

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

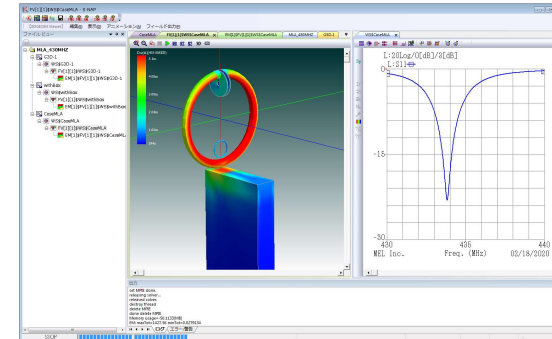
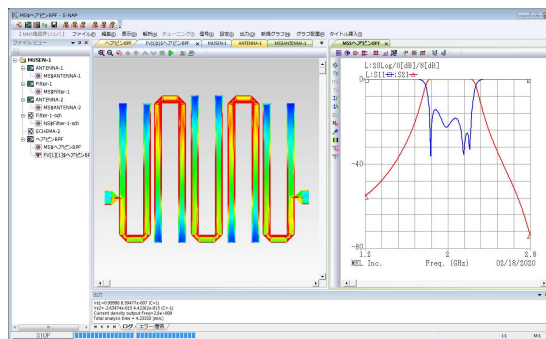
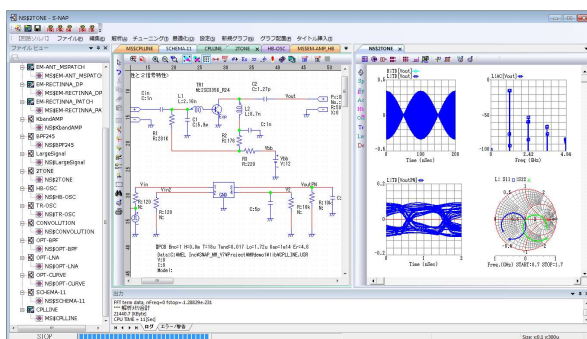
2022年11月 MWE2022  
株式会社 エム・イー・エル



[http://melinc.co.jp/seminar/SNAP\\_WIRELESS\\_seminar202211.pdf](http://melinc.co.jp/seminar/SNAP_WIRELESS_seminar202211.pdf)

# MEL社のシミュレータ

- マイクロ波用回路・電磁界シミュレータ(1991~)  
S-NAP Wireless/Microwave Suite  
回路シミュレータ, 回路設計ツール,  
多層基板電磁界シミュレータ  
3次元電磁界シミュレータ  
(電磁界手法: モーメント法)
- 実装プリント板用シミュレータ  
S-NAP PCB Suite



# 積分方程式法 (モーメント法)

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega\mu\mathbf{H}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + j\omega\epsilon\mathbf{E}$$

マクスウエルの方程式



$$\nabla^2 \mathbf{E} + k^2 \mathbf{E} = j\omega\mu\mathbf{J}$$

ヘルムホルツ波動方程式



積分方程式

$$E_k(\mathbf{r}) = -j\omega A_k(\mathbf{r}) - \nabla\phi_k^e(\mathbf{r}) - \frac{1}{\epsilon_k} \nabla \times F_k(\mathbf{r})$$

ここで、

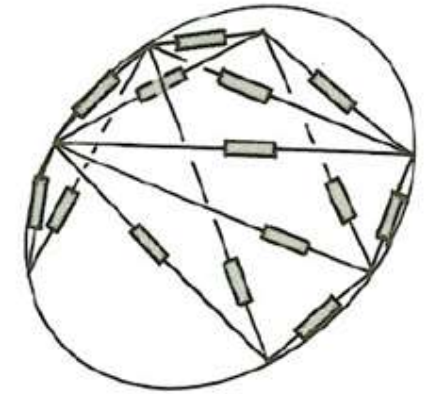
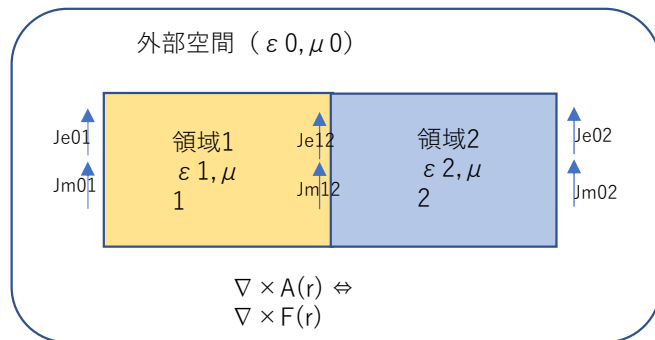
$$A_k(\mathbf{r}) = \mu_k \iint_S G_k(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \underline{J}_{e,k}(\mathbf{r}') d\mathbf{r}'$$

$$F_k(\mathbf{r}) = \epsilon_k \iint_S G_k(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \underline{J}_{m,k}(\mathbf{r}') d\mathbf{r}'$$

$$\phi_k(\mathbf{r}) = 1/\epsilon_k \iint_S G_k(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \underline{q}_{e,k}(\mathbf{r}') d\mathbf{r}'$$

k:領域番号

A, F : ベクトルポテンシャル  
 Φ : スカラポテンシャル  
 J<sub>e</sub>, J<sub>m</sub>, q<sub>e</sub>, q<sub>m</sub>が変数



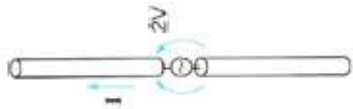
(c) 境界要素モデル

積分形の解

MPIE(Mixed Potential Integral Equation)

# 各種グリーン関数

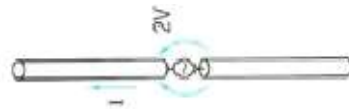
## ①自由空間



$$G(r, r') = \frac{e^{-jk|r-r'|}}{|r-r'|}$$

自由空間のグリーン関数

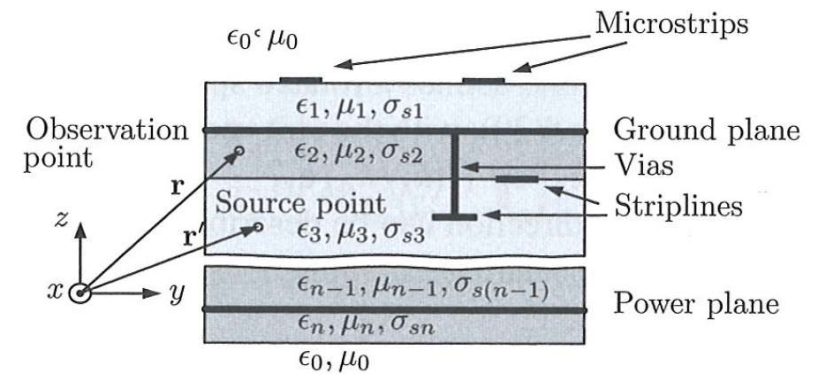
## ②半空間



Sommerfeld solution

PEC, PMC, リアル大地

## ③層構造



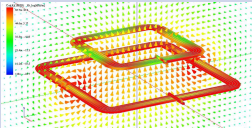
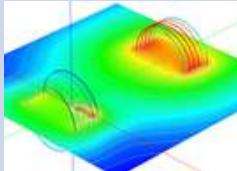
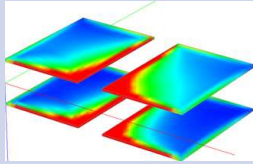
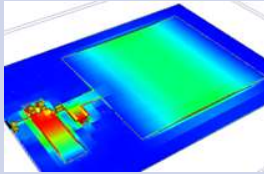
(a) Multilayer PCB in Cartesian coordinates

- ・ オープン領域MLGF
  - ・ シールド領域MLGF
- 共に実装

# モーメント法の特徴

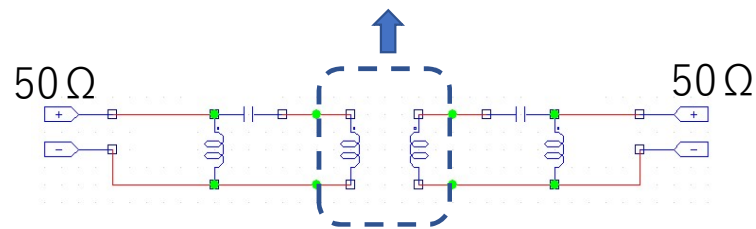
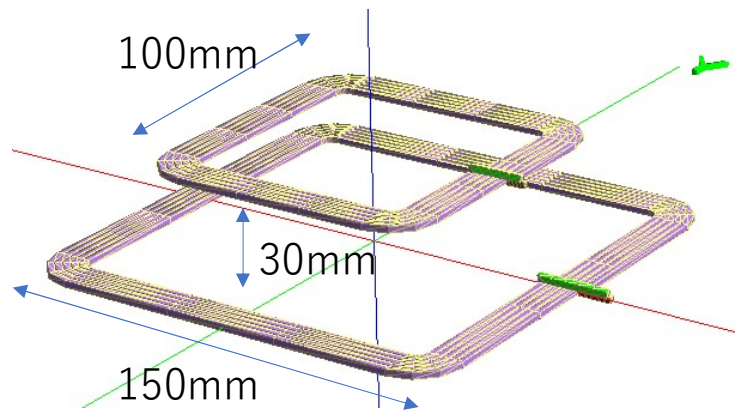
- **<一般的な特徴>**
- 境界面の変数のみなので必要な変数が少ない  
マトリックスが小さくて済む（ただし密行列）
- 結合問題が高精度に解析可能  
磁界共鳴方式などのHi-Q問題に適している
- 数十波長離れている遠方のオブジェクト間の解析が容易  
ワイヤレス電力伝送など送受信ペアで解析する問題の解析
- 極大、極小問題の解析が容易  
小型アンテナと車などの大規模な筐体との同時解析など
- **<MPIE(Mixed Potential Integral Equation)>**
- 超低周波から超高周波まで対応できる（kHz～ミリ波まで）  
85kHzのワイヤレス電力伝送の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

# ワイヤレス電力伝送

磁界結合	磁界共鳴	電界結合	電波放射
			
電磁誘導により電力を供給。	コイルの自己共振を利用	対向した金属間で容量性結合を行う	放射電界を拾いダイオード検波で直流を得る
密着か近距離	数メートルの距離が伝送可能	密着か近距離	レクティナ

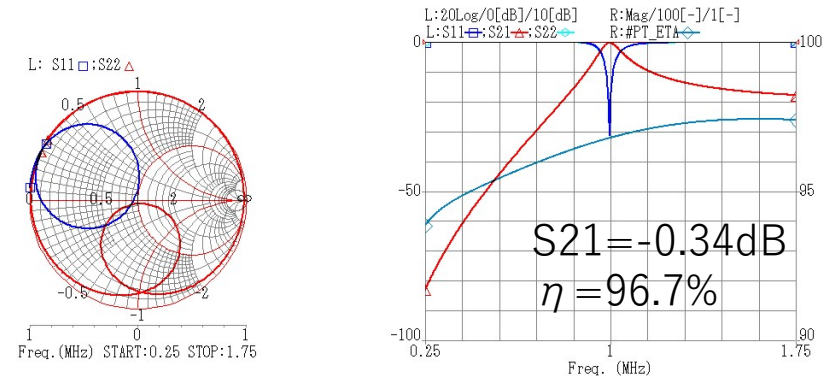
# 磁界結合方式

磁界で結合して電力を伝送する

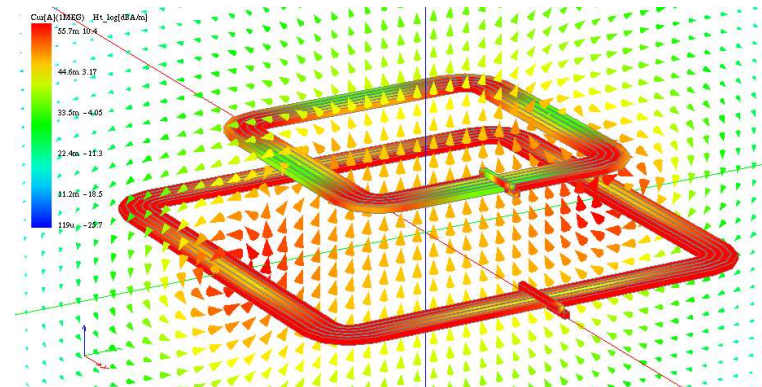


整合回路を含めた全体回路  
(自動設計機能)

解析時間：  
11秒/周波数  
帯域スイープ：56秒/1000周波数 (VFモード)  
※MPIEモーメント法は高速に解析

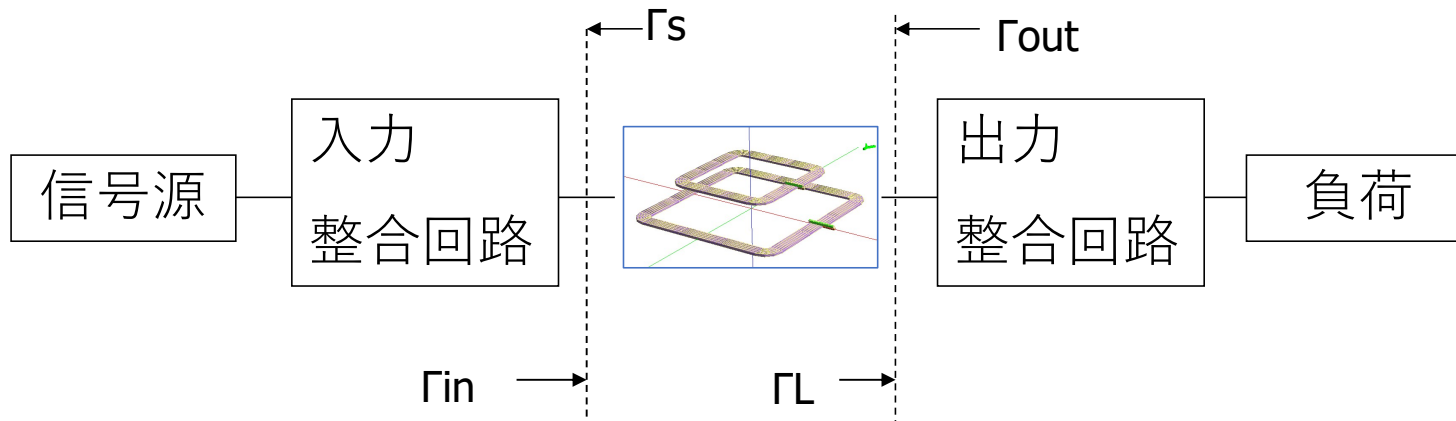


※ $\eta$ の特性は負荷に依存しない



磁界分布 @1MHz

# 最大有能電力利得の点での整合 (Optimal matching)



$$\Gamma_{in} = S_{11} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_L}{1 - S_{22}\Gamma_L} \quad \text{---(1)}$$

$$\Gamma_{out} = S_{22} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_S}{1 - S_{11}\Gamma_S} \quad \text{---(2)}$$

$$\Gamma_L = \Gamma_{out}^*$$

$$\Gamma_S = \Gamma_{in}^*$$

共役整合



$$\Gamma_S = \frac{B_1 \pm \sqrt{B_1^2 - 4|C_1|^2}}{2C_1^*} \quad \text{---(5)}$$

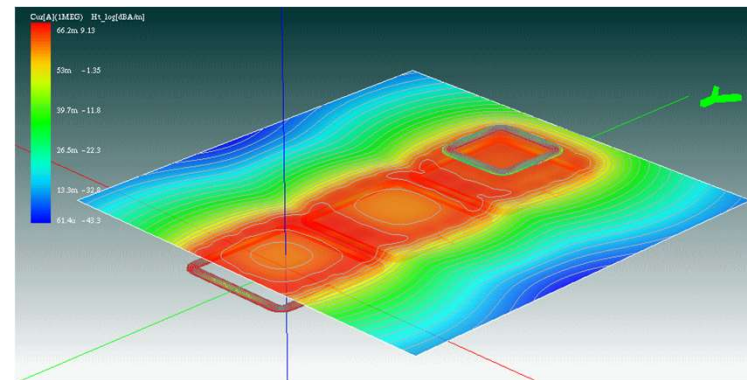
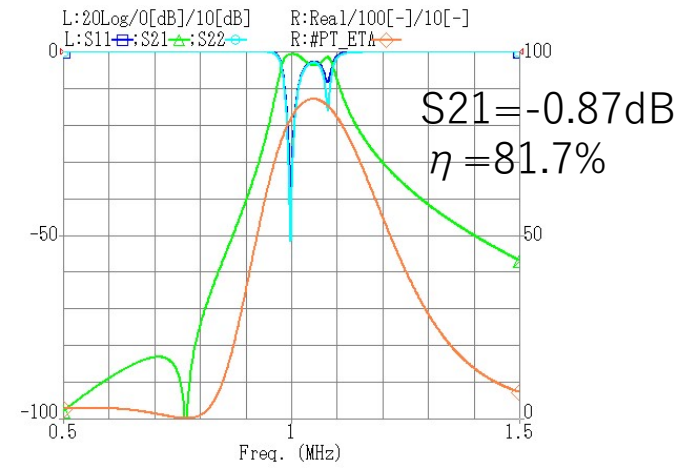
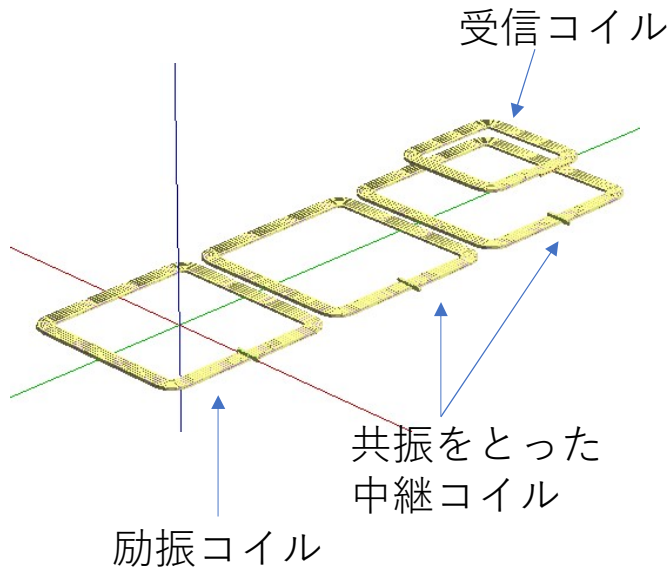
$$\Gamma_L = \frac{B_2 \pm \sqrt{B_2^2 - 4|C_2|^2}}{2C_2^*} \quad \text{---(6)}$$

連立方程式の解

※S-NAP/Wirelessは $\Gamma_s, \Gamma_L$ の計算機能があり整合回路を自動設計できる



# 中継コイルを用いた伝送

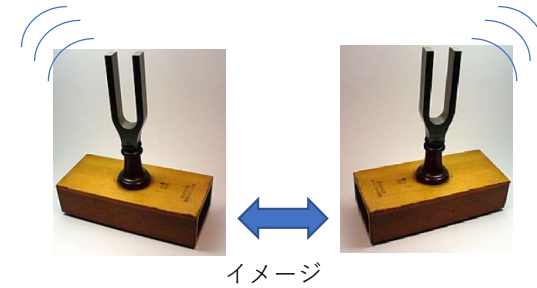
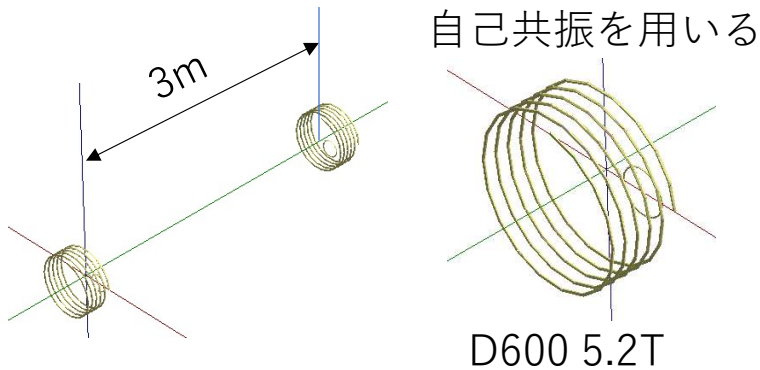


磁界分布 @1MHz

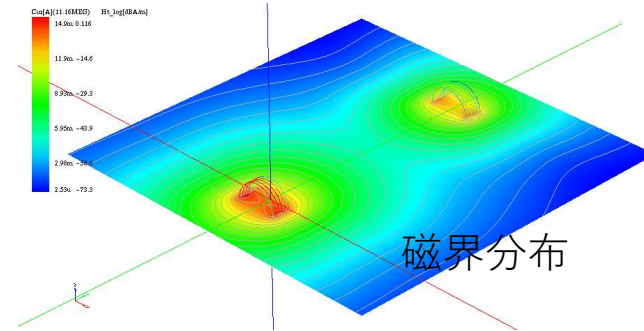
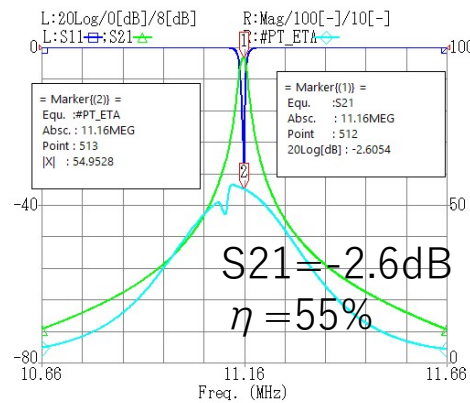
# 磁界共鳴方式



■写真、MITの発表 (2.1m離れた60W電球の点灯 2007年6月発表)  
(出典: [http://www.mit.edu/~sojajic/MIT\\_WiTricity\\_Press\\_Release.pdf](http://www.mit.edu/~sojajic/MIT_WiTricity_Press_Release.pdf))



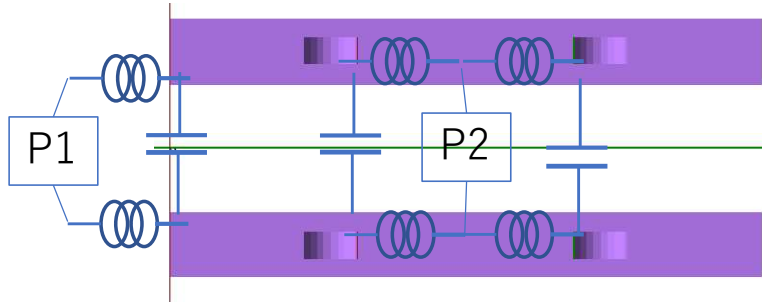
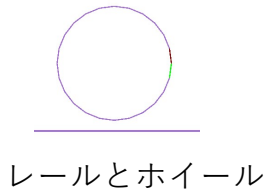
磁界共鳴方式は、コイルの自己共振を利用した共振コイルを用いた電力伝送方式で、長距離での電力伝送が可能



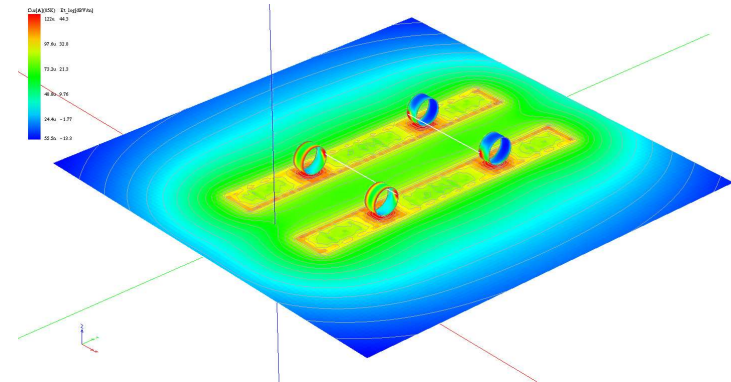
空間離散化方式のEM-SIMでは距離が離れると解析が重くなる

解析時間：  
36秒/周波数  
帯域スイープ：10.4分/1000周波数 (VFモード)  
※モーメント法では距離が変わっても解析時間は同じ

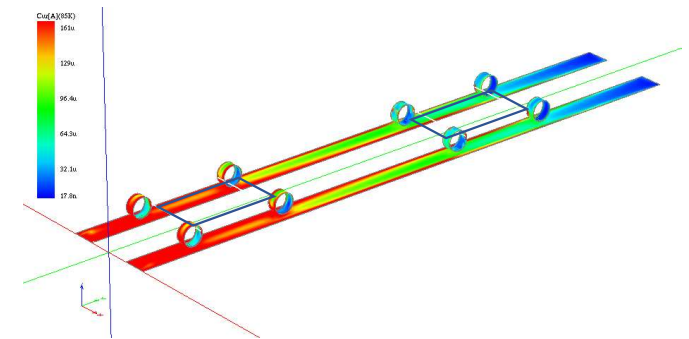
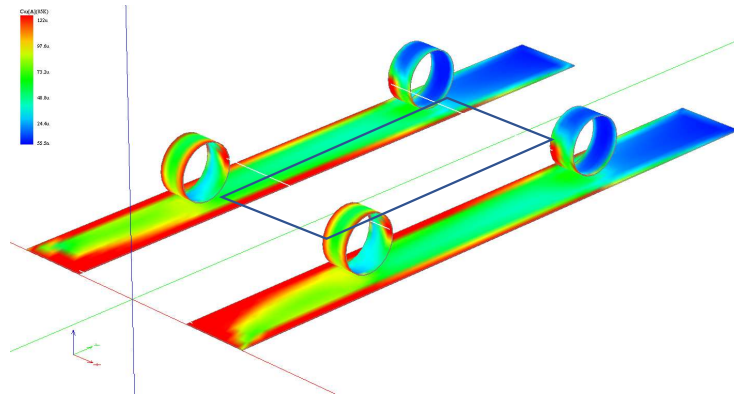
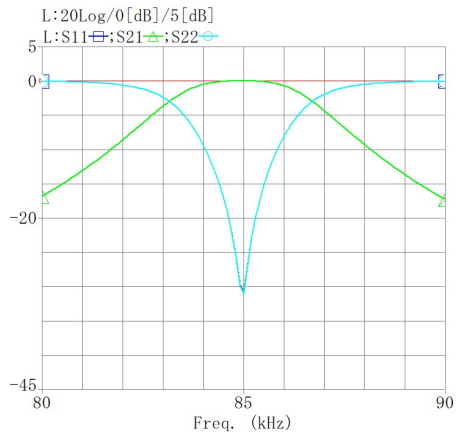
# 電界結合方式 (85kHz)



回路構成  
全輪給電



電界分布 @85kHz  
Z=25mm (タイヤと線路の中間位置)



電流分布 @85kHz

解析時間：  
144秒/周波数  
帯域スイープ：12.3分/1000周波数 (VFモード)

# マイクロ波などによる電波放射による電力伝送

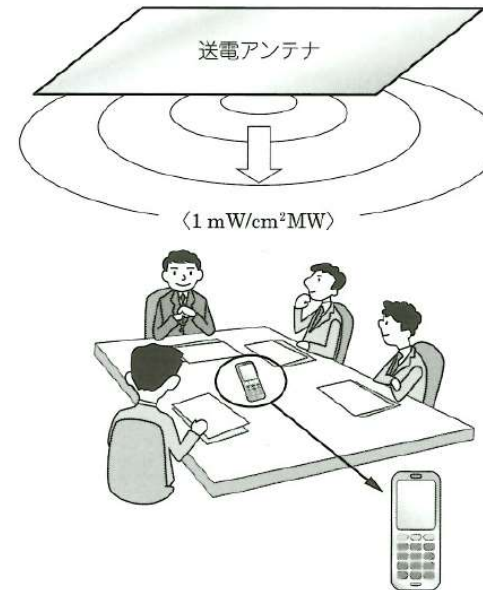
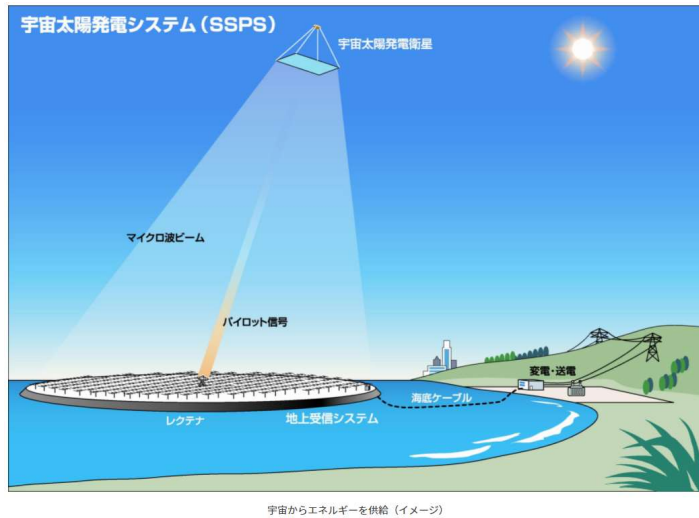
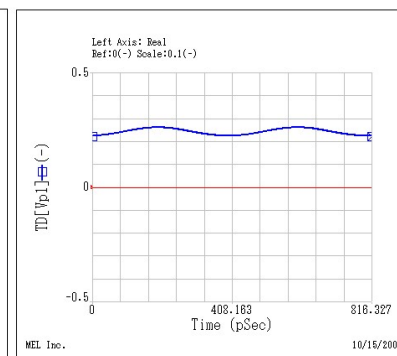
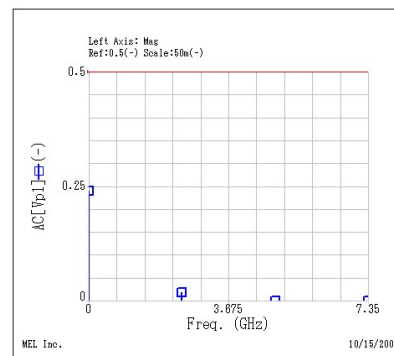
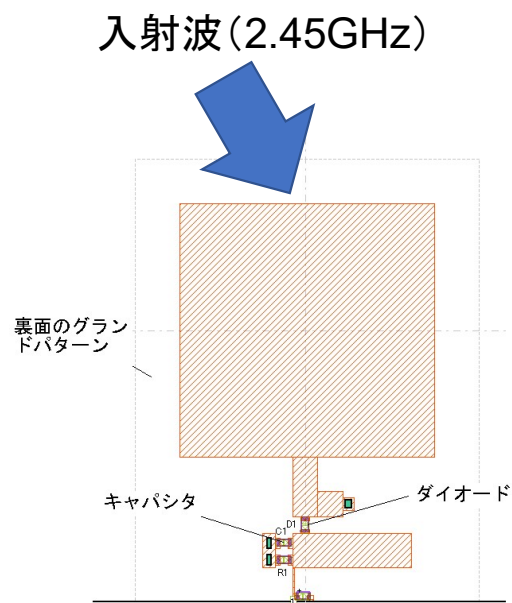


図 2.16 マイクロ波による 3 次元空間ワイヤレス給電のイメージ

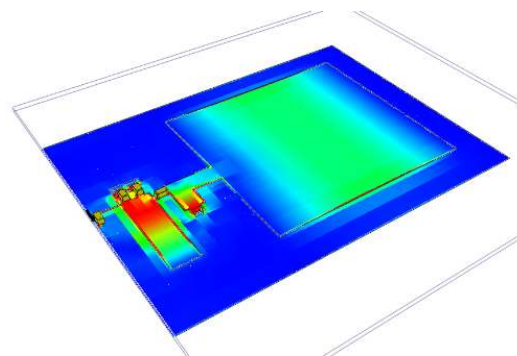
- [1] 松木英敏, 高橋俊輔, “ワイヤレス給電技術がわかる本”, オーム社
- [2] 日刊工業新聞2015年11月13日「創刊100周年特別号」より

# 電波放射による電力伝送

- ・ 非線形素子実装状態で平面波入射を実行
- ・ ハーモニック・バランス法でスペクトルを計算



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 $\Omega$



## IoT小型アンテナの開発

- (1) サイズが限定される（機器の大きさに依存）
- (2) 通信範囲が限定される場合がある
- (3) 周辺の金属や人体の影響

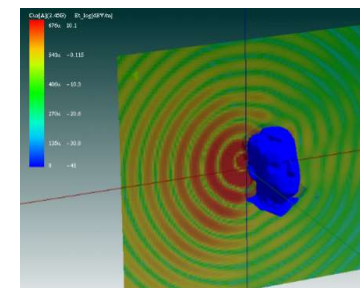


# 昨今のアンテナ事情、小型アンテナ

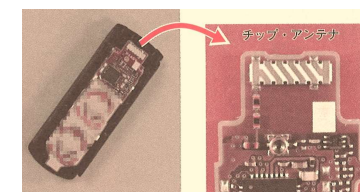
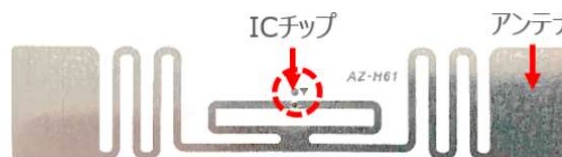
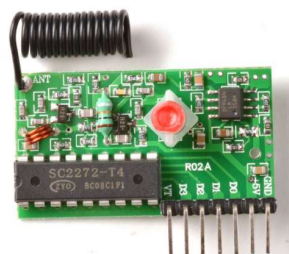
- 筐体への組み込みが必須（小型）
- 用途により通信距離が限定される
- 使用環境の影響が大きい
- 周波数が高い



設計式等の確立が困難なので  
電磁界シミュレータが必要



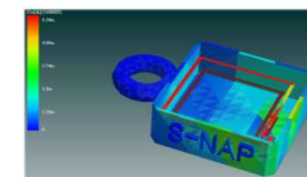
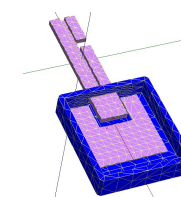
人体の影響



チップアンテナ[1]



微弱機器(315MHz)[2]



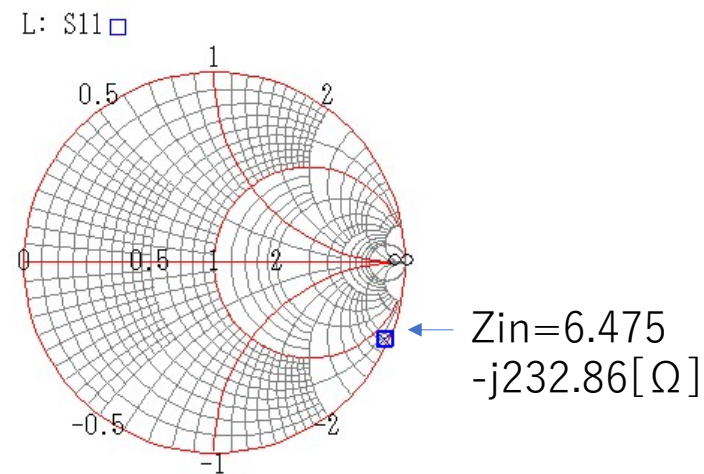
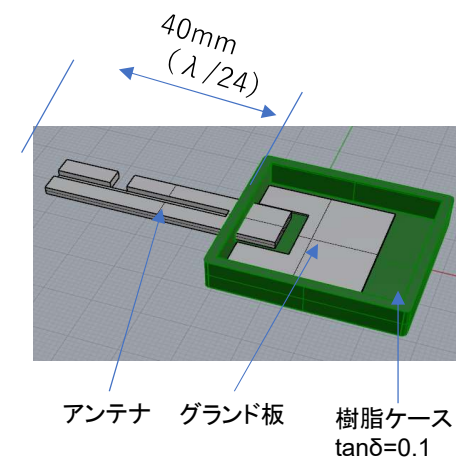
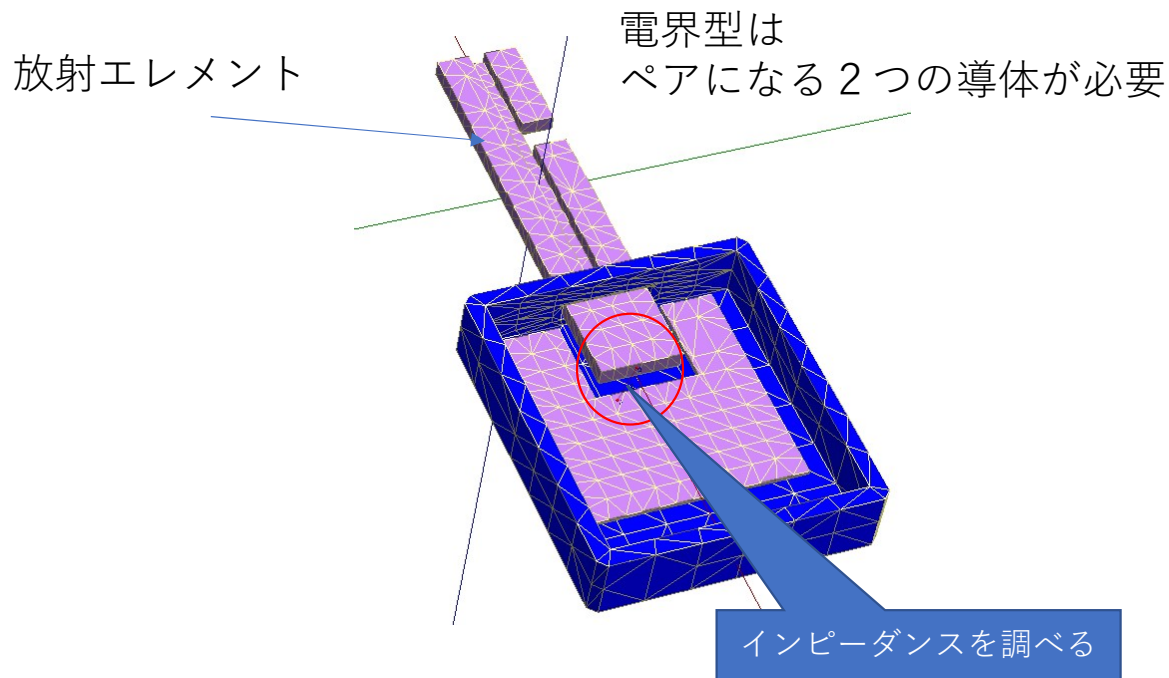
S-NAPサンプル[3]

[1]RFワールド No.44

[1][2][3]以外の画像はWEB上のデータです

# 電界型小型アンテナ (315MHz)

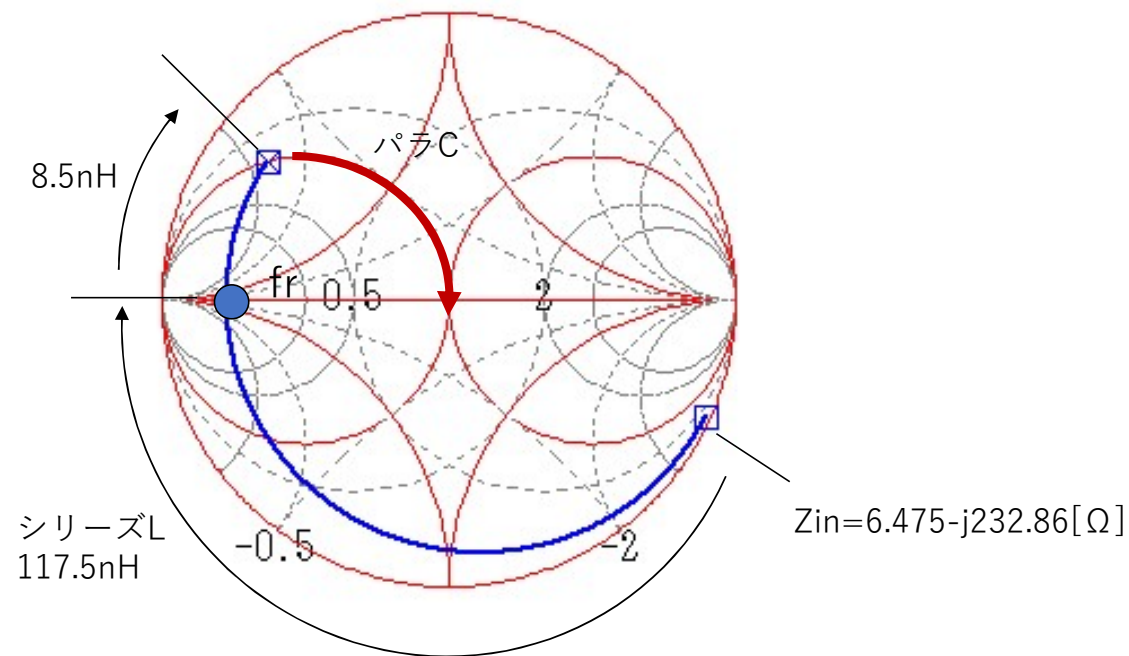
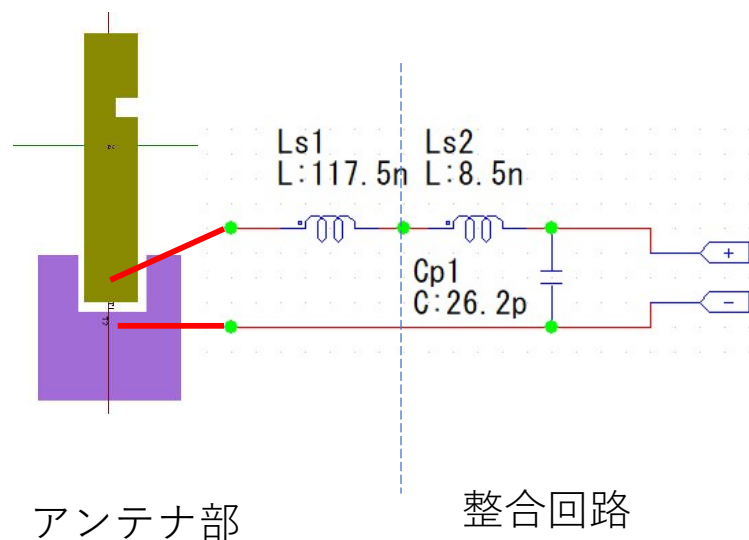
約40mmの金属鍵部を持つキーを315MHzのワイヤレス化する場合のアンテナ設計例





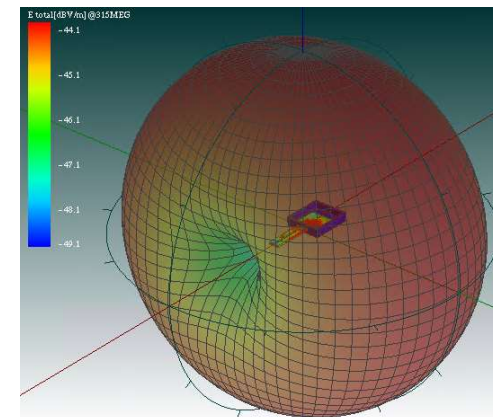
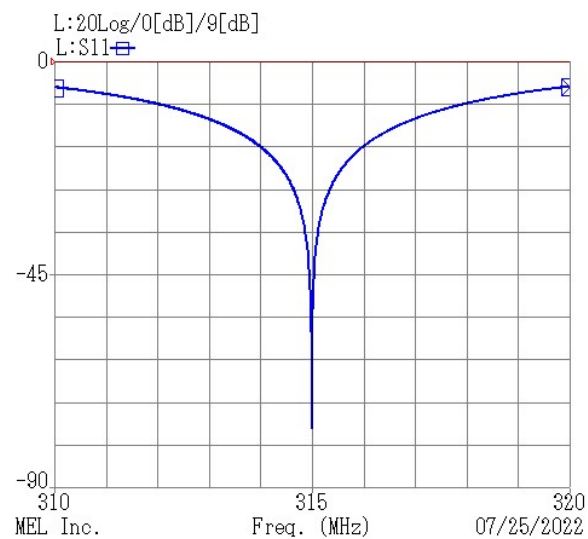
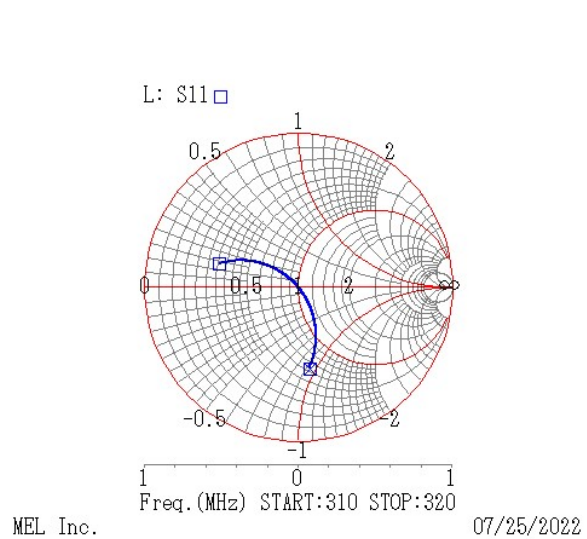
# インダクタの装荷と整合回路の追加

50Ωに整合させる



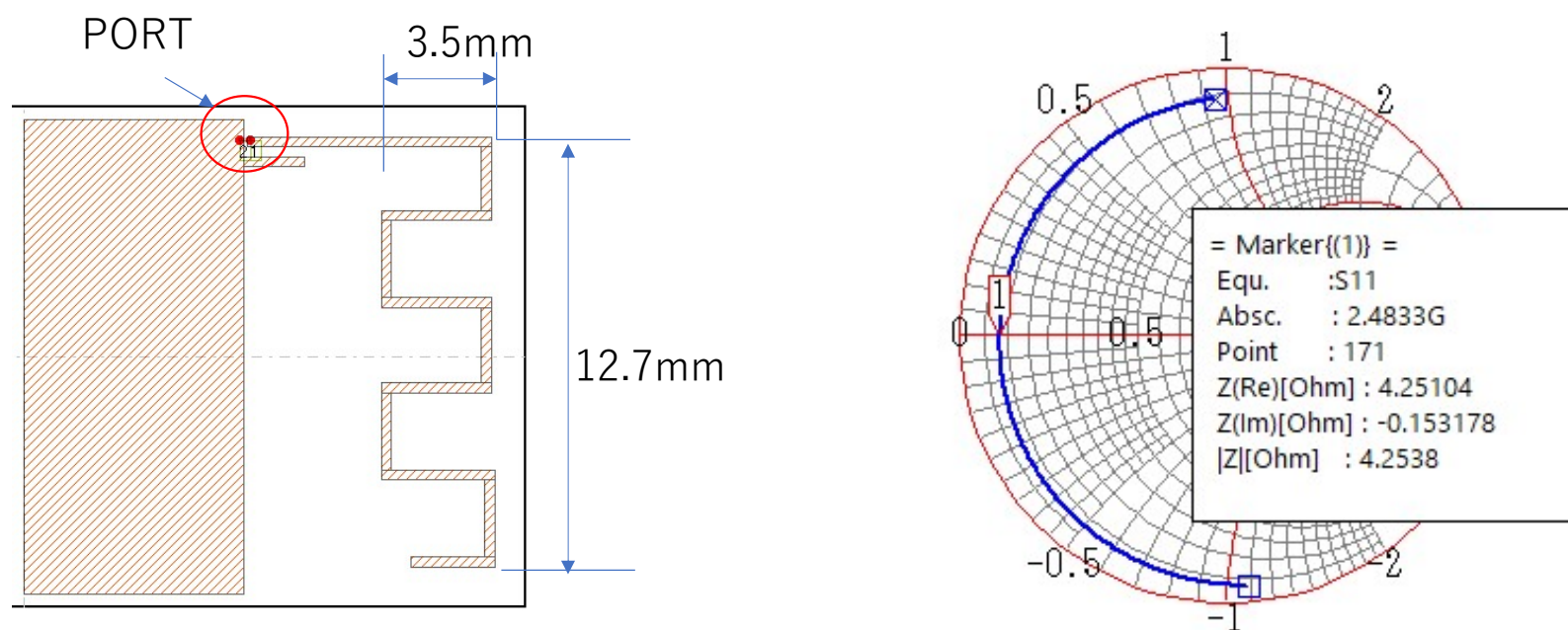
※S-NAP/Wirelessの自動設計機能で容易に設計できる

# 全体特性



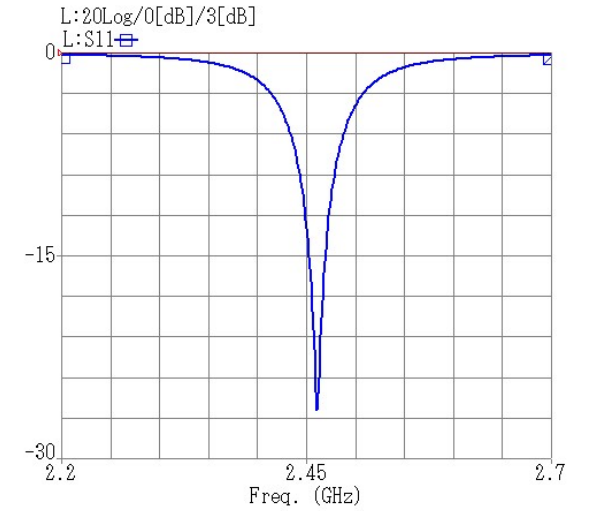
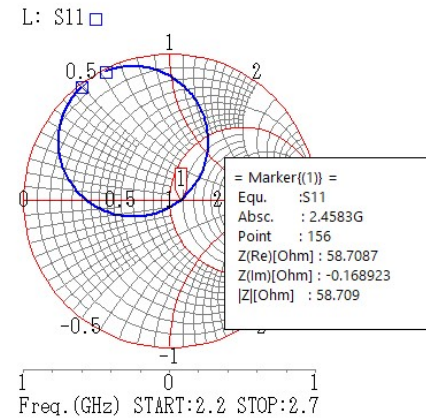
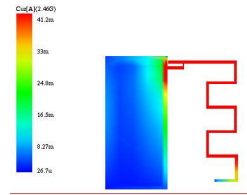
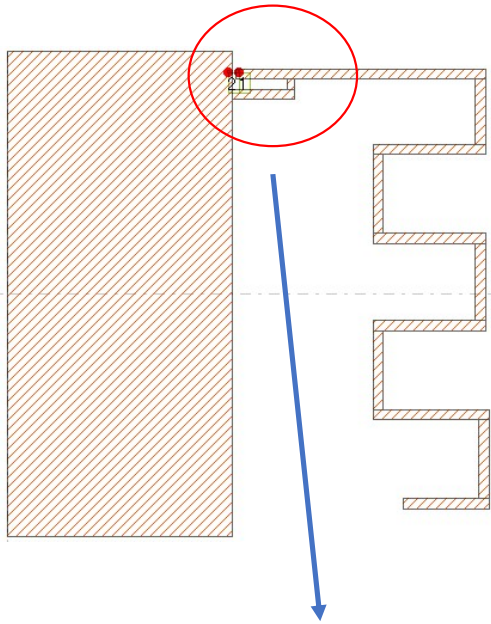
--- Far field analysis ---  
VSWR=1.00027  
Direction :  $\theta=165, \phi=255$   
Gd=1.87717[dBi]  
Ga=-10.1034[dBi]  
Efficiency=6.33781[%]  
Axis ratio= 1: 4.39641e-05

# 2.45GHzプリントアンテナ

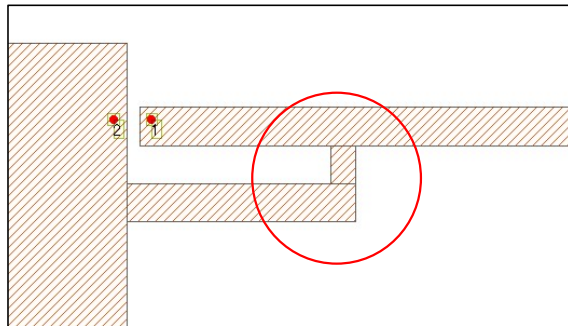


- ・パターン長を調整して2.45GHzに合わせる
- ・メアンダはあまり密にしない

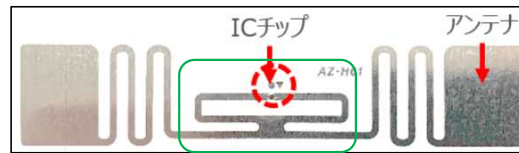
# 整合回路を追加



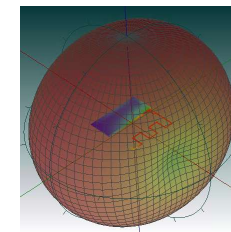
整合特性



ガンママッチ



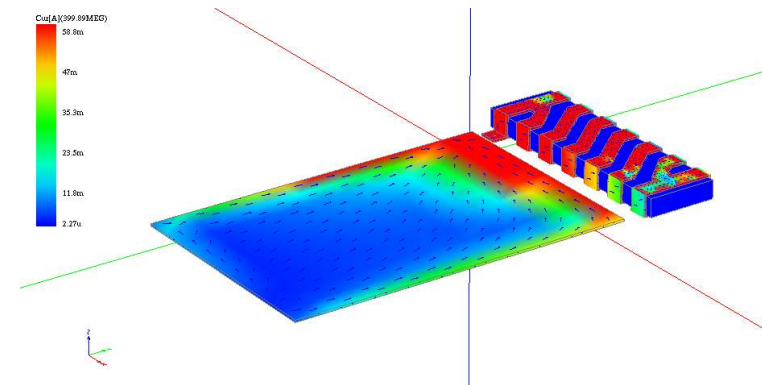
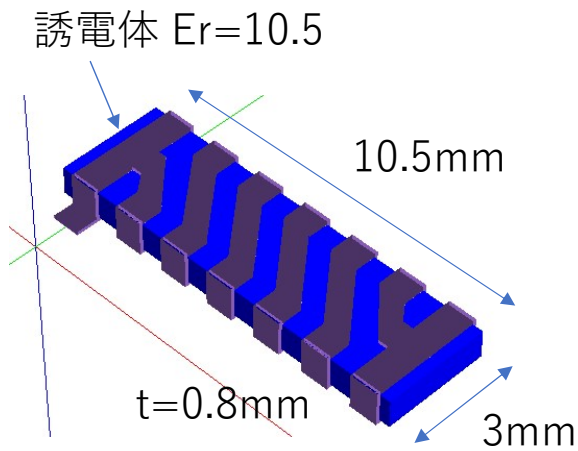
類似した整合回路  
(900MHz RF-TAG)



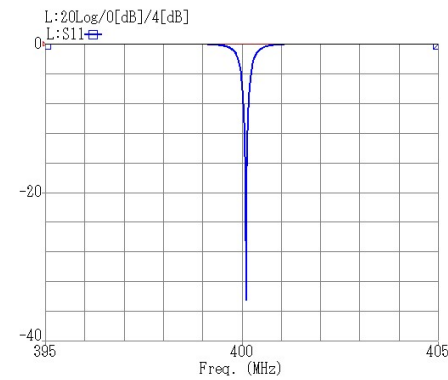
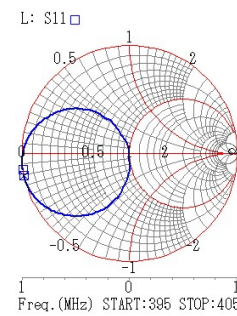
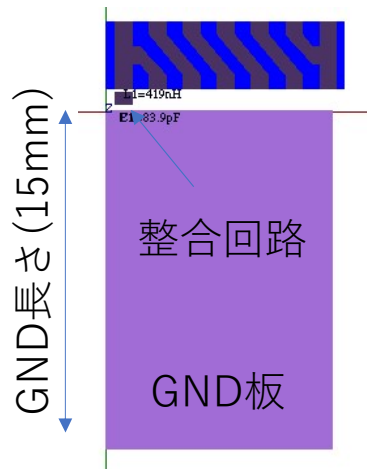
放射特性

--- 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

# チップアンテナ (400MHz)

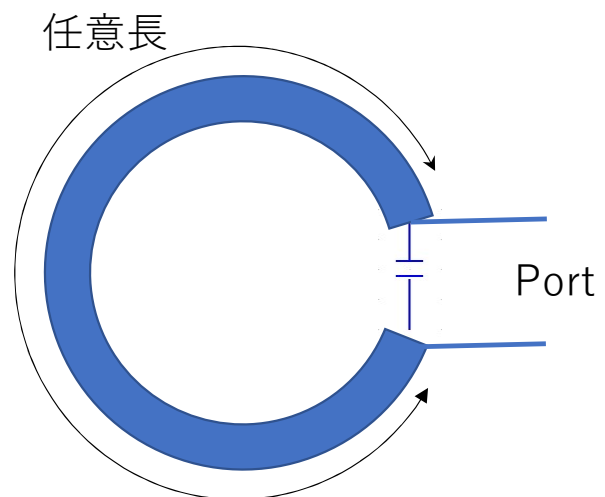


電流分布 @400MHz

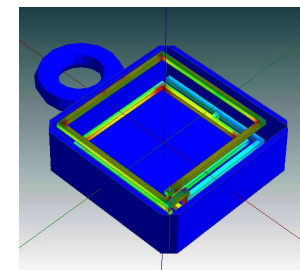
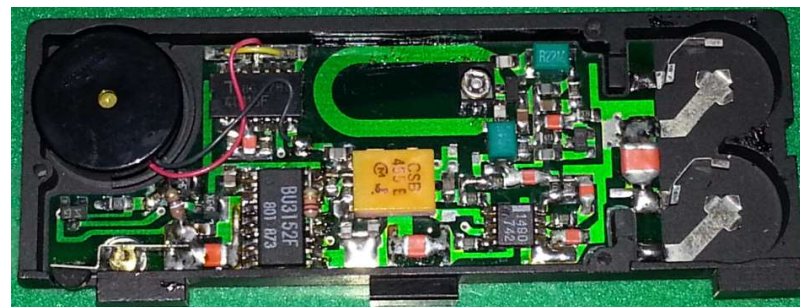




# 磁界型アンテナ

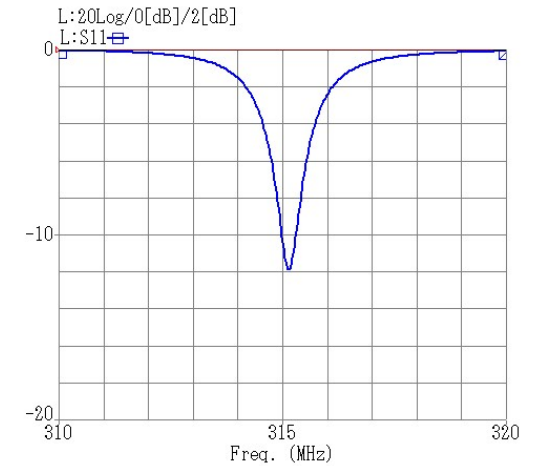
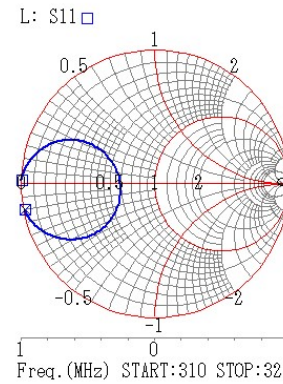
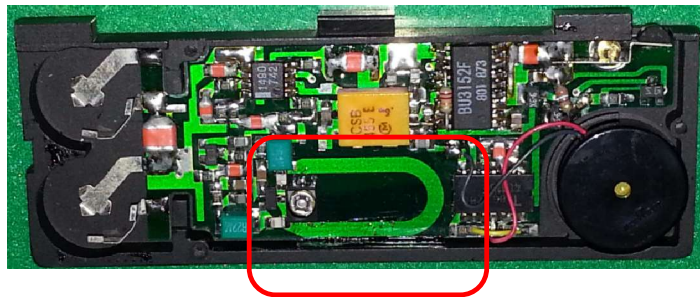


LC共振なのでエレメント長は任意にできる



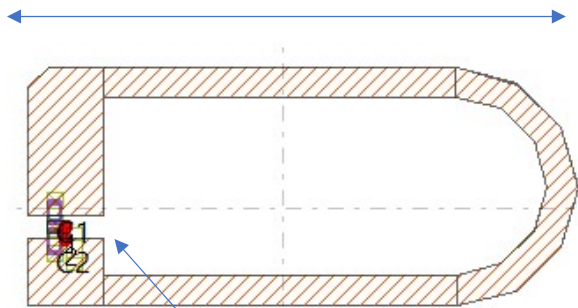


# 小型機器への適用例

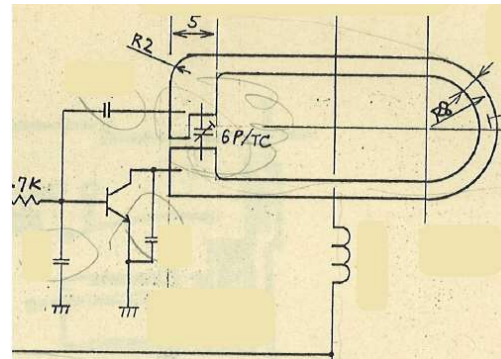


36.6mm

15.7mm



共振, 整合回路

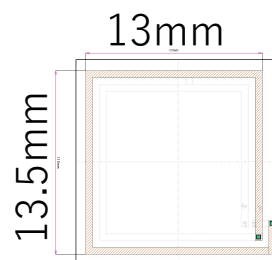
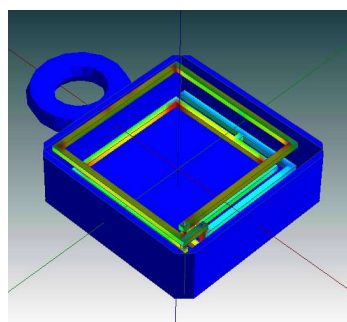


--- Far field analysis ---  
 VSWR=1  
 Direction :  $\theta=90, \phi=180$   
 $G_d=1.72737[\text{dBi}]$   
 $G_a=-10.8688[\text{dBi}]$   
**Efficiency=5.50026[%]**  
 Axis ratio= 1: 1.53493e-14

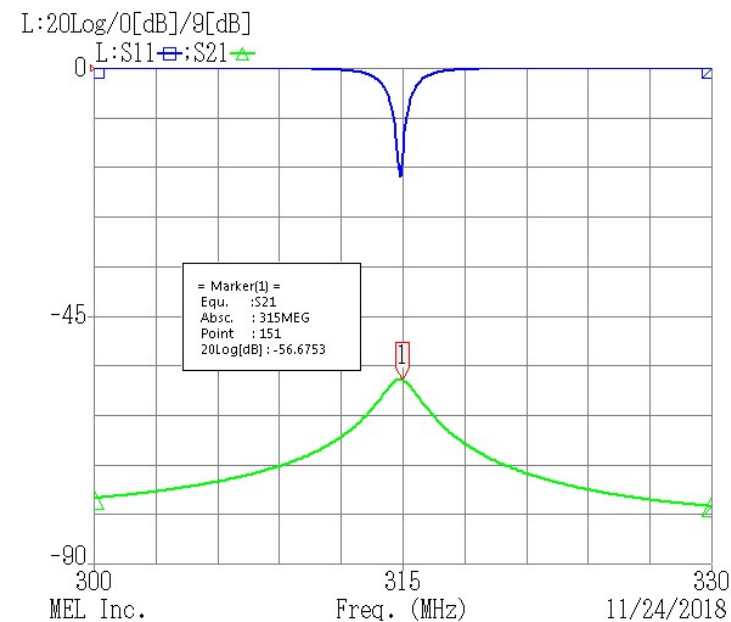


# キーホルダ型アンテナ例 (315MHz)

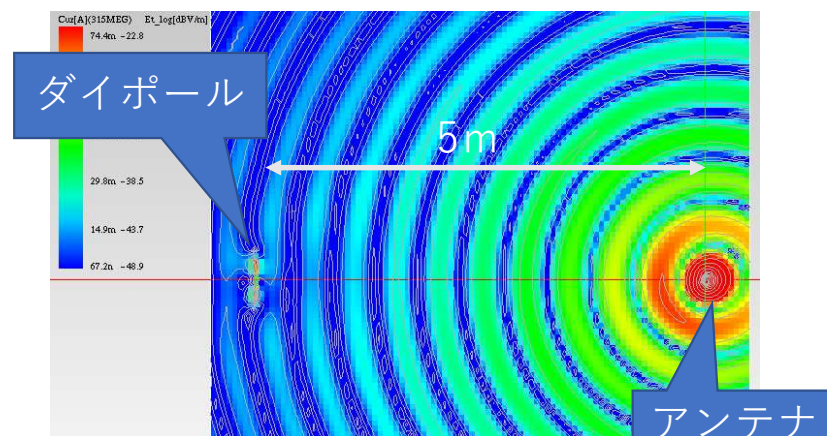
約15mm□の樹脂ケースに入った315MHzのワイヤレスキーのアンテナ設計例



電磁界シミュレータで伝送特性を調べる



S21 = -56.6dB @315MHz

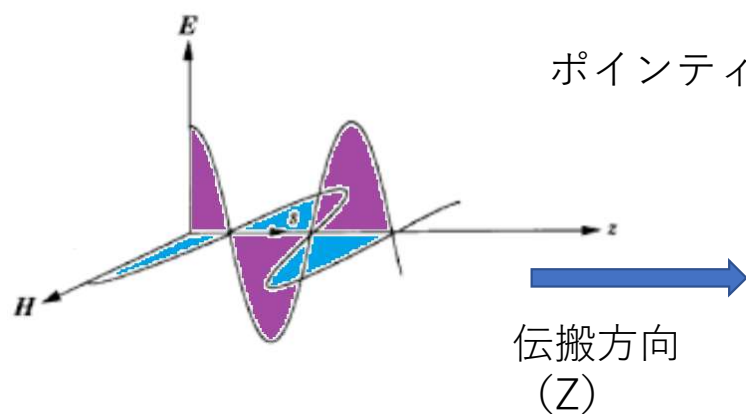


電界分布



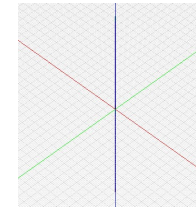
# 飛ぶアンテナと飛ばないアンテナ

SWR（定在波比）は1まで下がるのに放射効率が異なるのは何故？



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

# ダイポールアンテナの複素ポインティングベクトル ( $E \times H^*$ )

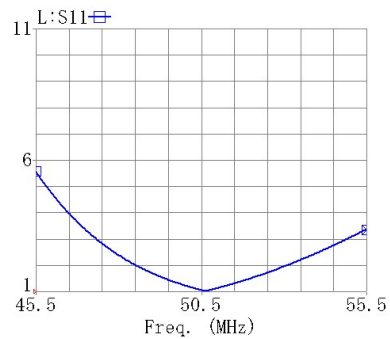


$\lambda / 2$  50.5MHz

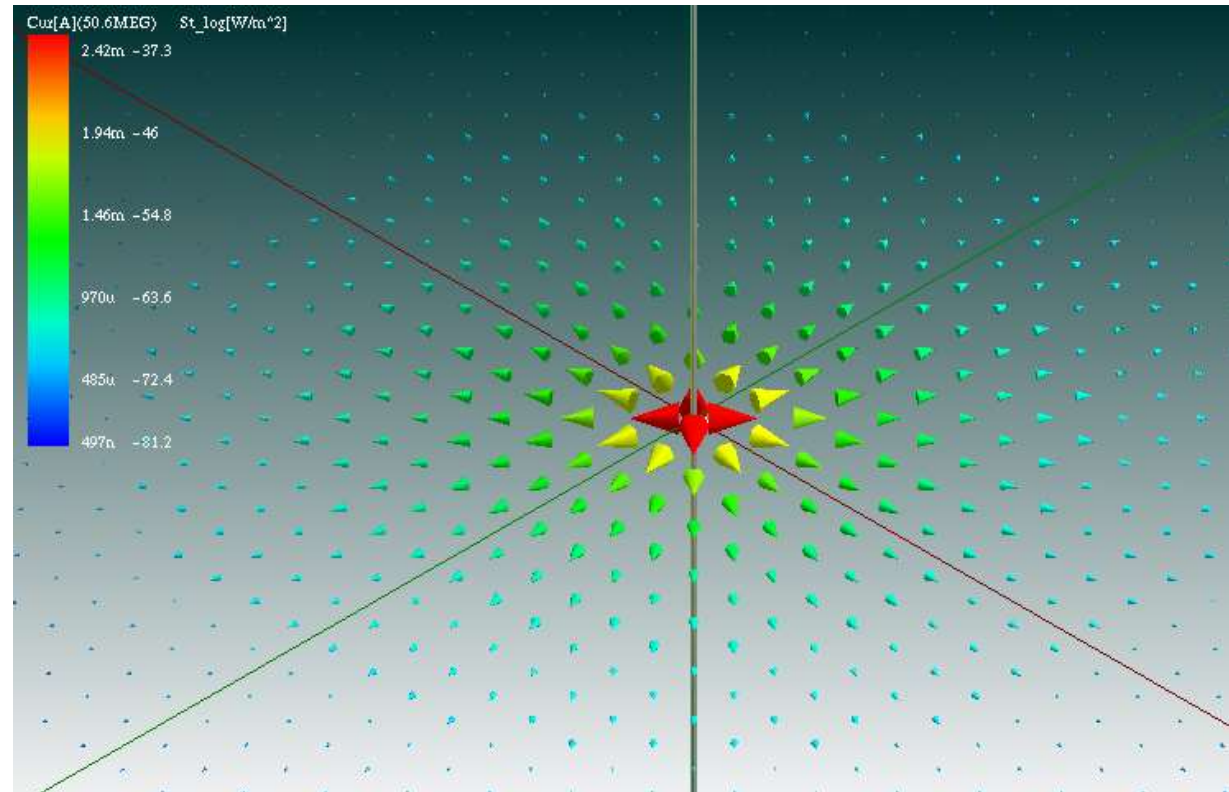
・ SWRは1であるので、電力は全て空間に放射される

・ ベクトルは全て外に向かうので、効率は良い

放射効率：96.15%

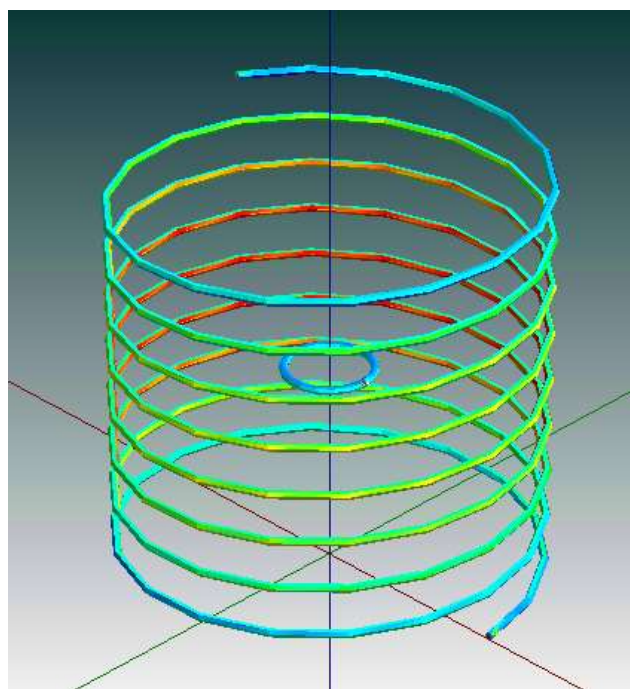


SWR特性

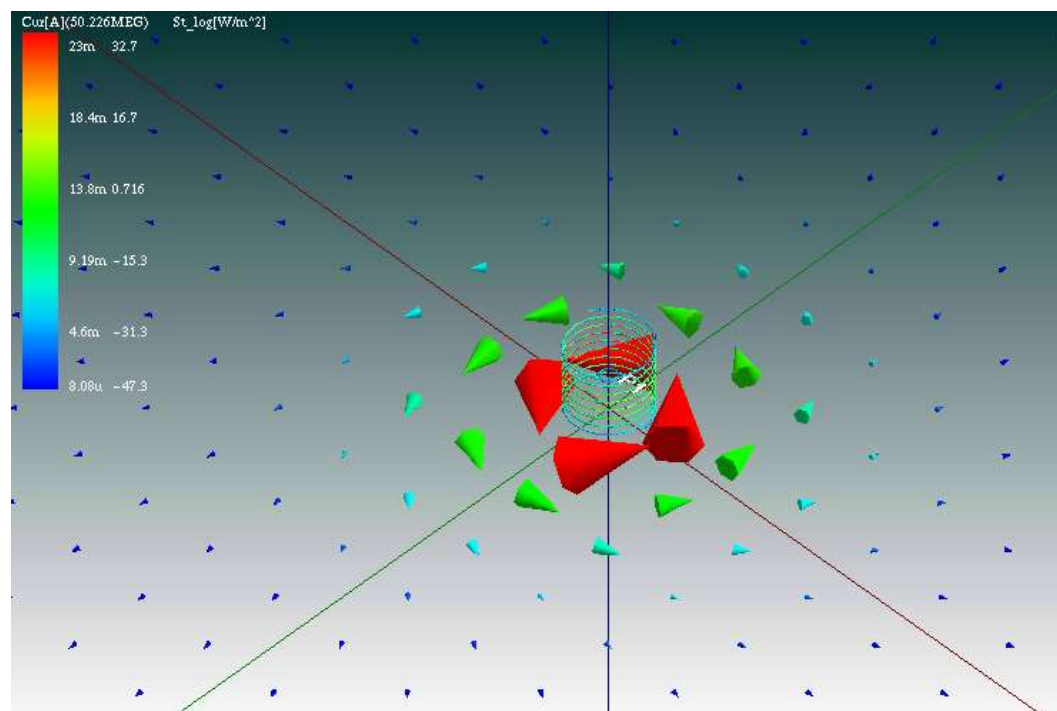


全方向に均一に放射されている  
放射効率：96.15%

均一ピッチヘリカルアンテナの複素ポインティングベクトル  
( $E \times H^*$ )



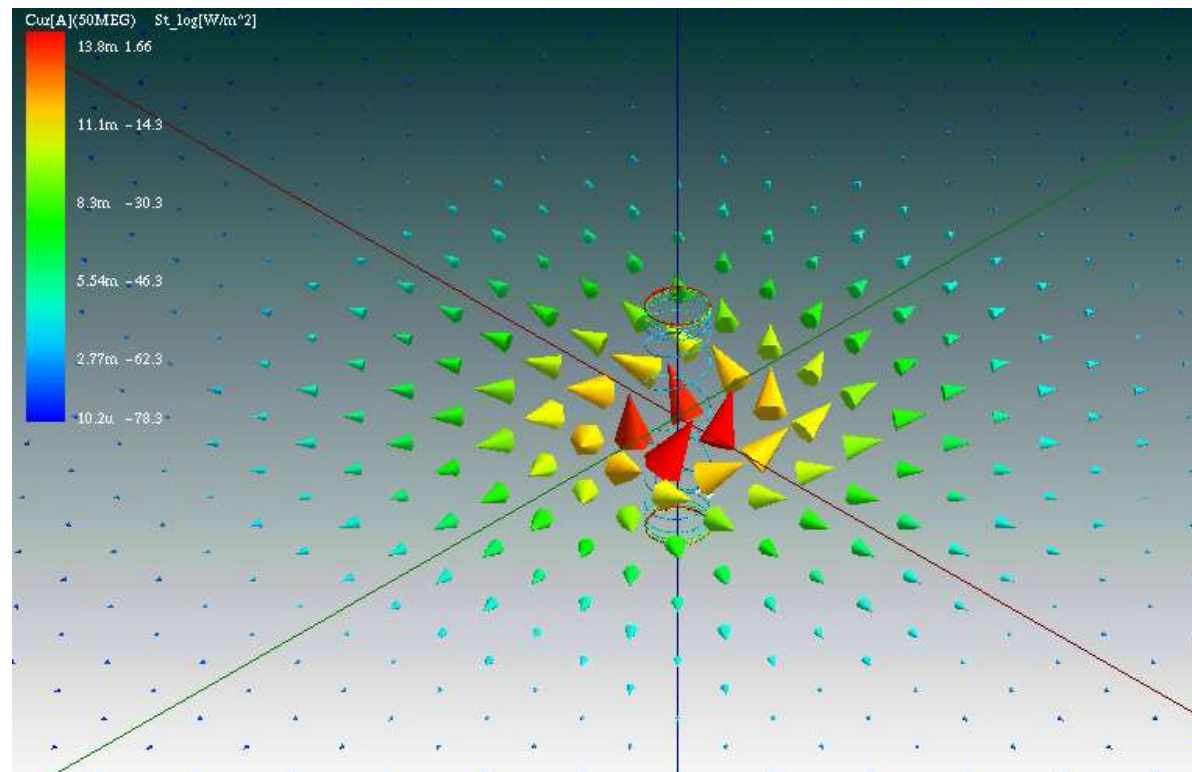
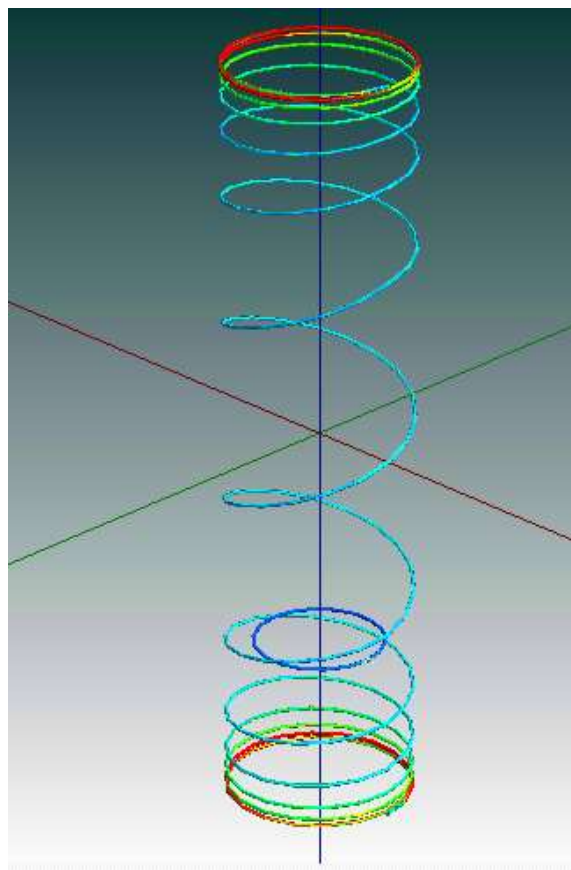
電流分布



エネルギーが滞留している  
放射効率：24.7%



不均一ピッチヘリカルアンテナ複素ポインティングベクトル  
( $E \times H^*$ )

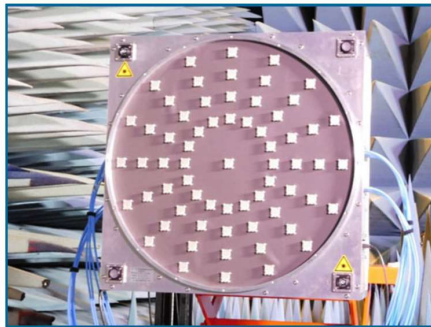


滞留が改善される  
放射効率：33.16%

## 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。

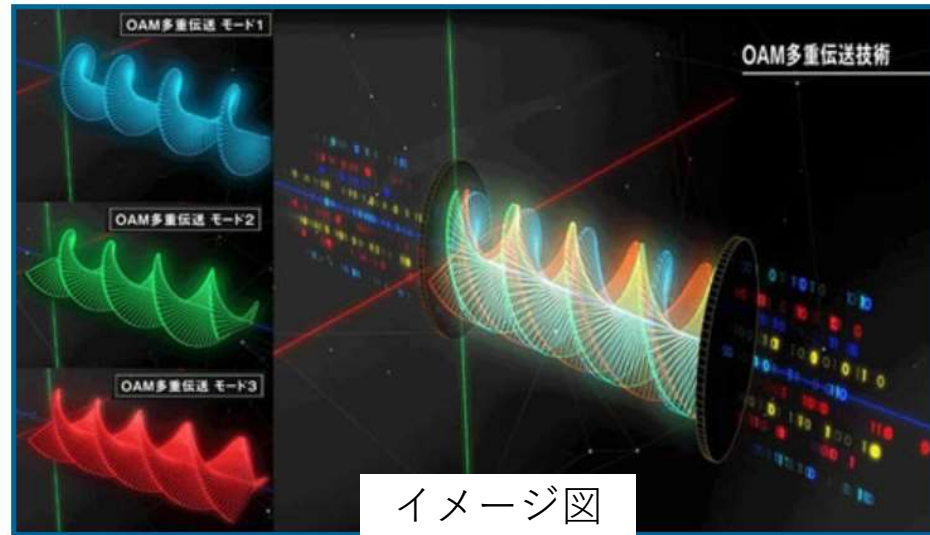
(IT media NEWSより引用)



NTTが試作した送受信装置

OAM用のアンテナ

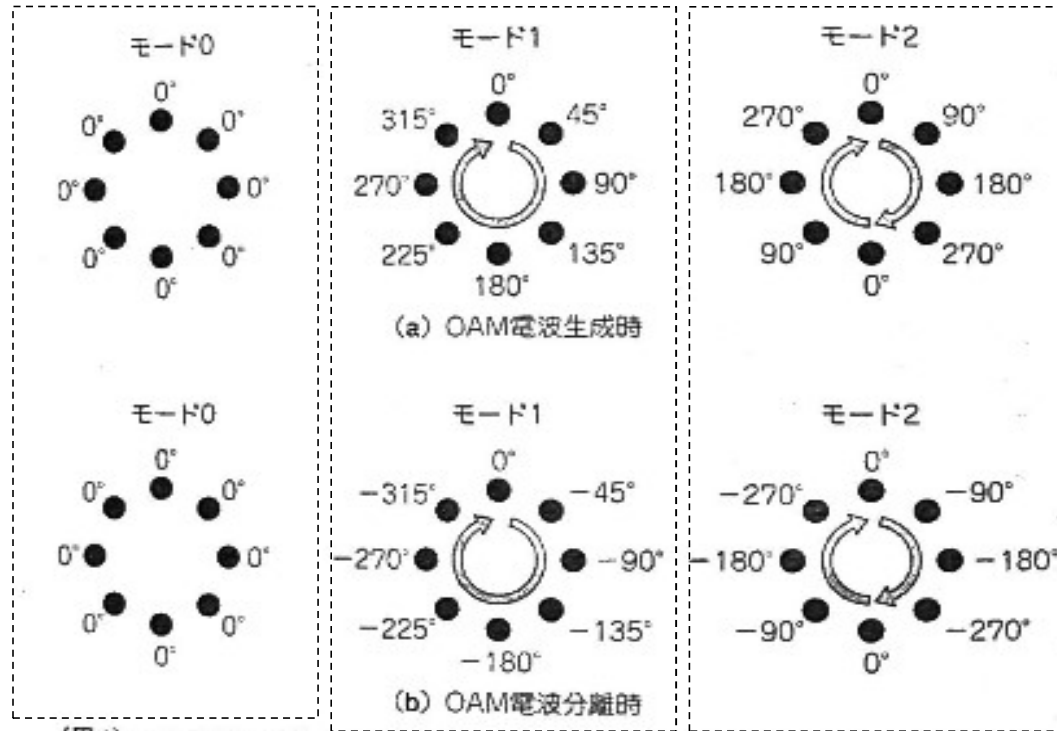
UCA (uniform circular array)



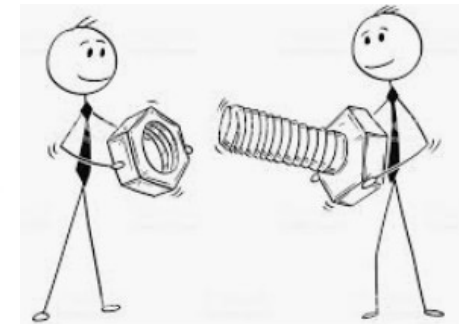
OAM多重の原理

参考資料：IT media News

# OAMの位相シフト図



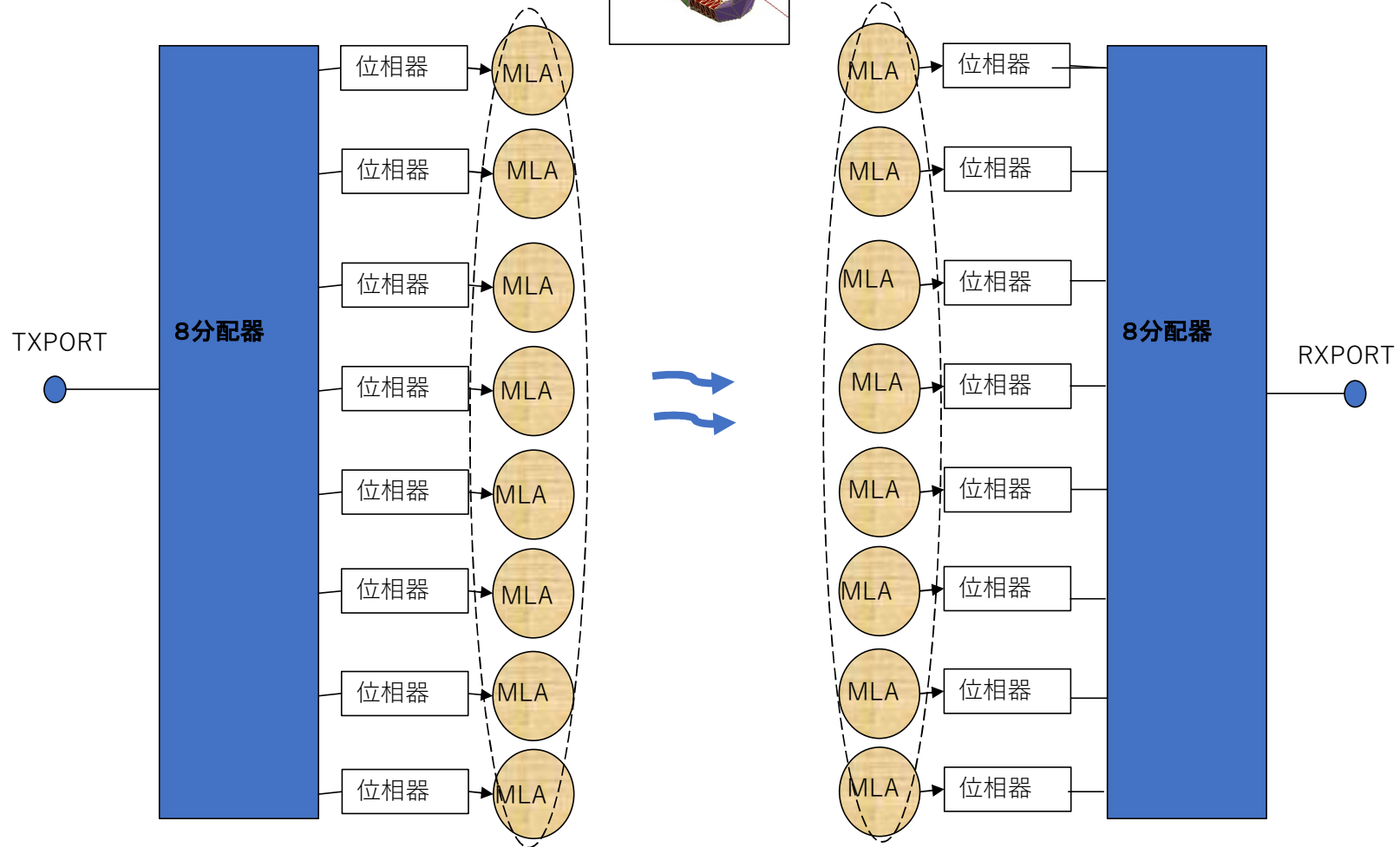
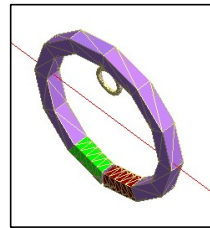
(図4) 一つのUCAを使って異なるOAMモードをもつ電波を生成/分離する時の各アンテナ素子に与える位相シフト量



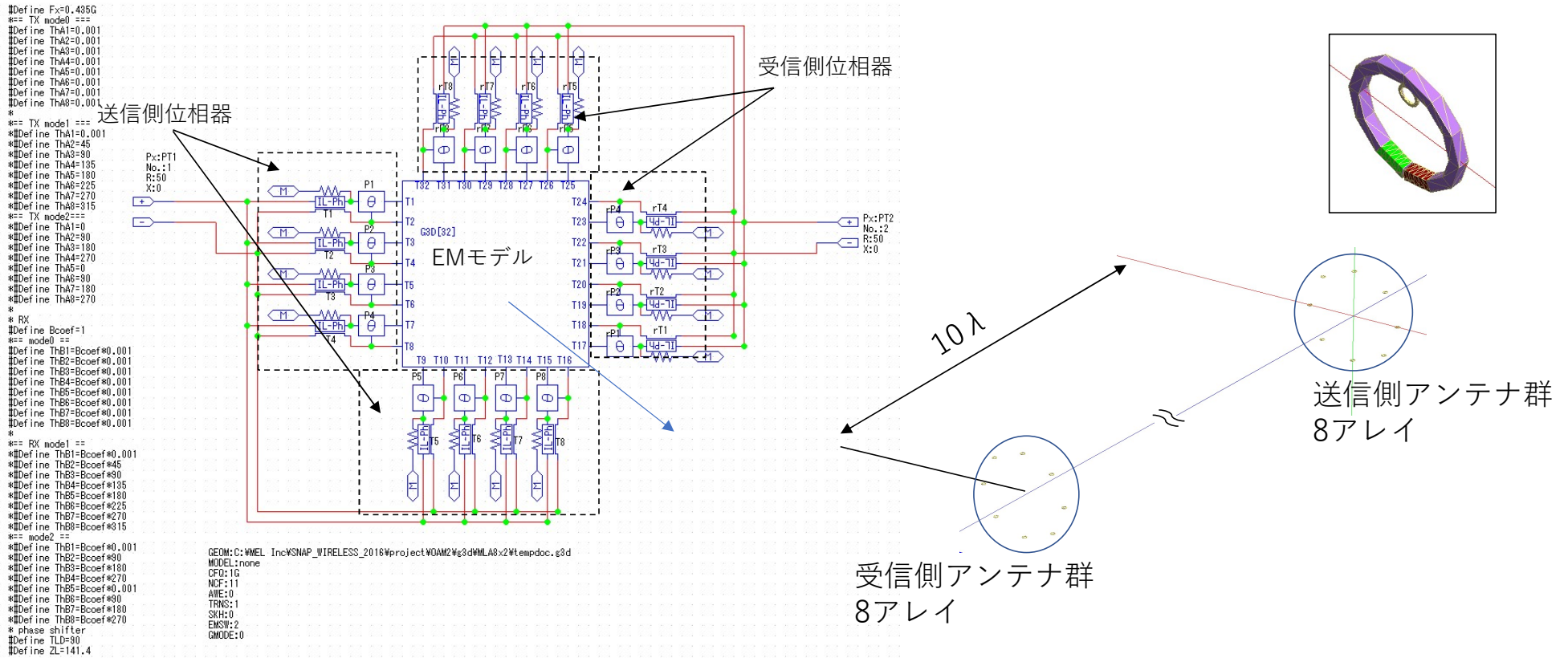
参考文献：RFワールド No.47



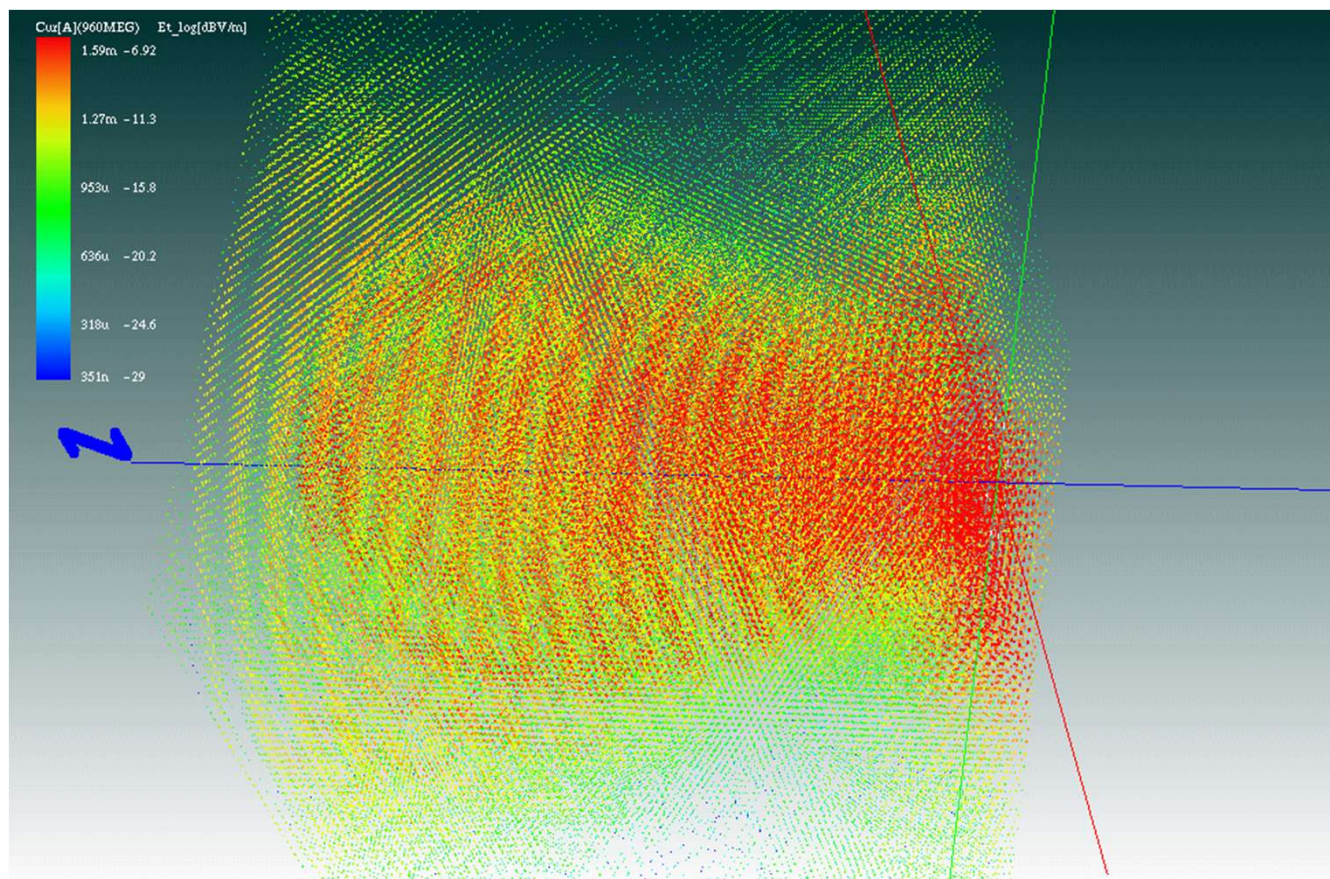
OAMのシミュレーション図  
位相器と8分配器



# OAMのシミュレーション図 位相器と8分配器



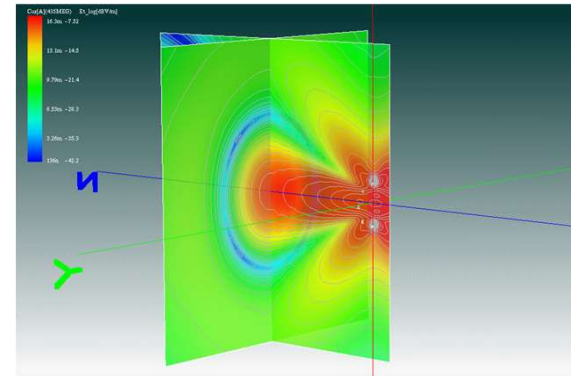
## 空間にマッピングしたMODE 1の時の3次元電界分布



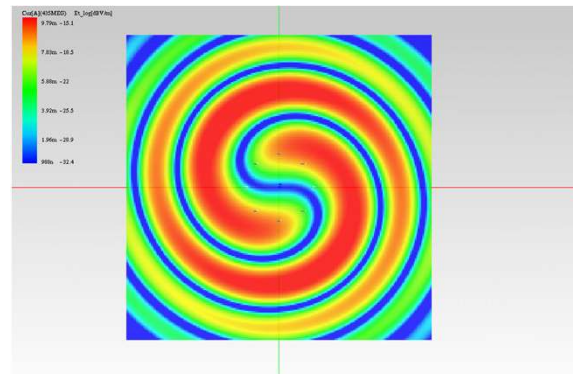
# OAMのアイソレーションと電界分布

## アイソレーション特性

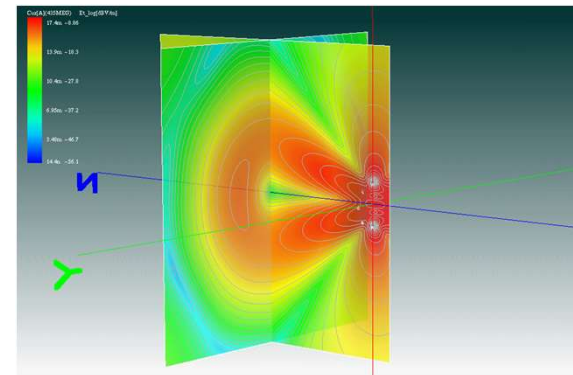
送信モード		Mode 0	Mode 1
受信	Mode 0	-22.43	-110.20
	Mode -1	-110.04	-34.98



MODE 0



MODE 1

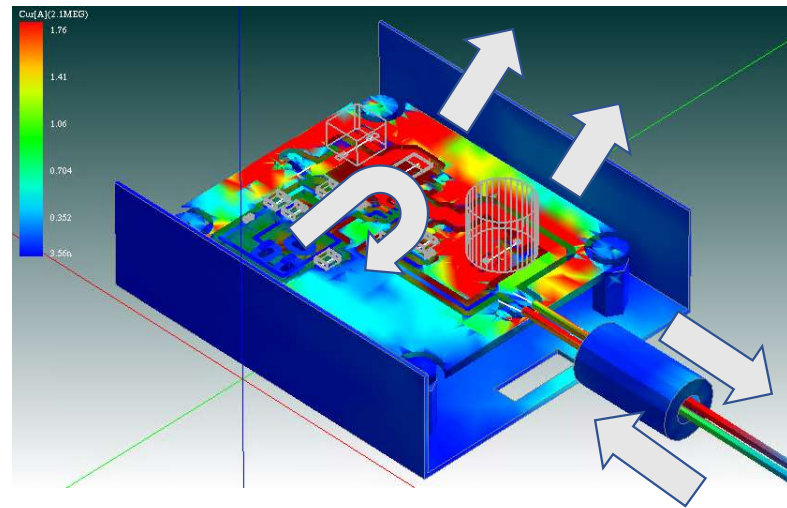


空間電磁界分布の解析



# EMCのテーマ

- 1) プリント板内の電磁界結合
- 2) 回路動作に伴うノイズ
- 3) 筐体の電磁界特性
- 4) プリント基板と筐体の結合
- 5) 外部接続ワイヤへの漏洩
- 6) ノイズ抑制素子の効果
  
- 7) プリント基板からの放射
- 8) 筐体からの放射
- 9) 外部接続ワイヤからの放射
  
- 10) プリント基板への外来波入射
- 11) 筐体への入射
- 12) 外部接続ワイヤからのノイズ



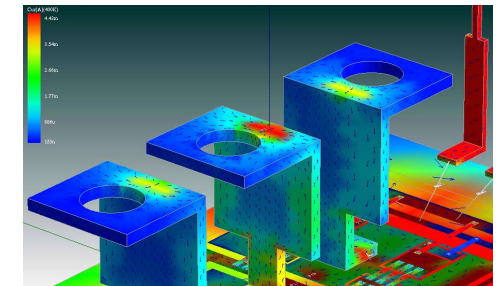
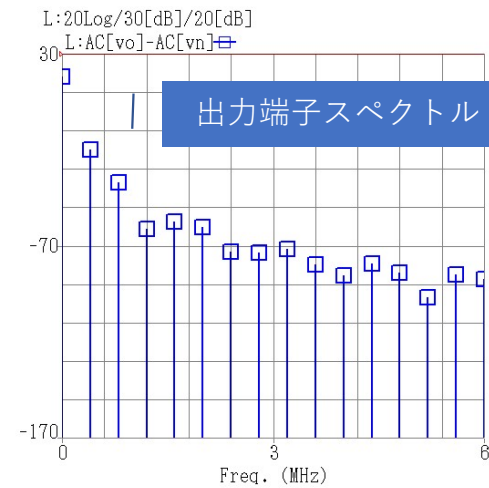
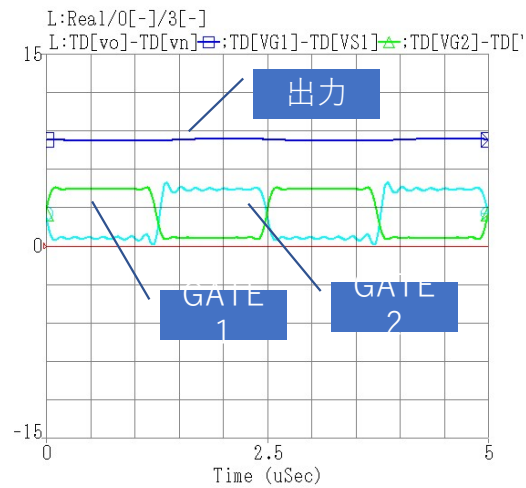
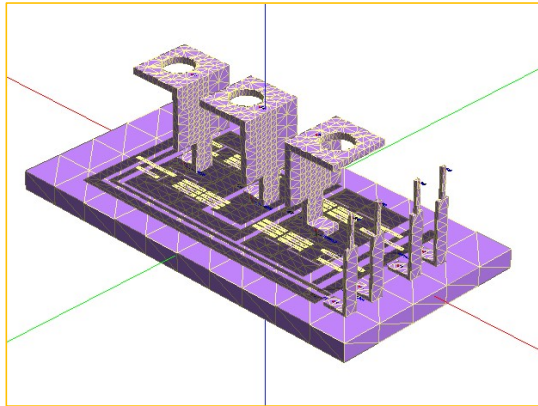
# IGBT動作波形とスペクトル

IGBT出力を脈流状態とするためにCを小さくしている (1mHと10000pFで平滑)

<解析手法>

電磁界解析：3次元MPIEモーメント法

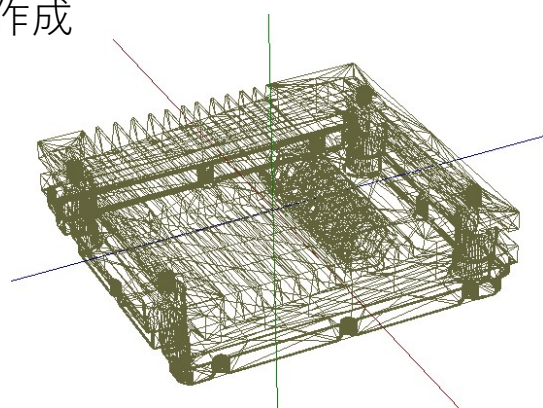
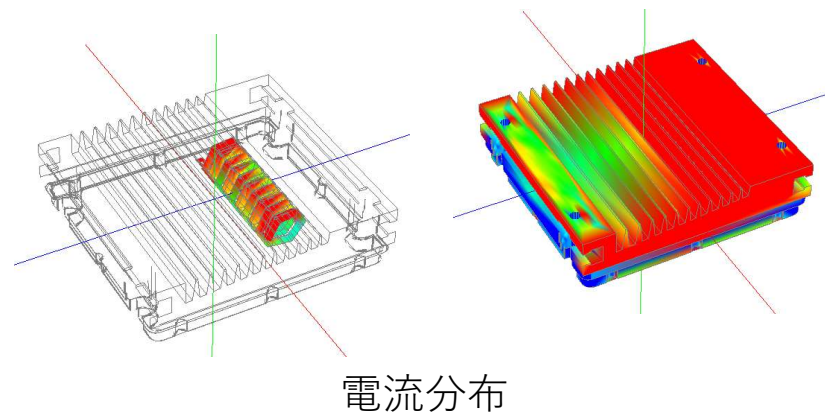
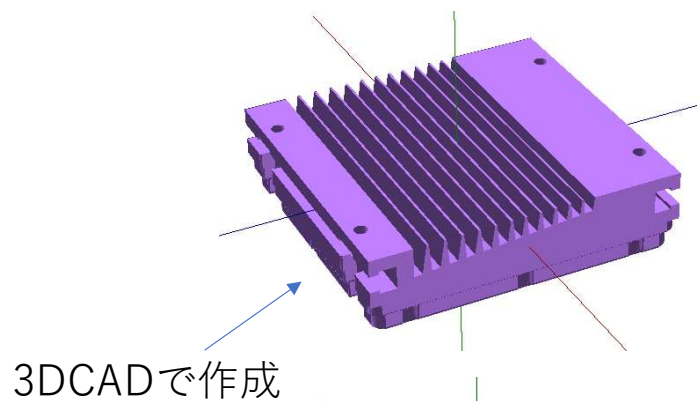
回路解析：ハーモニック・バランス法



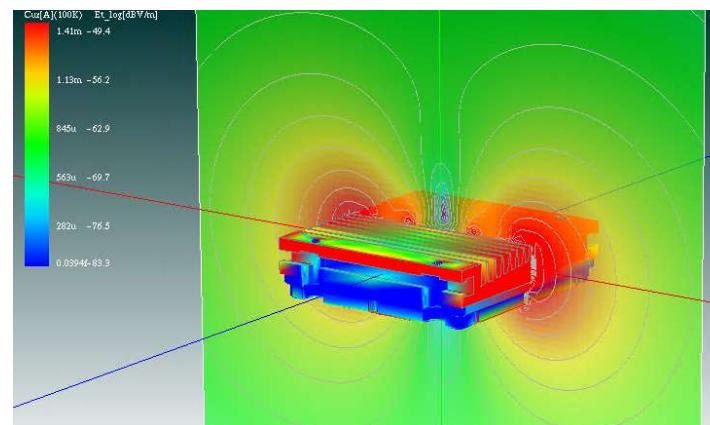
端子表面の電流分布  
@400KHz

# ケース内のコイルからの放射

@100kHz

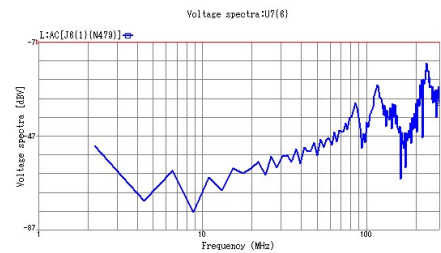
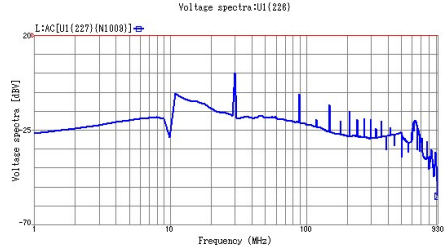
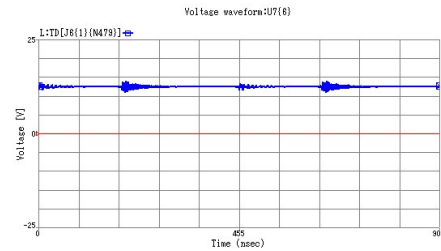
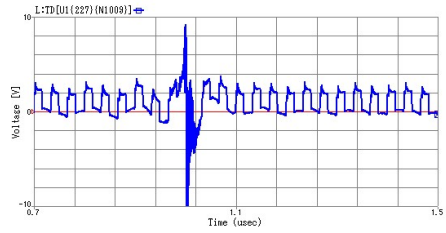


解析時間:4.5分/Freq



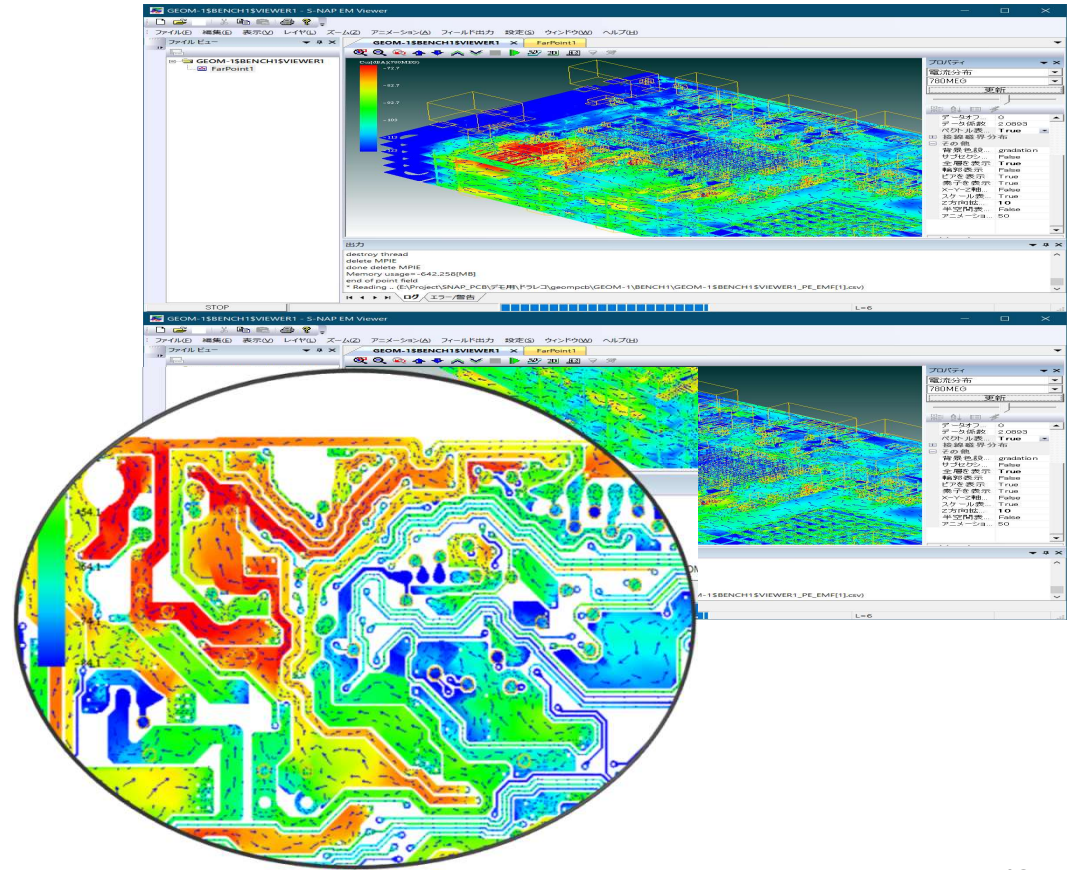
# S-NAP PCB Suite Ver.4

3DMPIEモーメント法+境界要素法



信号+ESDインパルス

DCDCスイッチングノイズ





# まとめ

- 電磁界解析手法の概要を紹介。
- ワイヤレス電力伝送解析を紹介。
- 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

Thank you for your attention.

= Ogawa =