

■S4 群 (宇宙・環境・社会) - 2 編 (電磁環境)**3 章 システム・回路の電磁環境**

(執筆者：井上 浩) [2010年4月 受領]

■概要■

本章では、電磁ノイズの主要な源を論じている。最初に回路基板からの電磁ノイズ発生を述べる。次いで、電子機器システムの電磁ノイズ放射および対策について述べる。最後に、スイッチングを伴う電力システムの電磁環境問題を取り上げて、システムおよび回路系の電磁環境についてポイントを述べている。

■S4 群 - 2 編 - 3 章

3-1 電磁波ノイズと回路基板設計

(執筆者：須藤俊夫) [2009 年 10 月 受領]

3-1-1 はじめに

近年、LSI の高速化、電子機器の小型化により、デジタル回路基板からの不要電磁放射 (EMI : Electromagnetic Interference) は、回路基板設計をますます困難なものにしている。このような電磁波ノイズを低減するには、初めに EMI の発生メカニズムを把握することが必要となる。具体的な発生原因は電子機器によって異なるが、**図 3・1** に示すように、電磁波の発生要因を大まかに「励振源」、「伝達経路」、「アンテナ要因」という三つの要因に分類すると考えやすい。EMI の大きさは、「励振源の強さ $F(\omega)$ 」×「伝達係数 $H(\omega)$ 」×「アンテナ効率 $A(\omega)$ 」の積として考えられるので、EMI を低減するには 3 要因のいずれかを抑えることが必要となる。



図 3・1 EMI 発生 の 3 要因

特にプリント回路基板には、「アンテナ要因」や「伝達経路」として働く様々な物理的な構造や構成が内在している。プリント回路基板に実装される LSI はパルス信号によるクロック周波数を基準に動作しているために、クロック周波数のほかに多くの高調波を発生する。このときプリント回路基板の電源/グラウンドプレーンのもつ共振周波数やその高調波と近接したり一致すると、電磁波ノイズが発生する。シールドのように「臭いものに蓋」という対策から、回路基板からの電磁波の発生メカニズムを考慮した回路基板設計が必要になっている。

3-1-2 プリント回路基板からの電磁ノイズ発生

プリント回路基板上にある励振源である LSI から見たときの電磁波ノイズの発生メカニズムを示したものが**図 3・2**である。一つの要因は信号伝送に伴う「ノーマルモード EMI」であり、もう一つの要因は、スイッチングに電源/グラウンド端子に流れる電源電流変動による「コモンモード EMI」に大別できる。ただ、信号伝送に伴う「ノーマルモード EMI」も、プリント回路基板に内在する様々な物理的な配線構造や構成により、「コモンモード EMI」が付随する。その代表的なものが「リターン電流不連続」からくる電磁波発生である。それを**図 3・3**に示す。

(1) ノーマルモード放射

プリント回路基板上に形成される信号配線は、システムの回路機能を構成するために不可欠なものである。信号配線に信号が流れると、グラウンド面をリターン電流が逆向きに流れ、それがループアンテナを構成する。特に信号配線が長くなると、このノーマルモードの電磁

放射が最も大きな電磁波の発生要因となる。

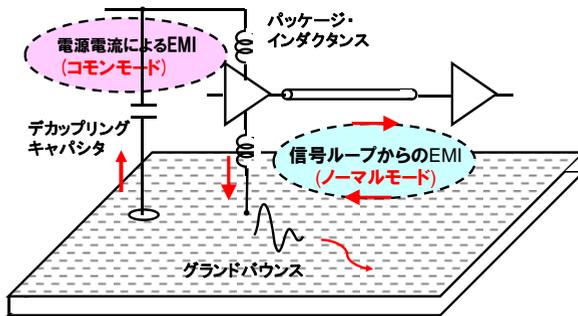


図 3・2 LSI から見たときの電磁波ノイズ発生要因

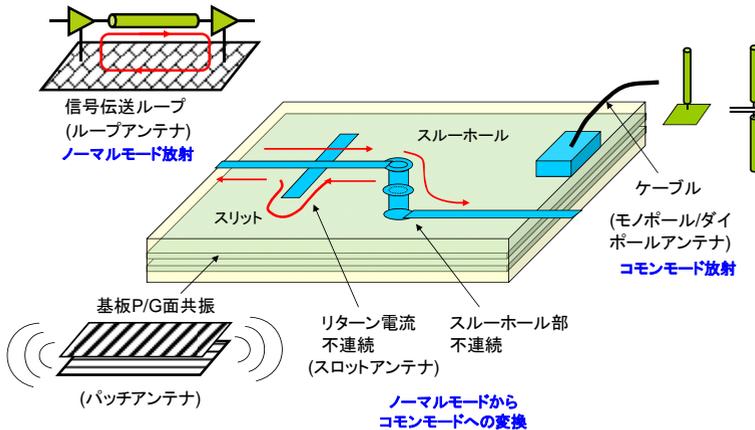


図 3・3 プリント回路基板に内在する電磁波ノイズ発生の物理構造・構成

(2) コモンモード放射

一般に、コモンモード放射は定義されていないが、ノーマルモード放射以外の要因は、コモンモード放射とよい。デジタル LSI が論理動作に伴い、電源/グラウンド端子に流れる電源電流が、プリント回路基板内の電源/グラウンドプレーンを揺さぶり、基板共振と呼ばれる共振系を励振し、電磁波を発生する。また信号伝送に伴うノーマルモード放射に付随して、コモンモード放射を行う場合がある。この例としてよくあるのは、リターン電流の不連続からくるものであり、ノーマルモードの信号伝送にともなって電磁放射を起こす。このように、プリント回路基板内の配線構造・構成により大きく依存する。以下、コモンモード放射について代表的な例を説明する。

(a) 基板共振

多層プリント基板では、通常内層に電源面と GND 面が積層されて構成されている。このとき電源/グラウンドプレーン構造は、パッチアンテナとして働く。つまり、デジタル回

路は、アンテナの上に配置されているということになる。長方形基板の縦横の長さを a , b , 基板の比誘電率を ϵ_r , 光速を C_0 とすると、そのプリント回路基板のもつ共振周波数 f_{req} は次のようになる。

$$f_{req} = \frac{C_0}{2\pi\sqrt{\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \quad m, n : \text{整数}$$

プリント回路基板の形状寸法から決まる共振周波数が、1 GHz までの周波数範囲内に、基本モードから高次モードまで複数個含まれることが多い。図 3・4 に 180 mm 角の 4 層基板の共振モードと共振周波数を示す。プリント基板の共振周波数と、クロック周波数が重なると、プリント回路基板自体がアンテナとして働き、電磁波ノイズの発生させる元凶となる。

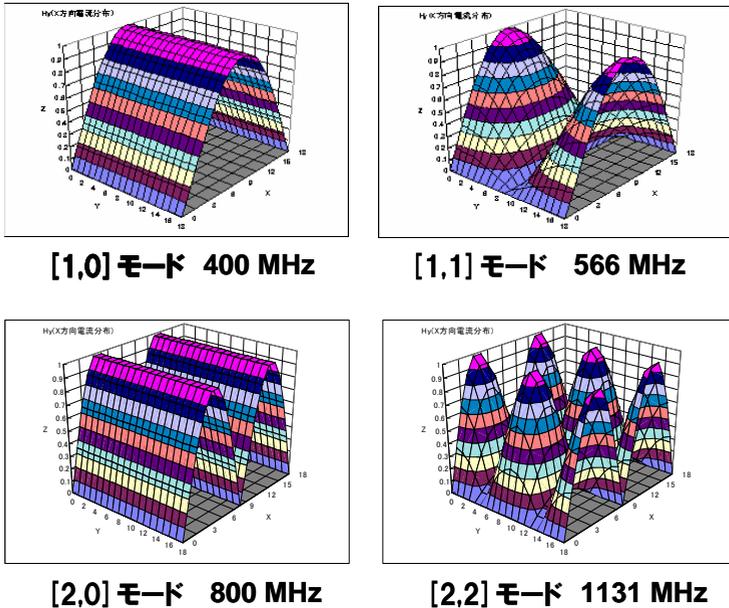


図 3・4 基板共振モードと共振周波数

(b) 電源プレーンのスリットによるリターン電流不連続

プリント回路基板には多くの電源電圧が使われているため、プリント回路基板の電源層は、複数個の島に分割されることが多い。このとき、異なる電源間に形成されるスリット部を、信号配線が跨ぐように配線されると、リターン電流の経路が信号配線直下を戻ることができなくなり電磁放射が起こる。スリットと同様な構造は、スルーホールが密に並ぶコネクタ部分や、バス配線の切り返し部分でクリアランスホールがつながる場合にも、リターン電流の不連続が起こり、基板共振のようなコモンモード放射を励振する要因となる。

(c) スルーホールによるリターン電流不連続

プリント回路基板には多くのスルーホールが形成されているが、このスルーホールもまた

垂直方向のリターン電流の不連続を引き起こす。このリターン電流不連続は、面内の不連続と同様に、基板共振などのコモンモード放射を励振する要因となる。

(d) 共通グラウンドプレーンを流れる不均一リターン電流分布

信号配線の直下の共通グラウンドプレーンには、リターン電流が流れるが、配線直下以外の部分にも、わずかながら電流が流れる。特に、信号配線がプリント回路基板端に偏って配置された場合には、共通グラウンドプレーン内を流れる電流の不均一さが大きくなり、コモンモード放射が顕在化するほど励振される。これもノーマルモード放射に伴うものである。

(e) 電源／グラウンドプレーンのノイズ伝搬抑制

ノイズ励振源である LSI の高周波電源電流は、プリント回路基板の共通に配置されている電源／グラウンド面を介して、ノイズが基板全体に拡散する。電源／グラウンドプレーンに配置されるキャパシタは電源インピーダンスを低下させると同時に、ノイズの伝搬を阻止するデカップリング機能ももっている。それをより積極的に利用しようとしたものが Electronic Band Gap (EBG) 構造である。この構造は電源／グラウンドプレーンのノイズの伝搬抑制方法として注目されている。

3-1-3 電子回路との電磁共存設計

LSI の論理動作自体が電磁ノイズの根源である。ただ論理動作をするのは LSI 自体の機能であるため、電磁共存設計が不可欠になる。電磁放射低減のための LSI 設計手法の一例を紹介する。

(1) オンチップキャパシタの形成・配置

LSI 内に半導体プロセスを使ってデカップリングキャパシタを形成する方法は、携帯電話用の LSI では EMI 低減に必須となっている。これは電源電流変動分をチップ内部のキャパシタで吸収することにより、外部に流出する変動分を少なくする効果をもつ。これにより外部の電源・グラウンド端子に流れ出すことによる、コモンモード放射を低減できる。

(2) バッファ駆動能力の適正化

I/O バッファ回路やクロック回路は、他の論理ゲート回路より大きな電流駆動力を有するため、信号波形に反射やリングングを引き起こし、それが電磁波ノイズの増大をまねく。このため、信号負荷に適正なバッファを使用することにより、電磁波ノイズを抑制することができる。

(3) 差動伝送回路の採用

I/O バッファ回路には、通常シングルエンド配線が使われているが、これを差動回路に置き換えて電磁波ノイズを抑えようとする手法が様々なところで採用されている。差動伝送回路は、互いに逆相となる信号を送り出すことによって、お互いに発生した電磁波を相殺するもので、特に、高速信号の伝送が不可避な液晶パネルとマザーボード間には差動伝送回路が採用され、電磁波ノイズを低減に寄与している。

■S4 群 - 2 編 - 3 章

3-2 電子機器，システム設計と電磁環境

(執筆著：田島公博) [2009年6月 受領]

3-2-1 はじめに

電気機器，電子機器などの人工システムにおけるデジタル信号処理の進展に伴い，1980年代頃より電磁妨害波の放射（エミッション）や，電磁妨害波への排除能力（イミュニティ）不足による誤動作が社会問題となり，規制の整備や様々な対策が実施されている．本節では，電磁環境に対応した電気機器，電子機器のシステム設計について解説する．

機器システムから発生した電磁波ノイズが，他の機器システム（テレビやラジオのような放送機器，無線通信機器を含む）に影響を及ぼしたり，逆に他の機器システムから影響を受けたりする伝搬経路のイメージを図 3・5 に示す．通信線，電源線，アース線，大地などの伝送路を伝導ノイズが，また，空間を直接，電磁波ノイズが伝搬する．機器システムが設置された環境により，これらは複雑に複合したノイズとなる．

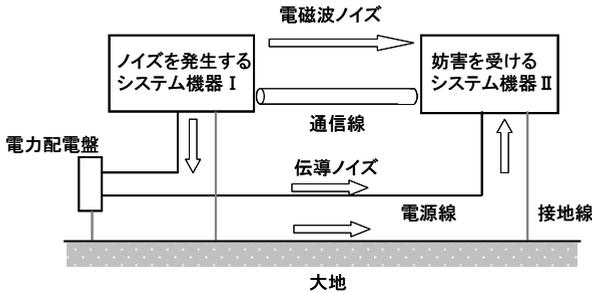


図 3・5 機器システム間における電磁波ノイズの伝搬経路イメージ

これら複合ノイズの形態は大きく 3 種類に分けて考えることができる．

- (1) ノイズを発生する機器システム I の伝送路が，妨害を受ける機器システム II の伝送路に結合する．（伝導 ⇒ 空間 ⇒ 伝導）
- (2) ノイズを発生する機器システム I の伝送路から電磁波ノイズが放射され，妨害を受ける機器システム II に結合する．（伝導 ⇒ 空間）
- (3) ノイズを発生する機器システム I から電磁波ノイズが放射され，妨害を受ける機器システム II の伝送路に結合する．（空間 ⇒ 伝導）

これらは，分離した二つの機器システム間におけるノイズ伝搬経路であるが，同様なことが機器システム内部にも起こっており，ノイズの発生から機器システムの誤動作まで次のように整理できる．

ノイズを発生する回路（または機器システム I）でノイズ発生 ⇒ 伝送路へ結合 ⇒ 伝搬 ⇒ 他の機器システムへ結合 ⇒ 妨害を受ける回路（または機器システム II）で誤動作

次節では，電磁波ノイズのメカニズムについて解説する．

3-2-2 機器システムからの電磁放射

電気機器、電子機器などの人工システムから発生する電磁波ノイズは、雷・静電気放電のような自然電磁環境に起因する「自然ノイズ」に対し、「人工ノイズ」といわれる。人工ノイズは、発生源である人工システムの種類により、放射される主な電磁放射要因とノイズ種類が表 3・1 のように分類できる²⁾。これらのうち、(1)無線通信・計測・制御システムは、電磁波を意図的に放射することにより機能するシステムであり、(2)以下の非意図的に電磁波が放射される機器システムと異なる。

ここでは主に、表 3・1 の(3)~(7)の代表的な機器システムから放射される非意図的電磁放射について説明する。

表 3・1 人工システムからの電磁放射主要因

人工システム種類	主な電磁放射要因
(1)無線通信・計測・制御システム	意図的電磁界放射
(2)電力システム	誘導電磁界、回路の過渡振動、放電
(3)通信装置	誘導電磁界、高周波電磁界
(4)ISM装置	高周波電磁界、放電、パルス信号
(5)情報技術装置 (高周波利用設備)	高周波電磁界、パルス信号
(6)輸送機器	誘導電磁界、回路の過渡振動、放電
(7)電気機器・照明機器	誘導電磁界、高周波電磁界、回路の過渡振動、放電
(8)核兵器	核爆発に伴う電磁パルス

近年の人工システムから発生する電磁放射の多くは、搭載したデジタル電子回路に起因しており、クロック周波数ノイズやスイッチングノイズがその主な原因である。立ち上がり急峻なパルス信号の周波数スペクトル成分が、数百 MHz までの広帯域な周波数帯域に渡って発生するのが特徴であり、クロック周波数の高周波数化や信号の高速化によって、1 GHz 以上の周波数成分をもつ電磁妨害波の問題も顕著化している。

通信装置や情報技術装置からの電磁放射は、IEC/CISPR (国際無線障害特別委員会) で定められた国際標準試験法において放射妨害波の電界強度として、その許容値が規定されている³⁾。放射妨害波は、機器システムを構成する電子機器や電気機器のプリント基板や筐体本体ばかりでなく、電源線や接地線、信号線、通信線からも発生する。

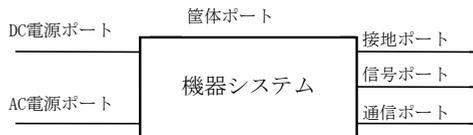


図 3・6 CISPR 試験法における供試装置配置例

機器システムの各ポート（筐体、電源、接地、信号、通信）は、機器システムと外部電磁環境との個々の境界点（面）であり、**図 3・6** のように規定されている⁴⁾。ポートの数や形態および配置により放射妨害波の特性は変化する。

機器システムの接地は、異常電流や伝導ノイズの回避のみに主眼が置かれているだけでなく、筐体や回路基盤の接地設計により放射妨害波を抑制することが可能である⁵⁾。通常、信号用接地には大きく分けて、一点接地と多点接地がある。そのイメージを**図 3・7**、**図 3・8** に示す。更に、一点接地には直列接続と並列接続がある。

直列接続は配線が簡単であるが、接地線のインピーダンスが無視できない場合は、グラウンド導体に近い側の回路の信号電流による電圧降下の影響を受けることになり、接地の効果に影響が生じる。これを回避するためには並列接続が望ましいが、配線量が多くなる欠点がある。ただし、周波数が高くなると、この接続形態にも問題が発生し、接地線の長さがそこを伝播するノイズ信号周波数の $1/4$ 波長およびその奇数倍になるとインピーダンスが非常に高くなる。また、 $1/20$ 波長より長くなると電磁放射が大きくなる。すなわち、高周波になるほどこれらの現象は発生しやすくなり、この問題を解決するために多点接地が用いられる。

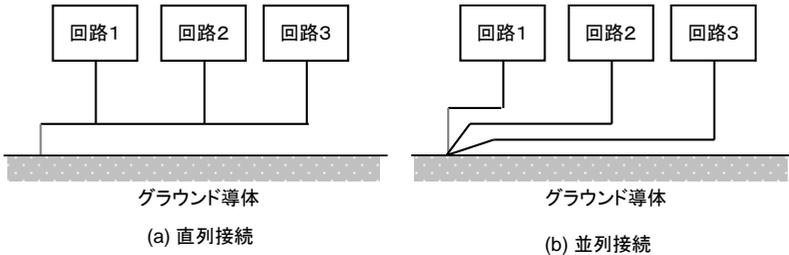


図 3・7 一点接地

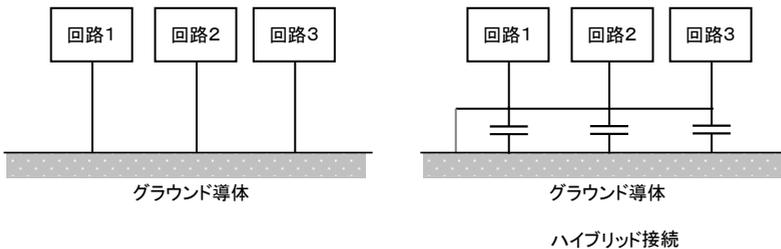


図 3・8 多点接地

多点接地は、各回路の接地線を最も最短距離にある低インピーダンスのグラウンドに接続する方法であり、接地線の低インピーダンス化により電磁放射の抑圧を図ることができる。更に、一点接地の直列接続にコンデンサを挿入し多点接地とすることにより、低周波で一点接地として働き、高周波においては多点接地として働くハイブリッド接地を実現でき、低周波での伝導ノイズ抑制効果を保ちながら高周波での電磁放射にも効果がある。

3-2-3 機器のイミュニティ対策

電気機器、電子機器の電源ケーブルやインタフェースケーブルなどに電磁波ノイズが混入し機器のノイズ耐力（イミュニティ）の限度値を超えると、品質が劣化したり誤動作を生じる。電磁波ノイズはコモンモードでケーブルなどに誘導し、ケーブルの線間電圧（ノーマルモード）に変換され電子回路に影響を及ぼす。

機器システムに影響を及ぼす主な電磁波ノイズ源は、電氣的波形の違いにより、①定常正弦波、②定常パルス波、③過渡波に分けられる。定常正弦波は、電力送電線から放射される低周波電磁界や、放送電波送信所、不法な CB 無線、無線システムから放射される中・高周波電磁界などである。定常パルス波は、蛍光灯やアーク溶接機、インバータ装置などから放射される AC 電源に同期したパルス波やファーストトランジェントなどである。また、過渡波は、静電気放電や雷サージなど自然現象や電気鉄道スパーク時などに生じるパルス波、大電力装置の電圧遮断時などに生じる過渡電流などである。なお、ノイズ源が人工システムの場合の放射電磁界の詳細は表 3・1 に示したとおりである。

これら様々なノイズ源から発生したノイズは、図 3・6 に示したのと同様に、筐体、通信線、電源線、アース線、接地線などの各ポートから伝搬し、妨害を受ける機器システムへ影響を及ぼす。通信装置や情報技術装置のイミュニティ規格としては、主に、TC/77 や CISPR で作成された国際規格が運用されており、これらポートへ各種のノイズ波形を印加することで、その印加レベルと発生する動作異常から機器システムのイミュニティレベルを評価する試験法となっている⁴⁾。

機器システムのイミュニティ対策は、各ポートから進入する電磁波ノイズを抑制する手法となる⁵⁾。筐体ポートより、機器システム内に直接進入する電磁波ノイズを抑制するためには、シールドが有効である。金属体の閉曲面により、その両側にある媒質空間を電磁的に絶縁する方法であり、一方の媒質空間から他の一方の媒質空間へ伝搬される電磁波ノイズを微量に抑制することができ、電磁放射の対策としても使用される。シールドは、対策する周波数により、静電シールド（静電気対策）、磁気シールド（直流、低周波電磁界対策）、電磁シールド（高周波電磁界対策）などに分類することができる。

機器システムの場合、実際には筐体から通信線や電源線などのケーブルが出ているため、筐体ポート以外の各ポートからコモンモードの伝導性ノイズとなって、システム内に侵入する場合が多い。対策としては、ケーブルがもつ直列インピーダンスが高く、ケーブルとグラウンド間の並列インピーダンスが小さいほど、ケーブルの線間に誘起されるノーマルモードの電圧が抑制され、イミュニティが向上する。

ケーブルの直列インピーダンスを高くするためのひとつの方法は、コモンモードチョークコイルの装着である。多くは、リング状のフェライトコアであり、信号線とその帰路回路を同一リング内に通す。それぞれの逆向きの電流により信号線の外部に発生する磁界の向きも反対となり、また磁界のほとんどは透磁率の高いフェライト内部を通るので、お互いにキャンセルされインピーダンスの増加はなく、ノーマルモードの信号に対しては何ら抑制を与えない。しかしながら、コモンモードの信号に対しては、信号線と帰路回路が一つの導線のように見えるため、透磁率の高いフェライトのインピーダンスがノイズを抑制する効果を生じる。材質や構造により、数 KHz～数百 MHz の伝導性ノイズの抑制に効果がある。

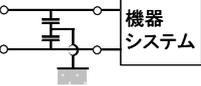
ケーブルとグラウンド間の並列インピーダンスを小さくするためのひとつの方法として、

デカップリングコンデンサを挿入する方法がある。コンデンサは、周波数が高くなるに従いインピーダンスが低くなる性質をもっているため、情報となる信号や商用電源へ影響を及ぼさないように、カットオフ周波数以上のノイズ周波数成分のみをグラウンドへバイパスするような値のものを使用する。また、インダクタと組み合わせ、 LC フィルタとすることで、直列インピーダンスを付加したコモンモードフィルタを形成することができる。

また、主に電源線にかかわるイミュニティ向上の方策として、入出力回路をトランスで分離する方法がある。トランスとして、絶縁トランス、シールドトランス、ノイズカットトランスなどがあり、特にノイズカットトランスは、電磁シールド構造であり高い透磁率の材料を用いているなどの理由から、グラウンドが不安定なシステム間のアイソレーションや、低い周波数から広帯域のノイズである場合などに有効である。

各ポートの主なイミュニティ対策方法を表 3・2 に示す。

表 3・2 各ポートの主なイミュニティ対策方法

対策方法		対策の原理と用途
(1) シールド		<ul style="list-style-type: none"> ・外部電磁環境から分離する。 ・主に、直接的な電磁波ノイズ対策
(2) コモンモード チョークコイル		<ul style="list-style-type: none"> ・ケーブルの直列インピーダンスを高くする。 ・主に、伝送性ノイズ対策
(3) コンデンサ		<ul style="list-style-type: none"> ・ケーブルとグラウンド間の並列インピーダンスを小さくする。 ・主に、伝送性ノイズ対策
(4) トランス		<ul style="list-style-type: none"> ・入出力回路を分離する。 ・主に、伝送性ノイズ対策

3-2-4 機器内の電磁環境

機器システムの回路実装はますます高密度化しており、機器内の電磁環境を良好に保つことは、機器システムの正常な動作に不可欠であり、そのために専門的な知識と対策が重要である。機器内の電磁環境対策のひとつとして、回路レベルでの対策技術がある。機器内では、信号ノイズや電源ノイズなど内部ノイズが他の回路へ侵入し性能劣化などの影響を及ぼす。

デジタル回路を搭載したプリント基板とその周辺における回路レベルでのノイズ対策として、実装技術により実施することができる⁶⁾。プリント配線間にはパターン設計により、インダクタンスやキャパシタンスが発生し、デジタル信号レベルの変化や回路共振などによりノイズ電圧が発生する。これに対し、グラウンドパターンの設計を工夫したり、グラウ

ンド間にデカップリングコンデンサを挿入するなどの対策方法がとられる。

また、信号線伝送インピーダンス不整合による反射で波形ひずみが生じるため、低インピーダンスの電圧駆動、信号線の終端整合、伝送インピーダンスの一定化、などの対策がなされる。更に、隣接した信号線間の誘導結合によりノイズが誘導する現象をクロストークノイズといい、隣接する平行線長を短くする、配線間隔を大きくする、配線インピーダンスを低くする、終端を整合させる、などの対策が講じられる。

近年、無線機能を有した情報技術装置が普及し、機器内で発生した微弱な電磁雑音、無線通信の受信感度を低下させたり、他の電子システムへ深刻な障害を及ぼす「イントラ EMC」が問題となっている。携帯電話機や無線 LAN、デジタルテレビ受信機など、機器の小型化、高性能化に伴うものや、自動車、航空機、船舶のように電氣的に外部と孤立した空間内で、急激に高性能な電子システム化が進展したために生じているものがある。これら問題への対策は、現在も研究が進められているが⁷⁾、無線機能を含めた機器内部の EMC 設計を基本から検討し、従来型の回路基板への実装技術による対策を講じたり、また、APD (Amplitude Probability Distribution : 振幅確率分布) によるノイズ評価が影響分析に有効であるとの報告がなされており、今後の対策に有効と思われる。

■参考文献

- 1) 「ノイズ対策最新技術」編集委員会, “ノイズ対策最新技術,” 4 章など, 総合技術出版, 1986.
- 2) 赤尾保男, “環境電磁工学の基礎,” 電子情報通信学会, 1991.
- 3) IEC, “CISPR 22 Ed.5.0 Amendment 2,” 2006-01.
- 4) IEC, “CISPR 24 Ed.1.0 Amendment 2,” 2002-10
- 5) Clayton R. Paul (翻訳監修 佐藤利三郎), “EMC 概論,” ミマツデータシステム, pp.51-84, 第 1 版, 1996.
- 6) 電気学会, “情報通信機器のノイズイミュニティー電磁障害防止に向けて一,” 2 章~5 章, コロナ社, 2002.
- 7) 電波産業会, “デジタル電波利用の最適化に向けた電波雑音に関する調査検討会 報告書,” 2008-3.