

プリント基板におけるノイズシミュレーション について

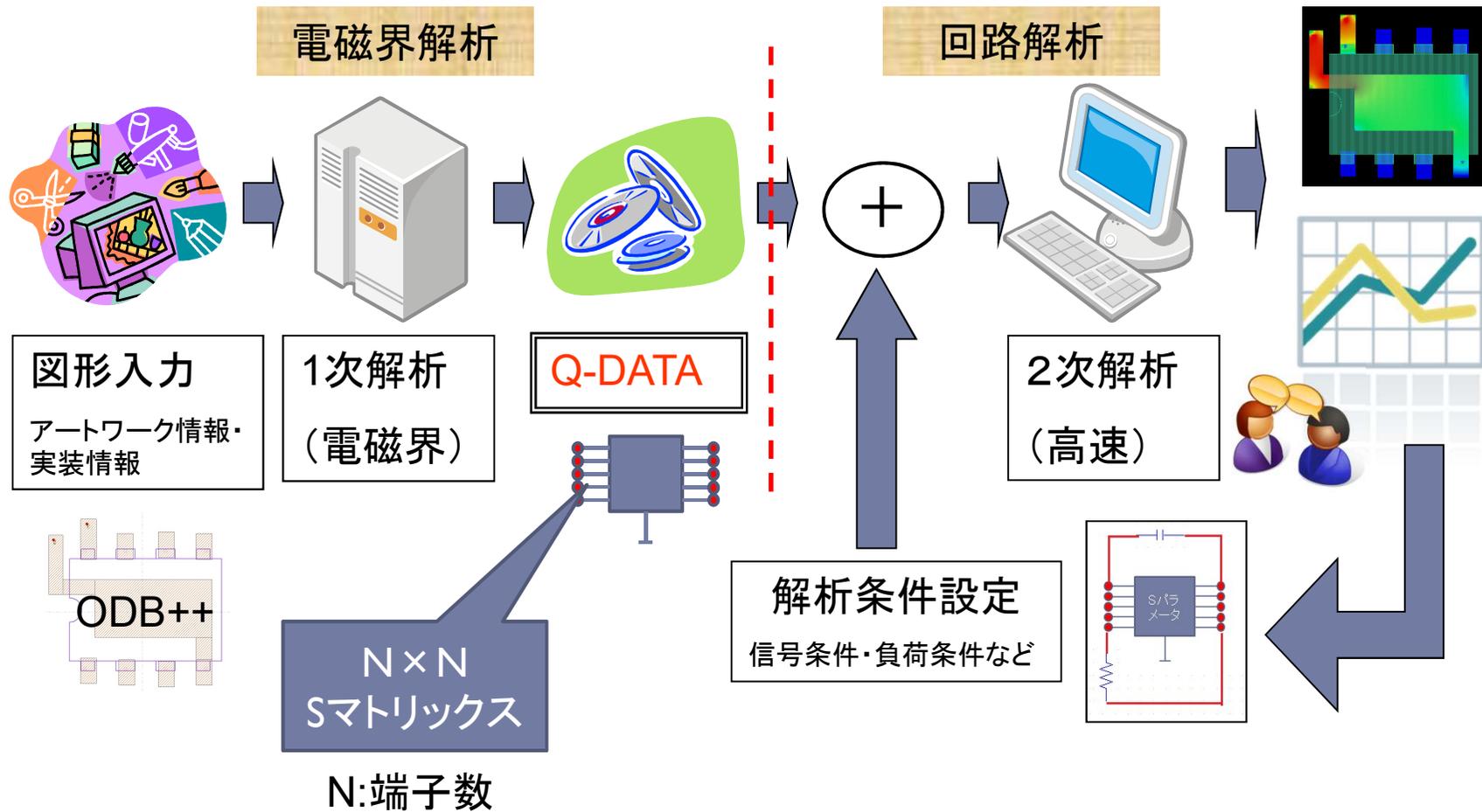
©2018 株式会社 エム・イー・エル

2018年12月

MEL Inc.

S-NAP PCB Suiteの構造

- ▶ 解析処理を分割→電磁界の解析時間問題、実装問題



EMCにおける電磁界解析手法

- ▶ 基板全体, 全層に渡って解析可能なこと
- ▶ キャパシタなどのLCR部品、等価回路を含めて解析可能なこと
(ポートの取扱法)
- ▶ 実用的な時間で解析可能なこと



等価回路化が容易な電磁界手法が必要

M-FDM法 (Multi-layered Finite Different Method)

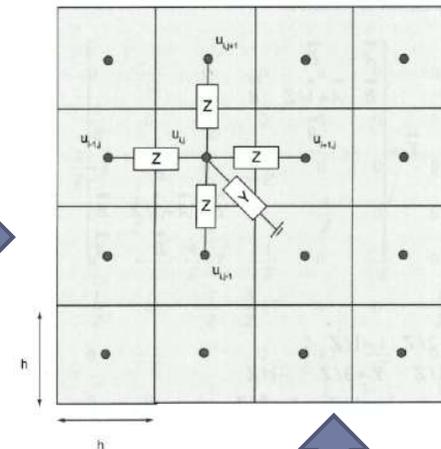
$$\nabla^2 \mathbf{E} + k^2 \mathbf{E} = j\omega\mu \mathbf{J}$$

$$u_{i,j-1} + u_{i,j+1} + u_{i-1,j} + u_{i+1,j} - 4u_{i,j} + h^2 k^2 u_{i,j} = -h^2 j\omega\mu d J_z$$

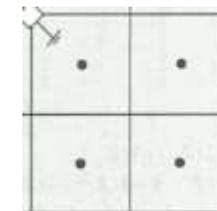
差分方程式の等価回路化

<特徴>

- 素子を実装しての電磁界解析が可能である
- 連立方程式が疎行列になるので高速に解析できる
- 多層化(2.5次元)にも容易に展開できる



MFDでは結合がない \updownarrow BEMを併用



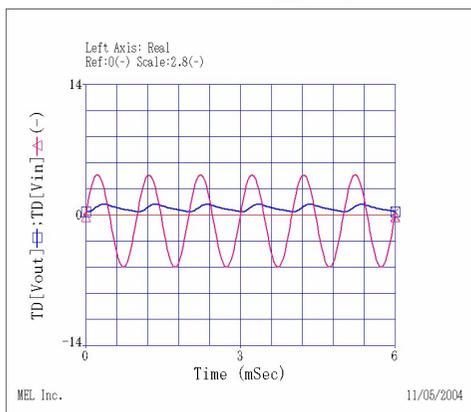
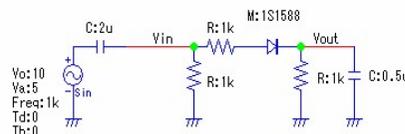
非線形定常応答解析

回路応答 = 過渡項 + 定常項

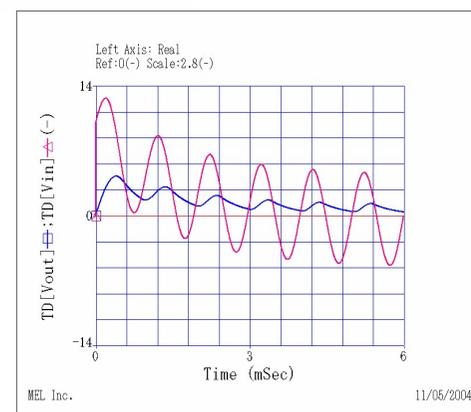
SPICEなどで用いられるトランジェント解析は非線形解析を行います。この解は図のように過渡解と定常解の合成であり、定常解を得たい場合、過渡解が収束するまで待つ必要があります。回路の時定数が大きい場合、過渡解が収束時間は非常に長くなり、またどの時点で過渡解が収束しているのかの判断も難しくなります。



定常解が必要



ハーモニック・バランス解析



トランジェント解析

プリント基板ノイズ問題と解析手法

- 高周波帯の特性が重要視される問題

静電ノイズ、放射ノイズ、EMS

電圧(電界)分布



基板の共振特性、結合、放射特性、
2次ソルバは概ね線形で可

- 電流経路が重要視される問題

スイッチングノイズ、モータノイズ

電流(磁界)分布



スイッチング動作による電流の引き込み

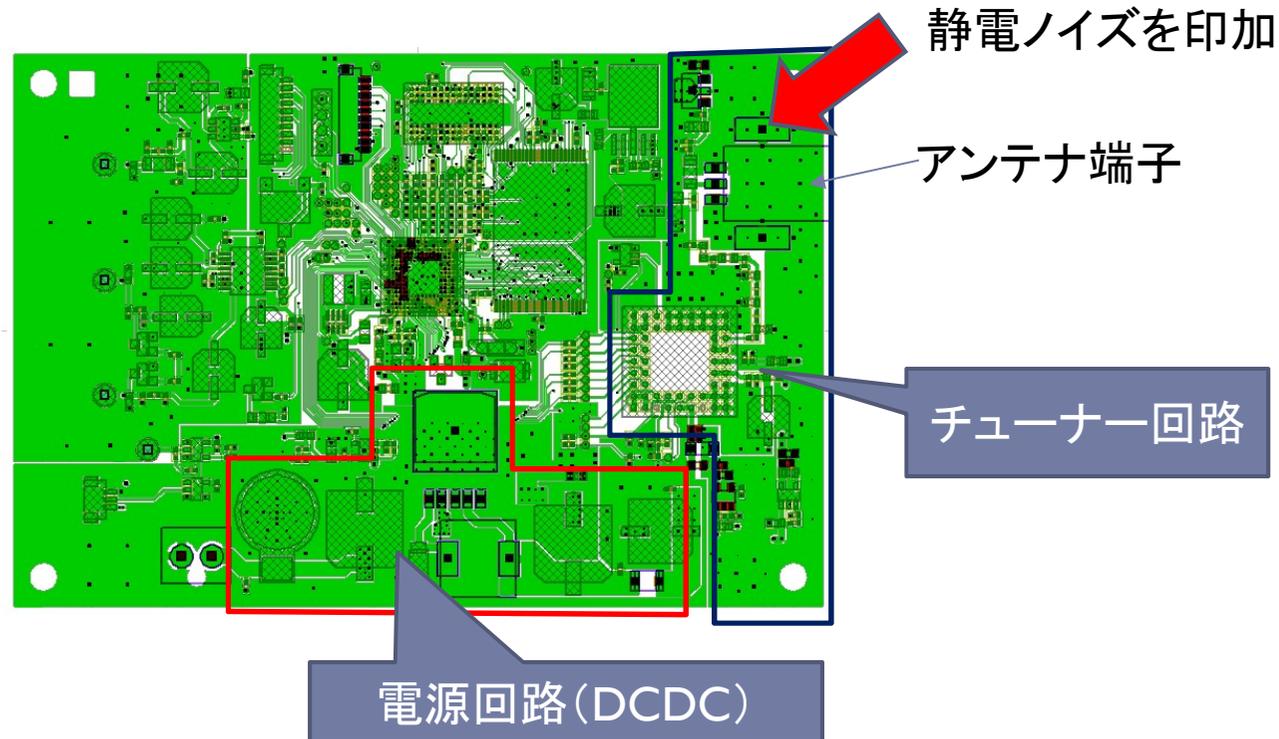


2次ソルバに非線形解析(スイッチング動作)
が必要

静電ノイズ解析：全端子を俯瞰

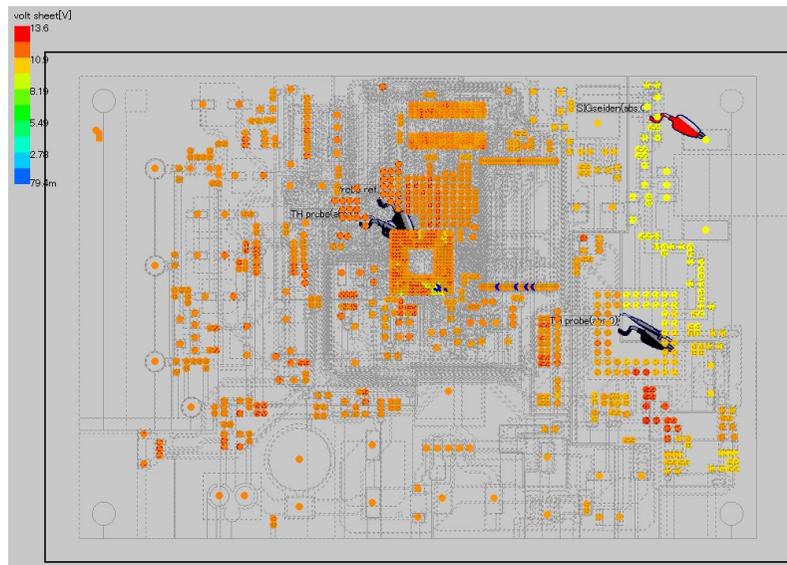
例えば、静電ノイズが印加されたとき
何を調べるべきか？

サンプル基板： 端子数約1400、6層

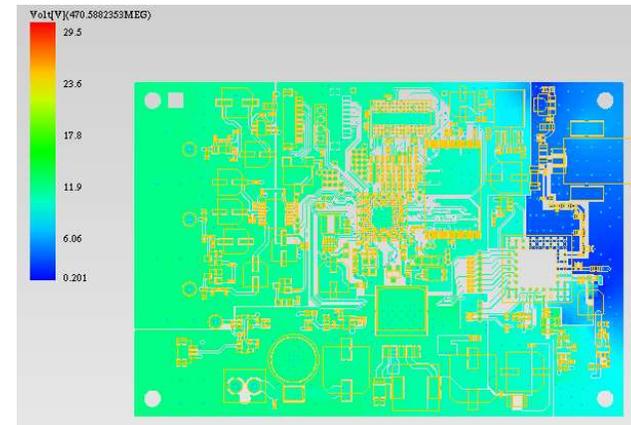


端子電圧とパターンの電圧電流分布

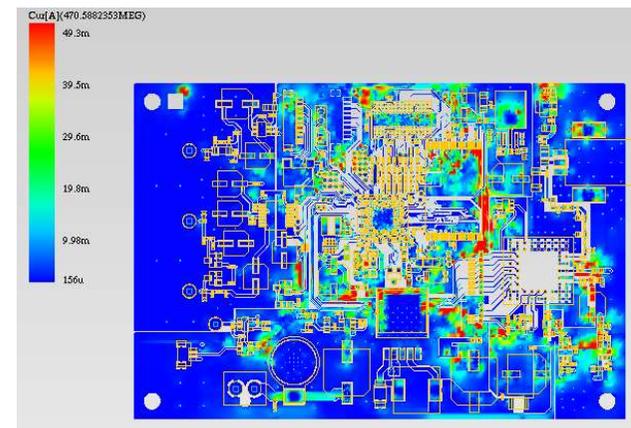
RFコネクタに印加しているが、システム回路部分の電圧が高い



全端子の電圧(色表示)



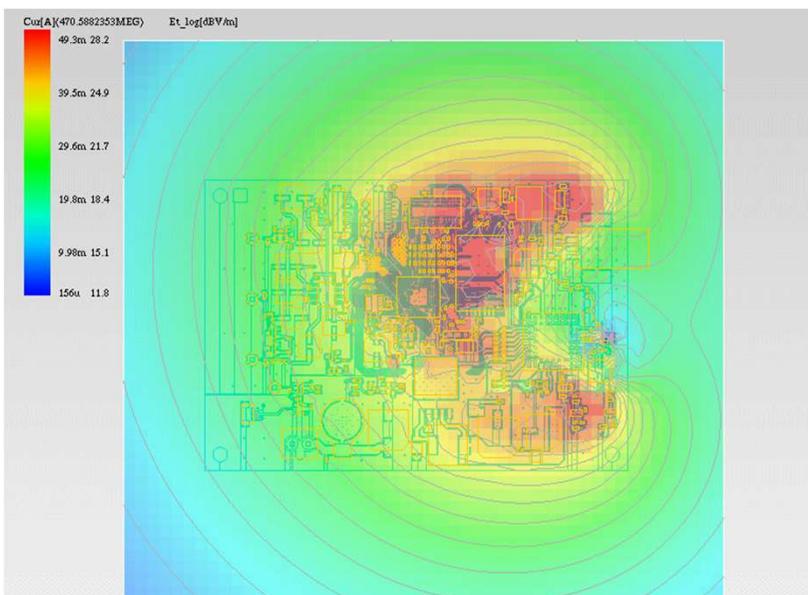
電圧分布 @470MHz



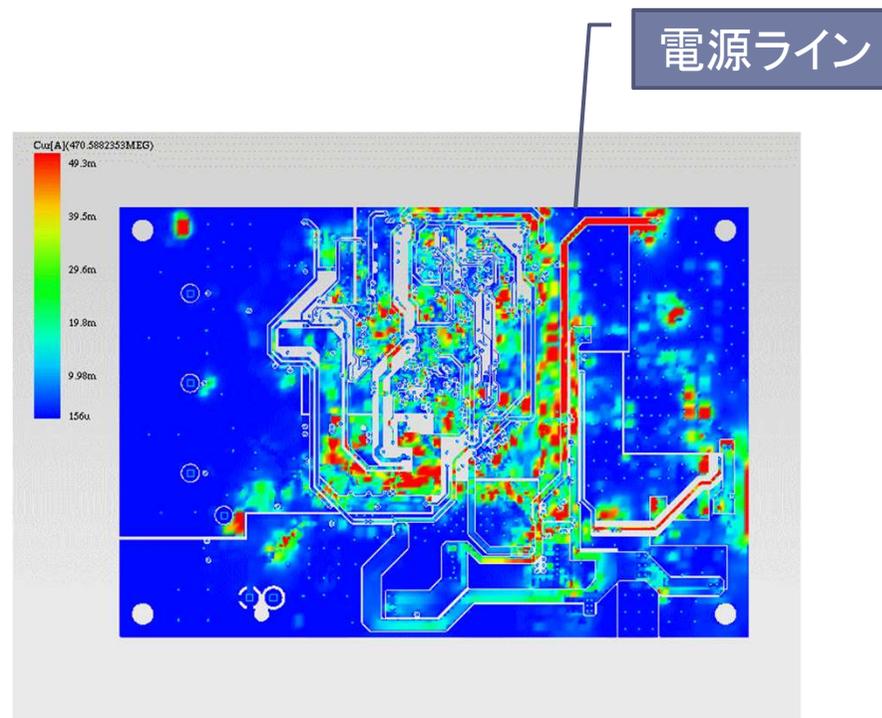
電流分布 @470MHz

ノイズ侵入経路の考察

近傍電界分布や磁界分布を観測することで、侵入経路を推測できる

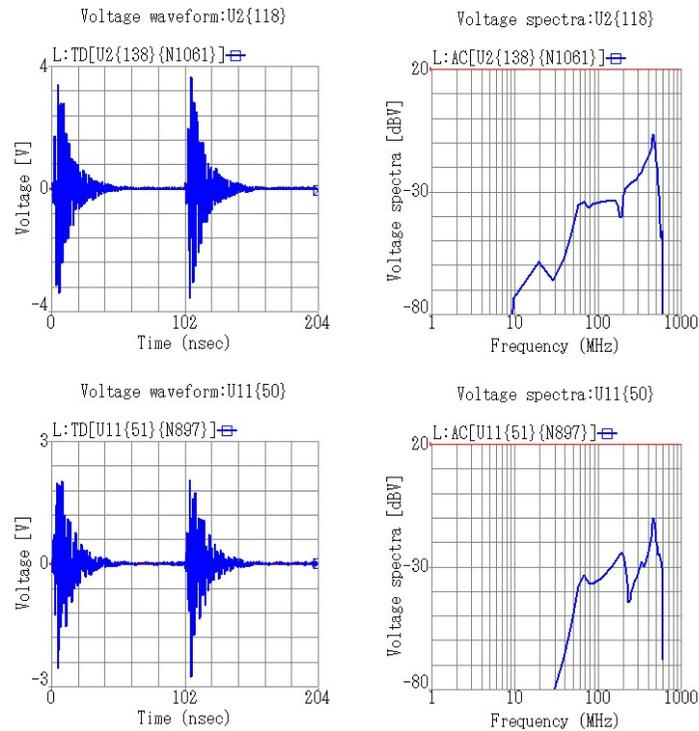


基板上方1mmの電界分布
@470MHz

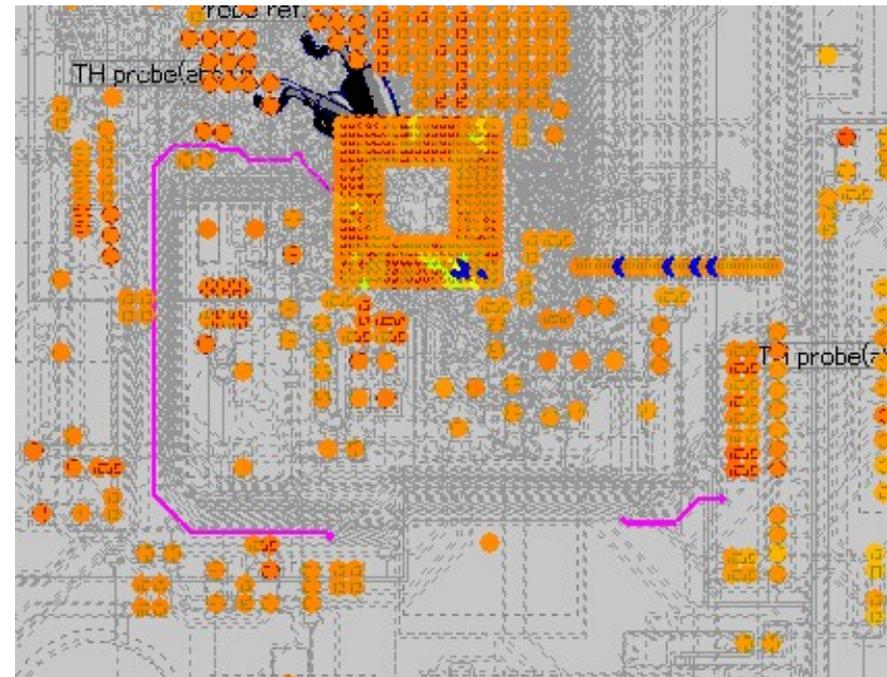


L3層の電流分布 @470MHz

端子電圧波形とスペクトル



CPU電源端子(上段)と
チューナICの電源端子(下
段)の波形とスペクトル

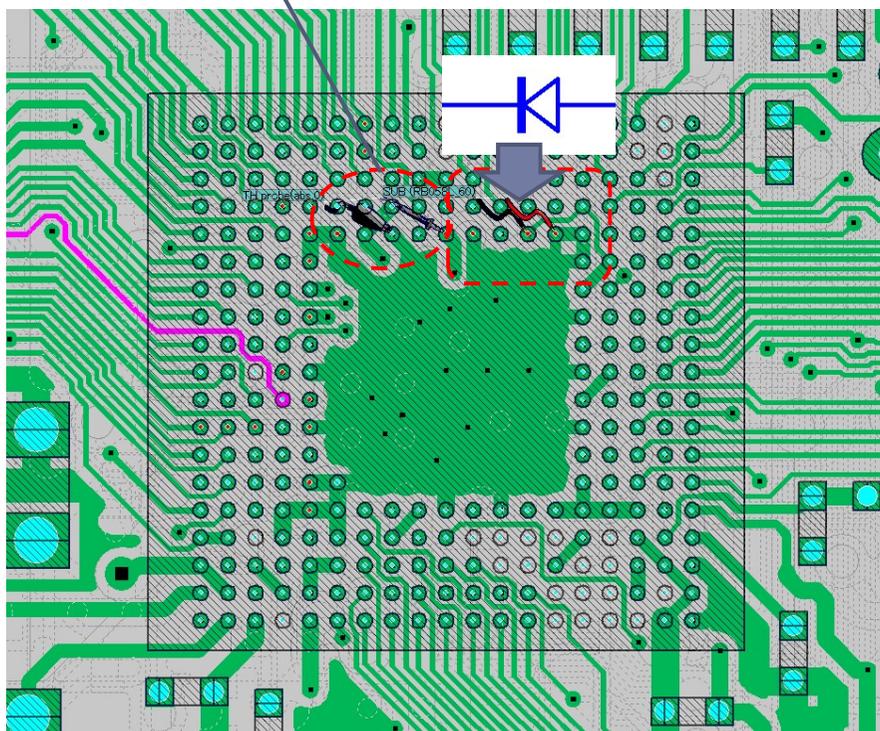


電圧の高い端子を調べると長いラインがつながっている

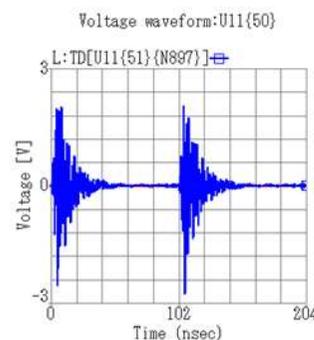
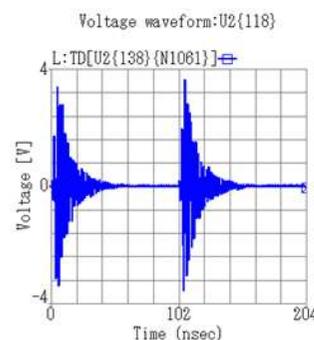
ダイオードの効果

ハーモニック・バランスを用いてダイオードの効果調べる
CPU電源-GND間に挿入、ダイオードはSPICEモデル

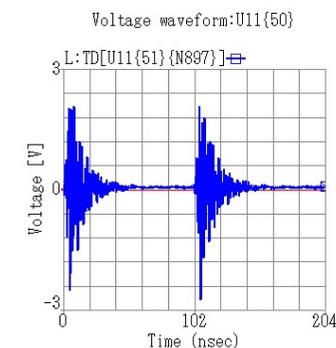
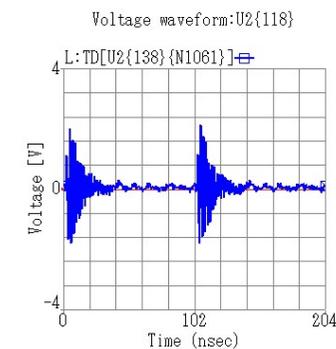
観測点



ダイオード無し



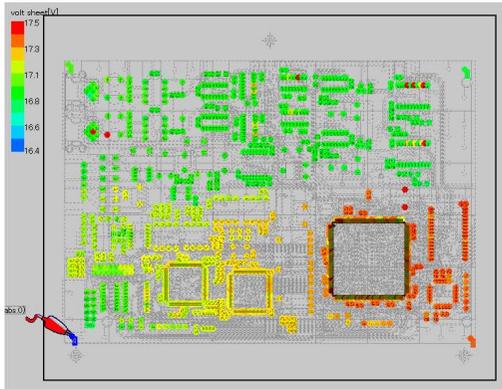
ダイオードあり



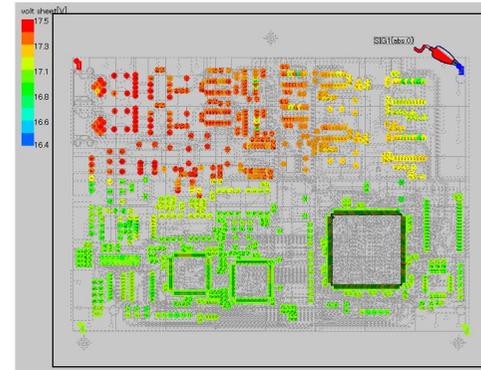
CPU電源端子(上段)とチューナICの電源端子(下段)の波形とスペクトル

ノイズ分布

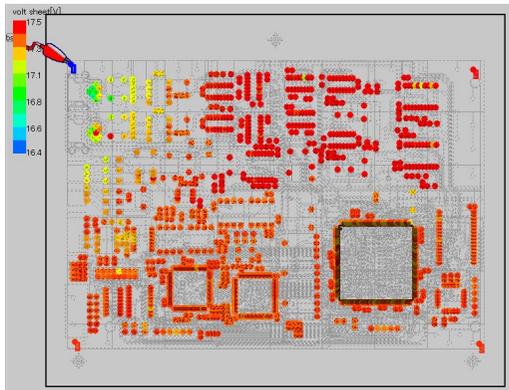
静電ノイズの印加位置により、端子のノイズ分布が異なる



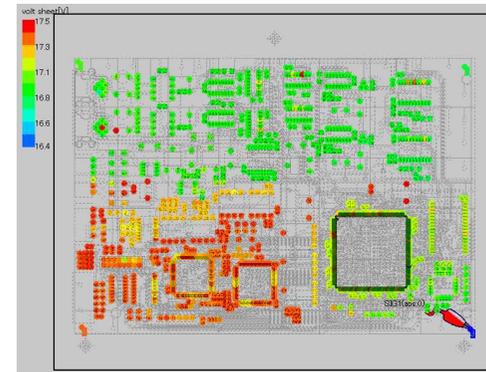
①左下からノイズを印加



③右上からノイズを印加



②左上からノイズを印加

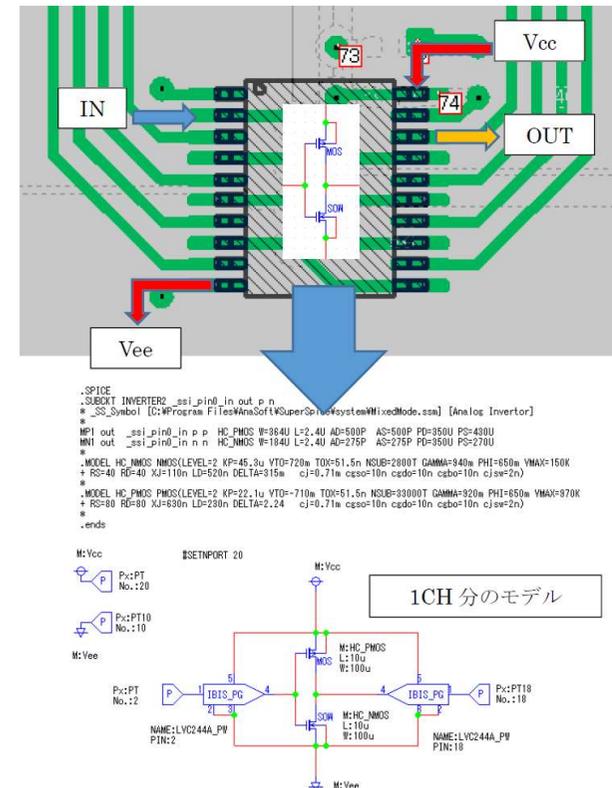


④右下からノイズを印加

スイッチングノイズ：非線形解析

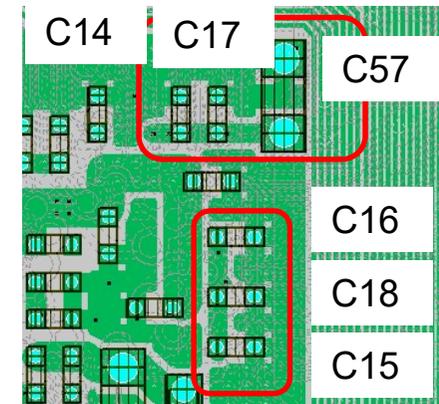
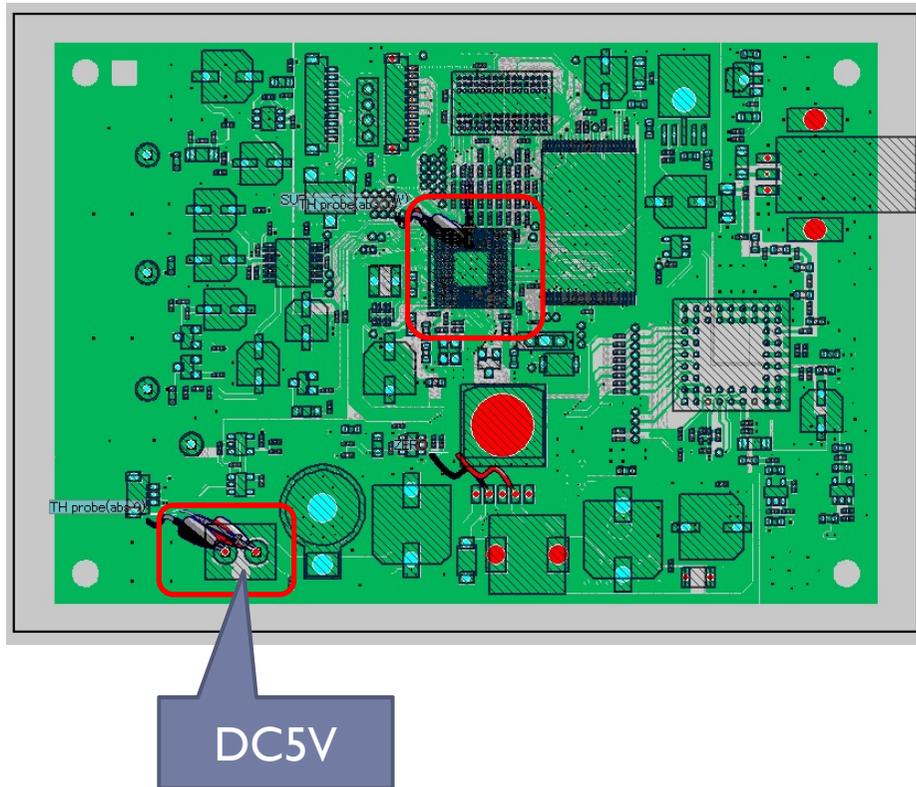
基板上でスイッチング動作を行うことが重要！

- ・信号出力時のスイッチング
- ・DCDCコンバータのスイッチング
- ・モータのスイッチングパルス信号

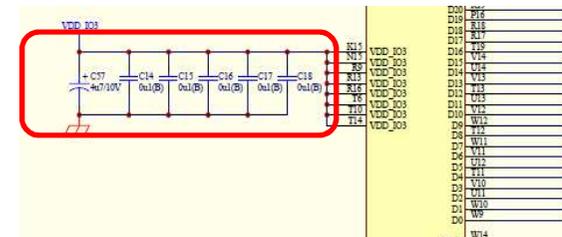


ICの信号出力動作時のスイッチングノイズ

出力バッファがスイッチング動作している場合の電源電圧変動とパソコンの挙動を解析
CN1にDC5Vを印加し、CPUの電源、グランド間にスイッチングモデルを設定。

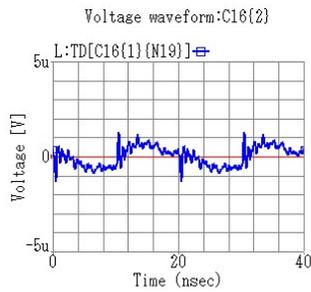


L6層に実装されたパソコン、U2のほぼ裏側

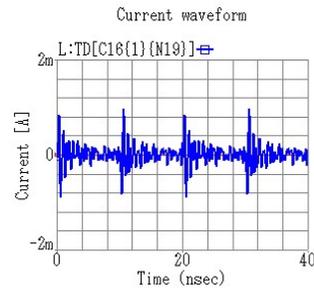


各パスキコンの電圧と電流波形

C16 電圧変動(1uV/div)

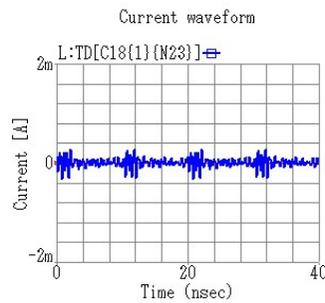
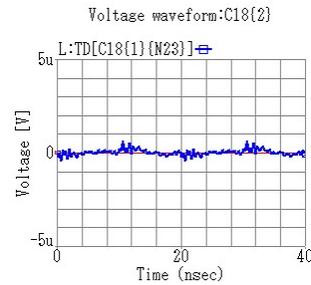


C16 電流(400uA/div)

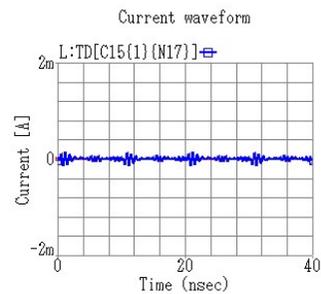
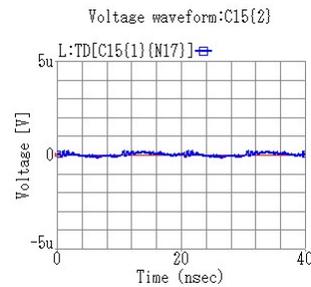


C16

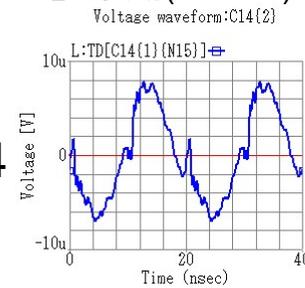
C18



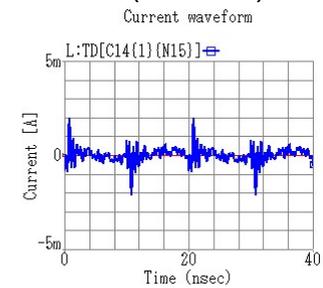
C15



C14 電圧変動(1uV/div)

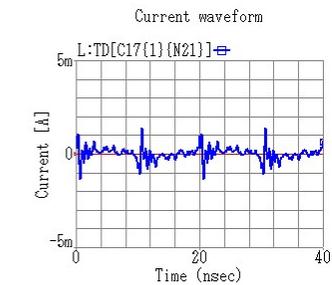
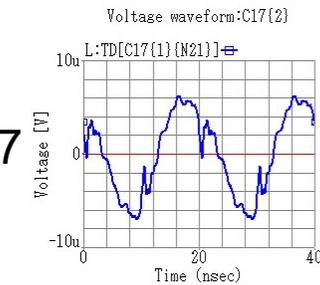


C14 電流(1mA/div)

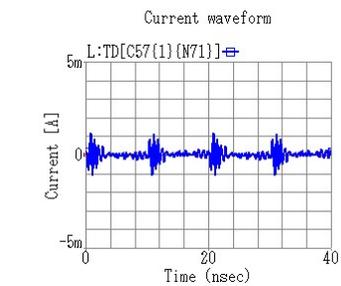
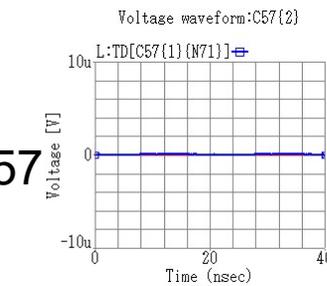


C14

C17

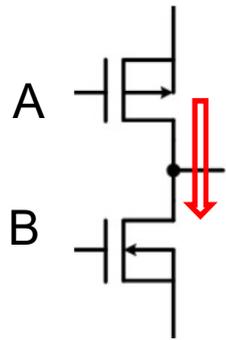


C57

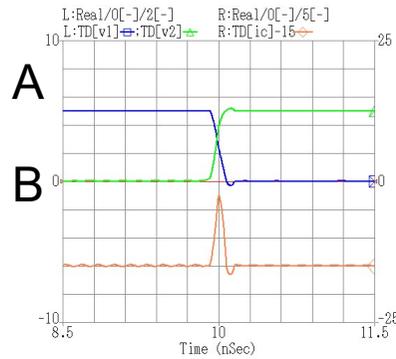
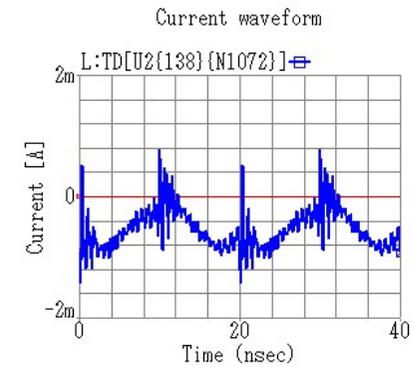
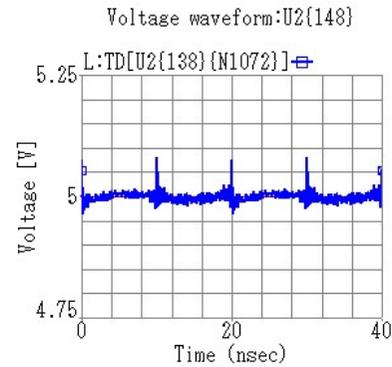


同時スイッチング時の電源電圧波形と電流波形

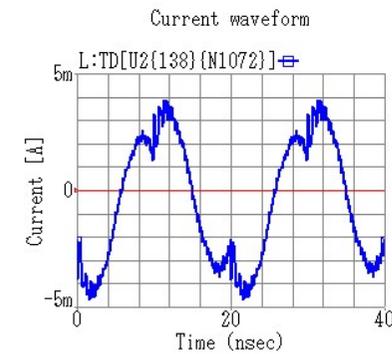
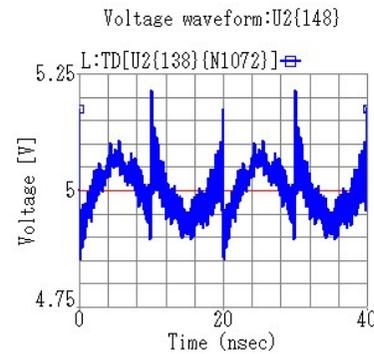
スイッチング素子に0.5度位相ずれの状態を設定し貫通電流を再現



正常な
スイッチング時



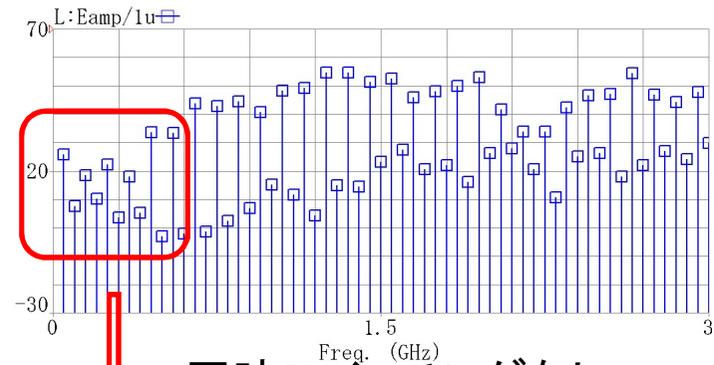
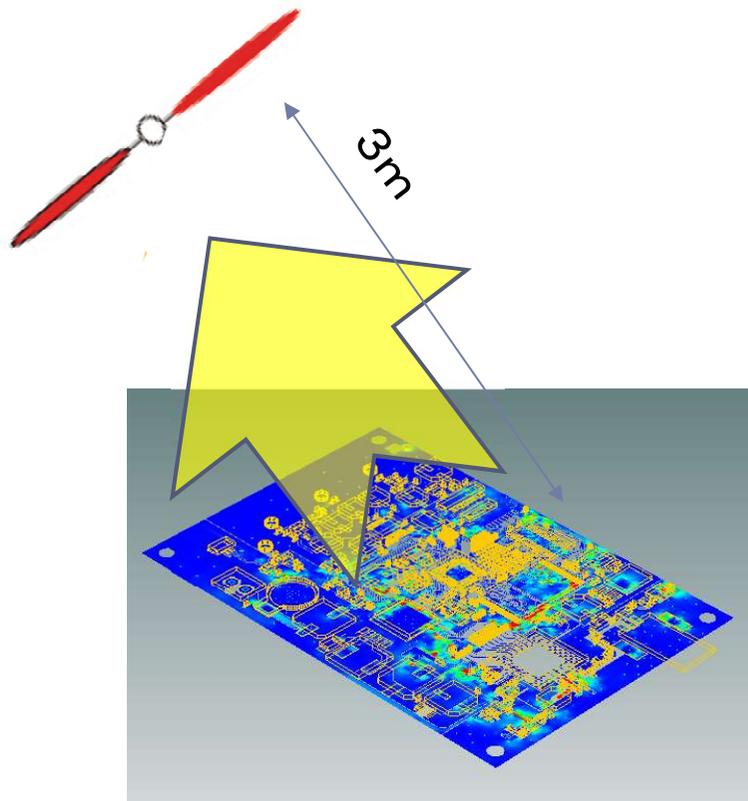
同時
スイッチング時



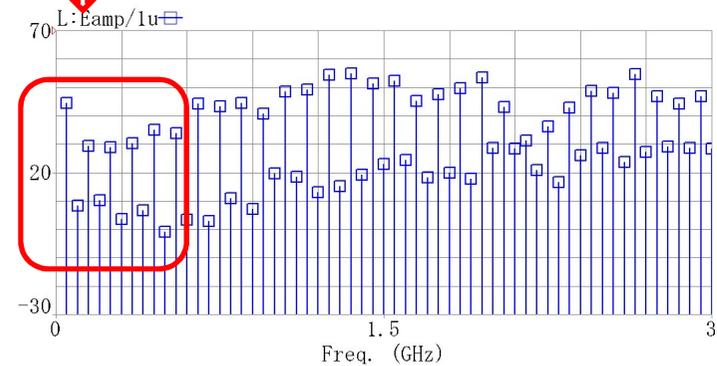
放射ノイズの違い

放射電界は、電流密度から計算可能

同時スイッチングが発生した場合、50MHz~350MHzのノイズスペクトルが10dB以上UP



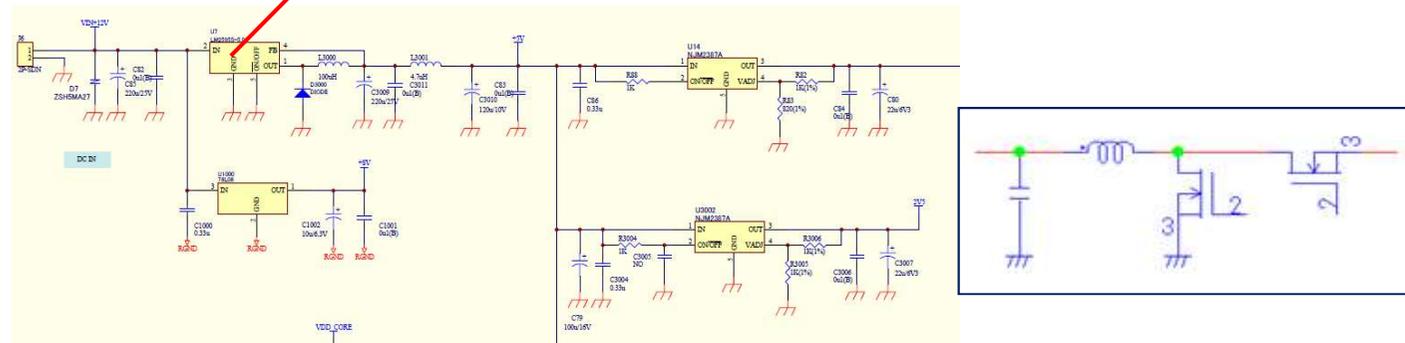
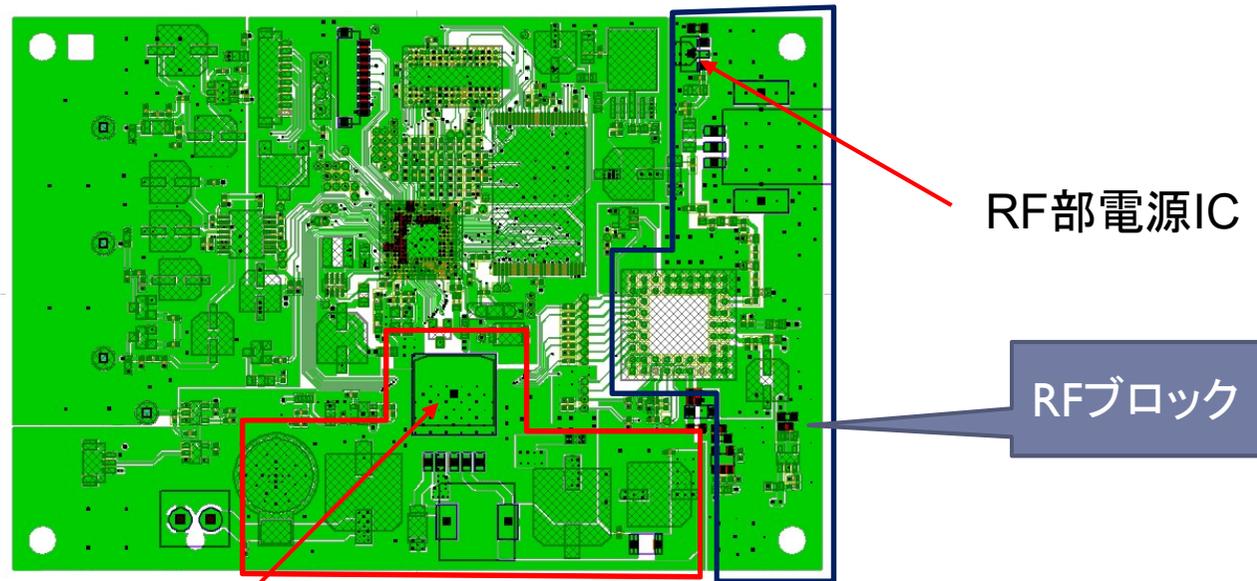
同時スイッチングなし



同時スイッチングあり

DCDCコンバータ部の解析

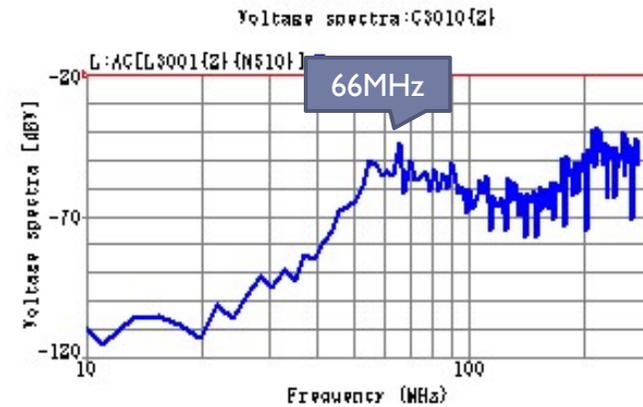
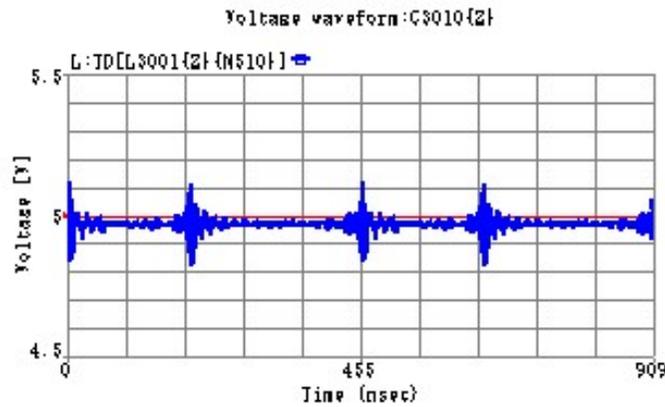
- ・周波数DCDCのシミュレーションは、スイッチングが重要
- ・基板内で動作しているDCDCコンバータのスイッチングノイズがRF部にどれだけ影響するか



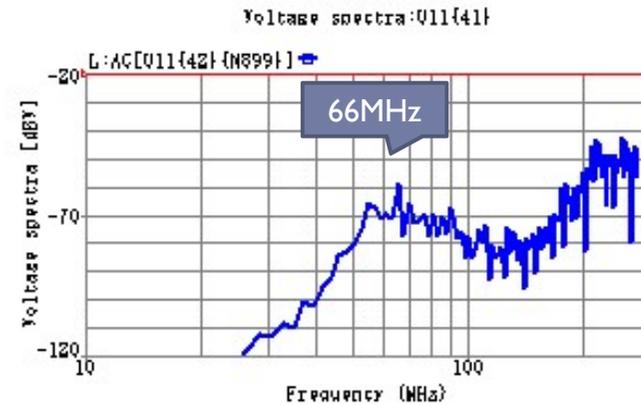
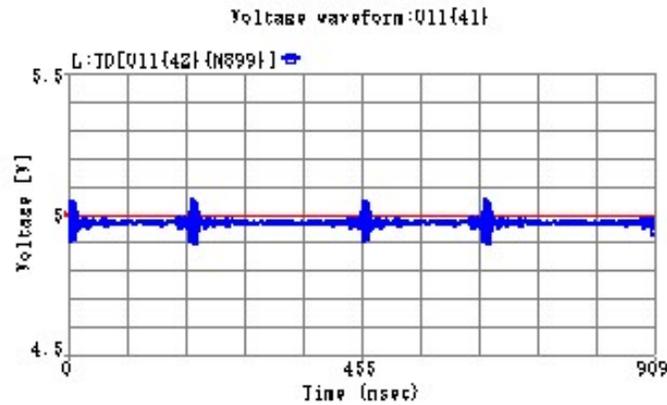
RFブロックのノイズ

66MHzと200MHz付近にノイズスペクトルが確認できる

RF回路ブロックの
入り口のDCライン



チューナIC電源端子

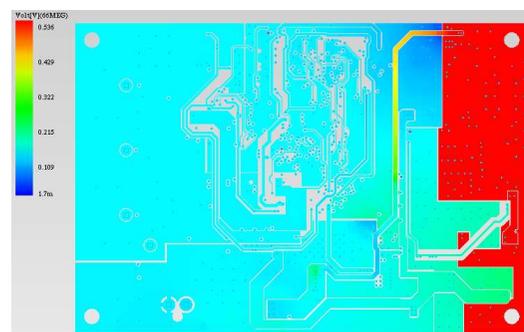


アンテナ電源供給部分 電圧電流分布

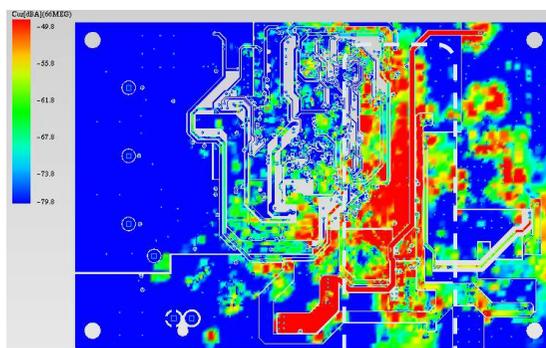
L4層

66MHz

電圧分布



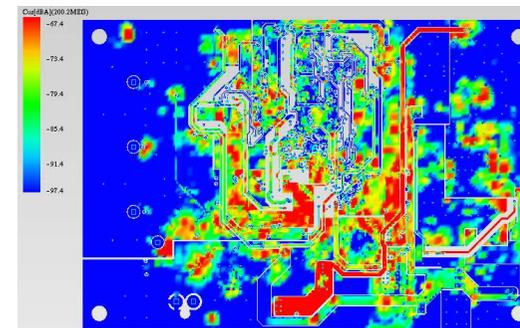
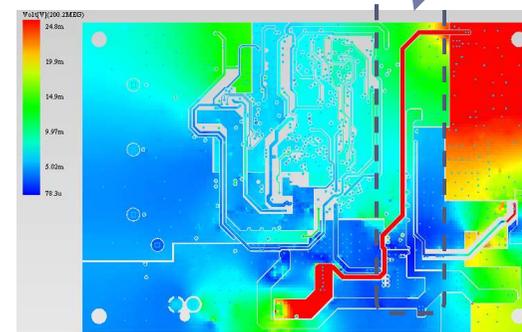
電流分布



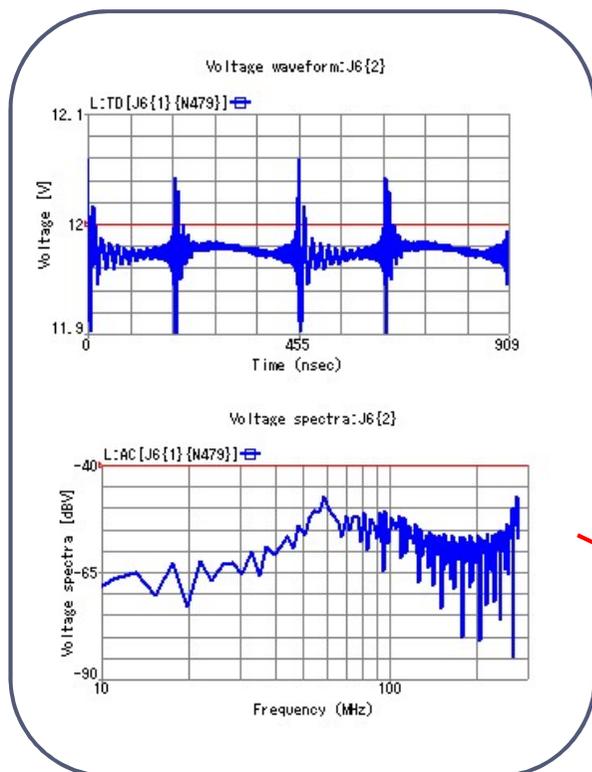
ノイズが分布

200MHz

電圧供給ライン

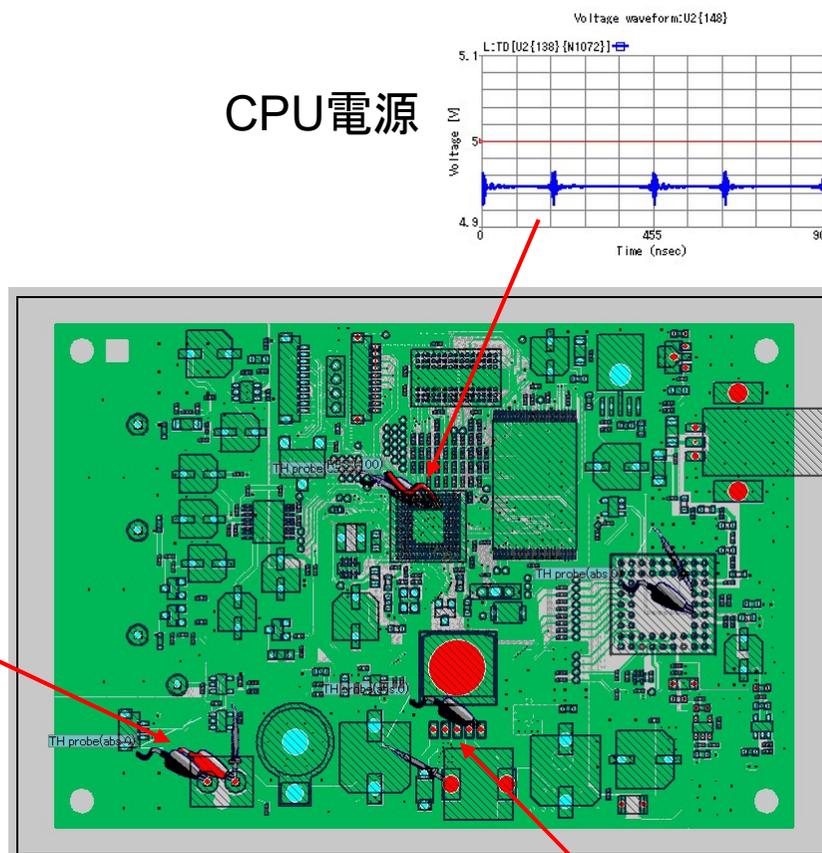


各部の波形

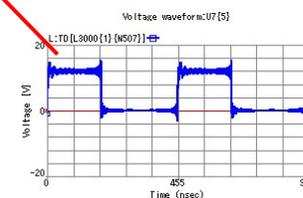


電源端子伝導ノイズ

CPU電源

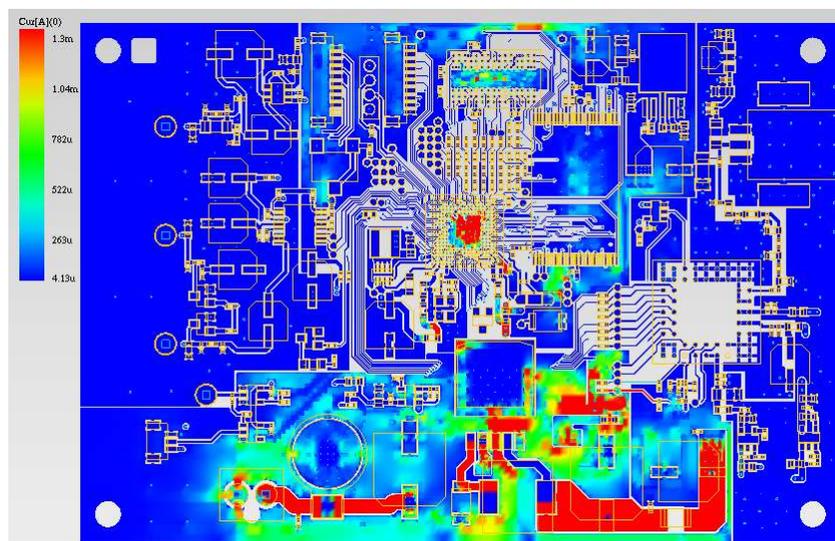


DCDCス
イッチング

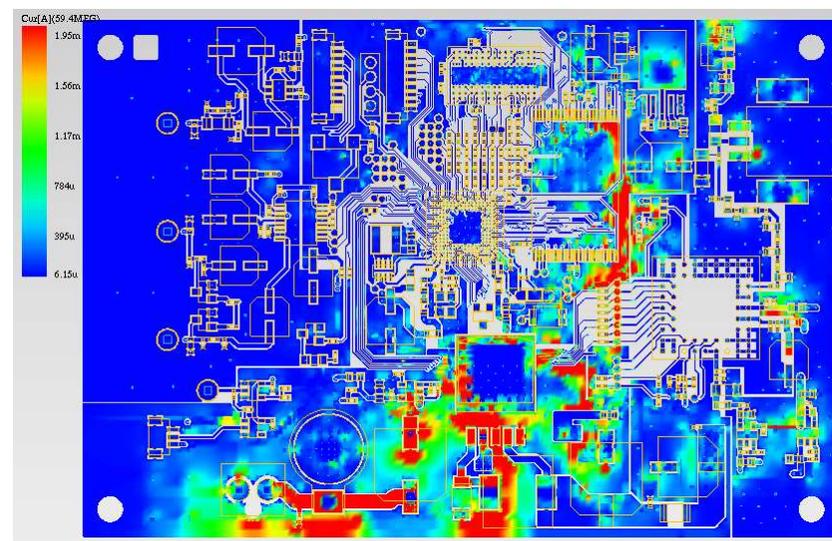


電流分布

L1層における、DCと60MHzの電流分布

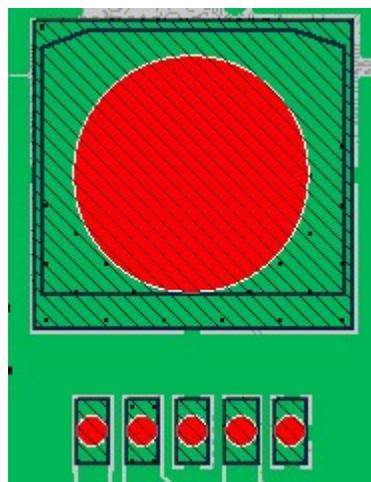


DC

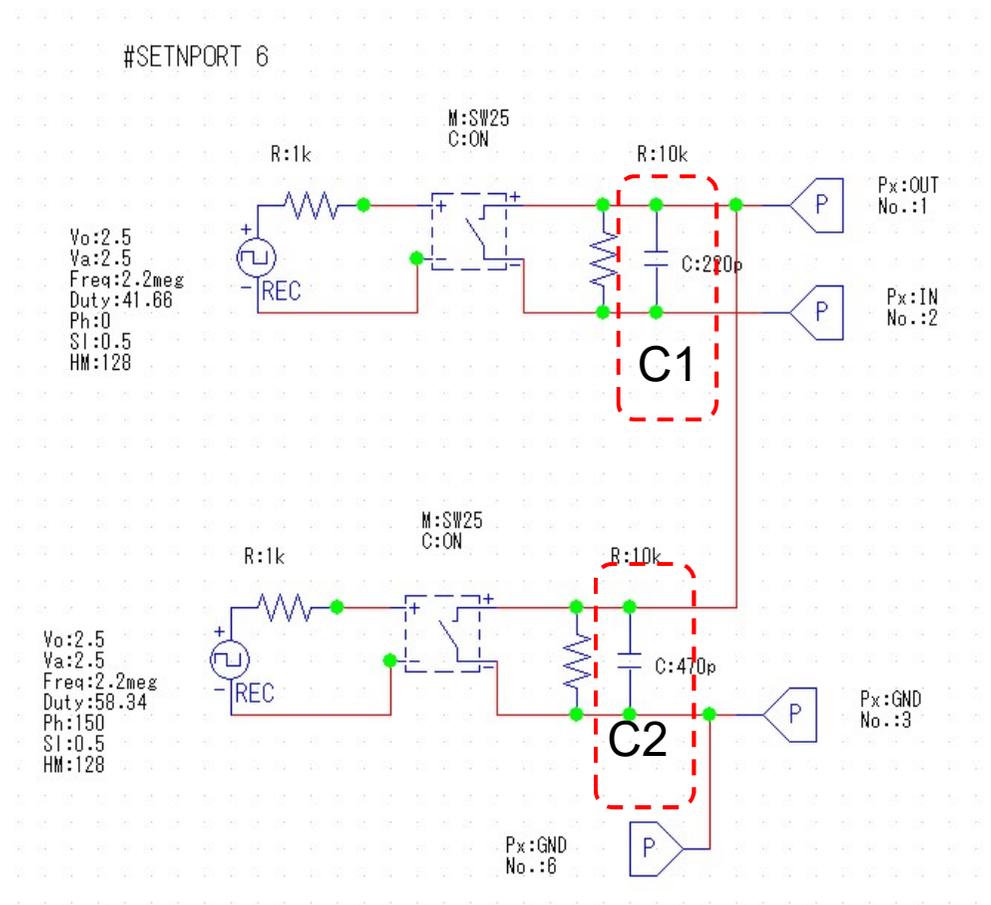


60MHz

スイッチング素子の等価回路



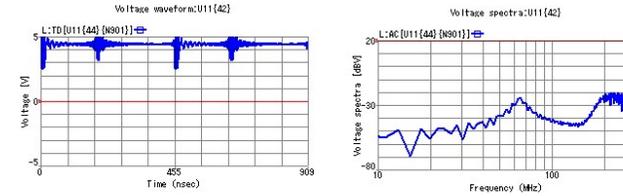
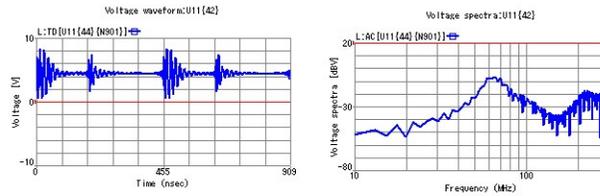
LM2595



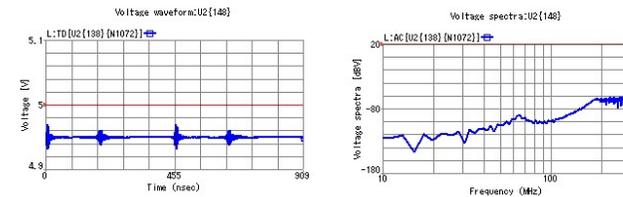
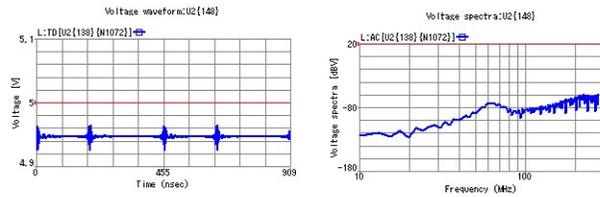
スイッチング素子特性の差

スイッチング素子内のキャパシタを1/10にすると、60MHzの伝導ノイズは180MHzに移動

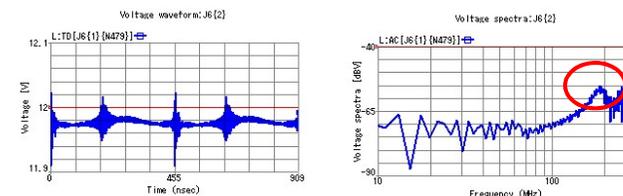
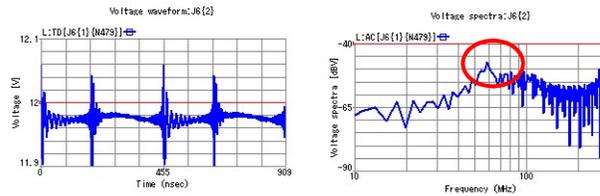
チューナ
IC



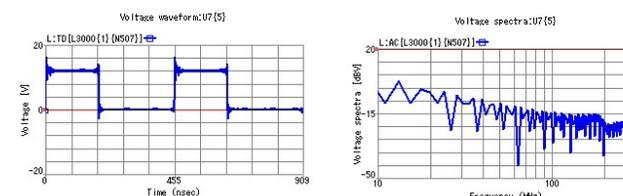
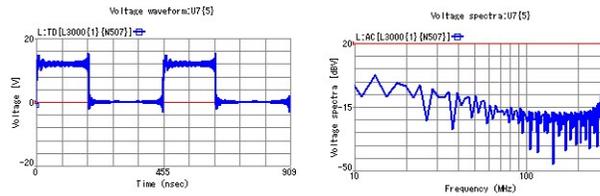
CPU



電源端子
(伝導)



DCDC出力



C1=220pF C2=470pF

C1=22pF C2=47pF

3次元モーメント法電磁界 (S-NAP/Wireless)

$$\begin{aligned} \nabla \times \mathbf{E} &= -j\omega\mu\mathbf{H} \\ \nabla \times \mathbf{H} &= \mathbf{J} + j\omega\epsilon\mathbf{E} \end{aligned}$$

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



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

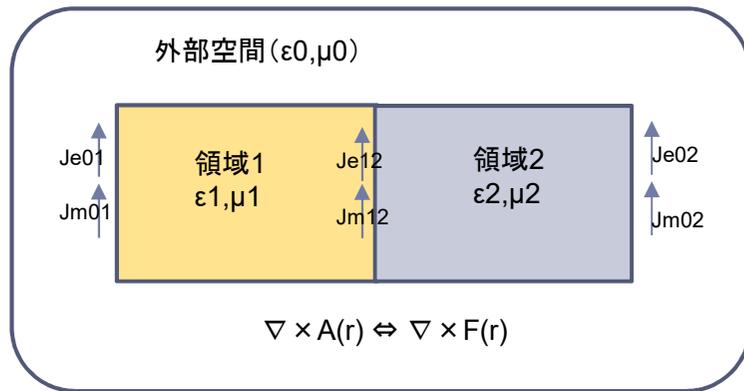
ここで、

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

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

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

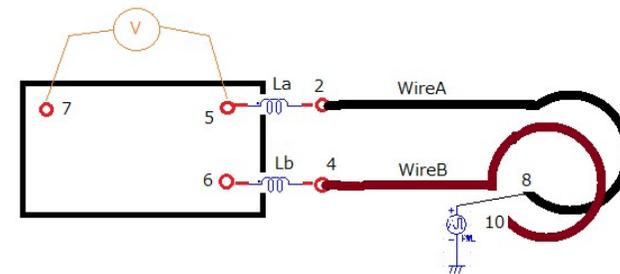
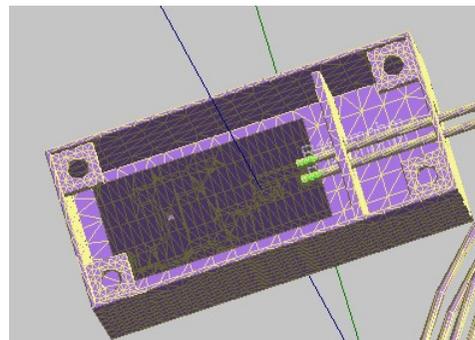
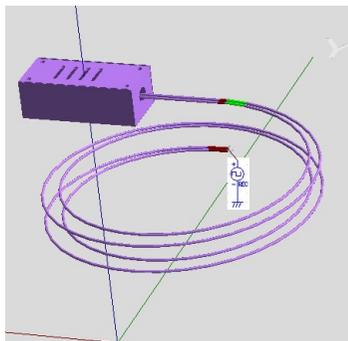
k: 領域番号



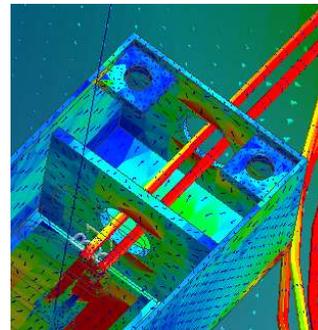
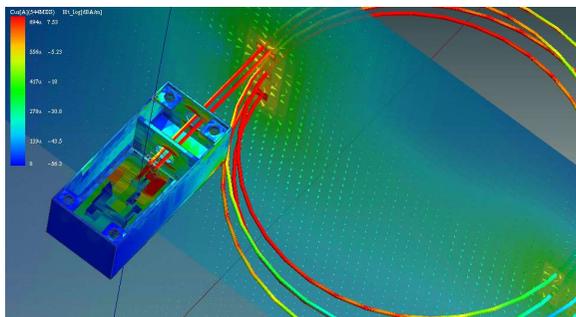
積分形の解
MPIE (Mixed Potential Integral Equation)

3次元電磁界解析（筐体、ワイヤ）

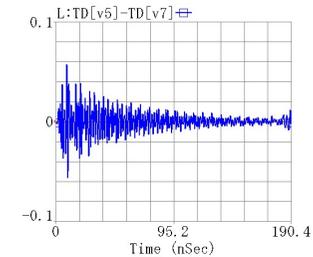
筐体やワイヤを含む全体解析



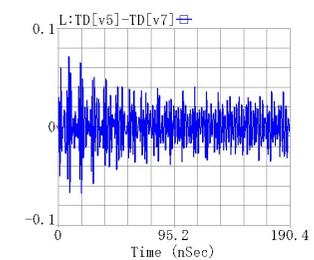
等価回路



ケースの電流分布と近傍磁界



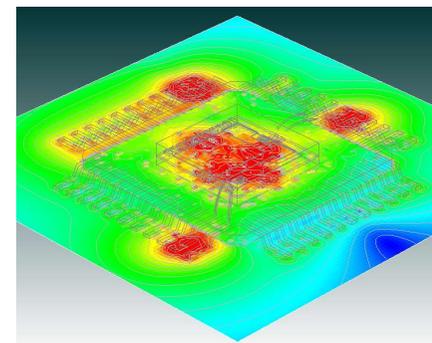
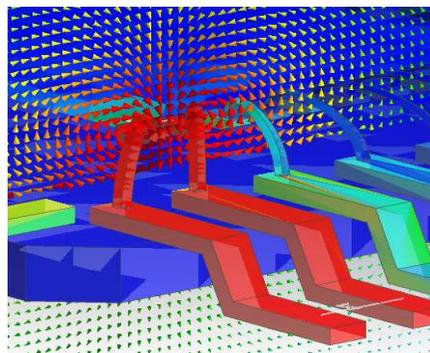
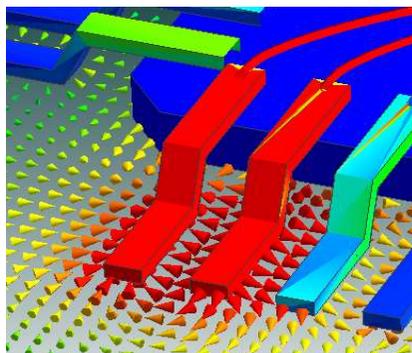
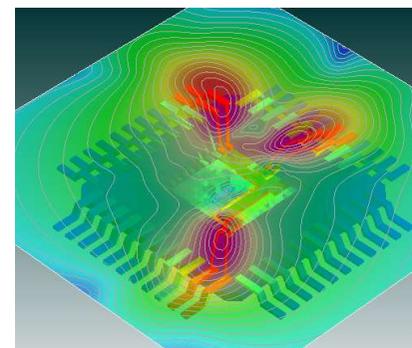
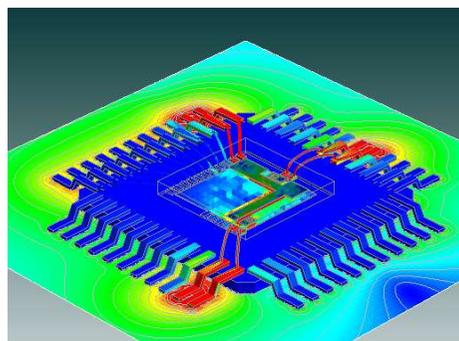
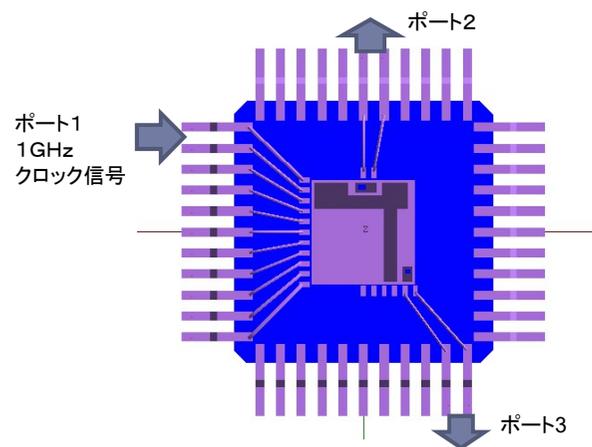
$L_a=L_b=1\text{nH}$



$L_a=1\text{nH}$
 $L_b=10\text{nH}$

3次元電磁界解析 (ICパッケージ)

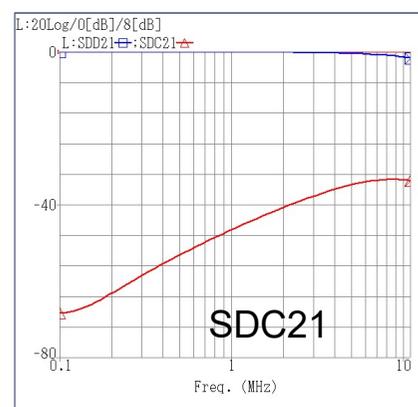
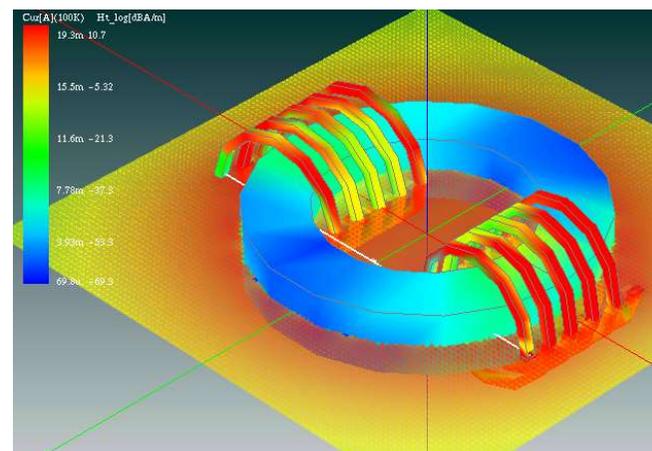
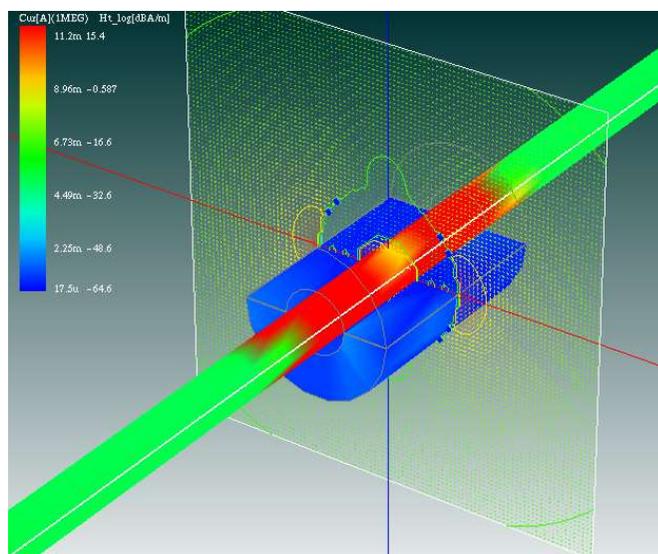
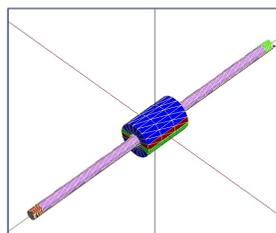
ボンディングワイヤや端子の相互結合を考慮する必要がある



端子近傍の電界磁界ベクトル

3次元電磁界解析（クランプフィルタ）

- ・EMC問題ではフェライトの効果も重要
- ・コモンモード特性は、ミックスドモードSパラメータを用いる



まとめ

- ▶ EMCシミュレーションはプリント板全体の特性解析が必要
- ▶ 電磁界解析＋回路解析が必要。

- ▶ 静電ノイズ解析などでは、全端子を俯瞰する必要がある
- ▶ スイッチングノイズ解析は、基板内でのスイッチング動作が重要→非線形解析が必要
- ▶ 3次元的結合を考慮する場合は、3次元電磁界が必要