

多層プリント基板における電源－グラウンド層間の共振の解析

Analysis on Resonance between Power-Ground Layers of Multilayer Printed Circuit Board

大力 賢次* 軽部 俊幸* 宮下 純一** 蜜澤 雅之**

1. はじめに

本報告は、長野県精密工業試験場と茨城県工業技術センターの共同により、平成10年4月から実施している「プリント配線板の電磁界分布とノイズ低減設計の研究」についての研究報告である。

電源パターンがEMIへ及ぼす影響は無視できるレベルではない。このことは、Vcc・GND各層(電源パターン)の設計次第で、部品の増加(コストの増加)無しにノイズ低減が可能であることを示唆している。そこで、ノイズ電流の解析により電源パターンのEMIにおける最適化設計を実施できれば、設計段階での低コストなノイズ低減が実現可能である。このような技術を確立するための基礎研究として、プリント配線板の電流・電磁界の分布を解析して、その解析結果とEMIの関係を明確にし、パターン設計時におけるノイズ低減技術確立のために本研究を実施した。

EMC対策設計技術としてプリント基板からの放射ノイズについて伝送路パターンの影響やグラウンドパターンのスリットの影響[1][2][3]などの研究が進められてきた。最近では電源－グラウンド層間の共振が放射ノイズを大きくする一因であることが知られ、対策方法が検討されている[4][5][6]。

多層基板では電源とグラウンドパターンをそれぞれ一層化し対向させて容量性をもたしている。これは、ICのスイッチングの際に電源パターン(Vcc)とグラウンドパターン(GND)で起こるバウンス電圧[7]を抑制するためである。しかしながら、これらの層は結果として平行平板共振器を形成することとなるため、その共振点では対策効果が薄れてしまう場合(図1)や逆に放射ノイズを増大する要因となる場合があり、基板パターン設計の際にはこの共振現象を考慮することが大切である。

本研究ではこの電源－グラウンド層間の共振について、プリント基板の大きさ、誘電体の厚み、励振の位置などの影響をTLM法(Transmission Line Method)による高周波電磁界解析ソフトウェア(KCC社 Micro-Stripes)を用いて解析を行った。共振周波数はネットワークアナライザを用いて入力反射係数S11により測定できるが、本シミュレーション結果とよく合致することが確認されている[8]。

2. 理論

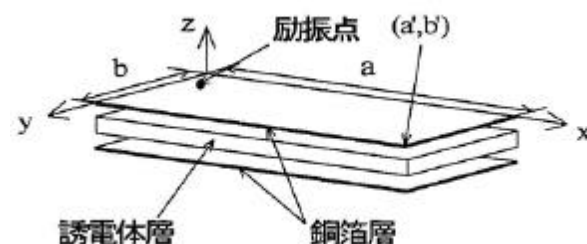


図2 両面プリント基板

図2に示す長さa、幅bの両面基板において、上下の銅箔層が電圧によって励振される場合、x・y成分は磁界、z成分は電界分布となる。進行方向はx・y方向であり、TE波(Transverse electric wave)となる。

この時、ヘルムホルツの方程式

$$\begin{aligned}\nabla^2 \psi + k^2 \psi &= 0 \\ k^2 &= \omega^2 \varepsilon \mu - j \omega \mu \sigma\end{aligned}\tag{1}$$

が成り立つ。ただし、 ψ はHまたはEである。

共振の影響により対策効果が薄れた

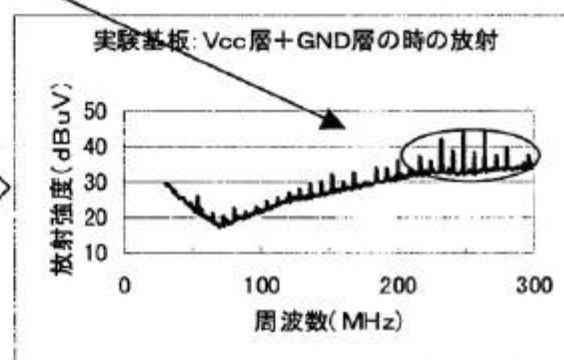
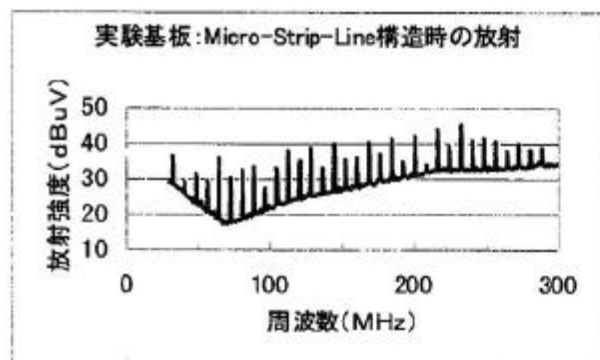


図1 電源－グラウンド層間の共振の影響

共振時には E_z が $x=0, a$ あるいは $y=0, b$ で最大値となり、 H_x は $y=0, b$ で 0、 H_y は $x=0, a$ で 0 となる。これらの条件より

$$\begin{aligned} H_x &= H_{x0} \cos k_x x \sin k_y y \\ H_y &= H_{y0} \sin k_x x \cos k_y y \\ H_z &= H_{z0} \cos k_x x \sin k_y y \end{aligned} \quad (2)$$

ここで H_{x0} 、 H_{y0} 、 H_{z0} は定数であり、

$$\begin{aligned} k_x &= \frac{m\pi}{a} \quad m=0,1,2,3\cdots \\ k_y &= \frac{n\pi}{b} \quad n=0,1,2,3\cdots \end{aligned} \quad (3)$$

である。このとき波数 k は

$$\begin{aligned} k^2 &= k_x^2 + k_y^2 \\ &= \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 \end{aligned} \quad (4)$$

で与えられる

また、

$$k = \omega / v \quad (5)$$

の関係より TE_{mn} モードの共振周波数 f_{mn} は

$$f_{mn} = \frac{v}{2\pi} k = \frac{c}{2\pi\sqrt{\epsilon_r}} k \quad (6)$$

となる。

ただし、 c は自由空間中の光速 ϵ_r 誘電体の実効誘電率

3. 実験

3.1 基板の大きさの影響

図2に示した両面プリント基板において、基板の大きさが $280\text{mm} \times 100\text{mm}$ (モデルA)、 $350\text{mm} \times 150\text{mm}$ (モデルB) の2つの場合について解析を行った。信号源は位置 $(x, y) = (10, 90)$ にて上下の銅箔層間で励振させた。このとき銅箔厚 $50\mu\text{m}$ 、誘電体厚 1.6mm 、誘電率 ϵ_r は 4.3 とした。(以下の実験では変更がない限りこれらのパラメータは同じ値である)

3.2 対向する面の大きさの影響

図2の両面プリント基板において、誘電体の大きさを $a=280\text{mm}$ 、 $b=100\text{mm}$ とし、励振は前項と同様に、位置 $(x, y) = (10, 90)$ にて上下の銅箔層間で行う。この時、下側の銅箔層の大きさを誘電体と同じ大きさに固定し、上側の銅箔層の大きさ (a', b') を表1に示すように設定して上下層の対向する面の大きさの影響について解析を行った。

表1 上面の銅箔層の大きさ

モデル	a' (mm)	b' (mm)
A	280	100
C	140	100
D	140	80

3.3 励振点の位置の影響

図2の両面プリント基板において基板の大きさを $a=280\text{mm}$ 、 $b=100\text{mm}$ に固定する。表2に示す位置にて上下の銅箔層間で励振した場合について解析を行った。

表2 励振点の位置

モデル	信号源(x,y)
A	(10,90)
E	(40,50)
F	(140,50)

3.4 信号線の影響

平行平板に対して励振源となる伝送線路の影響について、層の中間と外側に伝送線路を配置した場合の影響について実験を行った。

図3に信号線路を中層に持つ3層プリント基板を示す(モデルJ)。下層の銅箔と中層の信号線路間で励振した場合について解析を行った。

図4に信号線路上層に持つ3層プリント基板を示す(モデルK)。中層の銅箔と上層の信号線路間で励振した場合について解析を行った。

解析した基板は信号線路幅 2.8mm 、長さ 200mm として基板中央に配置し、 $(x, y) = (40.5, 50)$ で励振した。基板の大きさは $280\text{mm} \times 100\text{mm}$ であり上下各誘電体の厚みは 0.8mm である。

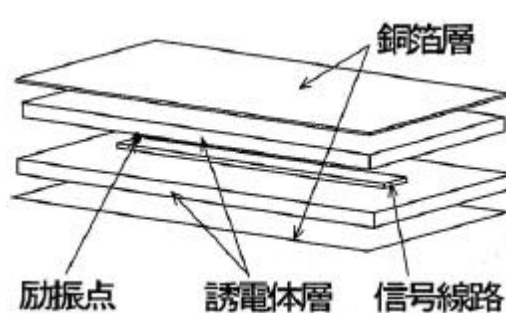


図3 中層に伝送路を持つ基板 (モデルJ)

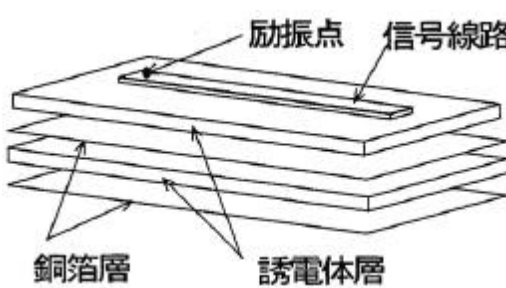


図4 上層に伝送路を持つ基板 (モデルK)

4. 実験結果及び考察

4.1 基板の大きさの影響

信号源から見た入力反射係数 S_{11} の解析結果を図5に示す。あわせて、式(4)と(6)による計算結果を表3に示す。図5の結果と表3の計算結果とはほぼ一致しており、基板の大きさで共振周波数が決まることがいえる。

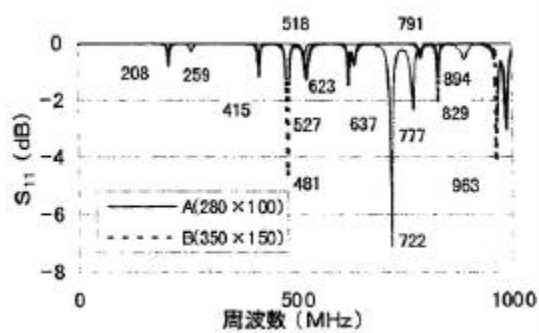


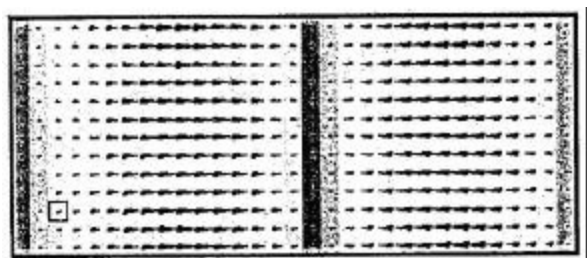
図5 基板の大きさと入力反射係数

表3 理論式による計算結果

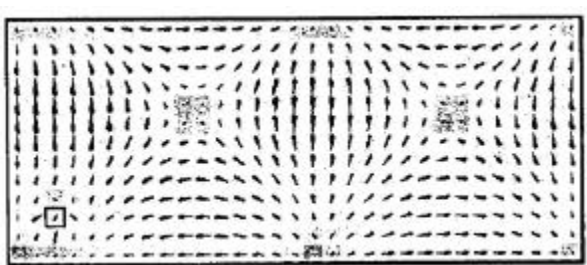
m/n	0	1	2
0	—	723	1447
		482	964
1	258	768	1470
	207	525	986
2	517	889	1536
	413	635	1049
3	775	1060	1641
	620	785	1146
4	1033	1261	1778
	827	957	1270

(単位MHz) 上段: モデルA (100×280mm)

下段: モデルB (150×350mm)



(a) TE₂₀モード



(b) TE₂₁モード

図6 共振時の電流分布図1

また、銅箔層の電流分布については同一の銅箔の上面と下面では分布が異なる結果が得られている。両面基板では誘電体に面した側では共振時の電流分布がはっきりと見られるが、反対の外を向いた面では電流が小さく分布の様子が確認し難い。図6にTE₂₀、TE₂₁モード共振時について基板の大きさが280mm×100mmの基板(モデルA)の銅箔層(誘電体側面)の電流分布を示す。

4.2 対向する面の大きさの影響

解析結果を図7に示す。共振周波数は式(6)にておおむね基板の大きさを銅箔層の対向している面の大きさで計算した結果と合致する。このことから共振周波数は4.1のプリント基板の大きさということよりも対向している部分の面の大きさで決まることが解る。

上側の銅箔層が140mm×100mmの基板(モデルC)における下側銅箔層の誘電体側の電流分布をTE₂₀並びにTE₂₁モード共振時について図8に示す。

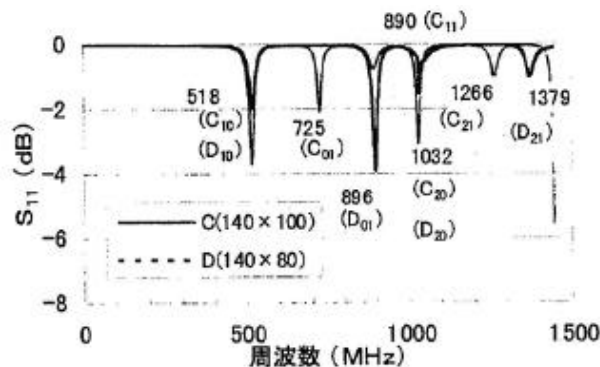
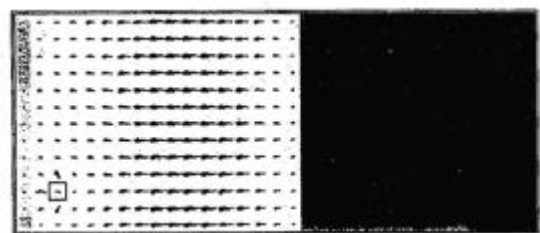
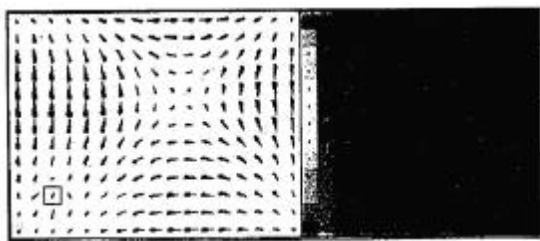


図7 対向する面の大きさと入力反射係数



(a) TE₁₀モード



(b) TE₁₁モード

図8 共振時の電流分布図2

4.3 励振点の位置の影響

S₁₁の解析結果を図9に示す。励振点が基板の端にある基板(モデルA)と比較すると、y軸方向の中央に励振点がある基板(モデルE)では式(6)で $m = 2s + 1$ ($s = 0, 1, 2, \dots$)となるモード、基板の中央に励振点を持つ基板(モデルF)では $m = 2s + 1$ ($s = 0, 1, 2, \dots$)あるいは $n = 2t + 1$ ($t = 0, 1, 2, \dots$)となるモードの共振がみられない。これらのモードは電圧分布を考えると励振点の位置が共振の節となるときのである。

またA、E、Fで共通の共振周波数においてS₁₁の値に差が見られる。このことは励振点から見た基板のインピーダンスに差があるのではないと思われるが、放射ノイズの問題で考えるとノイズ源による励振の位置は共振周波数のみならず、ノイズの大きさにも影響していると考えられる。

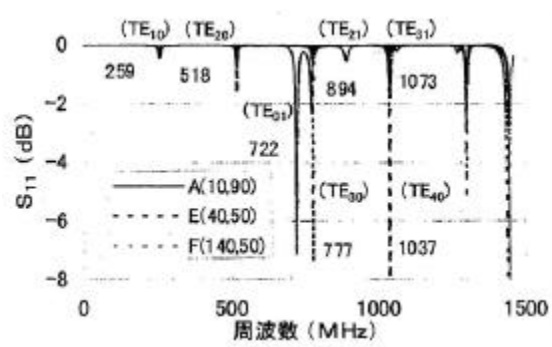


図9 励振点の位置と入力反射係数

4.4 信号線の影響

中層に信号線路を持つ基板（モデルJ）の解析結果を図10に、上層に信号線路を持つ基板（モデルK）の解析結果を図11に示す。

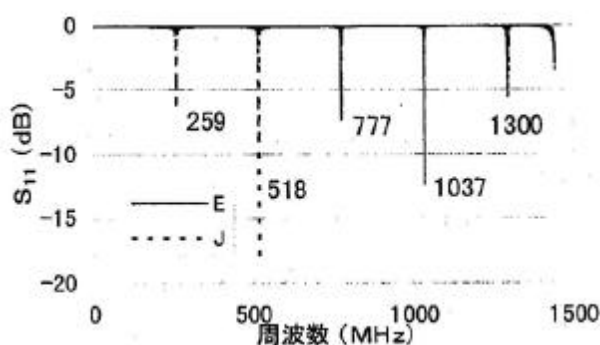


図10 中層に伝送路を持つ基板の入力反射係数

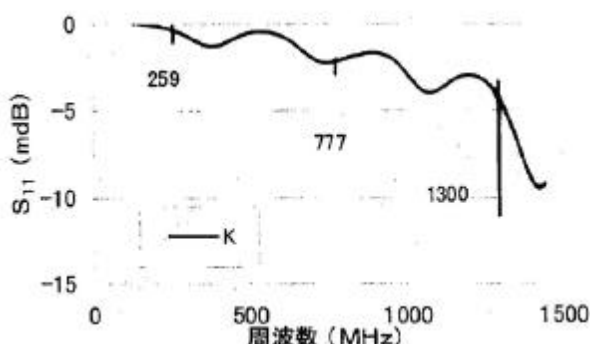


図11 上層に伝送路を持つ基板の入力反射係数

モデルJの解析結果では、共振が起きる周波数は同位置に励振点を持つ両面基板モデルEと同じである。モデルJは上下の銅箔層間で直接励振されていないが、下層と信号線路の励振が間接的に上下の層間を励振していると考えられる。このことから実際の多層基板における電源－グラウンド層の共振は、バウンス電圧の直接的な励振と信号ラインによる間接的な励振により引き起こされるものと考えられる。

モデルKの解析結果については、縦軸の単位がmdBでありこれまで解析してきた結果と比較するとほとんど全反射として扱え、共振はないと言える。モデルJと比較するとモデルKの電源－グラウンド層は信号線からの間接的な励振を受けないこととなり、電源－グラウンド層の共振はバウンス電圧のみに励振されるものと考えられ、電源層の共振によるEMC対策に限れば信号線路の配置は電源層とグラウンド層間に挟まない方が良く考えられる。

5. まとめ

多層プリント基板における電源－グラウンド層の共振について解析を行った。その結果以下の結論を得た。

- ① 多層プリント基板では対向する電源－グラウンド層間で共振が起こり、その共振周波数は対向する部分の面の大きさに依存する。
- ② 励振点の位置により共振の起こらないモードができることがある。これは励振点の位置が電圧分布で共振の節となるモードである。
- ③ 同電位の層で他の層を挟み込むとき（モデルH，I形状）、導通の取り方により共振現象が異なる。
- ④ 信号線路が電源－グラウンド層間に挟まれて存在すると信号線路により間接的に励振され共振が起こる。

[参考文献]

- [1] 軽部俊幸, 大力賢次他. 多層回路基板のグラウンド面のスリットが及ぼすEMIへの影響. 電子情報通信学会1997年通信ソサイエティ大会講演論文集 1.251(1997)
- [2] 長尾伸久, 大力賢次, 軽部俊幸他. 多層回路基板のグラウンド面のスリットが及ぼすEMIへの影響(II). 電子情報通信学会1998年総合大会講演論文集通信 1.300(1998)
- [3] 大力賢次, 軽部俊幸他. 回路基板上的伝送路と電源パターンのEMIへの影響. 電子情報通信学会1998年通信ソサイエティ大会講演論文集 1.220(1998)
- [4] 跡治昌吉, 須賀卓, 上芳夫. 電源・グラウンド層からの放射妨害波について. 電子情報通信学会技術研究報告. EMCJ96-17, 1-6(1996)
- [5] 伊藤卓, 上芳夫. 電源/グラウンド層間の共振による放射妨害波: 入力反射係数と基板の近傍磁界. 電子情報通信学会技術研究報告. EMCJ96-18, 7-12(1996)
- [6] 上野修, 井口大介, 新垣均. コンデンサによるプリント基板の電源・グラウンド面放射の抑制. 電子情報通信学会技術研究報告. EMCJ99-18, 7-21(1999)
- [7] 軽部俊幸, 大力賢次他. 回路基板における電源層の共振と切り込みの影響. 電子情報通信学会2000年総合大会講演論文集通信 1.366(2000)