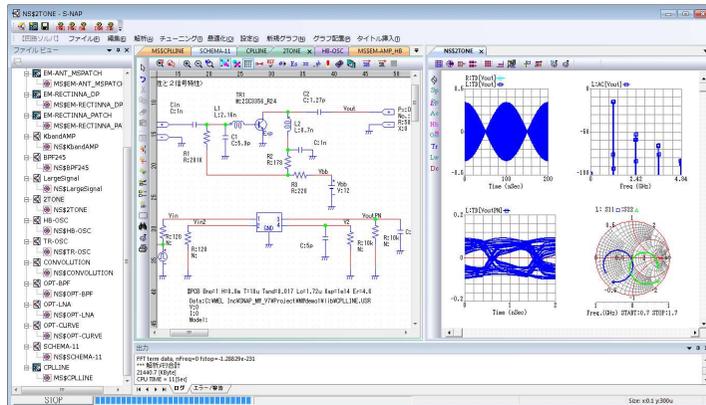

3次元モーメント法電磁界シミュレータを用いた、
ワイヤレス電力伝送、組み込みアンテナ、3DEMC問題の解析事例の紹介

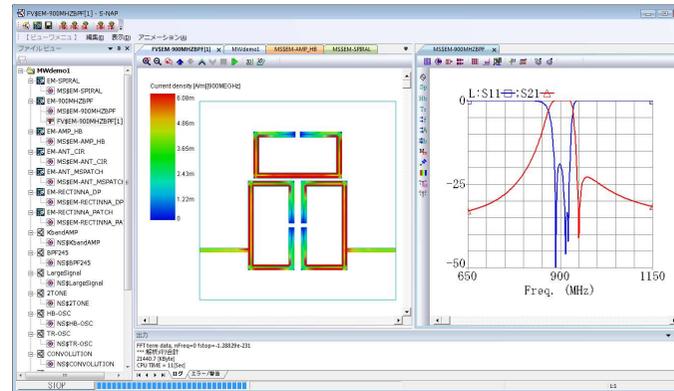
2019年11月 MWE2019
株式会社 エム・イー・エル



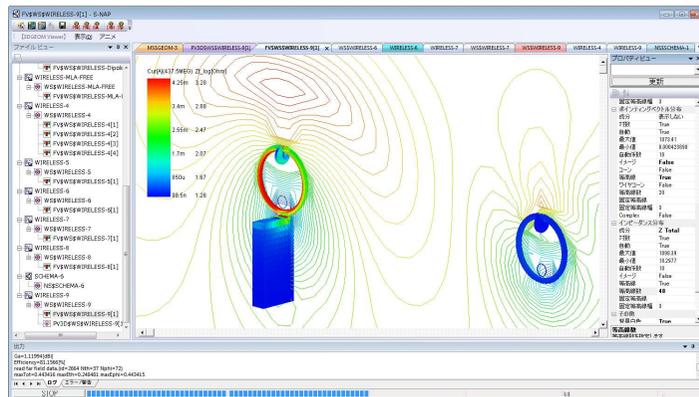
S-NAP Wireless Suiteの概要



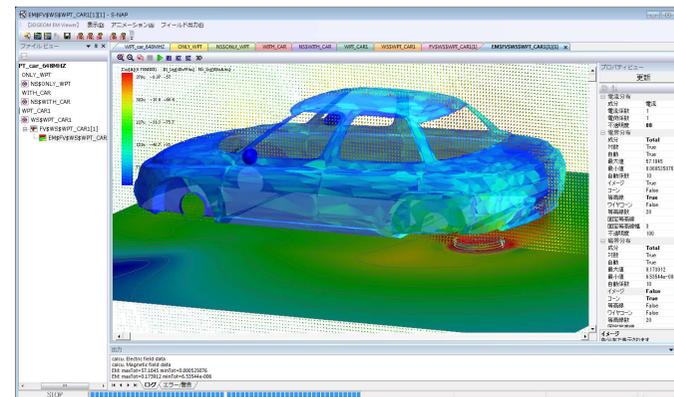
回路解析



多層基板電磁界解析

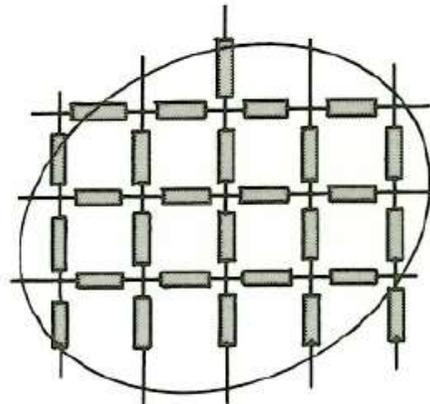


3次元電磁界解析

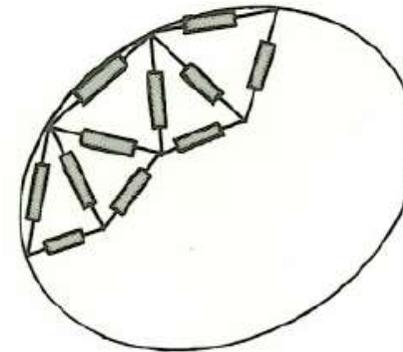


電磁界解析手法のおおまかな分類

- ▶ 差分法
(FDTD,TLM法)
- ▶ 有限要素法

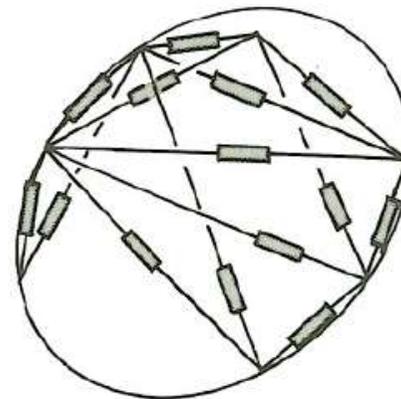


(a) 差分モデル



(b) 有限要素モデル

- ▶ 境界要素法
(モーメント法)



(c) 境界要素モデル

モーメント法の概要

E_f
 J_1
 J_2
 J_3
 ϵ_0, μ_0
 原点
 r
 J_e
 J_m
 磁性体
 ϵ_1, μ_1
 境界方程式を作ることによって異なる媒質も解析可能

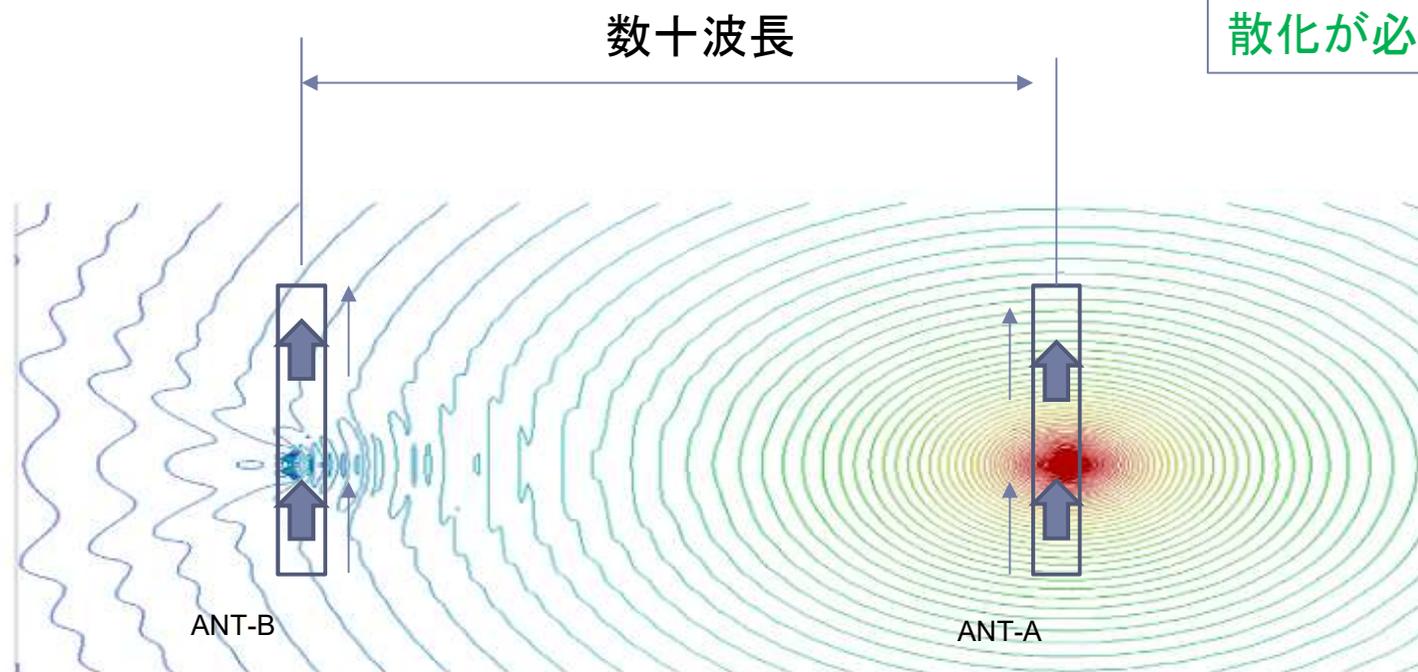
$$E_f(r_f) = \iint G(r_f, r_1) J_1 dS_1 + \iint G(r_f, r_2) J_2 dS_2 + \iint G(r_f, r_3) J_3 dS_3 + \dots$$

$$G(r_f, r_1) = e^{-jkr}/r, \quad r = |r_f - r_1|, \quad k = \omega \sqrt{\mu \epsilon}$$

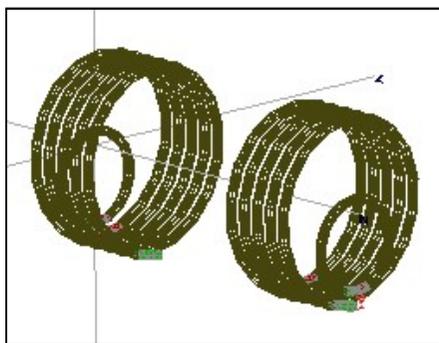
特長 1 : 超遠方特性の解析

モーメント法は、境界上にしか変数を設定しないので、
数十波長以上離れていても容易に解析できる

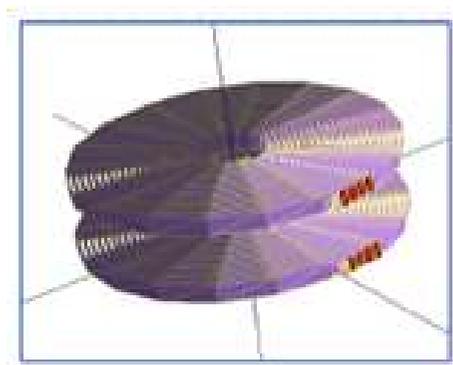
FDTD法や有限要素法では空間の離散化が必要



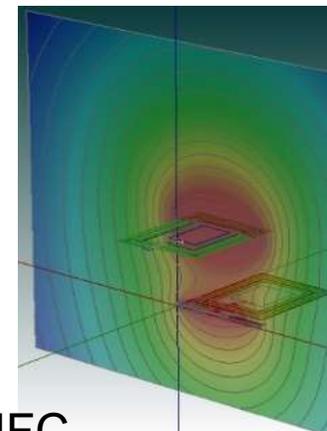
送受信間の解析が必要なもの



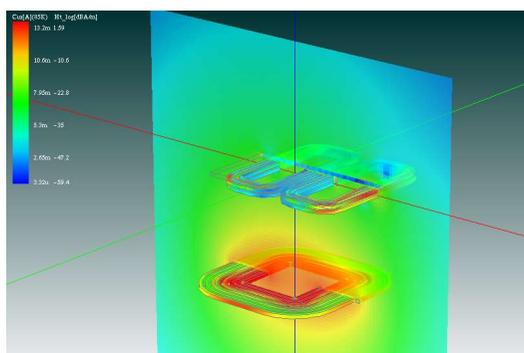
磁界共鳴方式WPT



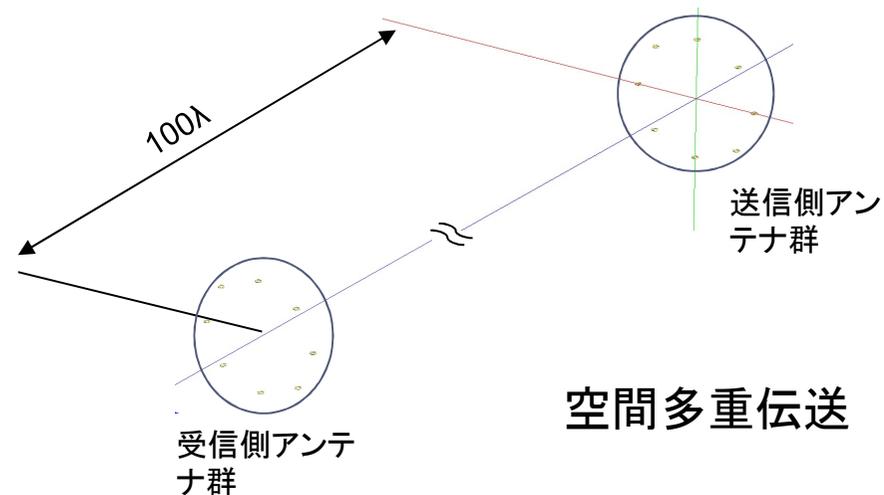
電磁誘導WPT



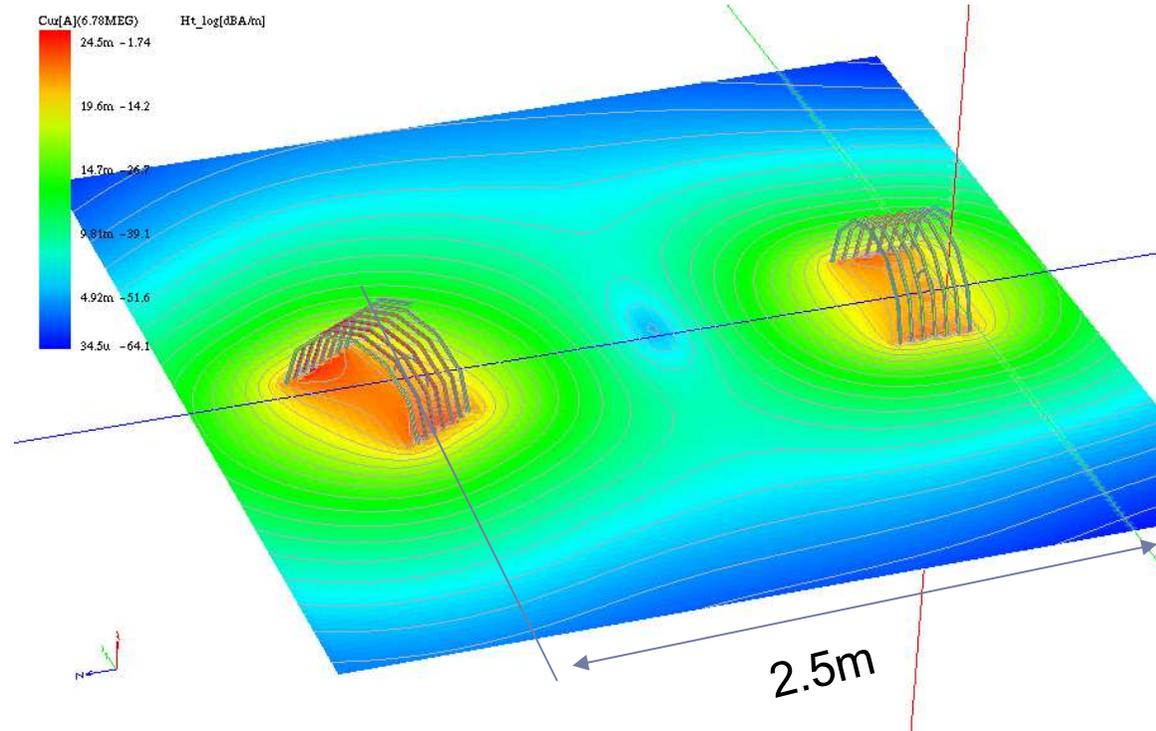
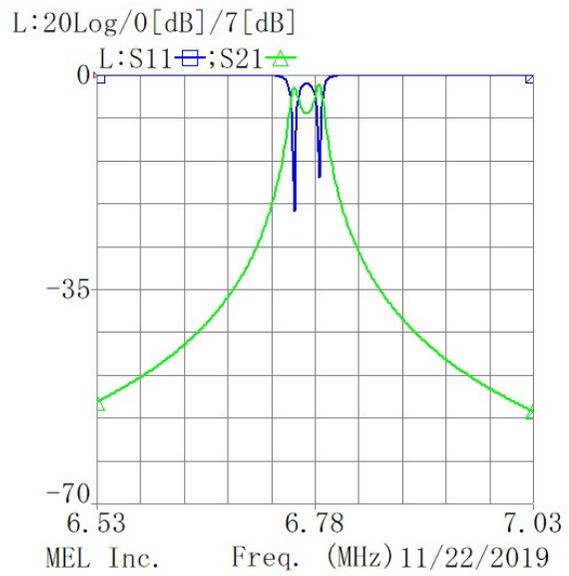
NFC



自動車用WPT



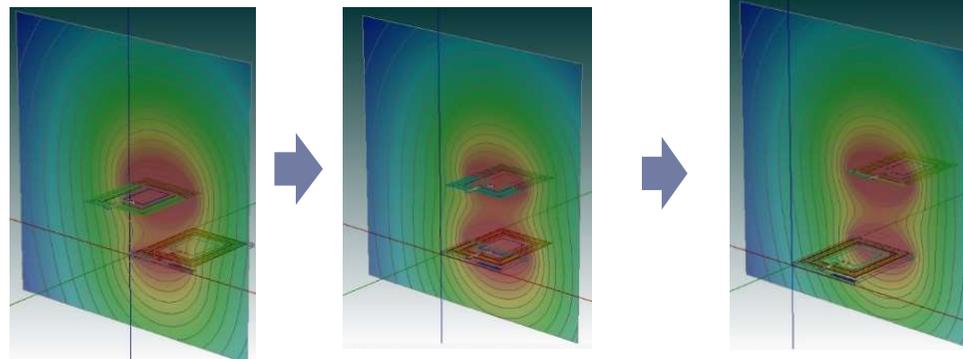
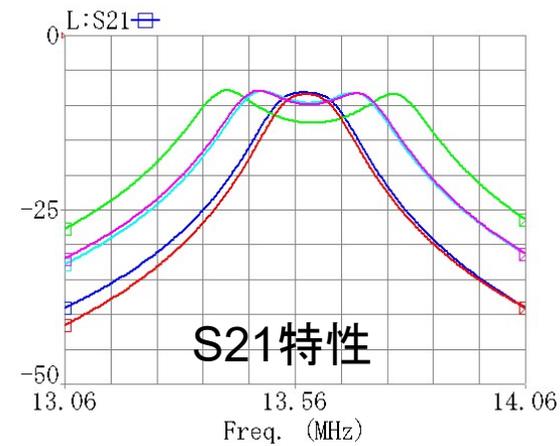
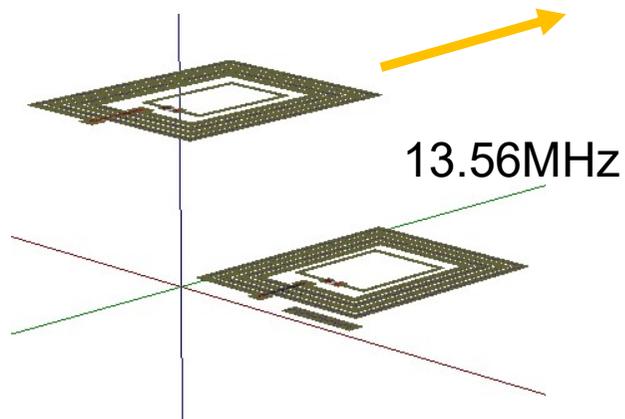
磁界共鳴方式WPT



解析時間: 3.5分

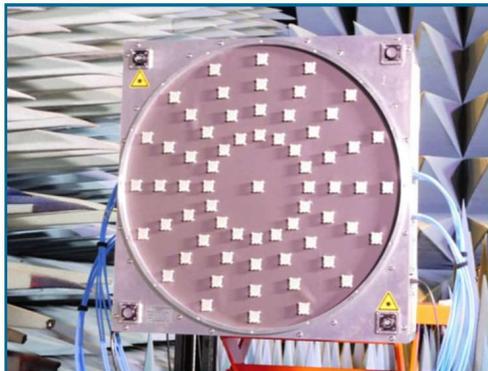
IDカードシミュレーション(13.56MHz)

- ・IDカードが親機の真上に来ると強結合になり双峰特性になる
- ・他のカードを読まないように気を付ける



OAM (Orbital Angular Momentum) のシミュレーション

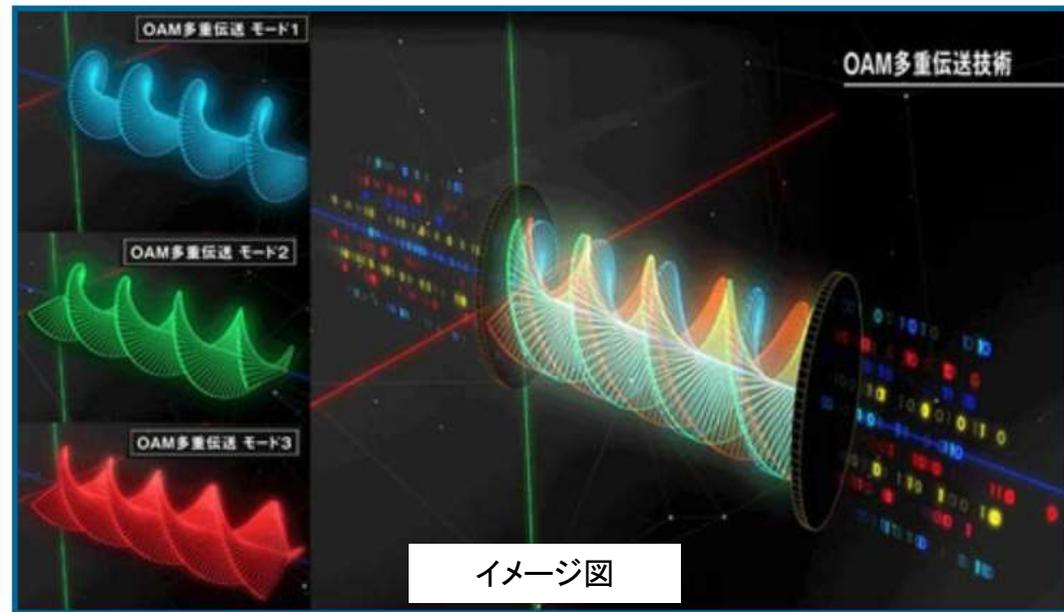
OAMは日本語で「軌道角運動量」。進行方向に対して螺旋(らせん)形状になる電波の“回転度合い”を示す。回転度合いの異なる電波は互いに交わらず、平行して進む特徴があるため、複数の電波を重ね合わせて通信容量を増やすOAM多重の研究が各所で進められている。(IT media NEWSより引用)



NTTが試作した送受信装置

OAM用のアンテナ

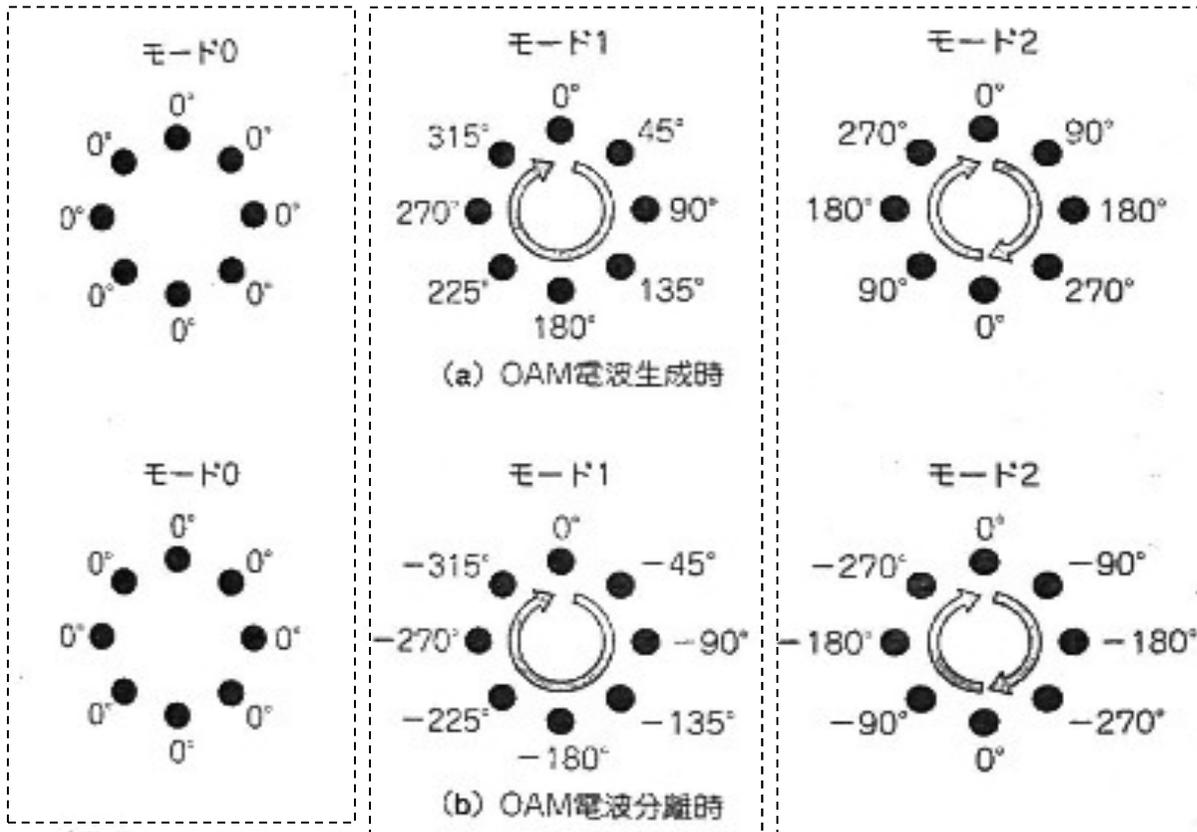
UCA (uniform circular array)



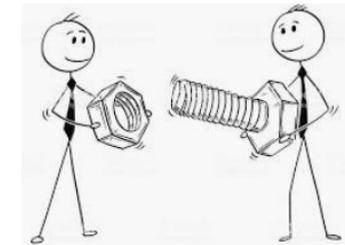
OAM多重の原理

参考資料: IT media
News

OAMのシミュレーション図 位相器と8分配器

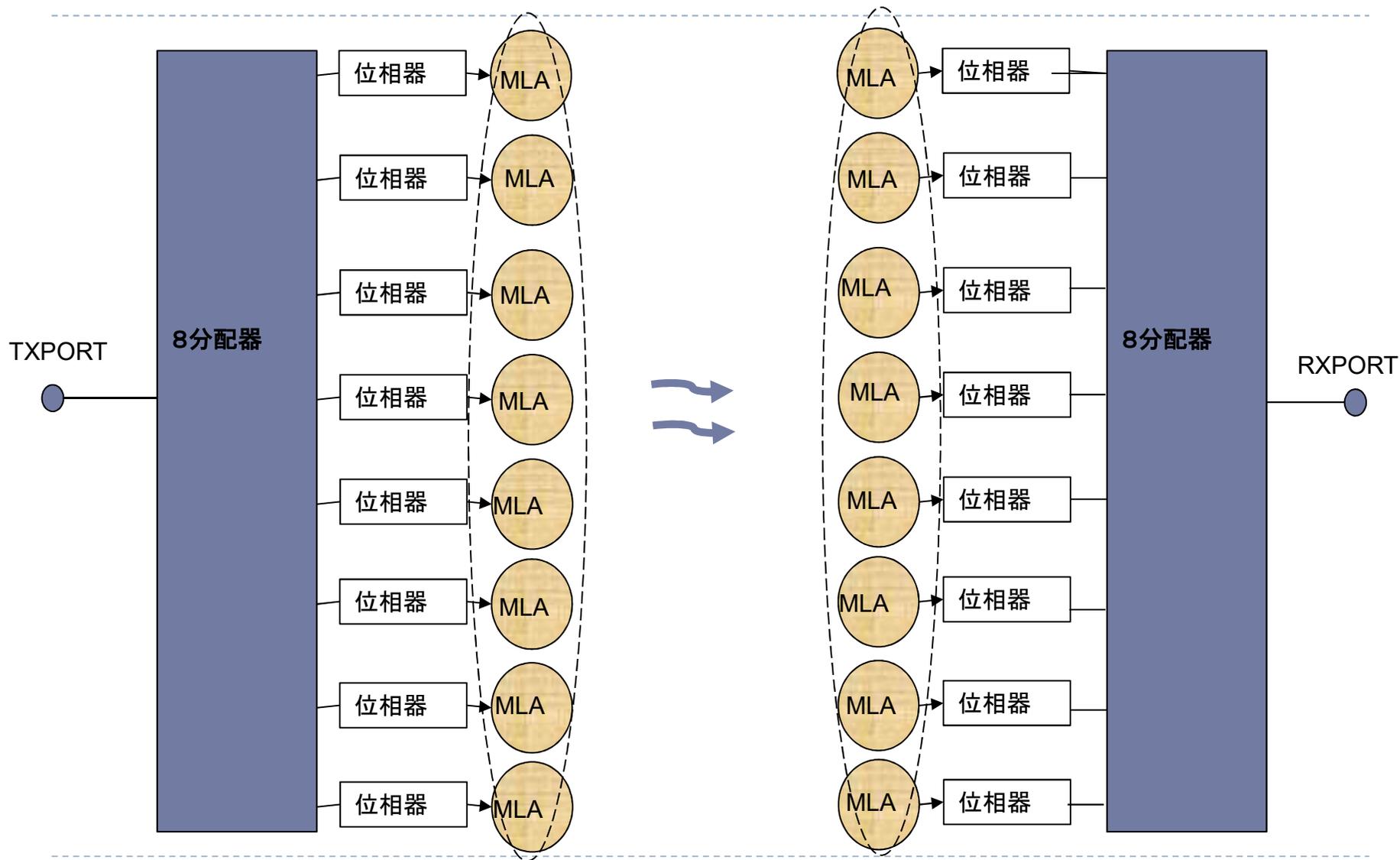


(図4) 一つのUCAを使って異なるOAMモードをもつ電波を生成/分離する時の各アンテナ素子に与える位相シフト量



参考文献: RFワールド No.47

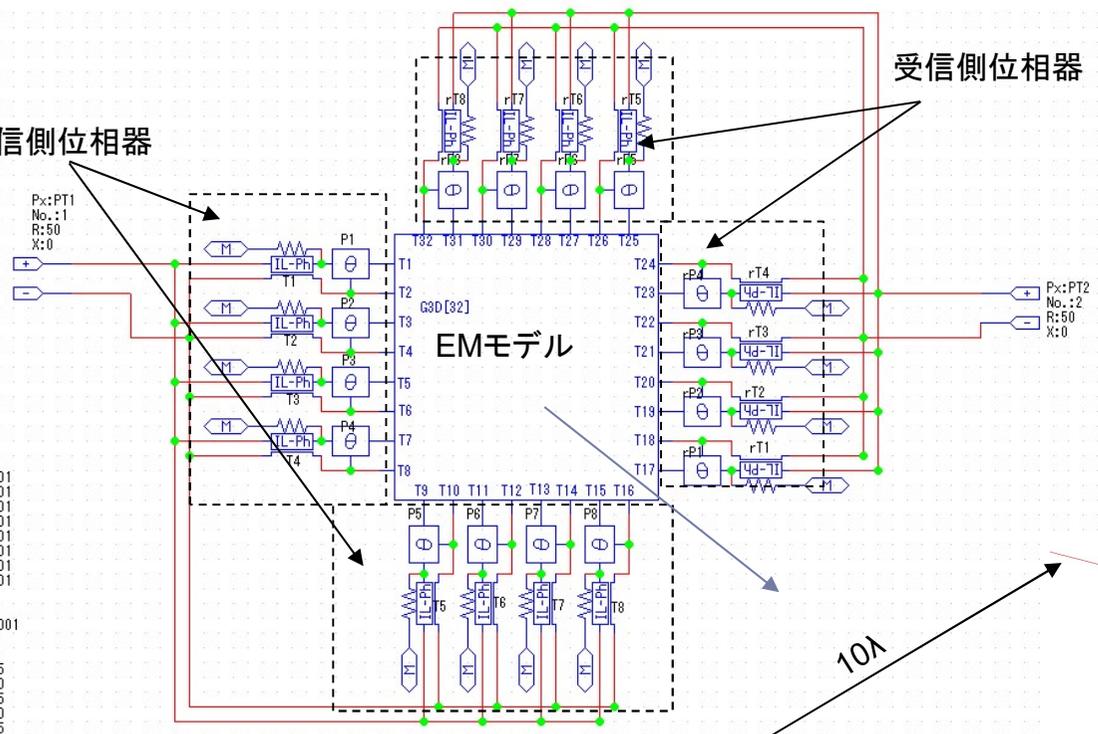
OAMのシミュレーション図 位相器と8分配器



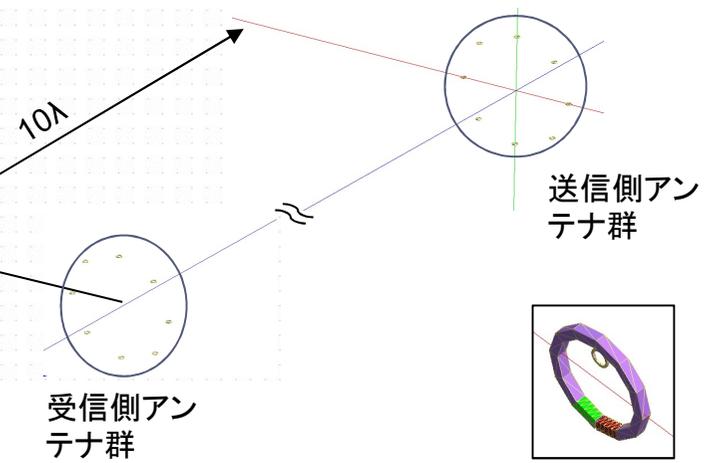
OAMのシミュレーション図 位相器と8分配器

```

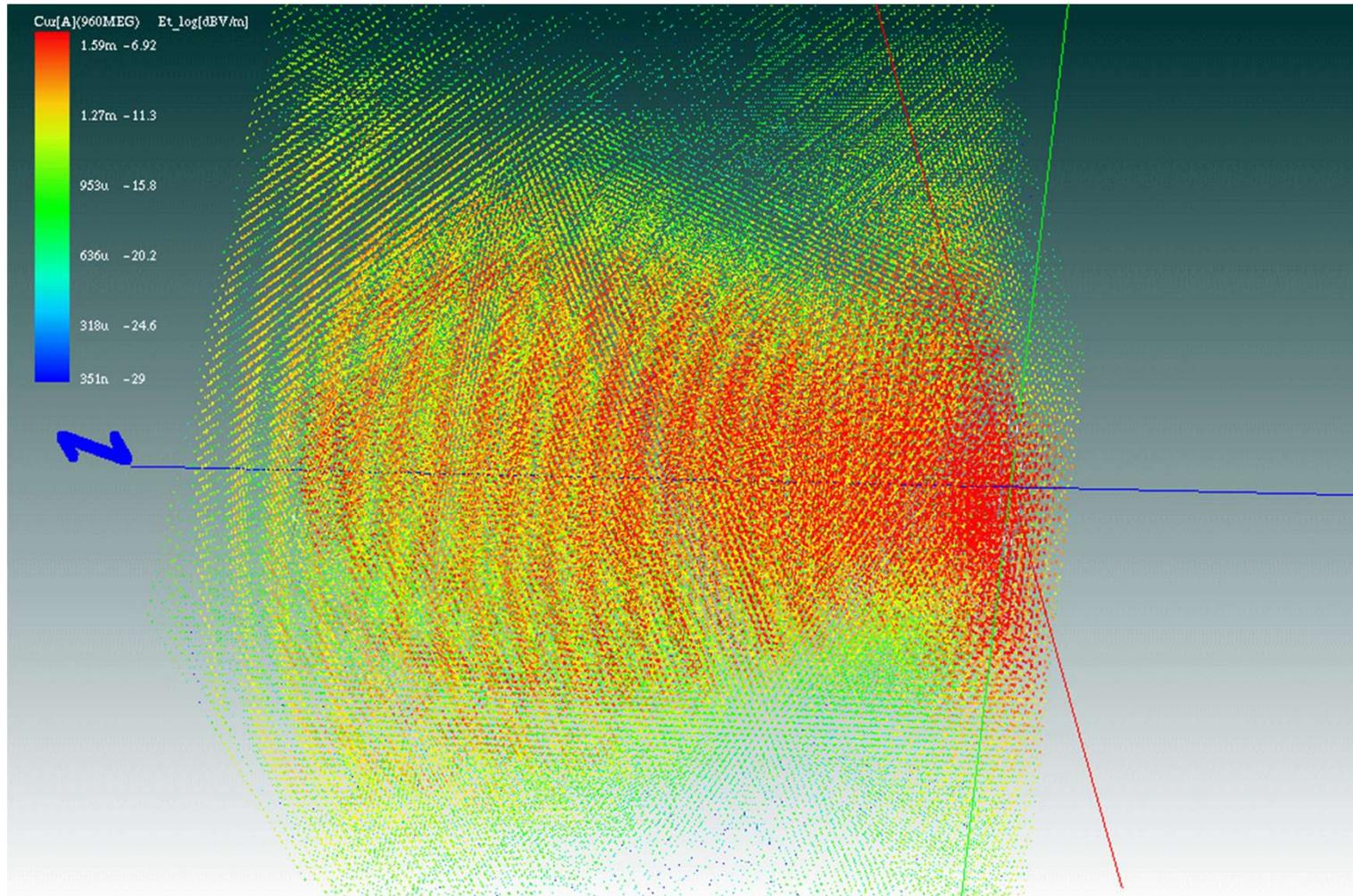
#Define Fx=0.435G
*== TX mode0 ==
#Define ThA1=0.001
#Define ThA2=0.001
#Define ThA3=0.001
#Define ThA4=0.001
#Define ThA5=0.001
#Define ThA6=0.001
#Define ThA7=0.001
#Define ThA8=0.001
*
*== TX mode1 ==
#Define ThA1=0.001
#Define ThA2=45
#Define ThA3=90
#Define ThA4=135
#Define ThA5=180
#Define ThA6=225
#Define ThA7=270
#Define ThA8=315
*
*== TX mode2 ==
#Define ThA1=0
#Define ThA2=90
#Define ThA3=180
#Define ThA4=270
#Define ThA5=0
#Define ThA6=90
#Define ThA7=180
#Define ThA8=270
*
* RX
#Define Bcoef=1
*== mode0 ==
#Define ThB1=Bcoef*0.001
#Define ThB2=Bcoef*0.001
#Define ThB3=Bcoef*0.001
#Define ThB4=Bcoef*0.001
#Define ThB5=Bcoef*0.001
#Define ThB6=Bcoef*0.001
#Define ThB7=Bcoef*0.001
#Define ThB8=Bcoef*0.001
*
*== RX mode1 ==
#Define ThB1=Bcoef*0.001
#Define ThB2=Bcoef*45
#Define ThB3=Bcoef*90
#Define ThB4=Bcoef*135
#Define ThB5=Bcoef*180
#Define ThB6=Bcoef*225
#Define ThB7=Bcoef*270
#Define ThB8=Bcoef*315
*
*== mode2 ==
#Define ThB1=Bcoef*0.001
#Define ThB2=Bcoef*90
#Define ThB3=Bcoef*180
#Define ThB4=Bcoef*270
#Define ThB5=Bcoef*0.001
#Define ThB6=Bcoef*90
#Define ThB7=Bcoef*180
#Define ThB8=Bcoef*270
* phase shifter
#Define TLD=80
#Define ZL=141.4
    
```



GEOM:C:\MEL Inc\SNAP_WIRELESS_2018\project\OAM2\#g3d\MLA8x2\tempdoc.g3d
 MODEL:none
 CFQ:1G
 NCF:11
 AWE:0
 TRNS:1
 SKI:0
 EMSW:2
 GMODE:0



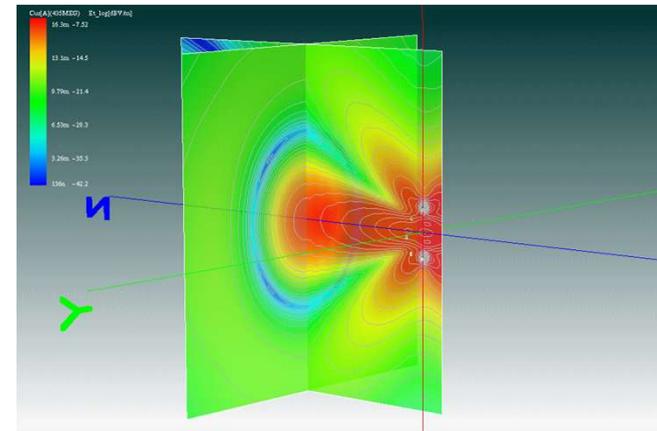
空間にマッピングしたMODE 1の時の3次元電界分布



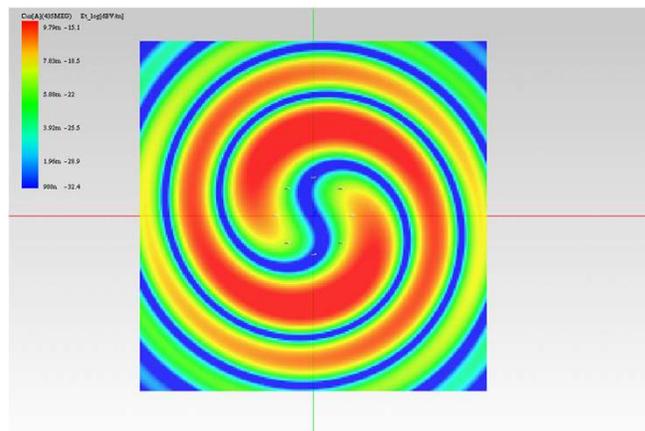
OAMのアイソレーションと電界分布

アイソレーション特性

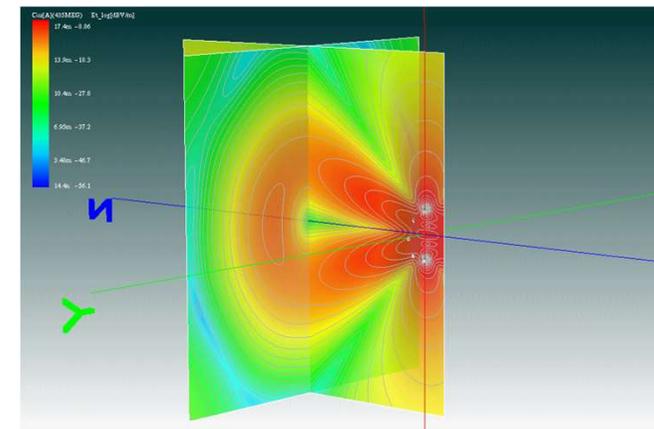
送信モード		Mode 0	Mode 1
受信	Mode 0	-22.43	-110.20
	Mode -1	-110.04	-34.98



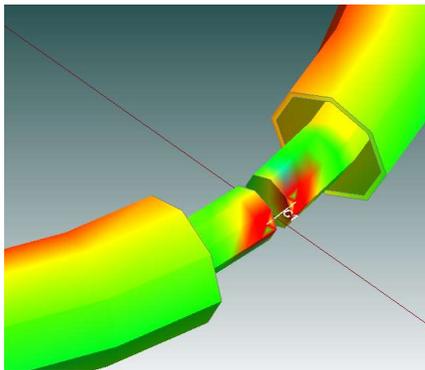
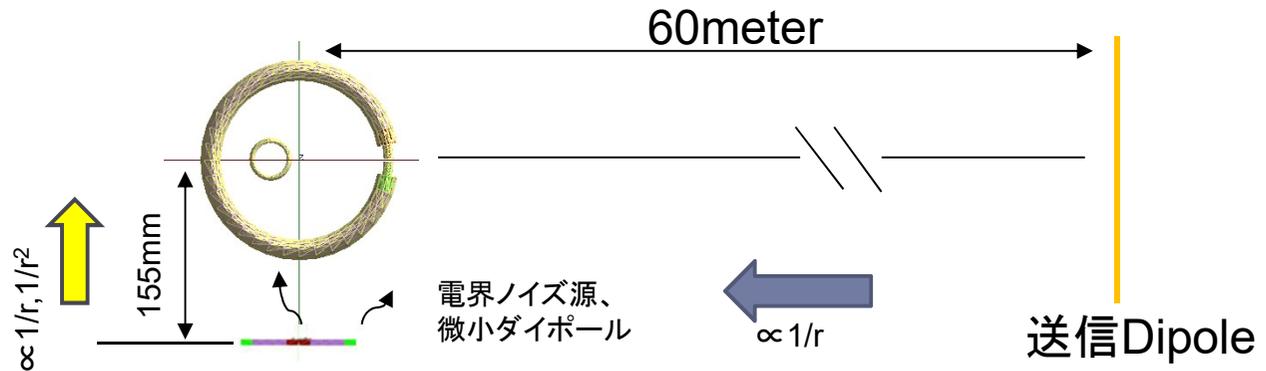
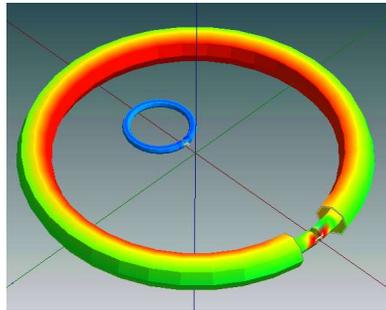
MODE 0



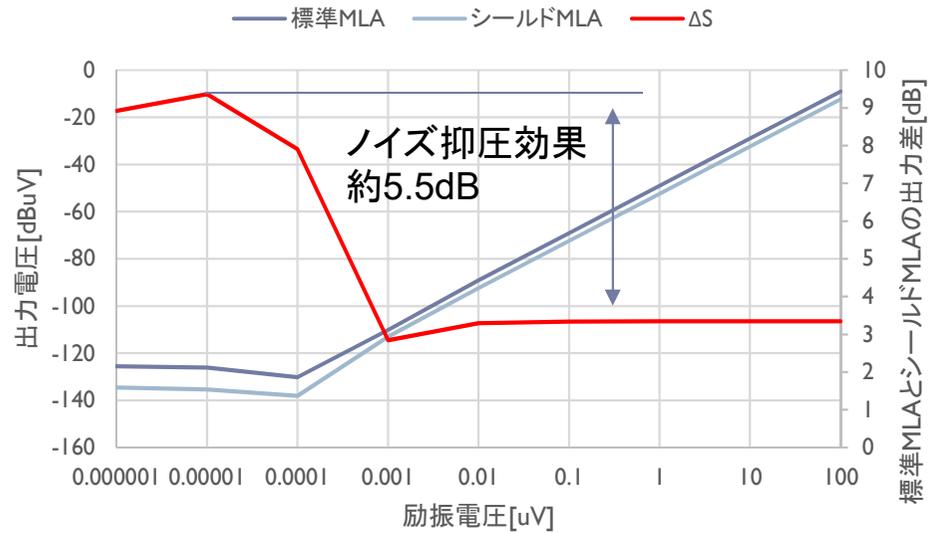
MODE 1



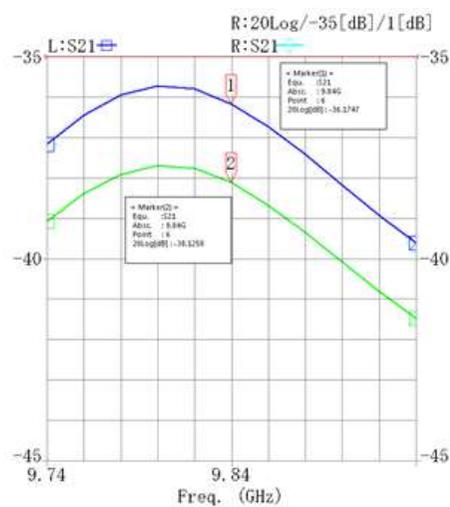
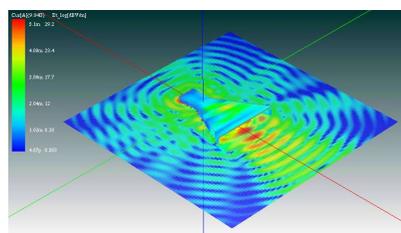
アンテナのノイズ特性の解析



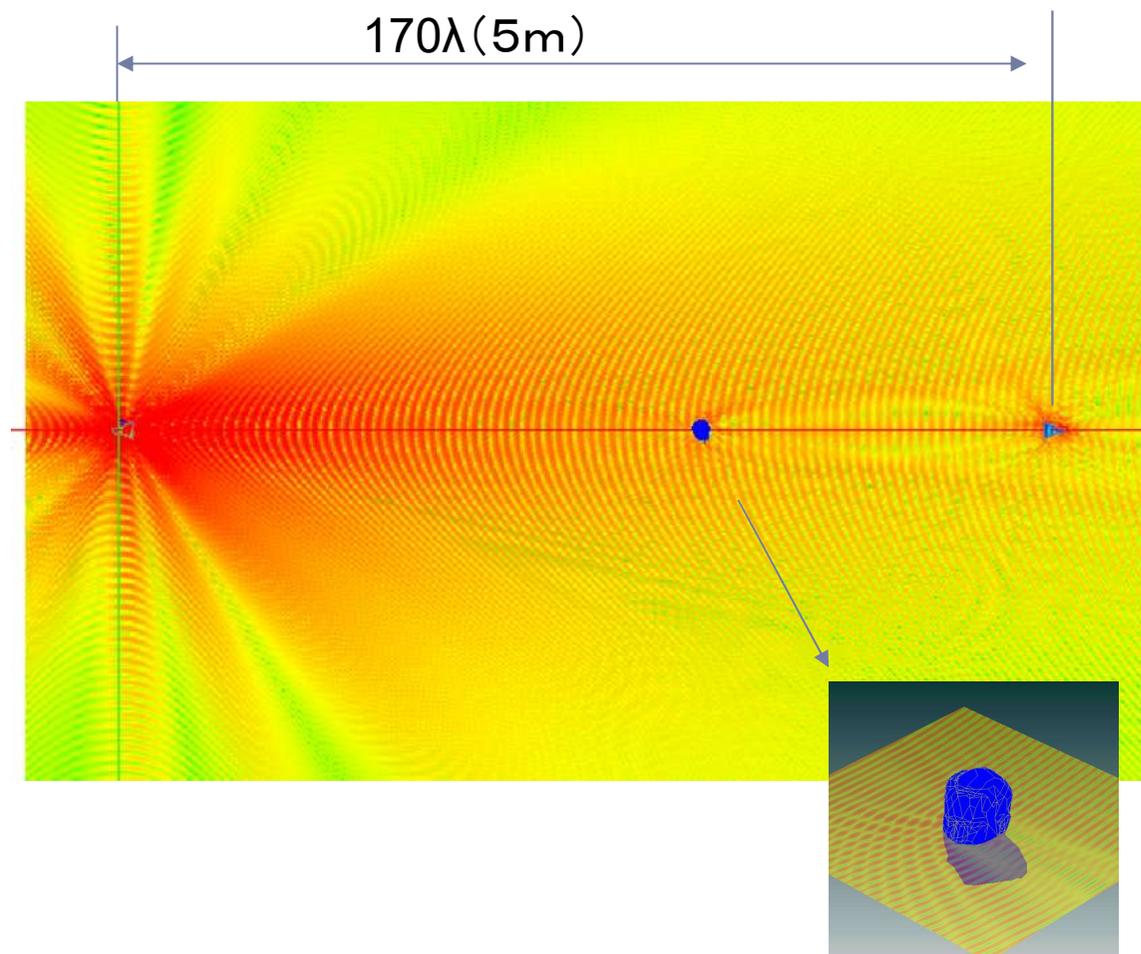
シールド開口部



ホーンアンテナ間に人体頭部が置かれた場合の伝搬特性 (10GHz)

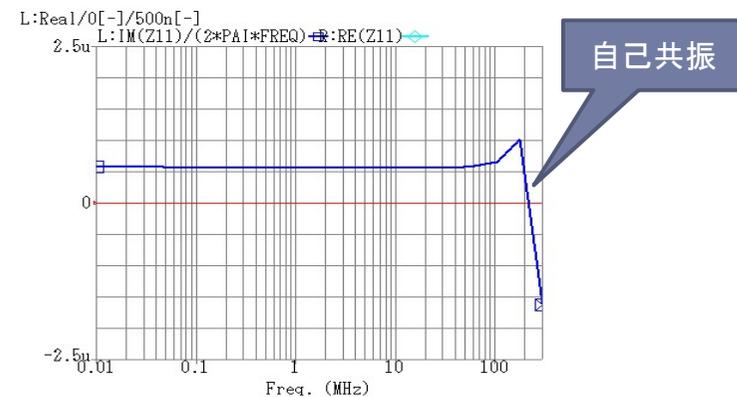
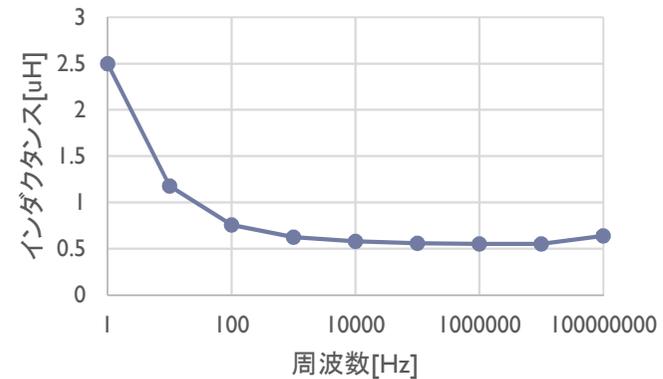
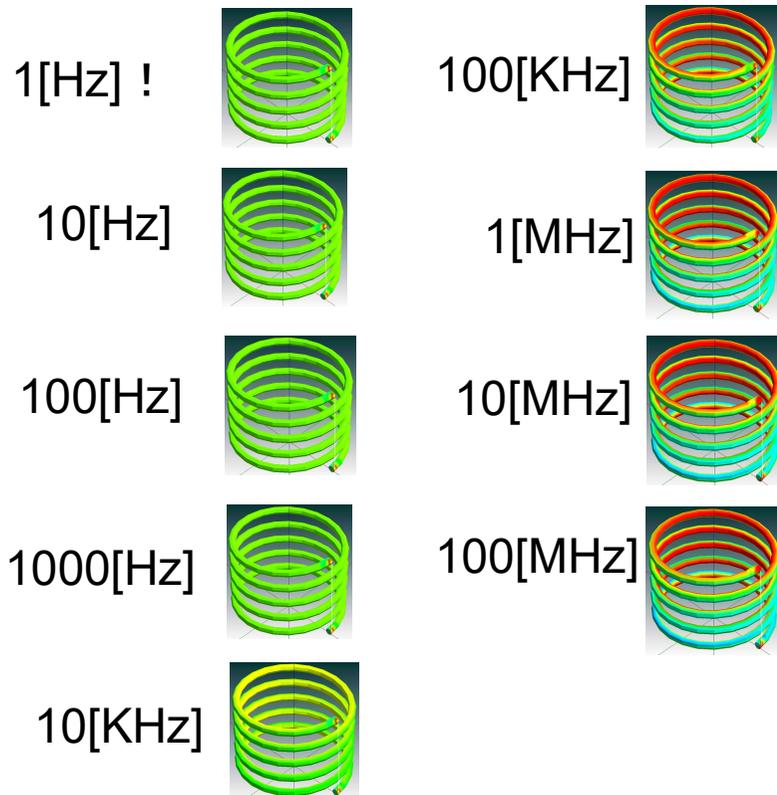


Obstacle有り無し of S21

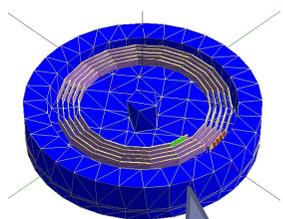


特長 2 : 低周波領域の解析

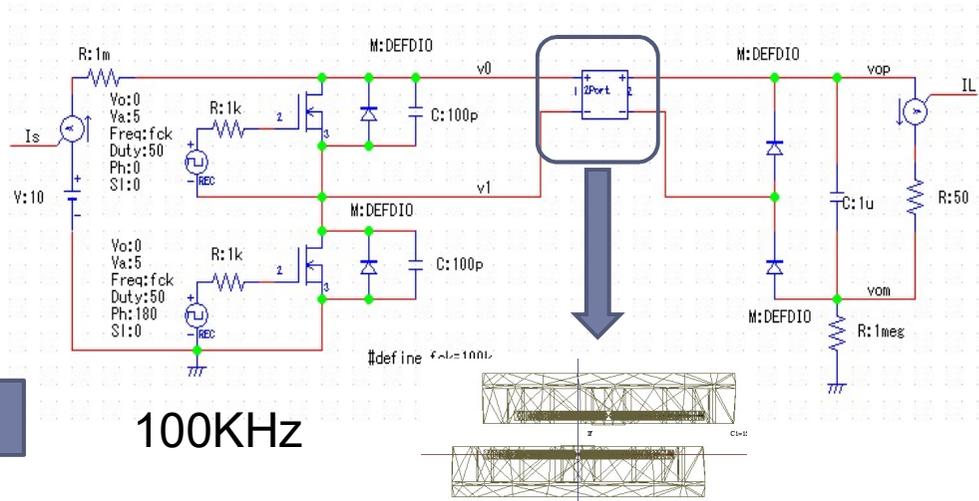
MPIE法は、1次変数に電流密度と電荷密度を用いることで、非常に低い周波数から安定して解析が可能にしています。以下は極端な例ですが、1Hz~100MHzまでの解析例です。



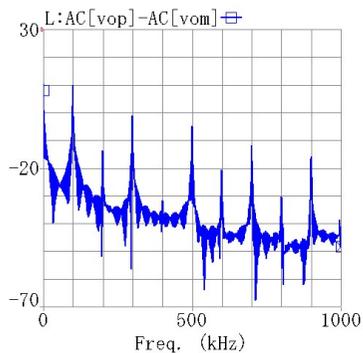
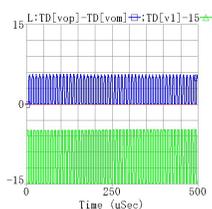
電磁誘導方式の電力伝送解析 (100KHz)



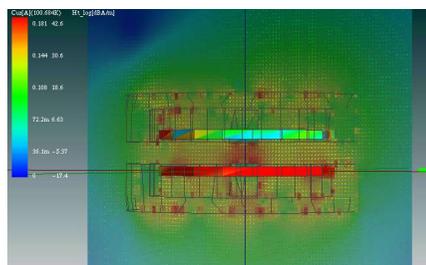
フェライト



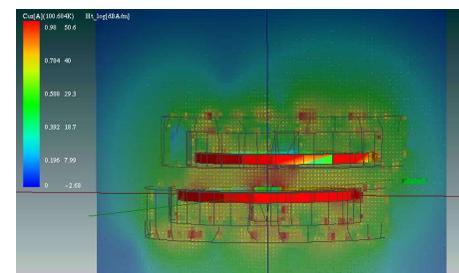
100KHz



出力スペクトル

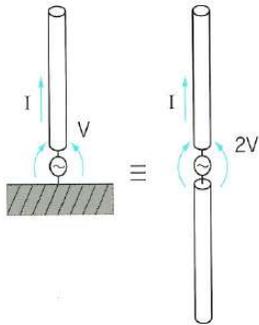


オフセット無し

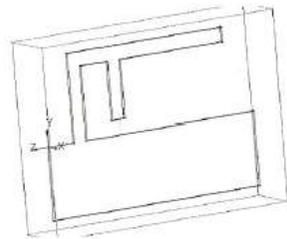


オフセットあり

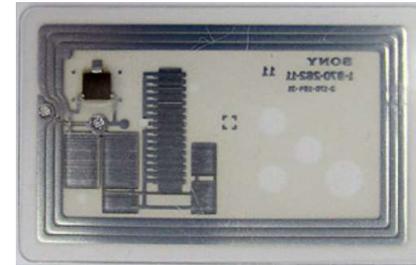
アンテナの種類



モノポール, ダイポール



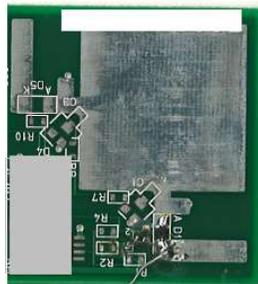
逆Fアンテナ



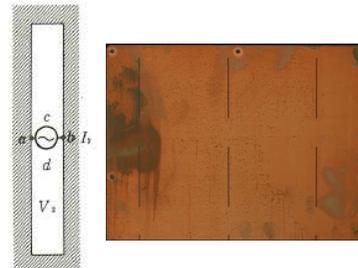
13.56MHz



50MHz



2.45GHzパッチ
アンテナ



(1) スロットアンテナ

2.45GHzスロツ
トアンテナ

電界型アンテナ



315MHz

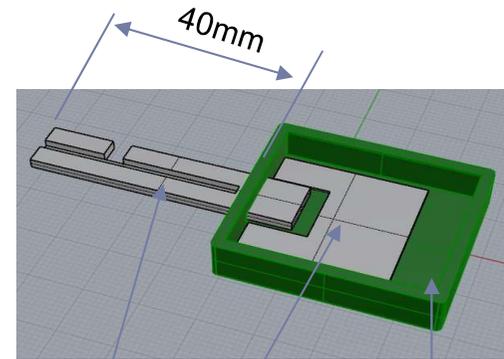
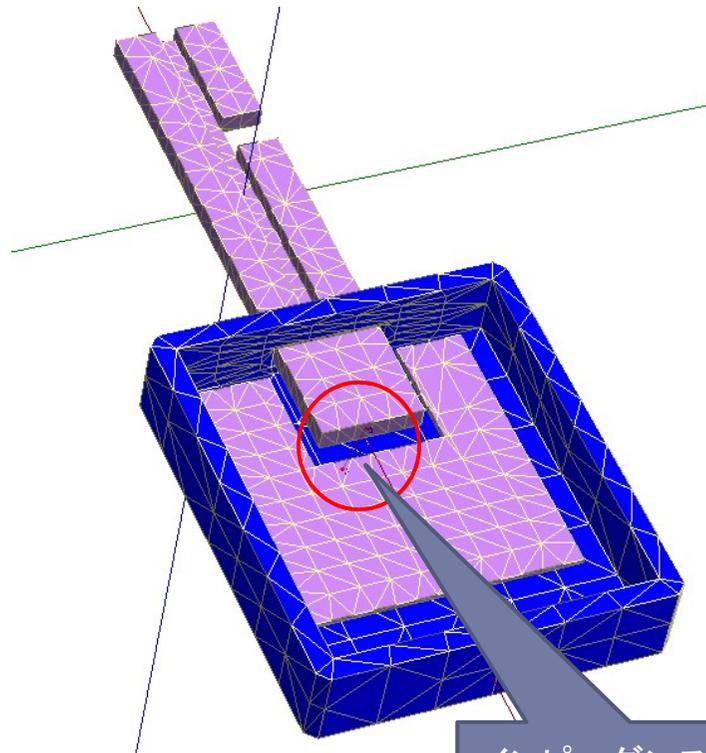


435MHz

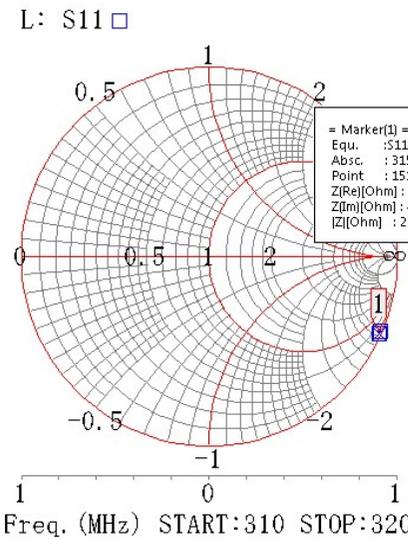
磁界型アンテナ

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



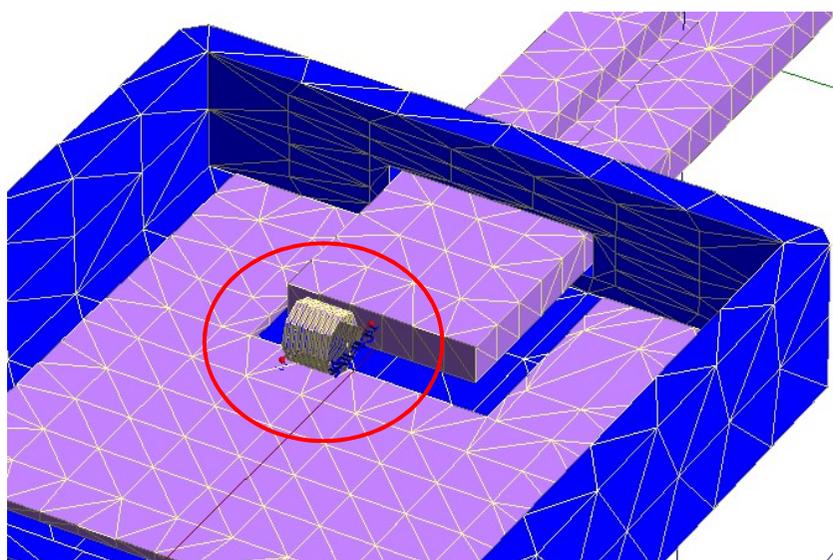
アンテナ グランド板 樹脂ケース



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

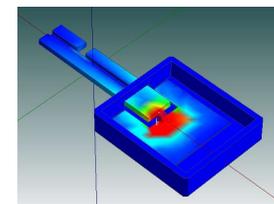
インピーダンスを調べる

ローディングコイルを付ける

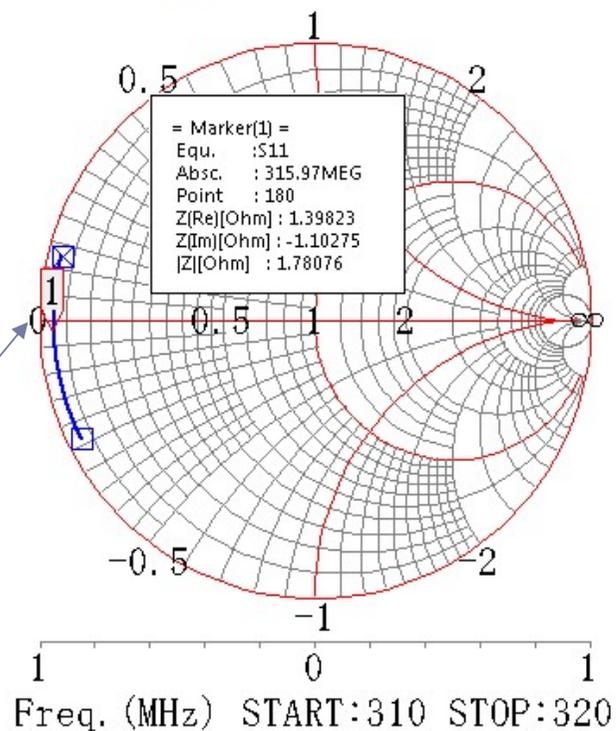


※ケースの影響を受けやすい

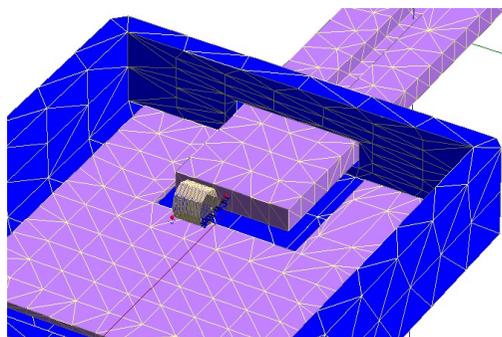
$\Phi=3\text{mm}$ $N=9\text{T}$ 程度で
虚数部は消える



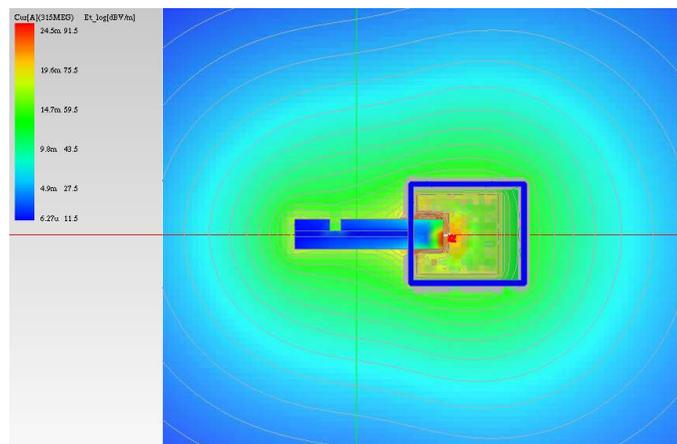
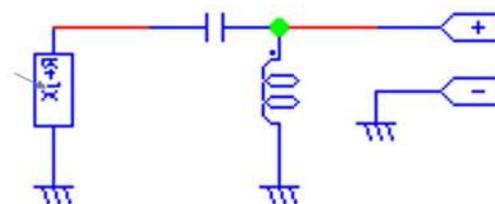
L: S11 □



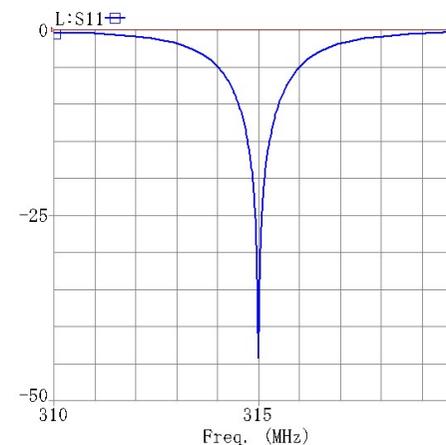
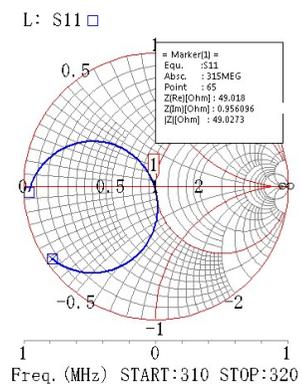
整合回路を付ける



+

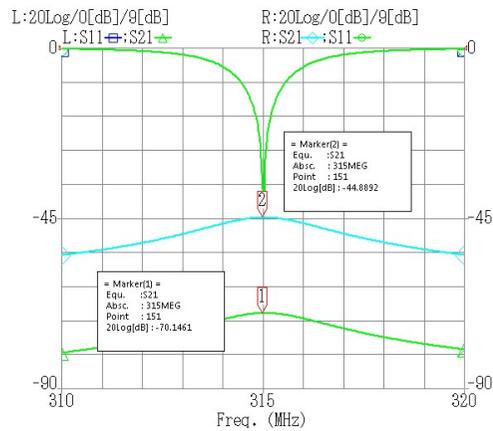
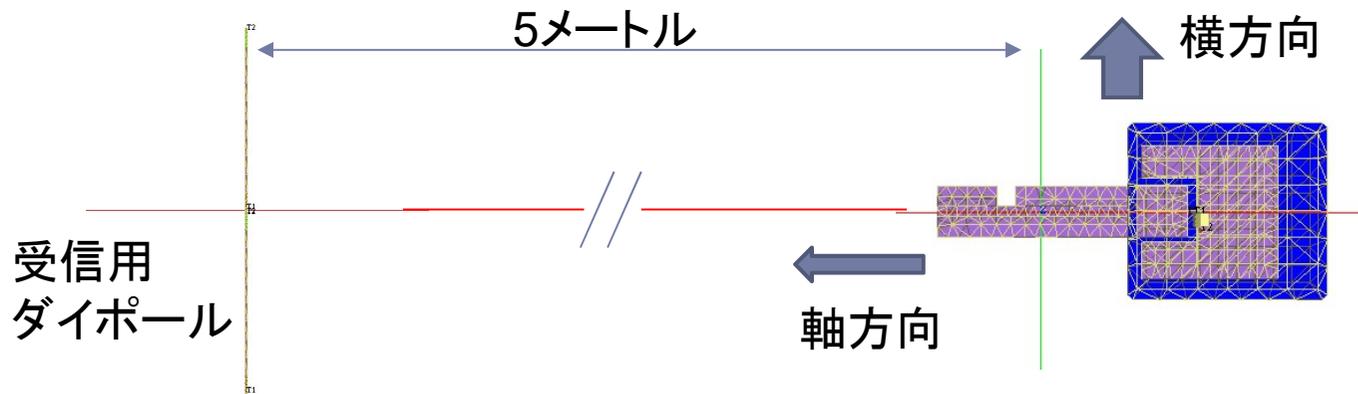


近傍電界

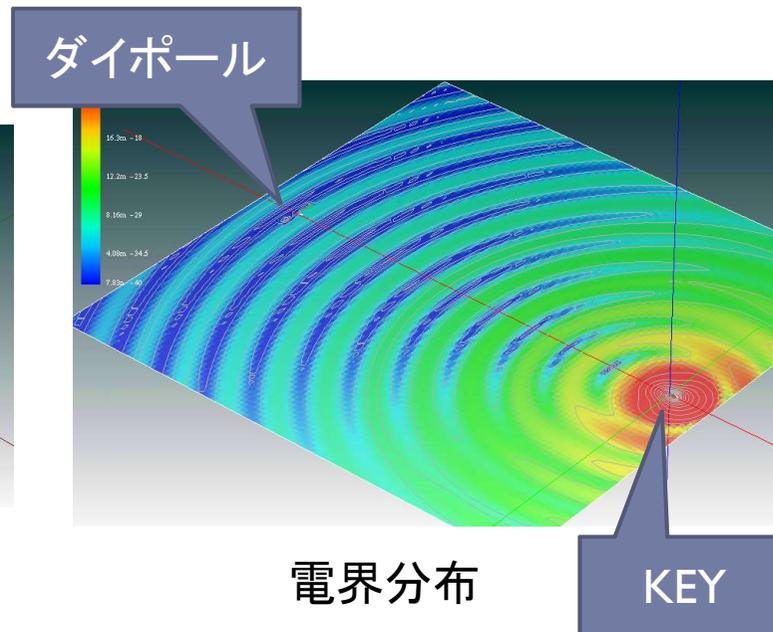
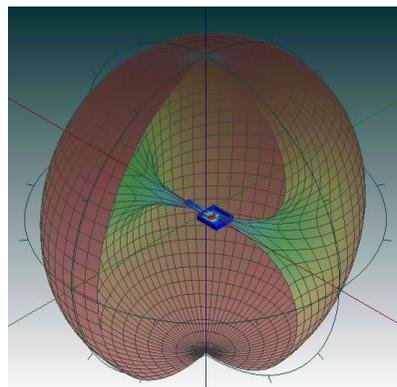


315MHzで整合の取れたアンテナができる

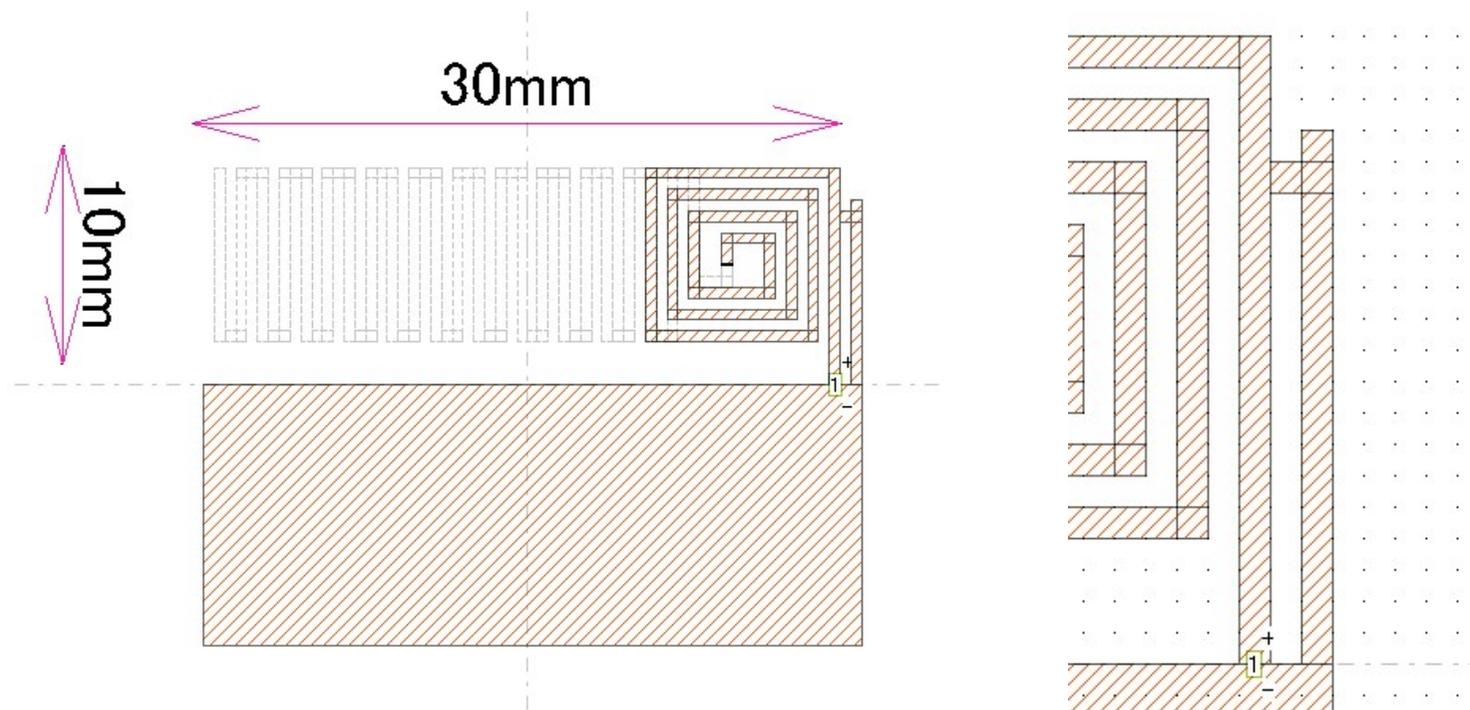
到達距離を調べる



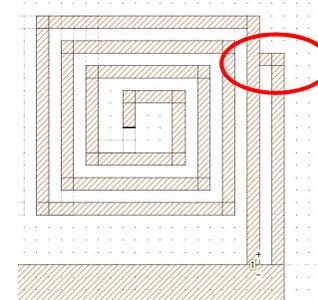
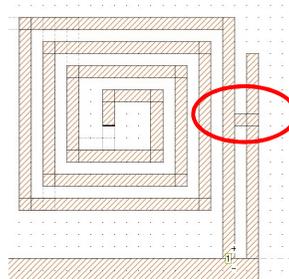
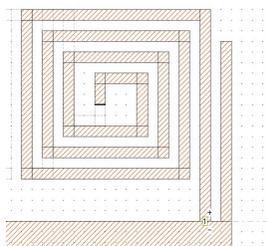
S21=-70dB 軸方向
S21=-45dB 横方向



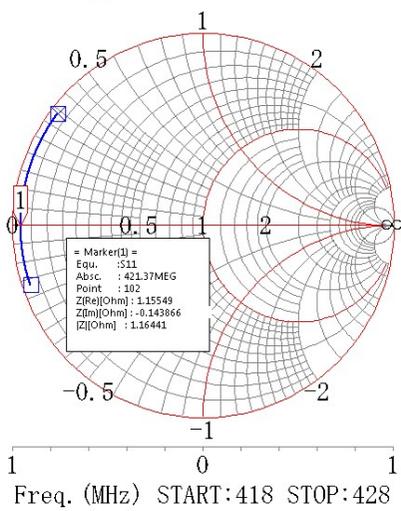
UHF帯 (425MHz) プリントアンテナ



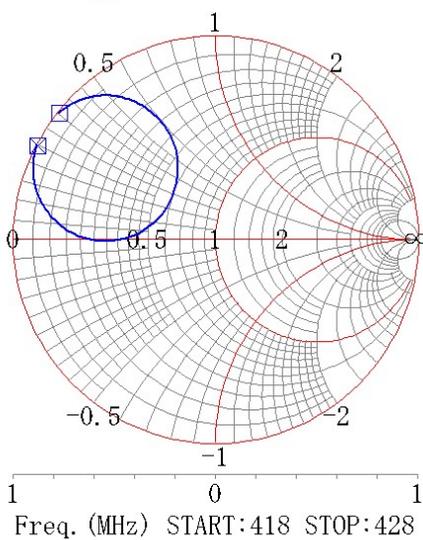
プリントアンテナの整合設計



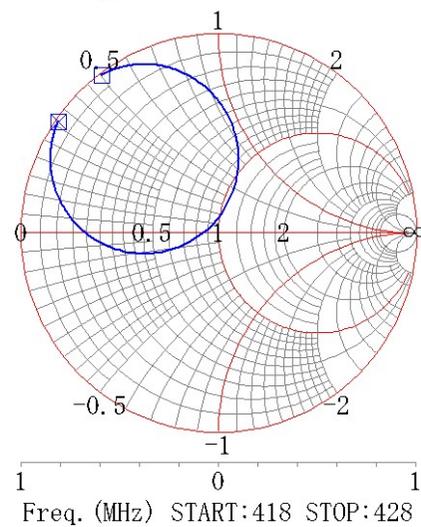
L: S11 □



L: S11 □



L: S11 □

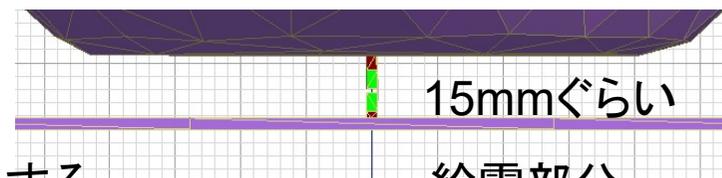
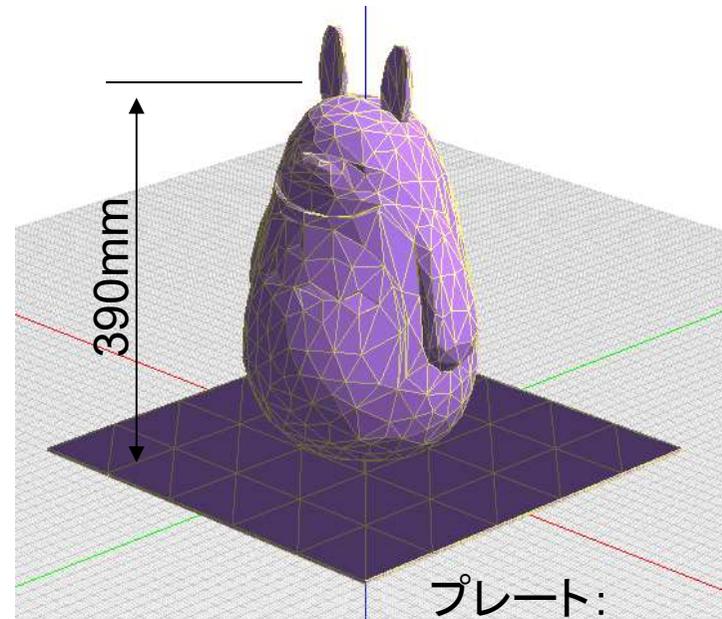


ショートバーなし

任意形状をアンテナにする

トトロを50MHzのアンテナにできるか？

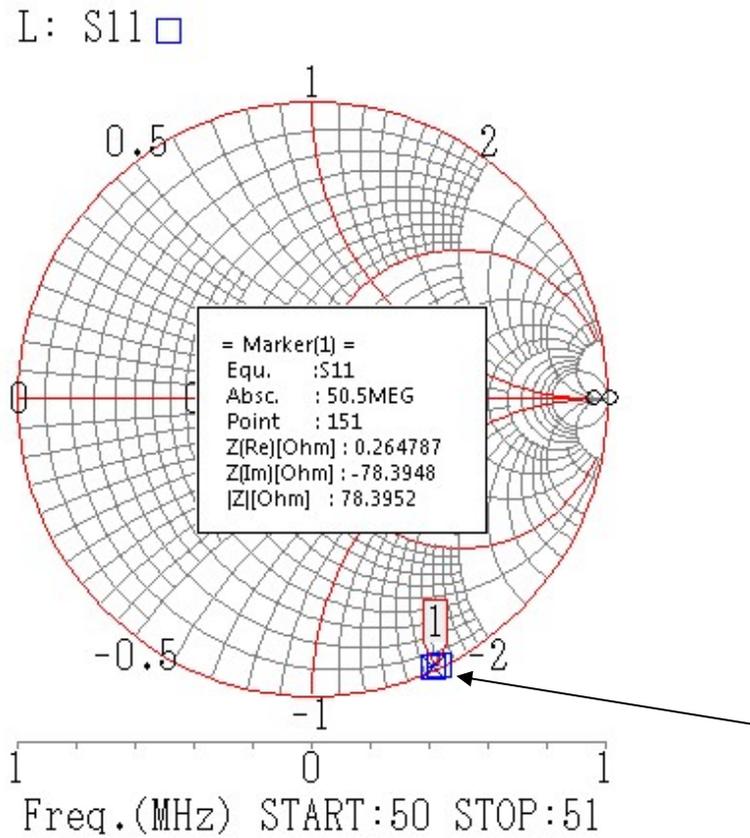
Property	Value
単位設定	
オプション設定	
境界設定	
材料/媒質	
変数	
グループ	
図形	
STL トトロ	トトロ, Enable, 1, 0.01, ¥192.168.3.215¥mel_...
Name	トトロ
GROUP :グループ(グループ番号)	
ENABLE	Enable
Ma :材料番号(整数(1))	1
Og :外側GEOM名	
Scale :倍率(実数)	0.01
File	¥192.168.3.215¥mel_document¥データ¥STLファ...
Ascii :アスキー(1:Ascii形式ファイル)	0
Rx :X軸回転角(度)	0
Ry :Y軸回転角(度)	0
Rz :Z軸回転角(度)	0
X0 :X軸オフセット(実数)	0
Y0 :Y軸オフセット(実数)	-107
Z0 :Z軸オフセット(実数)	20
FTARGET :ターゲット周波数(実数)	0
THN :サーマルノイズ(0:OFF,1:ON)	0
BOX plate	plate, Enable, 1, 500, 5, 500, 5, 3, 1, 0, 0, 0, ...
RBAR tapG	tapG, Enable, 1, 3, 3, 1, 3, 3, 1, 10, 2, 1, (0.5)...
RBAR tapP	tapP, Enable, 1, 3, 3, 1, 3, 3, 1, 10, 2, 1, (0.5)...



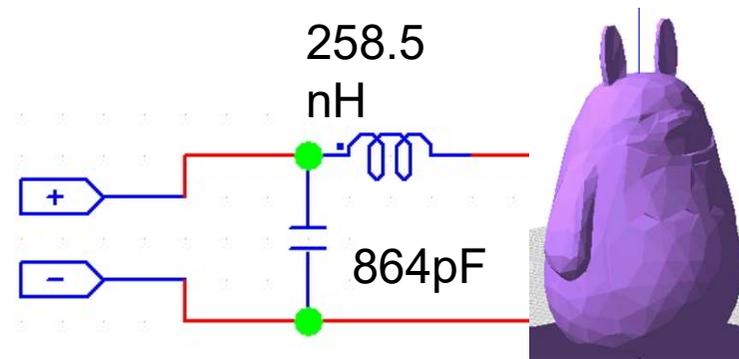
「トトロ」は3DCADのSTLファイルを使用する

※STLファイルは3Dプリンタでよく用いられるファイル

50.5MHzでのインピーダンスを調べ、 整合回路を設計する

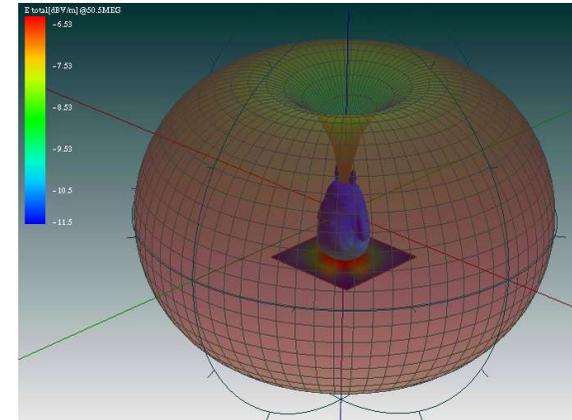
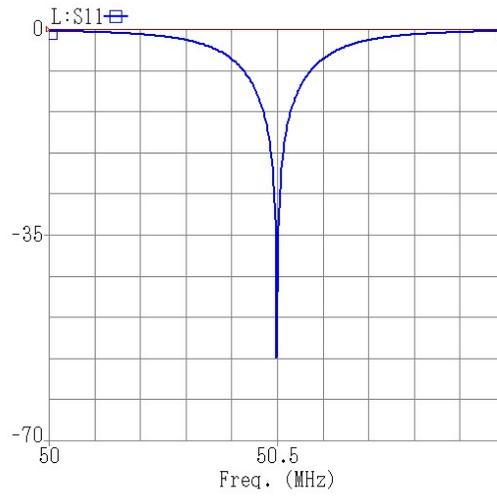
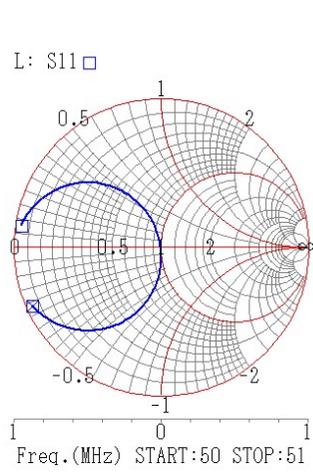


整合回路を設計

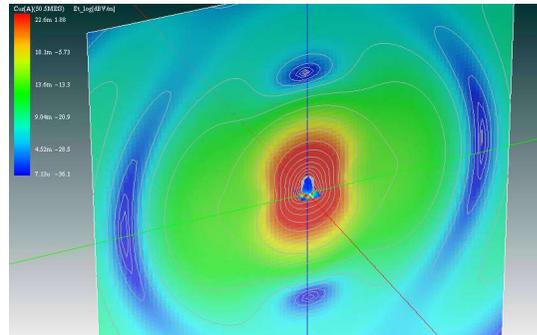
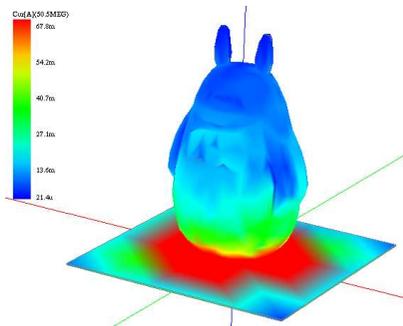


50MHzでのインピーダンス
は、 $Z=0.267-j78.4[\Omega]$

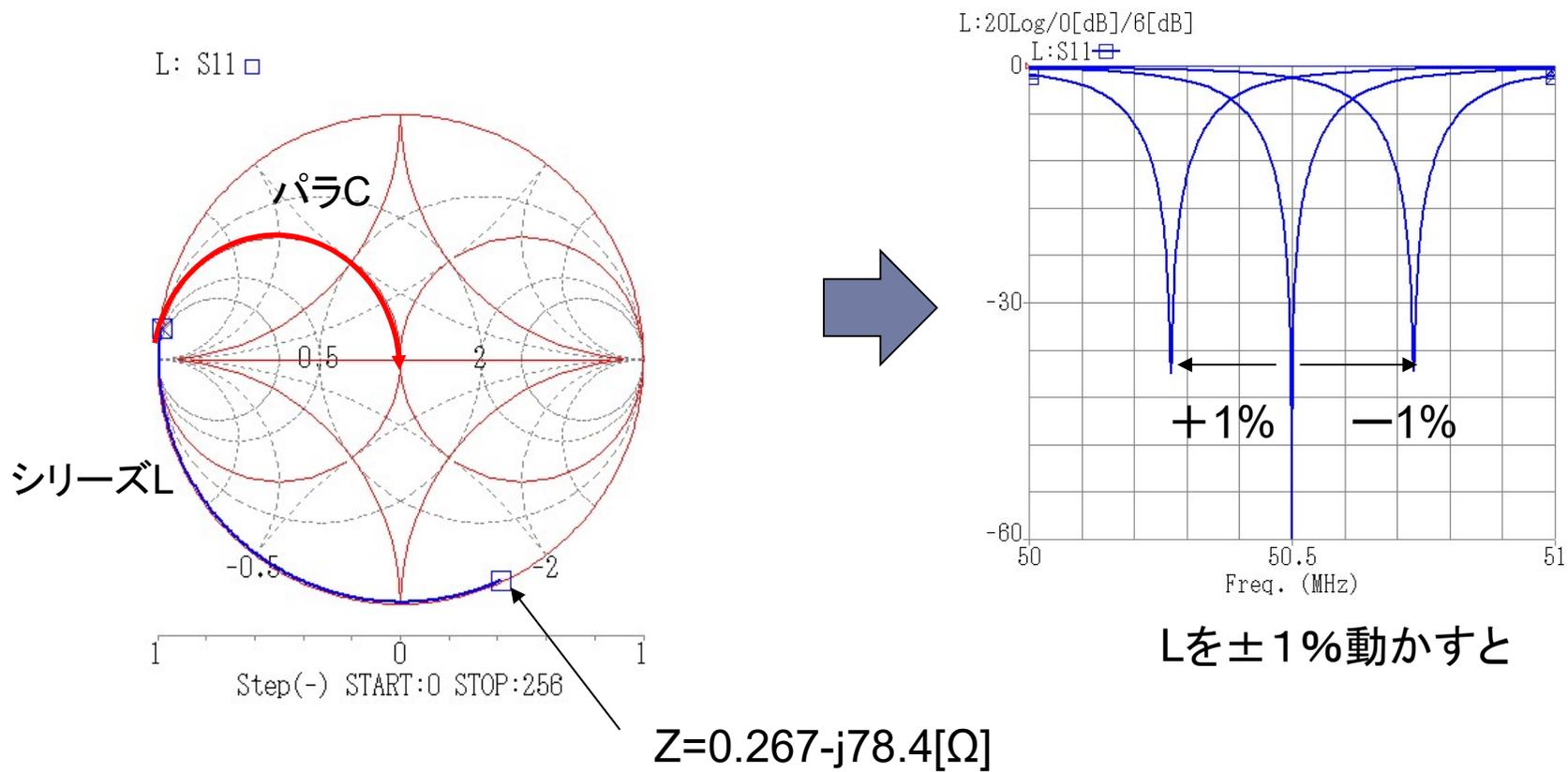
トロアンテナの特性



VSWR=1.00318

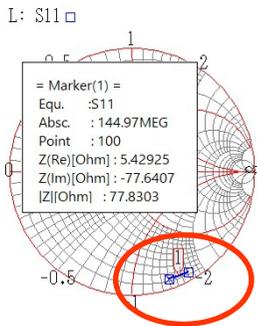
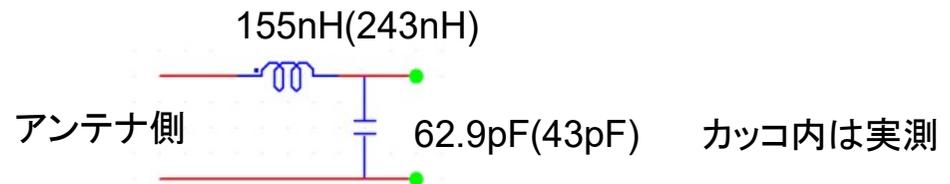


だけど、インピーダンスをよく見ると・・・

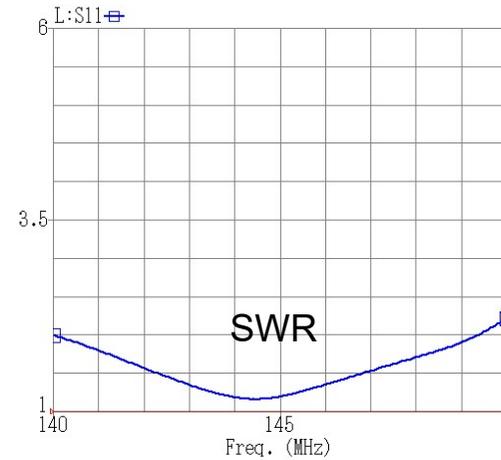
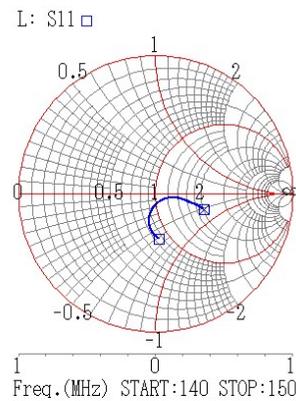


カンカンアンテナ実験(145MHz)

昨年の忘年会の景品の部品缶詰
Φ68mm H=80mm ぐらい



$Z_{in} = 5.43 - j128$ [ohm]
※cal $-j51.7$



SWR= 1.15@144.48MHz

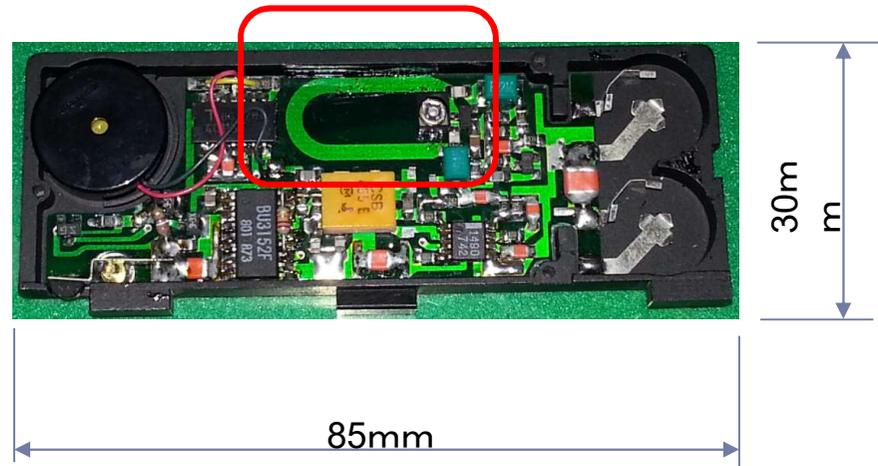
磁界型小型アンテナ



50MHz



435MHz



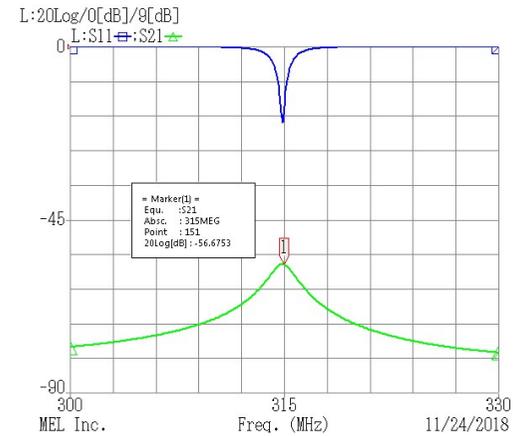
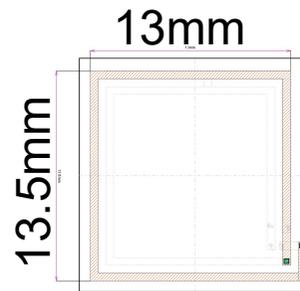
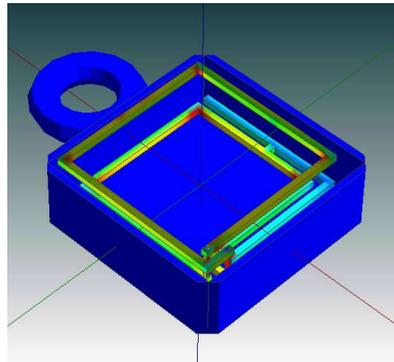
盗難防止タグ用受信器
315MHz
1988年

ループ長 $<\lambda/10$

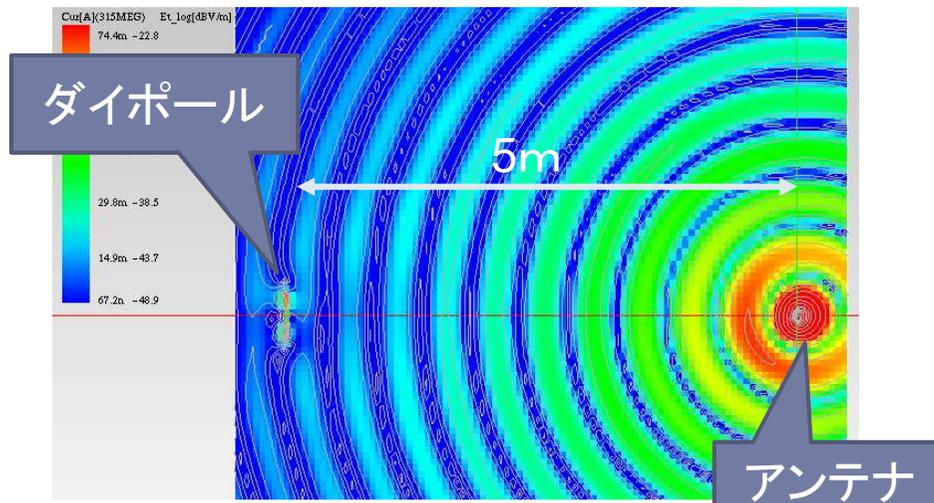


磁界型アンテナ例 (315MHz MLA)

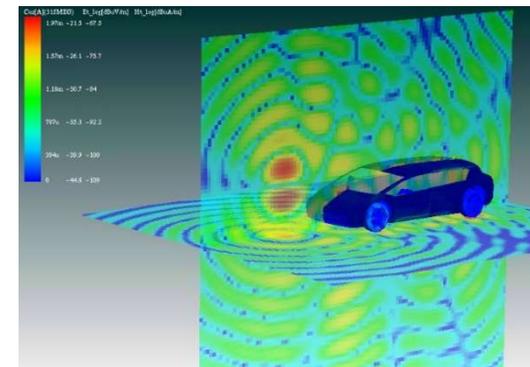
約15mm口の樹脂ケースに入った315MHzのワイヤレスキーのアンテナ設計例



S21=-56.6dB @315MHz

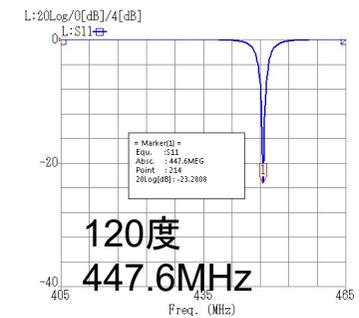
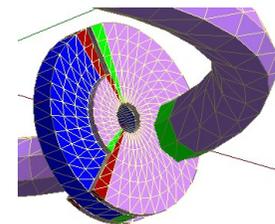
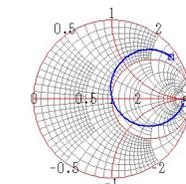
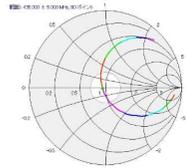
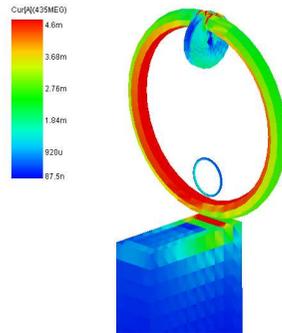
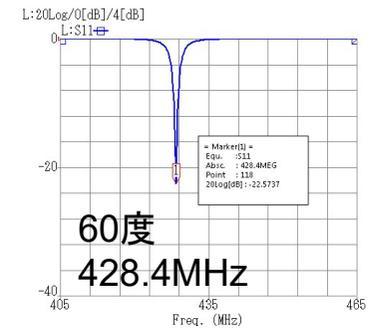
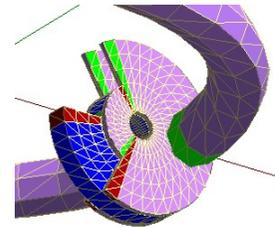
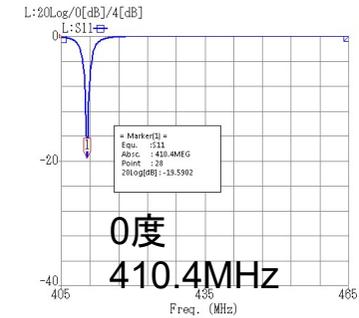
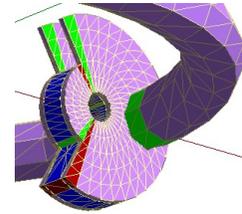
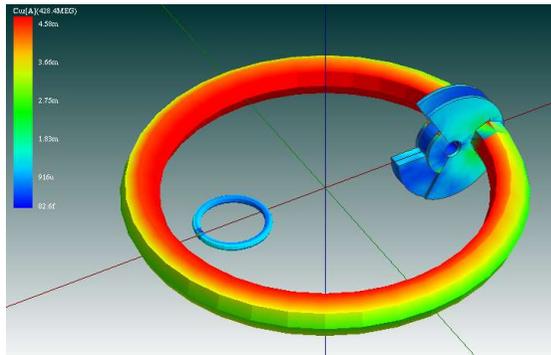


電界分布



磁界型アンテナ例 (435MHz MLA)

直径 50mm ($\lambda/5$)
誘電体 $\epsilon_r=2.2$ $t=2\text{mm}$



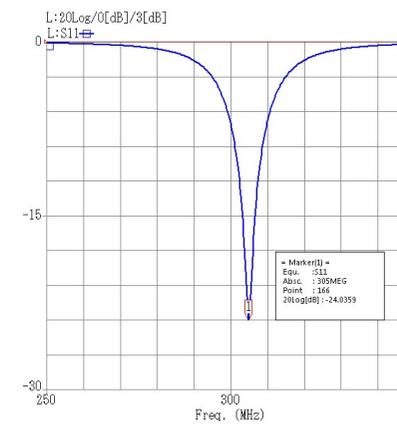
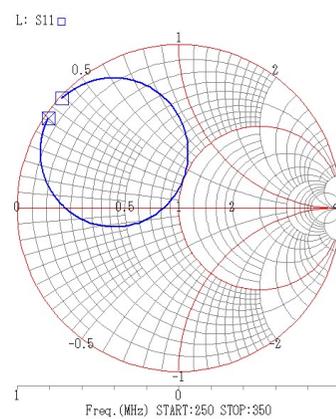
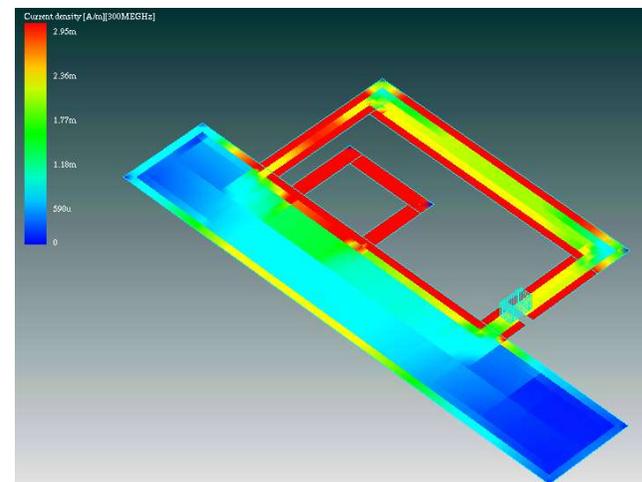
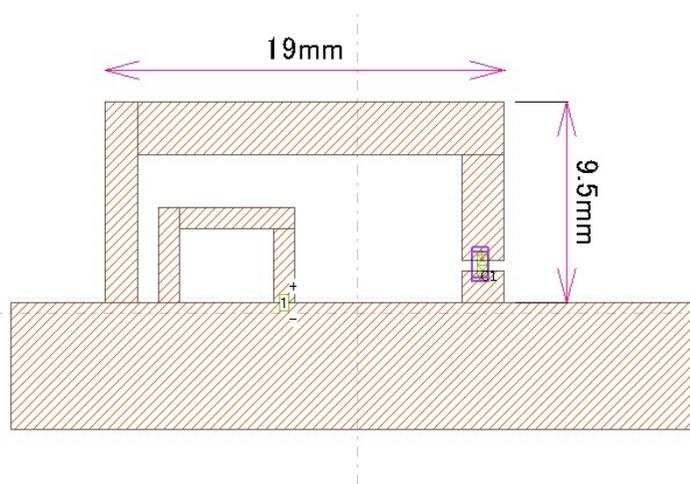
電流密度分布

実測(上)とシミュレーション(下)

※435MHz MLA JR10AO 中島氏製作

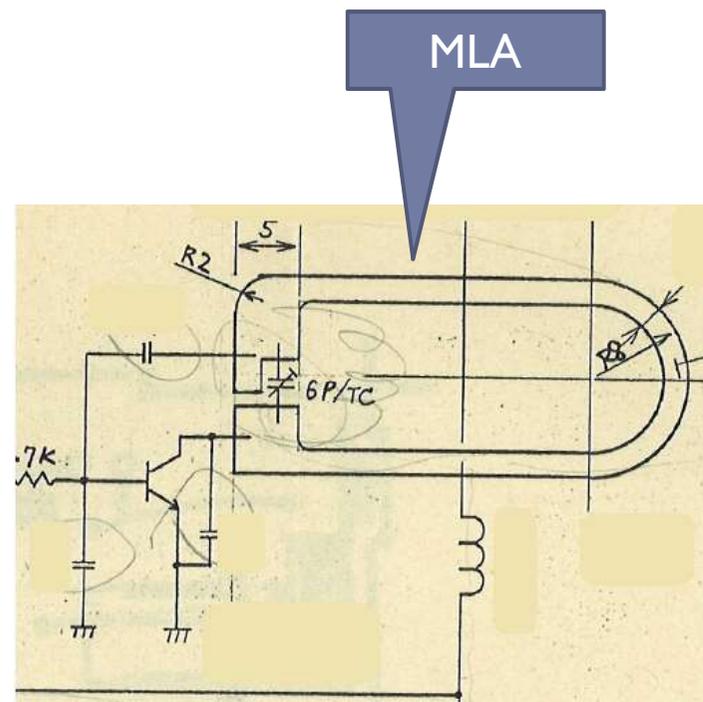
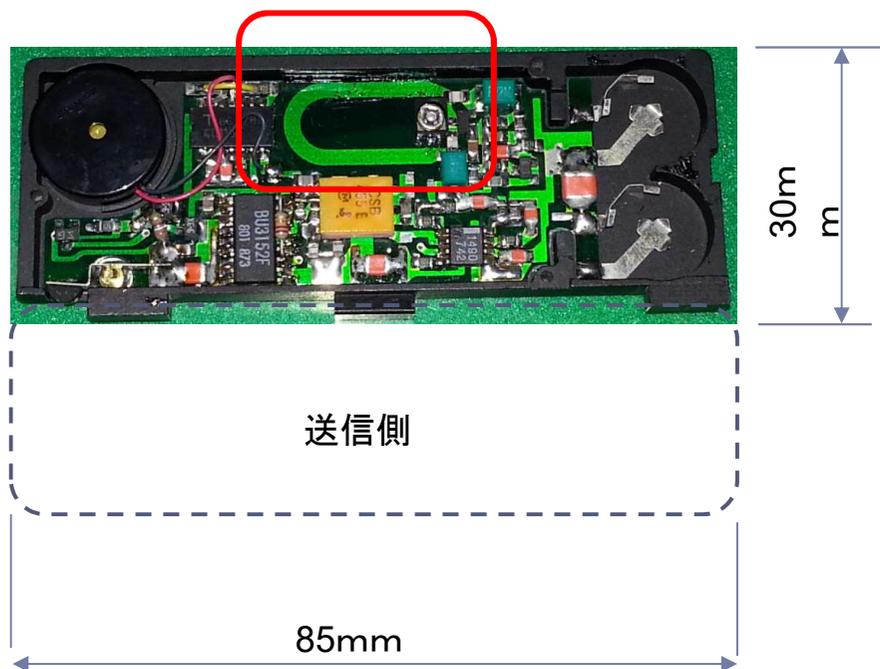
磁界型アンテナ例 (305MHz)

プリント基板上に作成



小型機器への適用例

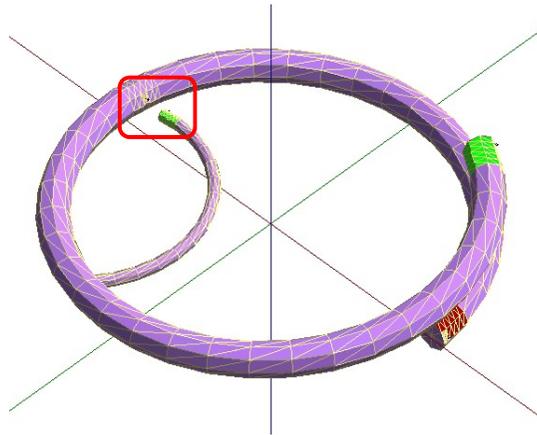
盗難防止タグ用受信器
315MHz
1988年



発振回路(送信側)

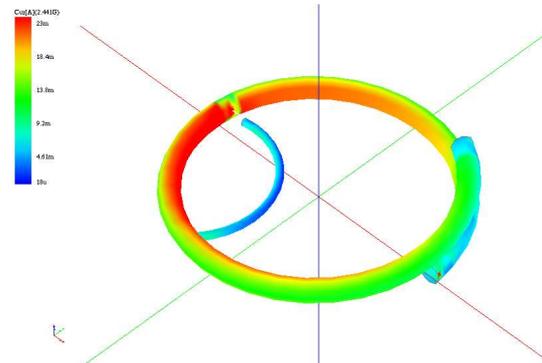
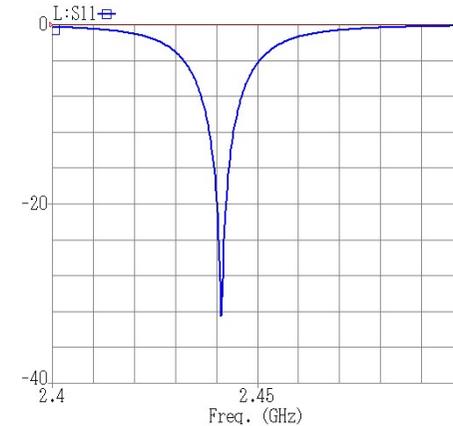
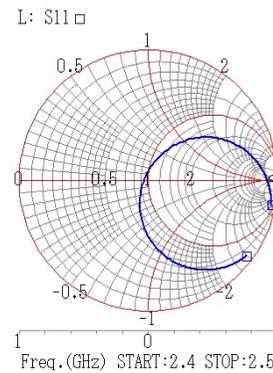
磁界型アンテナ例 (2.45GHz MLA)

ガンママッチによる励振例



$D=10\text{mm}$ $\phi=0.8\text{mm}$
巻き数: 1.17T

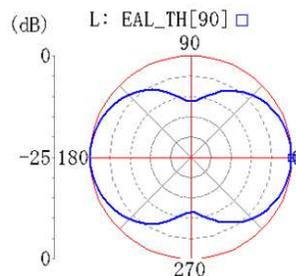
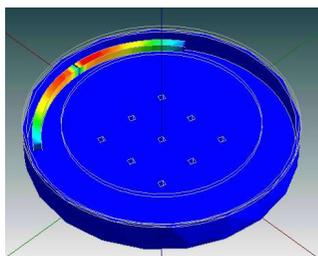
共振容量は0.17pF程度になる
ので、部分的に重ねて自己共振を用いる方がよい



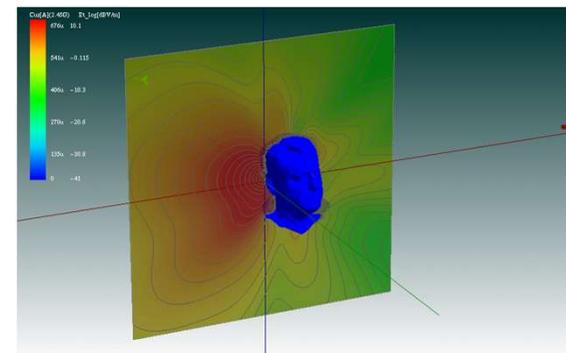
Active port imp.=50
VSWR=1
Direction : $\theta=90$, $\phi=35$
 $S_r=0.000481201[\text{W}]$
 $G_d=1.7503[\text{dBi}]$
 $G_a=0.825668[\text{dBi}]$
Efficiency=80.8233[%]

人体の影響を解析

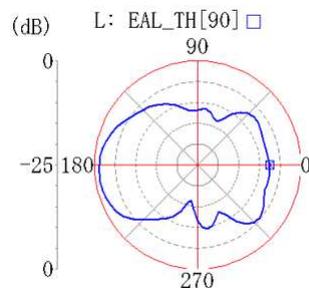
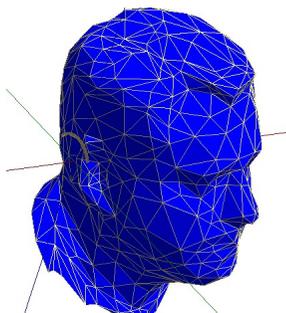
人体の影響を考慮した2.4GHzヘッドホン特性の解析



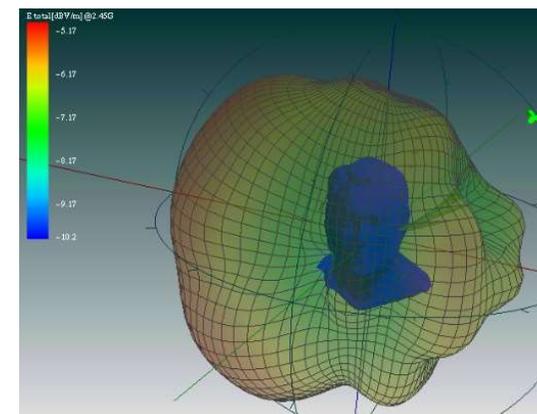
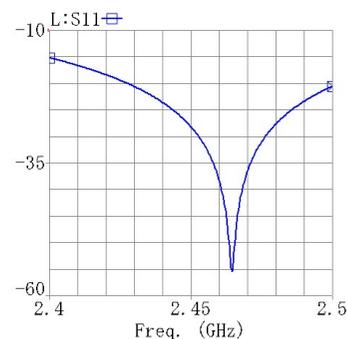
単体の指向性



近傍電界



頭部モデルを含めた指向性

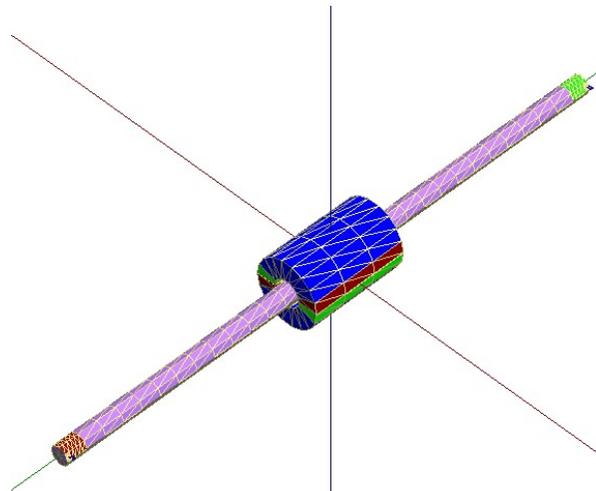


3D指向性

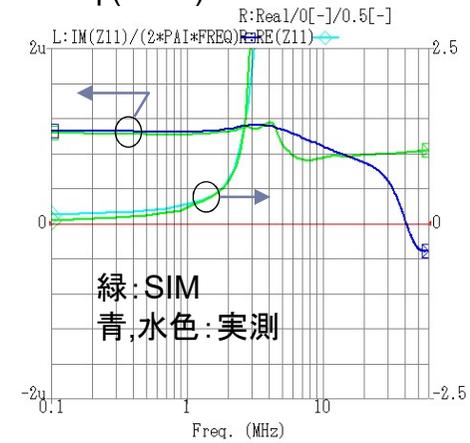
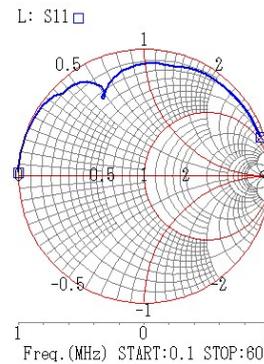
EMC問題への適用

Ur=1000, tanδ=0.4 で100KHz~4MHz帯域でほぼ一致
 解析時間: 20秒/freq, 555秒/301freq (AWE)

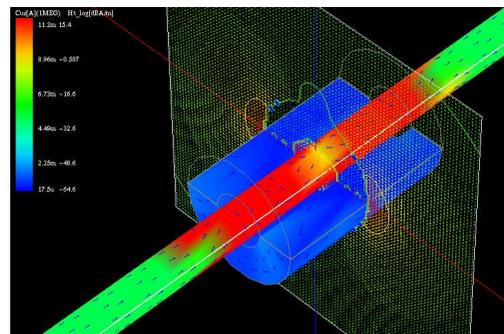
上下のフェライト間隔=0.1mm



材料/属性	
NO=1 Metal	CU, 0.1, False
NO=2 Magnetic	1000, 0.4, 0, *CSV, False
Ur	1000
Td	0.4
Sig	0
File	*CSV
Use file	False

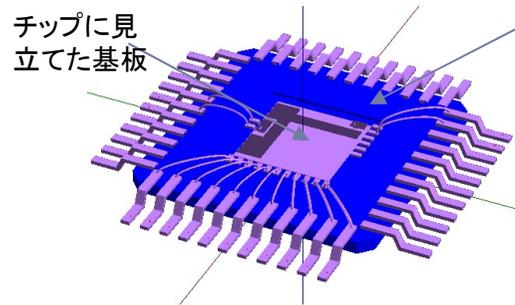


インダクタンスと抵抗

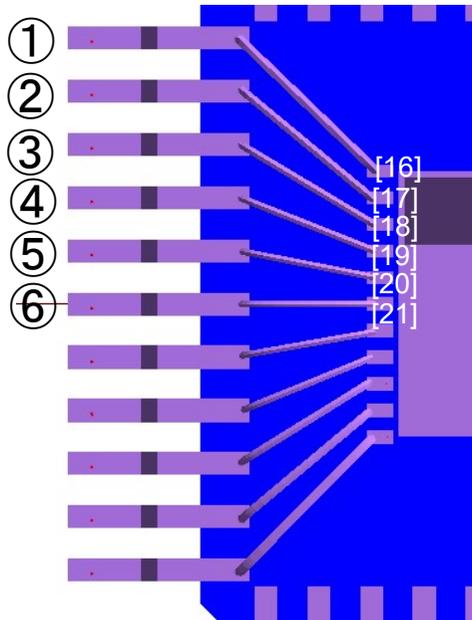
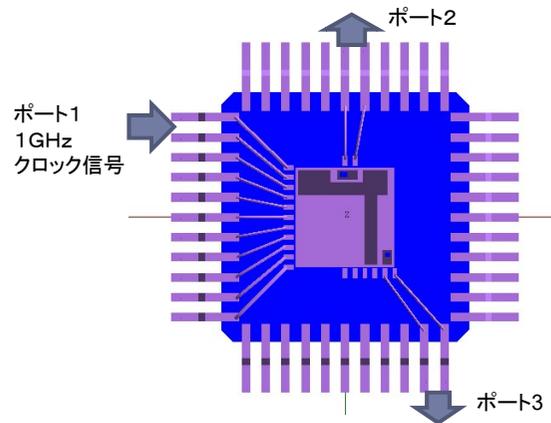


近傍磁界と電流
 コア表面は仮想電流
 @1MHz

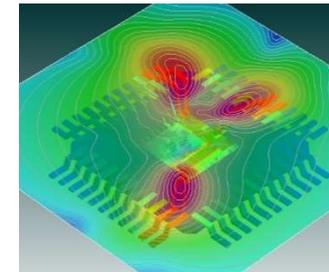
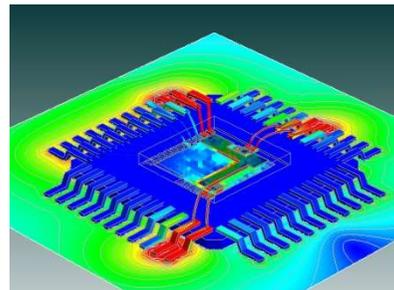
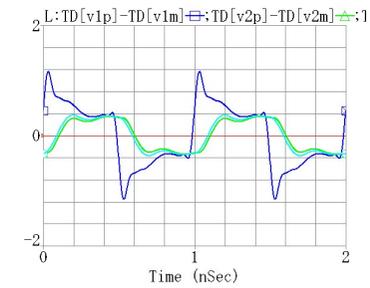
ICパッケージの特性解析



パッケージ ($\epsilon_r=10$)

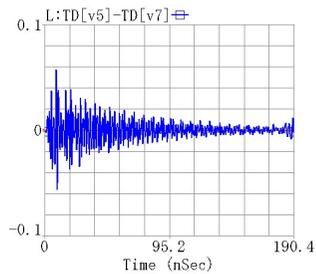
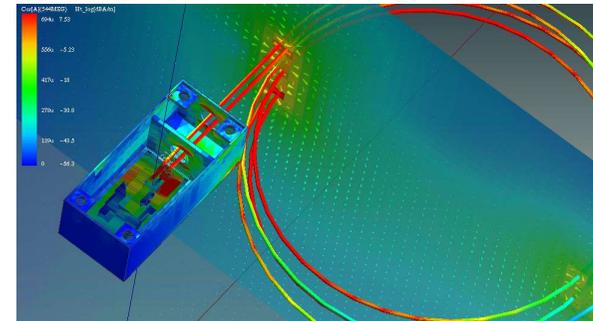
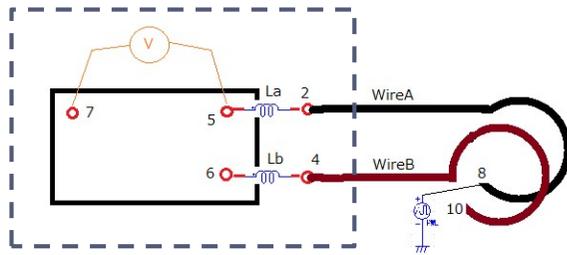
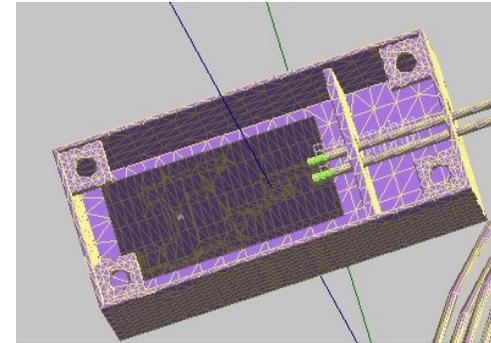
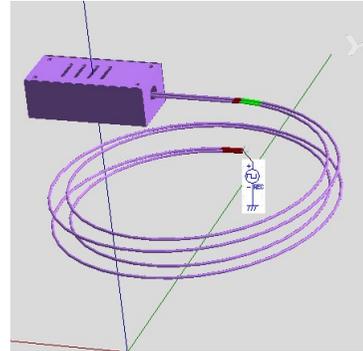


端子	インダクタンス[nH]
①-[16]	3.95
②-[17]	3.76
③-[18]	3.59
④-[19]	3.42
⑤-[20]	3.36
⑥-[21]	3.35

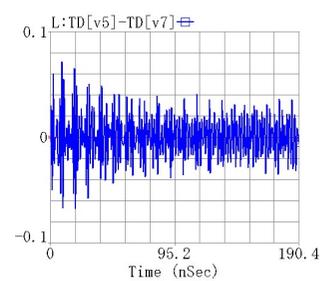


静電ノイズ経路の解析例 (筐体+プリント板+ケーブル)

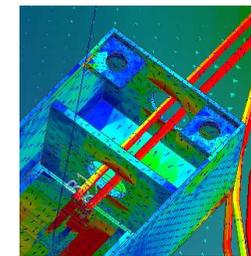
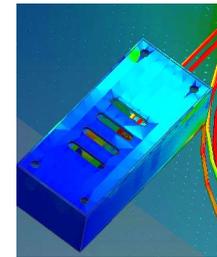
プリント板が内蔵されたケースから約30cmのケーブルが丸められて出ている場合に、ケーブルの先端とグランドの間に静電ノイズを印加した場合の内部のプリント基板上のノイズレベルなどを解析しています。
静電ノイズは8番とFG間に印加され、それが基板内でどれだけのノイズ電圧として現れるかをみています。Lbが大きい場合には基板内のノイズ電圧が大きくなっていることがわかります。



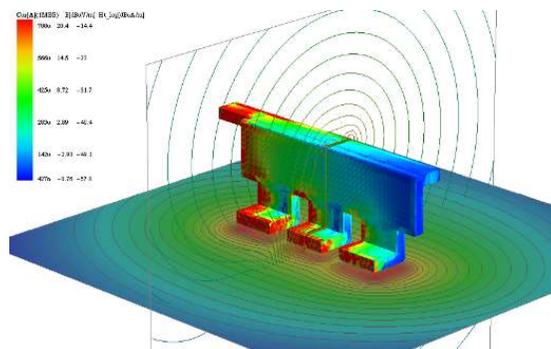
La=Lb=1nH



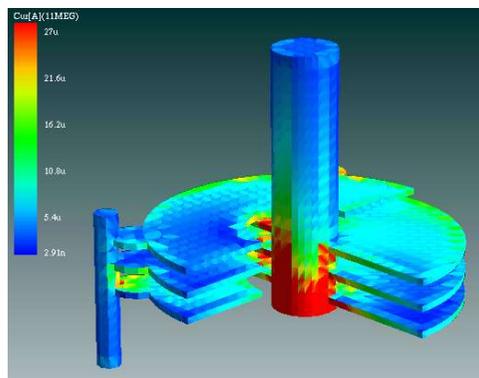
La=1nH Lb=10nH



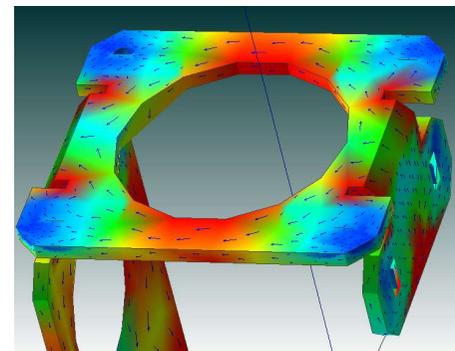
色々な電気部品の解析例



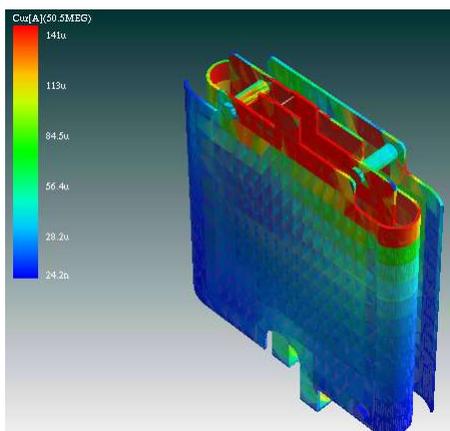
大電流端子



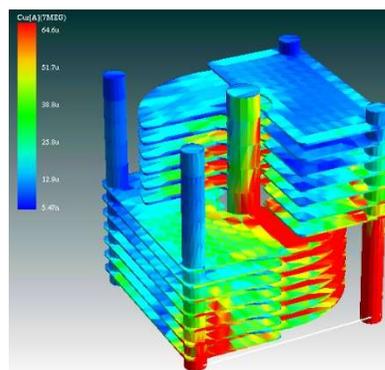
バリコン



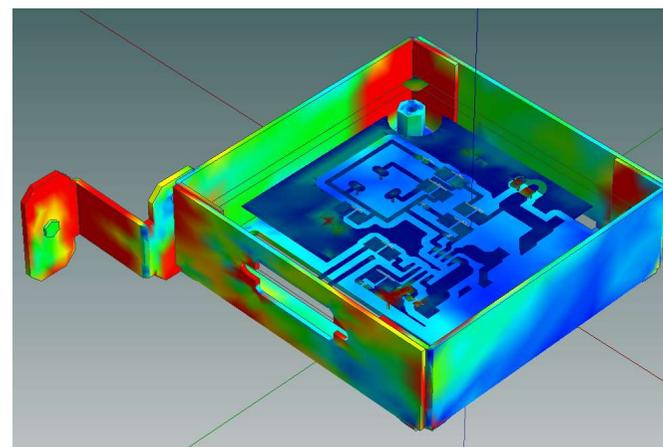
筐体



固定コンデンサ



スプリットステータ
バリコン



筐体+プリント基板

まとめ

- ▶ 電磁界解析手法の概要を紹介。
- ▶ 特長1:遠方間の特性解析を紹介。
- ▶ 特長2:超低周波からの解析。
- ▶ 電界型小型アンテナの紹介
- ▶ 磁界型小型アンテナの紹介
- ▶ EMC問題への適用の紹介