

—EMC のための設計テクニック—

Part 4: シールド

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、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 4 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)、及び素子の選択
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、開発に際しての繰り返しを減らし、また製造コストを削減するためにも重要である。

このパートの目次

- 4. シールド
 - － 4.1 シールドと商業的な必要性
 - － 4.2 シールドの一般的な概念
 - － 4.3 より大きい、直方体のものがベター
 - － 4.4 表皮効果
 - － 4.5 開口部

- － 4.6 低周波 (磁界) シールド
- － 4.7 カットオフ以下の導波路
- － 4.8 ガスケット
- － 4.9 表示部などのシールド
- － 4.10 換気口のシールド
- － 4.11 塗装、あるいはメッキされたプラスチックによるシールド
- － 4.12 金属を用いないシールド
- － 4.13 不適切なシールドによる伝導性試験への不合格
- － 4.14 シールド・エンクロージャの設置
- － 4.15 PCB レベルのシールドの使用

4. シールド

4.1 シールドと商業的な必要性

完全な空間シールドは、通常はそうではないにも関わらず穴だらけの籠 (ファラデーのオリジナルのもののような) が受け入れ可能であるという印象を与えるにも関わらず、しばしば「ファラデー・ケージ」として知られている。シールドを設計プロセスの初期段階で検討することを商業的に非常に重要なものとする、シールドのコスト階層がある。シールドは、次のようなものの周囲に取り付けられる：

- IC 単体：例えば 25 ペニー (50 円)
- PCB 回路の一部：例えば £1 (200 円)
- PCB 全体：例えば £10 (2,000 円)
- 部分組立やモジュール：例えば £15 (3,000 円)
- 完全な製品：例えば £100 (2 万円)
- アセンブリ (例えば工業用計装キュービクル)：例えば £1,000 (20 万円)
- 部屋：例えば £10,000 (200 万円)
- 建物：例えば £100,000 (2,000 万円)

* Cherry Clough Consultants, Associate of EMC-UK

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

これらのコスト例を、家庭用、商業用、及び工業用製品のための重要さの程度を示す非常に大雑把なガイド以上のものと捉えないで欲しい。例えば、ロンドンの新しい MI6 ビルで用いられているシールドは £100,000 よりも遥かに高いコストを要するであろうし、重要な航空制御コンピュータで用いられているものは £100 よりも高いコストを要するであろう。これらのコストはプロジェクトの後半でシールドを追加するためのリエンジニアリングのコストは考慮しておらず、それは遥かに大きくなるかも知れない。それらは、プロジェクトの後半でのシールドのリエンジニアリングによって引き起こされる遅延の結果として起こり得る、失われた販売や市場での立場も考慮していない。

重要な点は、シールドは最初から慎重に設計に組み込まれていれば非常に低コストにできる可能性があるが、製品を顧客に（あるいは EMC 執行機関に）受け入れられるようにするために最後の瞬間に追加しなければならないならば非常に高価なものとなる可能性があることである。

シールドは常にコストと重さを加えるので、EMC を向上し、シールドの必要性を低減するために、このシリーズで解説している他のテクニックを使うことが常に最良である。シールドを完全に避けることが望まれる場合でも、マーフィーの法則のため、必要であれば後でシールドを追加できるように最初から設計しておくことが最良である。あなたの新製品の EMC 試験を初めて行なう際に試せるような様々なシールド（及びフィルタ）の解決策を用意してあるならば、大抵はマーフィー氏はあなたの製品の出荷を邪魔することに挫折するであろう。

ある程度のシールドは、全ての導体や素子をソリッドの金属板に非常に近く保つことによって達成することができる。従って、EMC の優位のためには、低背型表面実装部品のみから構成された、グラウンド・プレーンを持つ PCB が推奨される。そのような PCB が追加のエンクロージャ（空間的）シールドを必要とするとしても、それは高いシールド効率（SE）を持つ必要はなく、従って作りやすく、コストも低いものとなるであろう。

有益なレベルのシールドは、電子アセンブリにおいて、常にその内部の電子ユニットとケーブルをアースされた金属面に非常に近く保ち、緑／黄のワイヤを用いたスター状の安全接地システムを用いる代わりに（あるいはそれと共に）そのアースをそれに直接接続することによって達成することができる。このテクニックは、通常は亜鉛メッキされた取り付け板やシャーシを用い、高いエンクロージャ SE の必要の回避を助けることができる。

4.2 シールドの一般的な概念

シールドがどのように働くかという主題での多くの教科書が書かれており、それらをここで繰り返すつもりはない。しかしながら、いくつかの概論が助けとなるであろう。シールドは放射電磁波を伝搬する経路にインピーダンスの不連続を設け、それを反射し、そして／もしくはそれを吸収する。これは概念的にはフィルタの動作原理と良く似ている——それらは不要な伝導信号の経路にインピーダンスの不連続を設ける。インピーダンス比が大きくなれば、SE も大きくなる。

0.5mm 以上の厚さでは、通常の金属の大半は 1MHz 以上で良好な、100MHz では素晴らしい SE を与える。金属シールドでの問題は、多くは薄い材料、1MHz 以下の周波数、あるいは開口部によって引き起こされ、この論文は主にこれらに焦点を当てる。

4.3 より大きい、直方体のものがベター

一般に、シールドされる回路とそのシールドの壁面とのあいだに大きな距離を設けられるようにすることが最良である。シールドの外側の放射フィールド、そしてデバイスが曝されるフィールドは、通常はシールド空間が大きくなればより「希薄」になる。大半の製品設計は五合徳利に一升の酒を入れようとするようなもののようで、このアドバイスは大抵は虚ろな笑いを引き起こす。

エンクロージャが互いに向かい合う平行な壁面を持つならば、共振周波数において定在波が発生することがあり、これが SE 問題を引き起こすことがある。変形のエンクロージャ、あるいは曲がった、もしくは平行していない壁面を持つもの（さらなる虚ろな笑い）は、共振を避ける助けとなるであろう。対向するシールド壁が平行している場合には、その幅、高さ、あるいは長さによる共振が同じ周波数で発生することを避けることを試みよ。立方体のエンクロージャを避け、正方形の代わりに長方形の断面を用い、互いに単純な倍数となる寸法を避けることを試みよ。例えば、もしその長さが幅の 1.5 倍であれば、幅の 2 次の共振は長さの 3 次の共振と一致する。昔ながらのフィボナッチ数列（ギリシャ人には黄金率として知られていた）によって与えられるような、無理数の比率の寸法を用いることが最良である。いずれにしても、内部の PCB、部品、そして配線がその共振周波数を予測できないように変えるので、おそらくこれについて考えすぎるだけの価値はないであろう。

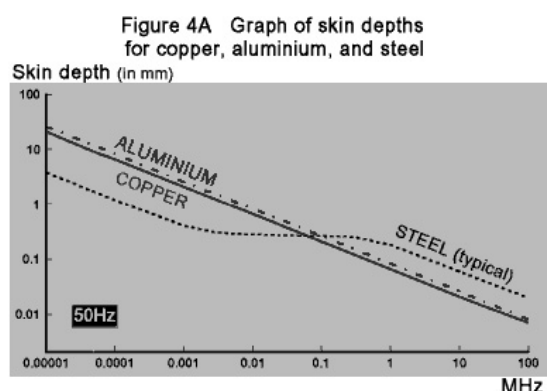
4.4 表皮効果

フィールドは2つの側面を持っている：電氣的 (E)、及び磁氣的 (M)。電磁界は、所定の割合 (空気中では 377Ω となる、インピーダンス E/M を与える) の電界、及び磁界から成っている。電界のシールドのメカニズムの1つは導電性の境界での電荷の再配分によるものであるので、電界は薄い金属箔によって容易に止められ、高い導電性 (低い抵抗) を持つおおよそどのようなものでさえも十分に低いインピーダンスを与える。高周波においては急速な電荷の再配分によってかなりの電流変化が生じるが、薄いアルミニウムでさえもこれを十分に扱うことができる。

しかし、磁界を止めることは遥かに難しい。これは、侵入する磁界と逆の磁界を作るためにシールド材の内部に渦電流を発生させることを必要とする。薄いアルミニウムはこの目的のために極めて適切なものであるとは言えない。所定の SE のために必要となる電流の侵入の深さはそのフィールドの周波数やシールドに用いられている金属の特性に依存し、これは「表皮効果」として知られている。

表皮深さとは、シールド材料内で、侵入した磁界によって引き起こされた電流がその「表皮効果」によって約 9dB 低減させられる深さである。表皮深さの3倍の厚さの材料ではその裏面での電流は約 27dB 低いものとなり、磁界に対して約 27dB の SE を与える。

表皮効果は、特に 377Ω よりも低い波動インピーダンスにおいて観察されるフィールドで磁界が支配的となる傾向がある、低い周波数で重要である。表皮深さの式は大半の教科書に示されているが、シールド材の導電率と比透磁率に関する知識を必要とする。Figure 4A は、対比のために銅を含め、アルミニウムと鋼についてこれを解いたものである。純粋な亜鉛はアルミニウムのものに近い表皮深さを持つであろう。



銅やアルミニウムは鋼の5倍以上の導電率を持つので電界を止めるためには非常に良いが、その比透磁率は1 (空気と同一) である。典型的な軟鉄は

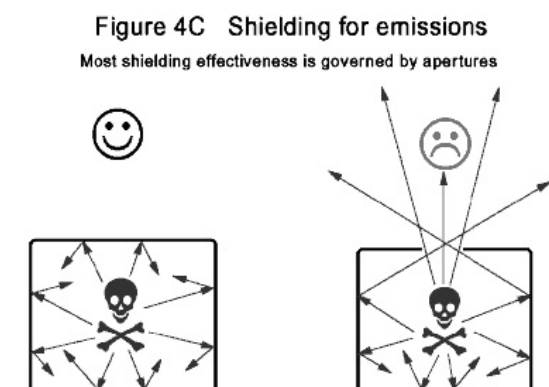
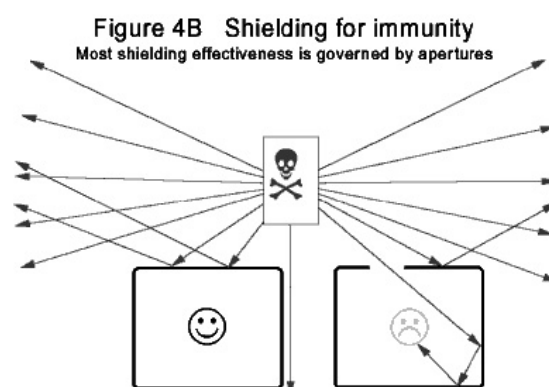
低周波では300程度の比透磁率を持ち、周波数が100kHz以上になると1に低下し、その高い比透磁率は小さい表皮深さを与え、低周波をシールドするための軟鉄の適当な厚さをアルミニウムのものよりも良いものとする。異なったグレードの鋼 (特にステンレス) は異なった導電性と透磁率を持ち、結果としてその表皮深さは有意に異なったものとなるであろう。

シールドのための良い材料は、高い導電率と高い透磁率を持ち、対象とする低周波における表皮深さの所定の倍数を達成するために十分な厚さを持つものである。純粋な亜鉛 (例えば $10\mu\text{m}$ 、あるいはそれ以上の) でメッキされた1mmの厚さの軟鉄は、多くの用途のために十分なものである。

4.5 開口部

普通の金属構造で30MHz以上の周波数で100dB以上のSEを達成することは容易である。しかし、これは継目やギャップを持たない完全に囲い込まれたシールド空間を仮定しており、その周囲全体の継目を溶接した、外部ケーブル、アンテナ、あるいはセンサ (やや特殊な製品) を持たないものを想定しているのではない限り、製品の組み立てをより難しくする。

実際には、シールドがエミッションの低減とイミューニティの向上のいずれのために行なわれているとしても、2つの単純な図 Figure 4B、及び4Cが示そうとしているように、大半のシールド性能はその開口部によって制限される。



開口部を、それがなければ完全なシールドに設けられた半波長共振「スロット・アンテナ」として振舞う穴と想定すれば、所定の SE のための最大の開口寸法を予測できるようになる。現実にはこの仮定は常に正しいとは言えないが、何もしないよりは良い手軽な設計ツールとなるという利点がある。この予測が不適切であることがわかった場合には、実践的な経験と特定の製品で用いられている技術や構造に基づいて改善することも可能であるかも知れない。

スロット・アンテナの共振周波数はその最長の寸法—その対角寸法—に支配される。これは開口部がどの程度広い、あるいは狭いかによって、あるいは開口部を通した「視線」があるかどうかによってさえも、ある程度の違いを生じる。金属板の重なりによって生じる塗装や酸化皮膜程度の厚さの開口部でさえも、それが指を通せる程広いものであるかのように、その共振周波数において依然として放射(漏洩)を生じる。

Figure 4D と 4E は、現代的な電子機器の内部で用いられている周波数が我々が通信や放送のために頼っている周波数と同じ範囲を用いているという事実についての感覚を与えるために、このシリーズで以前に用いられた。EMC の最も重要なテーマの 1 つは、外部の無線スペクトラムを汚染しないように、製品内部の周波数を内部に留めることである。Figure 4F はシールドの開口部がどの程度効率的にアンテナとして振舞うことができ、内部の周波数が無線スペクトラムを妨害し、干渉を生じることを許すかを示す。

Figure 4D The frequencies we use

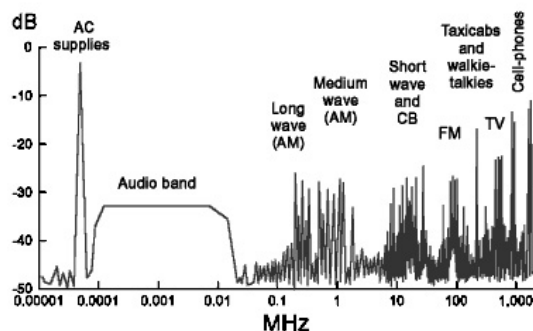


Figure 4E Plus the interference we create

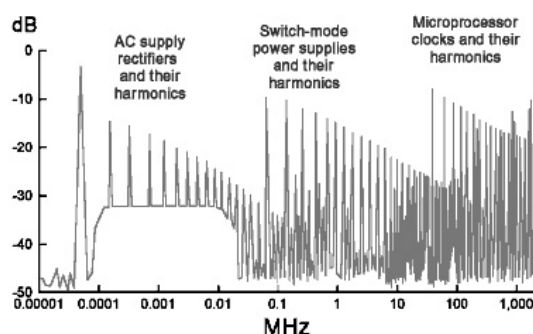
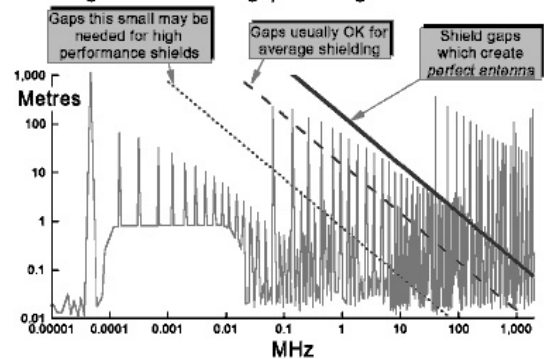


Figure 4F Shield gaps make good antennas



$v = fl$ (v は光速 3×10^8 m/s、 f は Hz で示した周波数、 l はメートルで示した波長) の関係を用いたスロット・アンテナの半波長共振が、Figure 4F の実線 (そして Figure 4G の親指の法則) の基礎である。我々は、19 インチ・ラック・ユニットの前パネルの前面のエッジに沿った長さ 430mm の狭いギャップが 350MHz 前後で半波長共振を生じることに気付いた。この周波数では、我々が例とした 19 インチ・ラックの前パネルはもはや充分なシールドとはならず、それを完全に取り除いても大きな違いは生じないかも知れない。

Figure 4G Rule of thumb for the SE of apertures

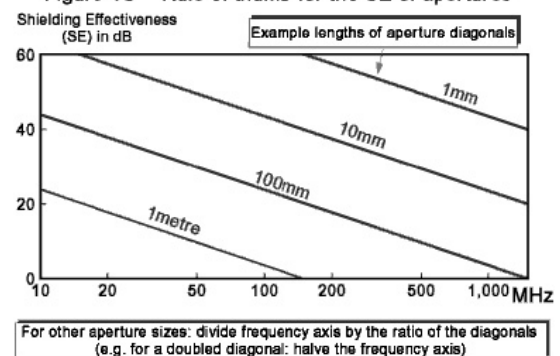


Figure 4G は所定の SE のための開口部の最大の大きさを予測するために有用であり、異なった寸法に合わせるために容易にスケーリングすることができるであろう。1GHz で 20dB の SE (大半の規格における試験のための上限) のためには、Figure 4G は 16mm よりも大きくない開口部を示唆する。これは 40dB のためには僅か 1.6mm となり、開口部をシールドするためのガスケット、及び/もしくは後述するカットオフ以下の導波路のテクニックの使用を必要とする。

現実には、実際の SE はエンクロージャ自身の壁面間での内部共振、開口部と部品や導体の近さ (デジタル・バス信号を流すリボン・ケーブルのようなノイジーなケーブルをシールドの開口部や継目から充分に離すこと)、エンクロージャの部品を組み立てるために用いている固定具のインピーダンスなどに依存する。

可能であれば、必要な、あるいは不可避な開口部を複数の小さなものに分割すること。不可避な長い開口部（カバー、ドアなど）は、導電性ガasket やスプリング・フィンガー（あるいはその他のシールドの連続性を維持するためのもの）を必要とするかも知れない。互いに近接した多数の小さな同一の開口部の SE は（大雑把にはあるが）その個数の平方根に比例し、2 個の開口部は 3dB、4 個では 6dB、8 個では 9dB といった具合に悪化する。しかし、関係する周波数の波長が小さい開口部の配列の全体の大きさと同程度となり、あるいは開口部が（その波長と比較して）互いに近接していない場合には、この大雑把な「2 倍ごとに 3dB」規則は位相打ち消し効果によって打ち壊される。しかしながら、少なくともこの単純な規則は危険な側に間違えるものとなる。

半波長以上離して配置された開口部は、通常はそれぞれによって独立に達成される SE を悪化させないが、100MHz での半波長は 1.5m であるので、これよりも小さい典型的な製品においては、そのような低い周波数では開口部の数の増加はエンクロージャの SE を悪化させる傾向を持つであろう。開口群がスロット・アンテナとして振舞うことは珍しくない。シールドを流れ、開口部があるためにその理想的な経路から逸れさせられる電流は、それに磁界の放射を引き起こさせるであろう。開口部の両側での電位差はその開口部に電界の放射を引き起こさせるであろう。筆者は、PCB に実装されたマイクロ・コントローラを覆う小さなシールドの直径 4mm よりも大きくない穴（クリップ・インのプラスチック製取り付けピラーのための）からの、130MHz での劇的なレベルの放射を見たことがある。Figure 4G は 4mm の穴のその周波数における非常に良好な SE を示しているが、特にノイズなマイクロコントローラからのエミッションはシールドにかなりの電流を流させることができ、その穴のアンテナ効果ではなく、これがエミッションを引き起こすものと見られる。長い狭い開口部がある場合には、その開口部の長い側を内部の回路に応じて適切な方向に向けることによってそのようなエミッションを低減できる場合もある。

4.6 低周波（磁界）シールド

妥当な厚さの通常の金属を用いてその周波数で良好な SE を達成することがいかに困難であるかを示すために、50Hz の周波数は Figure 4A で強調されている。

ミュンメタルやラジオメタルなどのような特殊な金属は極めて高い比透磁率を持っており、それはしばしば 10,000 のオーダーに達する。その表皮深さは

極めて小さいが、それが効果的なのは数十 kHz までに過ぎない。その透磁率が台無しにされ、研磨や水素ガス中での再アニールが必要となってしまうため、これらの材料で作られたものに衝撃を与えないように注意しなければならない。これらの風変わりな材料は、むしろ保護すべき領域から磁界を逸すための通路として用いられる——通常のシールドで用いられる概念とは異なったものである。

1 よりも大きい比透磁率を持つ全ての金属のシールド材料は強い磁界に対しては飽和し、そうするとシールドとしては有効に働かず、しばしば過熱する。ハム・フィールドを低減するために主電源トランスを囲む鋼やミュンメタルのシールド・ボックスは、飽和し、所要の効果を達成できなくなることがある。しばしば、そのような激しい局所的なフィールドにさらされないように、そのボックスを大きくすることのみが必要となる。

低周波シールドのためのもう 1 つのシールド・テクニックはアクティブ・キャンセルであり、少なくとも 2 つの企業が、特に高レベルの電源周波数磁界に汚染された環境で CRT 表示装置のイメージを安定させるためにこのテクニックを開発している。

4.7 カットオフ以下の導波路

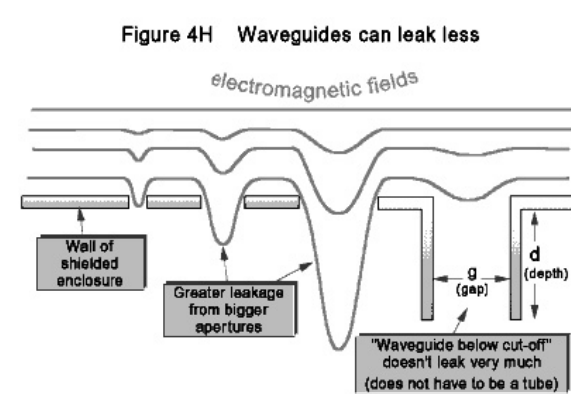


Figure 4H は、開口部を通して漏洩する波が自由空間に達するまでにそれを囲む金属壁の間を伝搬しなければならない距離を大きくすれば、その開口部が拳を通せるほど大きいものであってもかなりの SE を達成できることを示している。この非常に強力なテクニックは、「カットオフ以下の導波路」と呼ばれる。ハニカム金属構造は、実際にはカットオフ以下の多数の導波路を密集させたものであり、しばしばシールド・ルームや類似の高 SE エンクロージャの換気グリルとして用いられている。

どのような開口部とも同様、導波路もその内部の対角角 (g) が波長の半分である場合には侵入したフィールド全ての通過を許すので、導波路のカットオフ周波数は次の式で与えられる：

$f_{\text{cutoff}} = 150,000 / g$ (g が mm である場合は結果は MHz となる)

そのカットオフ周波数以下では、導波路は通常の開口部のように漏洩せず、(Figure 4H に示すように) かなりのシールドを与えることができる： $f < 0.5 f_{\text{cutoff}}$ である場合、達成される SE はおおそ $27 d / g$ (d は波が自由になるまでに伝搬しなければならない導波路の距離) となる。

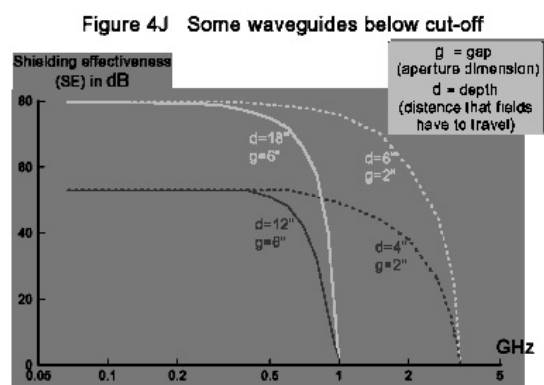


Figure 4J は 6 種の異なったカットオフ以下の寸法の導波路によって達成される SE を示す。より小さい直径 (g) ではより高いカットオフ周波数となり、50mm (2 インチ) の直径では 1GHz で完全な減衰が達成される。深さ (d) を大きくすると SE が向上し、すぐに非常に高い値が達成される。

カットオフ以下の導波路はチューブから作る必要は無く、製品の大きさをあまり大きくしないように、その深さ (d) だけ折り込まれた単純な板金構造によって実現することもできる。このテクニックは人の発想によって制限されるだけであるが、それを使うことを意図していない不合格となった製品に後から付け加えることは困難であるので、プロジェクトの初期に考慮に入れなければならない。

その効果を台無しにしてしまうので、決してカットオフ以下の導波路に導体を通してはならない。カットオフ以下の導波路は、それがエンクロージャから出る箇所 SE を台無しにしないように、プラスチックのシャフト (例えば制御用ノブ) に適用すると有用である。これに代わるものは、環状導電性ガスケットとともに金属のシャフトを用い、それによって生ずる摩擦と摩耗に煩わされることである。

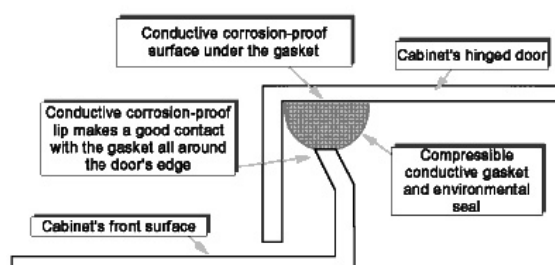
それは真のカットオフ以下の導波路には見えないかも知れないものの、カットオフ以下の導波路はシールド・エンクロージャの継目に容易に適用することができる。私は、エンクロージャの平らな蓋のエッジからのエミッションが、それを本体と 25mm 重ねるようにした場合に 900MHz で 10dB 減少するのを見たことがある。また、あるキャビネットの製造業者はこのテクニックによって 1GHz で 40dB の SE を達成している。このテクニックの使用は連

続した帯やガスケット、そしてノもしくは多数の固定の必要を避けることができ、従って材料費や組み立て時間を節約するが、稀にしか使われないようである。機構的なテクニックとして、それは電子設計者の興味の対象ではない；そして、EMC コースを受けている機構設計者を見た人はいるだろうか？

4.8 ガスケット

ガスケットは、接合部、継目、ドア、あるいは取り外せるパネルなどの、漏洩の大きい開口部を避けるために用いられる。「一度取り付けただけ」の組み立てにおいてはガスケットの設計はそれほど難しくないが、化学的なもの (腐食を避けるため) は言うまでもなく、多数の矛盾する機構的な、また電気的な要求に適合しなければならないため、ドア、ハッチ、カバー、その他の取り外し可能なパネルなどはガスケットに多くの問題を引き起こす。この譲歩に加え、シールド・ガスケットは環境シールともなることも要求されることがある。Figure 4K は、EMC シールドと共に環境シールを与える、導電性のゴムやシリコン・コンパウンドを用いた、工業用キャビネットのドアのための典型的なガスケット設計を示す。そのような用途では、しばしばスプリング・フィンガーも用いられる。

Figure 4K Bonding the doors and removable panels of shielded cabinets
example of a door on industrial cabinet
(horizontal cross-section, viewed from above)



ドアやパネルの安全接地に用いられる緑 / 黄のワイヤが数 kHz よりも上では EMC には効果がないということは、注意しておく価値があるであろう。これは、長いワイヤの代わりに短い幅広のアース用の帯を用いれば、数 MHz まで広げられるかも知れない。

多数の製造業者から様々な種類のガスケットを入手することができ、その多くは特注でのサービスも行なっている。この観察は、1つのガスケットで広範囲の用途のために適切なものはないことを示している。ガスケットの設計や選択に際しての考慮点は、以下のものを含む：

- 機構的適合性
- 圧縮性

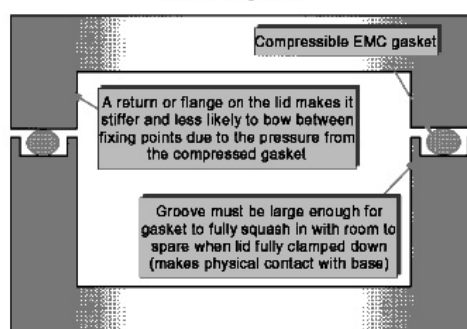
- 広範囲の周波数でのインピーダンス
- 腐食への耐性 (意図した環境に相応しい、組み合わせられる材質との低い起電力)
- 通常の使用で想定される負荷への耐性
- 取り付け面の形状と処理
- 取り付けや取り外しの容易さ
- 環境シール、発煙や発火に関する要求

シールド・ガスケットには、主に 4 種類ある：

- 導電性ポリマー (金属粒子を含んだ絶縁ポリマー) :
これは環境シールも兼ね、低い圧縮力を持つが、かなり一定した圧力を必要とし、レバーの助けがない手で開閉されるドアでの使用を難しくする。
- 導電性材料で被覆されたポリマー (導電性の外部コーティングを持つポリマー・フォームやチューブ) :
これは非常に軟らかく柔軟な、低圧縮力のものとしてことができ、一部のものはそれほど一定した圧力を必要としない。しかし、これらは最良の環境シールとはならず、その導電層は摩耗によって劣化しやすい。
- 金属メッシュ (ランダム、あるいは網の) :
これは一般には非常に硬いが、金属エンクロージャのインピーダンスとより良く一致し、上のタイプのものよりも良い SE を持つ。環境シール性能は良くないが、2 種類のガスケットを一度に取り付けられるように、環境シールと組み合わせたものも供給されている。
- スプリング・フィンガー (“フィンガー・ストック”) :
通常はベリリウム銅やステンレス鋼で作られており、良好な適合性を持つことができる。その最良の用途は、手で容易に取り外し (開き)、また容易に挿入する (閉じる) ことができなければならない、高頻度で使用されるモジュール (あるいはドア) におけるものである。その摺動接触動作は、良好な接続の達成と、金属エンクロージャとのインピーダンスの整合を良好なものとするのを助けるが、高い圧力が加えられない場合には保守 (おそらく、数年ごとの石油系ゼリーの塗布) が必要となるかも知れない。スプリング・フィンガーは、服の袖に引っかかって曲がったり外れたりするような偶発的なダメージによっても駄目にされやすい。スプリング・フィンガーの寸法とそのギャップはインダクタンスを生じ、高周波やクリティカルな用途では大半の EMC 試験チャンバーのドアで見られるように 2 列とすることが必要となるかも知れない。

ガスケットは、その効果を発揮し、また容易に組み立てられるようにするために、製品側での適切な機構的な配慮を必要とする。単に表面に貼り付けられ、組となる部品のあいだで潰されたガスケットは、期待したようには良く機能しないかも知れない— ガスケットを圧縮して良好なシールを達成しようとして取り付けねじを締め付けると、取り付けねじの間のすき間が反り、漏洩を起こすギャップが開くかも知れない。これは組となる部品の不適切な硬さによるものであり、Figure 4L に示すようにガスケットを収めるための溝を使わずに、組となる部品を十分に強くすることは困難である。この溝は、組み立てに際してガスケットを正しく配置し、その位置に保つことも助ける。

Figure 4L Example of mechanical design to use a gasket



ガスケットが接触する面は (導電塗料によるのではない限り) 塗装されているはず、使用する材料、処理、そしてメッキは電氣的腐食の観点から慎重に検討しなければならない。

ガスケットの全ての詳細と寸法は製造業者の図面に示されていないとすればならず、それに対するいかなる変更の要求も、そのシールドと EMC への影響について評価される。マスキングの情報が図面に含まれていないために、塗装作業が他の業者に移された際にガスケットが役に立たなくなることは珍しいことではない。用いられる塗装工程の変更 (異なった塗装工でさえも) も、マスクされていないガスケット取り付け面への余計なスプレーの程度の違いにより、有害な影響を持つことがある。

4.9 表示部などのシールド

表示部はエンクロージャに開口部を必要とし、シールドを損なう。通常、少数の小さい LED は少しの問題を引き起こす (プラスチックのエンクロージャを使用している場合でさえも、それらはしばしば人体静電気放電感受性の弱点となる) だけである。シールド・エンクロージャの外側に表示を付ければ開口部を避けられるが、表示部からシールドの利点を奪い、表示部へのデータや電源のケーブルのエンクロージャへの貫通という新たな問題を引き起こす。

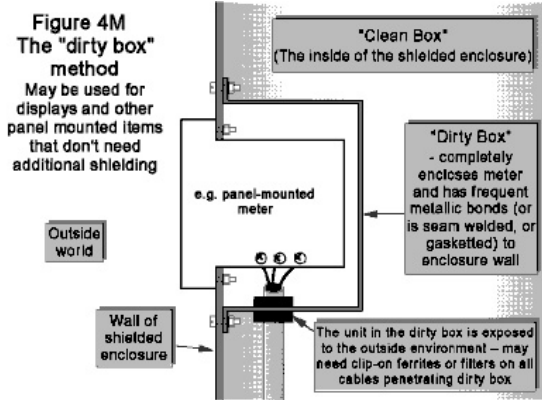


Figure 4M は、シールド・エンクロージャの壁面の大きな開口部に、その開口部を介したフィールドの漏洩を制御するための内部の「ダーティー・ボックス」を用いて取り付けられた表示ユニットを示す。ダーティー・ボックスとエンクロージャの内壁との接合は、その他の全てのシールドの接合と同様に扱わなければならない。

シールド・ウィンドウは、表示部が製品のエンクロージャによるシールドを必要とする箇所が必要となる。ある種の高性能 CRT は、その表示管の周囲の金属フレームが開口部の全周でシールド・パネルに電気的に接続されている場合、良好なシールドを与えることができる。そのような CRT が用いられていた製品のアクティブ・マトリックス LCD への更新が CRT よりも多くのエミッションを引き起こすことが知られており、CRT では必要なかった追加のシールド・ウィンドウが必要となる場合がある。

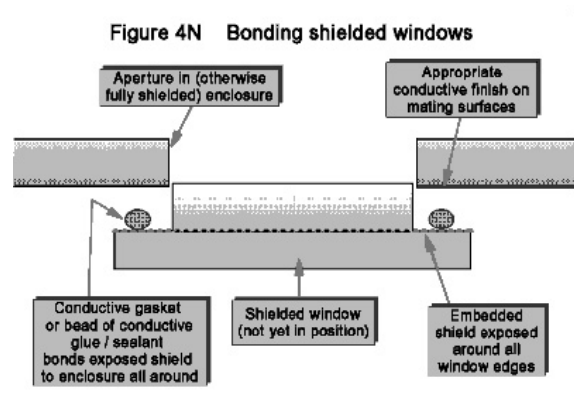
主に 2 つの技術に基づいた、種々のシールド・ウィンドウが入手可能である：

- プラスチック板上の金属膜、通常は酸化インジウム 錫 (ITO)。8 ミクロン以上の膜厚で光学的減衰が許容できなくなり始め、電池駆動の製品ではバックライト電力の上昇が問題となる。Figure 4A を参照すると、この膜の厚みは 100MHz 以下で良好な SE を得るためには不十分であることがわかる。
- 埋め込まれた金属メッシュ、通常は黒色処理された銅線の細かいメッシュ。金属膜と同等の光学的減衰においてより高い SE を与えるが、メッシュの大きさが適切でない場合には表示の画素との干渉によってモアレを生じることがある。トリックの 1 つはメッシュを斜めにするのである。

極めて高いシールド性能のためには、ハニカム金属表示スクリーンを使用することもできる。これは密集した多数のカットオフ以下の導波路であり、その非常に狭い視野角がオペレータの頭がその表示を他

人が覗くことを妨げることから、主にセキュリティや軍事の用途で用いられる。

シールド・ウィンドウにおける肝心な点は、その導電層（メッシュ、膜、あるいはハニカム金属）がエンクロージャ・シールド面にその切り抜かれたエッジの周囲全体で接続されなければならないということである。Figure 4N は、機構的な固定の必要性を避けるために導電性シール剤や粘着剤を用いることのできる、典型的な組み立て方の 1 つを示している。紫外線硬化型接着剤の使用は組み立て時間を機構的な固定と同等に、あるいはそれよりも良くすることができる。



4.10 換気口のシールド

これは表示部のシールドと似た議論をもたらすが、メッシュやカットオフ以下の導波路のみを使用することができる。上と同様、これらはその換気口の周囲全体でエンクロージャ・シールドと金属同士で（あるいは導電性ガasketを用いて）接合されていなければならない。勿論、メッシュの大きさは表示におけるものよりもかなり粗いものでも良く、しばしばエクスパンド・メタルが用いられる。

メッシュの大きさはエンクロージャの SE をあまり低下させない程度に小さいものでなければならない。互いに近接した多数の小さな同一の開口部の SE は（大雑把にはあるが）その個数の平方根に比例し、2 個の開口部は 3dB、4 個では 6dB、8 個では 9dB という具合に悪化する。換気グリルでよく見られる多数の小さい開口部では、メッシュの大きさは同等の SE を持つ 1 つの開口部よりも大幅に小さいであろう。換気口の大きさが波長の $1/4$ を超えるような高周波においてはこの大雑把な「2 倍ごとに 3dB」という式は過剰設計をもたらすことがあるが、この状況のための単純な親指の法則はない。

カットオフ以下の導波路は高い SE で大きな風量を可能とし、ハニカム金属換気シールド（密集した細長い六角形のチューブから成る）は長年この目的で用いられてきた。高度にシールドされた 19 イン

チ・ラックの少なくとも1つの製造業者が、上面と下面の換気口に、通常の板金構造テクニックを用いたカットオフ以下の導波路によるシールドを用いることを主張している筈である。

換気口のシールドの設計は、空気中の埃で汚されたシールドの清掃の必要性によって複雑なものとなるかも知れない。エア・フィルタの慎重な設計は、換気シールドを溶接し、あるいは恒久的に取り付けたままとしておくことを可能とする。

4.11 塗装、あるいはメッキされたプラスチックによるシールド

プラスチック・エンクロージャはしばしば望ましい感触や外観のために用いられるが、シールドは困難になる。バインダーに混ぜられた金属粒子などの導電性の材料（導電性塗料）や本物の金属（メッキ）でプラスチック・エンクロージャの内面をコーティングすることは技術を要するものであり、またモールド型の設計に際して細部にわたる注意を必要とする。

しばしば—シールドが必要であることが判明した際に—そのプラスチック・エンクロージャの設計が、要求される SE をその内面をコーティングすることによって達成することを許さないことに気付くことがある。弱点は、通常はプラスチック部品の継目である：それは、しばしば洩れのない接合を保証することができず、そして大抵はガasketを付けることは容易ではない。それに伴う出荷開始や新製品からの収益の開始の遅れとともに、しばしば高価な新しいモールド型が必要となる。

新製品のためのプラスチック・ケースが必要であれば、その設計プロセスの始めから必要な SE を達成するための検討を行なうことが、財政的に肝心である。

プラスチックに対する塗装やメッキは非常に厚いものとするとはできず、達成できる表皮深さの数は非常に小さい。表皮深さを低減してより良い SE を達成するために、ニッケルの適度に高い透磁率の利点を用いた、ニッケルと他の材料による巧妙なコーティングが開発されている。

塗装やメッキにおける別の現実的な問題は、意図した環境において、その製品の寿命のあいだそれを下地のプラスチックと密着させておくことを含む。材料とプロセスに関する専門的な知識なしに行なうことは容易ではない。製品の内部で剥離した導電性塗料やメッキは EMC を悪化させるだけではない—それは導体を短絡させ、信頼できない動作、そして火災や感電死のリスクを引き起こすことがある。プラスチックの塗装やメッキは、その特定の分野での

長い経験を持った専門家によって行なわれねばならない。

プラスチックの塗装やメッキにおける特殊な問題は、絶縁である。Class II 製品（二重絶縁）においては、そのプラスチック・ケースの内側に導電層を付け加えると沿面距離や空間距離が減少し、電気的安全性を損なうことがある。また、どのようなプラスチック・ケースの製品においても、そのケースの内面に導電層を付け加えることは継目や結合部を通して人体静電気放電 (ESD) が起きるようにすることがあり、放射干渉の問題を ESD に対する感受性の問題に置き換える可能性がある。商業的な理由から、シールドが急に必要となる可能性が少しでもあるならば、設計プロセスの最初からプラスチック・エンクロージャの慎重な設計を行なうことが重要である。

一部の企業は、薄く魅力的でない安価な金属シールドをプリント配線板の上やアセンブリの周囲に付けることにより、その洒落たケースにシールドとしての二重の責任を負わせることを不要としている。これはコストと頭痛を大きく減らすことができるが、プロジェクトの最初から考慮しなければならず、さもなくばそのような内部の金属構造を取り付けるための余裕がない（あるいは間違った余裕がある）ことになるだろう。

4.12 金属を用いないシールド

導電性のプラスチックやレジンとは、通常は機械的強度を与える絶縁性のバインダーに分散された導電性の粒子や繊維を用いている。これらはベースとなるプラスチックやレジンの「肌」の形成によって妨害され、ヘリコイル・インサートや類似のものを使わずに良好な RF 結合を達成することが困難となることがある。これらの絶縁性の表面は結合部での長い開口部の形成の防止を困難とし、コネクタ、ケーブル・グランド、あるいはフィルタの本体との良好な接合を与えることも困難とする。導電性粒子とポリマーの混合の不均一性による問題は、エンクロージャの一部を弱くし、また他の箇所ではシールドを失わせることがある。

炭素繊維（それ自身が導電性である）をベースとした材料や自己導電性のポリマーが入手できるようになりつつあるが、それらは金属の高い導電性を持たず、通常の厚さでは良好な SE を与えない。

4.13 不適切なシールドによる伝導性試験への不合格

放射現象が通常は 30MHz 以上でのみ試験されるというだけで、シールドが 30MHz 未満では重要でないという意味とはならない。低周波で極度に漏洩す

るエンクロージャは、伝導性試験に不合格となるかも知れない。

0.5m 以下の寸法の小さい製品は、通常は 30MHz 未満では比較的効率的なアンテナとなり、その問題の大半は漏れのあるケーブル遮蔽（ケーブルは通常は 30MHz 未満で良いアンテナとなるために十分に長い）に起因するものである。しかし、小さい製品でさえも、それが強力な低周波フィールド源を含んでいるならば、30MHz 未満でも有効なエンクロージャ・シールドを必要とするかも知れない。

4.14 シールド・エンクロージャの設置

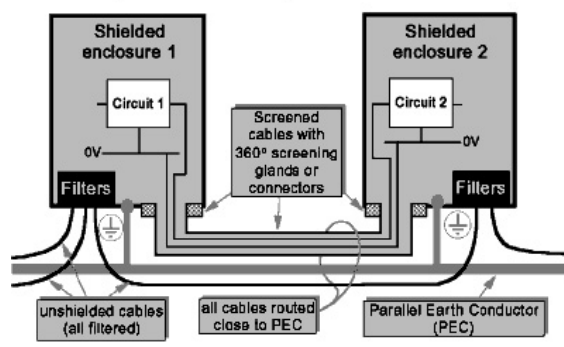
開口部を通してシールド・エンクロージャに入り込むワイヤは、どのような SE の要求も完全に崩すであろう。Figure 4P は、シールド・エンクロージャを、それを駄目にすることなく設置するための主な手法を示している。

シールド・エンクロージャに侵入する全ての遮蔽付きケーブルの遮蔽とコネクタ（あるいはケーブル・グランド）、そしてその 360°接続は、エンクロージャの金属構造自身の「ファラデー・ケージ」の一部として肝心なものである。シールドされていない外部ケーブルのためのフィルタの充分に考慮された組み立てと設置も、良好な SE を達成するために肝心である。これらの点はこのシリーズの第 2 部や第 3 部で示しており、もう一度示す価値がある。

ケーブル遮蔽のエンクロージャ・シールドへのピッグテール（360°接続する代わりの）は、非常に低い周波数（例えば、短いピッグテールでも 10MHz 以上で、長くなればより低くなる）からエンクロージャの SE を台無しにするということは繰り返しておく価値がある。

工業用キャビネットのシールド（そしてフィルタ）については IEC1000-5-6 のドラフト（BSI の 95/210789 DC）を、そして、なぜ火で加熱しなければならない半田鍍と共にピッグテールを歴史の本の中に葬るのが最良であるかを含む、配線（そして接地）のベスト・プラクティスについては BS IEC 61000-5-2:1998 を参照されたい。Figure 4P はこれらの 2 つのベスト・プラクティス標準に従ってシールド・キャビネットを設置するための主なポイントを示しており、これはこのシリーズの第 2 部の繰り返しである。この図の、シールド・キャビネットの設置に関連する詳細については第 2 部を、シールドされていないケーブルへのフィルタの接続に関する詳細については第 3 部を参照されたい。

Figure 4P Installing shielded enclosures



4.15 PCB レベルのシールドの使用

コストを節約するためにシールドをできる限り低いレベルのアセンブリに適用するという、我々のそもそものテーマに戻り、PCB レベルのシールドについて検討しよう。

理想的な PCB レベルのシールドは、上で述べた製品レベルのシールド・エンクロージャのミニチュア版である、その壁面に取り付けられたシールドされたコネクタや貫通フィルタを備えた、完全に取り囲む金属の箱である。この結果はしばしばモジュールと呼ばれ、極めて高い SE を与えることができ、しばしば RF やマイクロ波の世界で用いられている。

その SE は通常は良く設計されたモジュールほど良くないものの、より低コストの PCB シールドも可能である。いずれも、単純な 5 面のシールド・ボックスを他の部品と同様に PCB に実装できるように、シールドの一面のために PCB のグランド・プレーンに頼っている。この 5 面のボックスをその周囲の多数の点でグランド・プレーンに半田付けすることは、回路の必要な領域の周囲に「ファラデー・ケージ」を作ることとなる。種々の標準的な 5 面の PCB 実装型のシールド・ボックスをすぐに入手することができ、この種の精密金属加工に特化した企業はしばしばカスタム設計を行なっている。蓋を開けて調整を簡単に行ない、テスト・ポイントにアクセスし、あるいはチップを交換できるような、スナップ取り付け式の蓋を持つボックスを入手することができる。そのような取り外し可能な蓋は、通常はそれが取り付けられた時に良好な SE を達成できるように全周のスプリング・フィンガーによって取り付けられる。

このシールド手法の弱点は、明らかにグランド・プレーンに半田付けされた点の間のギャップによって作られる開口部、グランド・プレーンの全ての開口部（例えば、貫通リードやビア・ホール）、そしてその 5 面のボックスの全ての開口部（例えば、換気、調整可能部品へのアクセス穴、表示など）である。5 面のボックスを部品面のグランド・プレーンに全

周で半田付けすれば、手作業の時間のコストと引き替えに、一組の開口部を除去することができる。

最小のコストのためには、ワイヤやケーブルの使用を避け、全ての信号や電源を PCB 上のシールド領域にトラックとして引き込みたい。これは、バルクヘッド取り付け型シールド・コネクタやバルクヘッド取り付け型フィルタの PCB での相当品を使う必要があることを意味する。

シールド・ケーブルに相当する PCB トラックは、しばしば「ストリップライン」と呼ばれる、2つのグラウンド・プレーンの間に引かれたトラックである。この「シールド・トラック」と同じ銅箔層の両側にガード・トラックが引かれ、このガード・トラックが上面や下面のグラウンド・プレーンに非常に細かくビア・ホール接続されることがある。インチ当たりのビア・ホールの数がここでの制約条件であり、それらのギャップがシールドの開口部として振舞う(ガード・トラックは、それ自身が高周波で良好な SE を与えるためには高すぎるインダクタンスを持つ)。PCB 材料の誘電率は空気の 4 倍程度であるので、ビアの間隔を決めるために Figure 4F や 4G を使う場合には、その周波数軸は 2 (PCB の誘電率の平方根) で割らなければならない。一部の設計者はガード・トラックに煩わされず、問題のトラックを「溝に入れる」ためにビア・ホールを使うだけである。共振を避けるためにそのようなビア・ホールの列の間隔を望ましい間隔の近傍でランダムに変えることは良いアイデアかも知れない。

ストリップラインがシールド・ボックスで囲まれた回路領域に入る箇所では、そのストリップラインの近くで、その上下のグラウンド・プレーン(そして全てのガード・トラック)を遮蔽ケースの半田付けされた接続部に両側で接続すれば充分である。

平行する単一のグラウンド・プレーン層のみを持つトラックでは、反対側の面は空気にさらされており、これは「マイクロストリップ」構造と呼ばれる。マイクロストリップがシールド・ボックスに入る際には、そのボックスの壁によるインピーダンスの不連続の影響を受けるであろう。マイクロストリップ上の信号の最高の周波数成分の波長がボックスの壁の厚さ(あるいはボックスを取り付けるフランジの幅)の 100 倍よりも大きいならば、この不連続はそれほど抵抗とはならないかも知れない。しかし、そうでないならばある程度の性能の低下が発生するかも知れず、そのような信号はストリップラインを用いて配線することが最良である。

全てのシールドされていないトラックは、シールドされた PCB 領域に入る際にはフィルタされなければならない。しばしば、そのようなフィルタのない PCB シールドを用いて大きな改善を得ることも可

能であるが、これは予測することが困難であるので、フィルタは常に設計に含めておく(少なくとも試作段階ではそうしておいて成功した EMC 試験の後でのみ PCB レイアウトから取り除く)べきである。

最良のフィルタは貫通型のものであるが、コストを節約するためにはワイヤ配線型のものは避ける必要がある。通常の方法で PCB に半田付けでき、後の工程でシールド・ボックスを取り付けた後にその壁に手で半田付けすることのできる、リード付きの PCB 実装型のもが入手できる。より短時間での実装は、フィルタの中央の導体をその下のグラウンド・プレーンに半田付けし、シールド・ボックスとそのグラウンド・プレーン層とが、その近傍で、両側で半田接続されることを保証することによって達成される。この後者の構造は表面実装の「貫通」フィルタにも適切であり、実装コストをさらに低減する。

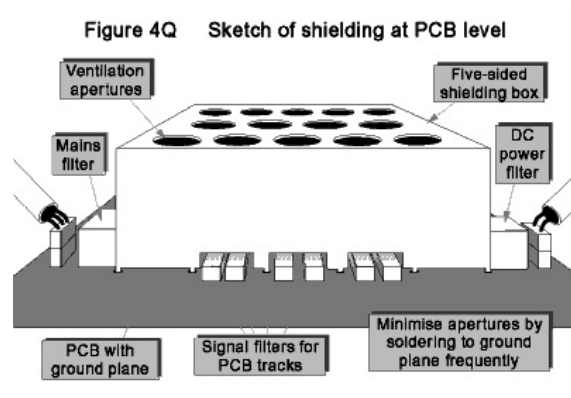
しかし、表面実装型のものでさえも、貫通フィルタは依然として単純なフェライト・ビーズやコンデンサよりも高価である。遅れを最小にし、また PCB レイアウトの繰り返しを避けながら、開発の EMC 試験の間に最も費用効果の良いフィルタを見付けられるように、以下のいずれのフィルタ構成にでもできるような多目的パッド・パターンを容易に作ることができる:

- ゼロ・オーム抵抗 (フィルタリングはせず、しばしば新しい設計の EMC 試験の出発点として用いられる)
- 信号と直列の抵抗やフェライト・ビーズ
- グラウンド・プレーンへのコンデンサ
- コモン・モード・チョーク
- 抵抗 / フェライト / コンデンサの組み合わせ (T、LC など。詳細についてはこのシリーズの第 3 部を参照)
- 貫通コンデンサ (中央のピンを接地するもので、真の貫通ではない)
- 貫通フィルタ (中央のピンを接地する T、LC など、真の貫通ではない)

多目的パッドは、専用のフィルタに限定されることなく、最小限のコストで、回路(そして製品全体)の要求に最適なものを設計することも意味する。

ここで、理想的にはこれらの PCB 実装フィルタ全てをその中心をシールド・ボックスの壁に沿って整列すべきであることは言うまでもなく、従っておそらくそれらの部品を収めるための小さい切り欠きを必要とするであろう。リード付きのものではなく表面実装部品を使うことはボックスの切り欠きの大

きさを最小限とし、SE を改善できるようにする。フィルタをきれいに一列に並べることが難しい場合には、フィルタされていないどのような信号もフィルタされたトラックの近くを走らないように十分に注意すること。Figure 4Q は低コスト PCB シールドがどのようなものとなるかをスケッチしたものである。



ケーブルと同様、シールドとフィルタを併用することが必要であるかも知れず、シールドされた PCB 領域に入る「シールド」されたトラック全てに多目的フィルタ用パッドを設けるか、あるいは少なくともフェライト・ビーズを想定することが賢明かも知れない。

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 12, 2000