

# —EMC のための設計テクニック—

## Part 2: ケーブルとコネクタ

Eur Ing Keith Armstrong\*, C.Eng MIEE MIEEE

翻訳: 佐藤智典\*\*

これは、このジャーナルでこれから一年にわたって発表していく、電気 / 電子 / 機械ハードウェア設計におけるベスト・プラクティス EMC テクニックに関する 6 つの論文のシリーズの 2 番目のものである。このシリーズは、電源、シングル・ボード・コンピュータ、そしてモータ・ドライバなどのような「工業用コンポーネント」から、コンピュータ、オーディオ / ビデオ / TV、計測器などのようなスタンド・アロンの、あるいはネットワーク化された製品の設計者を想定したものである。

これらの 6 個の論文でカバーするテクニックは：

1. 回路設計 (デジタル、アナログ、スイッチ・モード、通信)、及びコンポーネントの選択
2. ケーブル、及びコネクタ
3. フィルタ、及びトランジェント・サプレッサ
4. シールド
5. PCB レイアウト (伝送線路を含む)
6. ESD、電気機械デバイス、及び力率補償

上のトピックのいずれについても 1 冊の教科書を書くことができる (そして多数書かれている) ので、このジャーナルの論文の形ではさまざまな論点を示し、ベスト・プラクティス・テクニックの最も重要な点を示す以上のことはできない。この論文で述べるテクニックの多くは、信号のインテグリティを向上させるためにも重要である。

### このパートの目次

- 2. 全てのケーブルはアンテナである
  - 2.1 スペクトラムの使用と干渉の可能性
  - 2.2 導体からの漏洩とアンテナ効果
  - 2.3 全てのケーブルは固有の抵抗、容量、及びインダクタンスの影響を受ける
  - 2.4 導体の使用を避ける

\* Cherry Clough Consultants, Associate of EMC-UK

\*\* URL: <http://member.nifty.ne.jp/tsato/>

- \* 2.4.1 導体の代替品の費用 / 効果分析
- 2.5 ケーブルの分離と引き回し
- 2.6 ケーブルから最良の性能を引き出す
  - \* 2.6.1 伝送線路
  - \* 2.6.2 製品の内部や外部で用いられる導体に関する EMC の考慮
  - \* 2.6.3 送出導体と還流導体のペアリング
  - \* 2.6.4 遮蔽付きケーブルの性能を引き出す：遮蔽
  - \* 2.6.5 遮蔽付きケーブルの性能を引き出す：遮蔽の終端
  - \* 2.6.6 遮蔽の両端での終端
- 2.7 コネクタから最良の性能を引き出す
  - \* 2.7.1 遮蔽無しコネクタ
  - \* 2.7.2 PCB 間のコネクタ
  - \* 2.7.3 遮蔽付きコネクタ

## 2. 全てのケーブルはアンテナである

### 2.1 スペクトラムの使用と干渉の可能性

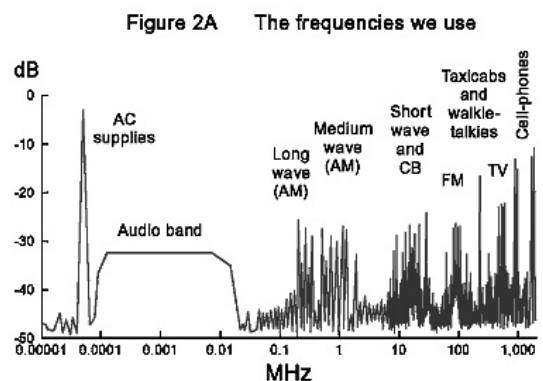
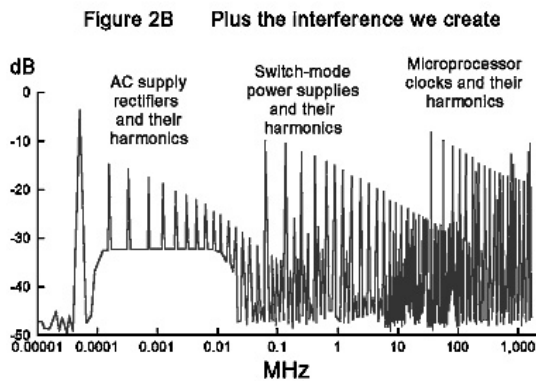


Figure 2A は、AC 電力線から音声周波数、長波、中波、及び短波無線、FM、及び TV 放送、900MHz と 1.8GHz の携帯電話に至る、市民の日常生活で一般に用いられている周波数を示す。

実際のスペクトラムはこれよりも混雑している—9kHz よりも上の全ての範囲は、何らかの目的で、

誰かによって使用されている。この図は、日常生活でマイクロ波技術がより一般的になるにつれ、すぐに 10GHz まで (あるいは 100GHz にさえ) 広げることが必要となるであろう。

Figure 2B は、Figure 2A の使用スペクトラムに、一般的な電気機器や電子機器からの典型的なエミッションを示す、それ程良く知られていないスペクトラムを重ねたものである。



AC 主電源整流器は、その電力に応じて、かなりの周波数に基本周波数の高調波のスイッチング・ノイズを放射する。5kVA 程度の電源 (リニアでもスイッチ・モードでも) は、50~60Hz の整流ブリッジのスイッチング・ノイズによって数 MHz までの伝導性エミッション限度に不合格となるかも知れない。サイリスタ式の DC モータ・ドライバや位相制御 AC 電力コントローラも同様のエミッションを持つであろう。これらのエミッションは長波や中波の放送、そして短波帯の一部に容易に干渉する。

スイッチ・モード電力コンバータは、2~500kHz の基本周波数で動作させられる。スイッチ・モード・コンバータがそのスイッチング周波数の 1,000 倍の周波数で顕著なレベルのエミッションを持つことは珍しくはない。Figure 2B には、パーソナル・コンピュータで一般的な 70kHz のスイッチング電源からのエミッションを示してある。このエミッションは FM 放送帯に至る無線通信に干渉することがある。Figure 2B には、16MHz クロックのマイクロ・プロセッサやマイクロ・コントローラからの典型的なエミッションのスペクトラムも示してある。これらの一般的な品目が 200MHz 以上でエミッション限度を超えることは珍しくはない。現在、パーソナル・コンピュータは 400MHz のクロックを使っており、1GHz に進もうとしているので、そのデジタル技術がスペクトラムの上側の全ての範囲で干渉を引き起こせる (そして干渉を受ける) ことは明らかである。

これを述べた理由は、全ての導体がアンテナであるためである。それら全ては伝えられた電気をより広

い環境に漏洩することのできる電磁界に変換する。また、それら全てはその領域の電磁界を伝導性電気信号に変換する。我々の世界でこの法則に対する例外はない。

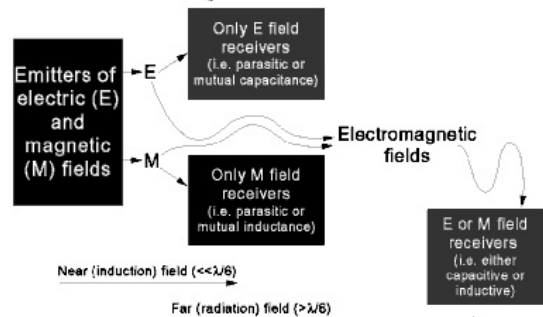
従って、導体は、信号が放射エミッションを引き起こし、また外部のフィールドが信号を汚染する (サセプティビリティとイミュニティ) 主な手段である。

## 2.2 導体からの漏洩とアンテナ効果

電界 (E フィールド) は導体領域の電圧によって生成され、磁界 (M フィールド) は電流 (常にそうであるように、ループを流れる) によって生成される。全ての電気信号はその導体によって双方の種類のフィールドを生成するので、全ての導体はその信号が外部環境に漏洩し、また外部のフィールドが信号の中に漏洩できるようにする。

関係する周波数の波長 ( $\lambda$ ) の  $1/6$  よりも大きな距離では、電界、及び磁界は電氣的、及び磁氣的な成分の双方による電磁界 (EM フィールド) となる。例えば：完全な電磁界への変化は、30MHz では 1.5m、300MHz では 150mm、900MHz では 50mm で起きる。従って、Figure 2C に示すように、周波数が高くなると、導体を単なる電界や磁界の放射器や受信器として扱うことは不適切となる。

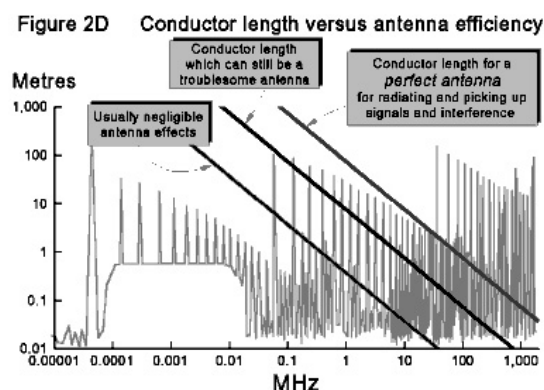
Figure 2C Electric and magnetic fields become electromagnetic fields with distance



周波数の上昇のもう 1 つの効果は、 $\lambda$  が導体長と同等となると共振が発生することである。この一部では、信号からフィールドへの (そしてその逆の) 変換はほぼ 100% に達することがある。例えば、標準ホイップ・アンテナは単なるワイヤに過ぎず、その長さが  $\lambda$  の  $1/4$  である場合にはそれは信号からフィールドへの完全な変換器となる。

これは非常に単純化した説明であるが、ケーブルやコネクタの使用者が考慮すべき重要なことは、全ての導体が共振アンテナとして振る舞うことがあるということである。明らかに、我々はそれらが非常に良くないアンテナとなることを望んでおり、導体がホイップ・アンテナのようになると仮定 (我々の目的のためには十分に良い) し、我々をガイドするために Figure 2D を用いることができる。

Figure 2D の縦軸は導体長をメートルで示したものであり、視覚的なガイドとして Figure 2B のスペクトラムを重ねてある。最も右側の (赤の) 線は完全なアンテナとなる導体長と周波数の関係を示している。



明らかに、普通に用いられる周波数において、非常に短い導体でさえもエミッションやイミュニティの問題を引き起こし得る。100MHz の信号やフィールドにとっては 1m の長さの導体が極めて効率的なアンテナとなり、1GHz においては 100mm の導体が良いアンテナとなる。この単純な事実が、EMC 問題の数多くの「黒魔術」の原因である。

普通に用いられる周波数がより低く、典型的なケーブルの長さではそれ程効率的なアンテナとはならなかったのはそれ程昔のことではないが、これが電気配線の「慣習と実践」が古くなりつつある理由である。

Figure 2D の中間の (青の) 線は、それ程効率的なアンテナとはならないものの、依然として問題を引き起こし得る導体長を示している。最も左の (緑の) 線は、そのアンテナ効果が (最もクリティカルな製品は例外として) 普通は無視できるほど短い長さを示している。

あなたは、誰かが「大丈夫だ。それは接地しておいた」と言うのを幾度聞いたことがあるだろうか？ RF が色盲であるというのは EMC コミュニティにおけるお決まりのジョークであり、それが伝搬する緑 / 黄のストライプの導体が完全な接地であると言いきかせることはできず、必然的に全ての接地導体もアンテナとなる。

## 2.3 全てのケーブルは固有の抵抗、容量、及びインダクタンスの影響を受ける

しばらく、フィールドとアンテナのことは忘れよう：いくつかの簡単な例が、普通に用いられる現代的な周波数においては理想からの極めて小さな逸脱が導体に運ばれる信号に問題を引き起こすことを示すであろう。

- 直径 1mm のワイヤの 160MHz における抵抗は、その周波数においては電流の 67% がその外側の  $5\mu\text{m}$  のみを流れる表皮効果により、DC の場合よりも 50 倍大きくなる。
- 25mm の長さの直径 1mm のワイヤは 1pF 前後の固有空間蓄積容量を持つ。これは大した値に聞こえないが、176MHz では  $1k\Omega$  の負荷となる。もし 25mm の長さのワイヤの切れ端が自由空間で完全な 5V ピーク・ピークの 16MHz 方形波で駆動されたならば、その 16MHz の 11 次高調波はそのワイヤを駆動するだけのために 0.45mA を要することになる。
- 10mm の長さの 1mm の直径のコネクタ・ピンは 10nH 前後の固有インダクタンスを持ち、これは大した値には聞こえない。40mA を吸い込むバックプレーン・バス・インピーダンスを完全な 16MHz の方形波で駆動しようとした場合、このピンにおける電圧降下は 40mV 前後となり、信号のインテグリティ、及び / もしくは EMC にかんがりの問題を引き起こすのに充分となる。
- 1m の長さのワイヤは  $1\mu\text{H}$  前後の固有インダクタンスを持ち、それを建物の接地接続ネットワークに接続するために用いればサージ防護デバイスが適切に機能することを妨げる。
- フィルタの 100mm の長さの接地ワイヤはかなりの固有インダクタンス (100nH 前後) を持ち、5MHz 程度以上でのフィルタ性能を台無しにすることがある。
- 4m のケーブルの遮蔽のための 25mm の長さの「ピッグ・テール」終端は、30MHz 程度以上でのケーブルの遮蔽の有効性を台無しにするのに充分である。

直径 2mm 以下のワイヤの固有キャパシタンスやインダクタンスに関する親指の法則は、1 インチ当たり 1pF、そして 1mm 当たり 1nH (単位を混在させて済まないが、その方が覚えやすい) である。

大半の基本的な電気の教科書にも見つかる、次のような非常に単純な式  $Z_C = 1 / (2\pi fC)$ 、及び  $Z_L = 2\pi fL$  は、導体の本質的な不完全性が重要となるかどうかをどのような技術者でも気付くようにさせるであろう。

## 2.4 導体の使用を避ける

上の簡単な分析は、周波数が高くなるにつれてケーブルの問題が大きくなることを示している：信号をきちんと運ばせることは難しく、また漏洩を止めることも難しい。

オーディオのような低周波の信号においてさえも、ケーブルはより多くの問題を与える。全ての半導体 (LM324 のような低速のオペアンプでさえも) は数百 MHz よりも上では「鉱石ラジオ」の検波器のように振る舞うので、ケーブルのアンテナ効果はオーディオ信号に予測できない汚染を与える。

従って、最も費用効果の高い EMC 適合のための信号やデータのケーブルやコネクタについての最良のアドバイスは、金属導体を一切使用しないことであるかも知れない。非金属の通信が望ましく、近頃は多くの代替手段がある：

- 光ファイバー
- 無線 (例えば、Bluetooth、無線 LAN)
- 赤外線 (例えば IrDA)
- 自由空間マイクロ波、及びレーザー・リンク (例えば、建物間の)

#### 2.4.1 導体の代替品の費用 / 効果分析

多くの設計者は、伝統的なケーブルやワイヤを用いて材料費を抑えたままとしなければならないと感じている。しかし、プロジェクトを完了させ、信頼できる、EMC 適合の製品、システム、そして施設を作るための総費用を計算に含めた時、しばしば光ファイバー、あるいは無線リンクが全体として安上がりであったと気付くことがある。勿論、それでは遅すぎる。

信号ケーブルやコネクタについて：最も単純な電気製品を除いては、もはやいかなる予測できる形でも、材料費は利益を出せる販売価格と関係していない。適切な費用 / 利益分析は、信号インテグリティや EMC 適合、罰金リスク、それに加えて高頻度の返品や保証請求、そして市場の認知による低水準の販売といった、起こり得る問題を考慮に入れるべきである。

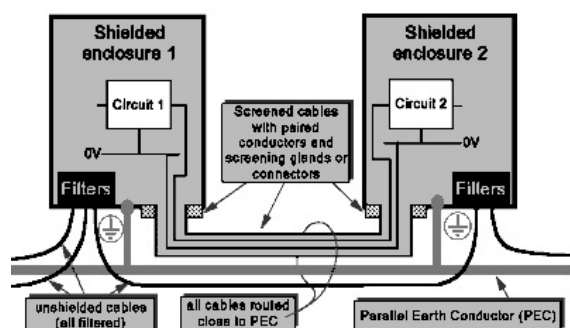
設計技術者は彼らの設計の商業的なリスクを考慮しないことを好むが、彼らは (通常はより商業寄りの担当者からの入力を用いて) これをどのような正確さでも行なうことのできる唯一の人々である。しかし、電子設計者がその設計の機能性や材料費にのみ注意を払っている限り、それらの企業は競争での優位性を失っていき、また未知の大きさの商業的なリスクを負うであろう。

#### 2.5 ケーブルの分離と引き回し

設置配線の規則は実際にはこのシリーズの範囲外であるが、製品設計者は製品の外部接続を設計するためにそれが何であるかを知る必要がある。ここでは、IEC 61000-5-2:1997 や、その他の多くの情報技術機器や通信機器の設置に関連する最近の規格の主な要求の、短い要約を示す：

1. 全ての建物は、少なくともその内部の接続ネットワークで接地レベルに接続された、BS6651 Appendix C、あるいはそれと同等な落雷防護システムを持たなければならない。建物内の全ての鉄鋼、金属構造、ケーブル・ダクト、コンジット、装置のシャーシ、及び接地導体は、4m よりも大きくない編目の三次元接続ネットワークを作るために交差接続しなければならない。
2. 電源と信号のケーブルを、非常に敏感なものから非常にノイズなものまでの少なくとも 4 つの「クラス」に分類する。
3. ケーブル・クラス間に少なくとも規定された最小の間隔を確保しながら、機器の要素間の全てのケーブルを単一の経路に沿って布線する (従って、それぞれに単一の接続パネルがなければならない)。
4. トランスジューサーや機器 (EMC 適合性が証明された) の製造業者によって特に禁止されていない限り、ケーブルの遮蔽 (そして全ての保護外装) をその両端で機器のエンクロージャ・シールドに 360 ° 接続 (以下を参照) する。
5. 全てのケーブル (信号や電力) を網状接地ネットワークの一部を構成する導体や金属構造に非常に近接して引き回すことにより、過剰な遮蔽電流を避ける。
6. 建物の網状接地が使用できないならば、平行接地導体 (PEC) として、ケーブル・トレイ、ダクト、コンジット、あるいはそれらが存在しないならば太い接地導体を用いる。PEC はその両端で機器のシャーシ・アースに接続されていなければならない、その全長にわたって信号ケーブルが固定される。

Figure 2E Good practices when installing shielded enclosures



分離、PEC、そして (一般に) 両端での遮蔽接続の必要性は、相互接続パネル・レイアウトの設計、コネクタの種類の選択、そしてヘビー・デューティーな PEC への何らかの接続手段の用意に影響を与える。Figure 2E は、遮蔽付き、及び遮蔽無しの双方

のケーブルによる遮蔽付きエンクロージャの相互接続に伴うテクニックの概要を示す。

PC とそのディスプレイ、専用のプリンタ、あるいはモデムとの間のような、機器の要素間の短距離の接続のためには、—相互接続される全ての要素が主電源の同一の短いセクションから給電され、建物の他の部分への全ての長いケーブル（例えばネットワーク・ケーブル）が電氣的に絶縁されている（例えば Ethernet）限り— 上述の d（両端でのエンクロージャ・シールドへの 360°ケーブル遮蔽接続）のみが必要となる。これらの遮蔽接続テクニックは、家庭用ハイファイやホーム・シアター・システムの EMC のためにも必要となる。しかしながら、雷雨に際してそのような機器を保護するためには、しばしば a も同程度に有用となる。

## 2.6 ケーブルから最良の性能を引き出す

適当な信号用ケーブル製造業者のカタログを開けば、同様の用途においてさえも、多岐にわたる種類のケーブルを見つけるであろう。これは全てのケーブルが不完全であるという警告である。所定の用途のための最良のケーブルを選択することは難しく、おそらくは高価過ぎ、嵩張り過ぎ、硬過ぎ、そして 5km のリールで 26 週のリードタイムでの特注でのみ入手可能なものとなるだろう。

### 2.6.1 伝送線路

伝送線路テクニックは、ケーブルが共振アンテナとして振る舞うことを防止する。

信号電流ループの送信導体と還流導体が互いに物理的に近接しており、強い相互結合を持つならば、それらの相互キャパシタンスとインダクタンスの組み合わせが特性インピーダンス  $Z_0 = \sqrt{L/C}$  を生ずる。ここで、 $L$ 、及び  $C$  は単位長（着目する最高の周波数の  $\lambda$  の断片）当たりのインダクタンスとキャパシタンスである。

$Z_0$  は、ケーブルやコネクタ（そして PCB 配線—このシリーズの第 5 部を参照）について計算することができる。

相互接続の全長にわたって  $Z_0$  が一定に保たれており、かつ駆動、及び / もしくは受信（信号源、もしくは負荷）インピーダンスが  $Z_0$  に「整合」しているならば、インピーダンスの管理された伝送線路が構成され、共振効果は生じない。導体の固有インダクタンスやキャパシタンスも、はるかに少ない問題しか生じない。これが RF 機器や全ての EMC 試験装置が 50Ω の伝送線路ケーブルとコネクタを使っている理由であり、また高速の、かつ / あるいは長距離のデータ・バスやシリアル通信リンクが伝送線

路（通常は 50 ~ 120Ω の範囲の）を使っている理由である。

線路は整合していなければならず、古典的方法では信号源と負荷の双方で整合させられる。これは信号源から負荷への最大の電力伝達を達成するが、それぞれの相互接続に対して 50% の電圧の損失を生じ、RF 機器以外での通常の信号相互接続にはあまり用いられない。その代わりに、EMC や信号インテグリティの観点からは理想的ではないものの、電圧の損失を生じないように伝送線路はしばしばその片端でのみ終端される。片端のみでの終端はコストを節約するための工学上の意識的な決定である。Figure 2G、2H、及び 2J は主な終端方法を示している。

しかし完全なものではなく、共振についてもそうであり、最良の現実の伝送線路も多少の漏洩を起こす。設置も、ケーブルが急な角度で曲げられ、押し潰され、きつく縛られたり固定されたりし、繰り返して曲げられ、損傷を受け、あるいは不適切なコネクタを取り付けられた時に、 $Z_0$  の変化を引き起こすことによって伝送線路性能の劣化（漏洩の増加）を引き起こす。

残念ながら、現代的な高周波において十分に高品質な伝送線路ケーブル相互接続を構成するための費用は極めて高いものとなることがある。例えば、マイクロ波試験装置用のフレキシブル・ケーブルは 1 メートル当たり何百ポンドもの値段となることがある。これが、Gigabit Ethernet が、データ・レートを低減してランダムに分散させるために複雑な DSP アルゴリズムを使わねばならず、さらに 4 組の配線を使う必要がある、安価なカテゴリ 5 UTP（シールド無しツイスト・ペア）を使っている理由である。従って、伝送線路は極めて強力ではあるものの、高周波におけるケーブル問題に対する万能薬ではない。

### 2.6.2 製品の内部や外部で用いられる導体に関する EMC の考慮

製品の内部 — もしその製品のエンクロージャ・シールド、そしてその外部ケーブルの遮蔽とフィルタリングが十分に良いならば、信号インテグリティは悪影響を受けるであろうものの、ほとんどのようなワイヤやケーブルでも使用することができる。ここでの問題は、高性能のデジタルやアナログの電子機器においては、より高価な内部ケーブルを使用した方が安く済む程、エンクロージャ・シールドとフィルタリングのための費用が高くなり得ることである。

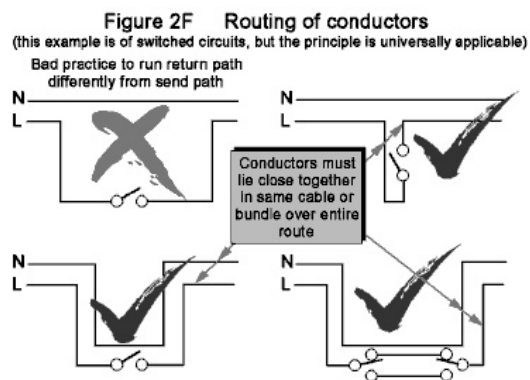
一般に、光ファイバー以外の全ての信号を相互接続された PCB（望ましくは単一の PCB —たとえフ

レクシ・リジッド・タイプのものを使っても) 上のトラック内に留め、内部ケーブルを一切使用しないことが最も費用効果が良い。このためには、それらの PCB は、全てのトラックの下にグラウンド・プレーンを設けて、このシリーズの第 5 部に従って設計されている必要がある。通常、これはエンクロージャ・シールドとフィルタリングのコストを低減して最も費用効果の良い製品を与え、また信号インテグリティも向上させることから普通は開発のやり直しも節減する。

製品の外部 — この場合、その製品がデジタルであってもアナログであっても、遮蔽無しケーブル上のシングル・エンド信号は深刻な負債となる。デジタル信号をフィルタリングすることは、エミッションの低減のためにはそれほど役に立たない: シングル・エンド駆動は信号周波数そのものの多量のコモン・モード電流を生じ、その信号周波数に依存してその製品を伝導性、あるいは放射性エミッション試験に不合格とさせる。どのようなフィルタリングもその信号を除去する必要がある、これは役に立たない。

フィルタリングは低周波アナログ信号に対しては極めて効果的に働くが、 $\pm 0.05\%$  (12bit) 以上の精度のためにはフィルタのコストとそのプリント板上の面積は急激に増加する。勿論、フィルタでは、適切に設計された平衡伝送システムが容易に除去できるような帯域内の干渉 (電灯線のハムのような) を取り除くことは困難である。

### 2.6.3 送出導体と還流導体のペアリング



伝送線路を使用しない場合でも、常にペアにした導体を用いること。還流電流のための専用の還流経路を、送信経路にできる限り近く (かつアースや遮蔽を介さずに) 用意する。これは、信号がシングル・エンドであり、それらの還流導体全てが共通基準電位に接続される場合でさえも有効である。磁束打ち消し効果が還流電流が他の電流経路に優先して送信導体に最も近い経路を流れるようにさせ、我々はこの自然現象をケーブルのフィールド・パターンをタ

イトに保ち、電界や磁界の漏洩を低減するために用いることができる。Figure 2F は、一般的な用途について、この一般的な原理を示す。

Figure 2F では片側にスイッチを付けた主電源配線を示しているが、同一の原理が信号にも適用される。電流ループ全体にわたっての送信導体と還流導体の近さが、たとえ良好な EMC を気にしないとしても、高周波においては回路の動作のために絶対的に重要となる。

多数のシングル・エンド (すなわち 0V を基準とした) 信号を伝達するリボン・ケーブルは EMC と信号インテグリティのためには非常に劣悪なものであるが、それをシールドすることは、それをフラット・ケーブルが避ける筈であった硬い、嵩張る、高価なケーブル・アセンブリとする。

フラット・ケーブルに対するペアリング・テクニックの使用はその EMC をかなり改善し、この導体配列が最良である:

*return, signal, return, signal, return, etc.*

しばしば推奨される、やや効果の低い代案は:

*return, signal, signal, return, signal, signal, return, etc.*

適切な平衡駆動 / 受信回路がより良い (このシリーズの第 1 部を見よ) もの、高周波においてそれらの導体ペアがあたかもそれらが平衡信号源によって駆動されているかのように振る舞うように信号源側にフラット・ケーブル用フェライト・クランプ (コモン・モード・チョーク) を取り付けることによって、しばしば顕著な改善が見られる。

ツイスト・ペアは平行ペアよりも遥かに良い。それが全ての信号の送信と還流の経路を近接させられるものである場合には、3 つ撚り、あるいは 4 つ撚りなどを用いる。

送信導体と還流導体の撚り合わせは、電源ケーブルに強く推奨される: 全ての相と中性導体 (単相では 2 本、3 相では 3 本、中性導体付きの 3 相では 4 本) を緩く撚り合わされた単一のケーブルにまとめることは、電源ラインの磁界エミッションを大幅に低減させる。電源バスバーや別々に引き回された相と中性ケーブルからの磁界は、建物の全ての場所を CRT を用いたディスプレイに適さなくさせることがある。

平衡回路とコモン・モード・チョークを用いたツイスト・ペア (このシリーズの第 1 部を見よ) は、その回路、ケーブル、及びコネクタの「平衡」によっては、数十 MHz までの信号のために良いものとなり得る。いかなる不平衡も、必要な信号の一部を、その全てがフィールドとして漏洩していく役に立たないコモン・モード電流に変換する。数マイクロ・ア

ンペアのコモン・モード電流でさえも、エミッション・テストに不合格とさせることがある。密な、より規則正しい撚り合わせは、ケーブルをより高い周波数のためにも良いものとする。

極めて多くの種類のツイスト・ペア・ケーブルが入手可能であり、その一部は伝送線路を意図している ( $Z_0$  が規定されている)。しかし、ツイスト・ペア技術は一括接続には向かない。「ツイスト + フラット」と呼ばれるフラット・ケーブルは全体がリボン状にされた複数のツイスト・ペアを含むが、一括接続コネクタのための 100mm 程度の長さの平行導体を持っている——そして、このフラットな部分は EMC を損なうのに充分なほど長い。

#### 2.6.4 遮蔽付きケーブルの性能を引き出す：遮蔽

「EMC 指令に適合する」ケーブルなどというものは存在せず、周波数に依存した遮蔽性能を持ったケーブルのみが存在する。

ケーブルの遮蔽は、その全長を 360° のカバレッジで覆わなければならない。最近では、最小の侵略性、かつ最小の感受性の信号を除いては、低コストで遮蔽が効果的に働くようにすることは徐々に困難になっている。

ケーブルのシールドを信号還流に使うことは、もはやベスト・プラクティスではない。同軸ケーブルにおける問題はその遮蔽が信号還流と外部干渉の双方の電流を運ぶことであり、それらを遮蔽の別の面に保持する（「三重同軸モード」として知られている）ために表皮効果を用いている。これはソリッドの銅の遮蔽（鉛管のような）においてはうまく働くが、柔軟な遮蔽を施されたケーブルはそれらの 2 つの電流を分離するために非常に良いとは言えず、このために還流電流は漏洩し、また干渉電流が侵入する。

「しかし、全ての RF 試験装置は柔軟な同軸を用いているのだから、それは OK の筈だ」とあなたが言うのが聞こえる。今度 EMC テスト・ラボに行った時にそれらのケーブルを注意して見て欲しい：高い周波数に用いられているケーブルは、非常に太く、硬く、そして高価であり、その理由の一部は少なくとも二重遮蔽されていることによるものである。それらは高価なねじ込み式のコネクタ（例えば N 接栓）を用いており、常に（両端で）整合した 50Ω の伝送線路で用いられている。また、それらは丁寧に取り扱われ、それを踏みつけると災いが降り掛かる。平均的な EMC テスト・ラボよりも高い周波数においては、自動車のブレーキ・パイプのように硬いセミ・リジッド、あるいはリジッド同軸ケーブルを用いなければならない。

遮蔽ケーブルの干渉防止能力は、シールド効率 (SE)、及び ZT という、2 つの方法で測定される。

SE は十分に明白であると思われ、ZT は単純には遮蔽に注入された外部 RF 電流への応答として中心導体に現れた電圧の比率である。所定の周波数での高い SE のためには低い ZT が必要となる。全周波数帯にわたる数  $m\Omega$  の平坦な ZT は理想的なものであろう。典型的な種類の遮蔽付きケーブルの遮蔽品質についての大雑把な要約を以下に示すが、それぞれの大きな分類の中に異なった性能を持つ多くの異なった構造やグレードのものがあることを憶えておくこと：

- 横巻金属箔はどの周波数でもあまり良くなく、1MHz 以上では徐々に悪化する。
- 縦巻金属箔は横巻金属箔よりは良い。
- 一重網組はどの周波数でも金属箔よりも良いが、依然として 10MHz 以上では徐々に悪化する。
- 金属箔上の網組、二重網組、あるいは三重網組は、いずれも一重網組よりも良く、またいずれも 100MHz 以上で徐々に悪化し始める。
- 2 つ、あるいはそれ以上の絶縁された遮蔽はさらに良いが、それは 10MHz 程度までであり、より高い周波数ではそれらの遮蔽の間での共振がその効果を損ない、周波数によっては単一の遮蔽と同程度となる。
- ソリッドの銅の遮蔽（例えば、セミ・リジッド、リジッド、銅管）は網組のものよりも良く、常にある周波数より上では悪化する網組や金属箔のものとは異なり、その遮蔽性能はより高い周波数においても連続的に上昇する。円筒金属コンジットは良好な高周波性能の遮蔽を加えるために用いることができる。（保護外装も遮蔽として有用であるが、それは数 MHz 程度の低周波においてのみである。）
- 「超遮蔽」ケーブルは、ミューメタルや類似の高透磁率の外皮とともに網組遮蔽を用いている。これらは、ある程度の柔軟性を保ちながら、ソリッドの銅の遮蔽と同等、あるいはそれ以上に良いものとなり得るが、高価であり、性能が価格よりも重要な用途（例えば、航空宇宙や軍事）にのみ適する。
- 私は、フェライトを混入した遮蔽ケーブルを提供している製造業者を 1 つ (Eupen) 知っているだけである。これには、超遮蔽ケーブルの高いコストをかけずに、良好な柔軟性を持った、改善された高周波性能を提供できる可能性がある。

遮蔽ケーブルの嵩とコストを減らしながら、高性能の現代的な製品のための良好な EMC を維持するためには、上で遮蔽無しケーブルについて述べたものと同様に、我々はそれぞれの信号とその還流に導体ペア、できればツイスト・ペアを使う必要がある。平衡駆動 / 受信も大いに助けになる。



### 2.6.5 遮蔽付きケーブルの性能を引き出す：遮蔽の終端

高性能のデジタルやアナログの製品においては、同軸ケーブルを使用してその遮蔽を回路の 0V トラックに接続することは、エミッションとイミュニティの双方について EMC の破綻を保证するようなものである。製品に取り付けられた絶縁 BNC コネクタは、通常は EMC について全てが良くないことのサインである。

ケーブル遮蔽は、非常に良い定量的なエンジニアリングと、何故そうしないかの EMC での理由がない限り、(たとえその後で回路の 0V に接続するとしても) 常にエンクロージャ・シールドに接続しなければならない。「我々はいつもこうしてきた」は理由とはならない。

回路開発ベンチは、製品の実際の構造と外部の世界との実際の相互接続を、できる限り厳密に作成する必要がある。さもなくば、回路設計者はベンチ上での PCB のテストを良くするために様々な相互接続トリックを用い(私は知っている — 私もそうしていた)、その結果生じる実際の用途や EMC での問題の整理を他の誰かに残すかも知れない。

しかし、高品質の遮蔽付きケーブルでさえも、遮蔽の製品への接続に欠陥があれば良くない。ケーブル遮蔽は 360 °で終端する必要がある — それが挿入される遮蔽エンクロージャの外郭への全周での接続であり、使用されるコネクタは非常に重要である。

遮蔽が数 MHz まででのみ必要な場合を除き、「ピッグテール」は決して使用すべきではない。ピッグテールを用いる場合には、それは実装テクニックが許容する限り短くしなければならず、ピッグテールを反対方向への 2 本に分けることも少しは助けになる。1980 年代の中期に、ある企業は EMC のために全てのピッグテール接続されたシャーシ取り付け型の BNC を圧着型のものに変更した。圧着工具には £600 程度のコストを要するものの、圧着の方が素早く行なえ、より少ない不良のみを生ずるために、急速に費用を節約できることに気付いて驚かされた。すなわち、ピッグテール接続は EMC のために良くないのと同様、不経済でもある。

ケーブル遮蔽の「黒魔術」は、コネクタ、あるいはそれが接続されるエンクロージャ・シールドがより低い SE を持つ場合に、ケーブルの SE が損なわれることを理解することである。

それが内部ワイヤを使っておらず、またその PCB が低背型の部品を用いた完全なグラウンド・プレーンを持つものであれば、遮蔽ケーブルをある種のシールドされていない製品とともにうまく使うことは可能である。これは、他のどのような金属板とも同

様、PCB グラウンド・プレーンがフィールド強度の低減された領域 — 限定された周波数範囲のための空間シールド — を作るためである。このテクニックをうまく使えるかどうかはその製品で用いられている電子技術に依存し、高性能のデジタルやアナログの製品には十分なものではないであろう。ケーブル遮蔽は PCB グラウンド・プレーンに 360 °接続される。

### 2.6.6 遮蔽の両端での終端

これは一部の人には異端のように聞こえるかも知れないが、近頃用いられている高周波は終端されていない端に残され、通常は過大な漏洩を引き起こす。両端での遮蔽終端はその遮蔽をどのような方向の磁界に対しても働くようにもする。

勿論、遮蔽を両端で接続するといかなる接地電位差も遮蔽に電流を流せるようになり、これはハムを拾い、あるいはケーブルを融かしさえすることがある。そのような接地電流が存在するのであれば、それは適切に保護されていない電子機器を地絡や落雷サージが破壊するような劣悪な設備接地接続の表れである。雷雨に際して、遮蔽ケーブルの終端されていない端が放電を起こし、明らかな危険を生じすることは、知られていないことではない。

ケーブル遮蔽をその片端のみで電氣的に接続し、他の端を小さいコンデンサを介して終端することが推奨されることがある。この目的は過剰な電源周波数遮蔽電流を防止することであり、非常に高い周波数に対してコンデンサが十分に低いインダクタンスを与えるようにすることは困難であり、またそれはサージや放電の問題には何も影響しないものの、ある程度の範囲で機能する。遮蔽 シャーシ間コンデンサを組み込んだ絶縁 BNC コネクタが入手可能であるが、私が知っている 1GHz まで良好に働く種類のものの最新の価格は 1 個当たり £20 近かった。電氣的に絶縁された通信は両端での遮蔽の接続を逃れる方法を提供するが、そのようなアプローチは、特に設置での地絡やサージに関連した安全性と信頼性の観点からの、詳細にわたる慎重な配慮を必要とする。金属を使用しない光ファイバーは最良の種類の電気絶縁信号通信であり、使用が最も容易である。

上の 2.5 章は、熱いケーブルを我慢することなく、また安全性を損なうことなく良好な EMC を達成するための、現在受け入れられている最良の設置プラクティスの概要(例えば、大きな接地電流を逸らすための PEC の使用)をリストしたものである。詳細については IEC 61000-5-2:1997 を参照されたい。



## 2.7 コネクタから最良の性能を引き出す

結局、コネクタは固体の中の短い導体に過ぎず、ケーブルと同様の EMC 問題の多くを受ける。

サージや静電気放電現象に際しての外部から内部ピンへの放電の可能性のため、コネクタを内部接続に用いるものと外部接続に用いるものとに分けることが最良である。そのような放電は保護素子をバイパスすることがある。

### 2.7.1 遮蔽無しコネクタ

高速バックプレーンやケーブルのためには、インピーダンスが管理された伝送線路コネクタが徐々に入手できるようになっている。

伝送線路を使用しない場合、EMC と信号インテグリティのかなりの改善は、それぞれの「送信」ピンが確実にその近くに還流ピンを持つようにすることにより、普通多極コネクタ (例えば DIN41612 やねじ止め式端子台) からでも得ることができる。最低限、2つの信号ごとに1つの還流ピンを設けること。これは平衡信号とともに使用することが最良であるが、このテクニックは信号がシングル・エンドである場合にも役に立つ。

### 2.7.2 PCB 間のコネクタ

PCB 間コネクタ (例えば、ドーターボードとマザーボード) もその全長 / 全幅にわたってばらまかれた複数の 0V ピンによって大きな利益を得るし、電源ピンの同様の配置もかなり役に立つ。最良の信号インテグリティと EMC は、通常は (同一の電源レールを共有する信号に対しては) 次のようなピン・パターンによって達成される:

0V signal, +V 0V signal, +V 0V signal, +V  
0V etc.

次のパターンはより低い性能を与えるが、しばしば充分なものであり、より少ないピンしか使わない:

0V signal, +V signal, 0V signal, +V signal,  
0V etc.

コネクタをそれらの2つの基板の共通のエッジの全長に広げ、その全長にわたって 0V、及び電源接続を気前良くばらまくことも最良である。ランダムなピン割り当てが、定在波パターンを壊すことによってより良い性能を与えることがあるという、いくつかの証拠がある。敏感な信号とノイズな信号のあいだに追加されたグランド・ピンは、クロストークに対するバリアとして役立つ。

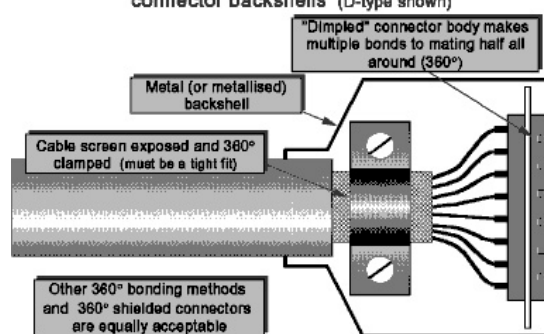
我々は本当は PCB 上のコネクタは好きではなく、これは可能であれば避けるべき (結果として信頼性

も向上するであろう) である— 既に述べたように、全ての配線の下にグランド・プレーンを設けた、単一の、あるいはフレキシ・リジッド PCB がより良い。また、PROM も含め、IC をソケットに挿さない (その代わりにフィールド・プログラマブルな PROM を使う) こと。それぞれの IC ソケット・ピンは、最も被害を受けやすい、あるいはノイズな箇所に置かれた小さなアンテナである。

### 2.7.3 遮蔽付きコネクタ

「EMC 指令に適合する」コネクタなどというものは存在せず、周波数に依存した遮蔽性能を持ったコネクタのみが存在する。

Figure 2G 360° termination of cable screens in connector backshells (D-type shown)



遮蔽ケーブルは、両端のコネクタのバックシェルを含めて、その全長で 360° 遮蔽カバレッジを維持しなければならない。コネクタのバックシェルは、それが取り付けられるエンクロージャ・シールドへ、iris スプリングやその他のいくつかの手法を用いて 360° の電気的接続を行なわなければならない。鞍形クランプは角形コネクタのバックシェルにおいて大半の目的で適切な遮蔽接続を与えるようであるが、例え短くても遮蔽をピッグテールとする必要があるものは避けること。Figure 2G は典型的な D 形コネクタの遮蔽終端を示す。

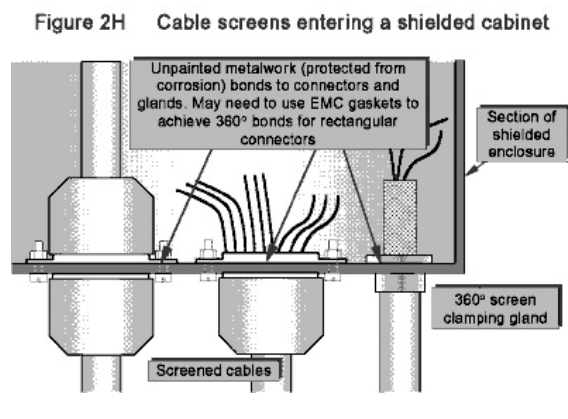
同軸、及び二芯同軸遮蔽ケーブルは、大半の利点をねじ込み式の金属のバックシェルから得る。これらは高周波においてはバヨネット式のもの (BNC のような) よりも良く、またより信頼でき、これが衛星 TV 変換器でそれが用いられている理由である。

多芯遮蔽ケーブルもねじ込み式のバックシェルを備えた丸形コネクタと共に用いることが最良であるが、しばしば D 形、あるいはより大きな角形のコネクタが規定されている。ケーブル遮蔽からコネクタ・バックシェルへの、そしてバックシェルからエンクロージャ・シールドへの 360° 接続を行なうことは、いくつかのコネクタ製造業者に尋ねるべき多くの点があり、特定の製造業者や種類に決める前にこれが効果的に行なわれているかどうかを調べる。特に、遮蔽接続のために用いられている単一の

(あるいは長い) スプリング、金具、そしてワイヤに用心せよ：それらはピッグテールそのものであり、高周波での SE を制限するであろう。

残念ながら、多くの工業規格コネクタ (例えば、ジャック・プラグ、XLR、オーディオ、そして多くの専用のコネクタ) はケーブル・シールドの正しい終端を許していない。また、残念ながら、コネクタ・システムは依然として単純な 360° ケーブル遮蔽終端の必要性を適切に考慮することなく設計されている (例えば、RJ45 や USB)。

コネクタ遮蔽の総合 SE は、低い SE のエンクロージャ・シールドやケーブルと共に用いられたならば損なわれるであろう。Figure 2H は、コネクタを遮蔽エンクロージャに接続する際の重要な配慮のいくつかを示している。



Copyright (C) 1999 Nutwood UK Ltd.

これは、Keith Armstrong 氏が UK EMC Journal 上で発表した文書を、その許諾を得て T. Sato が翻訳したものです。この翻訳については、原著者らはいかなる責任も持ちません。これについての意見、質問などは VEF00200@nifty.ne.jp (T.Sato) 宛にお送り下さい。

Last update: March 5, 2000