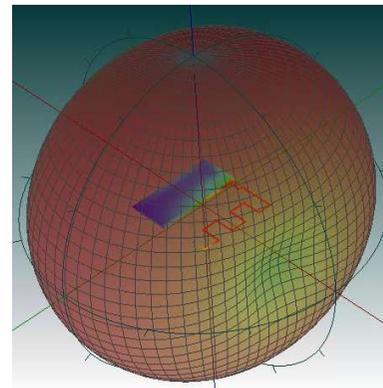
# 整合回路を追加



## 整合特性



ガンママッチ



放射特性

--- Far field analysis ---

VSWR=1

Direction : th=175,phi=260

Gd=1.62058[dBi]

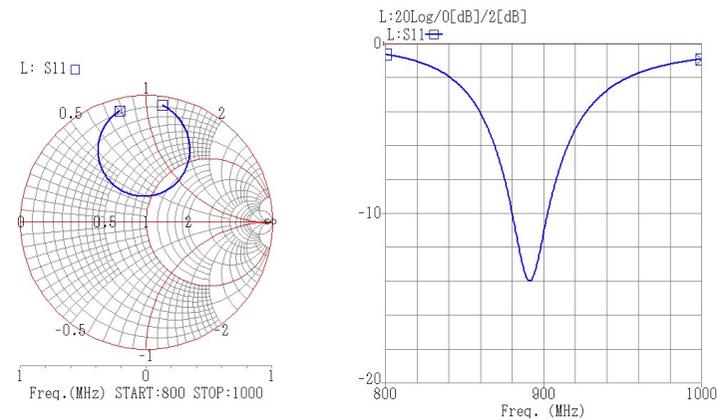
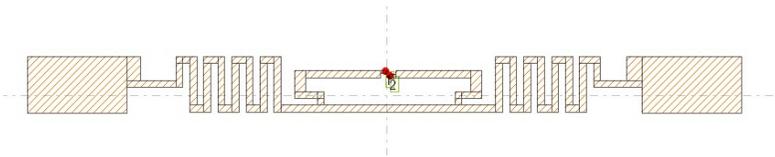
Ga=1.19166[dBi]

Efficiency=90.5958[%]

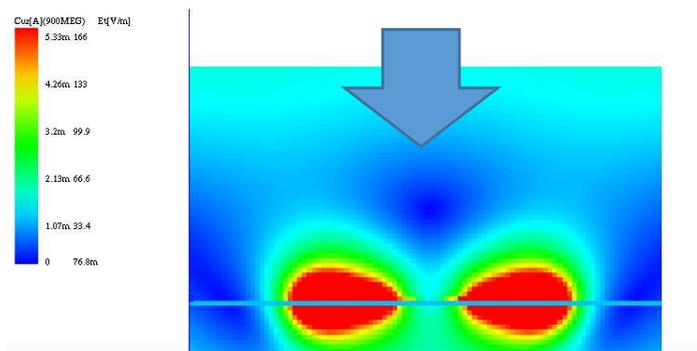
Axis ratio= 1: 0.000187325

# RFTAG(900MHz)の特性

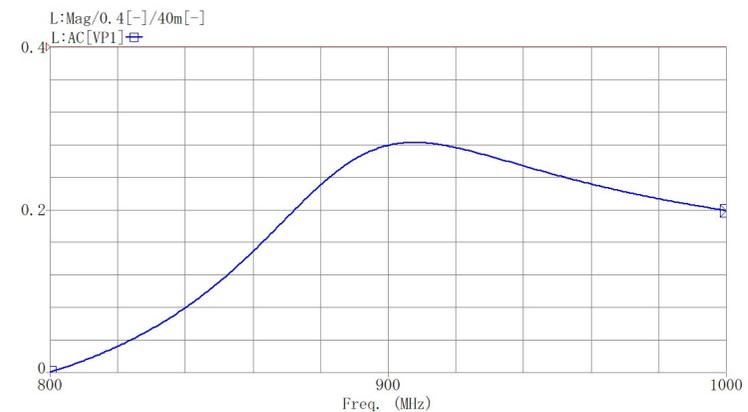
- ・Sパラメータ解析
  - ・入射波解析
- ポートインピーダンス:200Ω



Sパラ特性



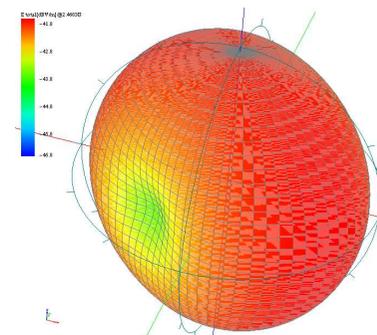
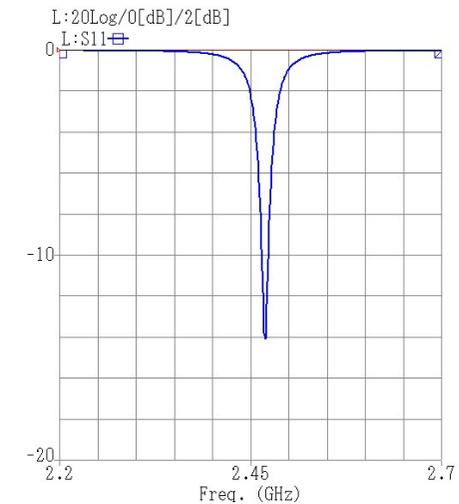
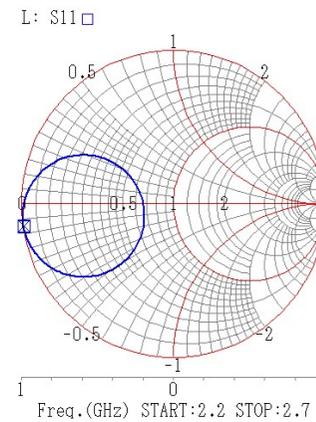
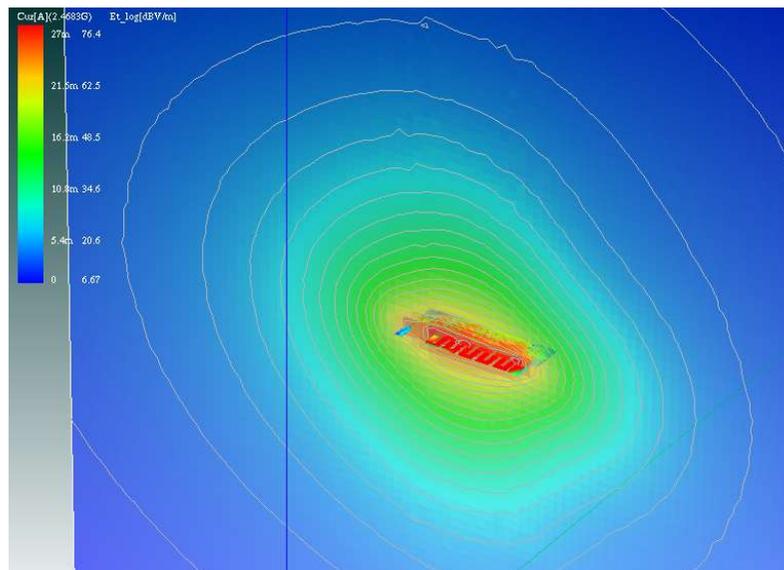
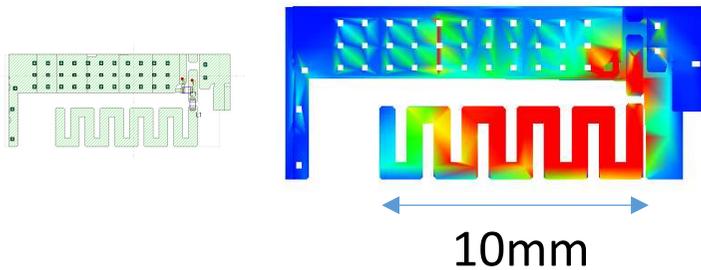
入射電界、散乱電界



0dBm入射時のポート誘起電圧

# プリント板Wi-Fiアンテナ

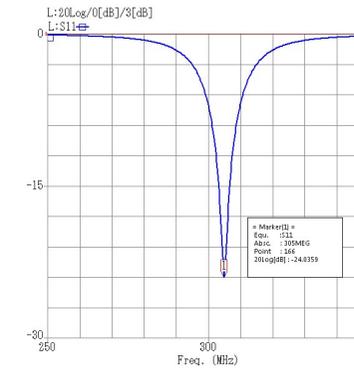
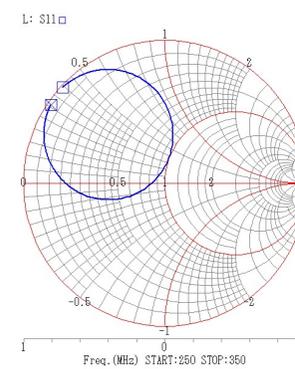
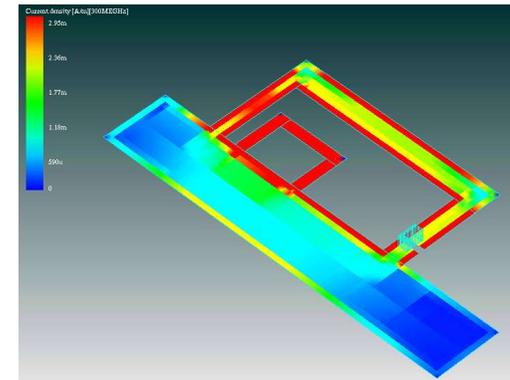
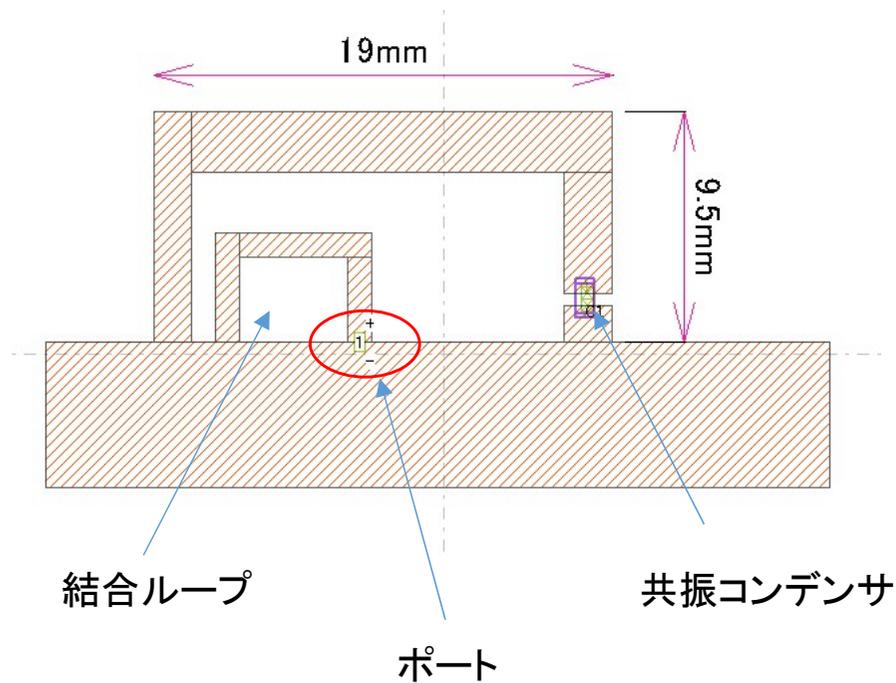
ガーバーファイルからアンテナ部分を切り取ったシミュレーションです



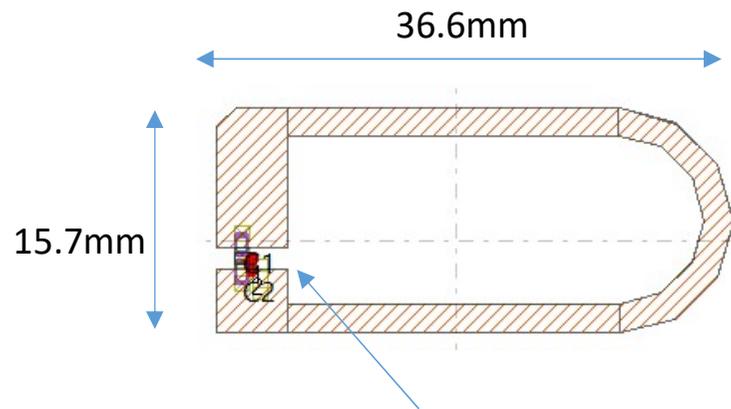
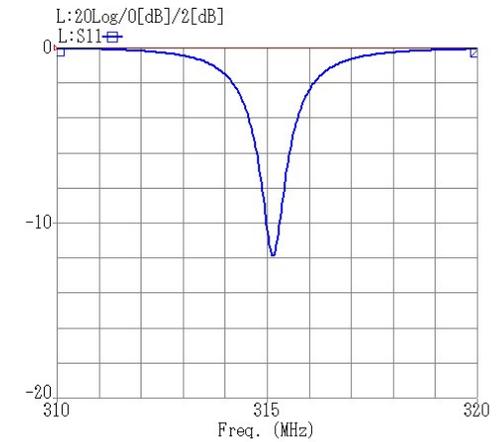
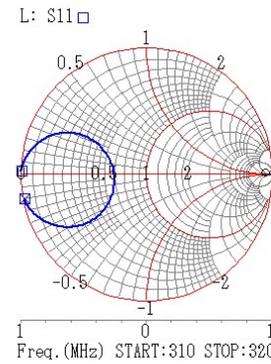
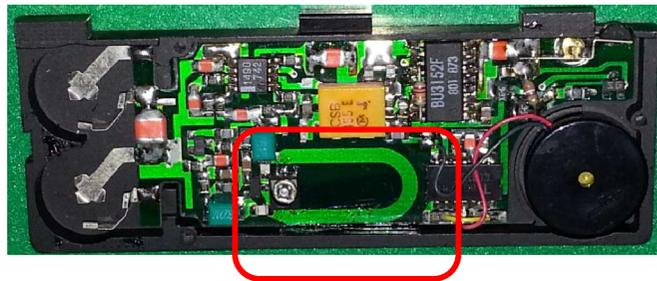
--- Far field analysis ---  
 Frequency 2.4683G Hz  
 Direction : th=90,phi=145  
 Gd=1.82566[dBi]  
 Ga=-7.76317[dBi]  
 Efficiency=10.993[%]  
 Axis ratio= 1:7.50804e-15

# 磁界型アンテナ例 (300MHz)

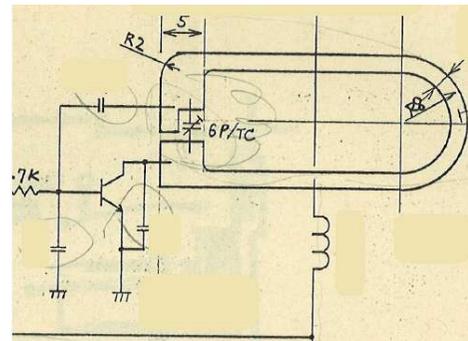
任意サイズで作成可能



# 小型機器への適用例



共振,整合回路



--- Far field analysis ---

VSWR=1

Direction : th=90,phi=180

Gd=1.72737[dBi]

Ga=-10.8688[dBi]

Efficiency=5.50026[%]

Axis ratio= 1: 1.53493e-14

# 入射波解析(電波放射による電力伝送:レクティナ)

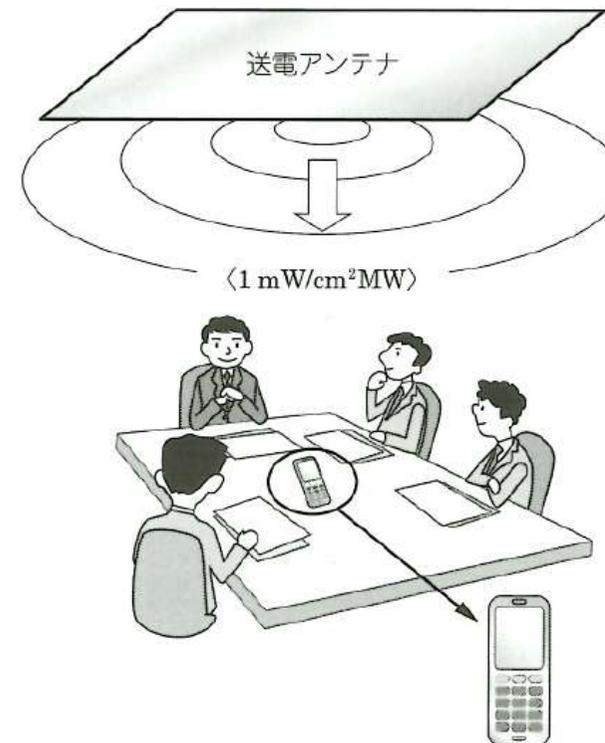
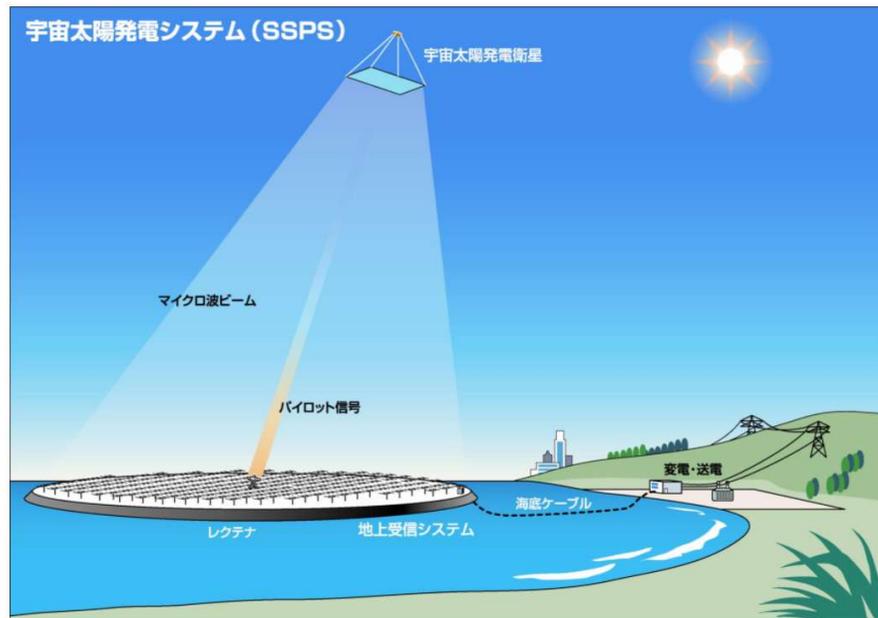


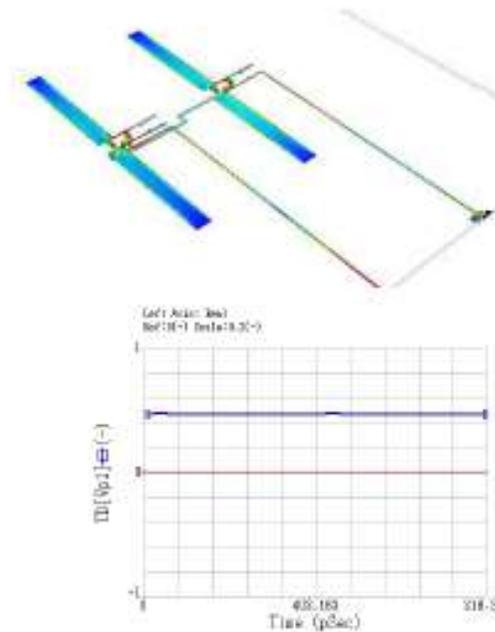
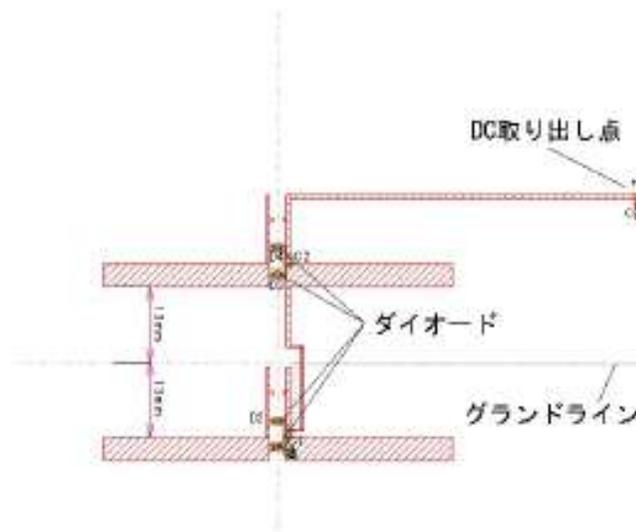
図 2.16 マイクロ波による 3 次元空間ワイヤレス給電のイメージ

- [1] 松木英敏, 高橋俊輔, “ワイヤレス給電技術がわかる本”, オーム社
- [2] 日刊工業新聞2015年11月13日「創刊100周年特別号」より

# 電波放射による電力伝送

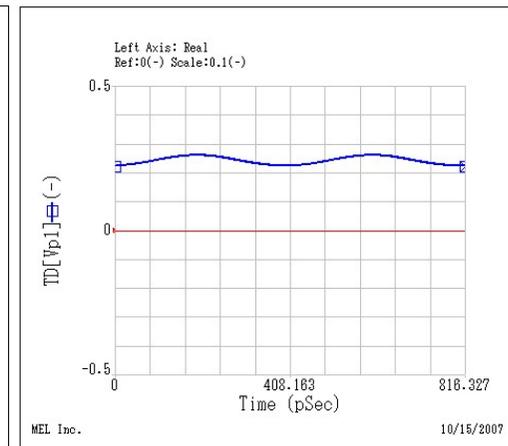
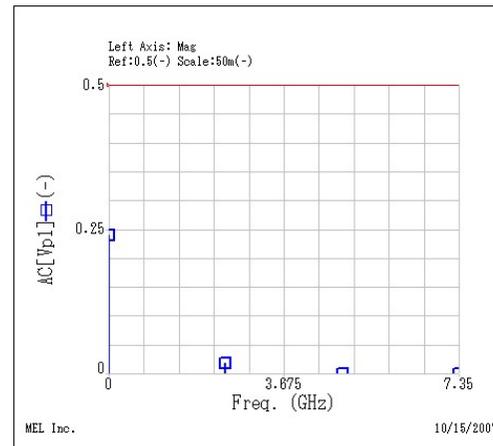
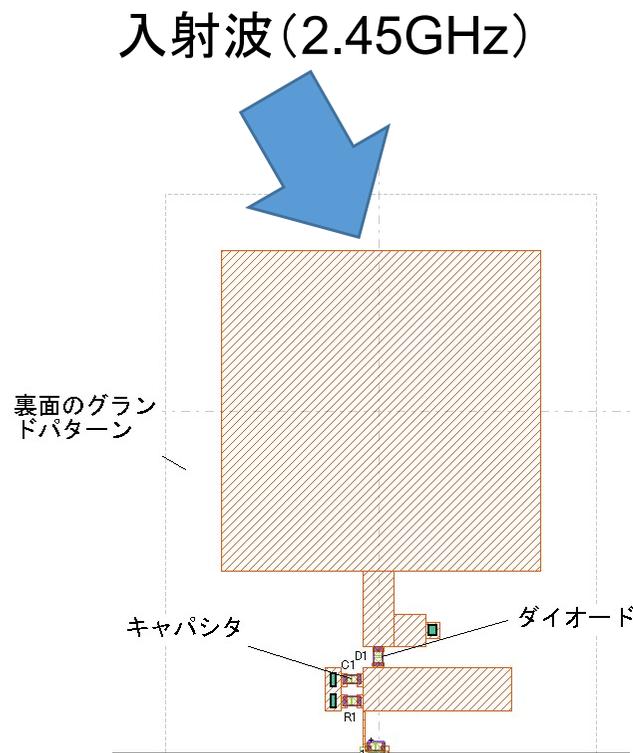
## ダイポールレクティナアンテナ

ダイポールアンテナを2個使用したレクティナアンテナです。1アンテナあたりダイオードを2個用いて倍電圧検波回路を構成しています。解析条件としては、 $14\text{V/m}@2.45\text{GHz}$ の電界強度の電磁波が正面方向から到来している場合の特性を解析しています。ポート抵抗は $500\text{K}\Omega$ として開放電圧を見ています。約 $460\text{mV}$ のDC成分が得られ、この値はモノポールアンテナ時のほぼ2倍の値になっています

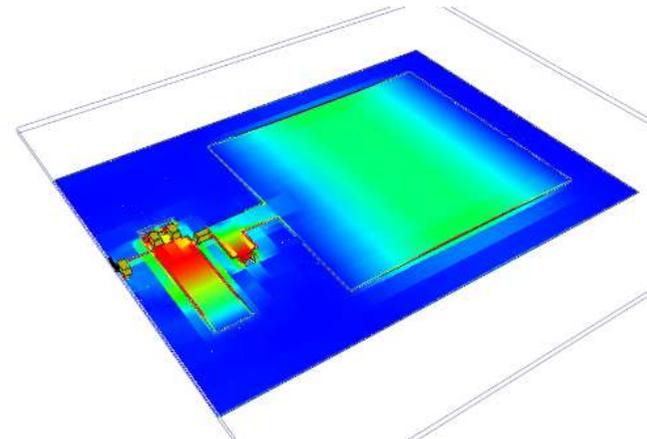


# 電波放射による電力伝送

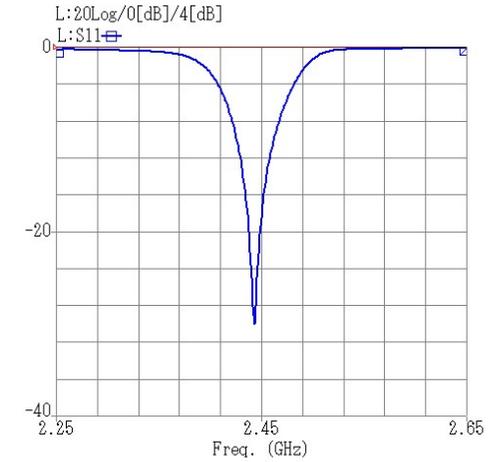
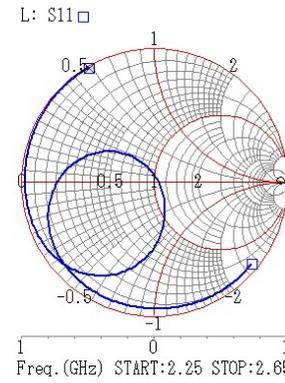
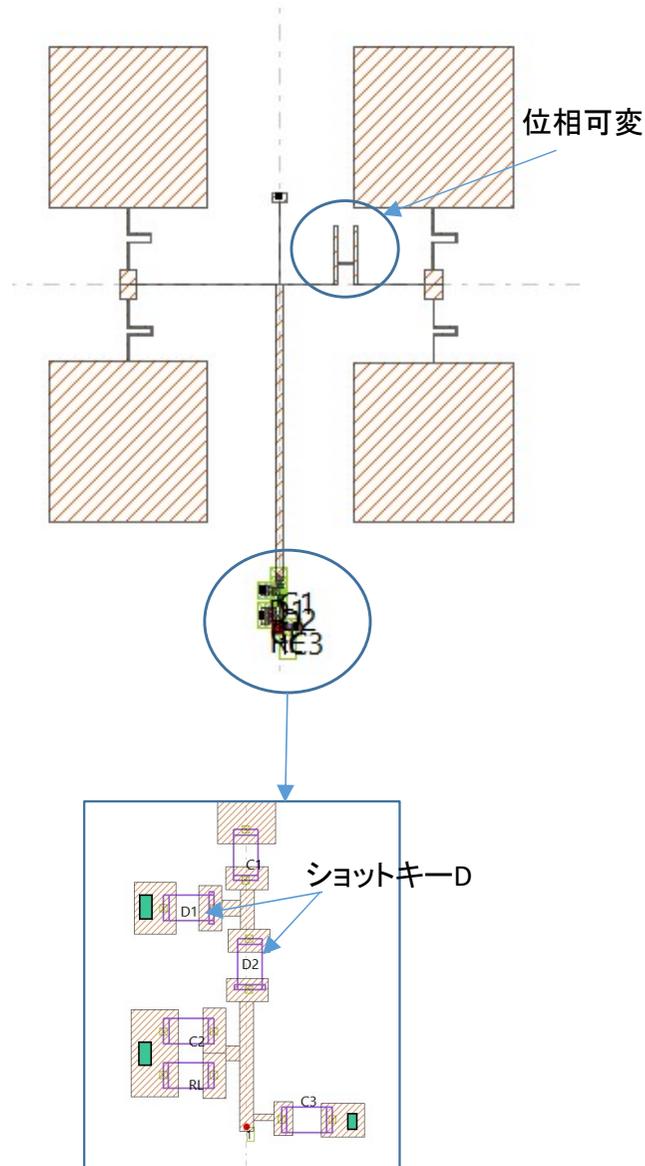
## マイクロ波による電力伝送



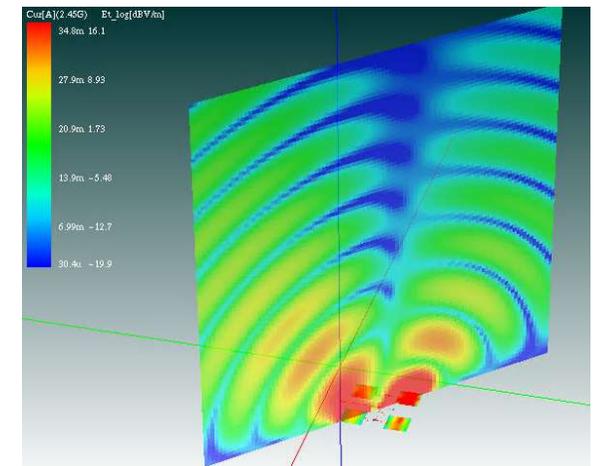
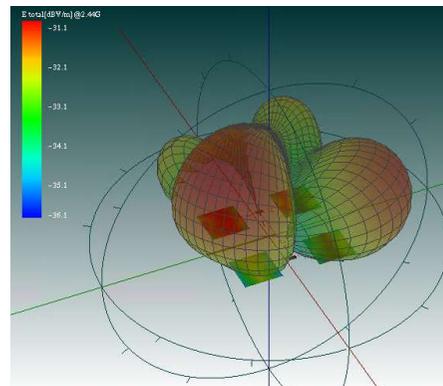
ポート端子でのスペクトルと波形 240mVのDC出力が出ている  
(開放電圧)  
入射電界強度 : 14V/m  
負荷抵抗 (ポート抵抗) : 500K $\Omega$



# 左右のパッチの位相を変えた4アレイパッチ レクティナテスト



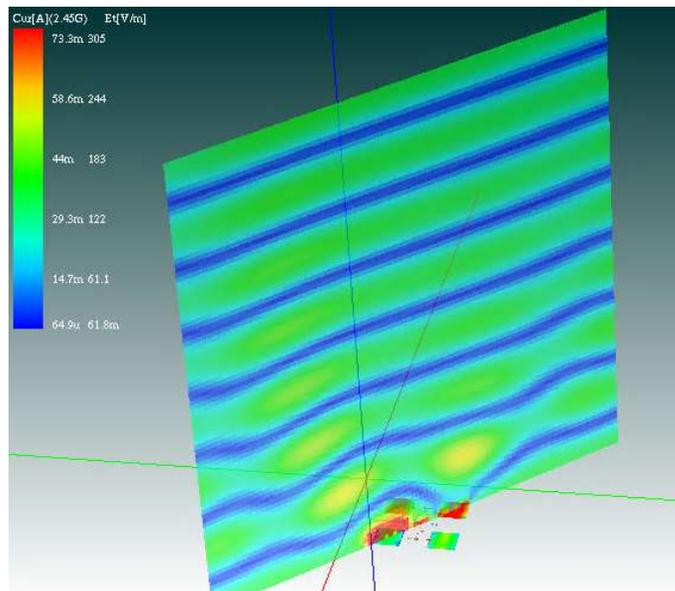
①アンテナのsパラ特性と放射特性



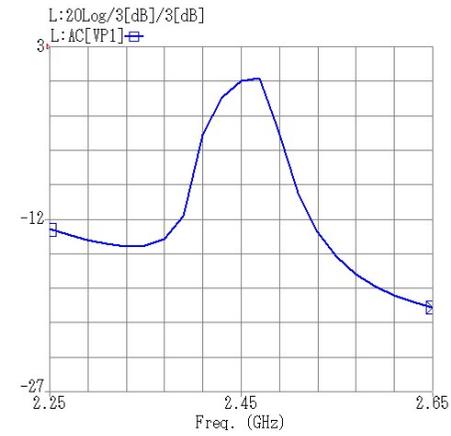
放射パターンと放射電界

②入射波特性とレクティナDC出力特性

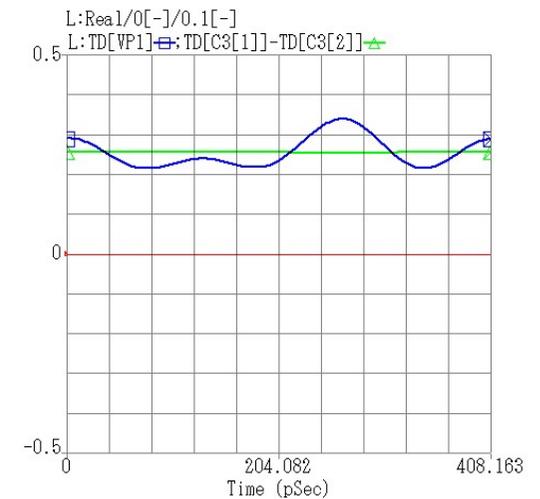
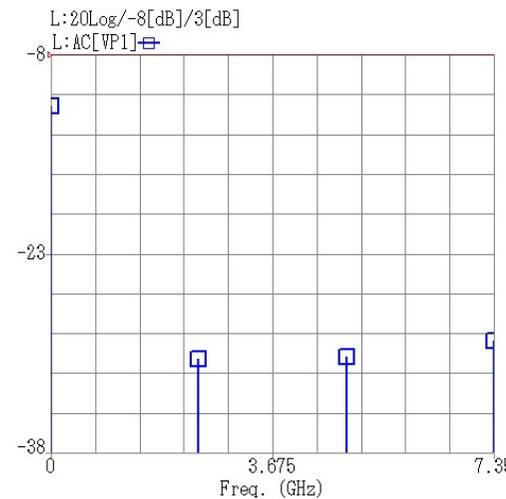
入射電界 : 2.45GHz 0dbm  
 $\Theta=30$ 度  $\phi=-45$ 度



入射電界と散乱電界の様子

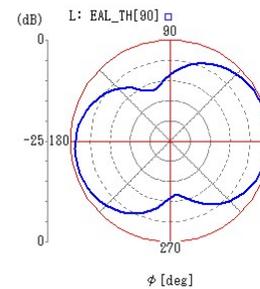
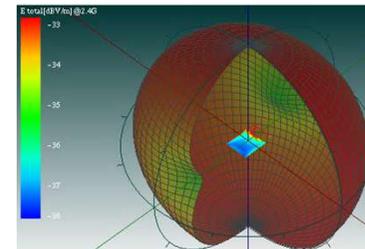
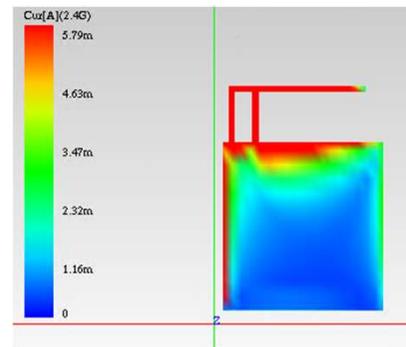
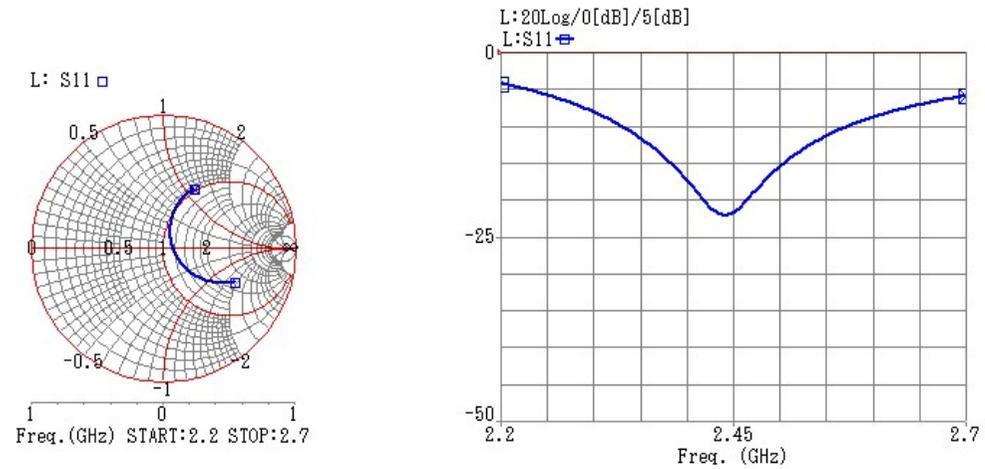
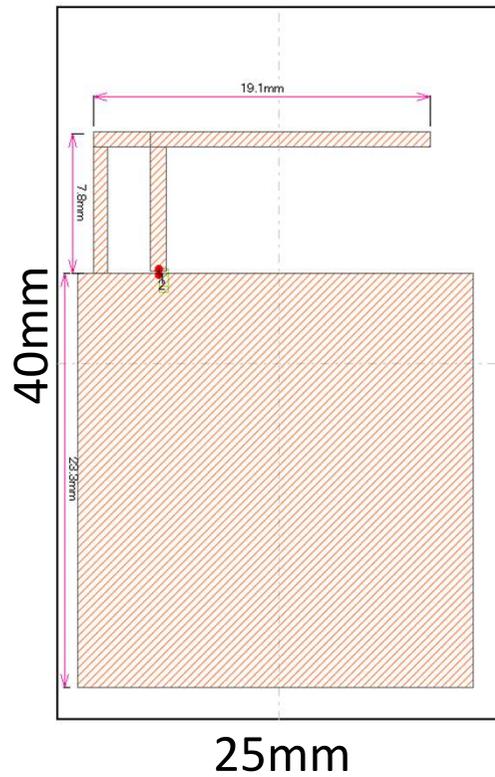


入射波をスイープしたときのポート誘起電圧



整流出力 左:スペクトル 右:ポート波形

# 逆Fアンテナ PC板 2.45GHz

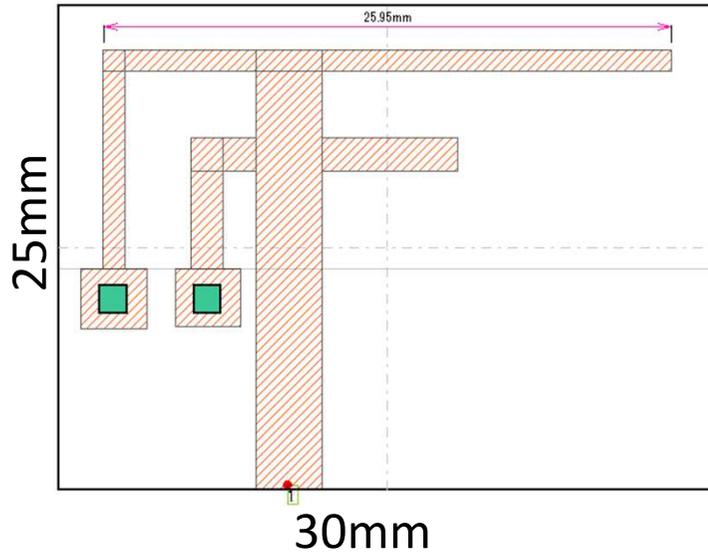


--- Far field analysis ---  
 Frequency 2.4G Hz  
 Direction : th=40,phi=5  
 Srm=0.000500096[W]  
 Gd=2.05013[dBi]  
 Ga=0.99293[dBi]  
 Efficiency=78.3934[%]  
 Axis ratio= 1:6.19488e-05

解析時間:  
 25秒/Freq  
 Sweep: 4.13分

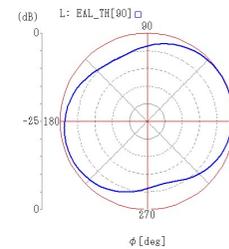
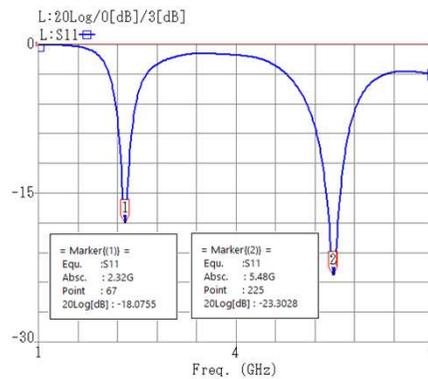
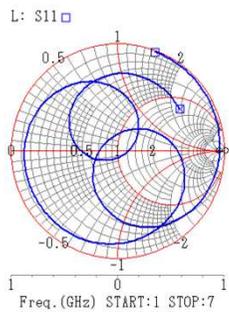
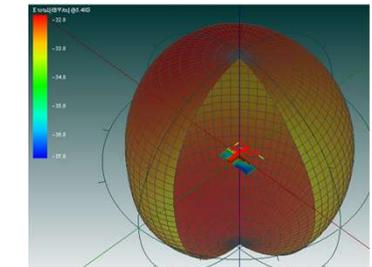
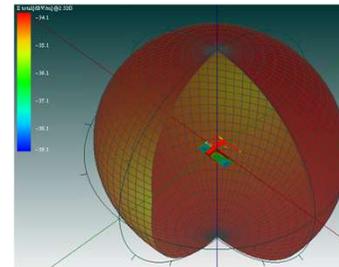
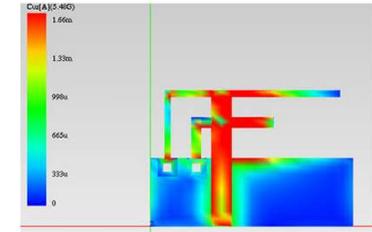
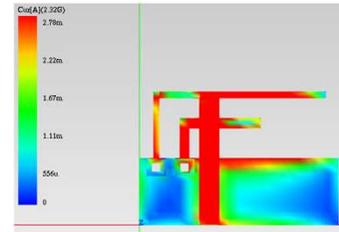
# Dual Band 逆Fアンテナ

## PC板 2.45GHz

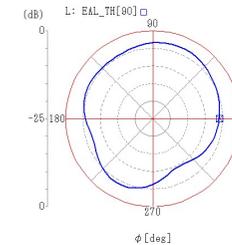


2.32GHz

5.48GHz



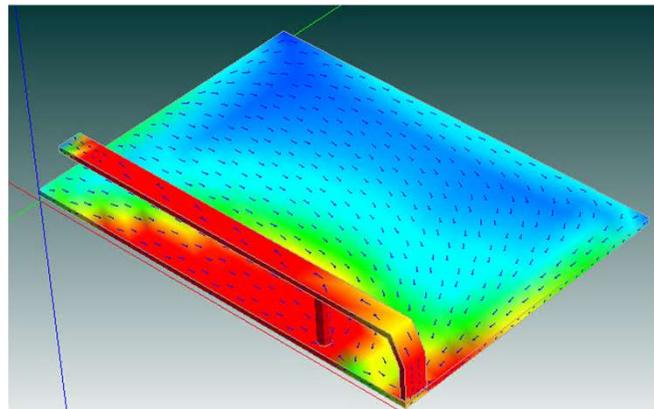
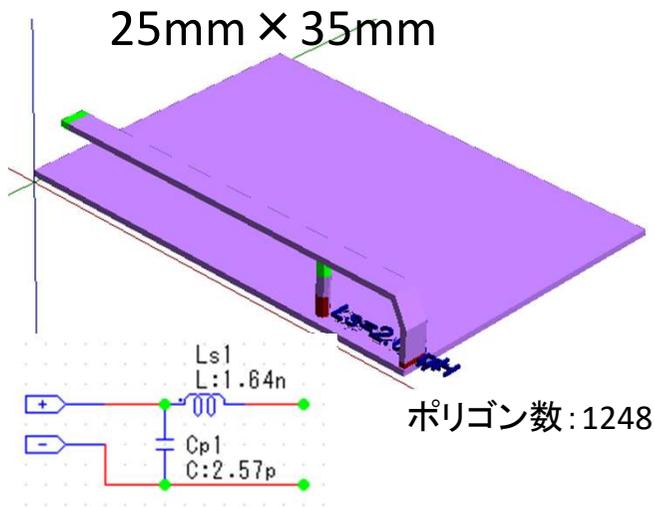
--- Far field analysis ---  
 Frequency 2.32G Hz  
 Direction : th=45,phi=25  
 Gd=1.56904[dBi]  
 Ga=-0.0503065[dBi]  
 Efficiency=68.8756[%]  
 Axis ratio= 1:0.0142919



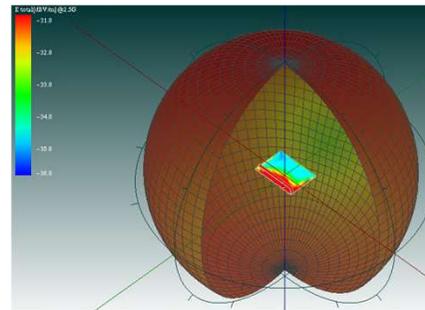
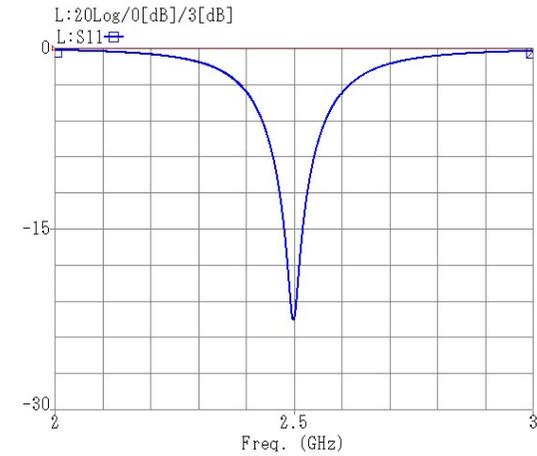
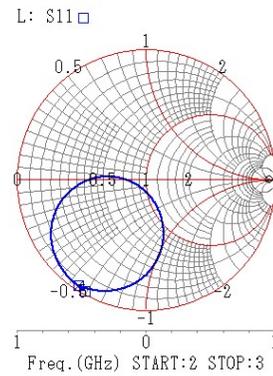
--- Far field analysis ---  
 Frequency 5.48G Hz  
 Direction : th=20,phi=190  
 Gd=3.30132[dBi]  
 Ga=1.16401[dBi]  
 Efficiency=61.1321[%]  
 Axis ratio= 1:0.085625

解析時間:  
 35秒/Freq  
 Sweep:19分

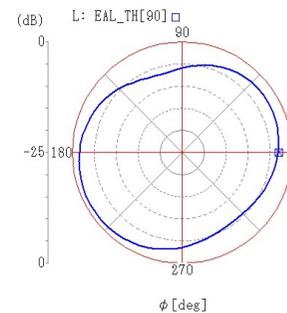
# 3D 逆Fアンテナ 2.5GHz



解析時間:  
3秒/Freq  
Sweep: 34秒

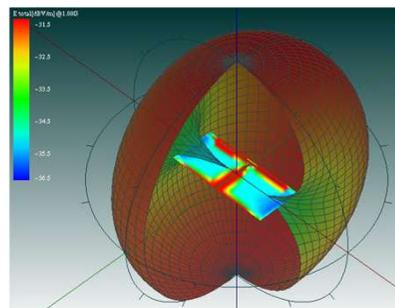
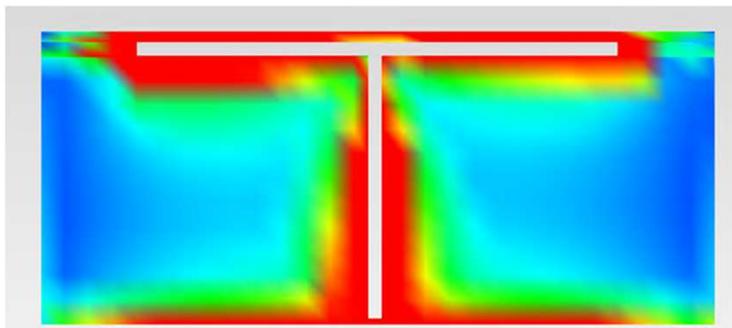
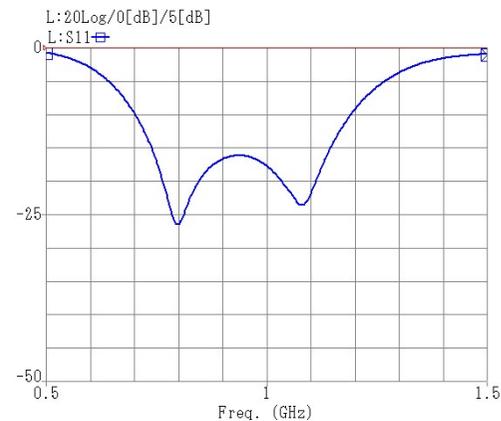
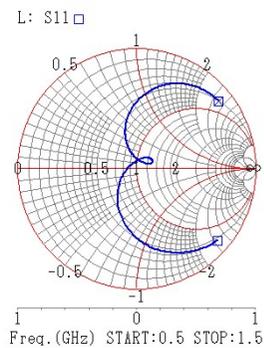
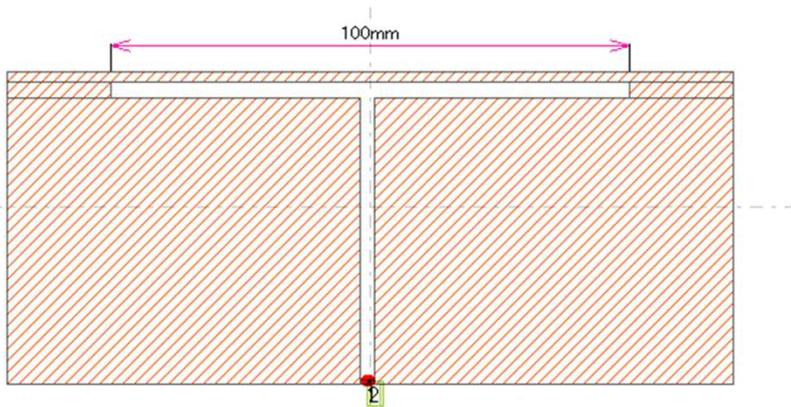


--- Far field analysis ---  
Frequency 2.5G Hz  
Direction : th=15,phi=160  
Gd=2.30101[dBi]  
Ga=2.22431[dBi]  
Efficiency=98.2494[%]  
Axis ratio= 1:0.0816037

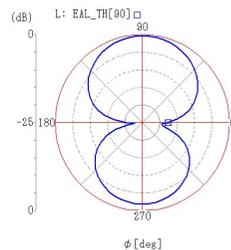




# プリントスロットダイポールアンテナ 1.08GHz

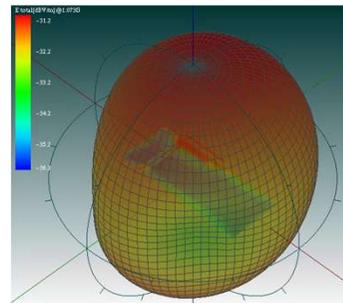
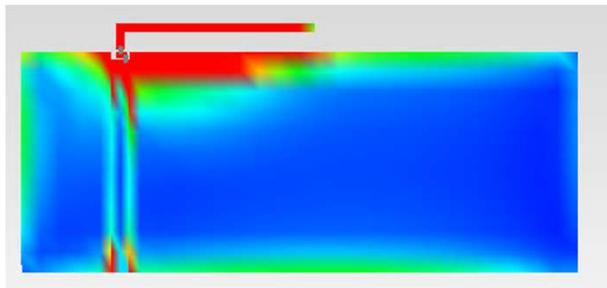
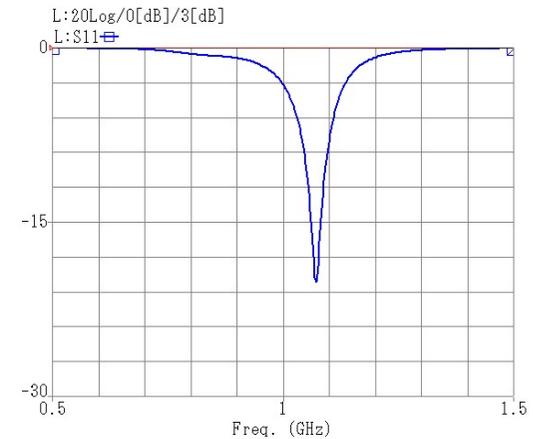
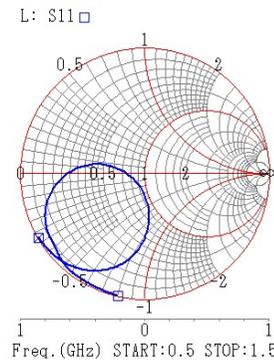
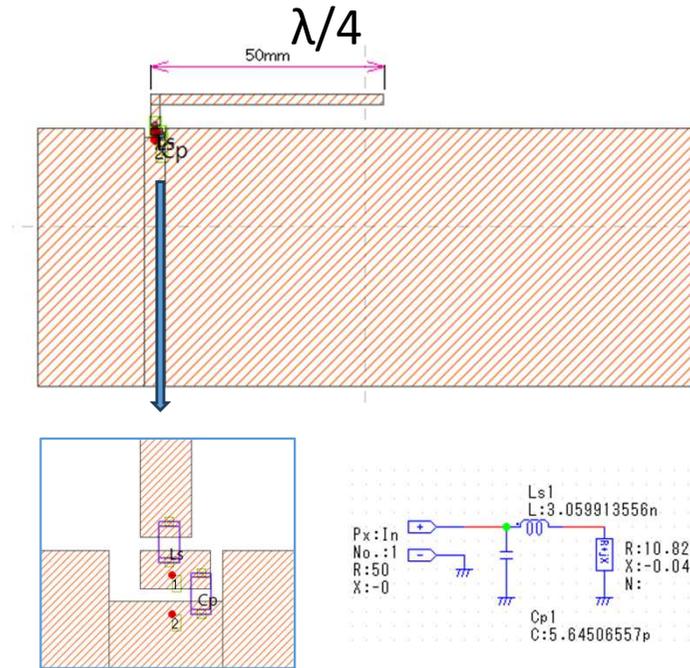


--- Far field analysis ---  
Frequency 1.08G Hz  
Direction : th=20,phi=90  
Gd=2.75047[dBi]  
Ga=2.46943[dBi]  
Efficiency=93.7337[%]  
Axis ratio= 1:0.00179688

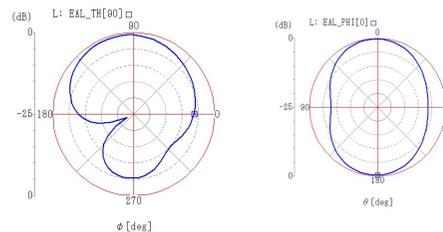


解析時間:  
34秒/Freq  
Sweep: 10.4分

# 1/4波長プリントモノポールアンテナ 1.073GHz



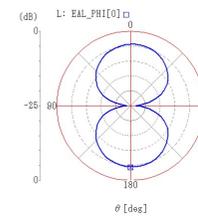
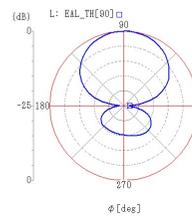
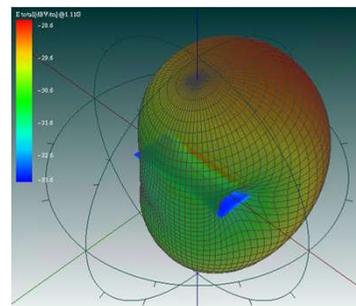
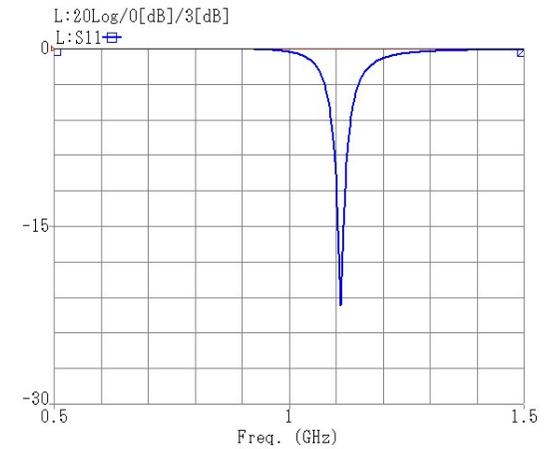
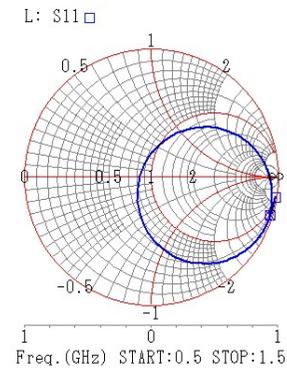
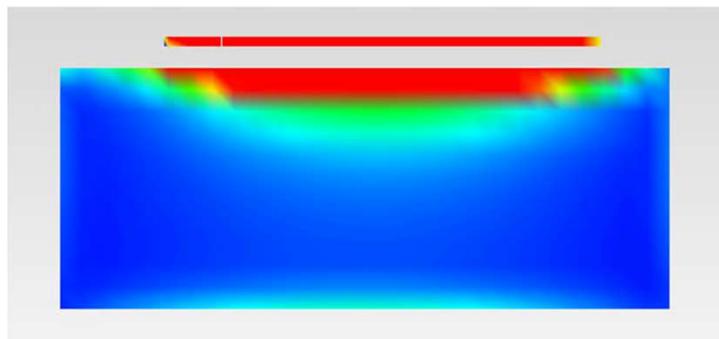
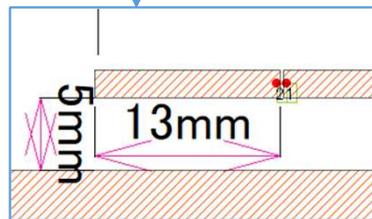
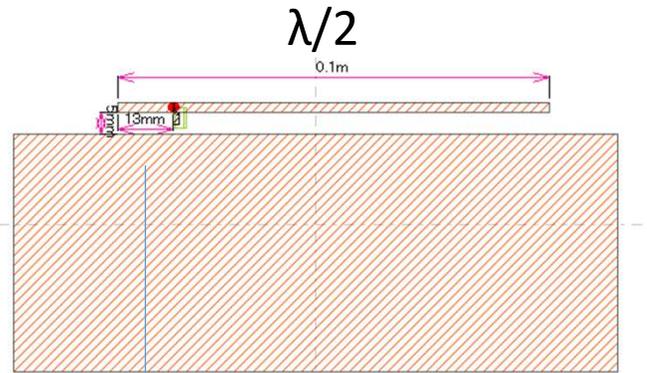
--- Far field analysis ---  
 Frequency 1.073G Hz  
 Direction : th=20,phi=105  
 Gd=2.82645[dBi]  
 Ga=2.78193[dBi]  
 Efficiency=98.9802[%]  
 Axis ratio= 1:0.143906



解析時間:  
 34秒/Freq  
 Sweep: 11.3分

# 半波長プリントモノポールアンテナ(ノンラジアル)

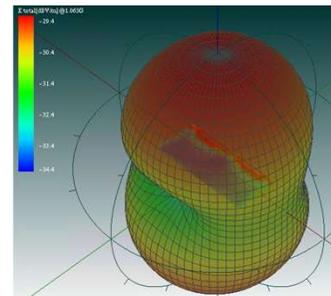
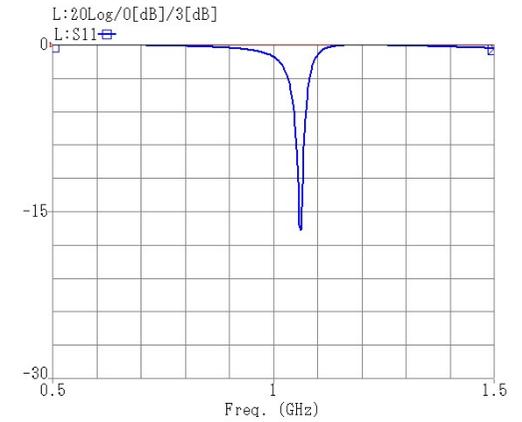
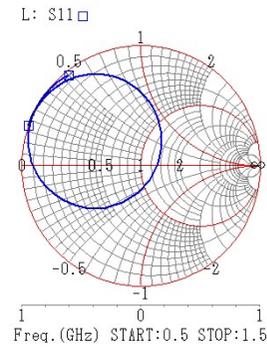
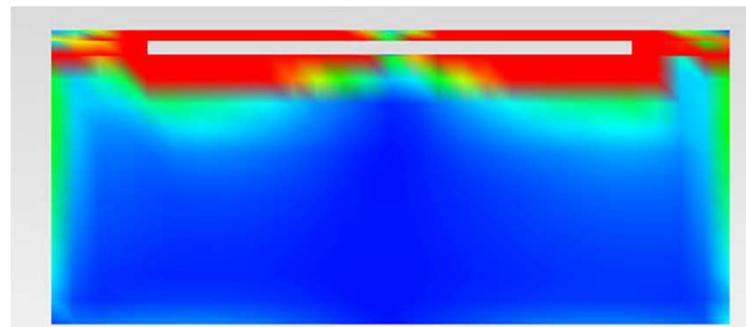
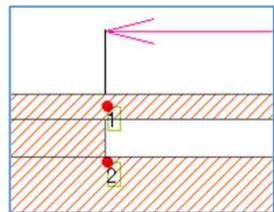
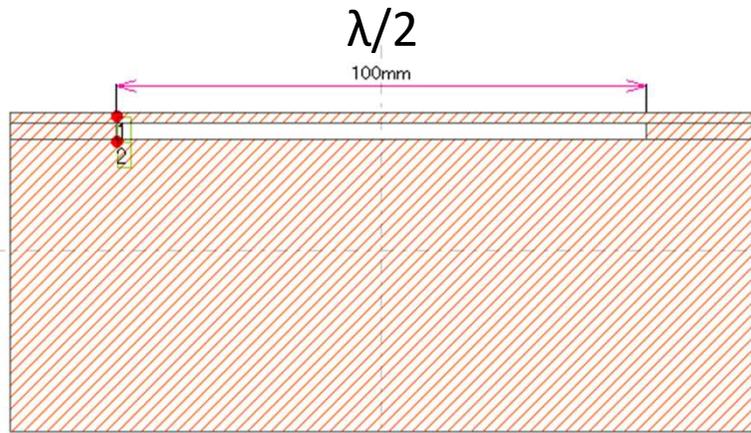
## 1.11GHz



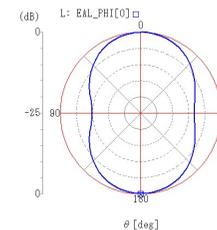
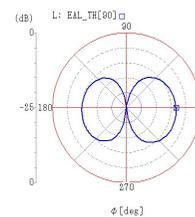
--- Far field analysis ---  
 Frequency 1.11G Hz  
 Direction : th=90,phi=90  
 Gd=5.66658[dBi]  
 Ga=5.38985[dBi]  
 Efficiency=93.8268[%]  
 Axis ratio= 1:3.63266e-16

# 半波長プリントスロットモノポールアンテナ(ノンラジアル)

1.063GHz

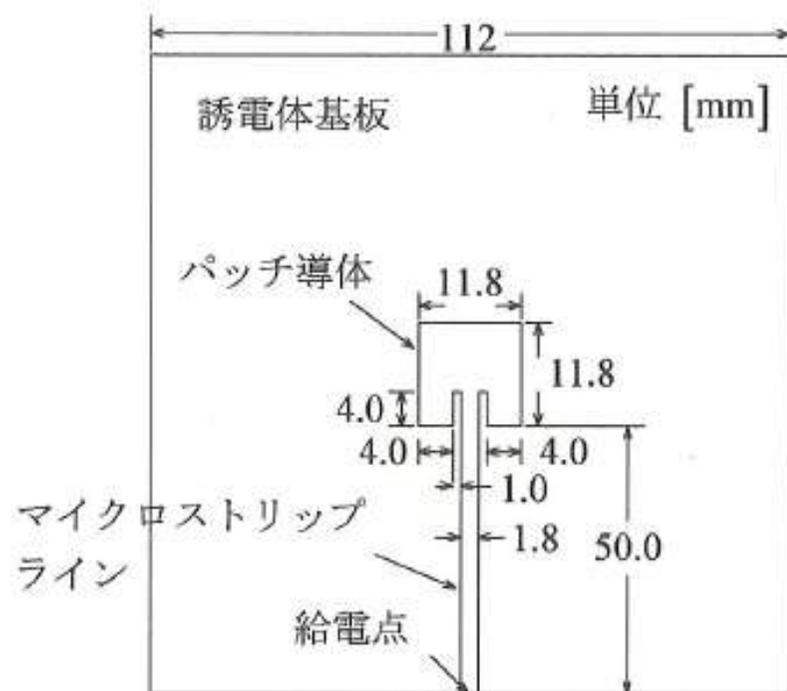


--- Far field analysis ---  
 Frequency 1.063G Hz  
 Direction : th=175,phi=300  
 Gd=4.76275[dBi]  
 Ga=4.61671[dBi]  
 Efficiency=96.6932[%]  
 Axis ratio= 1:8.86421e-07



# 実測比較

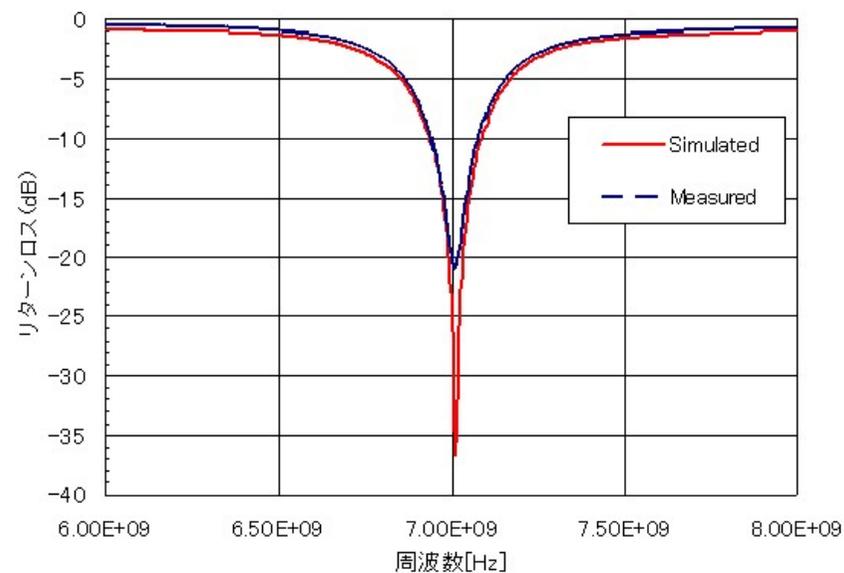
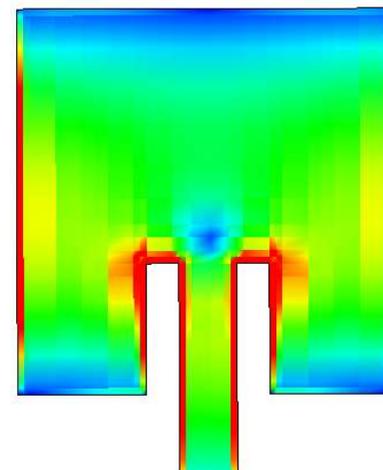
## パッチアンテナ実測比較 (シールド領域GF) MWE2012 規範問題



誘電体基板の厚さ 0.8mm, 比誘電率 3.274,  
銅箔の厚さ 35 $\mu$ m 誘電正接 0.0025,

<参考文献>

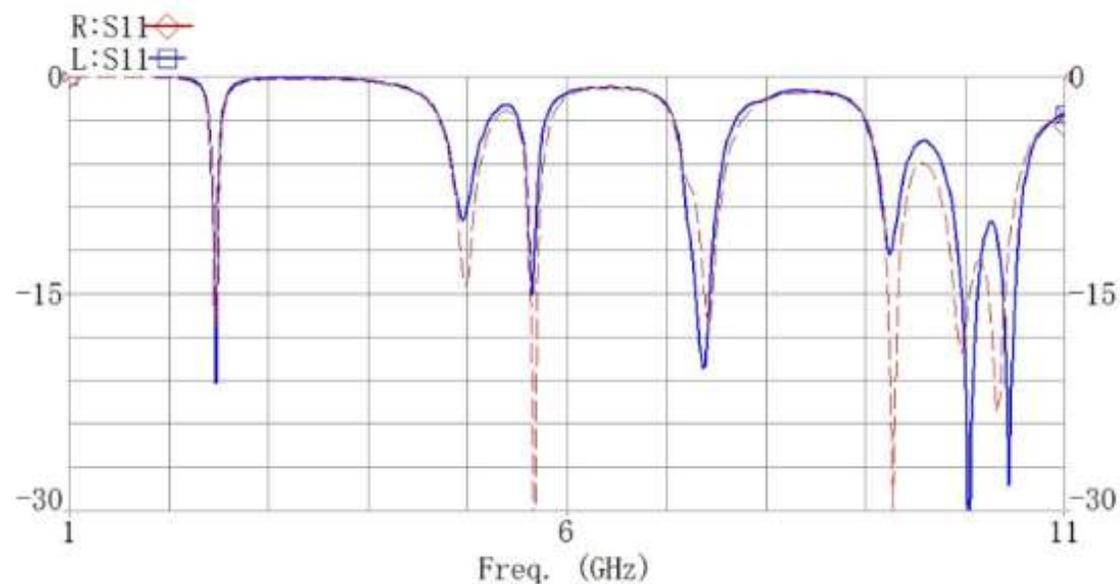
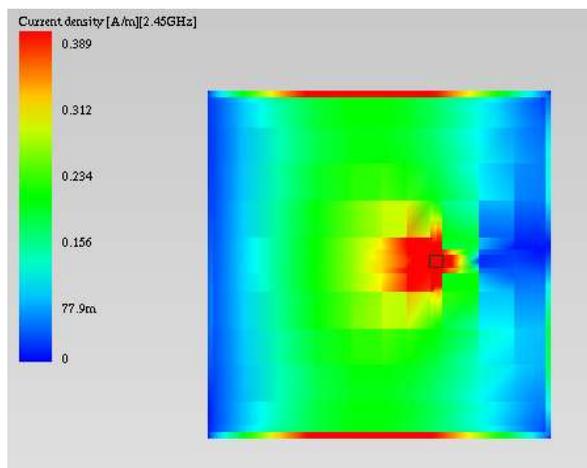
佐藤源貞、川上春夫、田口光雄著、“現代アンテナ工学”、総合電子出版社 pp85-88



## 実測比較

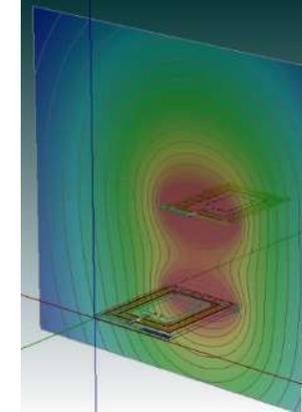
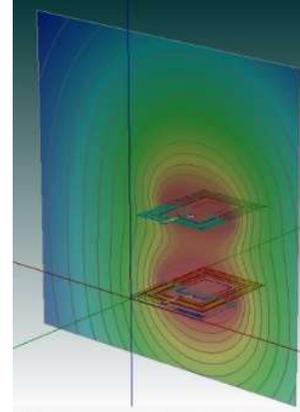
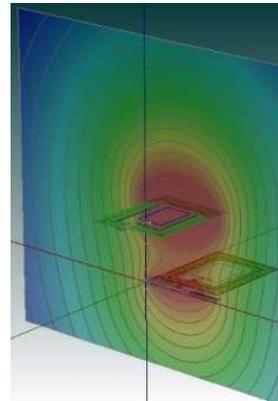
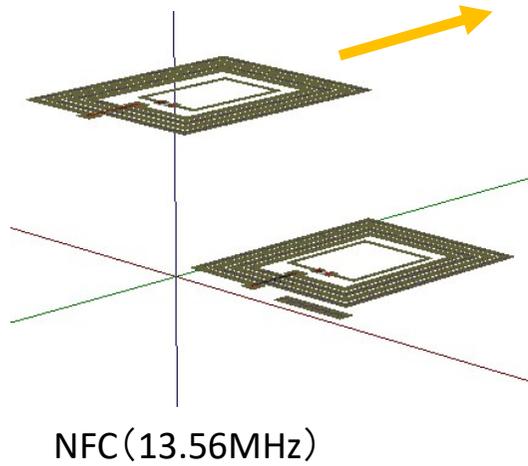
### パッチアンテナ高次特性実測比較（シールド領域GF）

図はビアによる背面給電の2.45GHzのマイクロストリップパッチアンテナのシミュレーションですが、基本波のみならず、11GHzまでの、高次モードの共振周波数において、ほぼすべてで位相を含めて実測と非常に良い一致を示しています。

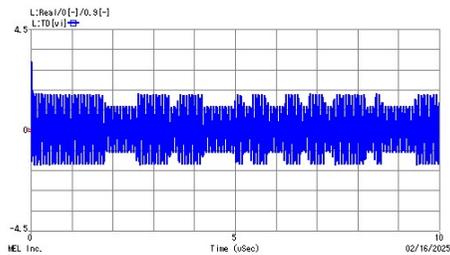


赤線:実測 青:シミュレーション

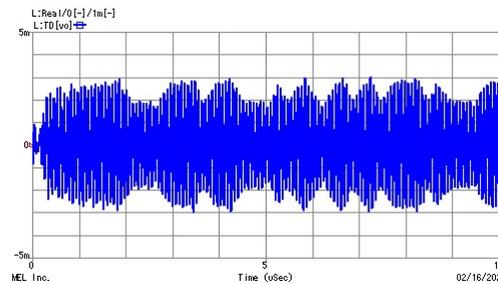
# NFC(Near Field Communication)(13.56MHz)



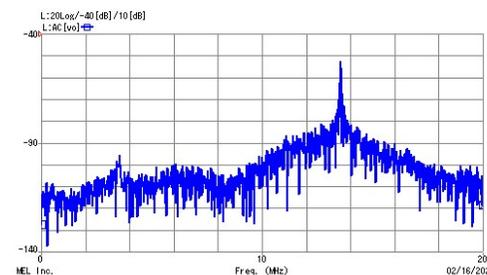
L=100mm 対向時



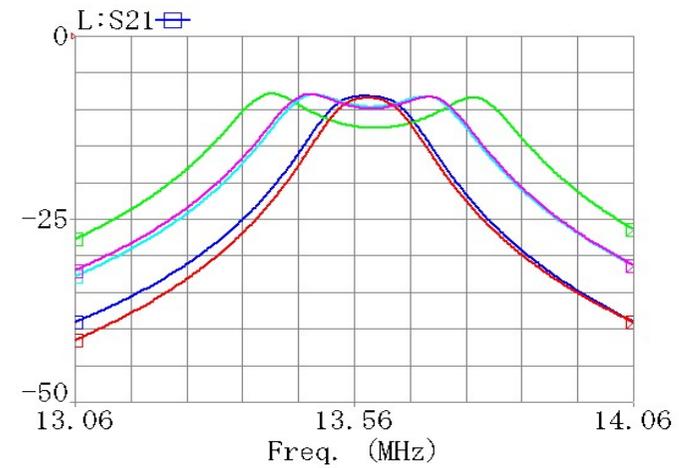
リーダー側出力



カード側波形

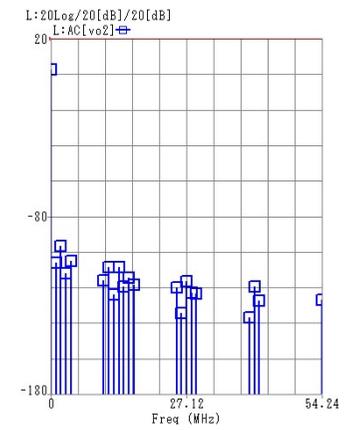
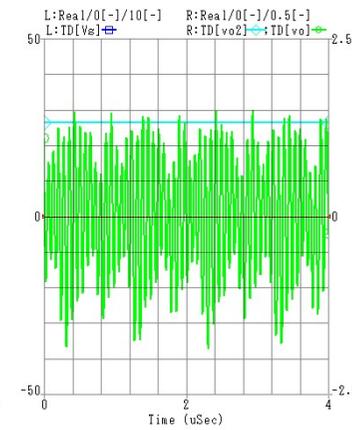
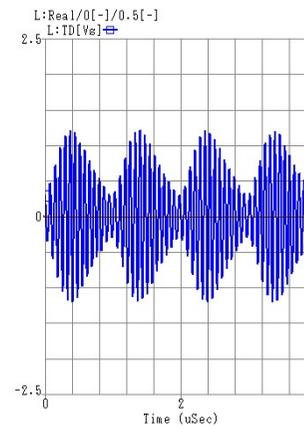
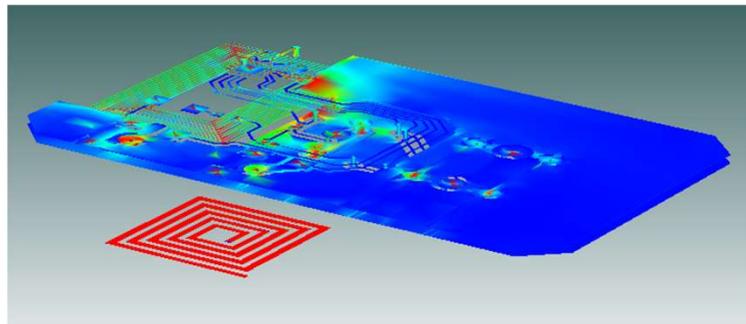
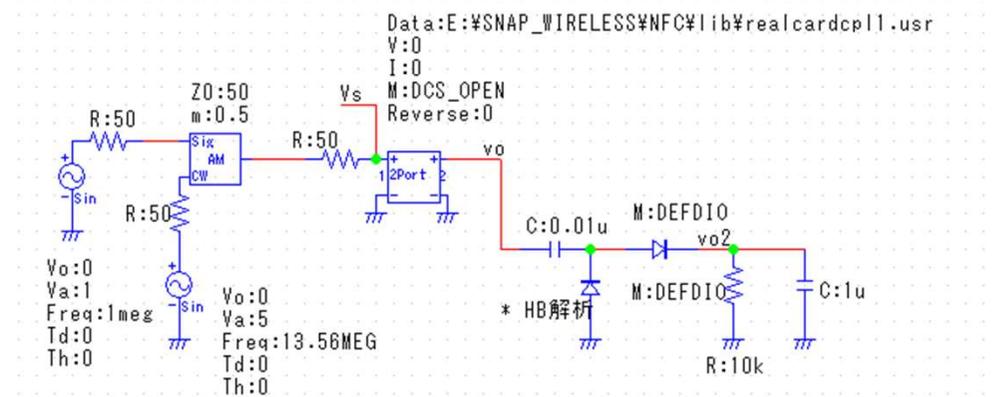
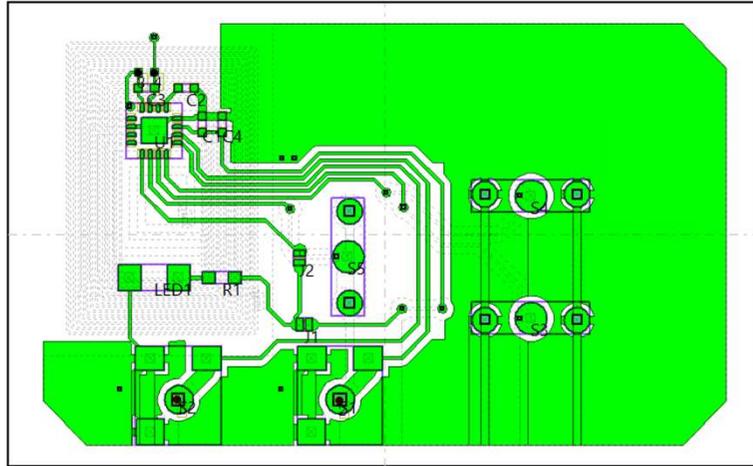


カード側スペクトル

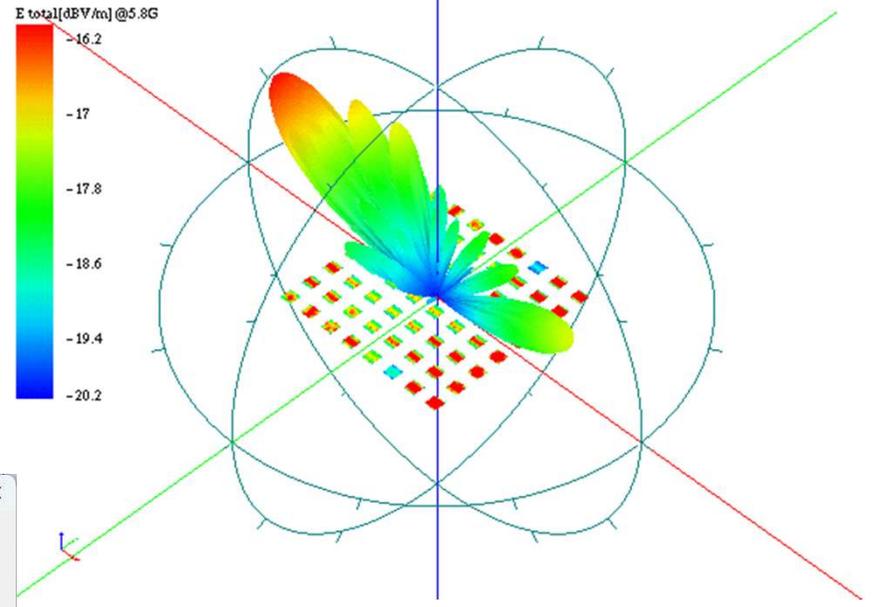
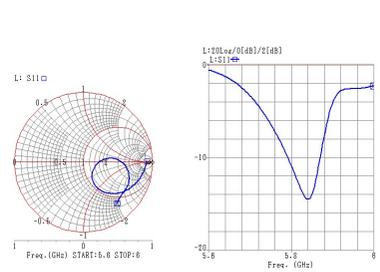
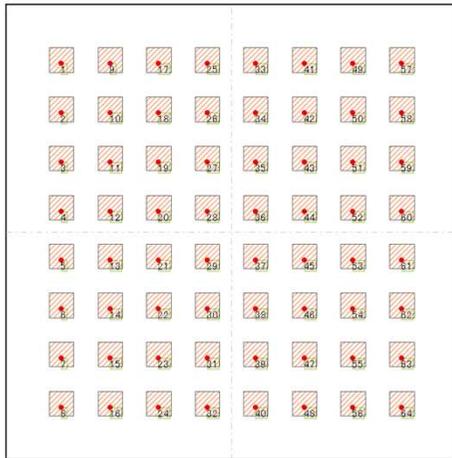


# リアルカード基板と伝送特性

## 13.4MHz



# 64MSパッチフェーズドアレイ(5.8GHz)



$\Delta=1.7\text{mm}$   
エッジメッシュ=ON  
サンプル=800  
公差=1E-9

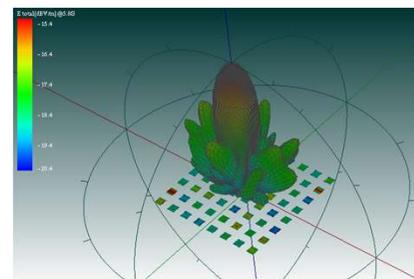
位相差給電、フェーズアレイ 位相計算

アンテナ座標  
アンテナ1座標 X[m] 0 Y[m] 0 Z[m] 0  
アンテナ列数 X方向 1 Y方向 1 Z方向 1  
アンテナピッチ Xp[m] 0 Yp[m] 0 Zp[m] 0  
ポート並び方向 X,Y,Z

周波数[Hz] 1G  
等位相面 R[m] 1  $\theta$ [deg] 0  $\phi$ [deg] 0  
10波長

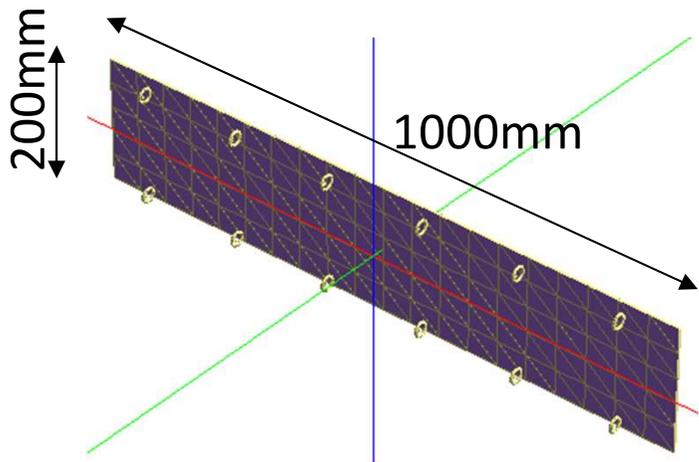
\* 指向性=(1,0,0)  
#FREQ,1e+09  
#PHASEDATA,1  
239.169  
#END

ファイル出力 COPY 計算 クリア OK キャンセル

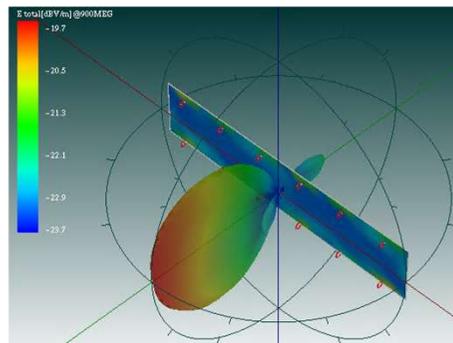


位相計算ツール

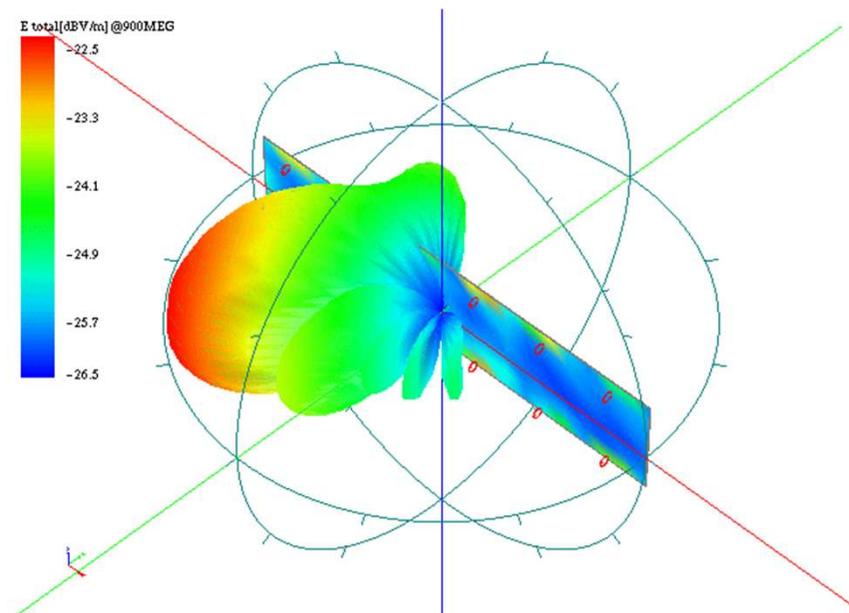
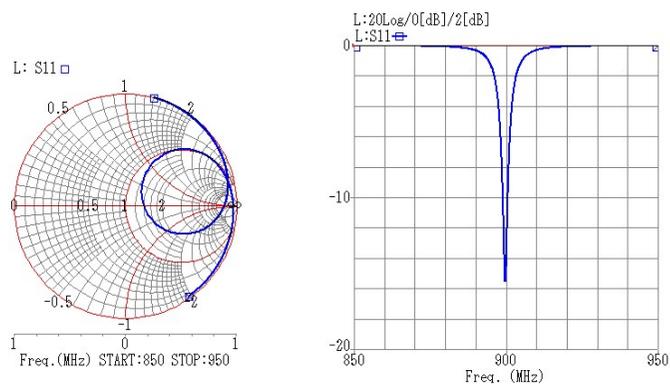
# 900MHz リニアアレイ



6MLA × 2リニアドアレイ

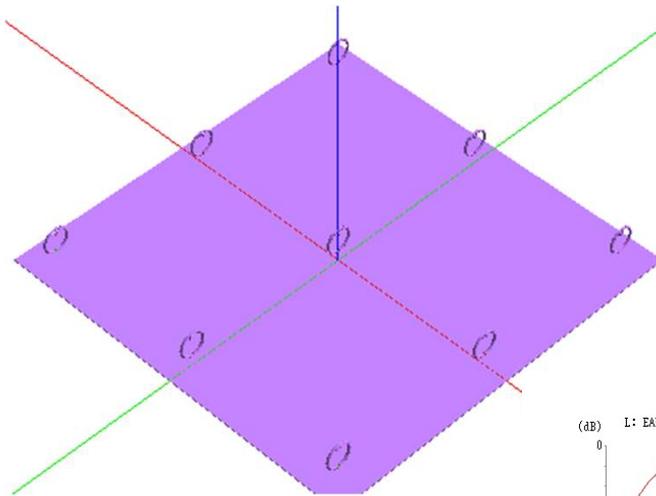


--- Far field analysis ---  
 Frequency 900MEG Hz  
 Direction : th=90,phi=270  
 Gd=15.0042[dBi]  
 Ga=14.1344[dBi]  
 Efficiency=81.8506[%]  
 Axis ratio= 1:6.17297e-07



ビームフォーミング  
 ±45° スイープ(15° ステップ)

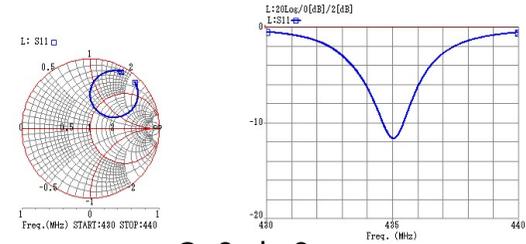
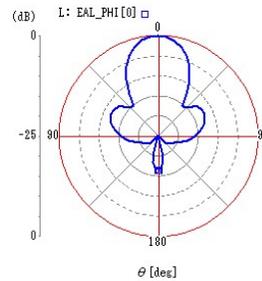
# 9MLAフェーズドアレイ(435MHz)



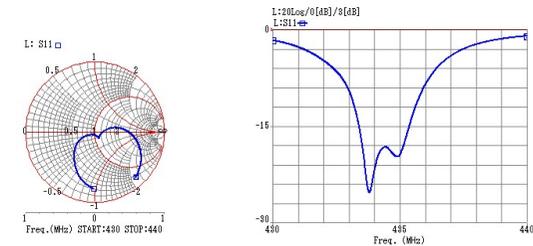
MLA間隔=344.8mm( $\lambda/2$ )

$\Theta=45, \phi=-135$ 時の位相角例

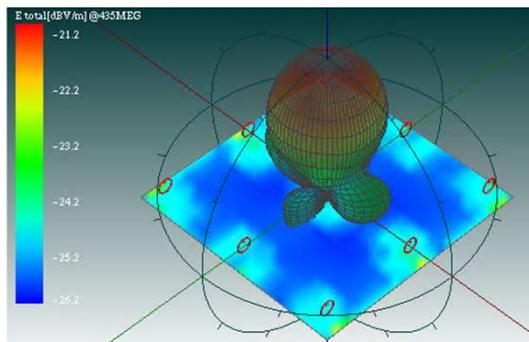
Th1	;位相を入力	126
Th2	;位相を入力	216.3
Th3	;位相を入力	306.6
Th4	;位相を入力	35.7
Th5	;位相を入力	126
Th6	;位相を入力	216.3
Th7	;位相を入力	305.4
Th8	;位相を入力	35.7
Th9	;位相を入力	126



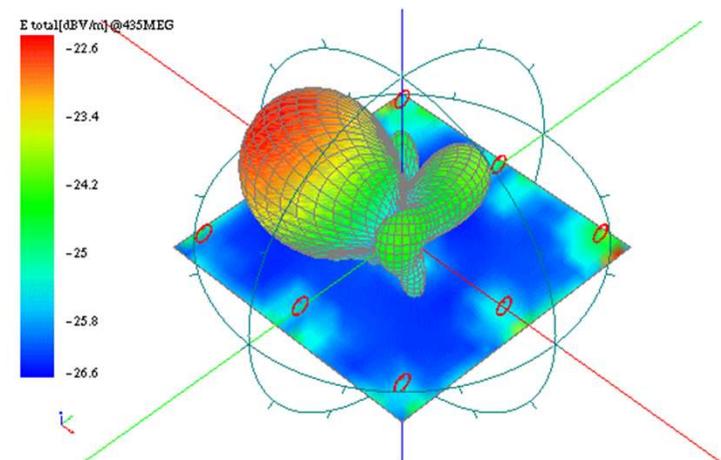
$\Theta=0, \phi=0$



$\Theta=45, \phi=-135$



--- Far field analysis ---  
 Frequency 435MEG Hz  
 Direction : th=0,phi=0  
**Gd=13.3491[dBi]**  
**Ga=12.5024[dBi]**  
 Efficiency=82.2867[%]  
 Axis ratio= 1:3.79161e-08

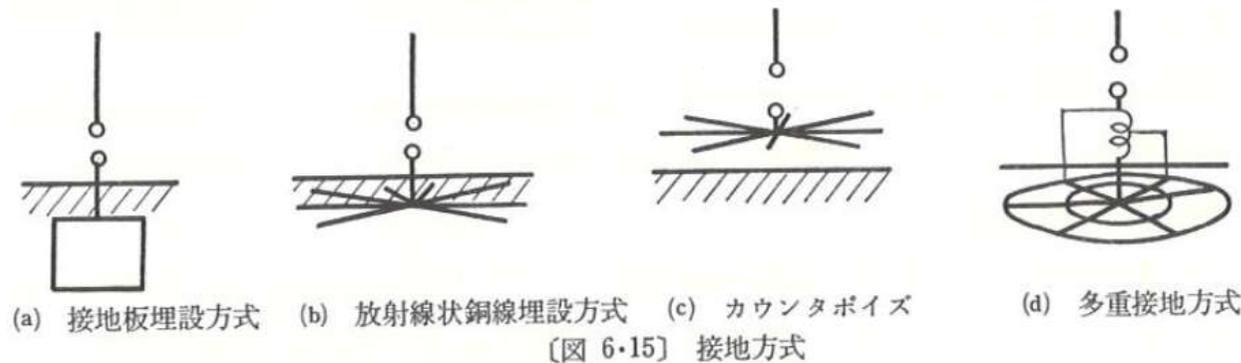


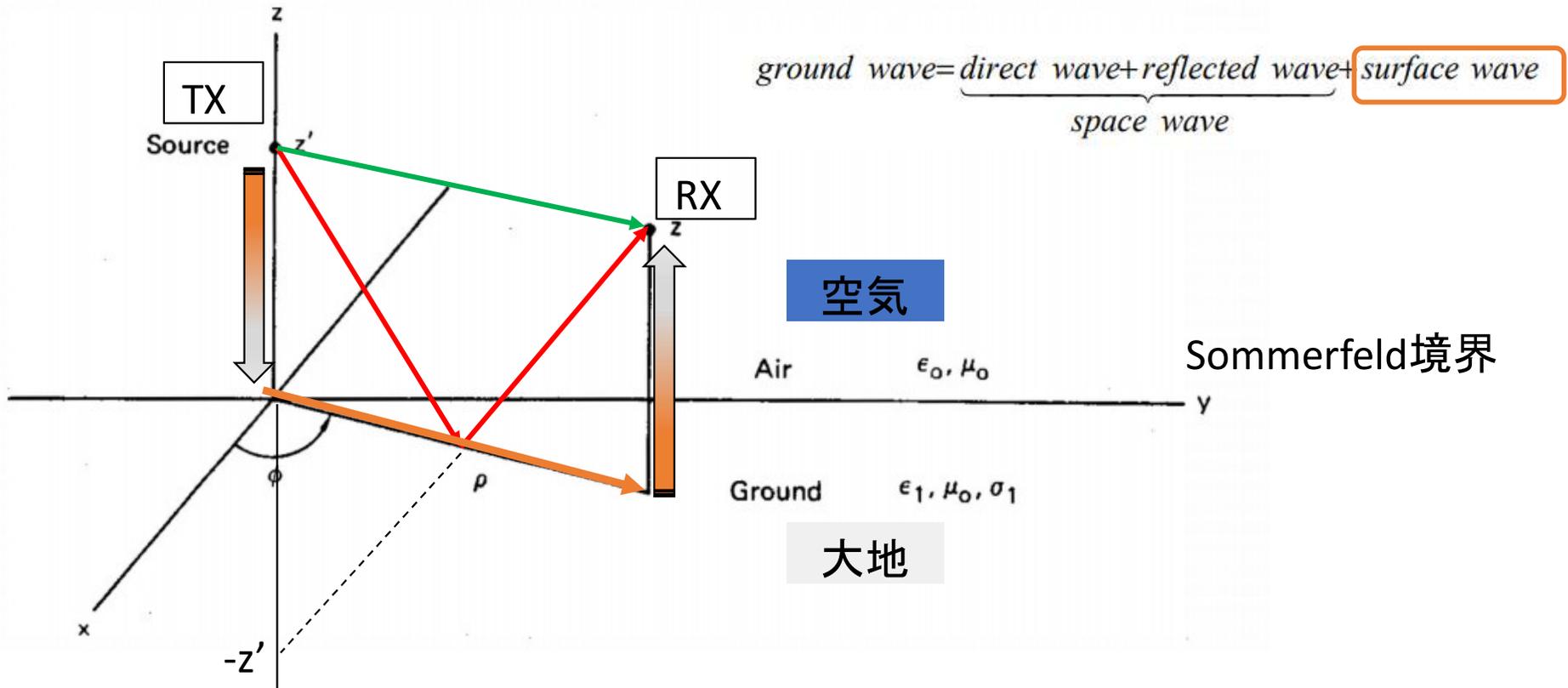
# 接地型アンテナ 接地抵抗など

## Verticalアンテナのアースの効果 カウンタポイズ/ 接地板/ 埋設

### 6.7 接地方式

接地アンテナの損失の大部分は接地抵抗によって占められるから、アンテナの効率を高めるために、できるだけその値を小さくすることが必要である。接地の方法には図6.14に示すようないくつかの方法がある。





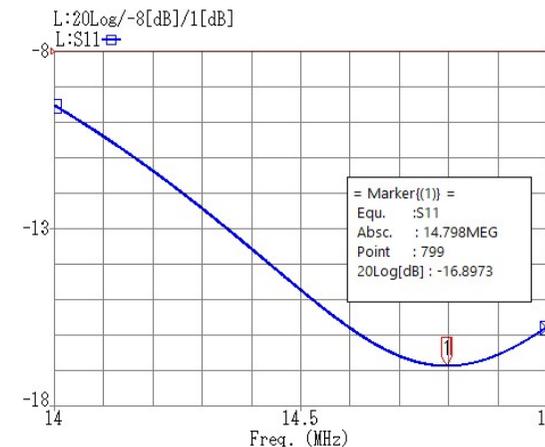
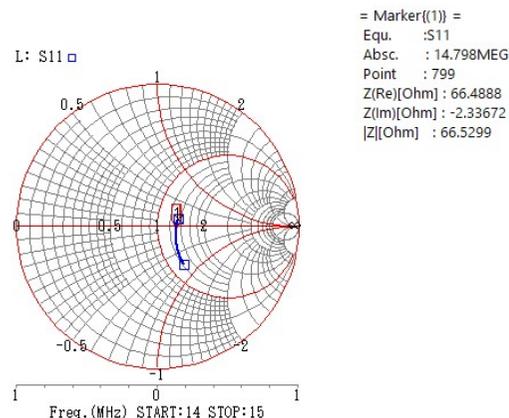
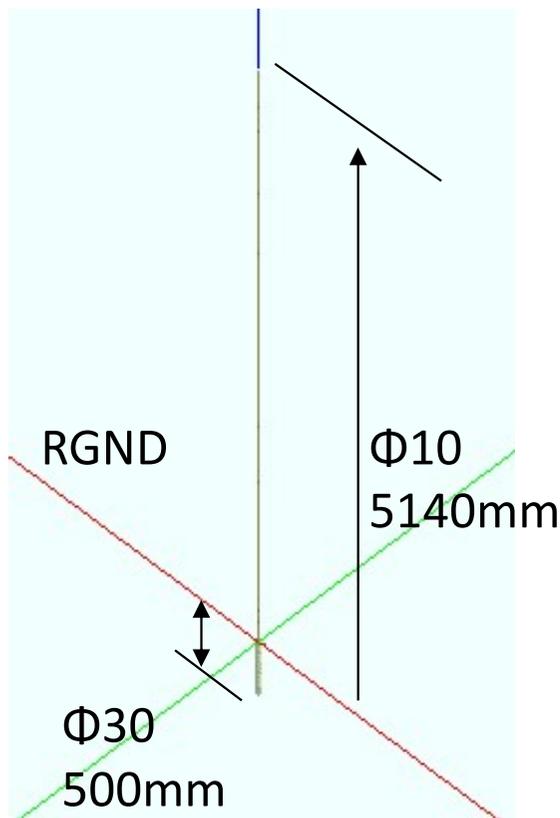
RXでの電界を求めるには  
Sommerfeld 積分の計算の必要あり



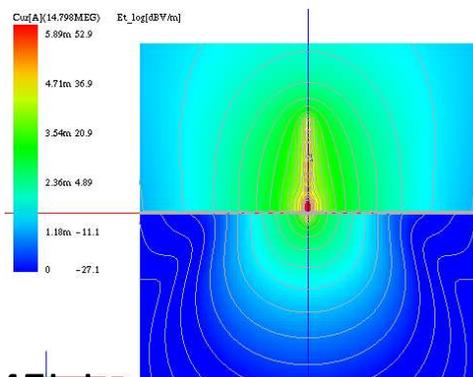
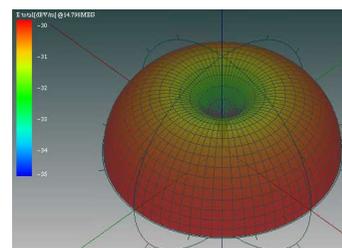
$$V_{22} = 2 \int_0^{\infty} \frac{\exp[-\gamma_2(z + z')] J_0(\lambda \rho) \lambda d\lambda}{k_1^2 \gamma_2 + k_2^2 \gamma_1}$$

(Surface wave)

14.5MHz Vertical ant.  
 境界面: リアルグランド  
 接地: アース棒



--- Far field analysis ---  
 Frequency 14.798MEG Hz  
 Direction : th=90,phi=275  
 Gd=5.89089[dBi]  
 Ga=3.95338[dBi]  
**Efficiency=64.0102[%]**  
 Axis ratio= 1: 5.05675e-16



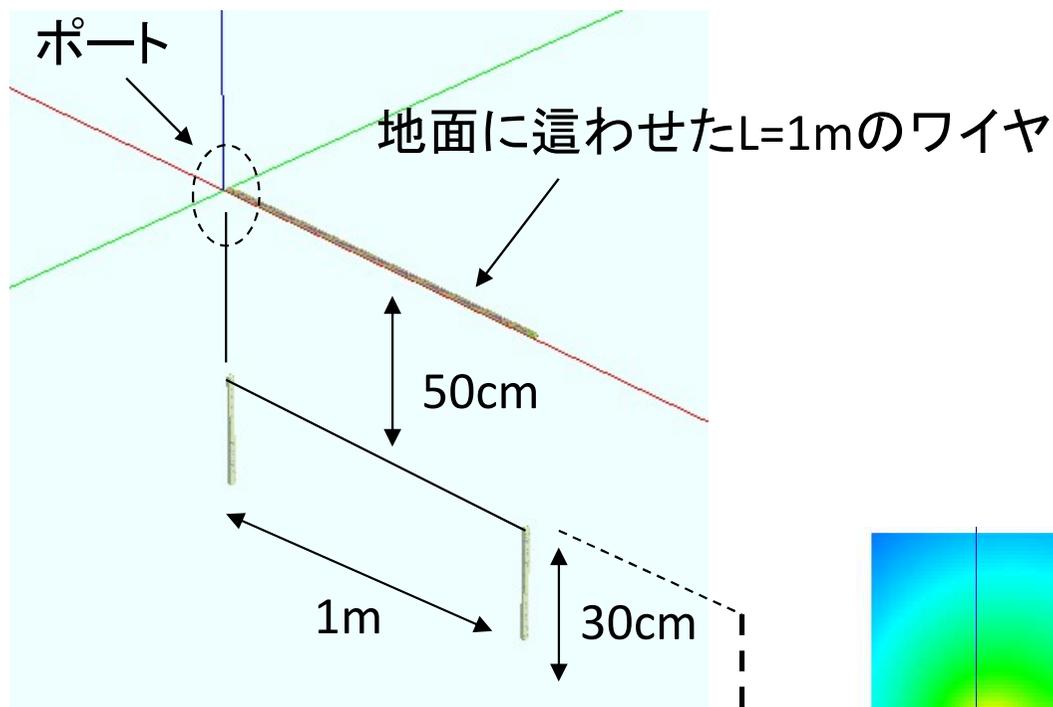
← 空間の電界分布

← 地中の電界分布

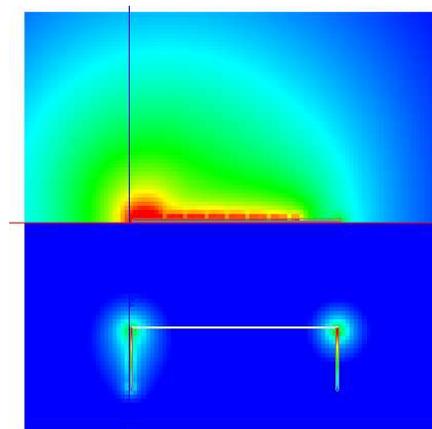
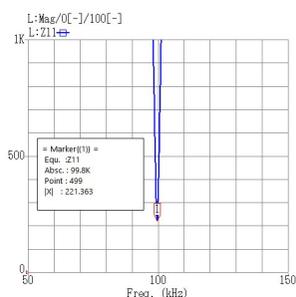


# 接地抵抗のシミュレーション

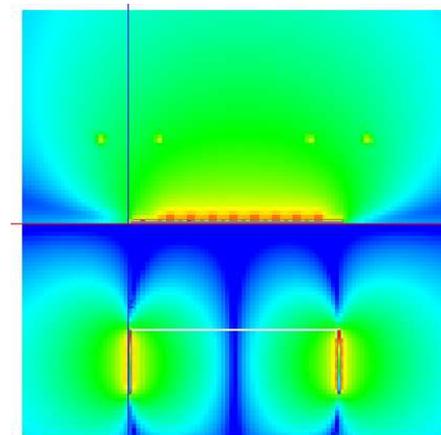
100kHzでポートに直列のLを入れて共振点でのインピーダンスを測る



本数	接地抵抗[Ω]
1	314
2	221
3	189



電界分布  
@100kHz

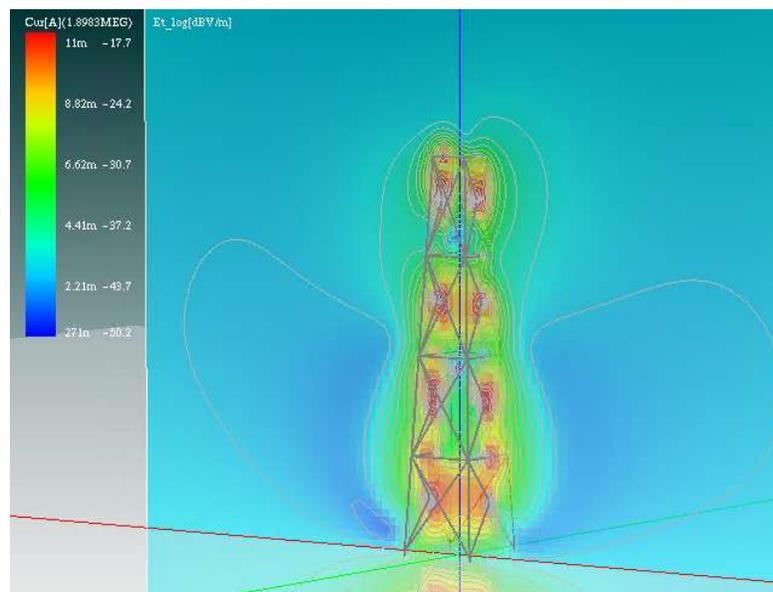
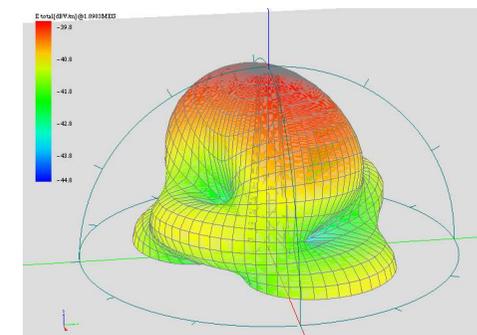
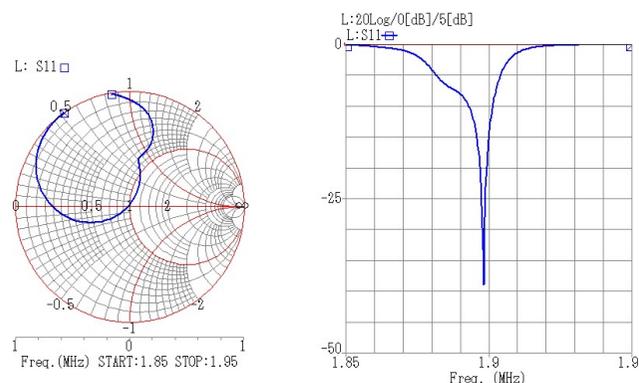
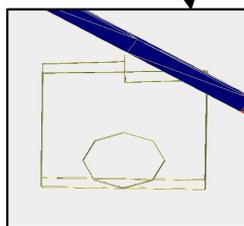
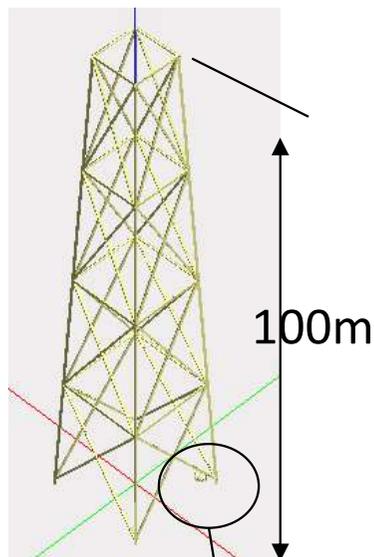


磁界分布  
@100kHz

# その他

# 鉄塔ドライブ

高さ100mの鉄塔に1.9MHzを乗せる



電界分布@1.9MHz

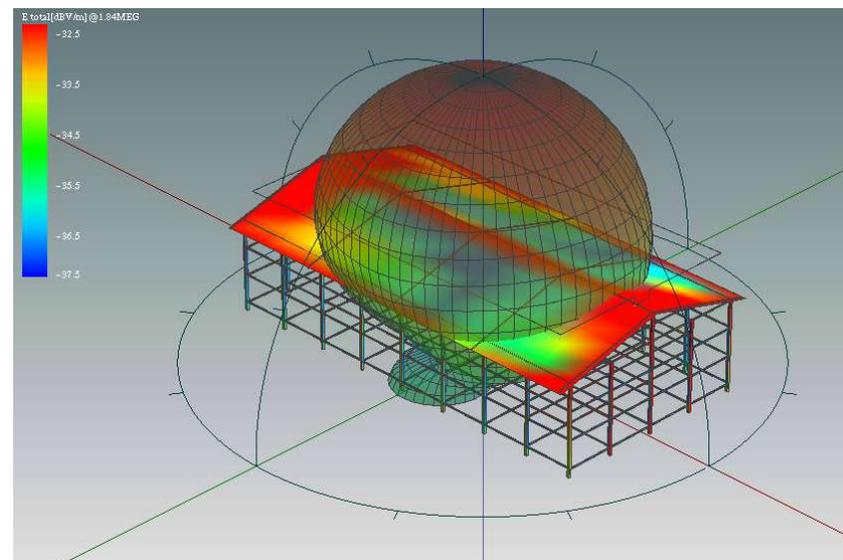
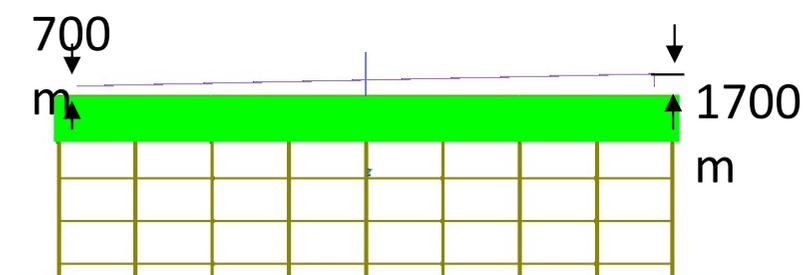
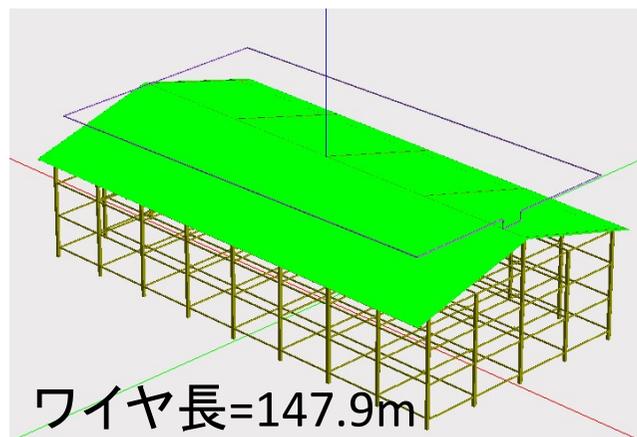
--- Far field analysis ---  
 VSWR=1.01861  
 Direction : th=10,phi=215  
 Gd=9.36457[dBi]  
 Ga=-5.77655[dBi]  
**Efficiency=3.06118[%]**  
 Axis ratio= 1: 0.00564178

## MLA 単体特性

境界条件	$\eta$ [%]
FREE	2.046
PEC(50cmh)	3.462

# 建物を含んだLOOPアンテナ特性

倉庫の屋上に敷設した1.8MHzのLOOPアンテナ  
倉庫を含めて解析を行う



@1.84MHz

--- Far field analysis ---

VSWR=1.00177

Direction :  $\theta=0, \phi=220$

Gd=9.75979[dBi]

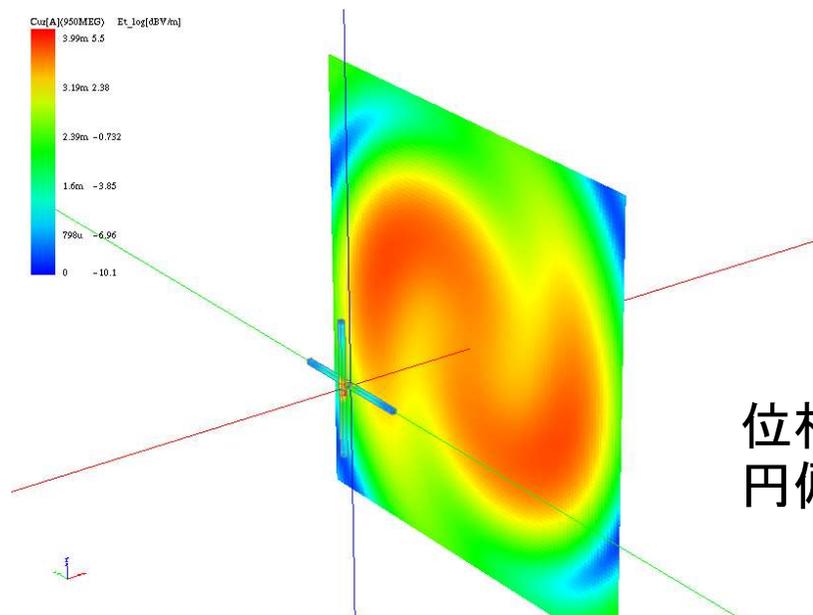
Ga=1.49947[dBi]

Efficiency=14.9269[%]

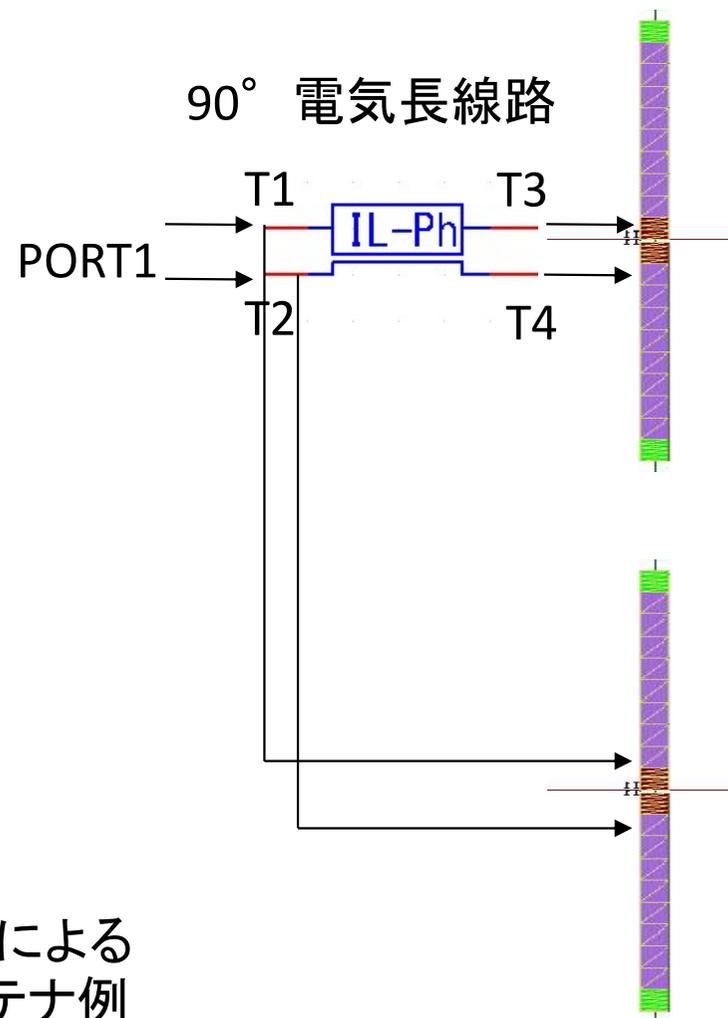
Axis ratio= 1: 0.00260305

# 各種回路素子の組み込み

ポートとアンテナ間に各種の回路素子を挿入することが可能。例えば、 $90^\circ$  の位相差を付けたい場合は、右図のように伝送線路を組み込みます。クロスダイポールに90度位相差を加えて励振することで、↓図のように理論的な円偏波アンテナを構築できます



位相差給電による  
円偏波アンテナ例



# シールドパイプのノイズ抑圧効果シミュレーション MEL Microwave & Electronics Laboratory

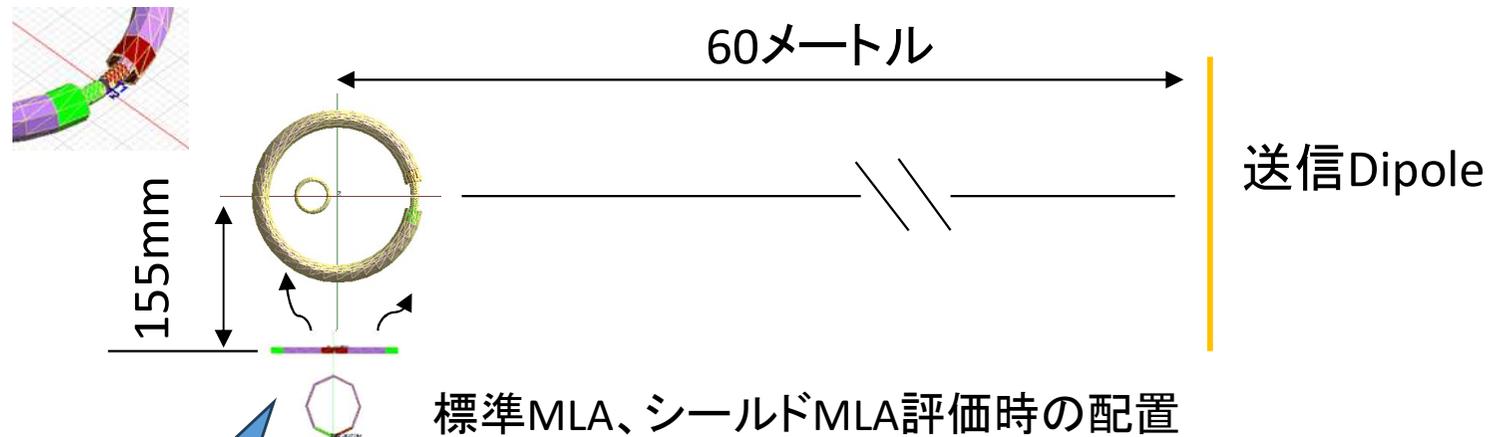
シールドループを被せたループアンテナで、近傍からのノイズがどれだけ抑圧できるかを調べます。信号は60m離れたダイポールから送信しています

## 【電界ノイズ源】

0.5mm□ 5mm×2  
微小ダイポール

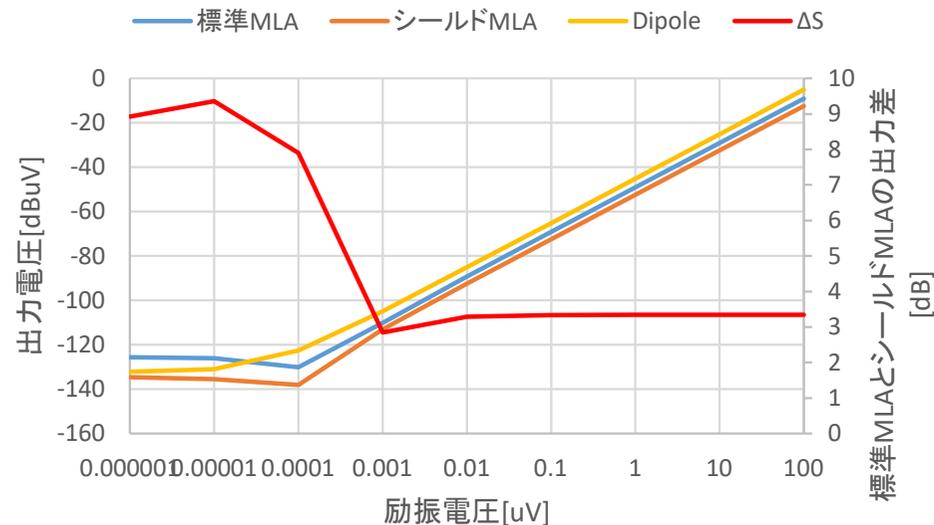
## 【磁界ノイズ源】

0.5mm□ D=10mm  
8角形ループ



ノイズ源

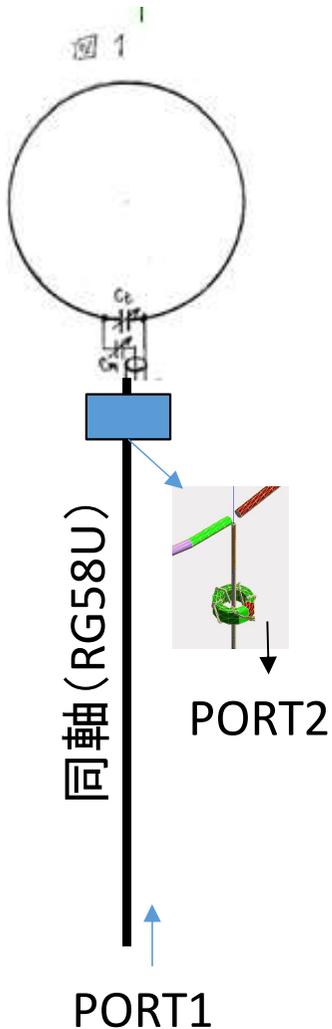
・電界ノイズ(偏波面//)時ノイズ電圧の差は約8.9dB、信号受信時の差は3.4dBなので、シールドMLAのノイズ抑圧効果は、電界ノイズに対して約5.5dBあることがわかる。ちなみに磁界ノイズに対しては抑圧効果は殆どない



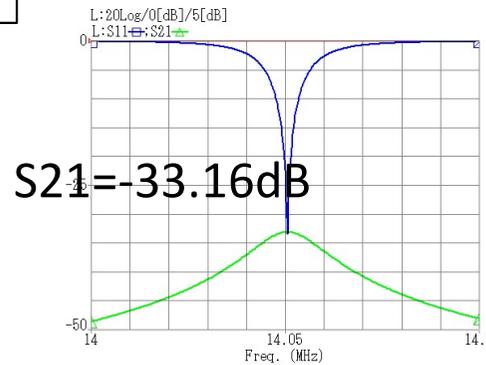
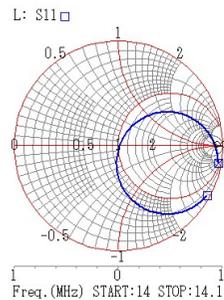
Dipole(Port1)に励振した場合の出力レベル

# コモンモードと同軸からの放射シミュレーション

## パターソンループ(不平衡整合)



同軸 0.5m



--- Far field analysis ---

VSWR=1.07215

Direction : th=90,phi=185

Srm=8.85729e-05[W]

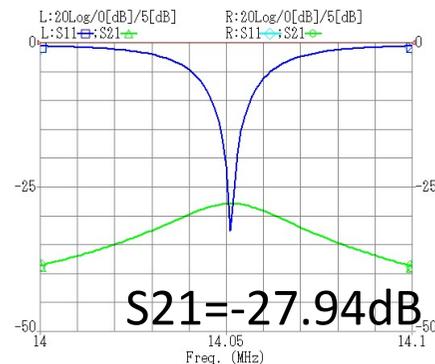
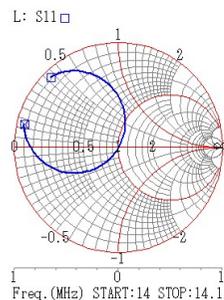
Gd=1.72697[dBi]

Ga=-6.52986[dBi]

Efficiency=14.9389[%]

Axis ratio= 1: 5.80304e-07

同軸 5m



--- Far field analysis ---

VSWR=1.1004

Direction : th=90,phi=95

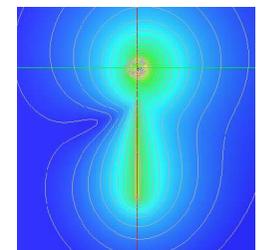
Srm=0.000188897[W]

Gd=2.16885[dBi]

Ga=-3.24527[dBi]

Efficiency=28.7467[%]

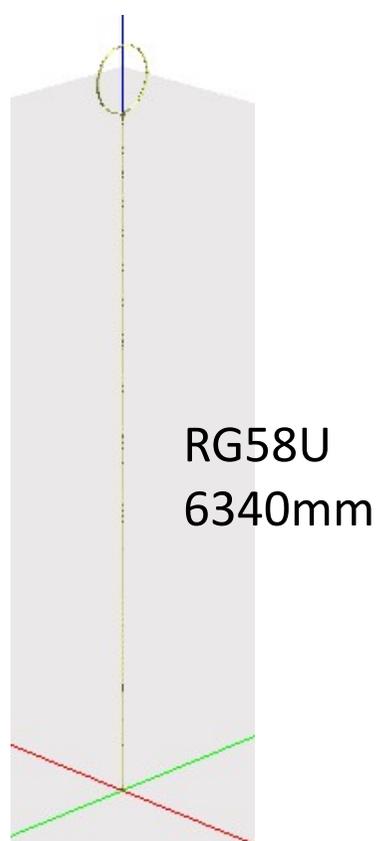
Axis ratio= 1: 2.08071e-07



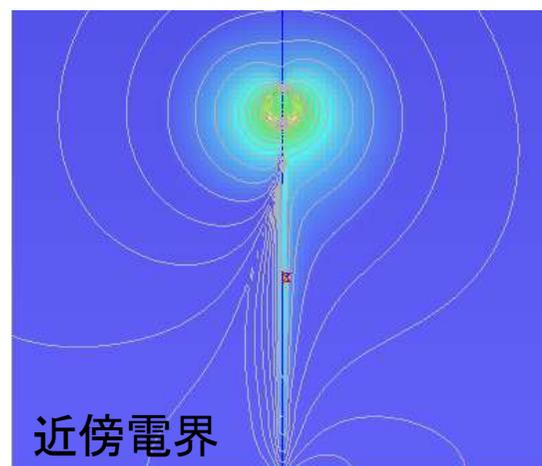
近傍電界

同軸の長さを5mにするとコモンモードレベルが大きくなるが、放射効率上がる。これは同軸からの放射分が加算されていると言える

# シュツベルトップ(阻止外管)の挿入特性



## 阻止外管なし



--- Far field analysis ---

VSWR=1.1119

Direction : th=90,phi=90

Srm=0.000302405[W]

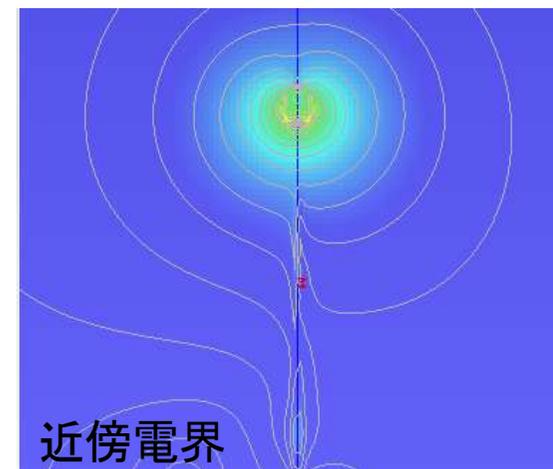
Gd=8.1812[dBi]

Ga=-1.20389[dBi]

Efficiency=11.521[%]

Axis ratio= 1: 1.65341e-15

## 阻止外管あり



--- Far field analysis ---

VSWR=1.11308

Direction : th=90,phi=90

Srm=0.000300376[W]

Gd=8.16294[dBi]

Ga=-1.23336[dBi]

Efficiency=11.4913[%]

Axis ratio= 1: 1.66458e-15

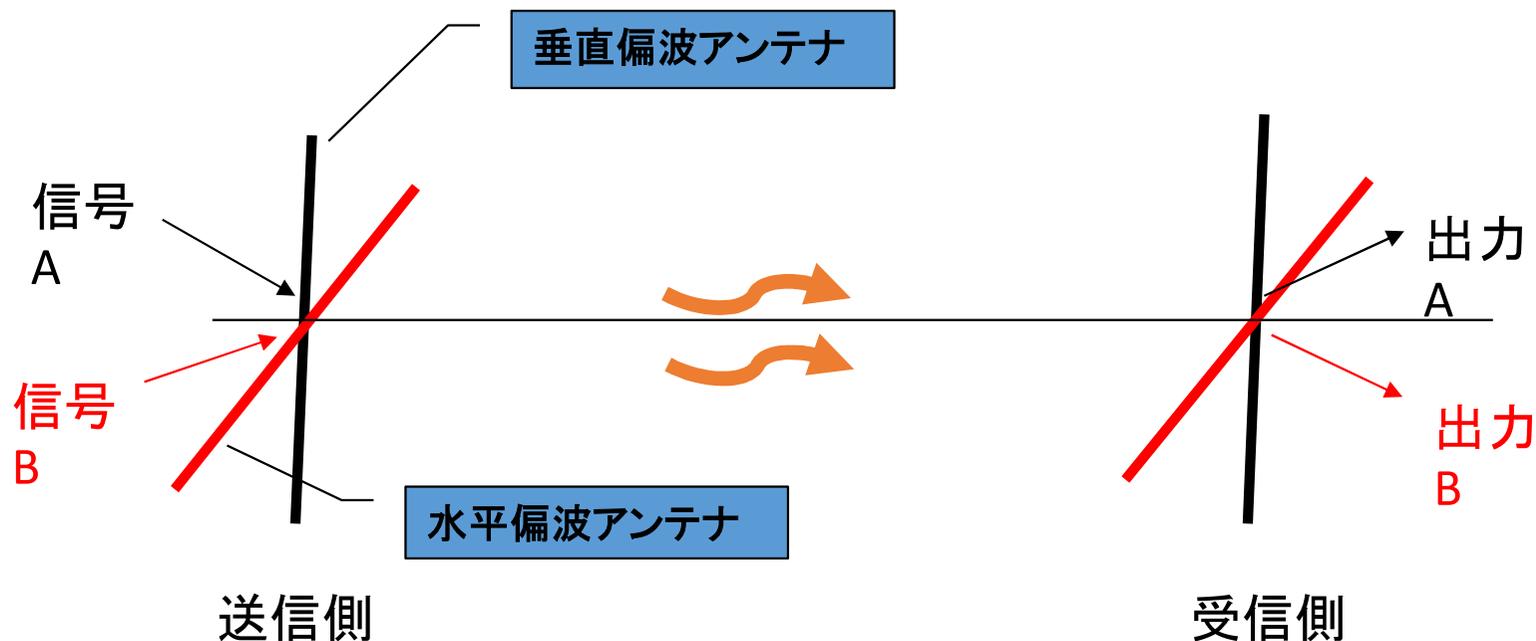
阻止外管を挿入すると同軸周りの電界レベルが下がっていることがわかる

# 伝搬解析

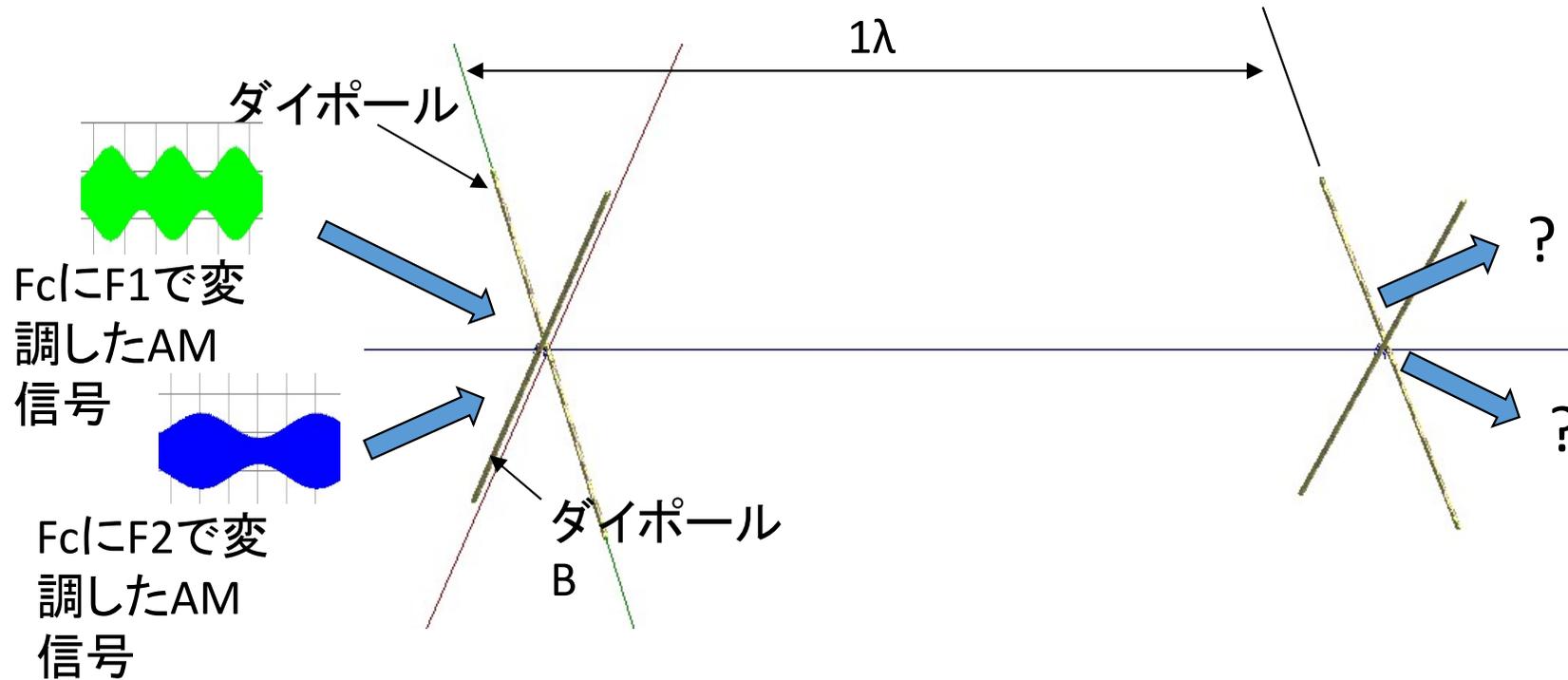
## 空間多重伝送サンプル OAM (Orbital Angular Momentum)

空間多重伝送の解析は空間を離散化する方式ではシミュレーションが難しいと言われますが、モーメント法は境界要素ですので、このようなシミュレーションも容易に行うことができます

## 偏波多重方式

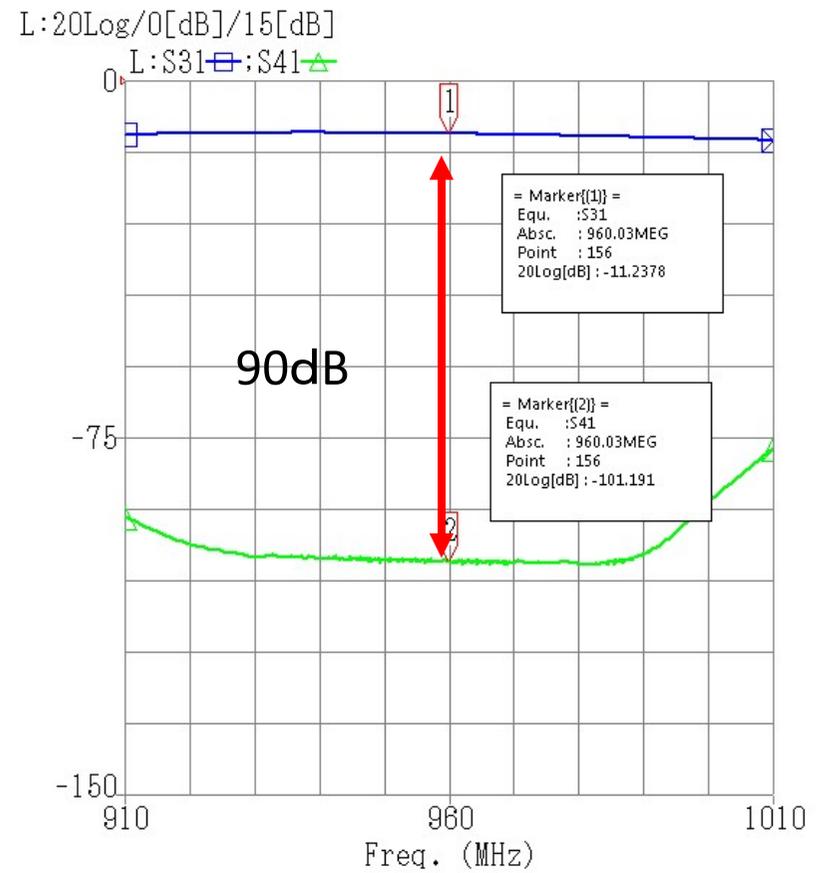
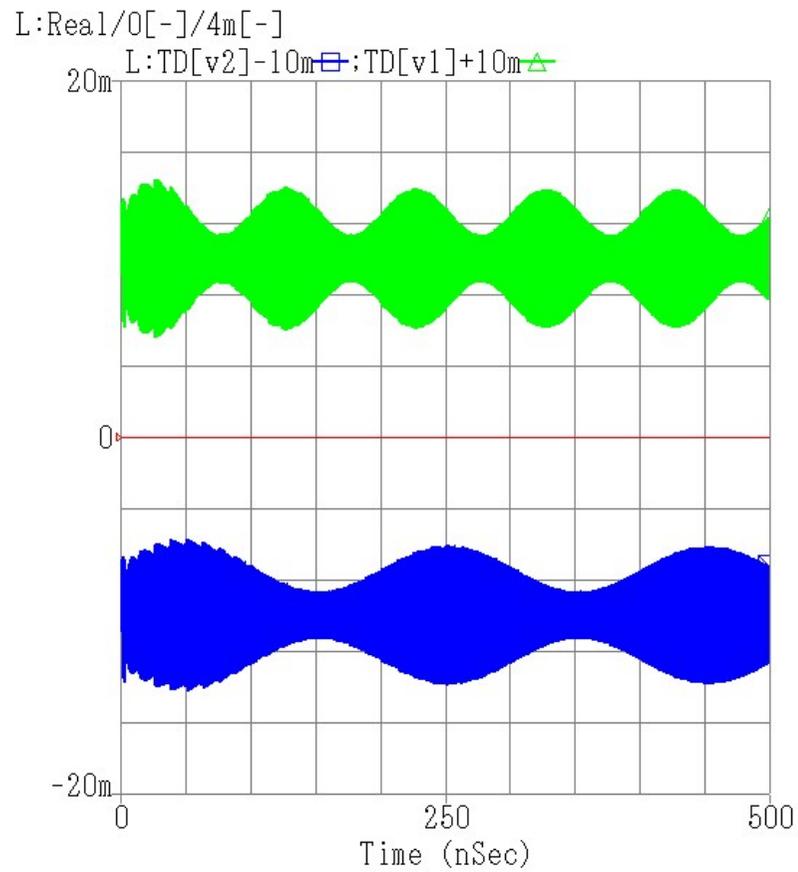


偏波面の異なるアンテナを用いると互いに干渉しないので、信号Aと信号Bが同じ周波数でも通信が可能。



搬送周波数が同じで、変調周波数の異なる2つの信号をそれぞれのアンテナに入れた時、出力はどうなる？

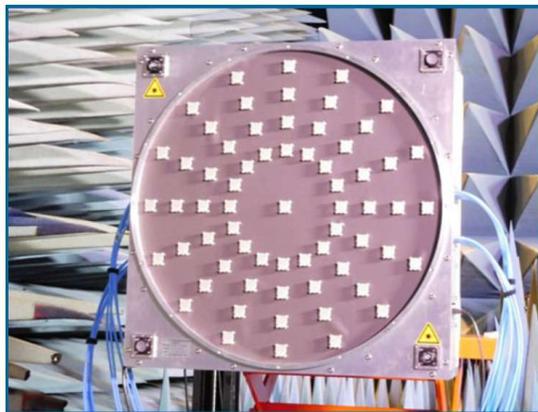
# 受信レベルと出力波形



2つの信号は干渉して  
いない

# OAM (Orbital Angular Momentum)

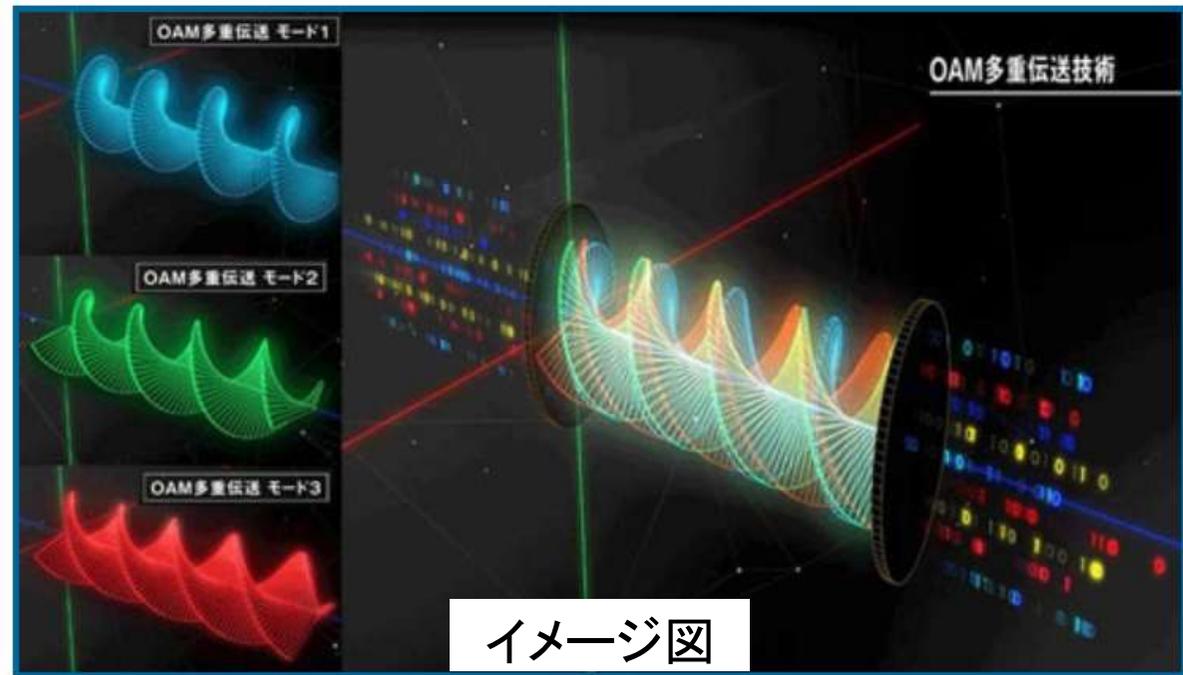
OAMは日本語で「軌道角運動量」。進行方向に対して螺旋(らせん)形状になる電波の“回転度合い”を示す。回転度合いの異なる電波は互いに交わらず、平行して進む特徴があるため、複数の電波を重ね合わせて通信容量を増やすOAM多重の研究が各所で進められている。  
(IT media NEWSより引用)



NTTが試作した送受信装置

## OAM用のアンテナ

UCA (uniform circular array)

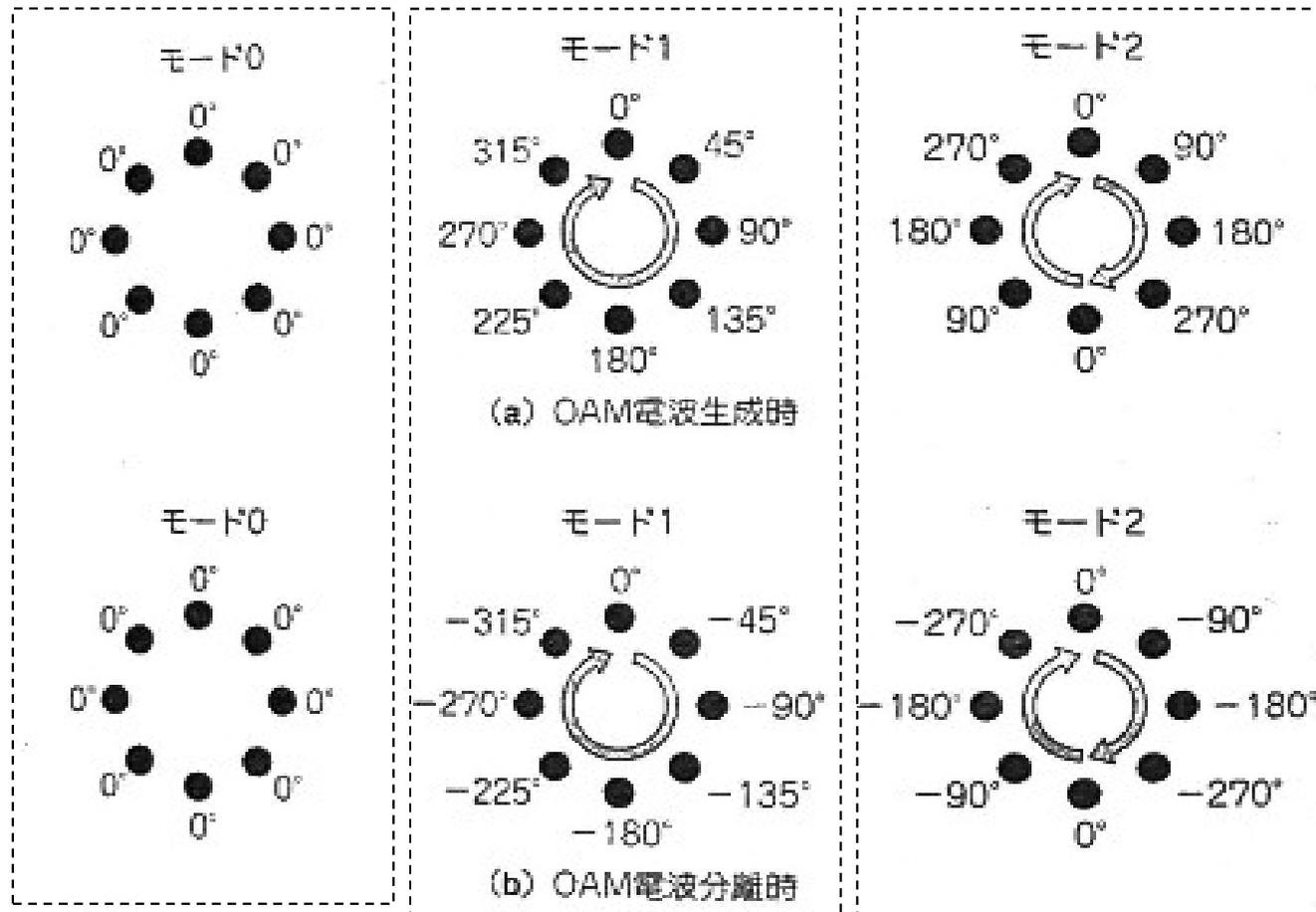


イメージ図

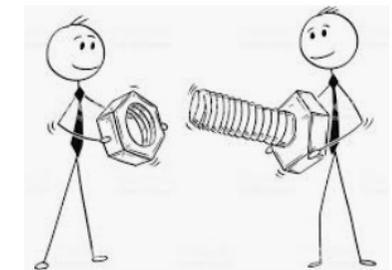
OAM多重の原理

参考資料: IT media News

# OAMの位相シフト図

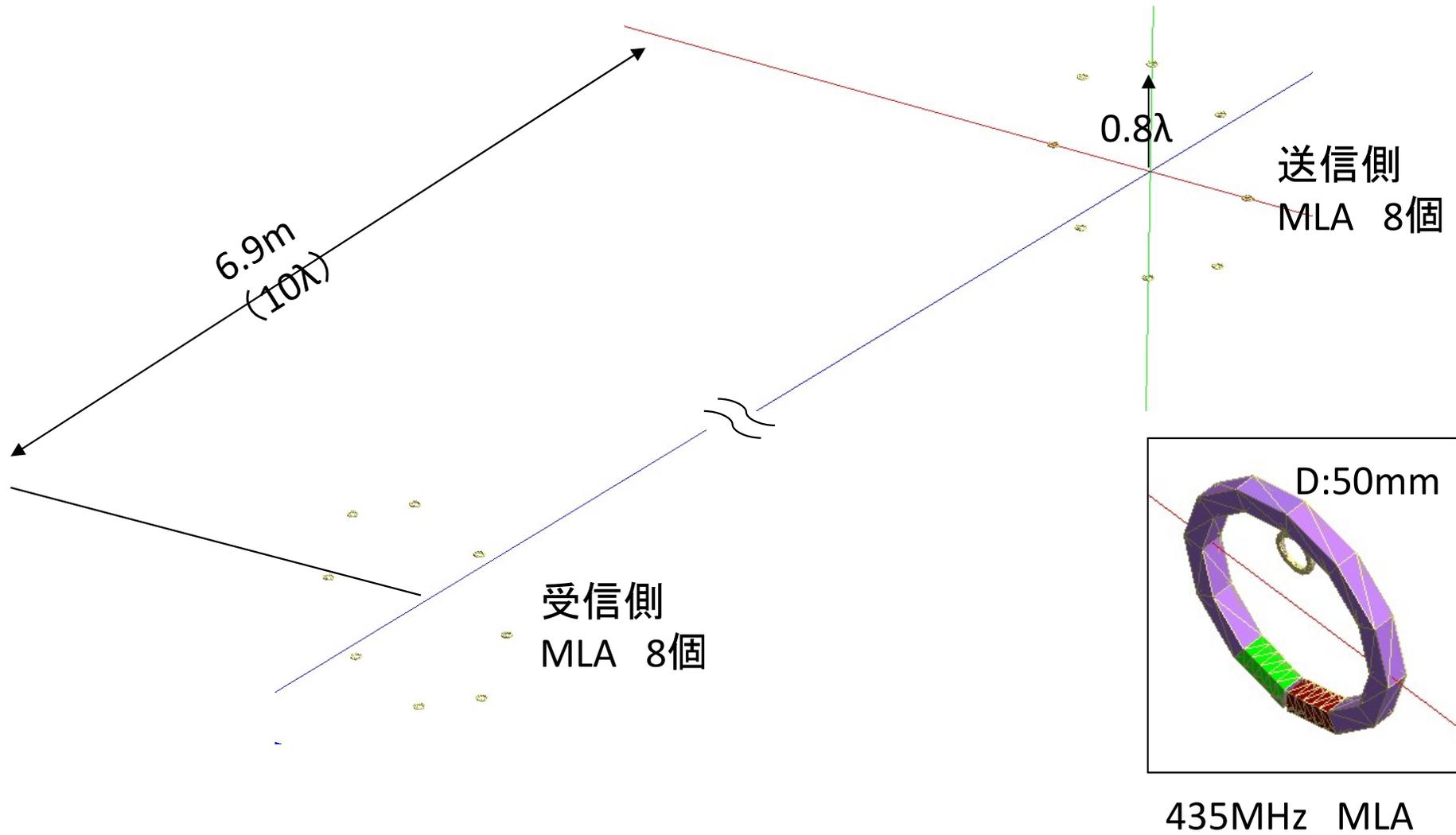


(図4) 一つのUCAを使って異なるOAMモードをもつ電波を生成/分離する時の各アンテナ素子に与える位相シフト量

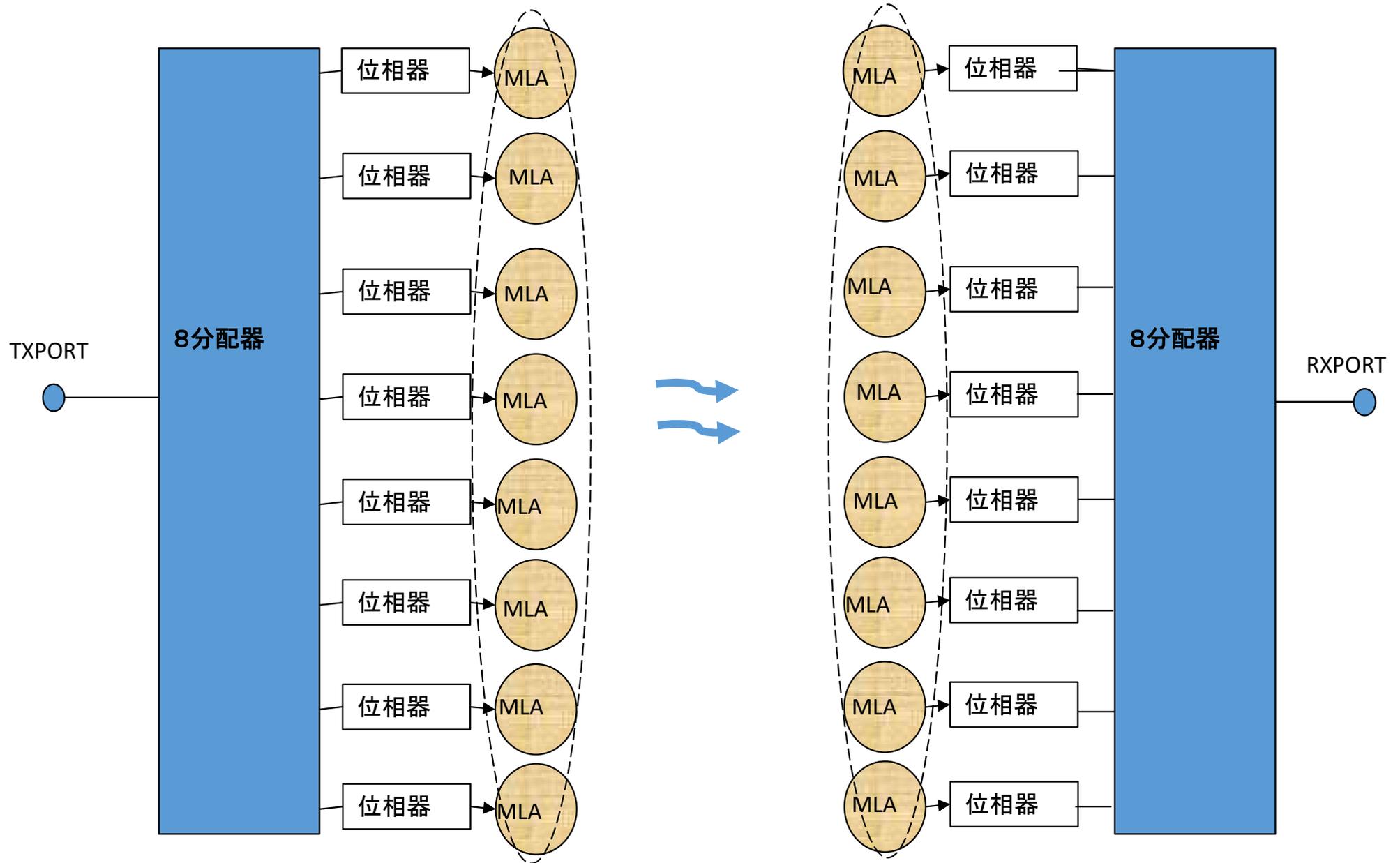


参考文献: RFワールド No.47

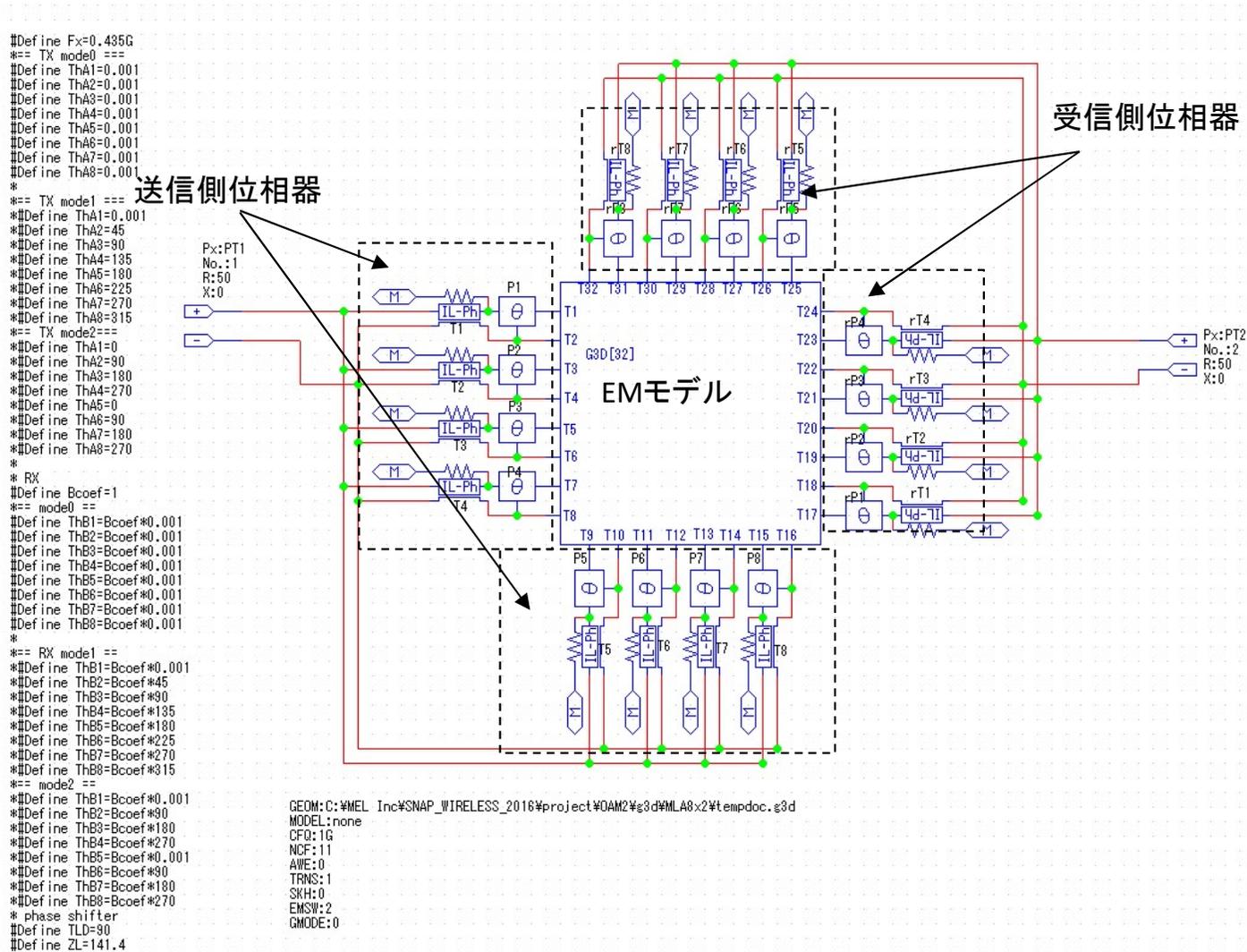
# OAMのシミュレーション図



# OAMのシミュレーション図 位相器と8分配器



# OAMのシミュレーション図 位相器と8分配器



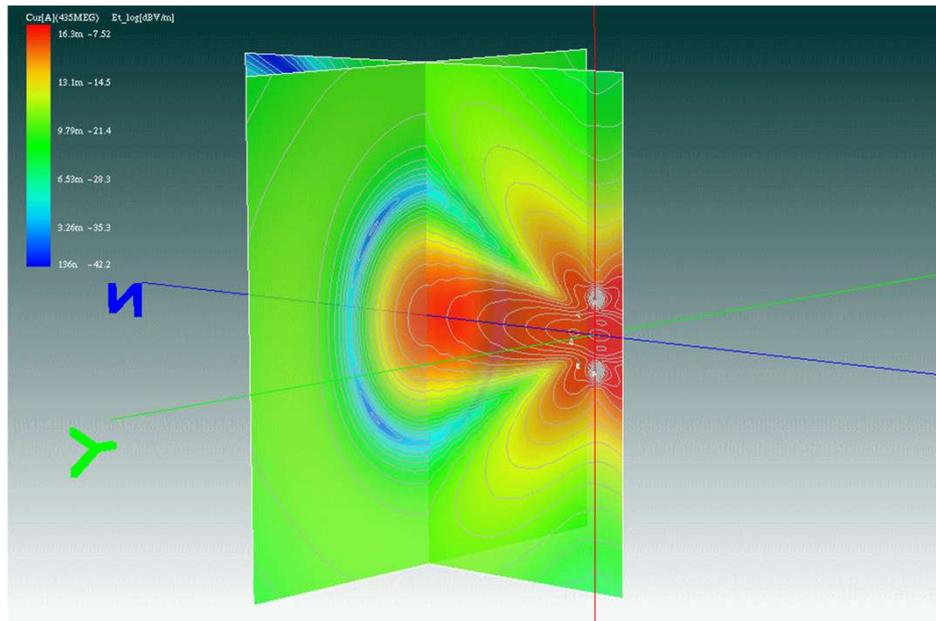
## モード切替時の受信レベル

単位: dB

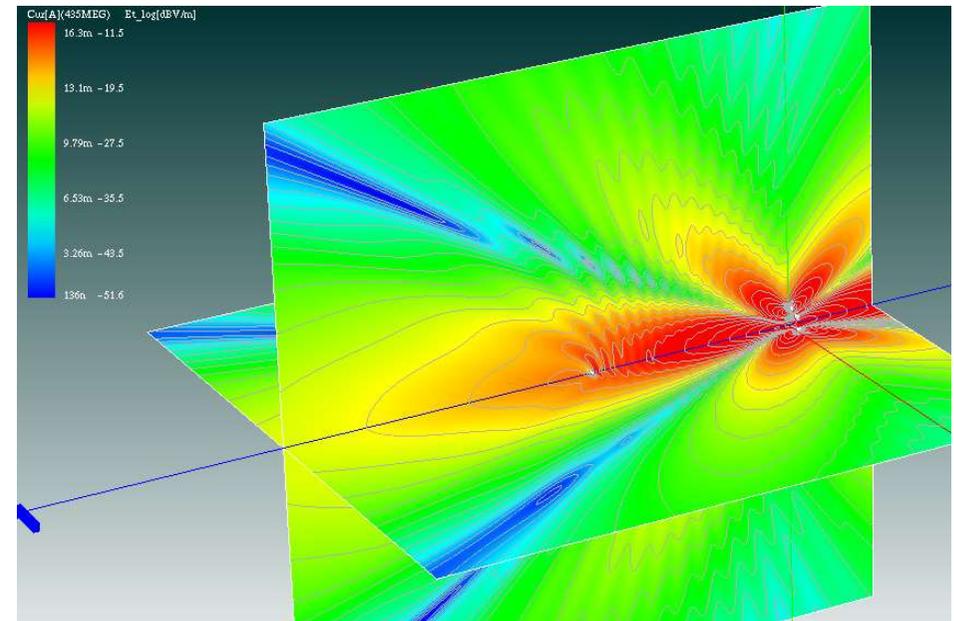
送信モード		Mode 0	Mode 1
受信	Mode 0	-22.43	-110.20
	Mode -1	-110.04	-34.98

# 435MHz 8MLAアレイ 0次ベッセルビームアンテナ

利得: 7.91dB (対ダイ  
ポール比)

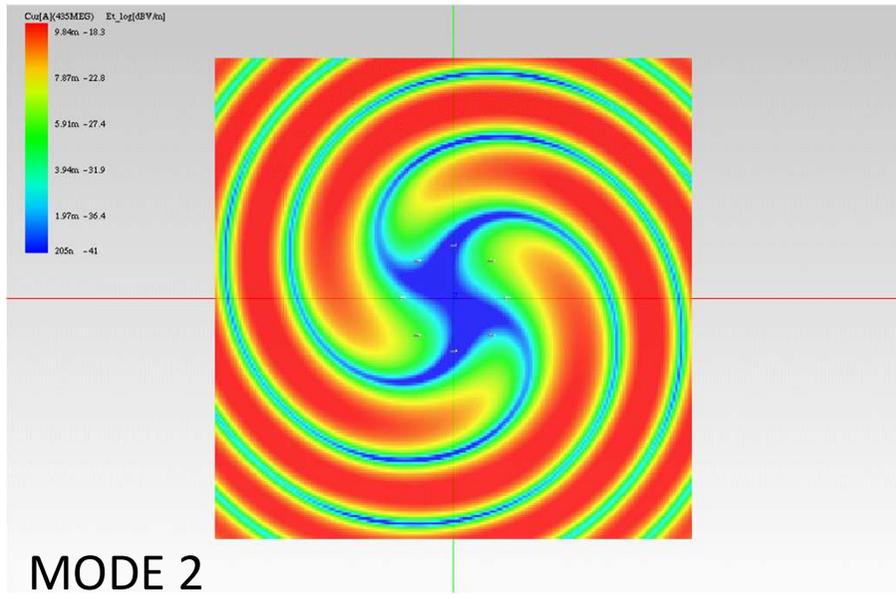
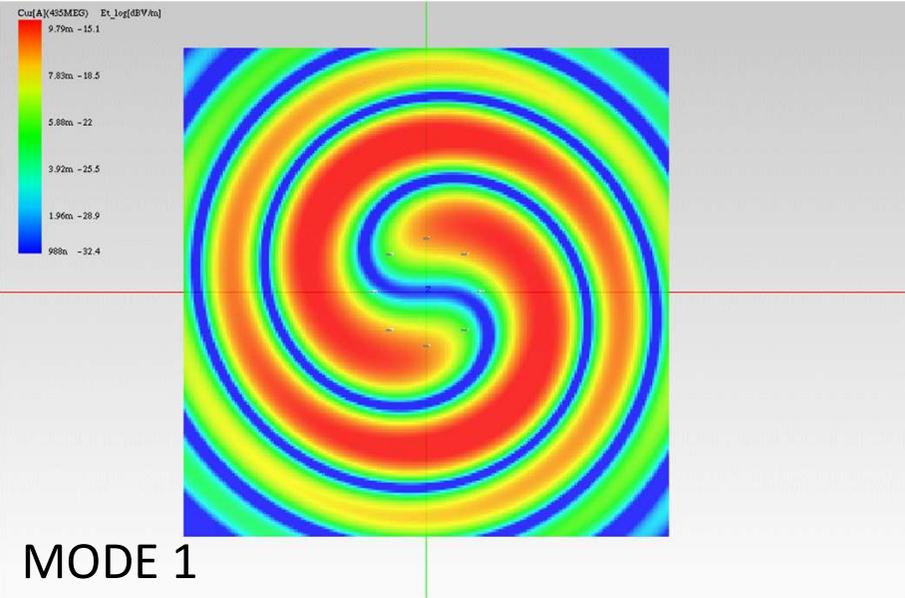
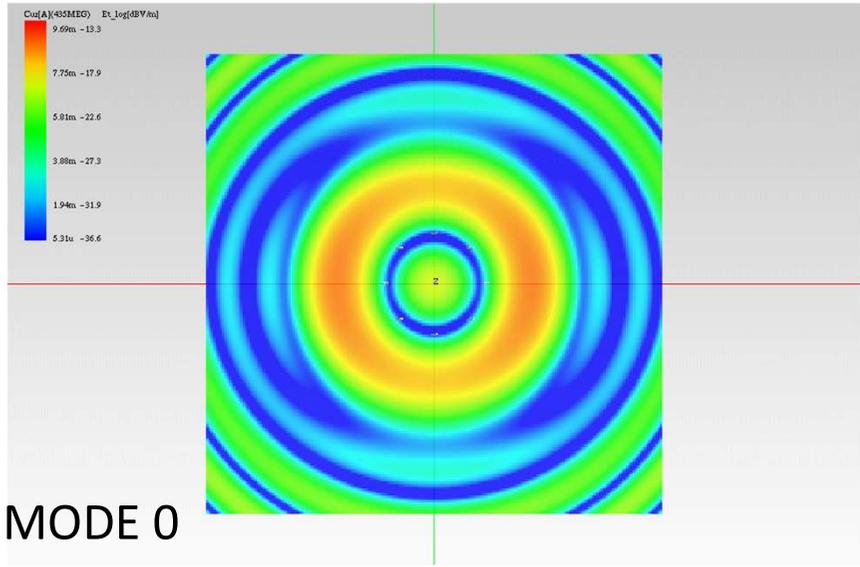


XY面 XZ面 電界分布

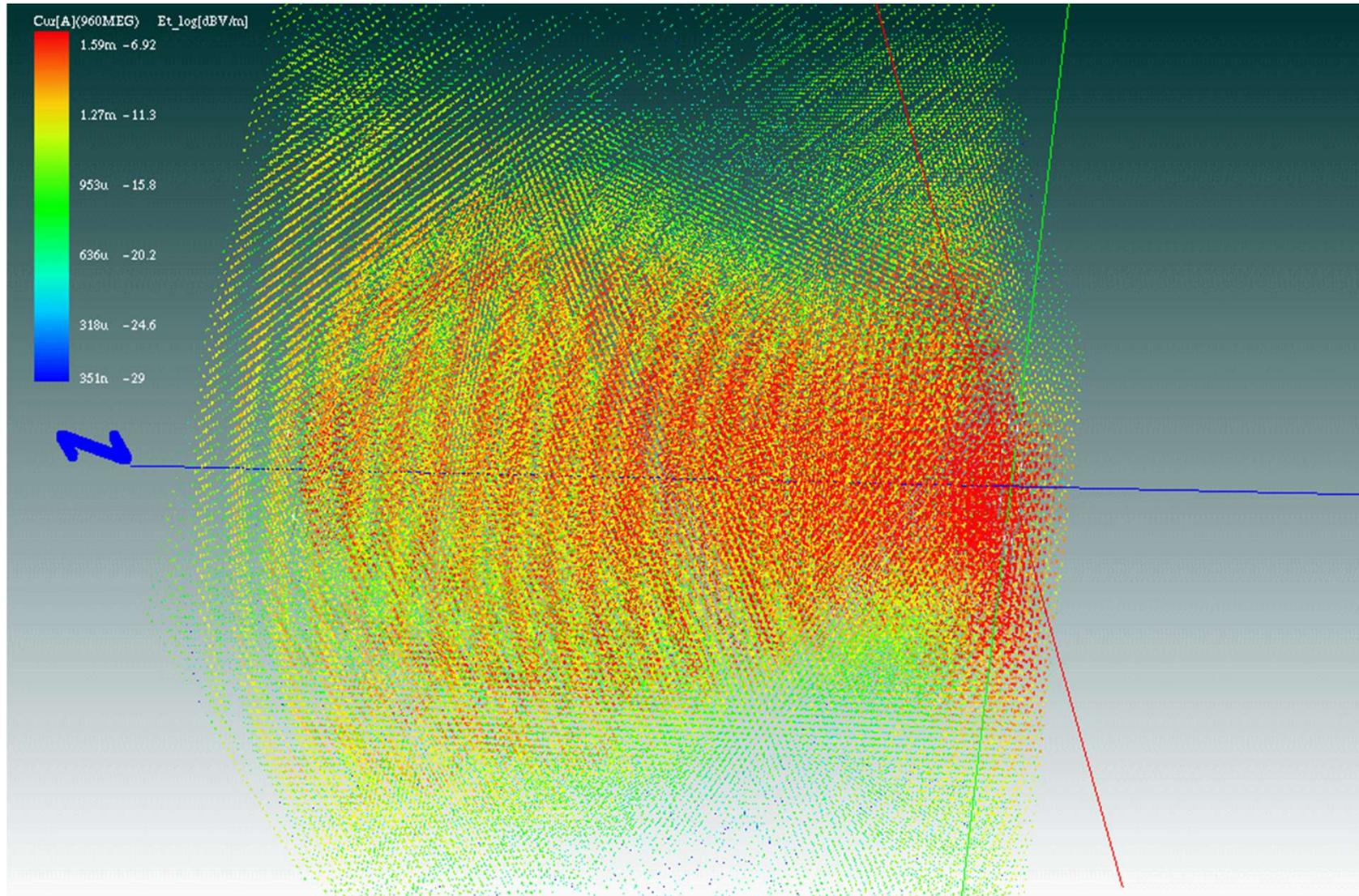


表示エリア: 20×20m 電界分布

# 断面電界分布



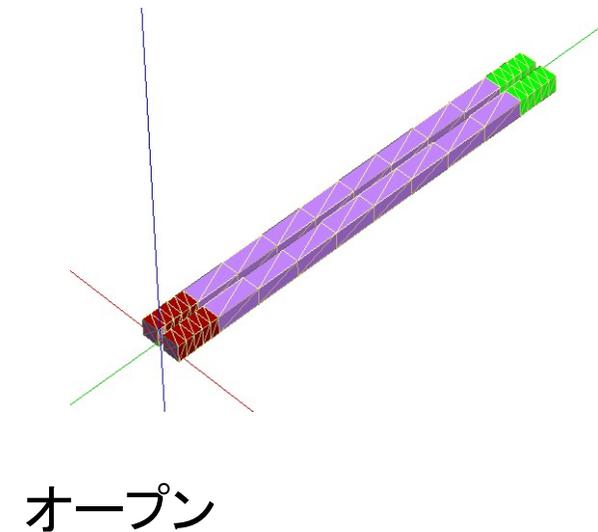
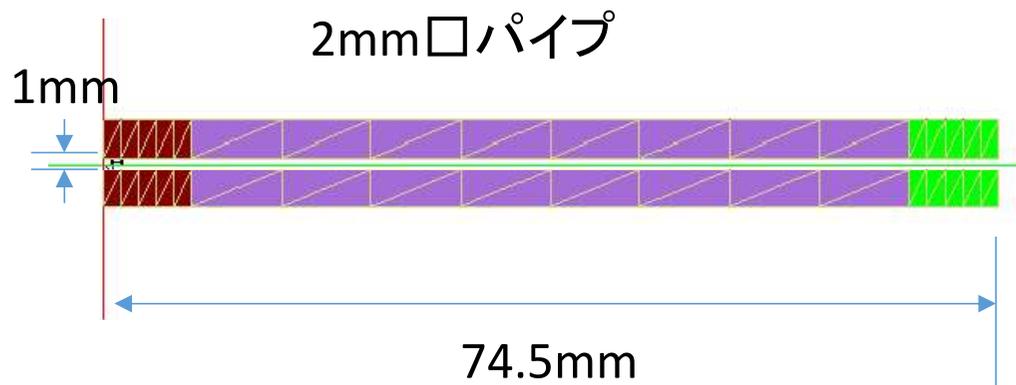
## 空間にマッピングしたMODE 1の時の3次元電界分布



# アンテナの基礎解析例

# ダイポールアンテナの成り立ち

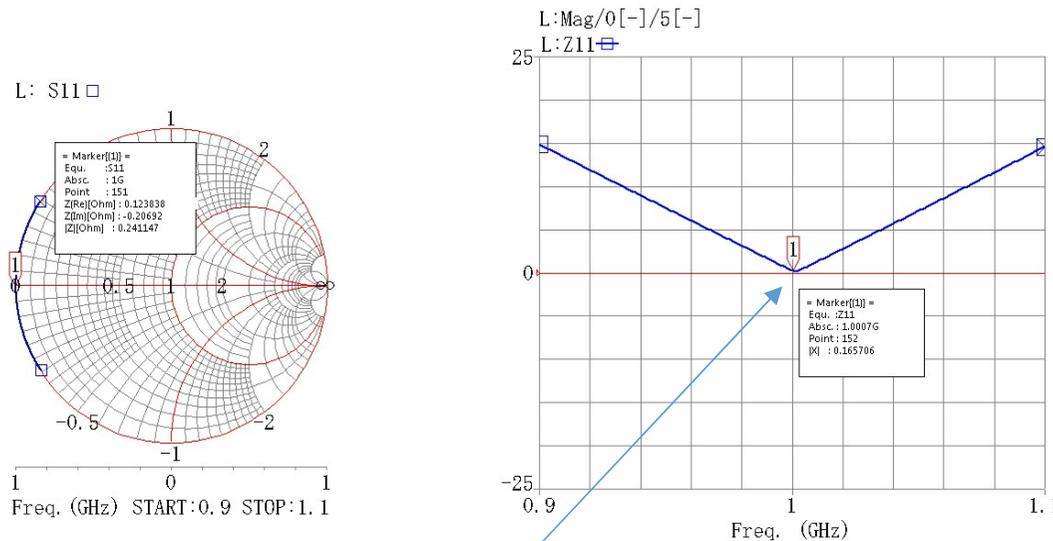
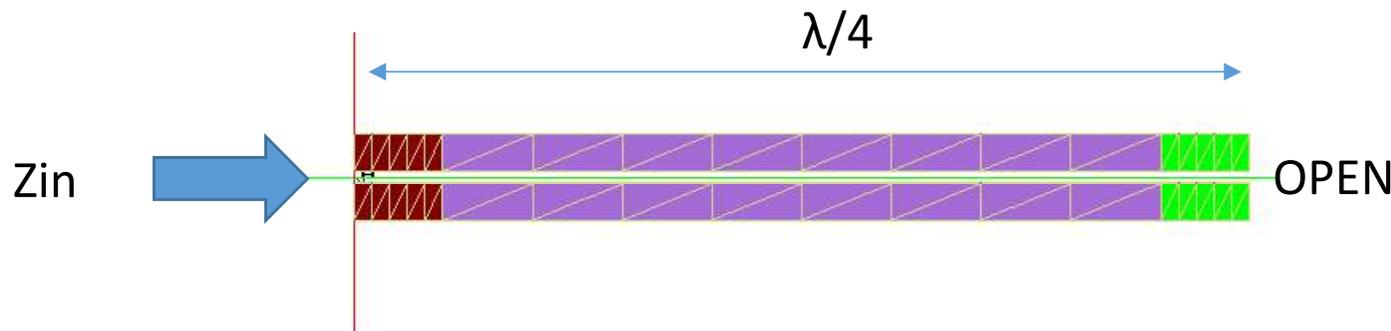
まずは先端開放の $\lambda/4$ の平行線路の特性



$\lambda/4$  @1GHz  $\cong$  75mm  $\rightarrow$  74.5mm (短縮)

# 平行線路特性

先端開放のλ/4の平行線路の特性



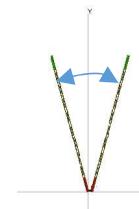
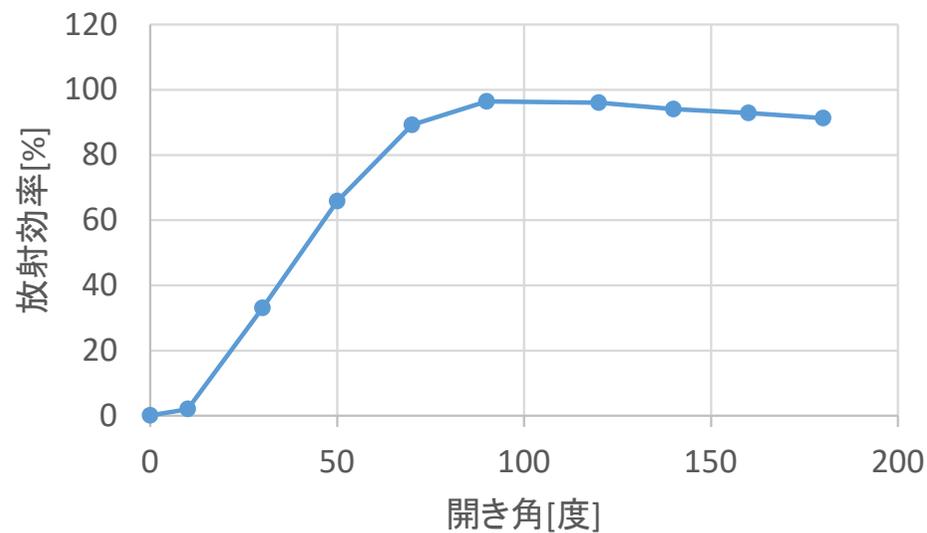
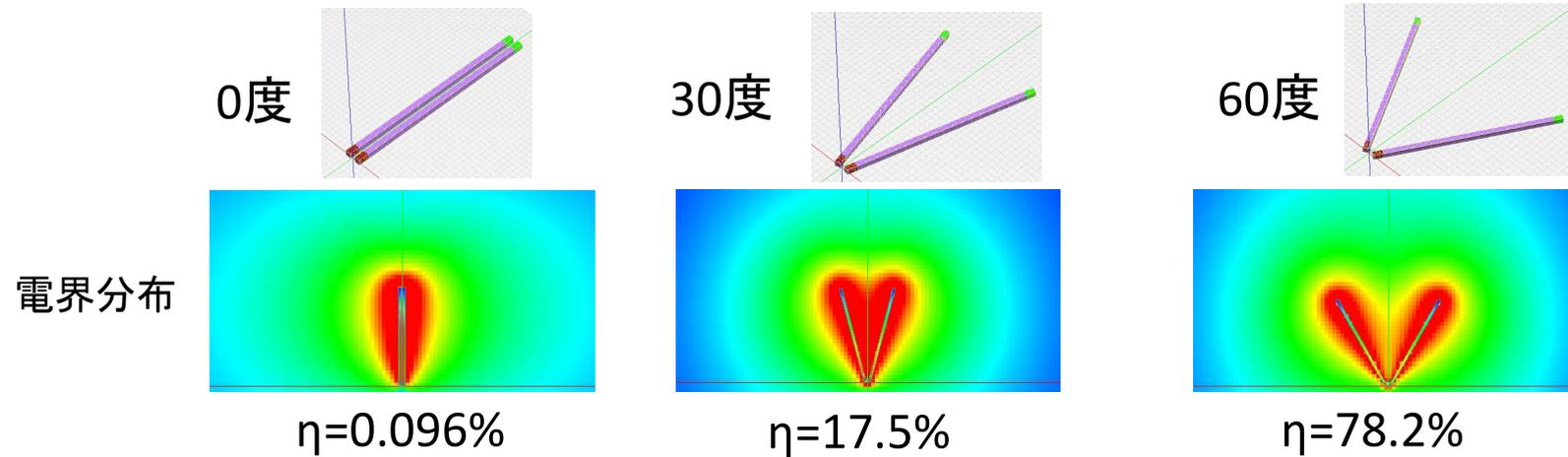
$$Z = Z_0 \frac{Z_r + j Z_0 \tan \beta l}{Z_0 + j Z_r \tan \beta l} \quad \text{--- (7)}$$

長さがλ/4時は、 $\tan \beta l = \infty$ となり  
 $Z = Z_0^2 / Z_r$  となる。

入力インピーダンスは  
負荷インピーダンスに反比例

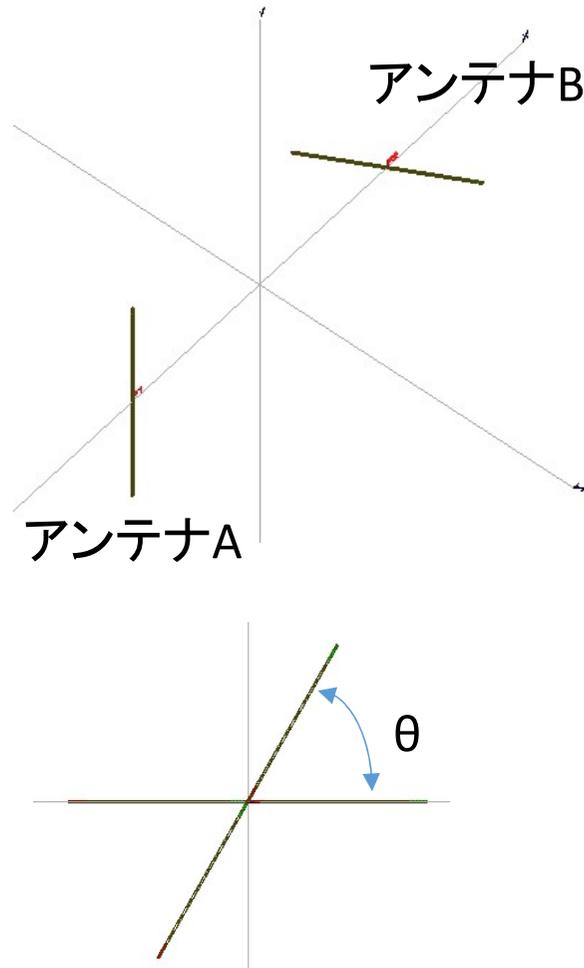
ショート状態

# 開き角と放射効率

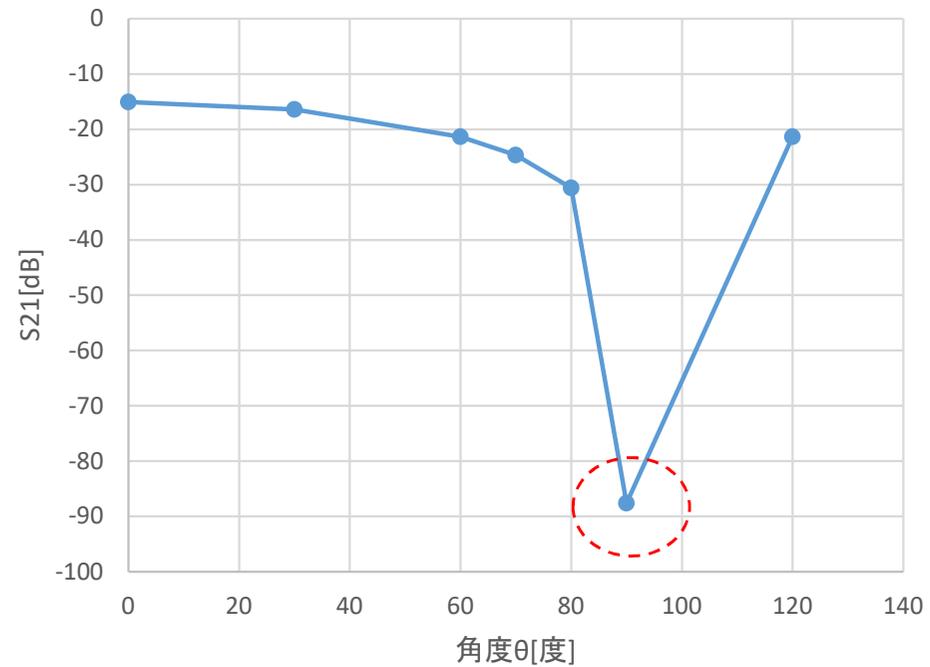


# 偏波面の影響

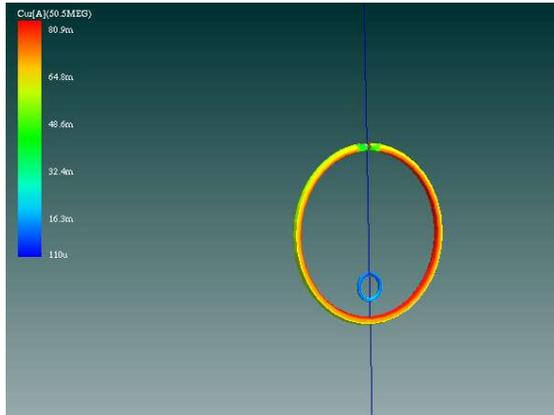
直線偏波アンテナの偏波面が互いに異なる場合



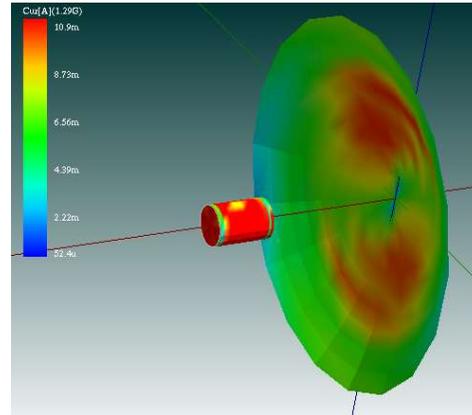
90度で受信できなくなる



S-NAP/Wireless 3次元電磁界ソルバ 周波数あたりの解析時間と解析時の最大メモリ使用量



ループアンテナ  
8秒/周波数 MEM:0.1GB

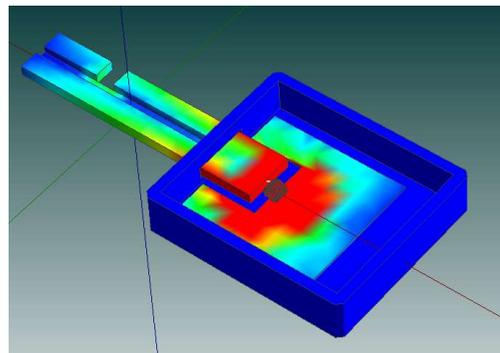


パラボラアンテナ  
6秒/周波数 MEM:0.1GB

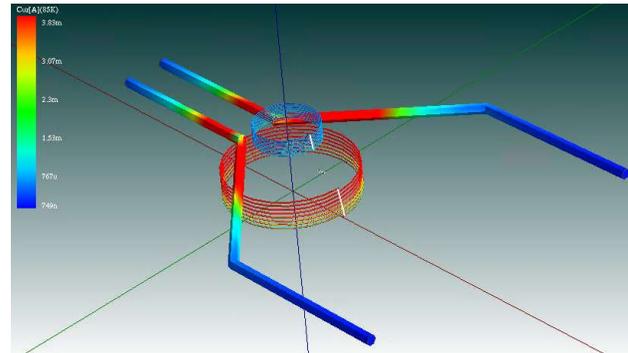
[テストマシンスペック]

デバイスの仕様

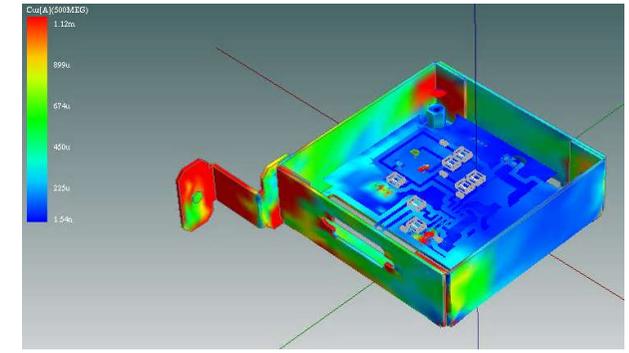
デバイス名	DESKTOP-F6MDK5N
プロセッサ	Intel(R) Xeon(R) W-2265 CPU @ 3.50GHz 3.50 GHz
実装 RAM	256 GB (256 GB 使用可能)
デバイス ID	9CA3B809-465D-4B04-89F2-269CA726CF04
プロダクト ID	00330-71429-24076-AAOEM
システムの種類	64 ビット オペレーティング システム、x64 ベース プロセッサ



キーアンテナ(金属+誘電体)  
11秒/周波数 MEM:0.5GB

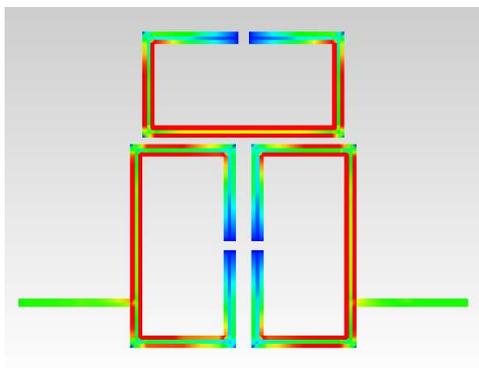


85KHz WPT 送受コイル+排気管  
265秒/周波数 MEM:5GB

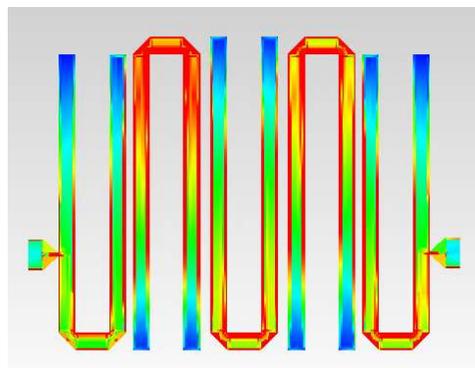


筐体+両面プリント板  
1049秒/周波数 MEM:19GB

S-NAP/Wireless 多層基板用2.5次元電磁界ソルバ 周波数あたりの解析時間と解析時のメモリ使用量



900MHz BPF  
2.9秒/周波数 M:0.1GB

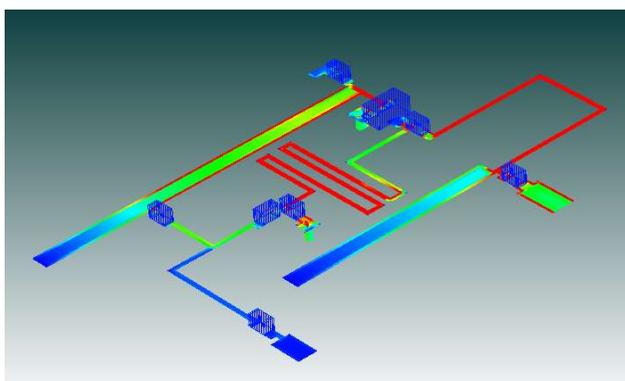


2GHzヘアピンフィルタ  
8.3秒/周波数 M:0.3GB

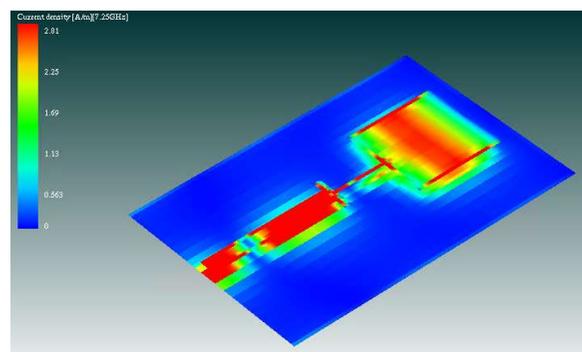
[テストマシンスペック]

デバイスの仕様

デバイス名	DESKTOP-F6MDK5N
プロセッサ	Intel(R) Xeon(R) W-2265 CPU @ 3.50GHz 3.50 GHz
実装 RAM	256 GB (256 GB 使用可能)
デバイス ID	9CA3B809-465D-4B04-89F2-269CA726CF04
プロダクト ID	00330-71429-24076-AAOEM
システムの種類	64 ビット オペレーティング システム、x64 ベース プロセッサ



1.2GHz アンプ(実装部品あり)  
12秒/周波数 M:0.3GB

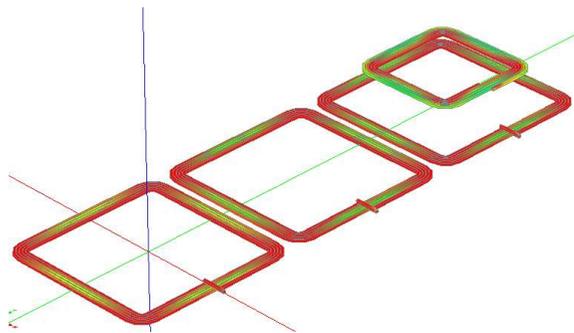


7.75GHz パッチアンテナ(GND付)  
3.2秒/周波数 M:0.1GB

# その他

# 多ポートSパラメータ⇒等価回路変換機能

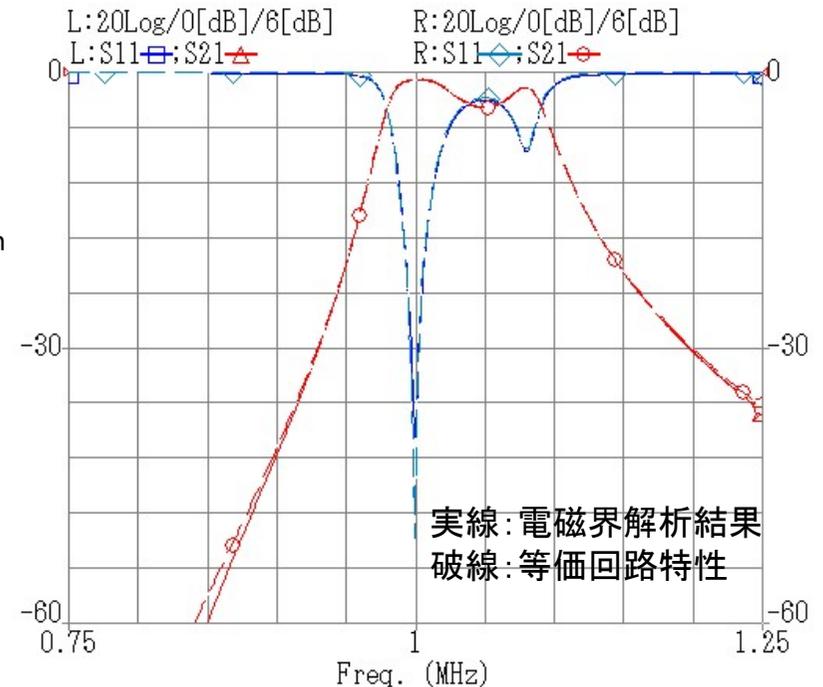
多ポートのS,Y,ZパラメータからSPICEのサブキットを出力できます。図は中継タイプのWPTの伝送特性の電磁界解析を行った結果を変換した例です。ほぼ同じ特性が得られています。



中継コイルタイプWPT

```
*****
* SPICE Model generated by S-NAP
*****
.SUBCKT x3_sparam p1p p1n p2p p2n
X1 p1p p1n p2p p2n x3_sparam0
.SUBCKT x3_sparam0 p1p p1n p2p p2n
VP_1 p1p p1c 0
HI_1 I1_1 I2_1 VP_1 1
VI_1 I1_1 I3_1 0
XAI_1 I3_1 I2_1 x3_sparam0_Ai1_1
FI_1 I4_1 p1n VI_1 1
.
.
```

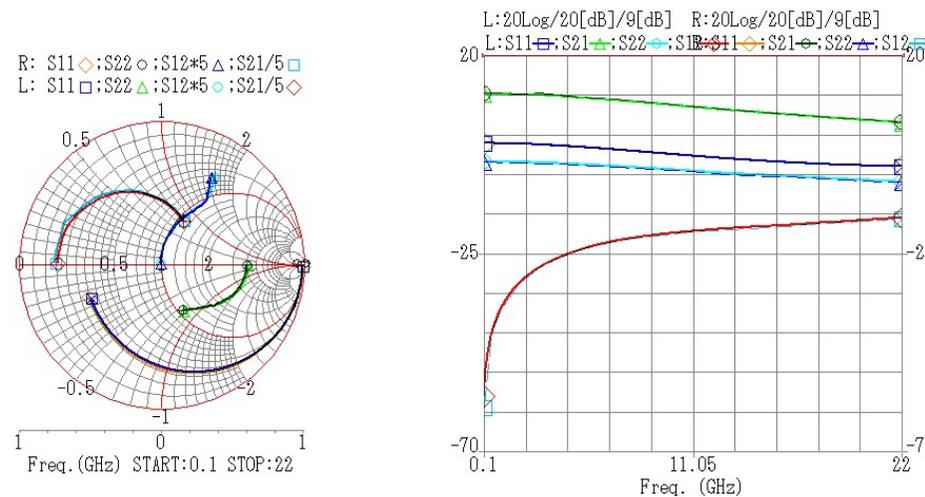
SPICE  
サブキット出力



# アクティブSパラメータ⇒等価回路変換機能

等価回路変換機能はパッシブ回路 ( $|S_{mn}| \leq 1$ ) でない場合も変換可能です  
 以下は、FHX04XというHEMTのSパラメータを等価回路変換した例です。

100.00MEG	1.00000	-0.90000	3.72100	179.20000	0.00100	89.50000	0.60600	-0.40000
500.00MEG	0.99900	-4.70000	3.71700	176.00000	0.00700	87.70000	0.60500	-2.10000
1.00G	0.99600	-9.50000	3.70500	172.00000	0.01300	86.40000	0.60400	-4.20000
2.00G	0.98300	-18.80000	3.65800	164.10000	0.02600	81.00000	0.59800	-8.30000
3.00G	0.96400	-28.00000	3.68500	156.40000	0.03800	76.70000	0.58800	-12.30000
19.00G	0.57800	-140.10000	1.91800	72.30000	0.12500	57.00000	0.38200	-55.70000
20.00G	0.57000	-145.40000	1.85300	68.80000	0.13000	57.80000	0.37300	-58.40000
21.00G	0.56400	-150.60000	1.79300	65.40000	0.13400	58.70000	0.36500	-61.10000
22.00G	0.56000	-155.60000	1.73600	62.10000	0.14000	59.80000	0.35800	-64.00000

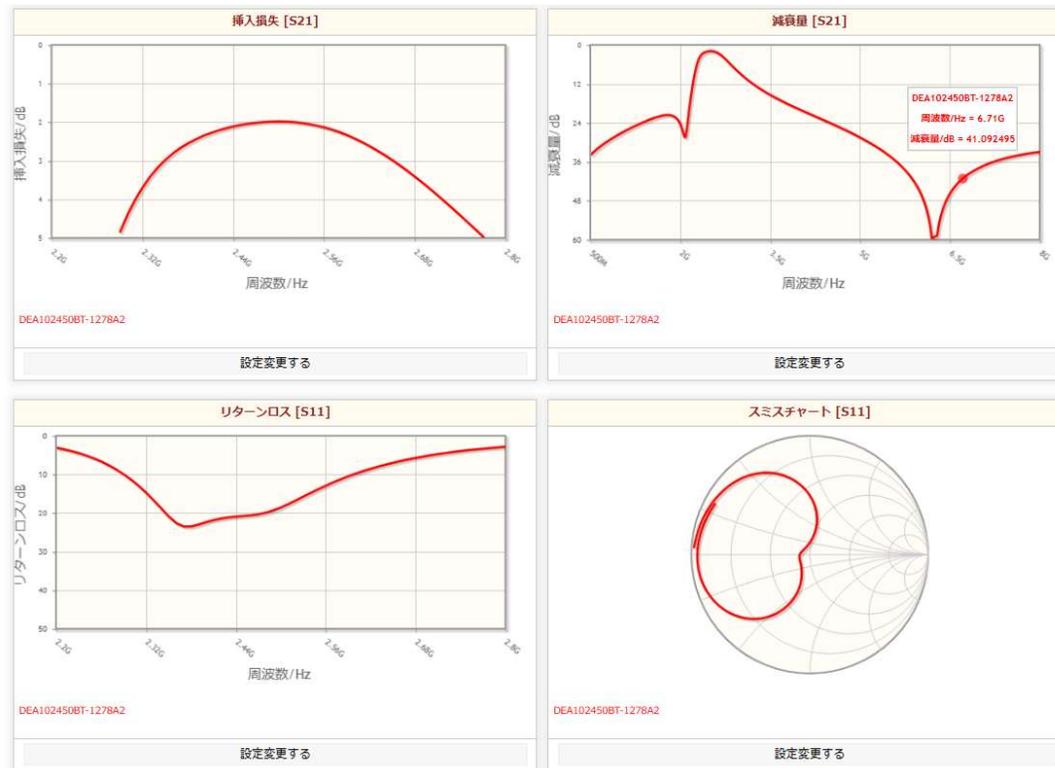


元のSパラメータと等価回路特性の比較

# 市販部品の等価回路化(1)

TDK社製  
2.45GHz BPF

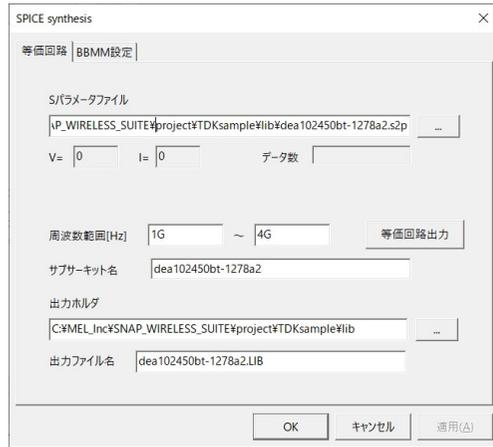
DEA102450BT-1278A2



# 等価回路抽出

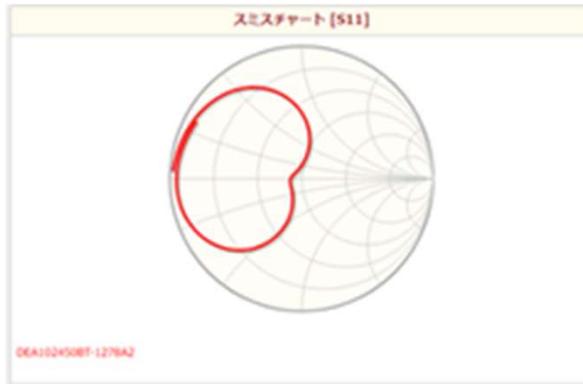
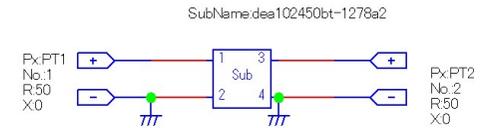
得られたSPICEサブサーキット(一部)

## 抽出設定

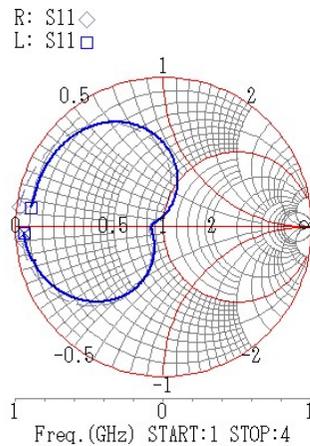


```

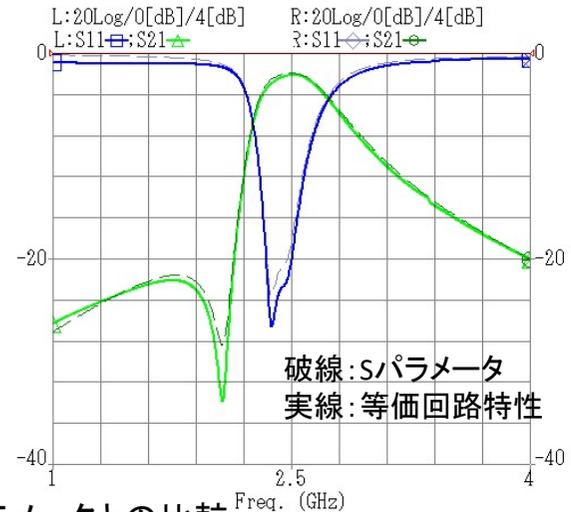
*****
*****
* SPICE Model generated by S-NAP/MEL Inc.
* Date: 2024 3月 27(水曜日)
* Sparameter : ¥TDKsample¥lib¥dea102450bt-1278a2.s2p (V=0,I=0)
* Base parameter : Sparameter
* Number of port : 2, symmetric=false
* Terminals : p1_pos,p1_neg,p2_pos,p2_neg,...
*****
*****
.SUBCKT dea102450bt-1278a2 p1p p1n p2p p2n
VFG1 p3p p3n 0
X1 p1p p1n p2p p2n p3p p3n dea102450bt-1278a20
.SUBCKT dea102450bt-1278a20 p1p p1n p2p p2n p3p p3n
VP_1 p1p p1c 0
HI_1 I1_1 I2_1 VP_1 1
VI_1 I1_1 I3_1 0
XAI_1 I3_1 I2_1 dea102450bt-1278a20_Ai1_1
FI_1 p1c p1n VI_1 1
XG_1 p1c p1n dea102450bt-1278a20_G1_1
.
.
.
    
```



TDK社データシート

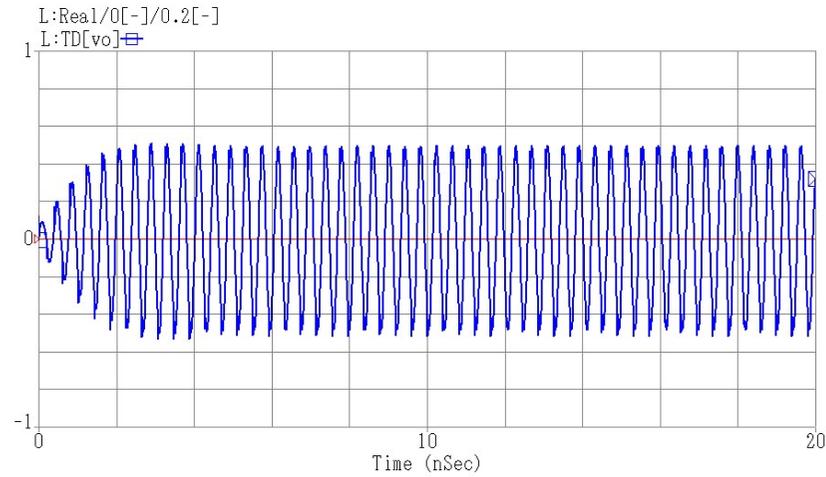
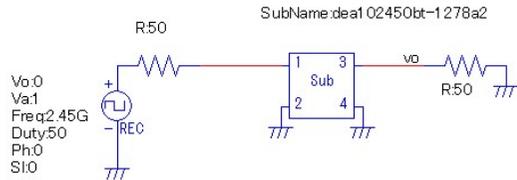


元のSパラメータとの比較

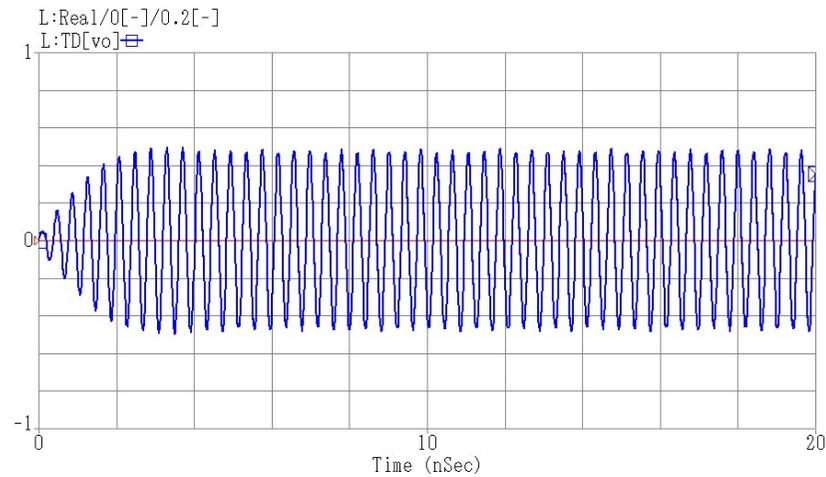
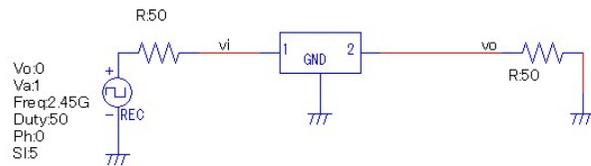


# トランジエント解析

## サブサーキット使用



## Sパラメータ使用



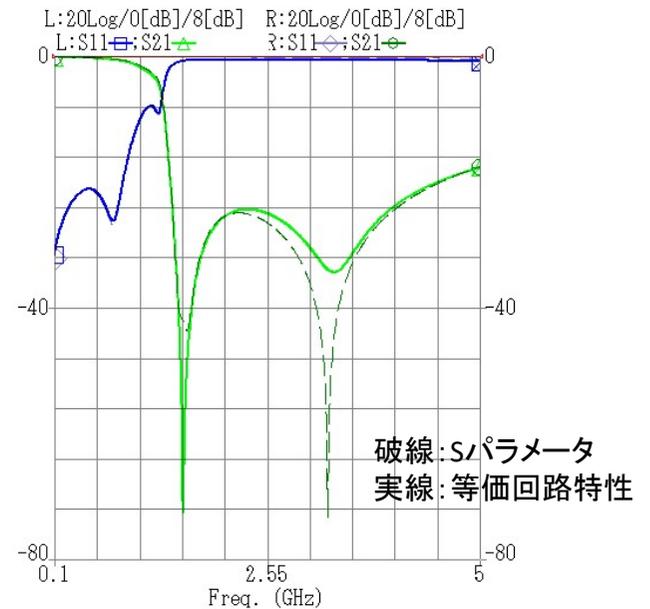
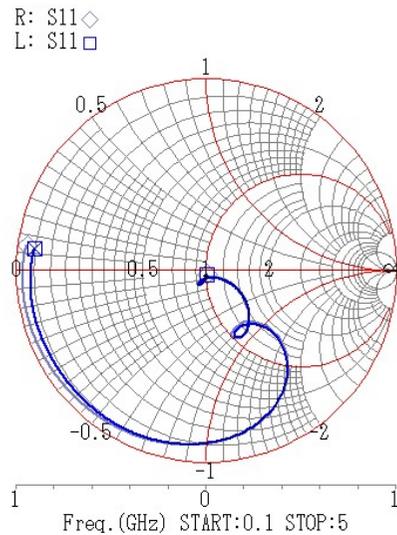
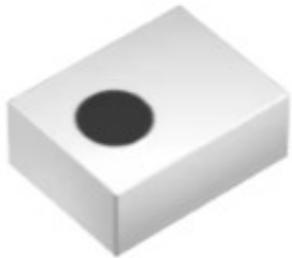
# 市販部品の等価回路化(2)

得られたSPICEサブサーキット(一部)

```
*****  
**  
* SPICE Model generated by S-NAP/MEL Inc.  
* Date: 2024 3月 27(水曜日)  
* Sparameter : ¥TDKsample¥lib¥dea070787lt-4002a1.s2p (V=0,I=0)  
* Base parameter : Sparameter  
* Number of port : 2, symmetric=false  
* Terminals : p1_pos,p1_neg,p2_pos,p2_neg,***  
*****  
**  
.SUBCKT dea070787lt-4002a1 p1p p1n p2p p2n  
VFG1 p3p p3n 0  
X1 p1p p1n p2p p2n p3p p3n dea070787lt-4002a10  
.SUBCKT dea070787lt-4002a10 p1p p1n p2p p2n p3p p3n  
VP_1 p1p p1c 0  
HI_1 I1_1 I2_1 VP_1 1  
.  
.
```

TDK社製  
1GHz LPF

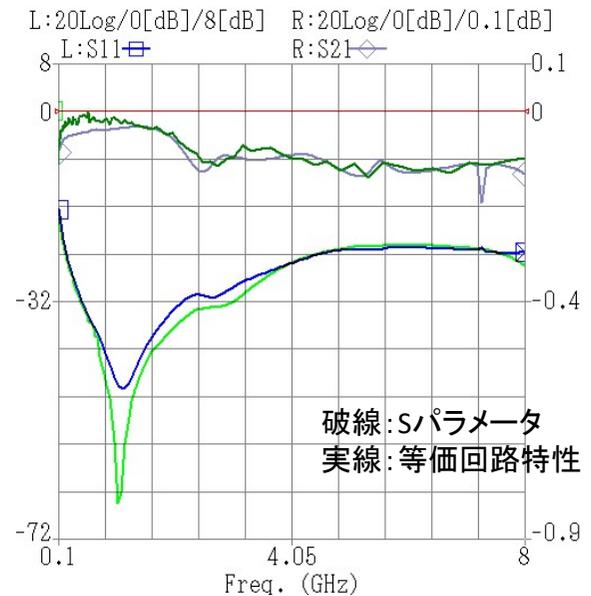
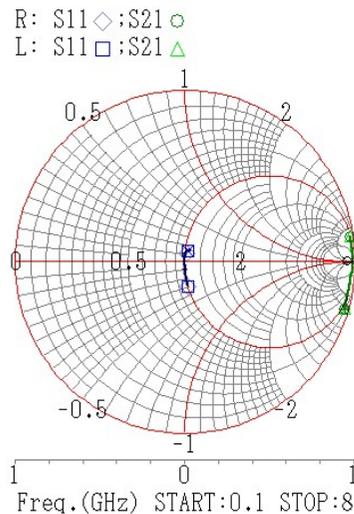
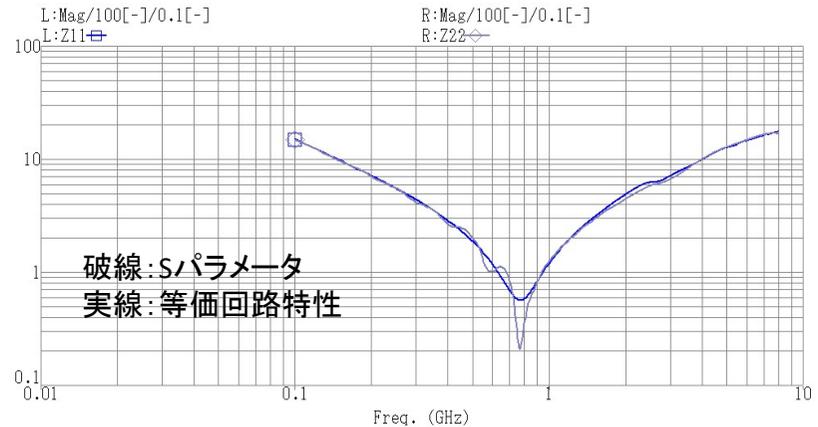
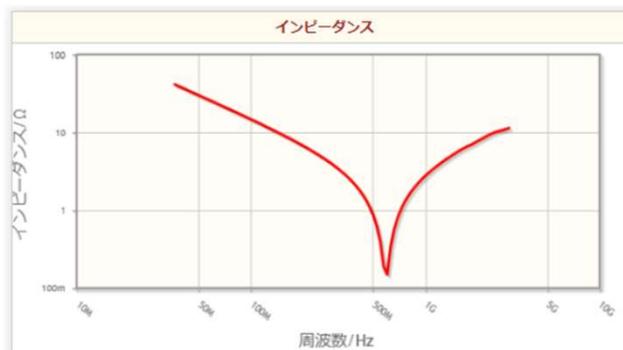
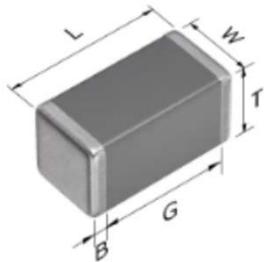
DEA070787LT-4002A1



# 市販部品の等価回路化(3)

TDK社製  
チップコンデンサ100pF

**CGA2B2C0G2A101J050BA**

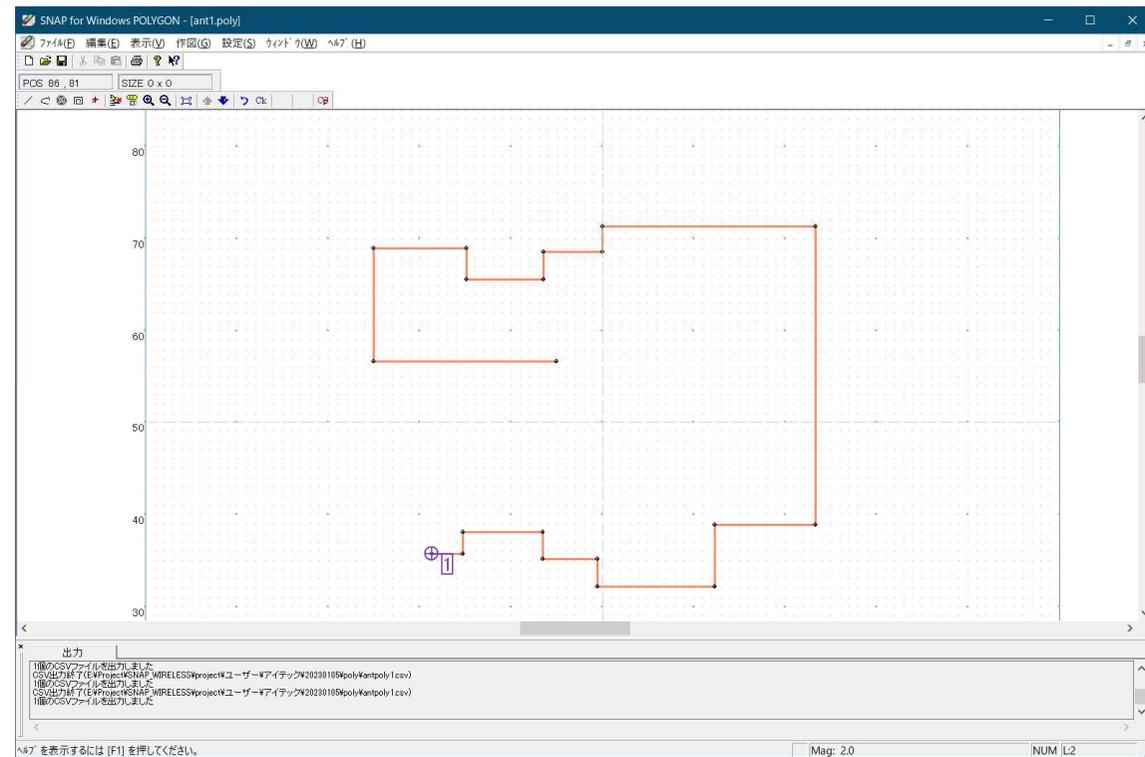
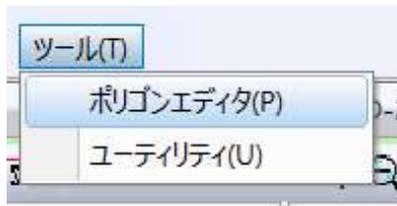


## ポリゴンエディタ

アンテナをポリゴンエディタで描いたものです

アンテナの形状を簡単に変更できます

ポリゴンエディタは以下のメニューから起動できます



# W/S (参考)

- ・並列計算のため、コア数が多いほど良い
- ・メモリは小さい基板でも32GB以上は必要、3Dでは512GB以上を推奨

(例1) プロセッサ Intel(R) Xeon(R) W-2265 CPU @ 3.50GHz 3.50 GHz  
実装 RAM 256 GB (256 GB 使用可能)

(例2) プロセッサ Intel(R) Xeon(R) w7-2495X 2.50 GHz  
実装 RAM 512 GB (512 GB 使用可能)