

シールドングとガーディング
干渉型ノイズの除去方法
合理的な方法：何をすべきか、なぜそうするのか
著者: Alan Rich

本稿は干渉ノイズを取り上げた 2 部構成の論文の後半部です。Analogue Dialog の最新号 (Vol.16, No.3, pp.16-19) では、干渉の性質について解説し、ノイズ源、結合チャンネル、レシーバ間の関係について説明するとともに、これらの 3つの要素の 1つを低減または除去してシステム内の干渉に対処する方法を検討しました。

ノイズ結合を低減する上で有効な方法の一つはシールドングです。本論文の目的は、適正なシールドングによるノイズ低減について説明することです。ここで解説する主要テーマは、容量性結合によるノイズ、磁気結合によるノイズ、駆動シールド、およびガード (保護用導体) です。一連のガイドラインには、「すべきこと」と「すべきでないこと」を記載しています。

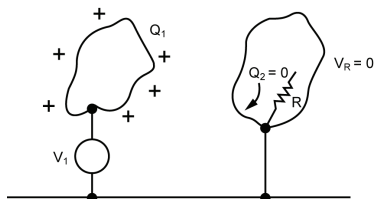
最初に留意すべきことは、シールドング問題が常に合理的なものであって、神秘的なものではないということです。ただし、この問題は必ずしも単純なものとは限りません。個々の問題は、慎重に分析する必要があります。まず、ノイズ源、レシーバ、結合媒体を特定することが重要です。これらの要素を誤って特定し、シールドングやグラウンディングを正しく行わないと、事態がさらに悪化したり、新しい問題を生じたりすることがあります。

シールドングには 2 つの目的があります。まず、シールドングによってノイズを狭い領域に制限する (封じ込む) ことです。これによってノイズ範囲が広がるのを防止し、近くの重要な回路にノイズが混入するのを防ぎます。しかし、そういったシールドにも欠点があります。シールドでノイズをとらえても、ノイズの戻り経路を注意深く計画、実現しないと問題が生じます。その計画・実現に際しては、グラウンド・システムを理解したうえで、接続を適正に行う必要があります。

第二の目的は、システム内にノイズ源が存在する場合に、混入が懸念される回路の周りにシールドを施し、ノイズを拾いやすい箇所からノイズが混入するのを防ぐことです。これらのシールドには、回路領域周りのメタル・ボックスや、中心導体を被覆するシールド・ケーブルがあります。シールドはどこに、どのように結合するかが重要です。

容量結合ノイズ

ノイズが電界から生じている場合は、シールドはうまく機能します。外部電位 V_1 から生じる電荷 Q_2 は、閉じた導電面の内側では存在できません (図 1)。


 図 1. 閉じた金属シェル内では電荷 Q_1 で電荷は生成されません

Analog Dialogue (1983) 17-1 より転載

相互 (浮遊) 容量による結合は、図 2 の回路でモデル化できます。ここで、 V_n はノイズ源 (スイッチング・トランジスタ、TTLゲートなど)、 C_s は浮遊容量、 Z はレシーバ (高ゲイン・アンプの入力とグラウンド間に接続されたバイパス抵抗など) のインピーダンス、 V_{no} は Z の両端で生成された出力ノイズです。

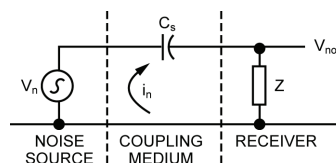


図 2. ソースとすぐ近くのインピーダンス間の容量結合の等価回路

ノイズ電流 $i_n = V_n / (Z + Z_{Cs})$ からは、ノイズ電圧 $V_{no} = V_n / (1 + Z_{Cs}/Z)$ が生成されます。たとえば、 $C_s = 2.5\text{pF}$ であれば、 $Z = 10\text{k}\Omega$ (抵抗性)、 $V_n = 100\text{mV}$ (1.3MHz 時)、出力ノイズは 20mV (10V の 0.2%、すなわち 12 ビットの 8LSB) となります。

敏感な回路に対してごく少量の浮遊容量がどのように影響を及ぼすかを認識することは非常に重要です。システムが低消費電力 (高いインピーダンス・レベルを意味する)、高速性 (低いノード浮遊容量、高速エッジ、高周波数を意味する)、高分解能 (かなり小さな許容出力ノイズ) を特徴とする回路を組み合わせ設計されるなかで、こういった認識はますます重要視されてきています。

シールドを加えると図 2 がどのように変化するかを、図 3 の回路モデルで例示します。シールドのインピーダンスがゼロだと仮定すると、ループ A-B-D-A のノイズ電流は V_n / Z_{Cs1} となりますが、ループ D-B-C-D のノイズ電流はゼロとなります。これはループ内に駆動源がないからです。また、電流は流れないので、 Z の両端に電圧は発生しません。これで敏感な回路はノイズ源 V_n からシールドされます。

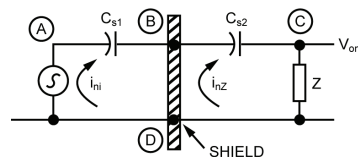


図 3. ソースとインピーダンスの間にシールドを設けた、図 2 の等価回路

静電シールドに関するガイドライン

●静電シールドを有効にするには、それをシールド内の回路のリファレンス電位に接続する必要があります。信号がアースあるいはグラウンド・レベルである (金属シャーシ/フレームやアースに接続されている) 場合、シールドはアースまたはグラウンド・レベルとなります。しかし、信号がグラウンド・レベルでない場合にシールドをグラウンドに落としても意味がありません。

アナログ・デバイセズ社は、提供する情報が正確で信頼できるものであることを期していますが、その情報の利用に関して、あるいは利用によって生じる第三者の特許やその他の権利の侵害に関して一切の責任を負いません。また、アナログ・デバイセズ社の特許または特許の権利の使用を明示的または暗示的に許諾するものでもありません。仕様は、予告なく変更される場合があります。本紙記載の商標および登録商標は、各社の所有に属します。※日本語資料は REVISION が古い場合があります。最新の内容については、英語版をご参照ください。

© Analog Devices, Inc. All rights reserved.

- シールドされたケーブルのシールド導体は、信号リファレンス・ノードのリファレンス電位に接続します（図4）。
- コネクタ使用時にはシールドが複数の部分に分割されることがありますが、その場合には、各部のシールドを隣接部のシールドに結合し、最終的には信号リファレンス・ノードに（だけ）接続する必要があります（図5）。

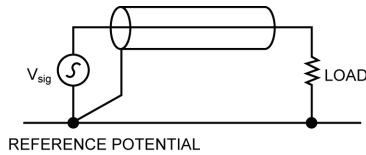


図4. ケーブル・シールドのグラウンディング

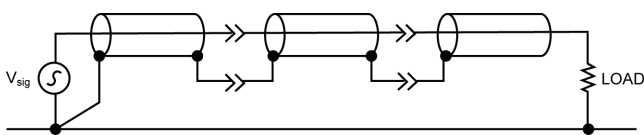


図5. シールドを中断させる場合はその相互接続が必要です

- システムに必要な個別シールドの数は、測定される個別信号の数と同じです。各信号は専用のシールドをもち、共通リファレンス電位（「グラウンド」信号）を共用していない限り、システム内のほかのシールドには接続されません。複数の信号グラウンドがある場合は（図6）、各シールドをそれぞれ自身のリファレンス電位に接続します。

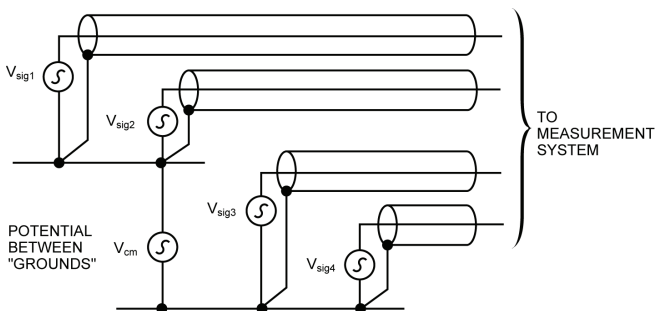


図6. 各信号には、それぞれのリファレンス電位に接続されたシールドを設ける必要があります

- シールドの両端を「グラウンド」に接続してはなりません。2つの「グラウンド」間に電位差が生じるとシールド電流が流れます（図7）。このシールド電流は、磁気結合を介して中心導体にノイズ電圧を発生させます。この例は、本稿の前半部（パート1）に示しています（Analog Dialogue 16-3、18ページ、図10を参照）。

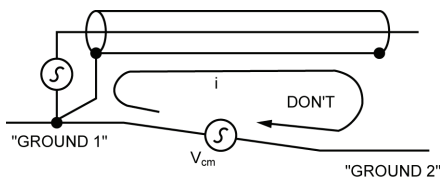
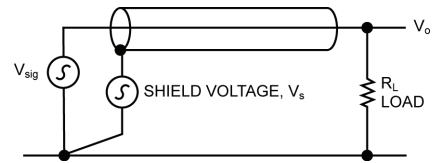


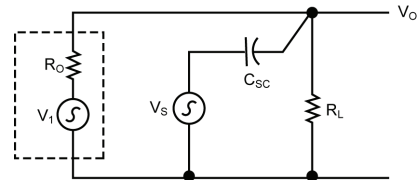
図7. シールドを複数地点でグラウンドに接続してはなりません

- シールド電流が発生しないようにします（後述するように例外はあります）。シールド電流によって、中心導体に電圧が発生します。
- シールドに電圧（リファレンス電位を基準）を与えないようにします。ただし、本稿で説明するように、ガード・シールドの場合は例外とします。シールド電圧は、中心導体（または複数

導体シールド内の導体）に容量結合します。シールドのノイズ電圧 V_s により、回路は図8のようになります。



a. 電位 V_s のシールド



b. 等価回路

図8. シールドに電位（信号電位を基準）を与えないようにします
出力にわずかに表れる V_s は次式で表されます。

$$V_o = \frac{V_s}{\sqrt{1 + \frac{1}{(2\pi f R_{eq} C_{sc})^2}}} \quad (1)$$

ここで、 V_1 はオープンサーキットの信号電圧、 R_o は信号のソース・インピーダンス、 C_{sc} はケーブルのシールド導体間容量、 R_{eq} は R_o と R_L の等価並列抵抗です。たとえば、 V_s が 1.5MHz 時 1V の場合、 $C_{sc} = 200\text{pF}$ （10 フィートのケーブル）、 $R_o = 1,000\Omega$ 、 $R_L = 10\text{k}\Omega$ 、出力ノイズ電圧 = 0.86V となります。重大なノイズ問題を避けるには好ましくない電位をシールドに与えないようにする必要がありますが、こうしたガイドラインは無視されがちです。

- シールドで捕捉されたノイズ電流がどのように「グラウンド」に戻るかについて注意深く調べます。電流が適正に戻らない場合、シールド電圧が発生して、ほかの回路に結合したり、ほかのシールドに結合してしまいます。シールドのノイズの戻り経路はできる限り短くして、インダクタンスを最小限に抑えます。ここで、最後の 2 つのガイドラインに関連する潜在的な問題を、例を挙げて説明します。図9には、不適切な構成のシールド・システムを示しています。このシステムの高精度電圧源 V_1 とデジタル・ロジック・ゲートは、共通シールド・コネクションを共用しています。この状況は、アナログ/デジタル信号がケーブルで相互接続されている大きなシステムで起こり得ます。

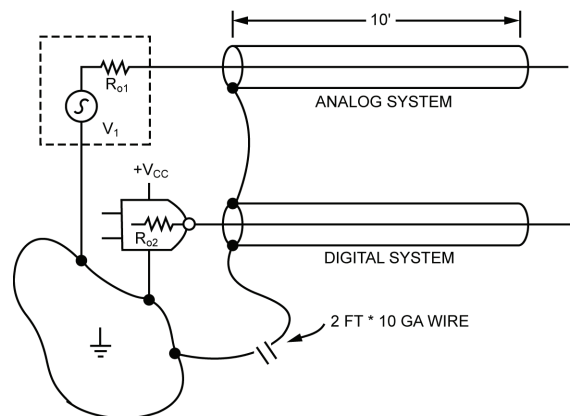


図9. 過渡シールド電圧の生成状況

ロジック回路出力のステップ電圧変化はそのシールドに容量結合し、共通の 2 フィート・シールドの戻り経路で電流を発生させます。図 10 に等価回路を示します。この回路の $V(t)$ はTTLロジック・ゲートからの 5Vステップ、 R_{O2} はロジック・ゲートの 13 Ω 出力インピーダンス、 C_{ws} はシールドからシールド・ケーブルの中心導体までの 470pF容量、 R_s と L_s は、シールドとシステム・グラウンドとを接続する 2 フィートの配線の 0.1 Ω 抵抗と 1 μ Hインダクタンスです。

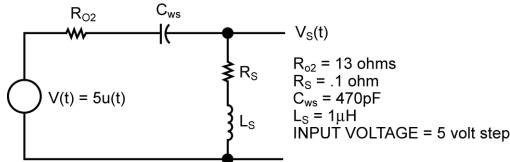


図 10. シールド電圧を生成する等価回路

シールド電圧 $V_s(t)$ については、従来の回路分析技術で解決するか、あるいは実際に特定のパラメータを持つ回路を作成し、その回路で十分な測定を行ってシミュレートします。実例を示すために、図 11 に算出した応答波形を示します。ここで、初期スパイクは 5V、共振周波数は 7.3MHz、減衰時定数は 0.15 μ sです。この図は、シールドに現れてアナログ入力に容量結合する電圧の性質を十分に示しています。広帯域幅オシロスコープを使って電圧をみると、その電圧はノイズの「スパイク」のようにみえます。この過渡電圧によって大きなピーク振幅をもつ高速減衰波形がアナログ・システム入力に結合されるものと考えられます。

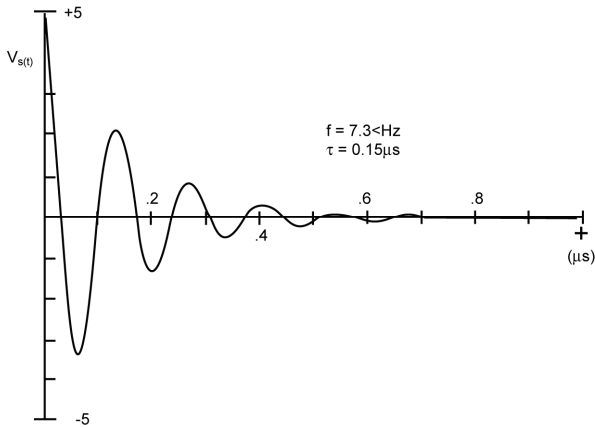


図 11. 図 10 の回路の算出応答波形

純粋なデジタル・システムでも、前述したような状況に置かれるとシステムの遠隔部でノイズ・グリッチが発生する可能性があります。不可解なシステム・バグでも、その一部はこのことで説明がつきます。

さまざまな可能性が考えられる中で、適正なシールド・コネクションを選択しているかどうか、すぐには判断がつかない場合も多く、ガイドラインに従って明確な選択をすることは不可能です。いずれにせよ、いろいろな可能性を分析し、最小ノイズを計算できる方法を選択する以外にはありません。

たとえば、図 12 に示したケースを考えてみましょう。この場合の測定システムとソースは異なるグラウンド電位を持っています。シールドは、測定システム入力のローサイドA、システム入力のグラウンドB、信号ソースのグラウンドC、ソースのローサイドDのどれに接続すればよいのでしょうか？

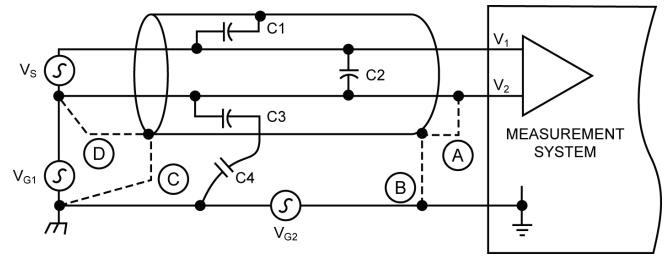


図 12. 測定システムとソースが異なるグラウンド電位を持つ場合：可能性のあるグラウンディング

Aの選択はよくありません。この選択では、ノイズ電流が信号導体に流れます。図 13aに V_{G1} に起因するノイズ電流の経路を示します。これはC4経由で戻ります。

Bの選択もよくありません。この選択では、直列電圧 V_{G1} と V_{G2} の 2 つのノイズ源により 2 つの信号線に特定の成分が生じます。これは、 C_1 と直列に接続された C_2 と並列のソース・インピーダンスによって生成されます (図 13b)。

Cも同様によくありません。Bの場合と同じメカニズムで、 V_{G1} が 2 つの信号線に電圧を発生させます (図 13c)。

与えられた前提のもとでは、Dが最も適切な選択です (図 13d)。シールドを信号のリファレンス電位に接続するというグラウンディングを行う際のガイドラインとも整合性があります。

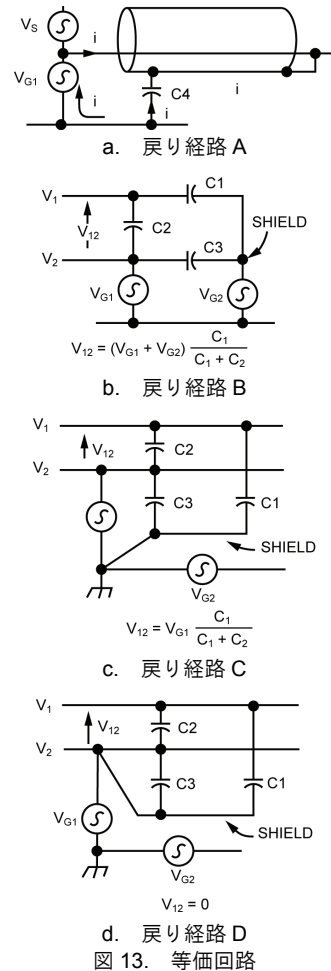


図 13. 等価回路

磁界によるノイズ

磁界という形式をとるノイズは、導体または回路に電圧を発生させます。磁界は導電性材料を透過するので、磁界に対して

シールドを施すのは、電界に対処する場合にくらべて、相当に困難です。導体の周りに配置され、一端がグラウンド電位に接続されるような典型的なシールドは、その導体内で磁的に生成される電圧には、ほとんど効果がありません。

磁界Bがシールドを透過すると、その強さは急激に減少します(図 14)。シールドの材質の表皮深さ δ は、大気中において磁界の強さを 37% ($\exp(-1)$) の値まで減衰させるのに必要な表面からの深さと定義されます。表 1¹⁾に、さまざまな周波数における各種材料の代表的な表皮深さ δ を示します。この表からわかるように、 δ 値は周波数とともに減少するので、どの材料も高い周波数でシールドとしての機能が増大します。また、鋼鉄はどの周波数でも銅やアルミより 1 桁以上効果的なシールドを提供します。

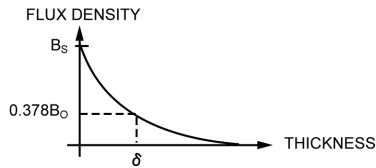


図 14. 表面からの深さの関数として定義されるシールドの磁界

図 15 では、それぞれ 2 種類の厚さの銅と鋼鉄について、周波数の関数である吸収損失を比較しています。1/8 インチの鋼鉄は 200Hz を上回る周波数でかなり効果的であり、20 ミル (0.5mm) 厚の銅も 1MHz 超の周波数では効果的です。しかし、低周波数における磁気結合ノイズの主要な発生源である、50~60Hz ライン周波数を含む低周波数においては、いずれも明らかにシールド効果が低いことを露呈しています。

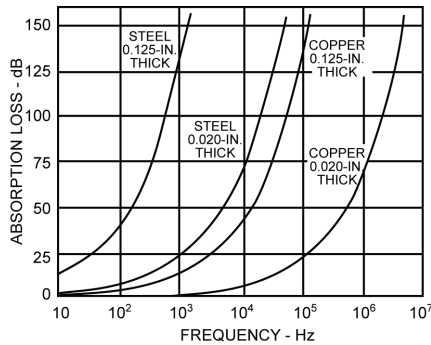


図 15. 銅と鋼鉄の 2 つの厚さに関する吸収損失の周波数特性

表 1. 表皮深さ δ と周波数の関係

Frequency	δ for Copper		δ for Aluminum		δ for Steel	
	(in.)	(mm)	(in.)	(mm)	(in.)	(mm)
60Hz	0.335	8.5	0.429	10.9	0.034	0.86
100Hz	0.260	6.6	0.333	8.5	0.026	0.66
1kHz	0.082	2.1	0.105	2.7	0.008	0.2
10kHz	0.026	0.66	0.033	0.84	0.003	0.08
100kHz	0.008	0.2	0.011	0.3	0.0008	0.02
1MHz	0.003	0.08	0.003	0.08	0.0003	0.008

¹⁾ 表 1 と図 15、16 は H.W. Ott 著 Noise Reduction Techniques in Electronic Systems (New York: John Wiley & Sons, © 1976) から引用したものです。

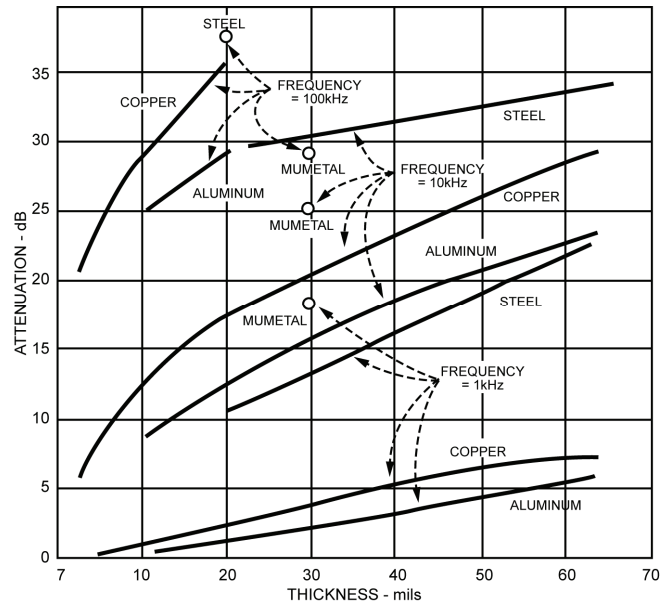
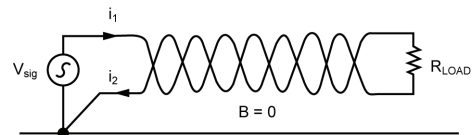


図 16. 複数の周波数におけるミューメタルその他の材料のシールドによる減衰

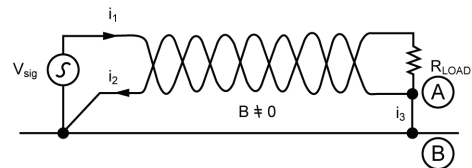
低周波磁気シールドを改善するには、高透磁率の磁性材料 (ミューメタルなど) から構成されるシールドを検討する必要があります。図 16 では、いくつかの周波数で 30 ミル厚のミューメタルと各材料を比較しています。この図でわかるように、1kHz 未満ではミューメタルがほかの材料より効果的ですが、100kHz では最も効果が劣ります。ミューメタルが必ずしも適用し易い材料というわけではなく、磁界が強すぎて飽和状態になると、その優位性は失われます。

すでにお分かりのように、磁界を遮るためのシールド、すなわちシールドによってノイズの混入を引き起こす導体に対策を施すのはかなり困難です。したがって、低周波数での最も効果的な方法は、干渉磁界の強度とレシーバのループ領域を最小化し、配線形状を最適化してノイズの混入を最小限に抑えることです。ここで、いくつかガイドラインを記しておきます。

- 受信回路は磁界源からできるだけ遠くに配置します。
- 磁界と並列に配線するのは避けて、配線を磁界と直角にクロスさせます。
- 周波数と磁界の強度に対応するために、適切な材料を用いて磁界をシールドします。



a. 電流平衡化の適正な接続



b. グラウンド・ループを形成する不適切な接続

図 17. ツイスト・ペアへの接続

●高レベルの電流を通す導体（磁界源）に対応したツイスト・ペア線を使用します。2つの配線の電流が等しく逆向きであれば、どちらの方向の磁界もツイストの各サイクルで差し引きゼロになります（図 17a）。こうした配線がうまく機能するためには、どの電流もほかの導体（グラウンド・プレーンなど）と共用してはなりません。図 17bは、グラウンド・ループが形成された場合に何が起きるかを示しています。この場合、電流の一部がグラウンド・プレーンに流れると（グラウンド抵抗と導体抵抗の比に応じて）、ツイスト・ペアとのループが形成され、 $i_3 (= i_1 - i_2)$ で決まる磁界が生成されます。

A と B 間のグラウンド接続は、トラブル源となるショート・サーキットほど単純であるとは限りません。 R_{load} 回路からグラウンド・プレーンまでの浮遊不平衡容量／抵抗は電流を不平衡にし、配線とグラウンド・プレーンを通る正味電流を発生させ、グラウンド・ループとそれに関連する磁界を生成します。したがって、ツイスト・ペアをグラウンド・プレーンに近づけ、それぞれの側からグラウンドまでの容量を平衡化して、ループ領域を最小化するのも適切な方法です。

●シールド・ケーブルを使って高レベル・ソース回路の戻り電流がシールド内を流れるようにします（図 18）。シールド電流 i_2 が中心導体内の電流と等しく、逆向きである場合、中心導体の磁界とシールドの磁界がキャンセルされ、磁界は差し引きゼロになります。この場合、レシーバ回路の「シールド電流なし」のルールを犯しているように見えますが、中心リード線をシールドするための同軸ケーブルは使用していません。その代わりに、こうしたジオメトリそのものによってキャンセル効果が発揮されます。

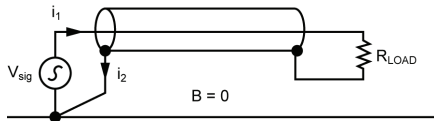


図 18. ノイズ源への戻り電流に対応したシールド

こうした方法は、ノイズ源になりやすい高出力電源を備えるデバイスで高精度の測定が必要となる、ATEシステムで活用することができます。図 19 にこの具体的な適用例を示します。この技法は、被試験 A/D コンバータの高電流ロジック電源の接続（試験ケーブルの端部）に適用しています。

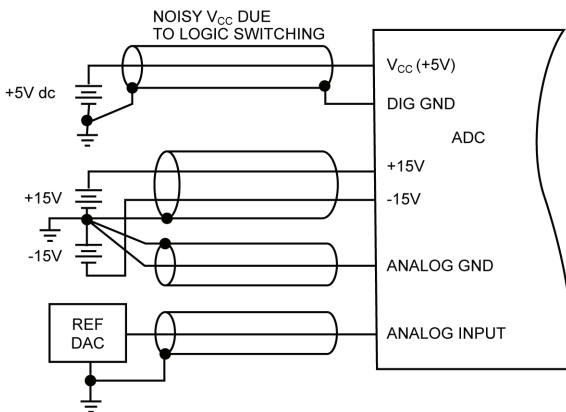


図 19. 図 18 の回路を適用した試験システム

●磁気により発生するノイズはレシーバのループ領域に左右されるので、磁気結合によって生じる電圧はループ領域を小さくして低減します。このレシーバ・ループとはいったい何でしょうか。図 20 に示す例では、信号源とその負荷は長さLと距離Dの1対の導体で接続されています。回路（矩形の構成を持つと仮定）はD・L領域でループを形成しています。

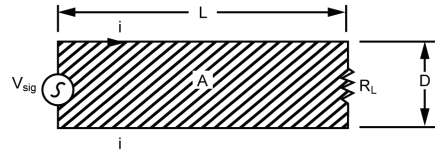


図 20. 磁気結合ノイズを受け取るループ領域

ループと直列に発生する電圧は、領域と磁界に対するその角度のコサインに比例します。したがって、ノイズを最小限に抑えるにはループを磁界に対して直角の方向とし、その領域をなるべく小さくする必要があります。

そのためには、導線の長さや相互の距離を短くします。同様の効果は、ツイスト・ペア、あるいは一体ケーブルになったペアの導線を用いることで得られます。導体をペアにするときは、回路の配線とその戻り経路が必ず一緒になるようにします。このためには、戻り電流が信号源に戻るときの実際の経路が確定していなければなりません。電流が最初の設計レイアウトとは異なる経路を戻るといった事態は頻繁に発生します。

たとえば、技術者がなんらかの問題を解決するために配線を移動し、それが原因でループ領域と磁界の方向が変化し、昨日まで許容可能だったノイズのレベルが、明日にはとんでもないレベルになってしまう、という事態も現実的に起こり得ます。そして、最後にはサービス部門に電話が殺到、という事態になりかねません。こうした過ちは何度も繰り返されるおそれがあります。結論としては、ループの領域と方向をよく理解し、ノイズを最小限に抑えるための作業を実践し、永続的に配線を保護するという事です。

駆動シールドとガーディング

導体周りの磁界を減らすことでノイズを低減する電流駆動シールド（逆向きの等しい電流を運ぶ）の役割についてはすでに説明したとおりです。

ガーディングの類似特性としては、シールド内に含まれる信号線のコモンモード電圧とほぼ同じで電位で、しかも低インピーダンスでシールドを駆動するという点です。ガーディングには多くの有益な目的があります。コモンモード容量の低減、コモンモード・ノイズ除去比の改善、高インピーダンス測定回路におけるリーク電流の除去といった目的です。

図 21 に、ゲインを備えた高インピーダンス非反転アンプとして接続されているオペアンプ（ごくわずかなバイアス電流を持つ）の例を示します。ケーブルの目的は、高入力インピーダンス信号導体を容量結合ノイズからシールドし、リーク電流を最小限に抑えることです。信号のソースは 10 メグオームの抵抗であり、ケーブルにはシールド対象導体の 1,000 メグオームのリーク抵抗（温度や湿度などの条件によって変わる）があるものと考えられます。図のような接続の場合、等価入力回路は減衰器であり、測定時には信号の 1%を失い、それ以外に失う信号はごくわずか（値は不明）です。また、ケーブル容量により、実質的な遅延の時定数 $R_s C_c$ が生成されます。

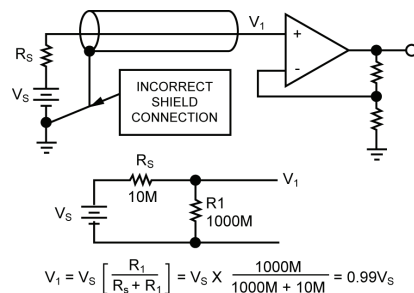


図 21. ゲインを持つ高インピーダンス非反転アンプとしてシールド入力リードに接続

図 22 のシールドは 図 21 と同じ役割を果たしますが、シールドはゲイン・デバイダのタップに接続されています（通常は低インピーダンスで）。オペアンプの反転アンプに接続されているので、これはアンプの非反転入力と同じ電位にする必要があります。ケーブルのリーク抵抗に電圧はかかっていないので、そこを通る電流はなく、その抵抗値は問題にはなりません。バイアス電流は無視できる程度のもので、 V_1 は V_s と等しくなります。

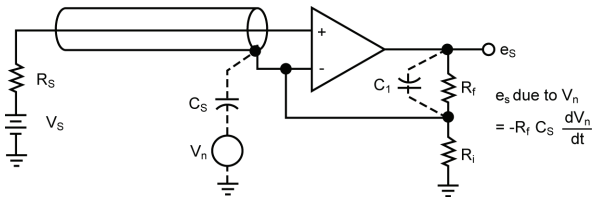


図 22. 図 21 と同じですが、ケーブル・シールドをガードとして接続しています

また、ケーブル容量に電圧はかかっていないので、ケーブルの充放電はありません。したがって、遅延の時定数は主に回路の浮遊容量とアンプの入力容量に依存します。安定性を確保するために、容量は $C_f R_f = C_s R_i$ となるように出力と負入力間に接続する必要があります。この場合の C_s はシールド、グラウンド、入力容量間の浮遊容量の合計です。

ガードにかかるノイズ電圧はゼロでなければなりません。ノイズの多いシステムの場合、図 22 に示すように、容量結合ノイズは微分され、高周波成分が強調されます。これを避けるには（図 23）、ガードを駆動する高速応答/低出力インピーダンスのバッファ・フォロワを使用するか (a)、信号コモンに接地された、ガード周りの第二シールド (b) を使用します。

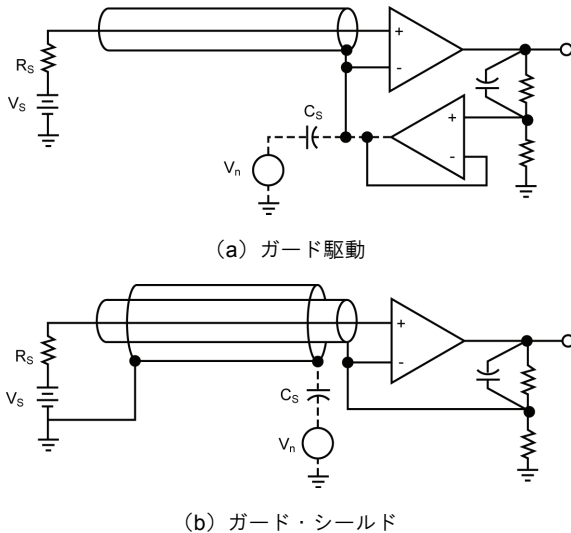


図 23. ガードでノイズ混入を防止

特定の長さのシールド線で電流源からアンプの反転入力までリード線がガードされる、高インピーダンス電流入力反転構成では、非反転入力と同じ電位のバッファ（ほかのどこにも接続されていない）でガードを駆動するか、ガードを非反転入力に直接接続し、第二の外部シールドは信号の基準ポイントに接続します。

要約

表 2 に本論文の要点をまとめました。保全性に優れたシールド・システムの維持には、このすべてが必要です。しかし、最も無視されがちな 2 つの命題、すなわち「信号シールドへのノイズ電圧の出現」と「シールド・ノイズ電流の適正な処理」については、いくら強調してもしすぎることはありません。ノイズ電圧はシールド上に存在してはならないのです。シールドと導体間の容量で、ノイズは中心導体に直接結合します。シールド電流が適正に戻らないと、それがシステムの遠隔部に流れることで、「解決」されたシールド問題とはまったく無関係な場所でトラブルが発生する可能性があります。

表 2. シールドの適応性に関する考慮事項

Consideration	Universal	Electric	Magnetic
Know the noise source, coupling medium, and receiver	X	X	X
Different shielding techniques are required for different noise sources, coupling channels, and receivers.	X	X	X
In most situations, conventional circuit analysis using lumped elements can be used.	X	X	X
Connect the shield at the signal-source end only.		X	
Carry shields through connectors.		X	
Individual shields should not be tied together.		X	
Do not ground both ends of a shield.		X	
Do not allow shield current to flow, except for driven shields - to chanced magnetic fields.			X
Do not allow voltage on a shield, except for guarding.		X	
Know exactly where noise current from the shield will flow.		X	
Use short connections to return noise current from the shield.		X	
Electrostatic shields have little effect in reducing noise resulting from magnetic fields.			X
Reduce magnetic fields by physical separation proper orientation, twisted pairs, and/or driven shields.			X
Know the receiver loop area and orientation to the field. Keep field at right angles and reduce the loop area by using paired conductors, preferably twisted pairs, and minimize wire lengths.			X
Use guarding in high-impedance circuits.	X	X	
In high-impedance circuits, be extremely careful of shield noise.	X	X	

主な参考文献

補足情報が必要な場合は、以下の文献を参照してください。

Paul A. Brokaw 著 『Analog Signal-Handling for High Speed and Accuracy』 Analog Dialogue 11-2, 1977 年, pp. 10-16

Paul A. Brokaw 著 『An I.C. Amplifier User's Guide to Decoupling, Grounding and Making Things Go Right for a Change』 Analog Devices Data-Acquisition Databook 1982, Volume I, 21-13~21-20 ページ

Ralph Morrison 著 『Grounding and Shielding Techniques in Instrumentation』 Second Edition (New York: John Wiley & Sons, 1977)

Henry W. Ott 著 『Noise Reduction Techniques in Electronic Systems』 (New York: John Wiley & Sons, 1976)