

# 基板ノイズ対策の基礎

## Basic Techniques for Noise Reduction at PCBs

芳賀 知

Satoru HAGA

沖プリントドサーキット株式会社

Oki Printed Circuits Co., Ltd

1 Fukuda-cho, Joetsu-shi Niigata, 942-0032 Japan

Tel: +81-25-544-5300, Fax: +81-25-544-0058, haga748@oki.com

### Abstract

This paper describes basic techniques to effectively reduce the noise at PCBs, focusing on EMI emission. Fundamental step to reduce the EMI noise is to design PCBs, observing the popular EMC design rules. However, there are some important points that you should pay attentions when you use the rules. In the paper, after general EMC design rules are covered, the points are presented with the practical examples.

### 1. はじめに

電子技術の応用の拡大や高度化に伴い、電子機器で本来、意図しない電磁界による誤動作、あるいは外部への干渉を引き起こすノイズ（不要電磁界）問題が顕著になってきた。

本稿では、電子機器のノイズ対策として中心となるプリント回路基板（以下、単に基板とする）におけるノイズ対策について、対策が最も困難とされる放射ノイズ対策に焦点を当て、基礎的な部分を主に解説する。はじめに、ノイズ対策の基本となる基板設計での基本設計ルールについて、電子回路の3要素の切り口から整理をする。次に、設計ルールを扱う上での留意点について、いくつかの事例を交えて解説する。

### 2. 電子機器のノイズ問題

電子機器のノイズ問題は、図1に示すように、機器内部での問題（信号保全）のみではなく、電磁環境として外部に妨害を与える問題（EMI: Electromagnetic Interference）と外部からのノイズで不具合を発生する問題（イミュニティ）がある。ノイズによる不具合問題は、時には重大な社会問題に発展する可能性を秘めており、それぞれについて規制、規格が整備されている。そして、規格をクリアしない製品を市場に出した場合には、厳しいペナルティも課せられる。近年の高度に電子技術を応用した社会では、ノイズ問題を抜きに技術の発展を考えるとできないようになった。

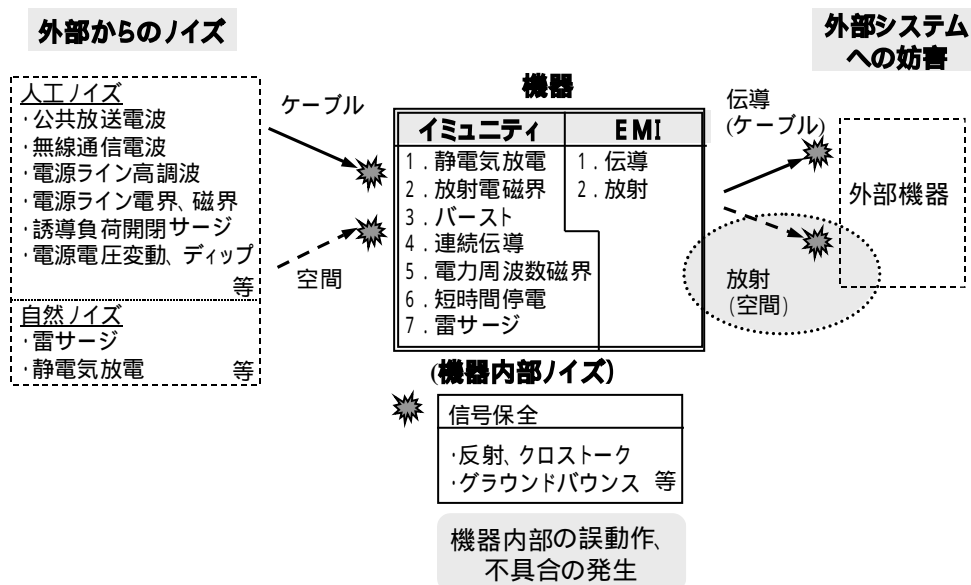


図1 電子機器のノイズ問題

近年の電子回路におけるデジタル制御の拡大、高速・高周波化の進展から、ノイズ問題で苦慮するのは、圧倒的にEMIの放射ノイズ問題が多い。そこで、ここでは放射ノイズ問題に焦点を当てて、解説を進めることとする。

### 3. 放射ノイズ対策の考え方

#### 3.1 放射ノイズ特性は何で決まるか

放射ノイズ特性は、各周波数の最大放射電界強度で規定される。そして、放射電界強度は、対象物の電磁界の空間分布により、最大値とその方向が決まる。したがって、放射ノイズに対する対策の原則は、対象物における電磁界の空間分布の周波数特性を管理すればよいことになる。そして、一般に言われている放射ノイズ対策は必ず本原則に従っている。

#### 3.2 周波数領域の管理 - 不要な高周波成分は発生させない

周波数領域を管理することの基本は、信号として不必要な電磁界の高周波成分を発生させないことである。エネルギーとして、本来、プリント板上に存在しない周波数成分の電磁界が、外部への放射エネルギーになることはない。すなわち、非線形デバイス自体の特性から発生する高周波成分の中で、回路構成や配線構造による電磁界の結合、共振現象などのため特定の周波数成分が、特に強く伝搬、放射されるのである。不要な高周波成分を発生させないためには、最適なデバイスの選択や回路構成、配線構造とする配慮が必要である。

#### 3.3 空間電磁界分布の管理 - 電磁界が広がらないようにする

空間電磁界分布の管理とは、アンテナとして振舞いやすい寸法の大きな導体に、高周波電磁界が広く分布しないようにすることである。一般に、アンテナとして振舞う導体は、回路図上には記載されていないことはない。また、最初から回路図上に記載されていない導体に電流を流そうとする設計者はいない。本来、回路機能として意図して流した電流が、何らかの意図しない結合により、伝搬しているのである。空間に電磁界が広がらないようにするためには、閉じた電磁界、すなわち電磁界が空間上に広がらないようにすることが基本である。このためには、高周波電流ループを小さくする、電磁界上、不連続部となる箇所は作らない、外部導体へ信号以外の高周波成分が流れ出すことを遮断する、系のグラウンドを強化するなどの配慮が必要となる。

## 4. ノイズ対策のための基本設計ルール

### 4.1 電子機器のノイズ対策は基板設計がポイント

電子機器のノイズ対策は、基板における設計配慮が中心的な役割を果たす。

理由は、電子機器の中で、電子回路が搭載されているのは基板であり、放射ノイズのエネルギーとなる高周波電流も基板から発生する。したがって、放射ノイズ対策は、発生源に近い基板で行うことが効果的となるためである。

また、ノイズ対策は、問題が発生してから、場当たり的にカットアンドトライによる対策を行うより、未然にノイズ問題を発生させないように、設計時点で十分な配慮を行うことが、やはり効果的であり、コストも抑制できる。

### 4.2 基板設計の基本設計ルール

ここでは、ノイズ対策として、一般的に用いられている基本的な設計ルール[1][2][3]について、図2に示すような電子回路の基本3要素である回路機能を実行するデバイス、デバイスに接続される配線、および回路動作の基準となるグラウンドの3つの面から整理する[4]。

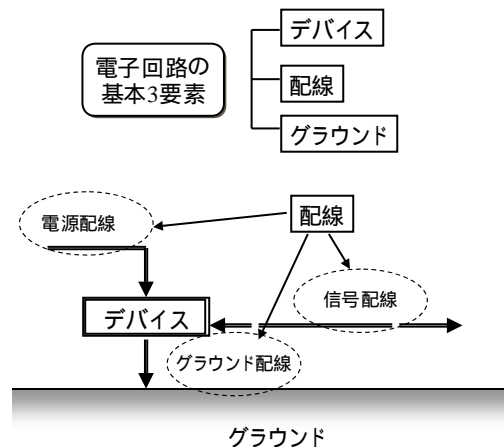


図2 電子回路の基本3要素

#### 4.2.1 デバイスの選択と実装設計

回路機能が大規模なLSIに集積が進む中、ノイズ対策設計の面からもデバイスの選択と実装設計は重要度が増している。特に大規模デバイスは、活用側からみると、ブラックボックスに近い。設計ルールの適用にあたっては、特に留意が必要である。ここでは、基本的な設計ルールについて解説する。

##### (1) できるだけ低速なデバイスに

放射ノイズ抑制の観点からは、タイミングマージン上、問題のない程度まで低速のデバイスを使うべ

きである。

デジタル信号は、矩形の電圧信号で信号を伝送する。矩形の形状を確保するためには、広い周波数成分を必要とする。基本繰り返し周期は、回路上、必要な周期が必要となるが、立ち上がり、立下り時間が高速な場合、周波数スペクトラムは広範囲に広がる。しかも、広がった周波数スペクトラムは機能上、何のメリットも引き出さないばかりか、問題を引き起こす電磁界を生成することになる。

(2) デジタルLSI などにはデカップリング回路を

デジタルLSIなどは、スイッチング時、瞬間的に大きな電流が流れる。これに対して、図3に示すように、デカップリング回路により、電源配線の高周波電流がプリント板上に広く分布するのを防止する。

ノイズ対策設計としては、重要な手法であるが、デカップリングのみで、完全な対策ができるわけではない。以下のように留意すべき点が2点ある。

- a. デカップリングが可能な高周波電流成分は、差動で流れる電源電流成分のみである。信号電流の帰路電流として流れ込む電源電流はデカップリングのパスには入らない。この場合には、別途、基板上で、信号電流の帰路を直近に確保する配慮が必要となる。
- b. デカップリングキャパシタは、本来、高速にスイッチングする際、スイッチング速度を確保するために、デバイスが必要とする電荷を本キャパシタから補填するためのものでもある。当然、電荷が多く供給されるとスイッチング速度が速くなり、結果として電流の高周波成分が増加することになる。したがって、aで述べたようなデカップリングが不可能な信号電流成分については、放射ノイズ対策の点からは、むしろ逆効果となることがある。

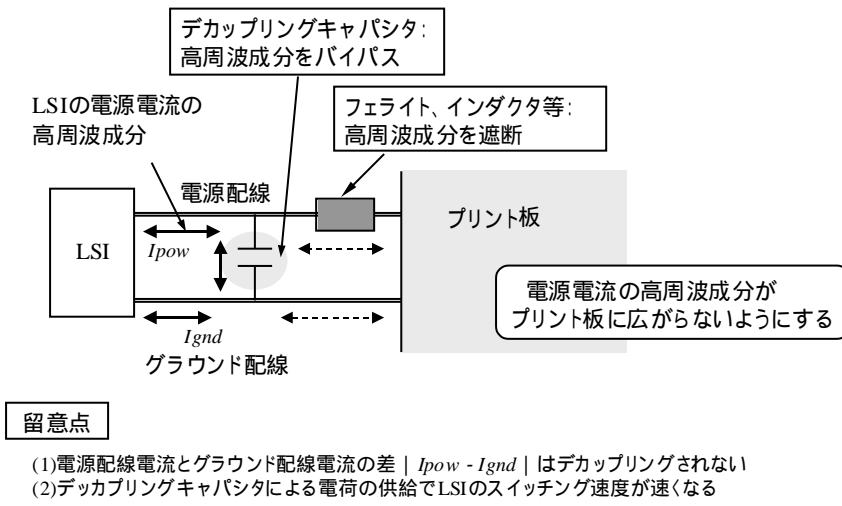


図3 デカップリング回路の例と留意点

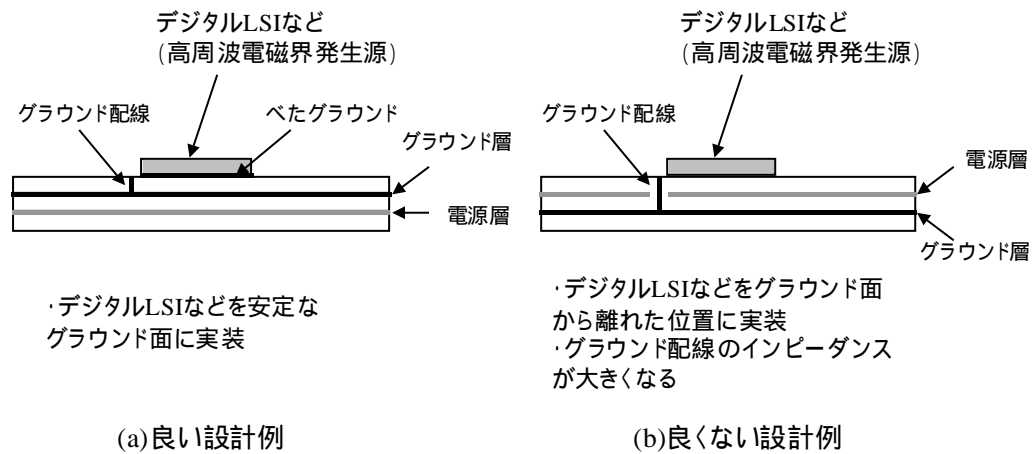


図4 デジタルLSIなどの実装設計

### (3) デジタルLSIには安定したグラウンドを提供

デジタルLSIなどには、周期的に瞬間的な大電流が流れる。デジタルLSIなどに安定なグラウンド面が提供されていない場合には、不必要な高周波電流が広く分布するはめになる。さらにデカップリング回路も十分な機能を果たせなくなる。基準電位を安定させ、高周波電流の広がりを抑制するためには安定したグラウンドを提供する必要がある。

基板設計の点からは、図4に示すように、デジタルLSIなどは、プリント板の層構成でグラウンド面が直近となる配置をする。さらに、QFP(Quad Flat Package)のようなパッケージの場合には、直下をグラウンドのベタ面とするようにすることが望ましい。

## 4.2.2 配線への配慮

基板の配線設計に関しては、単純なモデルで検討することができるため、設計ルールが最も充実している。ここでは、代表的な設計ルールを解説しよう。

### (1) 配線長を短く

デバイス間接続の配線長を短くすることが最も基本的なことである。集中定数回路の前提は、配線の長さや大きさを無視できることである。配線長がゼロであれば、反射、クロストーク、および電磁界の広がりも発生しない。

### (2) 配線の不連続部を少なく

配線の不連続部では、電磁界の分布も不連続となることから反射が発生し、結果として周辺に電磁界が広がることになる。基板設計上はできるだけ避けるべきである。

配線の不連続部には、配線の先端が開放、90度のコーナー、特性インピーダンスの変化する部分、同軸-マイクロストリップ線路の変換部などがある。

また、同様にデジタル信号の配線では、通常、配線のインピーダンスより、レシーバの入力インピーダンスが大きくなっているため、反射が発生してしまう。このため、反射抑制のために、適当な終端回路を設けることが必要である。

### (3) 電流のリターン経路を确实、安定に

配線による電気エネルギーの伝搬は、導波管とは異なり、2本の配線に逆向きの電流が流れることによって行われる。図5に平衡線路、不平衡線路の電流分布を示す。平衡線路の場合には、平衡した2本線路で構成され、それぞれの線路が行きと帰りの経路を分担する。この場合、2本の線路が平衡していることが前提となる。不平衡線路の場合には、通常、細いストリップ導体と広い面状の基準面から構成さ

れ、信号電流はストリップ導体に流れ、面状の基準面がそのリターン経路となる。この場合、基準面が一様で無限大に近い広さを持っていることが前提となる。ところが、実際の基板設計において、このような理想的な基準面を形成することは不可能に近い。このため、特に影響の大きいものについては、以下に示すような配慮を行う。

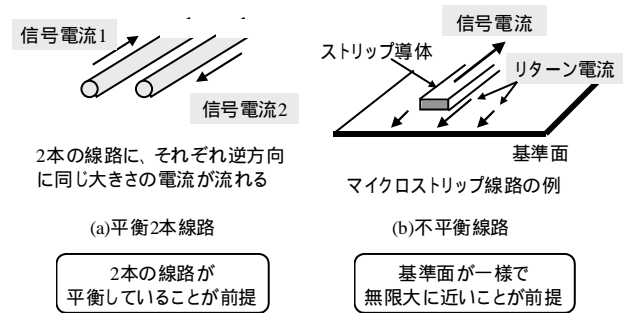


図5 平衡線路、不平衡線路の電流分布

### a. 層間移動配線（ピア配線）を少なく

片面プリント板以外では信号配線層が複数層になることから、配線収容性を確保するためには、必然的に層間を移動する配線が必要となる。図6に例を示すが、層間を移動する配線は、マイクロストリップ線路構成のように直下の面を基準面として信号伝送している場合、基準面が他の基準面に切り替わることになる。信号伝送上からは、電磁界分布が不連続となり、信号波形の劣化を引き起こす。また、2つの基準面間でリターン電流相当の電荷の移動が必要となる。これは2つの基準面間を不必要に励振することになり、放射ノイズの原因となる広がった電磁界分布の原因となる。

原則として、ピア配線はできるだけ避けるべきである。特に、クロックのようなクリティカルな配線は、同一層内で配線すべきである。

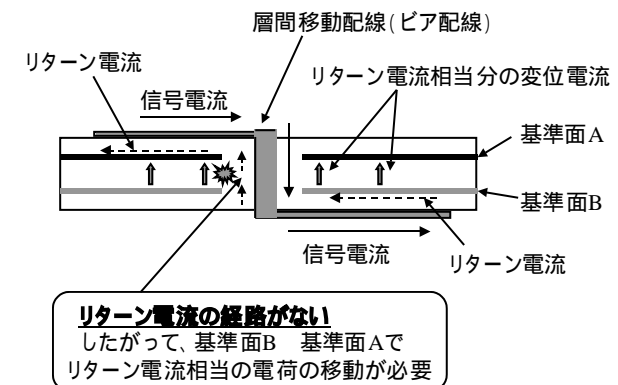


図6 層間移動配線（ピア）と電流の経路

b. 基準面スリット部をストリップ導体の通過不可

リターン経路が直近に確保されない箇所があった場合には、電磁界が不連続となる上、その箇所から電磁界が広がることになる。これについて、よく言われている例として、図7に示すように、マイクロストリップ線路構成で、ストリップ導体が直下にスリットがある基準面を通過することは避けるべきである。

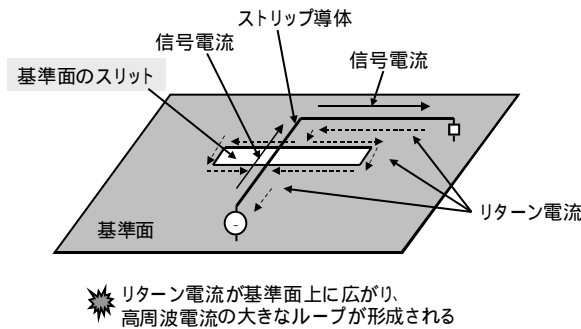


図7 ストリップ導体が基準面スリットの上を通過した場合の電流の経路

c. クリティカルな配線は基板端部に配置しない

マイクロストリップ線路構成で、基板端部に信号配線を配置したような場合には、端部側の基準面の面積が十分ではないため、端部から電磁界が広がり、放射ノイズの原因となる。したがって、クリティカルな配線には、広い基準面を確保することが必要であり、クロック配線などは、基板端部には配置しないようにする。

(4) その他

配線上での配慮には、今まで述べた配線により発生する電磁界の広がりを抑制する設計ルールのほかに、以下のように積極的に電磁界の広がり、あるいは外部からの影響を抑制する配慮設計も必要とされている。

- a. クロックのようなクリティカルな配線にはガードパターンを設ける。
- b. 外部インターフェイス部にフィルタ、ノイズ対策部品を活用し、外部への不要な電磁界の伝搬を抑制する。

### 4.2.3 グラウンドの強化

通常、系（対象とする機器あるいはシステム）の中で、最も大きな導体を占有するのは、グラウンドである。したがって、遠方界への放射ノイズとなる系の電磁界の空間分布は、ほぼグラウンドの電磁界分布で決まると考えてよい。

(1) グラウンドの低インピーダンス化

グラウンドはできるだけ、図8に示すように、広い面積を確保し、低インピーダンス化することは放射ノイズ対策に限らず回路実装設計の基本である。グラウンドは、回路動作として電位の基準となる部分である。もし、電子機器の中で、回路図上のグラウンドとは別に、電位がより安定している部分、言葉を変えればインピーダンスの最も低い導体があった場合、その導体を実質上、グラウンドとして振舞うことになる。この場合、回路図で想定したグラウンド部は不安定となり、系に不必要な電磁界を分布させる。

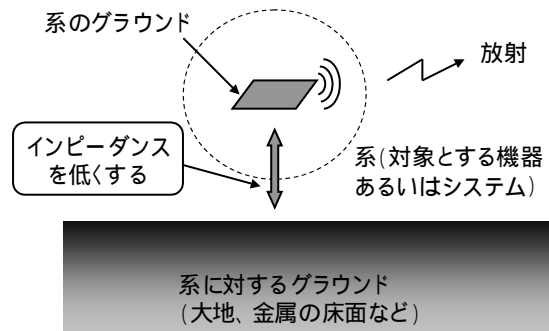


図8 系のグラウンドと放射

(2) 浮いた導体は多点で、グラウンドに確実に接続

グラウンドなどとの接続が充分でない、一般に浮いていると言いつける導体があると、それ自体がアンテナとして振舞う。あるいは電磁界の結合がしやすくなるため、他との意図しない結合を発生させることになる。

最近、話題になっているものに、LSIの放熱対策のために装着するヒートシンクがある。電気の世界から見ると、浮いた導体が、最も高周波成分を発生する個所に密着して取り付けられていることになる。特に周波数が高くなると、その影響は大きくなる。

したがって、このような導体は、図9に示すように、波長に対して十分狭い間隔(一般には、(波長)/20以下の間隔)で、周辺端部をグラウンドに、しかも確実に接続することが必要である[3]。

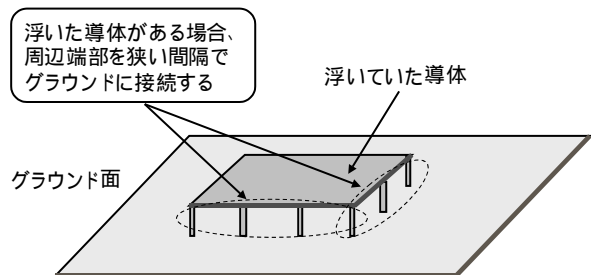


図9 浮いた導体の処理

以上、他にもいくつかあるが、一般的に知られている放射ノイズ対策のための基板における基本設計ルールを整理してみた。改めて設計ルールをみると3項の周波数領域の管理、電磁界空間分布の管理のどちらか、あるいは両方に関連していることが確認できると思う。設計ルールは基本原則を実際的设计上の配慮事項に置き換えたものである。

## 5. 設計ルールだけでは不十分、その留意点は

4項で解説したような設計ルールは、非常に手軽で扱いやすい。電磁気の専門的知識がなくても、基板設計に適用できる。そして、設計ルールに準拠して基板設計を行った機器が放射ノイズ問題を起こすことは、確かに一般的に少ない。

ところが、よく経験することとして、ある対策が、以前の機器では効果があったが、今回の機器では、ほとんど効果がなかった。あるいは、同じような設計基準で基板設計したのにもかかわらず、問題となる機器があれば、問題とならない機器がある。

一体、どうしてこのようなことが起きるのであるのか。次にその原因を考えてみよう。

### 5.1 深刻な問題を引き起こす共振現象

#### (1) 放射ノイズ発生メカニズムからみた設計ルール

はじめに、放射ノイズ発生メカニズムを確認してみよう。図10は、放射ノイズ発生メカニズムをまとめたものである。放射ノイズは、LSIで代表される放射となる高周波エネルギーの発生源から、いくつかの伝搬経路を通り、微小な電流でも効果的に放射する放射体(アンテナ)から放射される。基板にお

ける設計ルールの多くは、本メカニズムでは、伝搬経路での対策に当たる。もちろん、伝搬経路で、放射ノイズとなるエネルギーを完全に遮断できれば、対策は万全なのであるが、現実にはこのようなことは不可能である。したがって、確実な対策のためには、高周波エネルギー源での対策、放射体での対策について、バランスをとりながら行うことが必要となる[5]。

次に、放射体に着目する。図10に見られるように、最終的に、放射ノイズ特性は放射体の特性の影響を受ける。特に、放射体が共振特性を持ち、特定の周波数で、鋭いピークを持つ放射を発生させる場合についての放射ノイズ特性は、ほぼ、放射体の共振特性で支配される。

#### (2) 多層基板 電源-グラウンド層の共振の影響

多層基板の場合、放射体として振舞うのは、一般に最も寸法の大きい電源-グラウンド層である。もし、電源-グラウンド層の共振に手を打たなければ、放射ノイズ特性は、その共振特性で支配される[6]。すなわち、共振のピークとなる周波数では、わずかな励振エネルギーでも大きな放射ノイズを発生させ、一方、共振から外れた周波数では、特別な対策をしなくても、大きな放射ノイズは発生しない。

ICから駆動するトレースの本数と放射ノイズ特性との関係を実験した例を図11に示す。基板は外形230mm×150mmの4層板で、周波数20MHzの矩形波をインバータIC 74ALVC04に入力し、駆動させた。トレースは長手方向、及び短手方向にそれぞれ1本を配置している。パラメータをトレース全2本

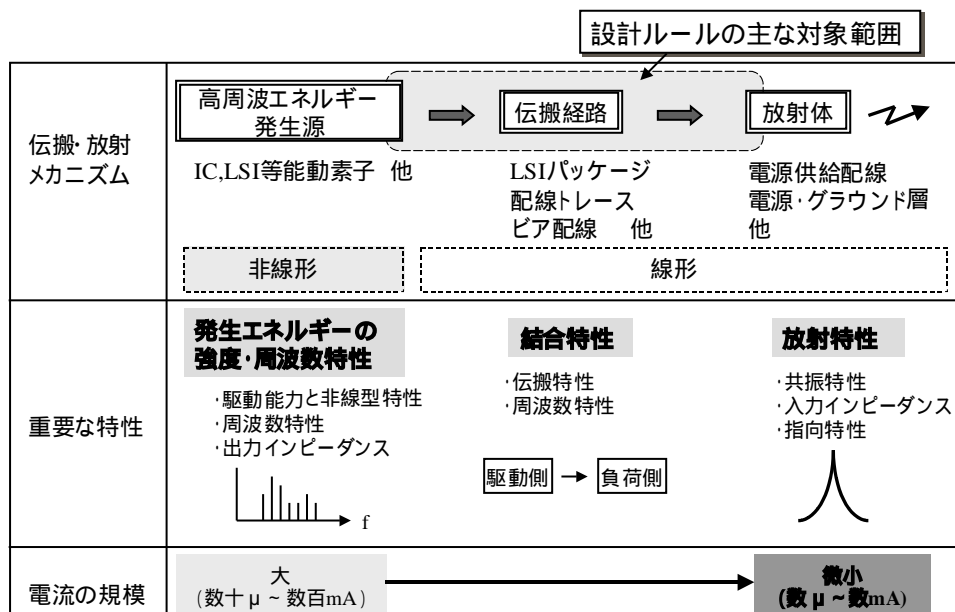


図10 放射ノイズの発生メカニズム



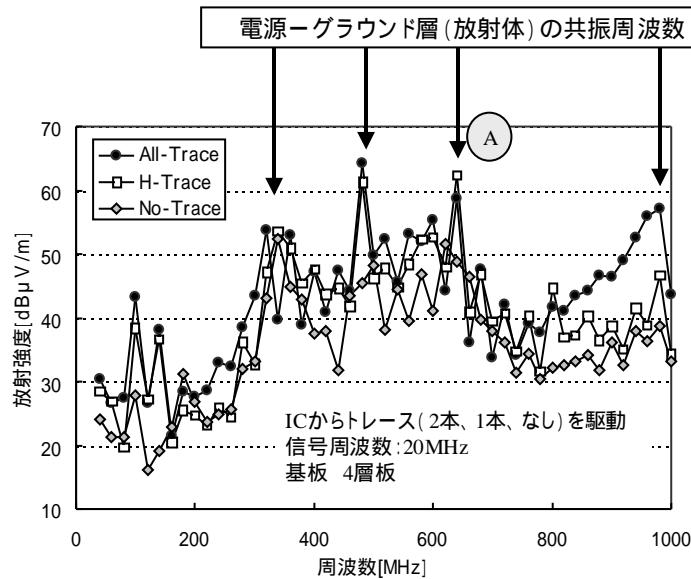


図11 駆動トレースの本数と放射ノイズ特性

駆動 (All-Trace) 長手方向のトレースのみ駆動 (H-Trace) トレース駆動なし(No-Trace)として、放射ノイズ特性を比較測定した。

全体の放射ノイズ特性は、パラメータにかかわらず、電源-グラウンド層の共振周波数でいずれも鋭いピークを示していることから、放射体の放射特性で支配されていることが確認できる。そして、全体にトレースの駆動する本数が多いと、放射ノイズが大きい傾向にあることもわかる。ところが、Aの周波数に限っては、トレース2本駆動より、トレース1本駆動の放射ノイズが大きくなっている。これは、Aの周波数においては、トレース1本の方が効果的に放射体である電源-グラウンド層を励振したことになる。一般的に言われている、トレースの本数が少なければ(励振源を少なくすれば)放射ノイズが小さくなることは、必ずしも言い切れない[7]ことがわかつて思う。

## 5.2 基板接続部、基板周辺部などの影響と対策

基板に寸法の無視できない導体などが接続された場合、あるいは基板周辺に導体が配置された場合などには、放射ノイズ特性は影響を受ける。念入りに基板に対してノイズ対策を施し、基板単体で問題のないことを確認した後、基板を筐体などに組み込んだ場合、一瞬にして放射ノイズ特性が大きく変わり、がっかりすることがある。

### (1) ケーブルが接続された場合の影響と対策

基板にケーブルが接続された場合、そのケーブルが線状アンテナとして振舞い、強く放射される。特に、コードの長さが着目している周波数の(波長)/4

となったときには、共振が発生し、最も強く放射する。この現象は、測定した時、ケーブルの有無で放射特性が大きく変化するので、確認しやすい。

対策としては、ケーブルに高周波成分をカットするフェライトコアなどの装着、基板上では、グラウンドの分離、ケーブル接続部にキャパシタの追加[8]などを行う。

### (2) 近傍に金属板がある場合の影響と対策

基板単体で、設計ルールに基づいて放射ノイズ対策を行っても、機器として組み込んだ場合、近傍に金属板があると、放射ノイズ特性は大きく変わる。特定のケースでは、非常に悪化することがある。ここでは、典型的な2つの事例[9]を紹介したい。

第1の事例は、信号配線が中央、及び、端部にある2種類の基板に対して、基板よりやや大きい金属板を、図12に示すように、基板の下(グラウンド側)に配置した場合の放射ノイズに対する影響である。金属板を配置する前は、4.2.3(3)c項で解説したように、信号配線が中央にある基板(a)より信号配線が端部にある基板(b)の方の放射が大きかった。つぎに、金属板を配置した場合、(a)は、特に大きな変化はなかったが、(b)では、放射ノイズは低減された。これは、グラウンドの面積が十分でない基板に対して、金属板が信号配線のグラウンドとして振舞い、電磁界の広がりが抑制されたためである。金属板を配置することで、結果として(a)と(b)の放射ノイズは同程度となった。

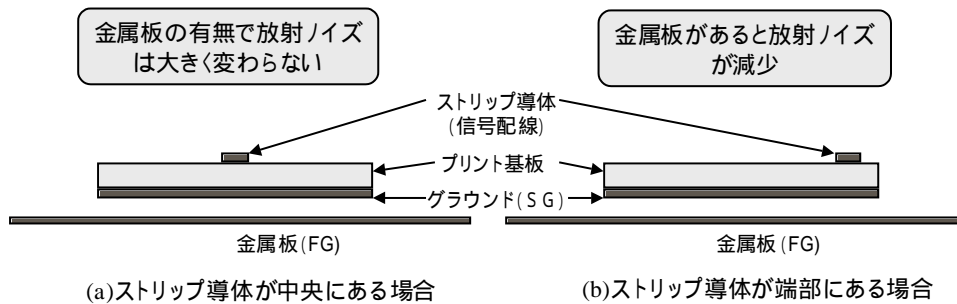


図12 信号配線の位置と金属板の影響

第2の事例は、基板よりやや大きい金属板を、図13に示すように、基板の上(信号配線側)に配置した場合の放射ノイズに対する影響である。この場合、基板と金属板により、空洞が形成され、ここで、空洞共振が発生する周波数では、鋭いピークを持つ強い放射ノイズが発生する。この場合の対策としては、4.2.4(2)と同様、基板のグラウンドと金属板を、波長に対して、十分狭い間隔で接続するなどの対策を行う。

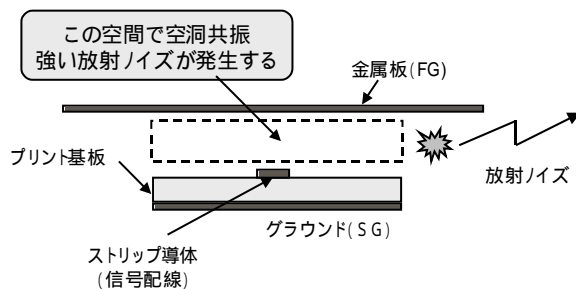


図13 金属板が信号配線側に配置された場合の影響

## 6. おわりに

本稿では、最も対策に苦慮するEMIの放射ノイズに焦点を当て、基板ノイズ対策の基礎となる基板設計の基本設計ルールを概説し、次に、設計ルールを扱う上での留意点について、事例を取り上げて解説した。

電子機器は、高速・高周波化や高密度実装化を背景に、搭載される機能も大規模化、高性能化が進んでいる。この進歩を支えるのが、ノイズ対策技術である。本稿が、電子機器のノイズ対策に携わる技術者に何らかの参考となれば幸いである。

## 参考文献

- [1] Henry W. Otto: "Noise Reduction Techniques in Electronic Systems", Second edition, John & Wiley Sons, Inc., New York, 1988
- [2] C. R. Paul: "Introduction to Electromagnetic Compatibility", John Wiley & Sons, Inc., New York, 1992
- [3] Mark I. Montrose: "Printed Circuit Board Design Techniques for EMC Compliance second edition", IEEE Press, 2000
- [4] 伊江夢司: "高速・高密度実装時代におけるプリント基板の最適設計1 - プリント板における EMC 設計の基本", 環境電磁工学情報 EMC, 第17巻第9号, pp.69-80, 2005
- [5] 伊江夢司: "高速・高密度実装時代におけるプリント基板の最適設計3 - 最適 EMC 設計に向けての課題と展望", 環境電磁工学情報 EMC, 第18巻第4号, pp.51-64, 2005
- [6] 芳賀, 中野, 橋本: "電源層を遮蔽する層構造による多層プリント板からの不要電磁放射の低減", 電子情報通信学会論文誌 B Vol. J86-B No.7, 2003
- [7] 芳賀: "デジタル回路基板の EMC 設計", 日本能率協会 EMC 対策技術シンポジウム, 2004
- [8] 小林, 伊藤, 芳賀, 高草木: "放射ノイズを低減するための電源・GND 層間パイパスコンデンサ実装設計技法", エレクトロニクス実装学術講演大会 14C-13, pp.195-196, 1996
- [9] 森本, 小林, 伊藤, 芳賀: "プリント配線板からの電磁放射解析", エレクトロニクス実装学術講演大会 17C-11, pp.77-78, 1999