



プローブ入門

入門書



テクトロニクスのプローブ選定ガイド

オンラインのプローブ選定ガイドであり、製品シリーズ、型名、または規格／アプリケーションなどでの検索、テスト要件による詳細な検索が可能なツールです。検索結果をクリックすると、該当製品が表示されます。当社Webサイト (tektronix.com/ja/probes) をご覧ください。

テクトロニクスの技術資料

お使いのプローブ、その他の計測器を最大限に活用するためのテクニカル・ブリーフ、アプリケーション・ノートなどを数多く取り揃えています。販売特約店にお問い合わせいただくか、または当社Webサイト (tek.com/ja) をご覧ください。

目次

第1章 プロービングにおける安全性について	4	第7章 差動測定	46
安全性に関する概要	4	差動信号と同相信号について	46
安全予防措置	4	第8章 微小信号の測定	49
第2章 プローブ – 測定品質を左右する重要な機器	6	ノイズ低減	49
プローブとは	6	測定感度	49
理想的なプローブ	7	第9章 プロービングによる影響への対処	51
プローブの現実	8	第10章 プローブの仕様について	52
プロービングの基礎知識	12	アベレーション (共通)	52
まとめ	14	確度 (共通)	52
第3章 多様なニーズに対応した豊富なプローブ	15	電流時間積 (電流プローブ)	52
多くの種類のプローブがある理由	15	減衰比 (共通)	53
プローブの種類とそれぞれの特長	17	周波数帯域 (共通)	53
フローティング測定	21	キャパシタンス、容量 (共通)	54
警告	21	CMRR (差動プローブ)	54
プローブ・アクセサリ	26	減衰時定数 (電流プローブ)	54
第4章 プローブ選択ガイド	28	直流 (電流プローブ)	54
適切なプローブの選択	28	周波数ディレーティング (電流プローブ)	54
信号源について	29	挿入インピータンス (電流プローブ)	55
オシロスコープに関連する要件	31	入力容量 (共通)	55
適切なプローブの選択	33	入力抵抗 (共通)	55
第5章 プローブが測定に及ぼす影響	34	最大入力電流定格 (電流プローブ)	55
ソース・インピーダンスの影響	34	最大ピーク・パルス電流定格 (電流プローブ)	55
容量負荷	35	最大電圧定格 (共通)	55
周波数帯域に関する検討事項	37	伝搬遅延 (共通)	55
第6章 プローブ・グラウンドとグラウンド・リードの影響 ..	40	立上り時間 (共通)	55
グラウンドのリード長と周波数応答	40	タンジェンシャル・ノイズ (アクティブ・プローブ)	55
アベレーションの原因特定	42	温度範囲 (共通)	55
不適切なグラウンドによるノイズ問題	42	スレッショルド電圧 (ロジック)	56
グラウンド・ループによるノイズ混入	42	第11章 用語解説	57
誘導ノイズ	43		
ノイズ源の特定	43		
正しいグラウンドのためのヒント	43		

第1章 プロービングにおける安全性について

安全性に関する概要

電気／電子系のシステムや回路を測定する場合、身体の安全を確保することが最も重要です。使用する計測器の機能、制限事項について、確実に理解しておくようにしてください。また、測定対象となるシステムや回路についても、十分に理解してから測定してください。測定するシステムのマニュアルや回路図などについて、特に回路の電圧レベルやその位置など、さまざまな注意事項に気を付けながら、もう一度すべてに目を通してください。

また、人体への危害や、計測器、接続されるシステムの損傷を防ぐため、以下の安全予防措置を必ず確認してください。予防措置の詳細については、「安全予防措置」の項を参照してください。

- すべての端子の定格を確認する
- 正しく接地する
- プローブは正しく着脱する
- 露出した回路には触れない
- プローブ取扱い時の高周波火傷を防止する
- カバーを外した状態で操作しない
- 著しく湿度が高い状態、濡れた状態では操作しない
- 爆発、引火のおそれのある場所で操作しない
- 故障の疑いがある場合は操作しない
- プローブの表面は清浄かつ乾燥した状態に保つ
- プローブを液体に浸けない

安全予防措置

人体への危害や、計測器、接続される製品の損傷を防ぐため、以下の安全予防措置を確認してください。想定される危険を防ぐため、計測器は必ずメーカーによって規定された方法でのみ使用してください。

**すべての電圧、電流は、
人体および機器に常に危険を及ぼすことに
留意してください。**

すべての端子の定格を確認する

- 火災、感電の危険を避けるため、製品の定格およびマークをすべて確認します。定格に関する詳細な情報を製品のマニュアルで確認してから接続を行うようにします。
- 端子の最大定格を超える電位をかけないでください。
- プローブのグランド・リードは、必ず接地アースにつなぎます。

注意

フローティング測定というオシロスコープのアプリケーション用に特化して設計されたオシロスコープもあります。このようなオシロスコープでは、2本あるリード線の1本はグランド・リードとしてではなく、コモン・リードとして使用します。この場合、接続可能な電圧レベルについては、メーカーが規定している最大電圧にしたがってください。

- プローブ、計測器において、ディレーティングに関する情報がなければ、マニュアルで確認します。最大定格入力電圧は、高い周波数では低下する場合があります。

正しく接地する

- プローブは、オシロスコープの電源ケーブルのグランド線によって間接的に接地されます。感電を防ぐため、オシロスコープのグランド線はアース（大地）に接続する必要があります。入力／出力端子に接続する前に、製品が正しく接地されていることを確認してください。
- 計測器の電源ケーブルのグランド線は必ず接地してください。
- プローブのグランド・リードは、必ず接地アースにつないでください。
- オシロスコープを接地からフローティングさせたり（そうした目的に設計・指定されていない場合）、グランド・リードをグランド以外に接続すると、コネクタ、操作部、あるいはオシロスコープ、プローブの表面に電圧が発生することがあり危険です。

注意

これはほとんどのオシロスコープに当てはまることではありますが、フローティング測定の目的のために設計されているオシロスコープもあります。

プローブは正しく着脱する

- プローブは、まずオシロスコープから先に接続します。次に、プローブを正しくグラウンドに接続してからテスト・ポイントに接続します。
- プローブのグラウンド・リードは、必ず接地グラウンドに接続します。
- プローブを被測定回路から外す場合、先にプローブ・チップを回路から外し、次にグラウンド・リードを外します。
- プローブ・チップとプローブ・コネクタの中心導体を除き、プローブ上にある接触可能な金属部（グラウンド・クリップを含む）はすべてコネクタ外側の金属部に接続されます。

露出した回路には触れない

- 露出した回路やコンポーネントには、手や体の一部が触れないようにしてください。
- プローブ・チップとグラウンド・リード・クリップは、互いに接触したり、被測定回路の他の部分と擦れ合うことのないようにしてください。

プローブ取扱い時の高周波火傷を防止する

- RFパワーがある場合、小さな電圧であっても、共振などにより危険な電圧になることがあります。
- 高周波火傷の危険範囲内でプローブを使用する必要がある場合は、プローブ・リードを着脱する前に被測定回路の電源を切るようにします。回路に電源が入った状態で入力リードを扱わないでください。

ケースを外した状態で操作しない

- オシロスコープ、プローブは、ケースや保護外被を外した状態で操作してはいけません。ケース、シールド、プローブ・ボディ、コネクタ・ハウジングを外すと、導体やコンポーネントが危険なレベルの電圧にさらされます。

著しく湿度が高い状態、濡れた状態では操作しない

- 感電、機器の損傷を防ぐため、湿気の著しく高い状態、濡れた状態では計測器を操作しないでください。

爆発、引火のおそれのある場所で操作しない

- 電気／電子機器を爆発、引火のおそれのある場所で操作すると、爆発の危険があります。ガソリン、溶剤、エーテル、プロパン、その他の揮発性物質を使用している、使用した、または保管されている場所も爆発の危険性がある環境といえます。また、空気中に微細な塵や粉末が浮遊している場合も、爆発、引火性のある場所であると考えられます。

故障の疑いがある場合は操作しない

- 電気的あるいは物理的にかかわらず、オシロスコープやプローブに損傷が疑われる場合は、使用を中止して有資格のサービス担当者による点検を受けてください。

プローブの表面は清浄かつ乾燥した状態に保つ

- プローブの表面に水分、塵、その他の汚れが付着すると、導電経路ができってしまう可能性があります。安全かつ正確に測定するため、プローブの表面は清浄かつ乾燥した状態に保ってください。
- プローブは、必ずプローブのマニュアルで指定されている手順で清掃してください。

プローブを液体に浸けない

- プローブを液体に浸けると、内部コンポーネントの間に導電経路ができたり、内部コンポーネントや外側のボディ、シールドの損傷や腐食の原因になることがあります。
- プローブは、必ずプローブのマニュアルで指定されている手順で清掃してください。

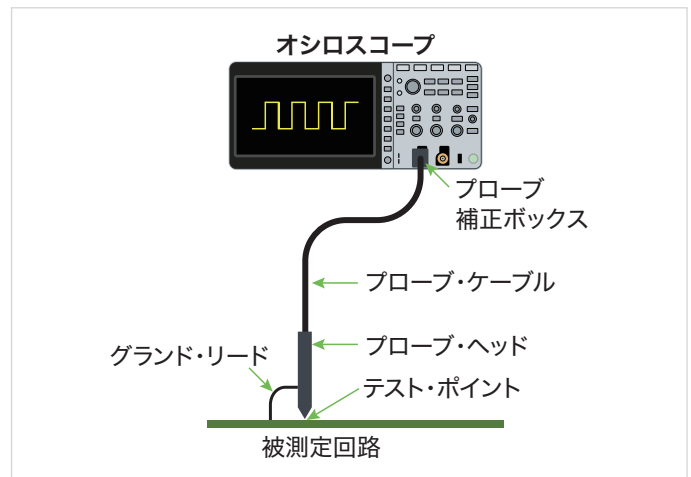
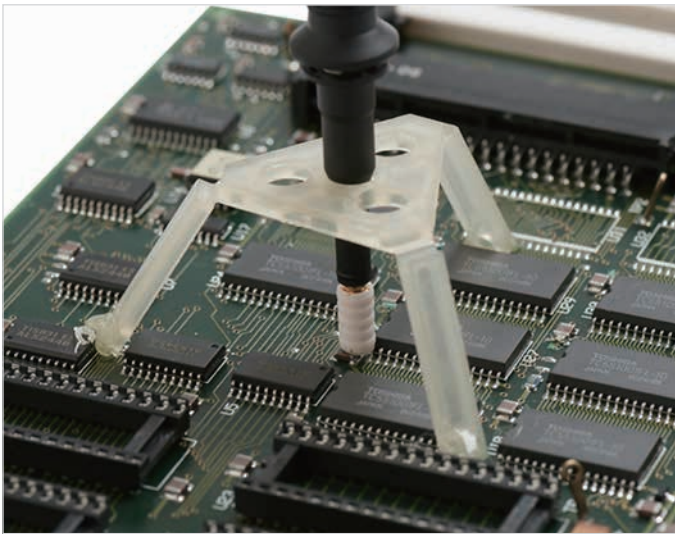


図2.1. ほとんどのプローブは、プローブ・ヘッド、プローブ・ケーブル、補正ボックスまたは独自の回路部で構成されている。

第2章 プローブ – 測定品質を左右する重要な機器

正確な測定を行う上でまず大切なものは**プローブ**です。その重要性を理解するため、オシロスコープからプローブを外して測定してみてください。できませんね。測定するためには、電気的な接続が必要になります。測定すべき信号とオシロスコープの入力チャンネル間を接続するのがプローブです。

その上、プローブは測定の質までも大きく左右します。プローブを回路に接続すると、多かれ少なかれ接続された回路の動作に影響を及ぼします。また、オシロスコープで表示、測定できるのは、プローブを通過した信号のみです。

そのため、望ましい測定結果を得るには、回路に対するプローブの影響を最小限に抑えるとともに、信号の忠実度を十分に維持することが不可欠です。

忠実度が維持されず、信号に何らかの変化をきたしたり、回路の動作が影響を受けたりすると、オシロスコープに映し出される信号の波形も歪み、正しい測定結果を得ることが困難になります。

つまり、プローブとは、オシロスコープの測定系統における最初の機器であり、オシロスコープと同様に、この測定系統の能力を大きく左右します。不適切なプローブ、プロービングによってこの最初の機器の能力が低下すれば、測定系統全体の能力が低下してしまいます。

この入門書では、プローブにとってメリット、デメリットとなる要因、そして、アプリケーションに適したプローブの選び方について説明します。また、プローブを正しく使用する上で重要となるポイントについても説明します。

プローブとは

まず、オシロスコープのプローブとは何かを明確にしておきましょう。

プローブとは、テスト・ポイントつまり**信号源**とオシロスコープを、物理的かつ電氣的に接続するためのものです。接続の仕方には、測定のニーズに応じて、ケーブルが1本のシンプルな接続もあれば、アクティブ**差動プローブ**のように注意を要する接続もあります。

この段階では、オシロスコープのプローブとは、信号源とオシロスコープの入力チャンネルをつなぐ機器のようなものという理解で十分です。

プローブにはその種類にかかわらず、信号源とオシロスコープの入力チャンネルをつなぐ機器として十分な利便性と品質が必要です(図2.1参照)。そして、それが適切なプローブかどうかを判断する決め手となるのが、物理的な接続、回路動作への影響、信号の伝送という3つの要素です。

オシロスコープで測定するには、まずプローブとテスト・ポイントを物理的に接続する必要があります。そのため、ほとんどのプローブは、図2.1に示すように1~2mのケーブルを備えています。このプローブ・ケーブルがあることにより、オシロスコープを台車や作業台の上に置いたまま、被測定回路のポイントからポイントへと、プローブを移動させることができます。しかし、こうした便利さと引き換えに、プローブ・ケーブルが長いほど、プローブの**周波数帯域**が低下するというマイナス面もあります。

プローブ・ケーブルの他に、ほとんどのプローブにはプローブ・チップを備えたプローブ・ヘッド部があります。このヘッド部分を持ってプローブを動かし、チップをテスト・ポイントに当てます。プローブ・チップ(先端)はスプリング式のフックになっているものが多く、プローブを容易にテスト・ポイントに接続することができます。

プローブ入門

プローブとテスト・ポイントを物理的に接続することにより、プローブ・チップとオシロスコープ入力端子が電氣的に接続されます。正しい測定結果を得るためには、プローブを接続したことによる回路への影響が最小限に抑えられ、また、プローブ・チップで検出された信号が、十分な忠実度を維持したままヘッドとケーブルを通過してオシロスコープの入力端子へ伝送されなければなりません。

以上の3つの要素 – 物理的な接続、回路に対する影響の最小化、十分な信号忠実度 – が揃っていれば、適切なプローブが選択できているといえます。このうち、プロービングの影響と信号忠実度の問題は複雑であるため、本入門書の大半をこの2つのテーマに充てます。しかし、プローブとテスト・ポイントの接続に問題があるとプロービングで忠実度が低下してしまうことが多いため、物理的接続についても無視するわけにはいきません。

理想的なプローブ

以下の特性を備えているものが理想的なプローブと言えます。

- 接続が容易で便利
- 信号忠実度が100%維持される
- 信号源にまったく負荷がかからない
- ノイズの影響を一切受けない

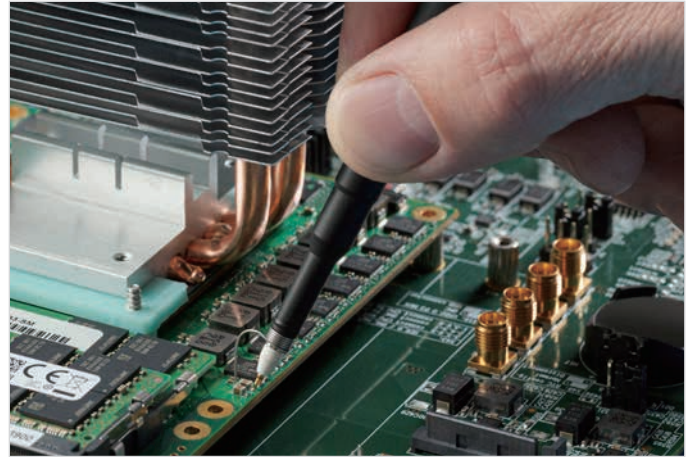
接続が容易で便利

テスト・ポイントへの物理的な接続については、プロービングの基本的な要件の一つとして既に触れていますが、理想的なプローブでは、この物理的接続を容易かつ便利なものにすることができます。

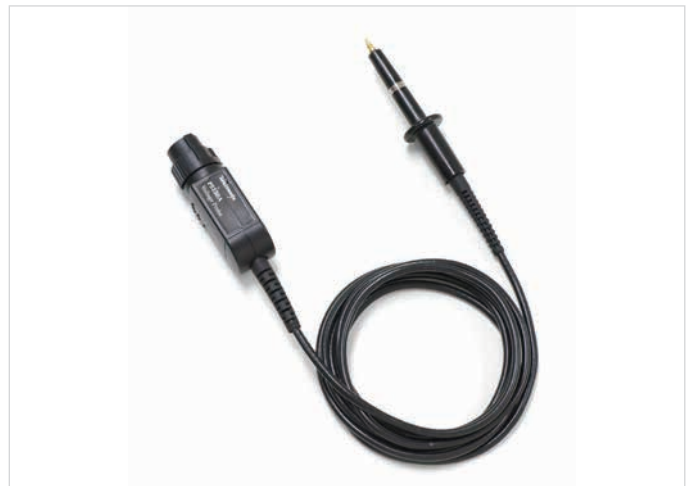
高密度表面実装技術 (SMT) が使用されている小型回路では、SMTデバイス用に設計された超小型プローブ・ヘッドや多彩なプローブ・チップ・アダプタによって、接続がより容易で便利になります。

そのようなプロービング・システムの例を、図2.2aに示します。ただし、このプローブは非常に小さいため、工業用電力回路のように、高電圧で導線径の太いアプリケーションには実用的ではありません。電力アプリケーションでは、もっとサイズが大きく、安全余裕度も高いプローブが必要です。そのようなプローブの例が図2.2b、2.2cであり、図2.2bは高電圧プローブ、図2.2cはクランプ式電流プローブです。

図2.2. さまざまなアプリケーション、測定ニーズに合わせて、さまざまなプローブが用意されている。



a. SMTデバイスのプロービング



b. 高電圧プローブ



c. クランプ式電流プローブ

このように物理的な接続の例をいくつか見ただけでも、1種類の理想的なプローブの大きさ、構成であらゆるアプリケーションに対応できるわけではないことは明らかです。そのため、さまざまなアプリケーションの物理的な接続要件を満たすため、さまざまなプローブの大きさ、構成が考案されています。

信号忠実度が100%維持される

理想的なプローブでは、プローブ・チップからオシロスコープの入力端子へ送られる信号の忠実度は100%維持されます。言い換えると、プローブ・チップでの信号は、オシロスコープの入力端子で忠実に複製されているということです。

忠実度を100%維持するには、チップからオシロスコープ入力端子までのプローブ回路において、減衰がなく、周波数帯域が無敵大で、全周波数にわたって線形位相になっていなければなりません。しかし、このような理想の要件を満たすことは現実的に不可能であり、非実用的です。例えば、オーディオ周波数の信号を扱う場合、プローブやオシロスコープに無限大の周波数帯域は不要であり、ほとんどの高速デジタル信号、テレビ、その他オシロスコープの一般的なアプリケーションも、500MHzでほとんど対応できるため、無限大の周波数帯域は必要ありません。

それでもなお、ある一定の動作周波数帯域では、100%の信号忠実度が理想として追求されています。

信号源にまったく負荷がかからない

テスト・ポイントから見た回路は、信号源と見なすことができます。プローブなど、テスト・ポイントに接続された外部機器は、この信号源に負荷をかけることがあります。

外部機器は、回路(信号源)から信号電流を引き出してしまう負荷として作用します。この負荷、つまり信号電流の流出は、テスト・ポイントにおける回路動作を変化させ、テスト・ポイントで検出される信号も変化させます。

理想的なプローブでは、信号源にかかる負荷はゼロです。言い換えると、信号源から電流を一切引き出さないということです。つまり、電流流出をゼロにするには、本質的にはテスト・ポイントへのオープン回路として、無限大のインピーダンスを持つプローブでなければなりません。

実際には、信号源にまったく負荷がかからないプローブを実現するのは不可能です。なぜならプローブは、オシロスコープ入力端子で電圧を発生させなければならないから、わずかですが信号電流を引き出さなければならないからです。その結果、プローブを使用する場合、信号源に対して多少の負荷となることが予測されます。しかし、適切なプローブを選ぶことにより、負荷を最小限に抑えることができます。

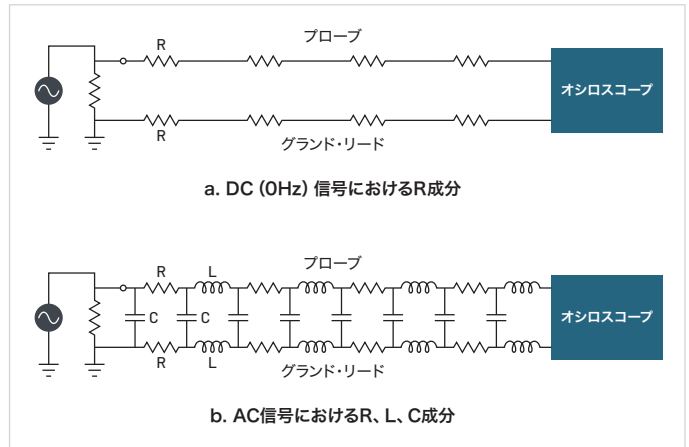


図2.3. プローブは、抵抗 (R)、インダクタンス (L)、キャパシタンス (C) で構成される回路。

ノイズの影響を一切受けない

測定環境下においては、蛍光灯やファン・モータだけでなく、さまざまな電気ノイズ源があります。こうしたノイズ源は、近くにある電気ケーブル、回路にノイズを誘発し、そのノイズが信号に付加されてしまうことがあります。導線1本だけのシンプルな構成のプローブは誘導ノイズの影響を受けやすく、理想的なオシロスコープ・プローブとは言えません。

どのようなノイズ源であれ、一切影響を受けないのが理想的なオシロスコープ・プローブです。そのようなプローブを使用すれば、オシロスコープへ送られた信号は、テスト・ポイントで検出された状態のままノイズは一切入りません。

実際には、シールド線を使うなどの対策によって、優れたノイズ耐性が得られます。しかし、低レベル信号では、ノイズが解消されない場合があります。後述しますが、特に同相ノイズは差動測定において問題になることがあります。

プローブの現実

前ページの「理想的なプローブ」では、実際のプローブが理想に到達できない数々の現実について触れました。こうした現実がオシロスコープ測定に及ぼす影響を理解するには、プローブの現実について、さらに掘り下げて考察する必要があります。

まず認識しなければならないのは、たとえ導線1本のシンプルなプローブであっても、非常に複雑な回路になり得るということです。

直流信号(周波数: 0Hz)では、プローブは直列抵抗と終端抵抗の単純な導体対のように見えます(図2.3a)。しかし交流信号では、信号の周波数が高くなるにつれてその状態が大きく変化します(図2.3b)。

交流信号で状態が変化するのは、導体に**分布インダクタンス (L)** があり、導体対には**分布キャパシタンス (C)** があるためです。分布インダクタンスは交流信号に反応し、周波数が上につれて交流電流の流れを妨げます。また、分布キャパシタンスは交流信号に反応し、周波数が上につれて交流電流に対するインピーダンスを下げます。このようにリアクタンス素子 (L、C) と抵抗素子 (R) の相互作用があり、プローブの総インピーダンスは信号周波数にともなって変化します。正しく設計されたプローブでは、規定の周波数範囲で望ましいレベルの信号忠実度、減衰、負荷が得られるよう、プローブ素子 R、L、C が決められています。しかし、設計が優れていたとしても、プローブはその回路によって制限を受けます。したがって、プローブを選択、使用するには、そのような制限やその影響について認識しておく必要があります。

周波数帯域と立上り時間の制限

周波数帯域とは、オシロスコープやプローブの設計で対象にしている周波数の範囲です。例えば、100MHzのオシロスコープまたはプローブは、100MHzまでの周波数の測定に対応できるよう設計されています。信号周波数が定められた周波数帯域を超えると、振幅は大きく減衰し、確実な測定結果が得られなくなります (図2.4)。

一般に、正確な振幅測定を行うためにオシロスコープに必要な周波数帯域は、測定する波形の周波数の3~5倍とされています。このルールに従っていれば、図2.4に示す3dB減衰周波数を避けて確度の高い振幅測定が可能になります。一次 (ガウシアン) のロールオフを持つシステムでは、-3dBポイントでの振幅測定値は実際の振幅の約70%でなります。高性能なオシロスコープやプローブの中には、ロールオフが急峻なものがあり、定格の帯域幅限界まで正確な振幅測定が可能なものもあります。信号の周波数の5倍の帯域幅を持つプローブとスコープの組み合わせを使えば、心配なく正確な振幅測定ができます。

図2.4のグラフは、純粋な正弦波に適用されることにご注意ください。方形波やパルスの最大周波数成分は、信号の基本周波数の高調波になります。方形波を正確に測定するには、五次または六次の高調波、あるいは七次の高調波が観測できなければなりません。

また、オシロスコープには、測定する波形に合わせた十分な立上り時間の性能も必要になります。オシロスコープやプローブの立上り時間は、パルスが10%の振幅レベルから90%の振幅レベルまでに要する時間と定義されます。パルスの立上り時間や立下り時間を正確に測定するには、プローブとオシロスコープの立上り時間を、測定するパルスの立上り時間の3~5倍にする必要があります (図2.5)。立上り時間が規定されていない場合、システムがガウシアン・ロールオフを持つ特性であると仮定して、以下の関係から帯域幅 (BW) の仕様から立上り時間 (T_r) を求めることができます。

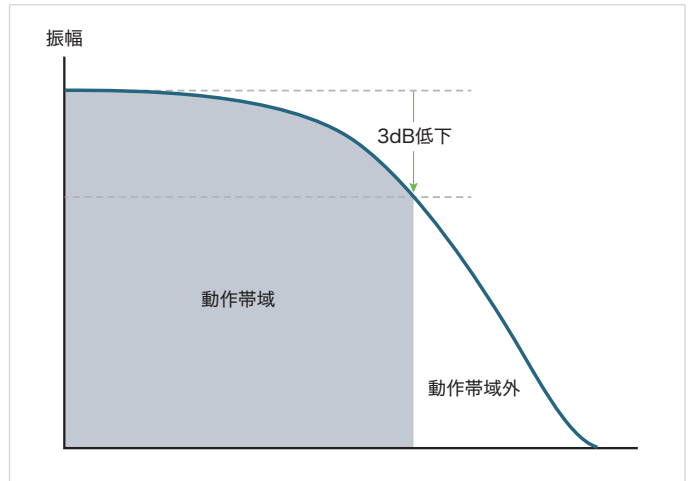


図2.4. プローブとオシロスコープは、動作帯域にわたって仕様通りに測定できるように設計されている。3dBポイントを超える周波数では、信号振幅が大きく減衰し、測定結果が予測できなくなる可能性がある。

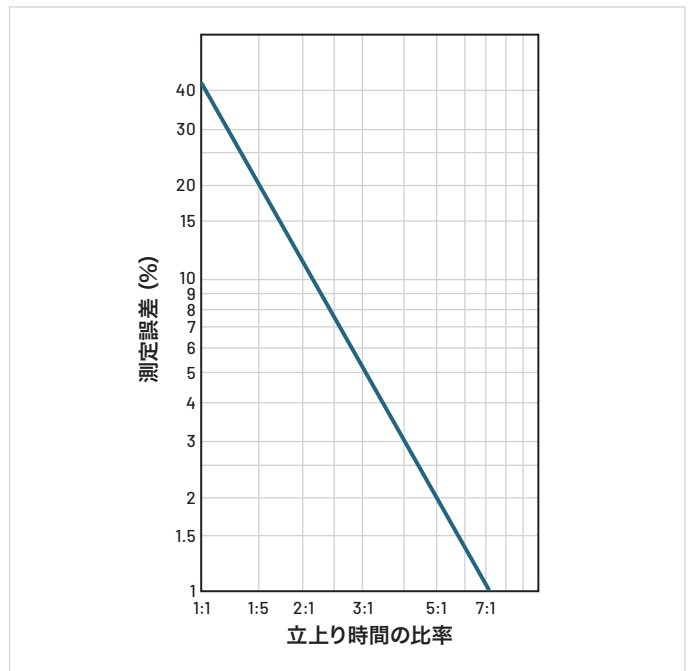


図2.5. 立上り時間の測定誤差は、上記のグラフから推定できる。オシロスコープとプローブの組み合わせで、測定するパルスの3倍の立上り時間 (3:1の比率) を持つのであれば、パルスの立上り時間を5%以内の確度での測定が期待できる。5:1の比率であれば、誤差はわずか2%になる。

$$T_r = \frac{.35}{BW}$$

どのようなオシロスコープにも、周波数帯域と立上り時間の制限が規定されています。同様に、プローブにも周波数帯域と立上り時間の制限があります。そして、プローブをオシロスコープに接続すると、システムとしての新たな周波数帯域と立上り時間の制限が課せられます。

ただし、システムとしての周波数帯域と、個々のオシロスコープ、プローブの周波数帯域との関係は単純なものではありません。立上り時間についても同じことが言えます。このため、オシロスコープ・メーカーは、オシロスコープと組み合わせて使用するプローブの機種ごとに、プローブ先端での周波数帯域や立上り時間を定めています。測定システムを構成するのはオシロスコープとプローブであり、そのシステムの周波数帯域と立上り時間によって測定能力が決まるため、これは重要なことです。オシロスコープの推奨リストにないプローブを使用すると、正確な測定結果が得られなくなるおそれがあります。

ダイナミック・レンジの制限

すべてのプローブには、超えてはならない高電圧に関する安全性の限界があります。**受動プローブ**の場合、その限界は数百～数千V(ボルト)の範囲です。**アクティブ・プローブ**の場合は、最大安全電圧限界は通常数十Vの範囲になります。人体への危害、プローブの損傷を防ぐため、測定する電圧と、使用するプローブの電圧限界を認識しておく必要があります。

安全面だけでなく、実用面での測定ダイナミック・レンジについても考慮する必要があります。オシロスコープには振幅感度範囲があります。例えば、一般的な感度範囲は1mV～10V/divです。つまり垂直軸8目盛表示では、(信号振幅において4目盛表示で十分な測定分解能が得られることが前提で計算すると)ピーク・ツー・ピークで4mV～40Vの信号を測定できることになります。

1:1プローブの場合、測定ダイナミック・レンジはオシロスコープと同じになります。上の例では、信号測定範囲は4mV～40Vになります。

では、40Vを超える信号を測定する場合はどうすればよいのでしょうか。

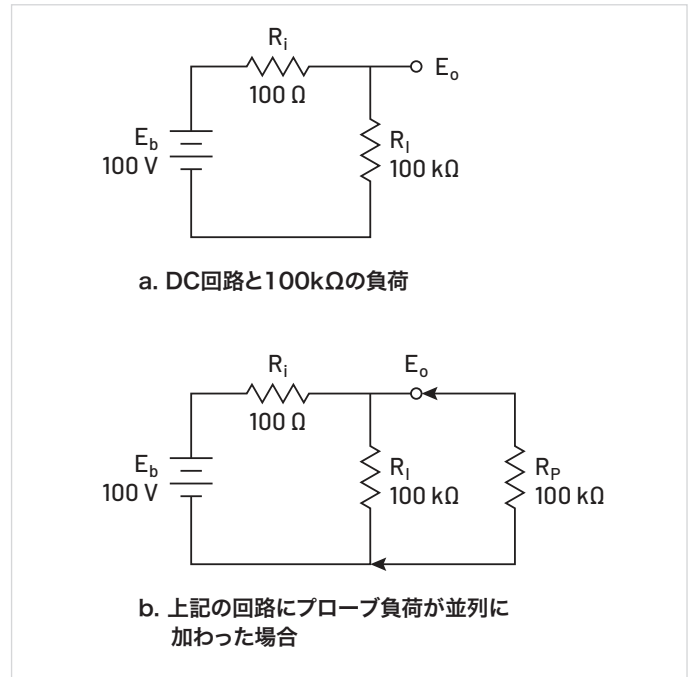


図2.7. 抵抗負荷の例

減衰プローブを使用すれば、オシロスコープのダイナミック・レンジを高い電圧域にシフトさせることができます。例えば10:1のプローブでは、ダイナミック・レンジは40mV～400Vになります。この場合、入力信号を10分の1に減衰させ、実質的にオシロスコープの倍率を10倍にします。一般的な用途では、電圧範囲の上限を上げることができ、信号源にかかる負荷も抑えられることから、10:1プローブが広く使用されています。しかし、測定する電圧レベルの範囲が非常に広い場合は、切替え可能な1:1/10:1プローブの使用を検討してもよいでしょう。これにより、4mV～400Vのダイナミック・レンジが得られますが、1:1モードでは信号源にかかる負荷に対して十分な注意を払う必要があります。

信号源に加わる負荷

前述したように、プローブはオシロスコープ入力端子で電圧を発生させるために、回路から電流を引き出す必要があります。これによってテスト・ポイントに負荷がかかるため、回路、つまり信号源からテスト・ポイントに送られる信号が変化してしまうことがあります。

回路負荷の影響を見る最も簡単な例として、図2.7に示すバッテリー駆動の抵抗回路網を測定する場合について考えてみましょう。図2.7aでは、プローブが接続されていない状態であり、バッテリーの直流電圧はバッテリーの内部抵抗 (R_i) とバッテリーが駆動している負荷抵抗 (R_l) に分かれて印加されています。図に示された抵抗値の場合、出力電圧は以下のようになります。

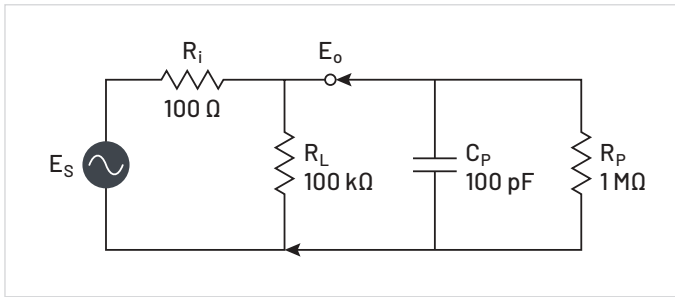


図2.8. 交流信号源の負荷問題で最も重要なのが、プローブ先端でのキャパシタンス (C_p) である。信号周波数が上がると、容量リアクタンス (X_c) が下がるため、キャパシタを流れる電流は増える。

$$\begin{aligned}
 E_o &= E_b \left(\frac{R_l}{R_i + R_l} \right) \\
 &= 100 \text{ V} \left(\frac{100 \text{ k}\Omega}{100 \Omega + 100 \text{ k}\Omega} \right) \\
 &= 99.9 \text{ V}
 \end{aligned}$$

図2.7bでは、プローブが回路に接続されており、R_iと並列にプローブ抵抗(R_p)がかかっています。R_pが100kΩとすると、図2.7bでの実質的な負荷抵抗は、その半分の50kΩになります。

E_oに対する影響は以下ようになります。

$$\begin{aligned}
 E_o &= 100 \text{ V} \times \frac{50,000}{(100 + 50,000)} \\
 &= \frac{5,000,000 \text{ V}}{50,100} \\
 &= 99.8 \text{ V}
 \end{aligned}$$

負荷の影響である99.9Vと99.8Vの差はわずか0.1%で、ほとんどの場合では無視できます。しかしR_pが小さい場合、例えば10kΩであるとすると、その影響は無視できなくなります。

こうした抵抗負荷を最小限に抑えるため、1:1プローブには通常1MΩの抵抗が使用されています。10:1プローブでは通常10MΩの抵抗が使用されています。ほとんどの場合、この値によって抵抗負荷はほぼ無視できます。ただし、高抵抗の信号源を測定する場合には、多少の負荷が予測されます。

通常、負荷の問題で最も重要なのは、プローブ・チップのキャパシタンス(静電容量)による負荷です(図2.8参照)。低い周波数では、このキャパシタンスはリアクタンスが非常に高く、影響はほとんどありません。しかし、周波数が増えにつれ、容量リアクタンスは下がります。その結果、高い周波数では負荷が大きくなります。

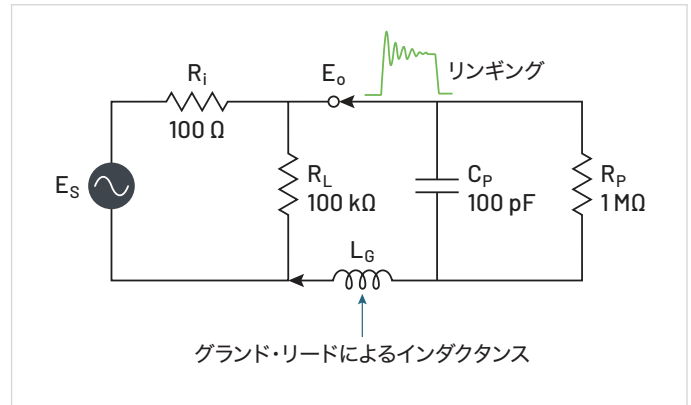


図2.9. プローブのグランド・リードにより、回路にインダクタンスが加わる。グランド・リードが長いほどインダクタンスが大きくなり、高速パルスでリングングが発生する可能性も高くなる。

$$X_c = \frac{1}{j\omega C}$$

この容量負荷は、周波数帯域を下げ、立ち上がり時間を遅くすることになり、測定システムの周波数帯域と立ち上がり時間の特性に影響を及ぼします。

容量負荷は、容量が低いプローブを選ぶことによって抑えることができます。下表に、一般的なプローブの容量を示します。

プローブ	減衰比	R	C
P6101B型	1 : 1	1MΩ	100pF
P6139B型	10 : 1	10MΩ	8pF
P6243型	10 : 1	1MΩ	≤1pF
TPP1000型	10 : 1	10MΩ	12pF

表2.1. プローブ容量

グランド・リードは導線であるため、ある程度のインダクタンスがあります(図2.9参照)。このインダクタンス(L)は、プローブのキャパシタンス(C)と共振し、ある一定の周波数(このLとCの値によって決まる)でリングングが発生します。このリングングは防ぐことができませんが、パルスに印加される、振幅の減衰した正弦波と見なすこともできます。リングングの周波数が、プローブ/オシロスコープのシステム周波数帯域の範囲外になるようにプローブ・グランドを設計することで、リングングの影響を軽減することができます。

グランドに関わる問題を防ぐため、プローブに付属しているグランド・リードから最も短いグランド・リードを使用してください。長いグランド・リードを使用すると、測定するパルスにリングングが発生することがあります。

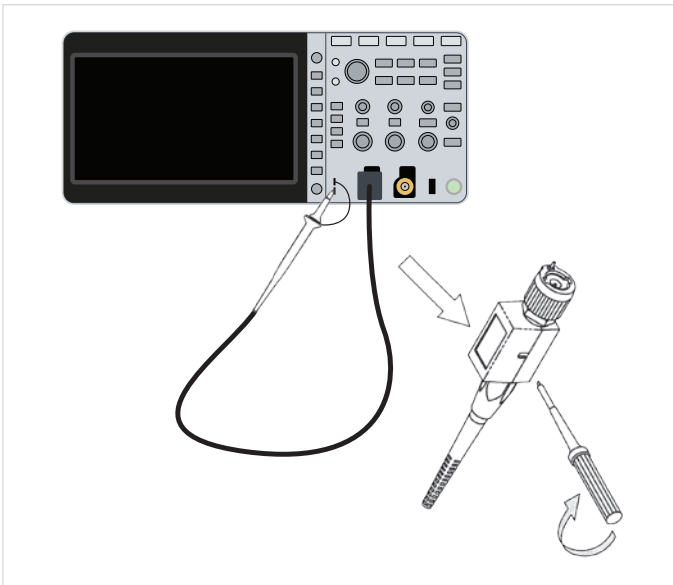


図2.10 マニュアル（手作業）による補正が必要なオシロスコープ、プローブの場合、オシロスコープ入力に接続するプローブ・ヘッドまたは補正ボックスで補正する。

プローブはセンサである

これまで述べたようなオシロスコープとプローブの関係を考える際に重要なのは、プローブはセンサであるということです。ほとんどのオシロスコープのプローブは電圧センサです。プローブは電圧信号を検出、つまりプロービングして、オシロスコープの入力端子に送ります。一方、電圧信号以外の現象を検出できるプローブもあります。

例えば、電流プローブは導線を通る電流を検出するように設計されています。電流プローブは、検出した電流を電圧信号に変換して、オシロスコープの入力端子に送ります。同様に、光プローブは光信号の電力を検出して電圧信号に変換し、オシロスコープで測定します。

また、オシロスコープの電圧プローブは、さまざまなセンサやトランスデューサと組み合わせることでさまざまな現象を測定できます。例えば、振動トランスデューサと組み合わせると、機械の振動信号をオシロスコープ画面に表示することができます。市販されているトランスデューサの種類と同じだけの可能性があります。

ただし、いずれの場合においても、トランスデューサ、プローブ、オシロスコープの組み合わせを1つの測定システムとして考える必要があります。前述した問題は、トランスデューサにも当てはまります。トランスデューサには周波数帯域に制限があり、負荷が加わることもあります。

プロービングの基礎知識

ご使用のオシロスコープとアプリケーションに合ったプローブを選ぶことで、必要な測定が初めて可能になります。測定によって有益な結果を得られるかどうかは、ツールの使い方次第とも言えます。測定でよくある落とし穴を回避するためのプロービングの基礎知識を以下で説明します。

プローブの補正

ほとんどのプローブは、特定のオシロスコープの入力端子に適合するように設計されています。しかし、オシロスコープごと、さらには1台のオシロスコープでも入力チャンネルごとに、わずかながらばらつきがあります。こうした問題に対応するため、多くのプローブ、とりわけ減衰プローブ（10：1プローブ、100：1プローブ）には補正回路が組込まれています。

プローブに補正回路がある場合は、使用するオシロスコープのチャンネルに合わせてこの回路を調整し、プローブを補正する必要があります。以下でその手順を説明します。

マニュアル（手作業）による補正が必要なプローブの場合の手順

1. プローブをオシロスコープの入力チャンネルに接続します。
2. オシロスコープ前面パネルにあるプローブ補正テスト・ポイントに、プローブ・チップを接続します（図2.10参照）。
3. プローブに付属している調整用ドライバ、それ以外であれば非磁性の調整用ドライバを使って補正回路を調整し、波形の水平部が平坦で、オーバーシュートや傾きのない波形が表示されるようにします（図2.12参照）。
4. オシロスコープに校正ルーチンが内蔵されている場合は、そのルーチンを実行して測定精度を上げます。

自動デジタル補正機能が備わっているプローブの場合の手順

1. プローブをオシロスコープの入力チャンネルに接続します。
2. オシロスコープ前面パネルにあるプローブ補正テスト・ポイントに、プローブ・チップを接続します（図2.10参照）。
3. オシロスコープに表示されるAUTOSSET ボタンをクリックします。
4. 画面左下のチャンネル・バッジをダブル・クリック、またはダブル・タップします。
5. ドロップダウン・メニューからPROBE SETUPを選択します。
6. Compensate Probeをタップ、またはクリックします（図2.11参照）。

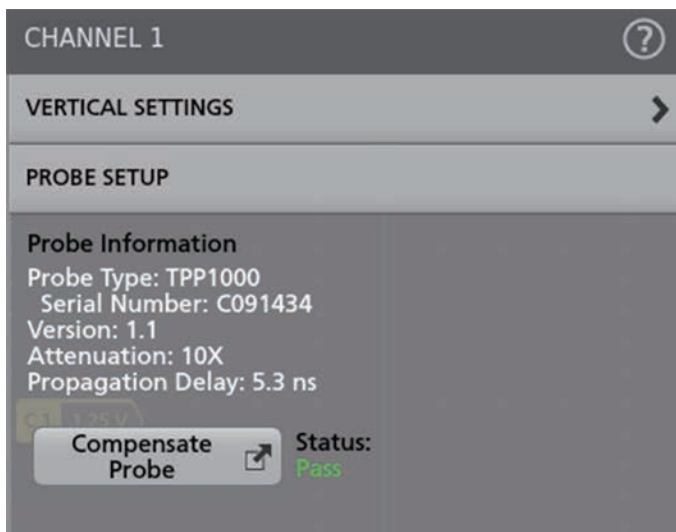
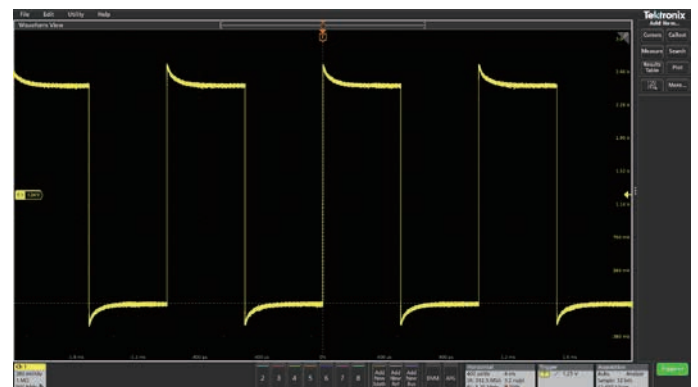


図2.11 自動デジタル補正機能が備わったオシロスコープのプローブ補正

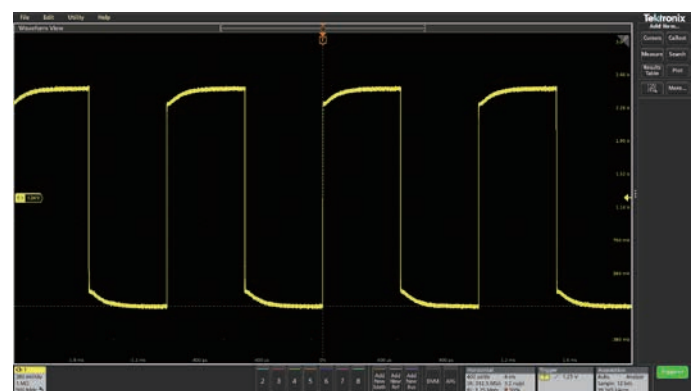
補正されていないプローブでは、特にパルスの立上り／立下り時間の測定において、さまざまな測定誤差を引起す可能性があります。こうした誤差を防ぐため、プローブをオシロスコープに接続したならば、直ちに補正を行うようにし、その後も補正のチェックを頻繁に行ってください。

プローブ・チップを交換した場合も、必ずプローブ補正を実行してください。最新のオシロスコープでは、TekVPIプローブなどに対する補正機能があります。この場合、クイック・テスト機能で簡単にプローブ補正が行えます。

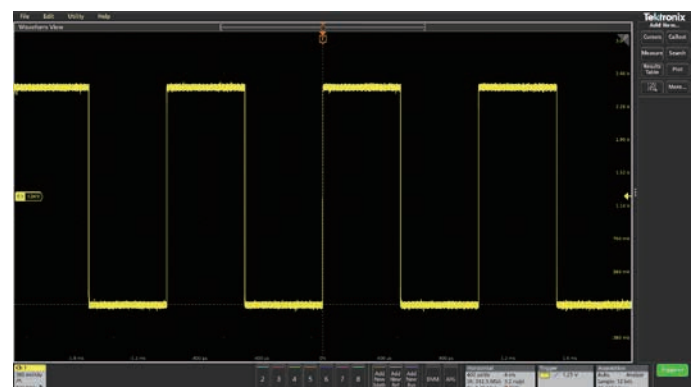
図2.12. 方形波に対するプローブ補正の影響の例



補正過剰

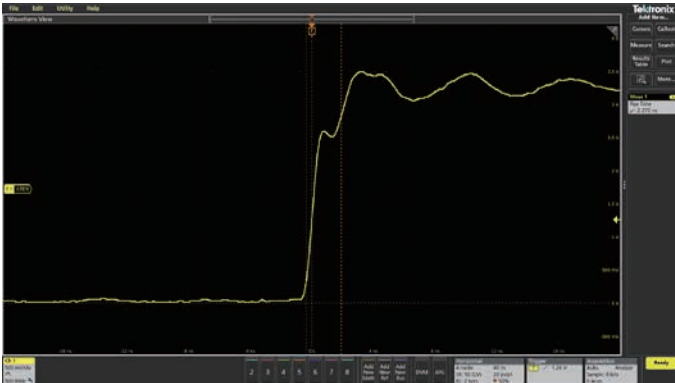


補正不足

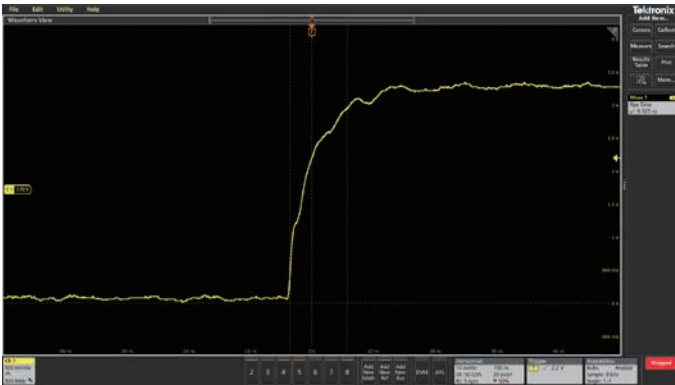


適正な補正

図2.13. 短い導線をテスト・ポイントにはんだ付けした場合であっても、信号忠実性において問題となることがある。この例では、立上り時間が4.74nsから5.67nsへと変化している。

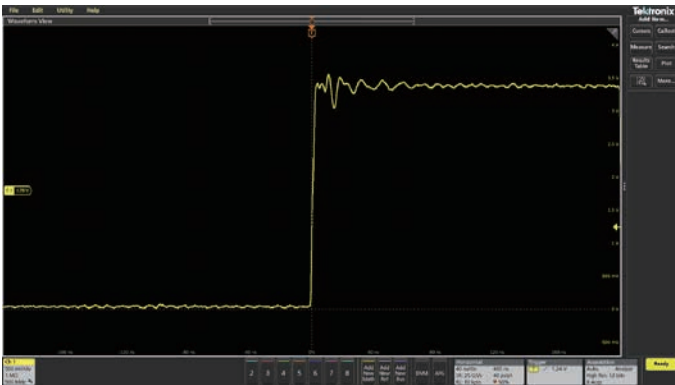


プローブ・チップを直接接続した場合

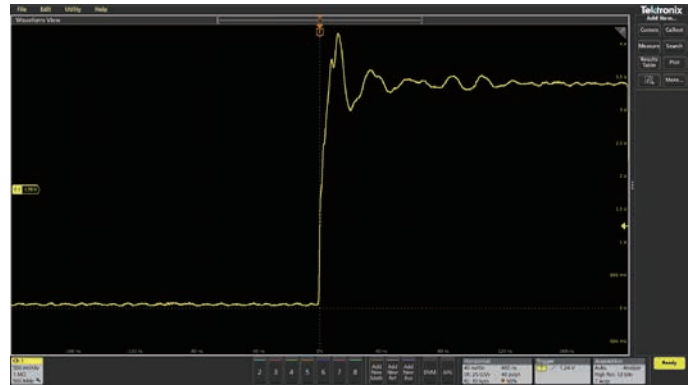


プローブ・チップに5cmの導線を付けた場合

図2.14. プローブのグランド・リードが長くなるとパルスにリングングが発生することがある。



16.5cmのプローブ・グランド・リードの場合



71cmのグランド・リードの場合

可能な限り適切なプローブ・チップ・アダプタを使用する

測定する回路に適したプローブ・チップ・アダプタを使用することにより、プローブの接続が迅速かつ便利になり、電気的にも繰返し測定のバラつきが減り、測定精度が上がります。適切なプローブ・チップ・アダプタを使わずに導線を回路のテスト・ポイントにはんだ付けているケースも、今だに少なくありません。

ここで問題となるのは、たとえ数cmの導線でも、高い周波数ではインピーダンスが大きく変化する可能性があるということです。この影響について示したのが図2.13であり、回路にプローブ・チップを直接に当てた場合と、両者の間に短い導線がある場合の測定結果を示しています。

グランド・リードはできる限り短く、できる限り直接接続する

サイズの大きい基板やシステムで性能チェックやトラブル・シューティングを行う場合、プローブのグランド・リードを長くしたいと思うことがあります。確かに長さがあれば、一度アースにつながだけで、システムの周囲を自在に移動させながら、各テスト・ポイントにプロービングできます。しかし、グランド・リードが長くなるとインダクタンスが加わるため、高速に遷移する波形でリングングが発生する原因になることがあります。図2.14では、標準的なグランド・リードを使用した場合と、長いグランド・リードの場合の波形的測定結果を示しています。

まとめ

この章では、プローブを正しく選定、使用する上で必要となる基礎について説明しました。以降の章では、これらの情報をさらに詳しく説明するとともに、プローブやプロービング技術に関する詳細な情報もご紹介します。

第3章 多様なニーズに対応した豊富なプローブ

市販されているオシロスコープ・プローブの種類は、数百～数千にのぼると見られます。

これほど多くの種類のプローブが本当に必要なのでしょうか？
 答えは「必要」です。
 なぜ必要なのかについて本章で説明します。

この理由を理解することで、使用するオシロスコープと測定対象の両方にマッチしたプローブが選択できるようになります。適切なプローブが選択できれば、測定能力を高め、有益な測定結果を得ることができます。

多くの種類のプローブがある理由

まず根本的な理由の1つとして、オシロスコープの機種や機能が非常に豊富なことが挙げられます。機種が異なると、必要なプローブも異なります。例えば、400MHzのオシロスコープには、400MHzの周波数帯域に対応するプローブが必要です。

しかし、100MHzのオシロスコープに400MHzの周波数帯域に対応するプローブは機能が高すぎるばかりか、過剰なコストがかかってしまうため、100MHzの周波数帯域に対応するように設計されたプローブが必要になります。

基本的には、可能な限りオシロスコープの周波数帯域に適合したプローブを選ぶことが重要です。それができない場合は、オシロスコープの周波数帯域を上回るプローブを選ばなければなりません。

むしろ、異なるのは周波数帯域だけではありません。オシロスコープは、入力コネクタの種類も多く、入力インピーダンスもさまざまです。例えば、多くのオシロスコープではシンプルなBNCタイプの入力コネクタが使用されていますが、SMAコネクタが使用されているオシロスコープもあります。また、図3.1のように、**リードアウト**、**波形ID**、**プローブ電源**、あるいはその他の特殊な機能に対応するために設計されたコネクタを備えたオシロスコープもあります。

プローブを選択する場合、使用するオシロスコープに適合したコネクタであることも重要です。直接取付けるコネクタを選ぶこともできますが、適切なアダプタを介して接続することも可能です。

図3.1. プローブ - オシロスコープ間の接続インターフェース



一般的なBNCプローブ - 簡素なBNCコネクタを持ったプローブは、当社のほとんどのオシロスコープに接続できます。低コストの受動プローブには、一般的に簡素なBNCコネクタが装備されています。



TEKPROBE™ Level 1 BNC プローブ - TekProbe Level 1 BNC プローブには簡素なプローブ・コミュニケーション機能が装備され、そのスケール情報をオシロスコープに伝えることによって正確な振幅情報を正しく変換することが可能です。



TEKPROBE™ Level 2 BNC プローブ - TEKPROBE Level 2 BNC プローブは、Level 1のスケール情報機能を継承しながら、アクティブ・プローブに電源を供給できます。



TekVPI® プローブ - TekVPIプローブには互換性のあるオシロスコープとの双方向の通信機能があり、オシロスコープでのスケール、補正、デスクュー、デガウス、ゼロ化が可能です。



TekConnect® プローブ - TekConnectインターフェースは、当社の広帯域アクティブ・プローブに対応しており、20GHzを超えるプローブに対応できるように設計されています。

プローブとオシロスコープのコネクタの互換性は、リードアウトへの対応が適合性を判断する上で特に重要になります。1:1プローブを10:1プローブと交換した場合、オシロスコープの縦軸スケールのリードアウトには、1:1から10:1への変更が反映されなければなりません。例えば、1:1プローブが接続されているときの縦軸スケールのリードアウトが1V/div (1目盛が1V) の場合、10:1プローブにすることで垂直軸のリードアウトは10倍の10V/divになるはずですが、この1:1から10:1への変更がオシロスコープのリードアウトに反映されていない状態で、10:1プローブを使って振幅を測定すると、測定値が本来の10分の1の値になってしまいます。

汎用プローブの中には、オシロスコープのリードアウト機能に対応していないものもあります。そのため、オシロスコープ・メーカーが推奨するプローブの代わりに汎用プローブを使用する場合は、特に注意が必要です。

さらに、周波数帯域やコネクタの違いだけでなく、入力抵抗 (R) や入力容量 (C) の値もオシロスコープによってさまざまです。オシロスコープの入力抵抗は、通常は50Ωまたは1MΩですが、入力容量はオシロスコープの周波数の仕様や、その他の設計上の要素によって大幅に異なります。信号が十分な忠実度を維持して伝送されるためには、組み合わせる使用するプローブのR、CとオシロスコープのR、Cが一致していることが重要です。例えば、入力抵抗が50Ωのオシロスコープには、50Ω対応のプローブを使用し、入力抵抗が1MΩのオシロスコープには1MΩ対応のプローブを使用します。

このように、抵抗には一対一の対応関係が必要ですが、**減衰プローブ**を使用する場合は例外です。50Ω対応の10:1プローブの入力抵抗は500Ωであり、1MΩ対応の10:1プローブでは10MΩになります。(10:1プローブなどの減衰プローブは、ディバイダ・プローブあるいはマルチプライヤ・プローブと呼ばれることもあります。10:1プローブであれば、オシロスコープへ送る入力信号を10分の1に減衰させることによって、オシロスコープの測定範囲を10倍にします。)

抵抗のマッチング (整合) の他に、容量についてもオシロスコープの公称入力容量にマッチングさせる必要があります。通常は、プローブの補正回路を調節することで容量をマッチングさせます。ただし、この方法は、オシロスコープの公称入力容量がプローブの補正範囲内にある場合にのみ可能です。そのため、さまざまなオシロスコープ入力端子の要件を満たすように、プローブの補正範囲もいろいろな種類があります。

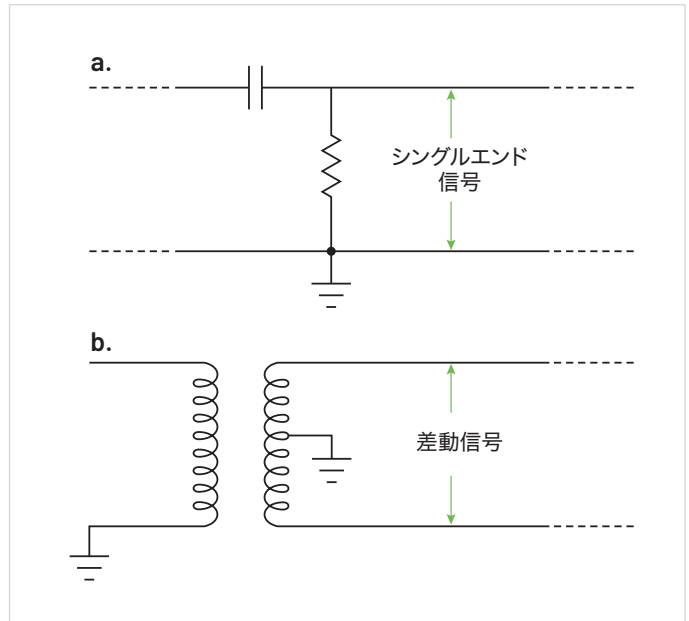


図3.2. シングルエンド信号はグラウンドを基準とした信号であり (a)、差動信号は2本の信号線あるいは2つのテスト・ポイント間の差として得られる信号 (b) である。

プローブとオシロスコープのマッチングは、オシロスコープ・メーカーの努力によって非常に簡単になりました。メーカー各社は、プローブとオシロスコープの組み合わせが完全なシステムになるよう、慎重に設計を行っています。これにより、メーカーが指定した標準的なプローブを使用すれば、プローブとオシロスコープは最適なマッチングが得られるようになってきました。メーカーが指定した以外のプローブを使用すると、最適な測定性能は得られません。

現在市販されているプローブの大半は、このプローブとオシロスコープのマッチングが最適になるよう生み出されたものです。また、さまざまな測定ニーズによって、必要なプローブの種類はさらに増えています。プローブの基本的な違いは、測定する電圧の範囲です。ミリボルト (mV)、ボルト (V)、キロボルト (kV) の測定には、通常、それぞれの減衰比 (1:1、10:1、100:1) のプローブが必要になります。

信号電圧が差としてあらわれるケースもよくあります。これは、グランドやコモン電位がかかっていない、2つのポイント間、2本の導線間の信号の差です (図3.2参照)。これは差動信号と呼ばれ、増幅回路、シリアル・データ通信、電力回路では一般的です。こうした信号の測定には、差動プローブと呼ばれるプローブが必要になります。

また、特に電力アプリケーションの場合、電圧よりも電流のほうが重要なケースもよくあります。このようなアプリケーションでは、電圧ではなく電流を検出するタイプのプローブが必要です。

電流プローブや差動プローブ以外にも、さまざまな種類のプローブがあります。以降では、一般的なプローブの種類とそれぞれの特長について説明します。

プローブの種類とそれぞれの特長

一般的なプローブの種類の説明の前に、その種類には多くの重複があることを認識しておく必要があります。例えば、電圧プローブは電圧検出専用のプローブですが、同時に、受動プローブあるいはアクティブ・プローブも電圧プローブです。また、差動プローブは特殊な電圧プローブの一種ですが、同時に、受動プローブあるいはアクティブ・プローブでもあります。こうした重複については適宜説明します。

受動電圧プローブ

受動プローブは導線とコネクタで構成されており、補正や減衰のための抵抗、キャパシタが含まれています。受動プローブの信号経路には、トランジスタや増幅器のようなアクティブ (能動) 素子はありません。

構造が比較的シンプルなため、受動プローブは最も堅牢で経済的なプローブであると言えます。使いやすく、最も普及しているタイプのプローブです。

受動電圧プローブは、電圧範囲に合わせて1:1、10:1、100:1などいくつかの減衰比があります。このうち10:1受動電圧プローブは最も多く使用されているプローブで、オシロスコープに標準アクセサリとして添付されているのもこのタイプです。

測定する信号の振幅がピーク・ツー・ピークで1V以下のアプリケーションであれば、1:1プローブが適しています。低振幅と中程度の振幅 (数十mV~数十V) が混在する場合は、切替え可能な1:1/10:1汎用プローブが便利です。注意しなければならないのは、切替え可能な1:1/10:1汎用プローブは2種類のプローブを一体化したものであり、減衰比だけでなく、周波数帯域、立上り時間、インピーダンス (R、C) の特性も異なるという点です。このため、オシロスコープの特性に厳密には適合せず、標準プローブとして指定された10:1プローブのような最良の性能が得られない場合があります。

ほとんどの受動プローブは、汎用オシロスコープで使用するように設計されています。したがって、100MHz未満から500MHz以上までの周波数帯域が一般的です。

さまざまな種類の導線、コンポーネント、テスト・ポイントに対応するための、豊富なアクセサリが用意されています。詳細については、「プローブ・アクセサリ」、およびこの章の最後にある図3.17を参照してください。

さらに高い周波数帯域で使用するための特別なカテゴリの受動プローブもあり、50Ωプローブ、Z₀プローブ、電圧ディバイダ・プローブなどと呼ばれています。このタイプのプローブは、高速回路の特性評価、マイクロ波通信、TDR (時間領域反射率測定) など、50Ωの環境で使用するように設計されています。こうしたアプリケーション向けの50Ωプローブでは、周波数帯域は数GHz、立上り時間は100ps以下が一般的です。

シングルエンド・アクティブ・プローブ

アクティブ・プローブは、その動作のためにトランジスタなどの能動素子を内蔵しています。能動素子として最も多いのが電界効果トランジスタ (FET) です。

FET入力の利点は入力容量が非常に小さいことで、数pFから、小さいものでは1pF未満のものもあります。この超低容量により、数々の優れた効果が得られます。

既に述べた通り、容量Cの値が小さいと、容量リアクタンスの値X_Cは大きくなります。これは以下のように表わされます。

$$X_C = \frac{1}{j\omega C}$$

容量リアクタンスは、プローブの主要な入力インピーダンス要素であるため、Cが小さいほど、より広い周波数域で入力インピーダンスが大きくなります。その結果、アクティブFETプローブにおける一般的な周波数帯域は、500MHz～4GHzにもなります。

入力インピーダンスが大きいと、周波数帯域が広がるだけでなく、インピーダンスの値が不明のテスト・ポイントで測定しても、負荷の影響を受けるリスクがはるかに低くなります。また、容量が小さいと、グランド・リードによる影響が低減されるため、グランド・リードを長くとることができます。しかし、FETプローブの最も重要な特長は、負荷が非常に小さいため、受動プローブでは負荷の影響を受けるような、高インピーダンスの回路で使用できることです。

DC～数GHzのような高い周波数帯域をはじめ、さまざまな利点があるにもかかわらず、いまだに受動プローブが使用されるのはなぜかという疑問が湧いてくるかもしれません。

アクティブFETプローブには、受動プローブのような広い電圧範囲がないというのがこの疑問に対する答えです。アクティブ・プローブのリニア・ダイナミック・レンジは、通常 $\pm 0.6 \sim \pm 10V$ 程度であり、最大耐電圧も $\pm 40V$ (DC+ピークAC) しかありません。つまり、受動プローブのような、数mV～数十Vの測定はできないのです。うっかり高い電圧にプロービングしてしまうと、プローブを損傷するおそれがあるのです。さらに、静電気の放電で損傷するおそれもあります。

それでも、高い周波数帯域がFETプローブの利点であることに変わりはなく、また、リニア電圧範囲は半導体の一般的な電圧の多くをカバーしています。そのため、アクティブFETプローブは、ECL、GaAsをはじめとする高速論理回路のような低レベル信号のアプリケーションで使用されています。

パワーレール・プローブ

従来の電力アプリケーションでは、パワーレールの測定では一般的に受動プローブまたは差動プローブを使用してきました。技術の変化に伴い、設計エンジニアは確度の高いリップル測定と、数GHzでの非常に高速なトランジション測定を求めています。新しい設計での問題点を解決するためには、測定ツールにおけるノイズを抑えつつ、より詳細な信号情報を観測できるだけの広帯域が必要になります。パワーレール・プローブはこのような目的のために開発されたプローブで、回路に加わる負荷を抑えることで優れた確度を実現し(特に非常に感度の高い測定において)、低ノイズと広帯域を実現しています。広帯域により、データ信号、クロックに影響を及ぼす、DCレールの高調波やリップルなどの信号成分が詳細に観測できます。



図3.3. TPR4000型パワーレール・プローブ

パワーレール・プローブの例を図3.3に示します。

パワーレール・プローブは、数GHzまでのパワーレールのトランジエント(過渡現象)に対応し、プラグから集積回路のピンまでの電源を測定できる、数十Vの大きなDCオフセットの電圧範囲を備えています。また、パワー・インテグリティ・アプリケーションのための広いダイナミック・レンジに対応しており、高電圧レールでは、ライン上のドループ、または負荷やトランジエントによって多くの電流が引き出された場合のドループが観測できます。大きな入力インピーダンス(DCで50k Ω)であるため、DCレールにおけるオシロスコープの負荷効果を最小限に抑えることができます。

技術の進歩に伴い、パワー・アプリケーションのエンジニアは、より小型でタイトな設計からより高い電力効率の実現に挑戦しています。これは、一般的な検証において複数のレールを他の信号と同時にプロービングしなければならない、自動車、産業、民生市場のエンジニアに特に当てはまります。このため、狭いスペース、埋め込まれた信号、より小さな寸法の部品により、接続に新たな制約が生じています。パワーレール・プローブには、モジュール式で柔軟な接続オプションがあり、ほとんどのニーズに対応できます。

差動プローブ

差動信号は、グランド基準ではなくお互いレベルをリファレンスとした信号です。差動信号の例を図3.4に示します。差動信号には、コレクタ間の負荷抵抗に発生する信号、ディスク・ドライブの読取りチャンネル信号、多相電源システム、その他、本質的にグランドから浮いた「フローティング」状態で発生する信号が含まれます。差動プローブによっては、グランド・ケーブルが付属しているものもあります。すべてのアプリケーションで必要となるものではないのですが、信号忠実度を上げることができます。コモンモード・ノイズが多い場合は、グランド・ケーブルがノイズの通り道となり、純粋な測定が可能になります。グランド・ケーブルを使用するもう一つの目的が安全性です。差動プローブを使用する場合、テスト・ポイントがグランドから数百V浮いていることがよくあります。グランド・ケーブルを使用することで、静電気放電(ESD)から保護することができます。

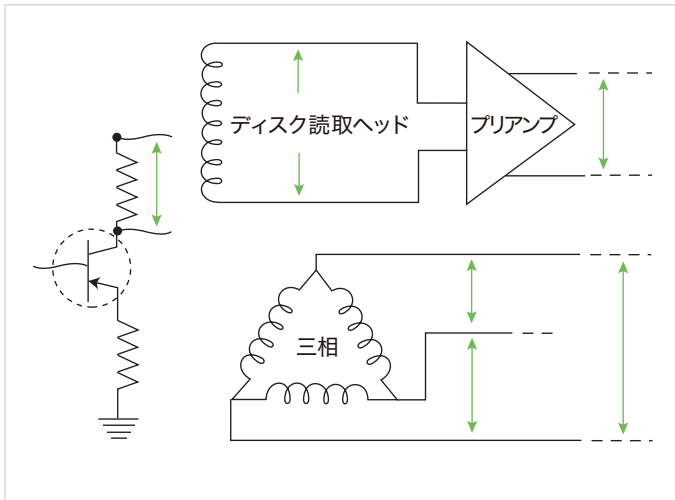


図3.4. 差動信号の例

差動信号のプロービングや測定には、基本的に2通りの方法があります。両方のアプローチを図3.5に示します。

図3.5aは、2本のプローブで2つのシングル・エンド測定を行う、一般的な方法です。同時にこれは、差動測定にとって最も望ましくない方法でもあります。それにもかかわらずこの方法が利用されるのは、この図のような2チャンネルのオシロスコープでは、2本のプローブが使用できるからです。対地（シングル・エンド）で両方の信号を測定し、オシロスコープの演算機能を使って両者の差を求める（チャンネルAの信号 - チャンネルBの信号）というのは、差動信号を測定する合理的な方法のように思われます。ただし、信号の周波数が低く、十分な振幅があり、ノイズの心配がない状況で測定できる場合に限りです。

しかし、2つのシングル・エンド測定を組合せる疑似差動測定には、いくつかの問題があります。その1つは、プローブからオシロスコープの各チャンネルまで、2本の長い信号経路が別々になっている点です。遅延によって両者の間に少しでも差が出ると、2つの信号が時間的にずれます。高速信号の場合、このずれは、差分信号の計算において振幅、タイミングの重大な誤差の原因となります。この時間差を最小限に抑えるためにも、遅延時間をマッチングさせた差動プローブを使用する必要があります。

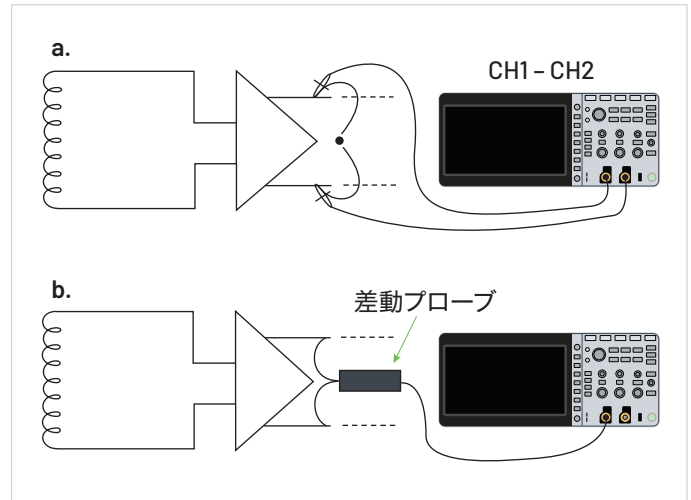


図3.5. 差動信号は、(a) のように2チャンネル・オシロスコープの演算機能を使用して引算するか、あるいは (b) のように差動プローブを使用（推奨）して測定することができる。

疑似差動測定のもう1つの問題は、十分な同相ノイズ除去が行われない点です。共通モード・ノイズとは、近くにあるクロック・ラインや蛍光灯などの外部からのノイズによって、両方の信号ラインに印加されるノイズのことです。ディスク読み取りチャンネルなどの低レベル信号の多くは、十分な同相ノイズ除去を利用するために差動方式で伝送、処理されます。差動方式では、この同相ノイズは差動信号から取除かれやすくなります。ノイズが除去できる割合を同相除去比（CMRR）と呼びます。

疑似差動測定では、入力チャンネルが別々になっているため、周波数が上るにつれてCMRRの性能は急速に悪化します。その結果、信号のノイズは、同相除去のレベルが維持された場合よりも多くなってしまいます。

一方、差動プローブでは、差動増幅器を使って2つの信号で引き算を行い、得られた1つの差動信号をオシロスコープの1つのチャンネルで測定します（図3.5b）。

これにより、より広い周波数範囲でのCMRR性能が著しく向上します。また、回路の小型化が進んだことで、差動増幅器をプローブ・ヘッドの位置まで移動させることができるようになっています。最新の差動プローブでは、1GHzの周波数帯域を、1MHz：60dB（1000：1）～1GHz：30dB（32：1）というCMRR性能で実現することができます。光アイソレーション型のプローブでは、さらに大きなCMRRが可能になっています。



図3.6. 高電圧プローブでは、直流 (DC) 電圧では20kVまで、75MHzの周波数帯域では40kVまでのパルス測定することが可能。

高電圧プローブ

「高電圧」は、相対的な意味で使われています。例えば、半導体業界で高電圧と言っても、電力業界では取るに足らないような電圧です。しかし、プローブの場合は、一般的な汎用10:1受動プローブで安全に扱える電圧レベルを超えたものを「高電圧」と定義することができます。

一般に、汎用受動プローブの最大電圧はおよそ400~500V(DC+ピークAC)です。一方、高電圧プローブの最大定格は20,000Vにもなります。このようなプローブの例を図3.6に示します。

高電圧のプローブ、測定においては、安全性が特に重要です。安全対策として、高電圧プローブの多くは、通常よりも長いケーブルを装備しています。一般的なケーブル長は約3mです。この長さは、オシロスコープを安全ケージや安全シールドの外側に置くのに十分です。高電圧源からさらに離れた場所でオシロスコープを操作できる7.6mのケーブルもあります。



図3.7. IsoVu光アイソレーション型プローブでは、より広い周波数帯域、非常に大きなCMRRが実現可能。

光アイソレーション型プローブ

絶縁型プローブは、ガルバニック絶縁を使用してプローブの基準電圧とオシロスコープの基準電圧 (通常はアース・グランド) を絶縁します。被測定デバイスとオシロスコープの間には電気的な接続がないため、コモンモード電流が計測器を流れる経路がなく、500MHzや1GHzの帯域幅でも非常に高いコモンモード除去比が得られます。

従来の高性能の差動プローブのCMRRは100MHzで-25dBですが、光アイソレーション型プローブでは-120dBにもなります。また、差動電圧範囲はkVレンジにもなります。

テクトロニクスは、光絶縁を使用したIsoVuという特許技術を開発し、非常に広い周波数帯域におけるクラストップのコモンモード除去比を実現しました。IsoVu技術は、パワー・オーバー・ファイバと光アナログ信号経路を使用して、測定システムとDUT (被測定デバイス) 間を完全にガルバニック絶縁します。この技術は、特に高速でスイッチングするワイドバンド・ギャップ半導体を使用するパワー・コンバータの正確な電圧測定において非常に有効です。

テクトロニクスのIsoVuプローブの例を図3.7に示します。

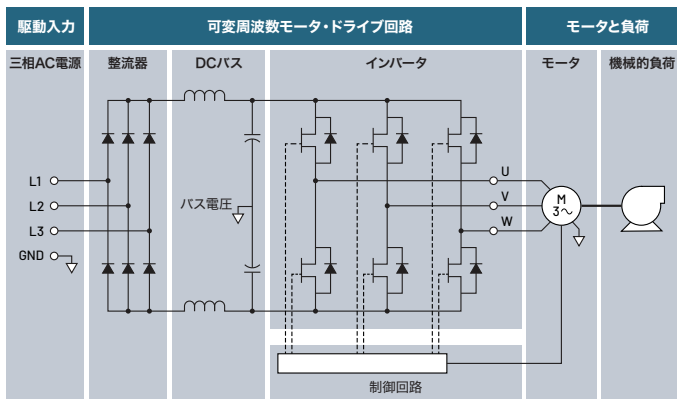


図3.8. この三相モータ駆動装置ではすべてのポイントが接地されていないため、フローティング測定が必要。

フローティング測定

フローティング測定とは、接地されていない2点間で行われる測定です。前述の差動プローブの説明に出てきた差動測定と似ていると思われるかもしれませんが、たしかにフローティング測定は差動測定であり、現に差動プローブを使ってフローティング測定を行うことができます。

ただし、この「フローティング測定」という表現は、一般に電力システムの測定に関して使用される用語です。例としては、スイッチング電源、モータ駆動装置、安定器、無停電電源装置など、いずれもテスト・ポイントが接地されていない状態で測定を行います。また、信号「コモン」では、接地からフローティングした状態で、電圧が数百Vにもなる場合があります。多くの場合、こうした測定では、高レベルのコモンモード信号を除去することで、そこにある低レベル信号を評価できるようにする必要があります。外来のノイズ電流も、表示波形にハムを付加して測定を一層困難にすることがあります。

一般的なフローティング測定の例を図3.8に示します。このモータ駆動システムでは、三相のAC電源を整流して最大600VのフローティングDC電圧を発生させています。パルス変調ゲート駆動信号を発生させる制御回路は接地されており、絶縁駆動回路を介してブリッジ・トランジスタをドライブします。ゲート・ソース間電圧を正確に測定するには、バス・トランジションを除去する必要があります。また、モータ駆動装置がコンパクトに設計されていること、電流が急速に変化すること、回転するモータが近くにあることなどが、EMI環境を過酷にしています。

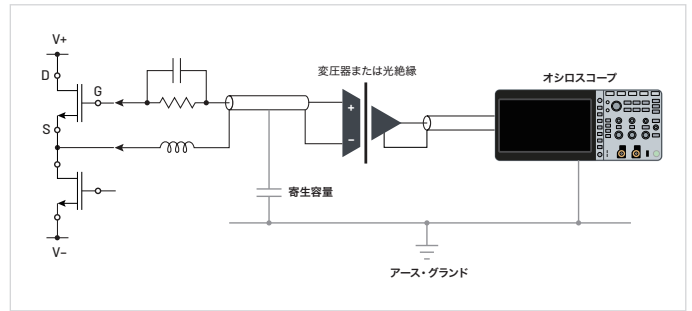


図3.9. フローティング測定のためのプローブ絶縁の例。

また、オシロスコープ・プローブのグランド・リードをモータ駆動回路のいずれかの部分に接続するとグランドとショートします。

プローブ・アイソレータは、オシロスコープではなくプローブのみをフローティングさせます。プローブの絶縁には、図3.9のように、トランスまたは光カップリング・メカニズムが使用されます。この例では、オシロスコープは適切に接地された状態のままで、絶縁されたプローブの先端チップとグランド・リード（ワニ口クリップ）に差動信号が印加されています。アイソレータは、絶縁部を介してレシーバに差動信号を送り、そこで差動入力信号に比例した対地信号が生成されます。このように、プローブ・アイソレータを使えば、すべての機器でフローティング信号測定が行えます。

さまざまなニーズを満たすため、さまざまなタイプのアイソレータがあります。その中には、グランド・リードが絶縁された2つ以上のチャンネルを備えた、マルチ・チャンネル・アイソレータもあります。また、アイソレータを機器から100mほど、遠く離れた場所に置く必要がある場合には光ファイバ・ベースのアイソレータもあります。差動プローブと同様に、アイソレータの場合も、主な選択基準は周波数帯域と同相除去比（CMRR）です。最大動作電圧も絶縁システムでは重要な仕様です。

警告

こうした対地間へのショートを回避するため、オシロスコープを接地しないという危険な方法で対処しているユーザがいます。このようにすれば、確かにオシロスコープのグランド・リードとモータ駆動回路がフローティング状態になるため、差動測定を行うことができます。しかしこの方法では、電位がかかった状態でオシロスコープ・シャーシがフローティングするため、致命的な感電の危険性があります。

オシロスコープを「フローティング」させることは、危険だけでなく、ノイズやその他の影響によって測定結果も損なわれます。

電流プローブ

導体を流れる電流は、導体の周囲に電磁束界を形成します。電流プローブはこの電磁束界の強さを検出し、相当する電圧に変換してオシロスコープで測定するように設計されています。こうすることで、オシロスコープで電流波形を表示、解析することができます。オシロスコープの電圧測定機能と組み合わせることで、さまざまな電力測定を行うことができます。オシロスコープの波形演算機能によっては、瞬時電力、有効電力、皮相電力、**位相**なども測定することが可能です。

電流プローブには、AC電流プローブ、AC/DC電流プローブという2種類があります。AC電流プローブは一般に受動プローブであり、AC/DC電流プローブはアクティブ・プローブです。両者ともトランスによる変換の原理を利用して、導体に流れる交流電流 (AC) を検出します。

トランスによる変換機能を利用するには、まず交流電流が導体を流れていなければなりません。この交流電流の振幅と方向によって、磁束界の形成と消滅が起こります。図3.10のようにコイルを置いて、この電磁束界を変化させると、コイル全体に電圧が誘起されます。

このトランスによる変換機能がAC電流プローブの基本です。実際にAC電流プローブのヘッドは、厳密な仕様にしたがって磁気芯 (コア) に巻かれたコイルになっています。このプローブ・ヘッドを、AC電流が流れる導体の近傍、また決められた向きに置くと、プローブは導体の電流に比例した電圧を出力します。この電流に関連する電圧が、電流スケールの波形としてオシロスコープ上に表示されます。

AC電流プローブの周波数帯域は、プローブのコイルの設計やその他の要因によって決まります。1GHzのような高い周波数帯域も可能ですが、100MHz以下の周波数帯域が一般的です。

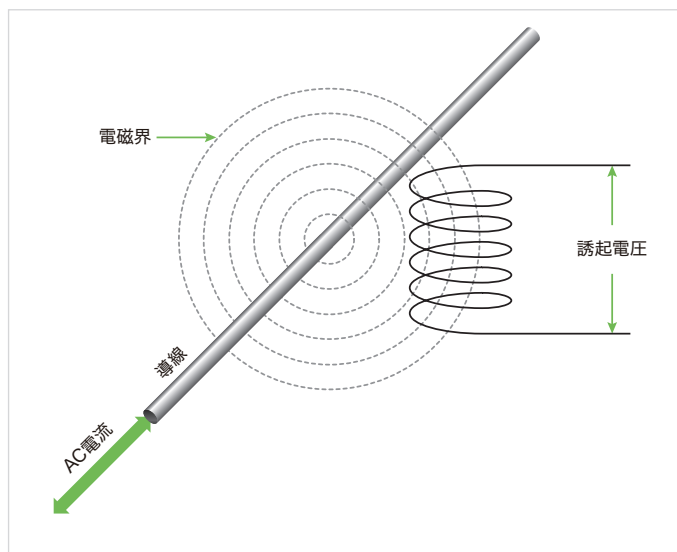


図3.10. 交流 (AC) 電流が流れる導体の周囲にコイルを置くと、磁束界が変化して電圧が誘導される。

いずれの場合も、AC電流プローブの周波数帯域では、低い周波数が切捨てられます。これには直流 (DC) も含まれます。DCは磁束界を変化させず、トランス機能が起こらないためです。また、直流に非常に近い周波数、例えば0.01Hzでも磁束界は十分な変化が起きません。しかし、周波数がある程度まで上るとトランス機能が十分になり、プローブの周波数帯域内で交流信号が出力されるようになります。これは、プローブ・コイルの設計によって異なり、周波数帯域の下限は0.5Hz~1.2kHzくらいまでになります。

周波数帯域がDCから始まるプローブでは、プローブに**ホール素子**を加えることでDCを検出しています。これにより、このAC/DCプローブの周波数帯域は、DCから規定上限周波数の3dBポイントまでになります。このタイプのプローブには、DC検出用のホール素子にバイアスをかけるための最低限の電源が必要です。プローブの設計によっては、ACレベルとDCレベルを組み合わせることでスケールリングし、一つの出力波形とするために電流プローブ・アンプが必要になる場合もあります。

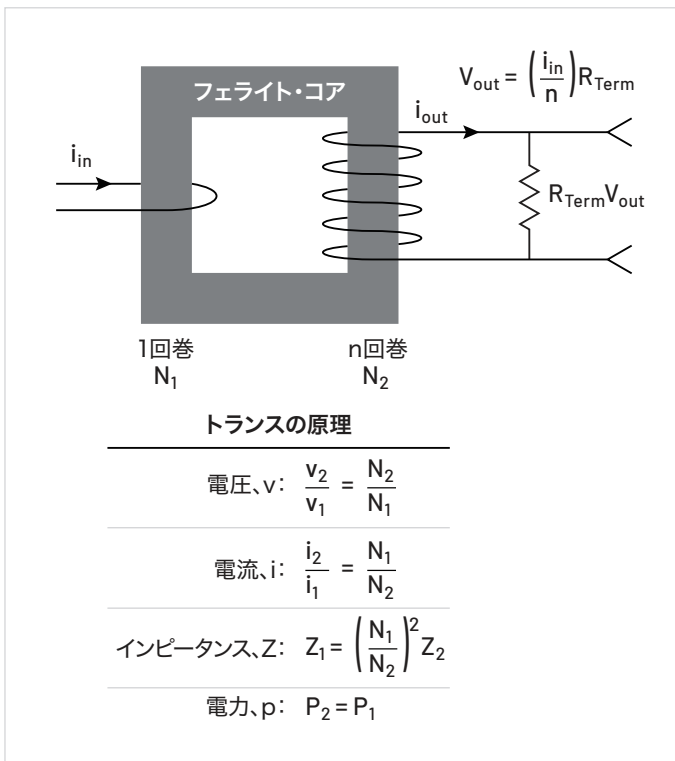


図3.11. ACトランス機能によって、単巻の通電導体 (N_1) がACプローブのコイル (N_2) に電流を誘起することで、プローブの終端 (R_{Term}) に電流に比例した電圧が生ずる。

基本的に電流プローブは、結合トランスの働きをします。この概念を図3.11に示し、トランスの基本方程式も示しています。標準的な動作では、被検出電流の導体は単巻です (N_1)。この単巻からの電流は、巻数の比率 (N_2/N_1) に比例した複巻 (N_2) のプローブ出力電圧に変換されます。同時に、プローブのインピーダンスも、導体の直列挿入インピーダンスに変換されます。この挿入インピーダンスは、プローブの種類によって異なりますが、1MHzにおける値をさし、30~500mΩの範囲にあります。インピーダンスは、被測定回路に並列に現れます。多くの場合、電流プローブの挿入インピーダンスは小さくその負荷は問題になりません。

トランスの原理を利用して、導体をプローブに何度も巻付けることでプローブの感度を高めることができます。2回巻なら感度は2倍に、3回巻なら3倍になります。ただし、巻き数の2乗の割合で挿入インピーダンスも増加します。



図3.12. スプリット・コア型のAC/DC電流プローブの例。開口部分には分割された変圧器とホール素子、DC電流測定用の制御回路が組み込まれている。

図3.12は、スプリット・コアと呼ばれるタイプのプローブです。このタイプでは、U字型のコアに導体を巻き付け、フェライト・スライドでU字の上部を閉じます。このプローブの利点は、フェライト・スライド部が開閉でき、測定する導体を挟むのに便利なことです。測定が終わったらスライドを開いて別の導体へ移動させることができます。

プローブをソリッド・コア・トランスで作ることもできます。このトランスでは、測定する導体が完全に包み込まれてしまうため、装着するには測定する導体を外し、トランスに通してから導体を回路につなぎ直す必要があります。ソリッド・コア・プローブの主な利点は、サイズが小さいことと、非常に高い周波数応答によって、非常に高速で振幅のせまい電流パルスやAC信号が測定できることです。

スプリット・コアは、電流プローブの中でも群を抜いて広く利用されています。AC、AC/DCの両タイプがあり、電流時間積にもよりますが、表示範囲 (電流/div) も広くなります。

電流時間積によって、電流プローブのリニア動作範囲の上限が決まります。電流時間積は、測定できる電流振幅が電流のパルス幅によって増減することを表わしたものです。電流時間積を超えると、プローブ・コイルのコア材料が飽和状態になります。飽和したコアは、電流が誘起した磁束を処理することができないため、電流入力と電圧出力の比例関係は失われます。

その結果、電流時間積を超えた部分では、波形ピークが実質的に「切取られた」ようになります。

コアの飽和は、被テスト導体に大きな直流電流が流れることによっても起こります。コアの飽和を抑え、電流測定範囲を実質的に拡大するため、バックアップ電流を提供するアクティブ電流プローブもあります。バックアップ電流を設定するには、被テスト導体のDC電流レベルを検出し、同等の逆電流をプローブに給電します。逆電流により直流電流が打ち消されるようにバックアップ電流を調整し、コアの飽和を防ぐことができます。

mA～kA、そしてDC～MHzにいたるまで、電流測定のニーズは実に多岐にわたるため、それに応じて電流プローブの種類も多くなります。特定のアプリケーションに合った電流プローブを選択することは、電圧プローブを選択する場合と似ています。以下のような選択肢があります。

- 電流処理能力
- レンジと感度
- 挿入インピーダンス
- 周波数範囲とディレーティング
- 最大電流時間積
- 接続のしやすさ

ロジック・プローブ

デジタル・システムの障害はさまざまな理由で発生します。発生した障害を突き止めて明らかにするツールがロジック・アナライザですが、実際にはロジック障害の多くが、デジタル波形のアナログ特性に起因しています。パルス幅のジッタ、パルス振幅のアベレーション、従来のアナログ・ノイズやクロストークをはじめ、デジタル障害には多くのアナログ的要因が考えられます。



図3.13. デバイスへのデジタル接続が容易なMSO用ロジック・プローブ

デジタル波形のアナログ特性を解析するには、オシロスコープを使用する必要があります。しかし多くの場合、原因を正確に把握するには、特定の論理条件時に発生する特定のデータ・パルスを観察しなければなりません。ロジック・トリガとタイミング解析は、デジタル・プローブを使用することにより、ミックスド・シグナル・オシロスコープで可能になります。

図3.13に示すロジック・プローブは、8チャンネルのポッドを備えています。各チャンネルには、被測定デバイスに簡単に接続できるように、グランドが埋め込まれた新プローブ・チップが付属しています。第1チャンネルの同軸ケーブルは、一目で見分けられるように青くなっています。コモン・グランドは、2つの4.7mm (0.187inch) クイック・コネクタ・タブで接続でき、広く入手可能なクイック・コネクタ・リセプタクルを使用することで、被測定デバイスに接続するためのカスタム・グランドが簡単に作成できます。ロジック・プローブをヘッダ・ピンに接続する場合、プローブ・ヘッドに付属のアダプタを使用します。グランド入力とシグナル入力を同一平面にできますので、簡単にヘッダ・ピンとの接続ができます。容量負荷も小さいため、優れた電気特性を実現しています。



図3.14. ハイブリッド回路やICのような小型形状デバイスをプロービングするためのプロービング・ステーションの例

その他のプローブの種類

上記の「標準的な」種類のプローブの他に、以下に挙げるような特殊なプローブやプロービング・システムが数多くあります。

- 広範囲な温度に対応するよう設計された環境対応型プローブ
- コンポーネント、その他の発熱体の温度を測定する温度プローブ
- マルチチップ・モジュール、ハイブリッド回路/ICなどの微細ビッチ・デバイスをプロービングするためのプロービング・ステーション、多関節アーム (図3.14参照)

光プローブ

光ファイバ通信の普及にともない、光波形を表示、解析するニーズが急速に高まっています。そして、通信システムのトラブルシューティングや解析のニーズを満たすため、さまざまな専用の光システム・アナライザが開発されています。しかし同時に、工学部品の開発や検証における一般用途の光波形測定や解析のニーズも高まっています。光プローブは、オシロスコープに光信号を表示できるようにすることで、このニーズに対応します。

光プローブは、光-電気コンバータです。光の側では、被測定デバイスの光コネクタ、光ファイバのタイプ、光モードなどに適合したプローブを選択する必要があります。電気の側では、標準的なプローブ、オシロスコープの選択基準にしたがいます。



図3.15. 一般的な電圧プローブと標準アクセサリ

プローブ・アクセサリ

ほとんどのプローブには、標準でアクセサリが付属しています。アクセサリには、通常、プローブに取付けるグランド・リード・クリップ、プローブをさまざまなテスト・ポイントに接続するのに役立つプローブ・チップなどが含まれています。プローブには多くの場合、プローブ補正ツールが付属していますが、最近のプローブの中には手作業による補正を必要とせず、自動的にデジタル補正を行うものもあります。図3.15に、一般的な汎用電圧プローブと標準アクセサリの一例を示します。

表面実装デバイスなどの特殊なアプリケーション用に設計されたプローブには、標準で専用のプローブ・チップ・アダプタが付属しているものもあります。さらに、特殊用途のアクセサリもオプションで用意されています。図3.16に、小型形状プローブで使用するように設計されたプローブ・チップ・アダプタをいくつか示します。

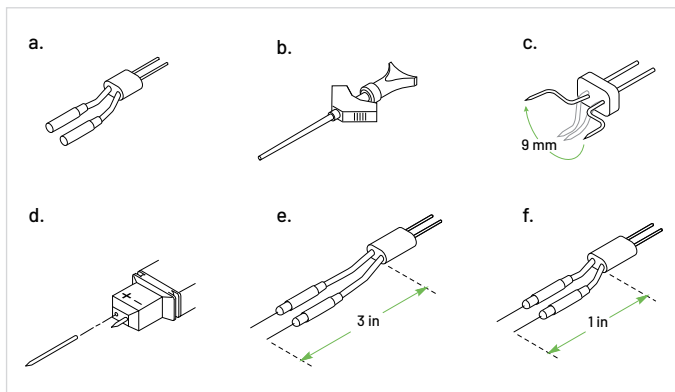


図3.16. 小型形状プローブ用のチップ・アダプタで、低電圧差動プローブに付属するアダプタの例。a. Yリード、b. MicroCKTテスト・チップ、c. ロングホーン・アダプタ、d. ストレート・ピン、e. 76mm (3in) はんだ付けアダプタ、f. 25.4mm (1in) はんだ付けアダプタ

ほとんどのアクセサリ、とりわけプローブ・チップ・アダプタは、特定のプローブ専用に設計されていることに注意が必要です。アダプタを、異なる型名のプローブや異なるメーカーのプローブで兼用することは、テスト・ポイントへの接続不良や、プローブおよびアダプタ自体の損傷の原因になるためお勧めできません。

プローブを購入する際には、プロービングする回路だけでなく、プロービングを迅速かつ容易にするアダプタやアクセサリも考慮に入れて選ぶことが重要です。多くの場合、安価な汎用プローブには、豊富なアダプタのオプションはありません。一方、オシロスコープメーカーのプローブには、特定のニーズに適應させるために、非常に豊富なアクセサリが用意されています。図3.17では、あるタイプのプローブで選択可能な、多彩なアクセサリ、オプションを示しています。こうしたアクセサリやオプションは、プローブの種類や機種によってさまざまです。

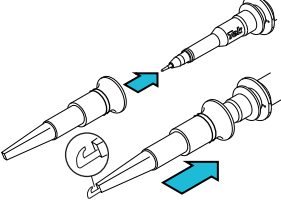
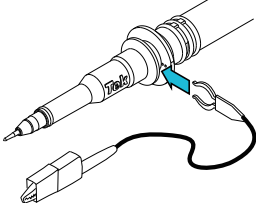
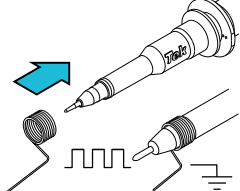
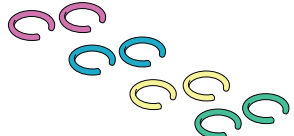
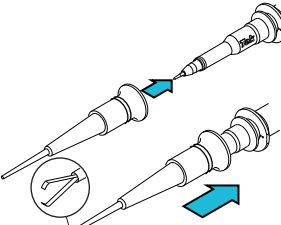
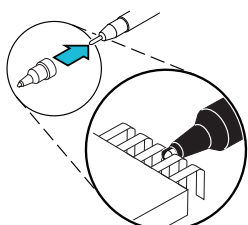
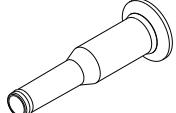
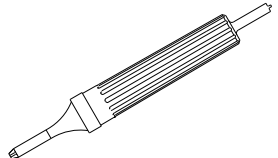
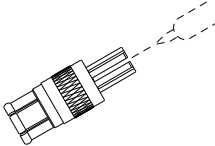
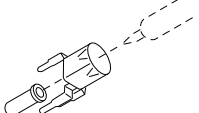
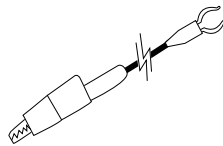
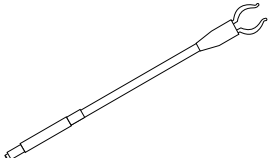
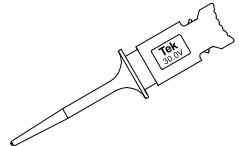
<p>フックチップ</p> <p>通常、プローブに付属しています。信号を導線、テスト・ポイントに接続するために使用します。</p> 	<p>ワニ口グランド・リード (15cm)</p> <p>通常、プローブに付属しており、プローブ本体に取付けます。汎用的なプロービングで使用します。</p> 	<p>グランド・スプリング</p> <p>プローブに付属している場合があります。グランド経路のインダクタンスによるアブレーションを抑えるために使用します。バネを曲げてグランド接続近くに届かせます。</p> <p>⚠ 30V_{RMS} を超える回路では使用できません。</p> 	<p>カラー・バンド</p> <p>プローブに取付けることで識別が容易になります。プローブ・チップの近くと、オシロスコープ接続部近くに取付けます。</p> 
<p>マイクロ・フック・チップ</p> <p>細い導線、スルーホール・コンポーネントなどの接続に便利です。</p> 	<p>ユニバーサルICキャップ</p> <p>フック・チップを外し、プローブ・チップのグランドされた部分を覆い、先端だけ露出させることで、ICピンとの短絡を防ぐことができます。</p> 	<p>インスレータ・スリーブ</p> <p>このスリーブはプローブに付属しています。プローブ針の上からねじ込むことで、カートリッジ部のグランド・パレルを絶縁します。</p> 	<p>調整用ドライバ</p> <p>マニュアルでのプローブ補正が必要な場合に使用します。</p> 
<p>プローブ針</p> <p>プローブに組み込まれています。ハイエンドの受動プローブでは、交換可能なものがあります。プローブによってはスプリングの付いたボゴ・ピン、または高周波対応のMMCXコネクタのオプションもあります。</p> 	<p>BNC - チップ・アダプタ</p> <p>プローブ・チップとBNCコネクタの接続を可能にします。同軸ケーブルの代わりにプローブを使用することで、高出力インピーダンス信号への負荷が軽減できます。</p> 	<p>基板テスト・ポイント/PCBアダプタ</p> <p>回路基板上に高忠実度のテスト・ポイントとして取付けるように設計されています。プローブ・チップのPCBへの接続が確実に行えます。</p> 	
<p>ワニ口グランド・リード (30cm)</p> <p>グランドの距離を長くとれますが、増加するインダクタンスによって高周波の信号、トランジションではアブレーションの原因になります。</p> 	<p>15cmクリップ式グランド・リード</p> <p>0.64mm (0.025inch) スクエア・ピンを持ったアクセサリまたはテスト・ポイントで使用します。</p> 	<p>MicroCKTテスト・チップ (グラバ・クリップ)</p> <p>細い導線、ICピンなどとの接続で使用します。0.61mm (0.024inch) スクエア・ピンが接続できる端子が2つあります。</p> 	

図3.17.10 : 1受動プローブで利用可能な豊富なアクセサリの例。アクセサリの互換性は、プローブ機械的設計によって異なる。詳細については、プローブのマニュアルを参照のこと。

第4章 プローブ選択ガイド

この章では、プローブの機能、プローブの種類、測定に及ぼす影響などについて説明します。そのほとんどの項目で、プローブをテスト・ポイントに接続したときにどのようなことが起こるのかを中心に説明します。また、信号源に焦点を当て、適切なプローブを選択するために信号源の属性をどのように読み替えるかということについて説明します。

オシロスコープに信号を最も正しく伝えるためのプローブを選択する、というのが常に目標となります。しかし、そこで終わりになるわけではありません。プローブ選択においても、オシロスコープで考慮すべき要件があります。

まずは、プローブ選択要件において、信号源で理解すべき項目から説明します。

適切なプローブの選択

オシロスコープ測定のアプリケーションやニーズは多岐にわたり、それに合わせてさまざまなオシロスコープ・プローブが市販されています。そのため、どのようなプローブを選んだらよいかわからない、という問題も起きてきます。

そのような場合、オシロスコープ・メーカーが推奨するプローブを参考にすれば、混乱せずに、的を絞ったプローブ選択ができます。オシロスコープの機種が異なれば設計上の周波数帯域や立上り時間、感度、入力インピーダンスなども異なります。オシロスコープの測定能力をフルに引き出すには、そのオシロスコープの設計に適合したプローブが必要です。

また、プローブを選ぶ過程では、「何を測定するのか、電圧か、電流か、あるいは光信号か」といった測定のニーズについても検討する必要があります。信号の種類に合ったプローブを選ぶことで、変換を要しないで測定結果を得ることができます。

さらに、「振幅は、オシロスコープのダイナミック・レンジ内か?」といった、測定する信号の振幅についても検討する必要があります。振幅がオシロスコープのダイナミック・レンジ内でない場合は、ダイナミック・レンジを調整できるプローブを選ぶ必要があります。通常、このような場合は10:1、またはそれ以上の減衰比を持つプローブを使用します。

プローブ先端での周波数帯域／立上り時間が、測定しようとする信号の周波数／立上り時間を上回っていることを確認してください。注意しなければならないのは、非正弦波信号には、その信号の基本周波数をはるかに上回る、高調波成分が含まれているということです。例えば、100MHzの方形波の五次高周波を捉えるには、プローブ先端での周波数帯域が500MHzの測定システムが必要です。同様に、オシロスコープ・システムの立上り時間も、測定しようとする信号の立上り時間の3~5倍の速さが必要です。

また、プローブによって信号に負荷がかかる可能性があることも、常に考慮しておく必要があります。高抵抗、低容量のプローブを選択してください。ほとんどのアプリケーションでは、抵抗が10MΩでキャパシタンスが20pF以下であれば、信号源負荷に対する備えとしては十分です。しかし、高速のデジタル回路では、先端での容量がさらに低いアクティブ・プローブが必要になる場合もあります。

そして、最後に忘れてはならないのは、プローブを回路につなぐことができなければ、測定はできないということです。回路に簡単に接続できるようにするため、特にプローブ・ヘッドのサイズ、アダプタの選択については十二分に検討する必要があります。

計測ニーズに合ったテクトロニクス社の推奨プローブの詳細については、当社Webサイト (tek.com/ja/probe-selector) をご覧ください。

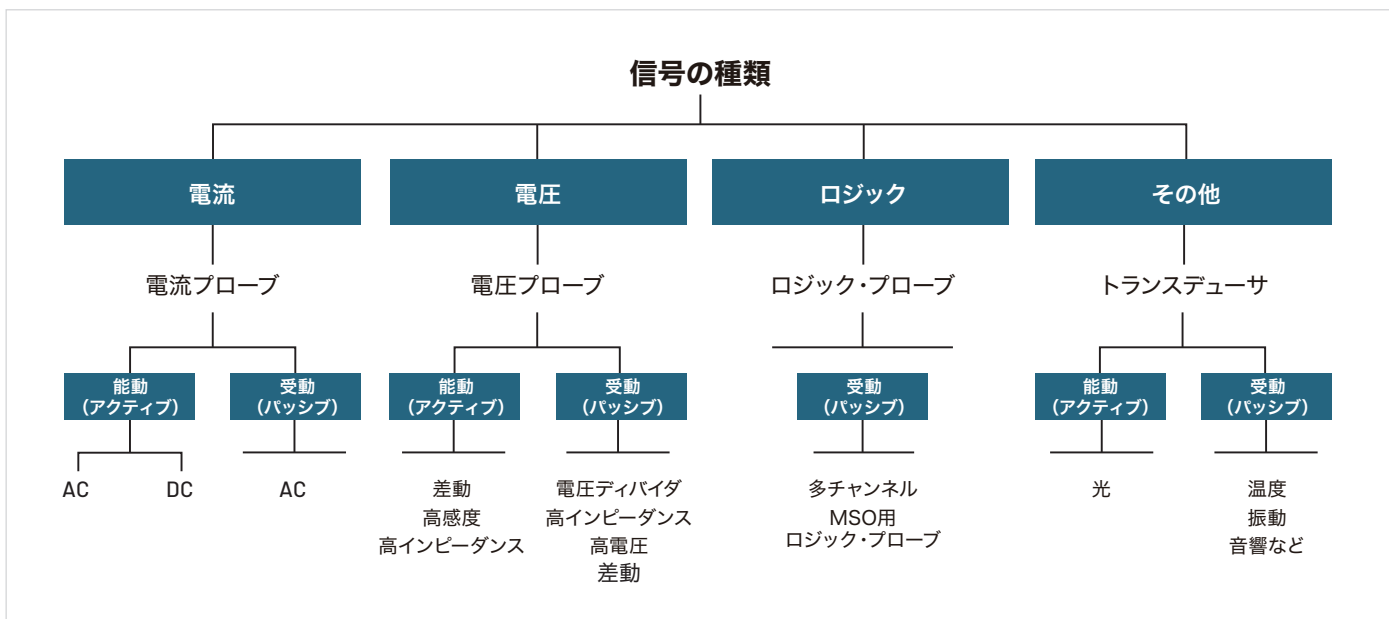


図4.1. 測定する信号の種類に基づいたプローブの分類

信号源について

プローブ選択では、信号源について考えるべき点が基本的に4つあります。信号の種類、信号周波数成分、ソース・インピーダンス、そしてテスト・ポイントの物理特性です。それぞれの問題について以下で説明します。

信号の種類

プローブ選択の第1のステップは、プロービングする信号の種類を明らかにすることです。この目的のため、信号を以下のように分類します。各ブロックは、次のいずれかで定義できます。

- 電圧信号
- 電流信号
- ロジック信号
- その他の信号

電圧信号は、電子機器の測定で最も多い種類の信号です。そのため、プローブで最も多く使用されているのが電圧プローブです。また、オシロスコープは入力端子から電圧信号を取入れる必要があるため、それ以外の種類のプローブは、検出した現象を相当する信号に変換するトランスデューサの働きをします。その一般的なものとして、電流プローブは電流信号を電圧信号に変換してオシロスコープで表示できるようにします。

ロジック信号は、特殊なカテゴリの電圧信号です。MSO(ミックスド・シグナル・オシロスコープ)用のロジック・プローブは、入力信号と、設定可能な電圧スレッシュホールドを比較することでロジック・レベルを決定します。その結果はハイ、ローのレベルとしてMSOに表示されます。また、特定のバイナリの組み合わせでのトリガにも使用されます。

電圧信号、電流信号、ロジック信号の他にも、興味深い信号が数多くあります。光、機械、熱、音響、あるいはその他の信号源から得られる信号です。さまざまなトランスデューサを使用することで、信号を電圧信号に変換し、オシロスコープで表示、測定することができます。

図4.1は、測定する信号の種類に基づいてプローブを分類し、図式化したものです。分類ごとに、信号の特性やオシロスコープの要件などによってさらに細分化されています。

信号周波数成分

どんな信号であれ、すべての信号は周波数成分を持っています。DC信号の周波数は0Hzであり、純粋な正弦波の信号周波数はその正弦波周期の逆数です。それ以外のすべての信号には複数の周波数成分が含まれており、その値は信号の形によって決まります。例えば、対称方形波には、その方形波周期の逆数である基本周波数 (f_0) と、基本波の奇数倍 ($3f_0$ 、 $5f_0$ 、 $7f_0$...) の高調波が含まれています。基本波は波形のいわば基礎部分であり、高調波が組み合わさることで、波形の遷移や角のような細部の構造が加わります。

十分な信号忠実度を維持しながら、信号をオシロスコープへ導くには、その信号の主要な周波数成分を極力乱さずに通過させるだけの十分な周波数帯域がプローブには必要になります。方形波やその他の繰り返し信号では、プローブの周波数帯域は信号の基本周波数よりも3~5倍高いことが求められます。この周波数帯域があれば、基本波と二次、三次くらいまでの高調波は、それほど減衰することなく通過できます。さらに上の高調波も通過しますが、プローブの3dB周波数帯域ポイントを超えているため、高くなるほど減衰も大きくなります。しかし、そうした高周波もある程度までは残っているため、少しは波形の形として残ります。

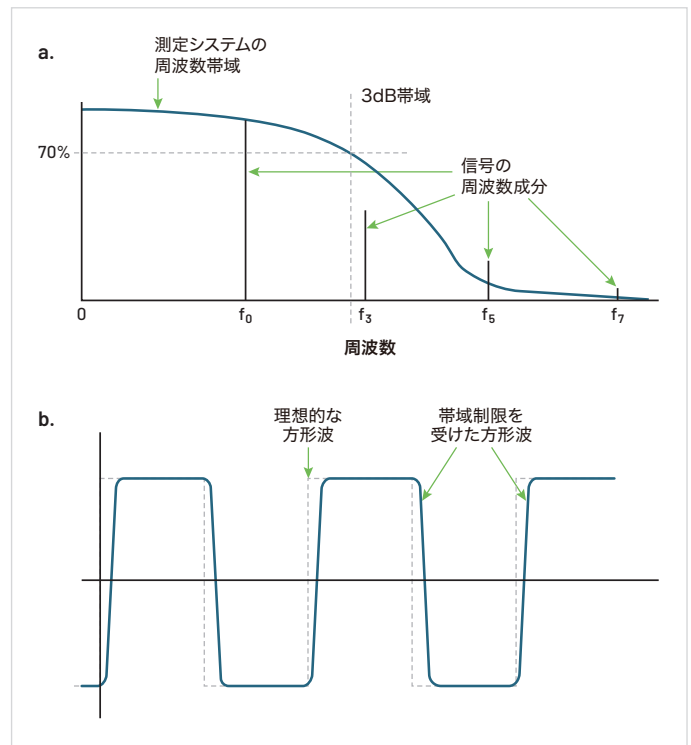


図4.2. 信号の主要な周波数成分が測定システムの周波数帯域より高いと (a)、減衰の度合いが大きくなる。その結果、角が丸くなったり、遷移が緩やかになるなどして、波形の細部情報が失われる (b)。

周波数帯域の制限による影響で最も重要なのは、信号の振幅が低下することです。信号の基本周波数がプローブの3dB周波数帯域に近くなるほど、プローブを通過する信号の振幅は低下します。3dBポイントでは、振幅の低下は30%になります。また、プローブの周波数帯域を上回る高周波、信号周波数成分では、減衰の程度はさらに大きくなります。こうした高周波成分の減衰が大きくなると、とがった角が丸みを帯びたり、急峻な立上り部が緩やかになったりします (図4.2参照)。

また、プローブ入力容量によっても信号の立上り時間が制限されることがあります。これは信号源インピーダンスや信号源負荷に関係しており、次のページで説明します。

信号源のインピーダンス

ソース・インピーダンスに関する要点を以下に示します。

1. プローブ・インピーダンスは、ソース・インピーダンスと一緒に新たな信号負荷インピーダンスを生成し、信号の振幅や立上り時間に影響を及ぼします。
2. プローブのインピーダンスがソース・インピーダンスよりもはるかに大きい場合、信号振幅に対するプローブの影響は無視できます。
3. プローブ先端の容量は入力容量とも呼ばれ、信号の立上り時間を長くする作用があります。原因は、プローブの入力容量が10%から90%まで充電されるのに要する時間によるもので、次のような関係があります。

$$tr = 2.2 \times R_{source} \times C_{probe}$$

RC積分ネットワークは、常に2.2RCの10~90%の立上り時間を生成します。これは、キャパシタの普遍的な時定数曲線から導かれます。2.2という値は、CがRを通してパルスの10%の値から90%の振幅値まで充電するのに必要な、RC時定数です。

以上の点から、信号源に及ぼすプローブ負荷を最小限に抑えるには、高インピーダンス、低容量のプローブが最適であることがわかります。また、可能な限り低インピーダンスの信号テスト・ポイントを選ぶことで、プローブ負荷の影響をさらに低く抑えることができます。信号源のインピーダンスとプローブのインピーダンスとの相互作用の影響については、「[多様なニーズに対応した豊富なプローブ](#)」の項を参照してください。

物理的接続に関する検討事項

テスト・ポイントの位置や形状も、プローブを選ぶ際の重要な検討項目になります。プローブをテスト・ポイントに当てるだけで、オシロスコープで信号を観察できる場合もあれば、プローブをテスト・ポイントにつないだまま、回路の調整をしながら信号をモニタリングする場合があります。前者には、ニードル型のプローブ・チップが適しており、後者にはフック状のチップが必要になります。

テスト・ポイントのサイズも、プローブの選択に影響を与えます。コネクタ・ピン、抵抗のリード線、バック・プレーンなどのプロービングには、標準サイズのプローブやアクセサリがよいでしょう。しかし、表面実装回路のプロービングには、表面実装アプリケーション向けのアクセサリを備えた小型のプローブをお奨めします。

最新のプローブには、MMCXコネクタを備えたものがあります。このコネクタは、一時的または恒久的なテスト・ポイントとして、回路基板にはんだ付けします。グランド・リードの長さを最小限に抑え、被測定デバイスのすぐそばまでシールドすることで、高い信号忠実度を維持することができます。MMCXコネクタを備えたプローブの適用例を図4.3に示します。

重要なことは、アプリケーションに最適なプローブ・サイズ、形状、アクセサリを選ぶことです。それにより、プローブをテスト・ポイントに迅速かつ容易にしっかりと接続でき、信頼性の高い測定値が得られます。

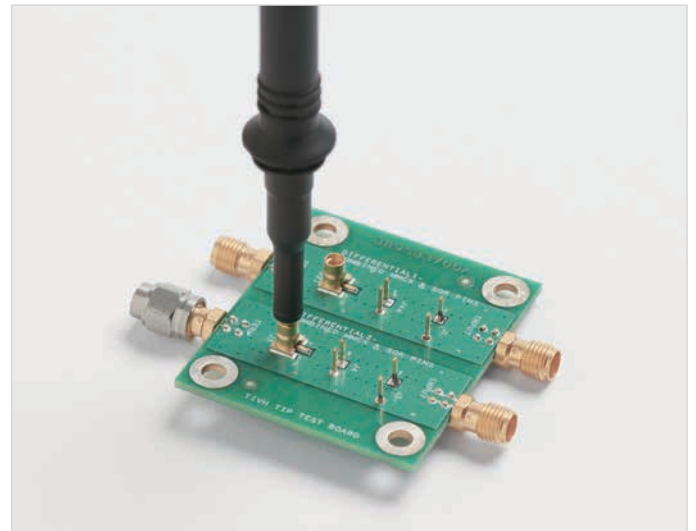


図4.3. MMCXカートリッジを備えたTPP1000型1GHzプローブを、回路基板に埋め込まれたMMCXコネクタに直接接続した例。

オシロスコープに関連する要件

オシロスコープの要件は、信号源の問題と同様にプローブの選択にも関係してきます。プローブとオシロスコープが適合していない場合、プローブのオシロスコープ端で信号忠実度が損なわれます。

周波数帯域と立上り時間

オシロスコープとプローブは、1つの測定システムとして連携して働きます。したがって、オシロスコープの周波数帯域と立上り時間の仕様は、プローブと同じかそれ以上であり、検査する信号に対しても十分なものである必要があります。

プローブ、オシロスコープ間における周波数帯域、立上り時間の関係は複雑です。そのため、オシロスコープ・メーカーの多くは、特定のオシロスコープに合わせて設計された標準プローブを定め、周波数帯域や立上り時間を規定しています。信号に対して、システムとしての十分な周波数帯域と立上り時間を確保するのに最も有効なのは、メーカーが推奨するプローブを選ぶことです。

入力抵抗と入力容量

すべてのオシロスコープには、入力抵抗と入力容量があります。信号伝送を最大限に高めるには、オシロスコープ入力のRとC、プローブの出力によるRとCが、次のように一致する必要があります。

$$R_{\text{scope}}C_{\text{scope}} = R_{\text{probe}}C_{\text{probe}} = \text{最適な信号伝送}$$

具体的には、50Ωのオシロスコープ入力には50Ωのプローブが必要であり、1MΩのオシロスコープ入力には、1MΩのプローブが必要だということです。適切な50Ωアダプタがあれば、1MΩのオシロスコープと50Ωのプローブを組み合わせることもできます。

プローブとオシロスコープの容量も一致しなければなりません。そのためには、オシロスコープの機種に合せて設計されたプローブを選ぶようにします。また、多くのプローブは、容量のわずかなばらつきを補正して厳密に一致させるための調整機能を備えています。プローブをオシロスコープに接続する場合、最初にすべきことはプローブ補正です。プローブを正しく選択し、補正することによってプローブをオシロスコープに正しく適合させないと、測定に大きな誤差が生じる可能性があります。

感度

オシロスコープの垂直軸感度範囲によって、信号振幅測定における全体のダイナミック・レンジが決まります。例えば、垂直表示範囲が10div（目盛）で、感度範囲が1mV/div～10V/divのオシロスコープでは、実際のダイナミック・レンジはおおよそ0.1mV～100Vになります。測定しようとする信号の振幅が0.05mV～150Vの範囲だとすると、このオシロスコープでは上限・下限ともカバーできません。しかし、扱う信号に合わせて適切なプローブを選択することでこれを補うことができます。

振幅の大きな信号には、減衰プローブを使用することで、オシロスコープのダイナミック・レンジを高い方へ拡大することができます。

例えば10：1プローブでは、オシロスコープの感度範囲の高い方を実質的に10倍シフトさせるため、上記の例であれば10mV/div～100V/divになります。これは150Vの信号を測定するのに十分な感度範囲であり、その上、最大で1000Vの表示範囲を得られることとなります。ただし、プローブを信号に接続する際は、信号がプローブの最大入力電圧を超えていないことを確認してください。

注意

プローブの最大入力電圧仕様は必ず守ってください。この限度を超える電圧をプローブに印加すると、人体に危害が及んだり、機器が損傷したりするおそれがあります。

小振幅信号に対しては、プローブ増幅器システムを使用することで、オシロスコープのダイナミック・レンジを低い方へ拡大することができます。一般に使用されるのは差動増幅器で、例えば10μV/divの感度を得ることも可能です。

こうしたプローブ増幅器システムは、オシロスコープの特定の機種専用設計されています。このため、オシロスコープを選択する際には、メーカーの推奨アクセサリ・リストで、小信号アプリケーションの要件を満たす差動増幅器があることを確認する必要があります。

注意

差動プローブには、デリケートなコンポーネントが含まれていることが多く、静電気放電などの過電圧の影響で損傷することがあります。プローブ・システムの損傷を防ぐため、必ずメーカーの指示に従い、安全予防措置を遵守してください。

リードアウト機能

最新のオシロスコープは、垂直軸／水平軸感度のリードアウト（V/div、s/div）を画面上に表示できるようになっているものがほとんどです。また、プローブ認識やリードアウト処理によって、使用するプローブがリードアウトに正しく反映されるようになっています。例えば、10：1プローブを使用する場合、垂直軸リードアウトは10：1の減衰比に変更されてオシロスコープに正しく反映されます。電流プローブを使用する場合は、垂直軸リードアウトがV/divからA/divになり、適切な測定単位が反映されます。

新世代のプローブは、プローブとオシロスコープ間の双方向通信に対応しています。例えば、TekVPIプローブ・インターフェースは双方向の通信機能を備えています。オシロスコープに適切なスケール情報を提供するだけでなく、プローブからオシロスコープへのエラー状態の伝達も可能です。スケール、オフセットは、オシロスコープの前面パネルから設定できます。プローブの補正、デスキューなども、前面パネルから実行できます。

こうしたリードアウト機能を活用するためには、オシロスコープのリードアウト・システムに適したプローブを使用する必要があります。そして、特定のオシロスコープ、組み合わせて使用するプローブの取扱いについても、メーカーの指示に従う必要があります。特に、最新のオシロスコープであるほど、高度なリードアウト機能を備えており、完全に対応できない汎用プローブが多いことにご注意ください。

適切なプローブの選択

これまで述べてきた信号源やオシロスコープについてのさまざまな問題から考えても、何らかの手助けがなければ、適切なプローブの選択が面倒な作業になってしまうのは明らかです。実際、プローブの立上り時間やオシロスコープの入力容量などの重要な選択基準が必ずしも規定されているとは限らないため、どれにすべきか迷ってしまうこともあります。

これを避けるには、推奨アクセサリ・リストにプローブの選択肢が豊富にあるオシロスコープを選ぶのが最も有効です。また、新たな測定要件が生じた場合は、ご使用のオシロスコープの機能を拡張できるプローブが新たに発売されていないか、オシロスコープのメーカーに確認するようにしてください。

最後に、あらゆるアプリケーションに使用できるような「適切な」プローブは存在しないということも覚えておいてください。存在するのは、オシロスコープとプローブの「適切な」組み合わせのみであり、信号測定の要件を以下の面から明確にすることが、適切な選択の第一歩です。

- 信号の種類 (電圧、電流、光、その他)
- 信号の周波数成分 (周波数帯域)
- 信号の立上り時間
- ソース・インピーダンス (R、C)
- 信号振幅 (最大値、最小値)
- テスト・ポイントの形状 (足付の部品、表面実装、その他)

以上について検討し、それぞれのアプリケーション固有の情報を加えていけば、さまざまなニーズを満たす上で、必要なオシロスコープと、それに適合する各種プローブを選択することができます。

第5章 プローブが測定に及ぼす影響

オシロスコープに信号を表示するには、信号の一部をオシロスコープの入力回路へ分流させる必要があります。図5.1では、テスト・ポイント TP の背後にある回路を信号源 E_s と表しており、関連する回路インピーダンス Z_{S1} と Z_{S2} が通常の E_s の負荷です。オシロスコープをテスト・ポイントにつなぐと、プローブ・インピーダンス Z_p とオシロスコープ入力インピーダンス Z_i が信号源の負荷に加わります。

プローブ、オシロスコープをテスト・ポイントにつなぐことによる影響は、負荷と信号源のインピーダンスの相対値によって異なります。

本章では、負荷の影響と、プロービングによるその他の影響について詳しく説明します。

ソース・インピーダンスの影響

ソース・インピーダンスの値は、プローブ負荷の実質的な効果に大きく影響します。例えば、ソース・インピーダンスが低いと、一般的な高いインピーダンス 10 : 1 プローブによる影響はほとんどありま

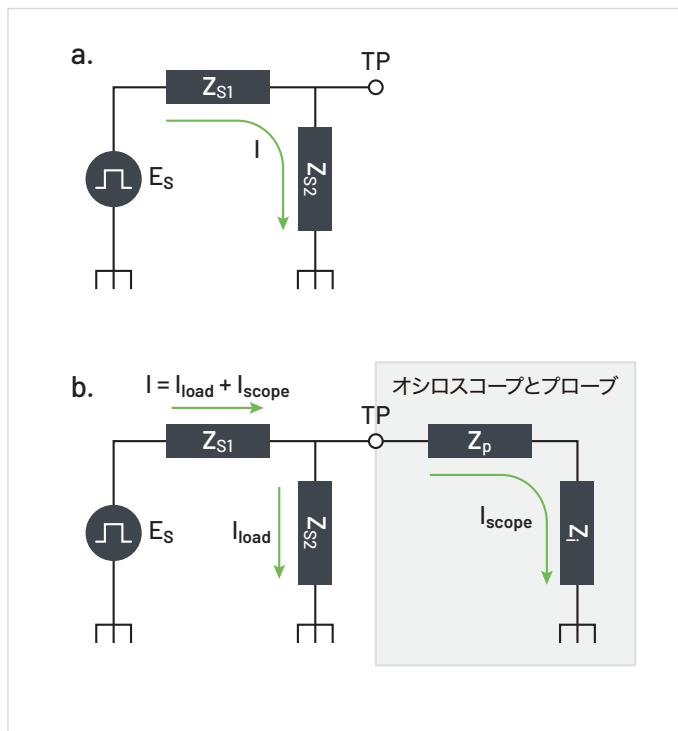


図5.1. テスト・ポイント (TP) の信号振幅は、ソースにかかる負荷インピーダンスの分圧によって決まる (a)。テスト・ポイントにプロービングすると、プローブとオシロスコープのインピーダンスにソース負荷が加わり、プローブとオシロスコープへも電流が流れる (b)。

せん。これは、高いインピーダンスが低いインピーダンスに並列に加わった場合は、トータル・インピーダンスにはほとんど変化が現れないからです。

しかし、ソース・インピーダンスが高いと、状況は劇的に変わります。例えば、図5.1の各ソース・インピーダンスの値が等しく、その値がプローブとオシロスコープのインピーダンスの合計に等しいというケースを考えてみます。この状況を図5.2に示します。

Z の値が同じであるため、プローブとオシロスコープがテスト・ポイントに接続されていない状態で、信号源にかかる総負荷は $2Z$ になります (図5.2a参照)。その結果、プロービング前のテスト・ポイントの信号振幅は $0.5E_s$ になります。しかし、プローブとオシロスコープをつなぐと (図5.2b)、信号源にかかる総負荷は $1.5Z$ になり、テスト・ポイントの信号振幅はプロービング前の3分の2まで下ります。

後者の場合、プロービングによるインピーダンス負荷の影響を低減するためのアプローチは2つ考えられます。1つ目は、さらにインピーダンスの高いプローブを使用することです。2つ目は、回路上のインピーダンスがより低いテスト・ポイントでプロービングすることです。例えば、カソード、エミッタ、ソースなどは、プレート、コレクタ、ドレインよりもインピーダンスが低いのが普通です。

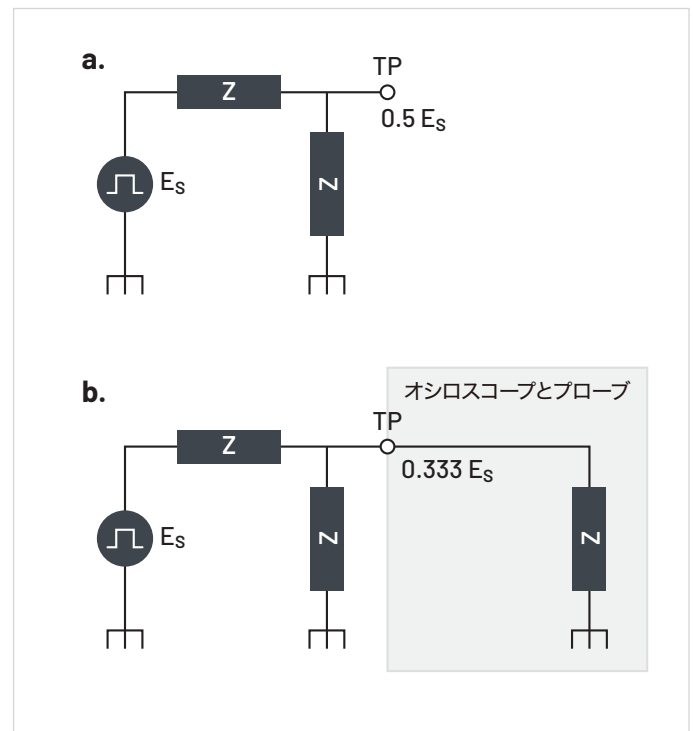


図5.2. ソース・インピーダンスが高いほど、プロービングによる負荷も大きくなる。このケースでは、インピーダンスはすべて等しく、プロービングによってテスト・ポイントの信号振幅が30%以上も減少する。

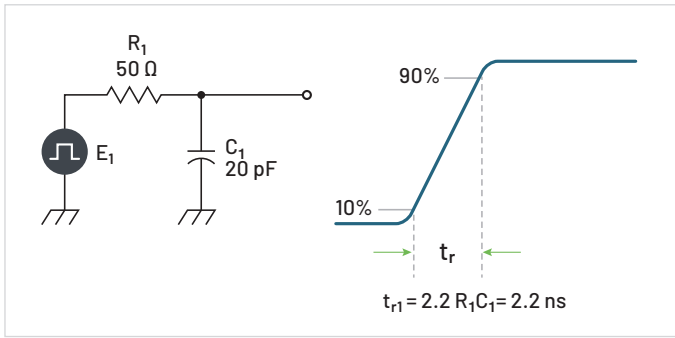


図5.3. パルス・ジェネレータの立上り時間はRC負荷によって決まる。

容量負荷

信号の周波数、つまり遷移速度が上ると、インピーダンスの容量成分が支配的になります。これにより、容量負荷の問題が重要になってきます。容量負荷は特に、急速に遷移する波形の立上り/立下り時間、波形に含まれる高周波成分の振幅に対して影響を及ぼします。

立上り時間に対する影響

容量負荷を考えるにあたって、立上り時間が非常に高速なパルス・ジェネレータを考えてみます。図5.3において、理想のジェネレータでは、出力パルスの立上り時間はゼロ ($t_r = 0$) になります。しかし、ソース・インピーダンス負荷の抵抗 (R) とキャパシタンス (C) を組み合わせると、ゼロではなくなります。

抵抗とキャパシタンス (RC) で構成された回路網では、10~90%の立上り時間は常に $2.2RC$ となります。これは、コンデンサの普遍的な時定数曲線から導かれます。2.2という値は、CがRを通してパルスの10%の値から90%の振幅値まで充電するのに必要な、RC時定数です。

図5.3の場合、ソース・インピーダンスの 50Ω と 20pF によって、パルスの立上り時間は 2.2ns になります。パルスの立上り時間は、この $2.2RC$ よりも速くはなれません。

パルス・ジェネレータの出力をプロービングする場合、プローブの入力容量と抵抗が、パルス・ジェネレータの入力容量と抵抗に加わります。図5.4では、一般的なプローブの $10\text{M}\Omega$ と 11pF が加わっています。プローブの負荷 $10\text{M}\Omega$ は、ジェネレータの負荷 50Ω よりもはるかに大きいため、無視できます。しかし、プローブの容量は負荷容量と並列であり、じかに加算されるため、負荷容量の合計は 31pF になります。これにより $2.2RC$ の値が大きくなり、プロービング以前 2.2ns だった立上り時間の測定値が 3.4ns になります。

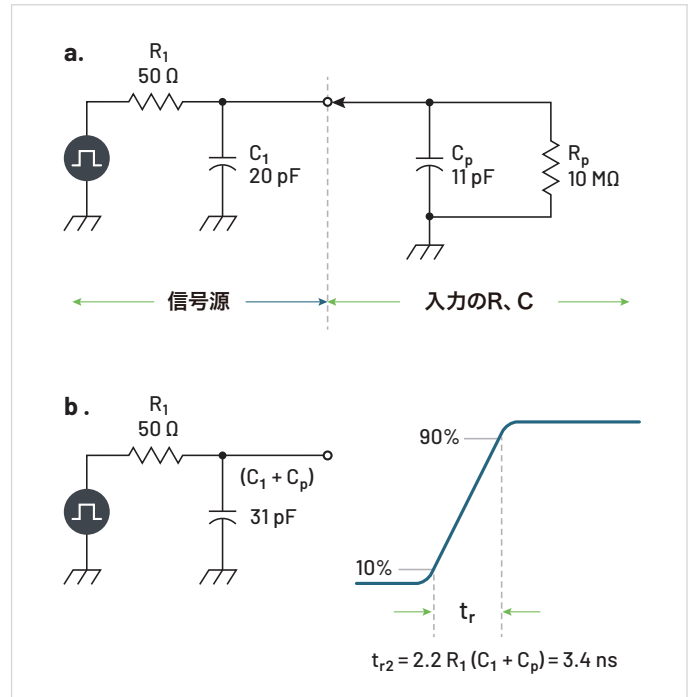


図5.4. プローブのキャパシタンスが加わると、RCの値が増大し、立上り時間の測定値も大きくなる。

立上り時間に対するプローブの入力容量の影響は、プローブの入力容量の仕様と、ソース・キャパシタンス (既知または推定) の比率から推定できます。図5.4の値を使うと、立上り時間のおおよその変化 (%) は次のようになります。

$$\frac{C_{\text{probe tip}}}{C1} \times 100\% = \frac{11 \text{ pF}}{20 \text{ pF}} \times 100\% = 55\%$$

この式からもわかるように、特にプローブの入力容量の影響により、どのようなプローブを選ぶかによって立上り時間の測定に対する影響が異なってきます。受動プローブでは、一般的に減衰比が大きいほどチップの容量は小さくなります。表5.1では、減衰比の異なる受動プローブごとに容量が示されています。

プローブ	減衰比	チップ容量
P6101B型	1 : 1	100 pF
TPP0100型	10 : 1	12 pF
TPP0500B型	10 : 1	3.9 pF

表5.1. プローブ・チップの容量

プローブ・チップの容量を小さくする必要がある場合は、アクティブFET入力用のプローブを使用します。アクティブ・プローブであれば、機種によってはチップ容量が 1pF 以下のものもあります。

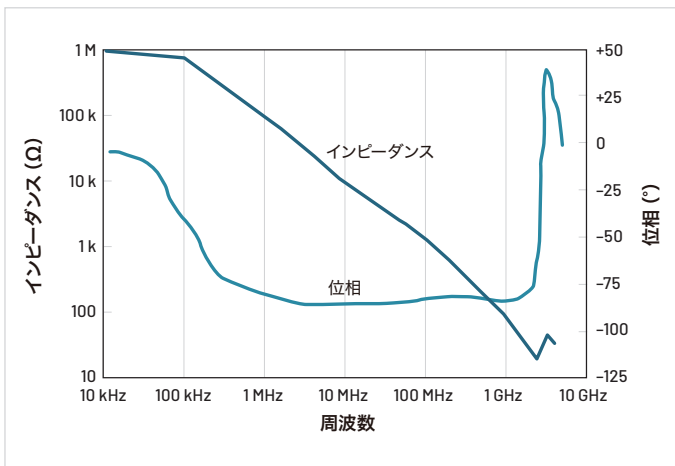


図5.5. アクティブ・プローブの代表的なインピーダンスと周波数の関係

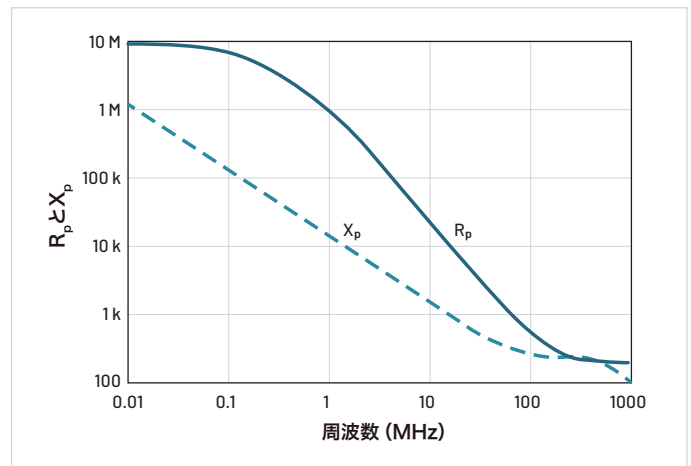


図5.6. 一般的な10MΩ受動プローブにおける、周波数に対するXpとRp

振幅と位相に対する影響

容量負荷は、立上り時間だけでなく、波形に含まれる高周波成分の振幅や位相にも影響します。ここで重要なのは、すべての波形は高次の正弦波成分で構成されているということです。50MHzの方形波には、100MHzをはるかに超える高周波成分が含まれています。したがって、波形の基本周波数だけでなく、基本波の何倍もの周波数における負荷の影響を考慮する必要があります。

負荷は、プローブ・チップの総インピーダンスによって決まります。これはZpと表され、Zpは抵抗成分Rpとリアクタンス成分Xpから成ります。容量負荷を一部相殺するため、誘導素子をプローブに意識的に組み入れることもあります。リアクタンス成分は主に容量負荷です。

基本的に、Zpは周波数の上昇とともに低下します。ほとんどのプローブのユーザ・マニュアルでは、プローブのRpとZpの、周波数に対する曲線が示されています。図5.5は、代表的なアクティブ・プローブにおける曲線の例です。1MΩのインピーダンスは、100kHz近くまでは落ち始めません。これは、プローブの抵抗素子R、容量素子C、誘導素子Lが綿密に設計されているためです。

図5.6は別のプローブ曲線の例です。この例では、一般的な10MΩ受動プローブでの、周波数に対するRpとXpが示されています。点線(Xp)は、周波数に対する容量キャパシタンスを示しています。XpはDCか

ら低下し始めていますが、Rpが大きく減衰し始めるのは100kHzからです。(理論上、抵抗はロール・オフしませんが、Rpのような現実の抵抗には抵抗と並列に寄生容量があります。このため、高い周波数ではRpはキャパシタのように見えます)。

ここでも、素子R、C、Lを綿密に設計することで、全体の負荷が低い周波数から小さくなり始めるのを防いでいます。

プローブのインピーダンス曲線がない場合は、以下の公式によって負荷を概算することができます。

$$X_p = \frac{1}{j\omega C}$$

ここで、

Xp = 容量リアクタンス

ω = 角周波数

C = プローブ・チップの容量

例えば、チップ容量が11pFの標準的な10MΩ受動プローブの場合、容量リアクタンス(Xp)は、50MHzで約290Ωです。ソース・インピーダンスによっては、この負荷が信号振幅に対して(単純なディバイダ効果によって)重大な影響を及ぼし、場合によってはプロービングする回路の動作にまで影響を及ぼすおそれもあります。

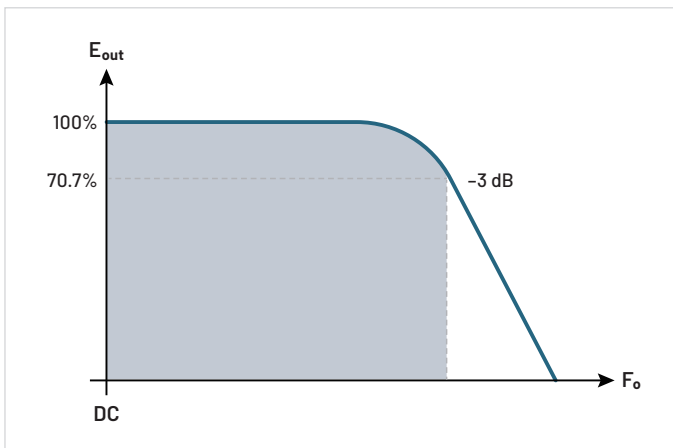


図5.7. 周波数帯域は、応答曲線において振幅が3dB低下した時の周波数であると定義されている。

周波数帯域に関する検討事項

測定システムの周波数帯域の問題は、プローブとオシロスコープの両方の周波数帯域について考える必要があります。オシロスコープの周波数帯域は、被測定信号に含まれる最も高い周波数成分よりも高くなるようにし、プローブの周波数は、オシロスコープの周波数と同じか、それ以上になるようにします。

測定システムの面から見て特に重要なのは、プローブ先端における周波数帯域です。特定のオシロスコープとプローブの組み合わせにおけるプローブ先端の周波数帯域が、メーカーによって規定されていることもよくありますが、常にそうであるとは限りません。このため、オシロスコープとプローブを組み合わせて規定されている場合と、そうでない場合の両方で周波数帯域に関する基本的な問題を認識しておく必要があります。

オシロスコープの周波数帯域

周波数帯域は、振幅対周波数のプロット上で、測定システムが基準レベルから3dB低下したときの周波数として定義されています。図5.7では、周波数応答曲線に3dBポイントを示しています。この曲線は、ガウシアン応答を持ったオシロスコープのもので、 -20dB/decade でロール・オフしています。この応答曲線は、周波数帯域1GHz未満の汎用オシロスコープに一般的なものです。この入門書におけるディレーティングは、このクラスのオシロスコープに適用されます。より広帯域のオシロスコープでは、より急峻なロール・オフ特性を持った入力フィルタを備えていることがあり、そのようなオシロスコープではディレーティングはさほど重要ではありません。

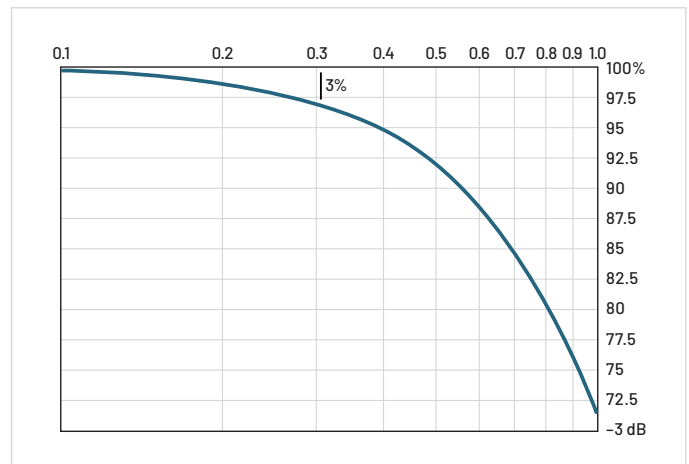


図5.8. 周波数ディレーティング曲線。汎用オシロスコープでy%の振幅精度を得るには、オシロスコープの周波数帯域幅に、そのy%に対応するxの値を掛ける。

重要なのは、定格周波数帯域における測定システムの振幅は3dB下がっているということです。つまり、周波数帯域の限界域では、振幅測定に30%の誤差が予想されるということです。

通常、オシロスコープを周波数帯域の限界域で使用することはありません。しかし、振幅精度が何よりも重視される場合には、オシロスコープの周波数帯域が高くなるにつれて精度が低下することに注意する必要があります。

図5.8のような周波数帯域ロール・オフの拡大図を例にして考えてみます。この図の横軸スケールは、30%以上の振幅精度が得られる範囲を示しています。ディレーティングがない場合の振幅(100%)と比較して、100MHzオシロスコープで100MHzの信号を測定した場合の誤差は最大で30%にもなります。振幅を3%以内で測定したい場合、このオシロスコープで測定する信号の周波数は0.3倍の30MHzにとどめる必要があります。30MHzを少しでも超えると、振幅の測定誤差も3%を超えます。

この例は、オシロスコープの選択における大まかな指針を示しています。振幅を3%以内の誤差で測定するには、周波数帯域の仕様が、測定する波形の最高周波数よりも3~5倍大きいオシロスコープを選ぶようにします。

主に立上り／立下り時間を測定する場合は、オシロスコープの周波数帯域 (BW) の仕様を、以下の公式によって立上り時間の仕様に変換します。

$$Tr \approx 0.35/BW$$

単位を付けると、以下のようになります。

$$Tr \text{ (nanoseconds)} \approx 350/BW \text{ (MHz)}$$

周波数帯域の場合と同様、立上り時間についても、測定しようとする立上り時間の最速値よりも3～5倍速いオシロスコープを選ぶようにします。(上記の式の係数0.35は、ガウシアン・ロール・オフを前提にしています。周波数帯域が1GHz未満のオシロスコープでは0.35を、周波数帯域が1GHzより広帯域のオシロスコープの場合は0.40～0.45とします。)

プローブの周波数帯域

他の電子回路と同じく、すべてのプローブにも必ず周波数帯域の制限があります。また、オシロスコープと同様に、周波数帯域によって製品のランクや機種が分けられています。したがって、周波数帯域100MHzのプローブでは、100MHzにおいて振幅応答が3dB低下します。

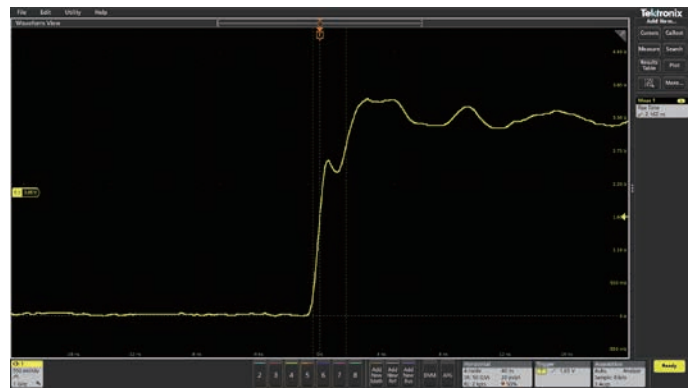
プローブでも、周波数帯域と立上り時間の関係を、オシロスコープで使用した公式 ($Tr \approx 0.35/BW$) を使って表すことができます。また、アクティブ・プローブでは、以下の公式によってオシロスコープとプローブの立上り時間を組み合わせ、プローブとオシロスコープのシステムとしてのおおよその立上り時間を求めることができます。

$$Tr_{system}^2 \approx Tr_{probe}^2 + Tr_{scope}^2$$

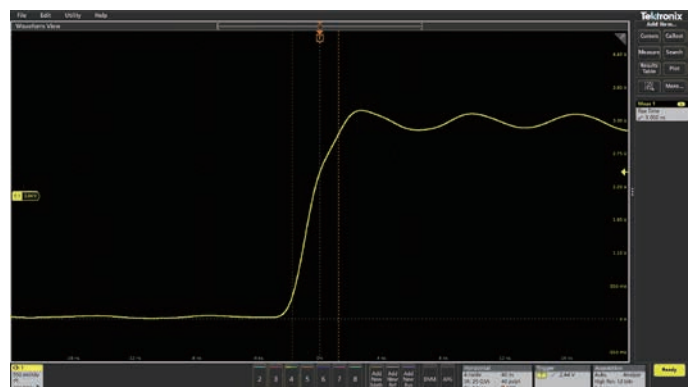
受動プローブでは、この公式を使用できないことがあります。

原則として、プローブの周波数帯域は、組み合わせて使用するオシロスコープの周波数帯域と同じか、それ以上になるようにします。プローブの周波数帯域のほうが低いと、オシロスコープが測定能力をフルに発揮できなくなります。図5.9では、周波数帯域の異なる3種類のプローブで同じパルス・エッジを測定した結果を示しています。

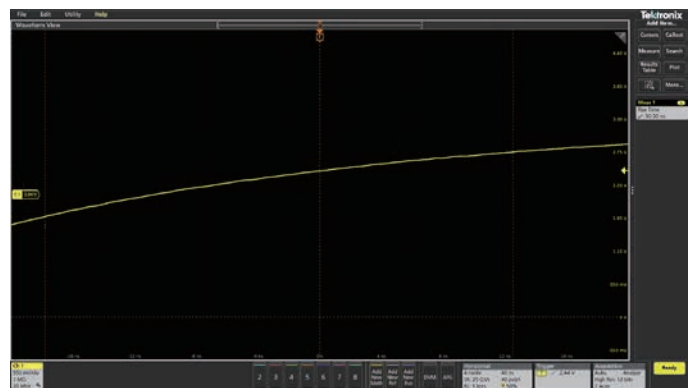
図5.9aは、10MΩの抵抗、3.9pFの容量を持った、10：1の1GHzプローブを使用して測定した例です。この測定では、パルスの立上り時間は2.162nsと測定されています。10GHzのオシロスコープ、1GHzのプローブの組み合わせによる400psの立上り時間レンジには十分に入っています。



a.



b.



c.

図5.9. 3種類の異なるプローブによる立上り時間測定：(a) 1GHz、10：1プローブ、(b) 200MHz、10：1プローブ、(c) 20MHz、1：1プローブ。すべての測定において、同じ10GHzのオシロスコープを使用。

次は、同じパルスを、同じオシロスコープを使用し、10：1、200MHzのプローブを使用します。その結果が図5.9bであり、立上り時間が3.002nsと測定されています。先の測定に比べて、30%近く長くなっています。

予想通り、周波数帯域の低いプローブでは、パルスの立上り時間が長くなっています。その極端な例が図5.9cであり、1:1、20MHzのプローブで同じパルスを測定しています。最初の測定による2.162nsから、30.20nsと長くなっています。

一言で言えば、「受動プローブは何でもよいわけではない」ということになります。

言いかえると、オシロスコープの性能を最大限に引出すため、そして投資に見合った性能を得るためには、必ずメーカーが推奨するプローブを使用してください。

プローブ先端の周波数帯域

プローブの周波数帯域や、それによって得られるプローブ - オシロスコープ・システムの周波数帯域の問題は、基本的にはメーカーの仕様や推奨にしたがうことで解決できると考えられます。例えばテクトロニクスでは、プローブが性能を満たすことができるようにプローブの周波数帯域を定めています。性能として、オシロスコープを含めたアベレーション、立上り時間、周波数帯域などが考慮されます。

また、テクトロニクスのプローブを、推奨するオシロスコープと組み合わせると、そのオシロスコープの周波数帯域がプローブ先端で得られます。例えば、テクトロニクスの100MHzプローブは、推奨する100MHzのオシロスコープと組合せて使用すると、プローブ先端で100MHzの性能(-3dB)を発揮します。

図5.10では、プローブ先端の周波数帯域を検証するために、業界認定テストの設定を等価回路を使って示しています。テスト信号源は、50Ωで終端する50Ωのソースと規定されているため、等価の25Ωのソース抵抗で表わされます。また、プローブはプローブ・チップ - BNCアダプタ、または同等品でソースに接続する必要があります。後者のプローブ接続アダプタを使用することで、接地経路が最短になり理想的な接続が可能となります。

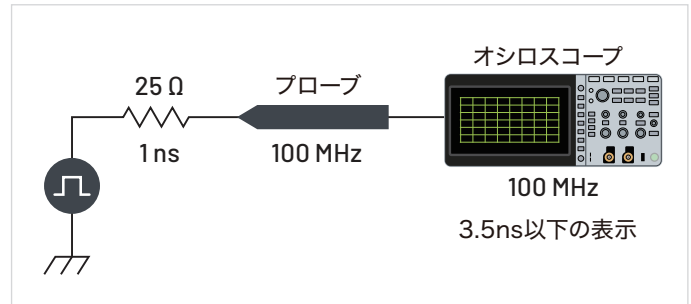


図5.10. プローブ・チップへの周波数帯域をテストするための等価回路。100MHzのオシロスコープと100MHzのプローブを組み合わせてもシステム帯域は100MHzとなり、表示される立上り時間は3.5ns以内になる。

上記の設定でテストすると、100MHzのオシロスコープ、プローブの組み合わせでは、立上り時間の測定値は3.5ns以下になります。3.5nsの立上り時間は、前述の周波数帯域/立上り時間の関係 ($T_r \approx 0.35/BW$) によれば、100MHzの周波数帯域に相当します。

プローブを標準アクセサリに加えている汎用オシロスコープ・メーカーの多くでは、提示したオシロスコープの周波数帯域がプローブ先端から得られることを保証しています。

ただし、プローブ先端の周波数帯域は、あくまで図5.10のテスト方法で判定されたものです。25Ωの信号源で発生する信号というのは現実にはまれであり、実際の使用、特に高インピーダンス回路を測定する場合には、最適の応答や周波数帯域より多少は劣ることが予想されます。

第6章 プローブ・グランドとグランド・リードの影響

対地測定を行う場合、測定対象となる回路またはデバイスに対して2つの接続が必要です。1つは、測定する電圧信号またはその他のパラメータへの接続です。もう1つが、オシロスコープを介して被測定回路に戻る接地帰線の接続です。この接地帰線は、測定電流の経路を完成させるのに必要です。

被測定回路とオシロスコープが同じグランド端子付電源コンセントに接続されている場合、電源回路のコモンが接地帰線になります。この場合、グランド・リードを接続しなくとも信号は観測できます。しかし、信号の電源グランド経由の帰線経路は直接的ではなく、距離も長くなります。そのため、クリーンでインダクタンスが低い接地帰線とはなり得ません。グランド接続はDUTでとるべきであり、プローブはそのような接続を想定して設計されています。

原則として、どのようなオシロスコープ測定を行う場合でも、接地経路を可能な限り短くするようにします。これにより、周波数応答におけるインダクタンスの影響を最小限に抑えることができ、ノイズの影響も抑えることが可能になります。この影響が、この章の主題となります。

まず疑ってみることがグランド・リード問題の最初の対処になります。オシロスコープに表示される信号にノイズや異常がないか、常に疑ってください。ノイズやアベレーションは信号の一部かもしれないし、測定処理の結果かもしれません。以下のセクションでは、グランドで問題となる症状、測定処理の一部であるかどうかを判断するためのガイドライン、測定への影響を軽減する方法に関するベスト・プラクティスについて説明します。

グランドのリード長と周波数応答

グランド・リードの長さは、プローブの周波数特性に影響し、リングングや立上り時間の遅れとなって現れます。

プローブであれ、回路内であれ、グランド経路にはインダクタンスがあり、そのインピーダンスは信号の周波数が高くなるにつれて高くなります。被測定デバイスに接続したプローブの等価回路を図6.1に示します。グランド・リードのインダクタンス(L)が確認できます。グランド・リードのインダクタンスは、リード長が長くなるにつれて増えます。

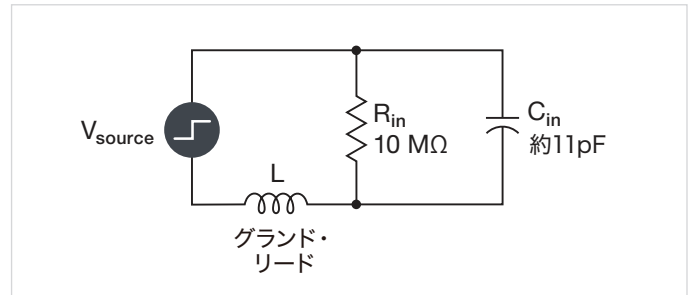


図6.1. DUTの電圧源に接続された一般的な受動プローブの等価回路。

グランド・リードのリアクタンス成分であるL、C_{in}は、減衰要因がR_{in}のみの直列共振回路を形成します。この直列共振回路にパルスが当たるとリングングが発生します。しかも、リングングだけでなく、過度に長いグランド・リードによってインダクタンスが高くなると、C_{in}への充電電流が制限され、パルスの立上り時間も制限されます。

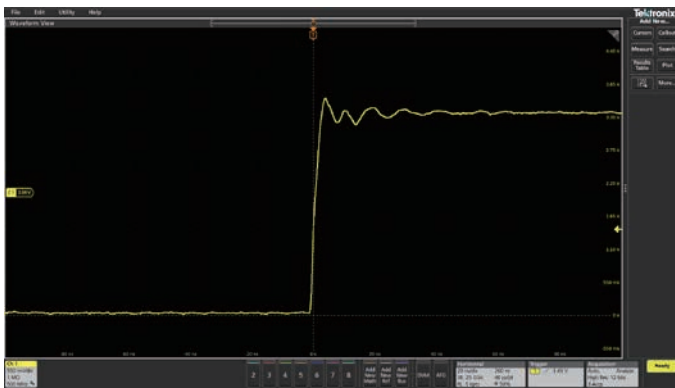
インダクタンスが低く抑えられれば、測定への影響も抑えられます。不十分なグランドによるリングング、その他のアベレーションは、以下の2つの条件があれば観測できます。

1. オシロスコープのシステム帯域幅は、プローブ先端で信号の高周波成分を観測するのに十分であること。
2. プローブ先端の入力信号は、リングング、アベレーションを発生するのに十分な高周波情報(高速の立上り時間)を含んでいること。

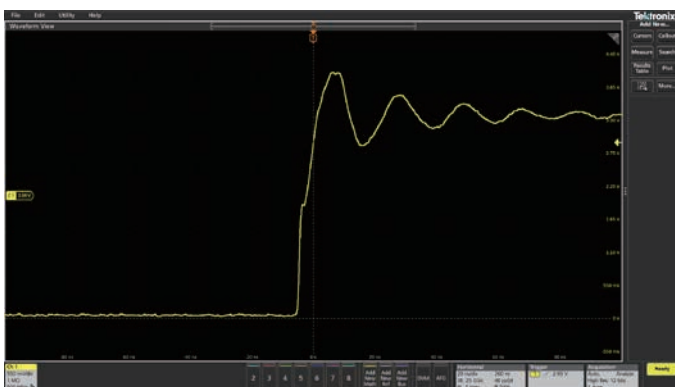
計算は省略しますが、グランド・リードが15cmの11pF受動プローブは、高速パルスにおいて約140MHzでリングングが発生します。100MHzのオシロスコープの場合、このリングング周波数はオシロスコープの周波数帯域を上回っているために観測できません。しかし高速のオシロスコープ(例えば200MHz)であれば、グランド・リードによるリングングの周波数はこのオシロスコープの周波数帯域内に十分入るため、パルスははっきりと表示されます。

グランド・リードによるリングングの様子を図6.2に示します。図6.2aでは、推奨されたオシロスコープとプローブの組み合わせで高速のパルス・エッジを捕らえています。使用しているグランド・リードは、標準的な16cmのプローブ・グランド・クリップで、テスト・ポイント近くのコモンに接続されています。

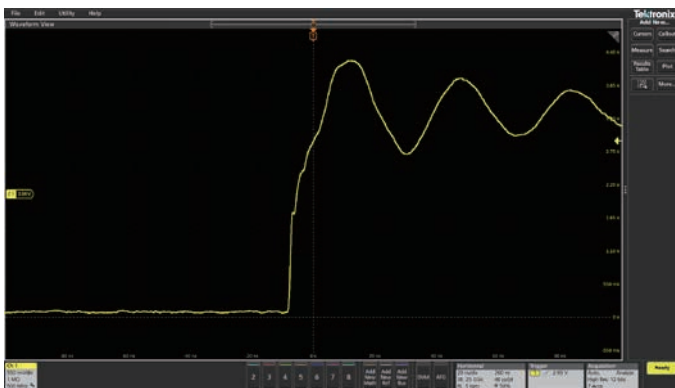
図6.2bでも同じパルス・エッジを捕らえています。ここでは標準的なグランド・リードより長い、71cmのグランド・リードを使用しています。このようにリードを延長することで、例えばプロービングするポイントが変わるたびにグランド・クリップを移動させる必要がなくなるかもしれません。しかし、このような方法ではグランド・ループも長くなり、図に示されるように深刻なリングングを引き起こすことがあります。



a. 16cmのワニ口クリップ



b. 71cmのグラウンド・チップ



c. 71cmのグラウンド・クリップをオシロスコープのシャーシに接続

図6.2. グラウンド・リードの長さや接続によって測定は大きく影響を受ける。

もう一つのグラウンド・ループの長さの違いによる変化の様子を図6.2cに示します。この例では、プローブのグラウンド・リードは接続していません。その代わりに、回路コモンからオシロスコープのシャーシまで、71cmの導線を別に引き、図6.2bで使用した71cmのプローブのグラウンド・リードよりもさらにグラウンド経路を長くしています。その結果、図6.2cに示すようなより低い周波数のリングングが生じています。

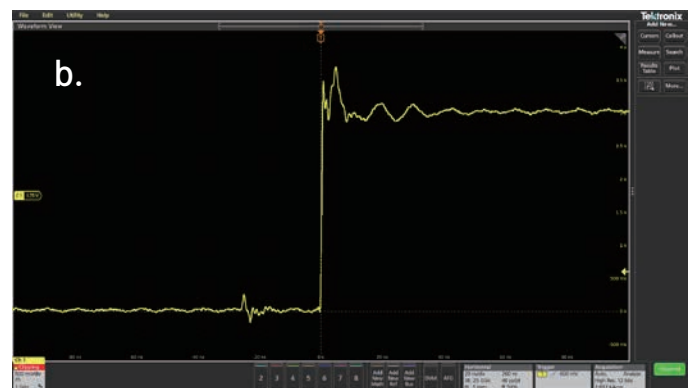
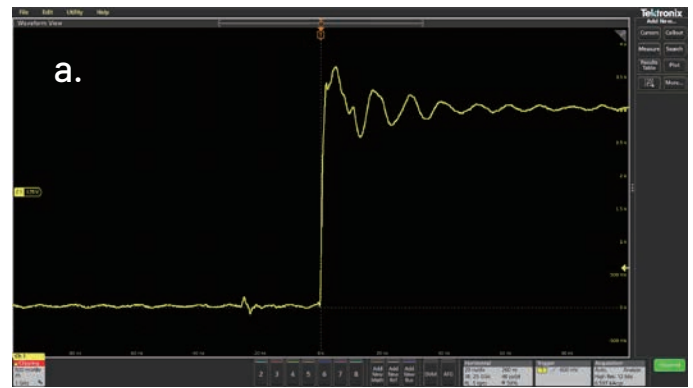


図6.3. 71cmのプローブ・グラウンドリードを使用したことにより、高速のステップ波形(立上り時間1.5ns)にアベレーションが発生している(a)。プローブ・ケーブルを動かしたり、ケーブルに手を添えることでこのアベレーションは変化することがある(b)。

以上の例から、グラウンド・リードの長さは測定品質に大きく影響することがわかります。

長いグラウンド・リードの位置や環境も信号経路の容量特性に影響し、その結果、測定品質にも影響を及ぼす可能性があります。図6.3は、71cmのグラウンド・リードを使用した、10GHzのオシロスコープによるリングングの例です。ステップ波形は非常に高速な1.5nsの立上り時間を持っているため、高周波成分によってプローブのグラウンド回路内にリングングを発生させます。

図6.3のどちらの波形も、同じオシロスコープ、プローブを使用して同じステップ波形を取込んだものです。ところが、図6.3aと6.3bではわずかに異なったリングングになっています。図6.3bは、プローブ・ケーブルの位置をわずかに変え、プローブ・ケーブルに手を添えた状態で取込んでいます。こうすることでプローブ・グラウンド回路の容量、高周波終端特性がわずかに変化し、結果としてリングングの変化につながっています。

アベレーションの原因特定

プローブのグラウンドリードが、高速で遷移する波形のアベレーションを引き起こす可能性があるという事実は、認識すべき重要なポイントです。また、波形のアベレーションは単に波形の一部であって、プローブのグラウンド方法によるものではない可能性があることも認識する必要があります。

この違いを明らかにするためには、プローブ・ケーブルを動かしてみます。プローブ・ケーブルに手を添えてみたり、プローブ・ケーブルを動かすことでアベレーションに変化が見られる場合は、そのアベレーションはプローブのグラウンド・システムが原因であると考えられます。正しくグラウンド（終端）されたプローブでは、ケーブルの位置や接触によって影響されることはありません。

パルスの表示にリングングが見られる場合は、グラウンド・リードを短くしてみます。短いグラウンド・リードではインダクタンスが小さくなり、高周波のリングングも抑えられます。それでパルスのリングング周波数に変化が見られる場合は、そのリングングはグラウンド・リードに関連したものであることがわかります。グラウンド・リードをさらに短くすると、リングングの周波数がオシロスコープの帯域幅を超えるため、測定への影響を最小限に抑えることができます。グラウンド・リードの長さを換えてもリングングに変化がない場合は、そのリングングは被測定回路由来のものであると考えられます。

不適切なグラウンドによるノイズ問題

ノイズも、オシロスコープの表示波形に現れる信号歪みの一種です。リングングやアベレーションと同様、ノイズもプローブ先端で検出した信号の一部である場合と、不適切なグラウンドが原因で信号に現れる場合があります。リングングやアベレーションと異なるところは、通常ノイズは発生源が外部であり、観察している信号の速度とは無関係に出現するものだということです。言い換えると、グラウンドが不適切であれば、どのような信号にも発生し得るということです。

プロービングによる信号へのノイズ混入には、主に以下の2通りのメカニズムがあります。その一つが、グラウンド・ループによるノイズ混入です。もう一つが、グラウンド・ケーブルまたはグラウンド・リードにノイズが誘導されてしまう場合です。

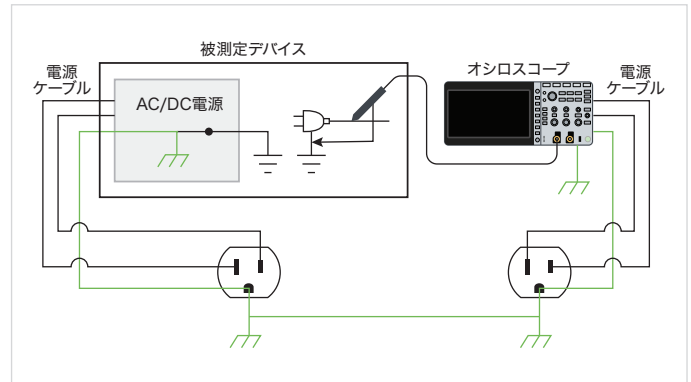


図6.4. 2つの電源コンセントに接続されたオシロスコープ、プローブ、被測定回路で構成された、すべてのグラウンド回路、つまりグラウンド・ループ。

グラウンド・ループによるノイズ混入

グラウンド・システムへのノイズ混入は、オシロスコープ・コモンと被測定回路の電源接地、およびプローブのグラウンド・リードとケーブルのシールドで構成されたグラウンド・ループに、不要な電流が流れることによって発生します。通常、これらのポイントはすべて電圧が0Vになっているはずで、電流は流れないはずですが、オシロスコープと被測定回路が、建物内の異なる接地システムにつながっている場合、一方のシステムにわずかな電圧の差、またはノイズが生じる可能性があります。このようなグラウンド・システムの例を図6.4に示します。

- このシステムのいずれかのグラウンド・ポイントにおいて電位差が発生すると、グラウンド・ループに電流が流れます。
- グラウンド・ループに電流が流れると、プローブのグラウンド導線に電圧降下が生じます。
- このノイズ電圧は、プローブ先端からの信号と直列にオシロスコープに混入します。
- その結果、測定している信号に乗る形でノイズが観測されます。

グラウンド・ループによるノイズ混入では、通常ノイズは電源周波数(50Hz/60Hz)のノイズになります。空調機のような建物設備の電源オン/オフによるスパイクやバーストの形で発生することもよくあります。

警告

電源プラグの3線式グラウンド・システムを使うことなく、オシロスコープをグラウンドから浮かせないでください。危険な電圧レベルが金属表面に発生することがあります。

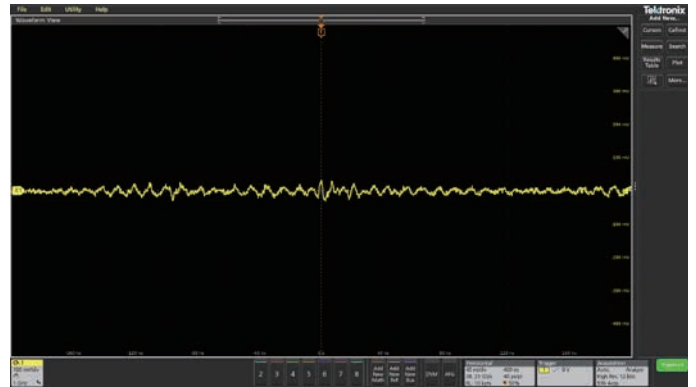


図6.5. グラウンド・リードとプローブ・チップを短絡させることによって生じる、プローブ・ループ内の回路基板によって誘起されるノイズの例。

グラウンド・ループによるノイズ問題を回避または最小化するには、さまざまな方法があります。その一つは、オシロスコープと被測定回路で同じ電源回路を使用することで、グラウンド・ループの距離を最小限にします。さらに、プローブとケーブルはノイズを発生される可能性のある信号源から離します。特に注意が必要なのは、プローブ・ケーブルは機器の電源ケーブルと並べたり、交差させたりしないようにしてください。

それでもグラウンド・ループの問題が解消されない場合は、差動電圧プローブを使用することで測定への影響を軽減できます。また、光アイソレーション型プローブを使用するとコモンモード・ノイズが除去できます。

誘導ノイズ

ノイズは、プローブ・ケーブルに誘導されてグラウンド・システムに流れ込むことがあり、特にケーブルが長い場合は起こりやすくなります。プローブ・ケーブルが電源ライン、その他の通電導体の近くにあると、プローブの外部シールドに電流が誘導されます。システムのコモン・グラウンドができることで、その電流の流れる回路が完成します。このノイズ源を抑えるためには、できるだけ短いケーブルを使用するようにするとともに、プローブ・ケーブルを干渉源に近づけないようにします。

ノイズは、グラウンド・リードに直接誘導されることもあります。これは、グラウンド・リードをテスト回路につないだ際に、1回巻きのループ・アンテナとして作用した結果です。このグラウンド・リードのアンテナは、ロジック回路や、急峻に変化する信号による電磁干渉の影響を強く受けます。グラウンド・リードが、被測定回路基板上のクロック・ラインなどに近づきすぎると、信号がノイズとしてグラウンド・リードに取込まれ、プローブ・チップの信号と混ざってしまいます。

ノイズ源の特定

オシロスコープに表示される信号にノイズが見える場合、それはプローブ先端で観測している波形の一部なのか、あるいはプローブのグラウンド・リードによって発生しているものなのかが疑問となる場合があります。

これを確かめるため、プローブのグラウンド・リードを動かしてみます。ノイズの信号レベルが変化する場合、そのノイズはグラウンド・リードによるものです。

ノイズ源を特定するもう一つの効果的な方法は、プローブを回路から外し、プローブのグラウンド・リードをプローブ・チップにクリップし、こうしてできたプローブ・チップとグラウンド・リードのループ・アンテナを、回路の上で往復させてみます。このループアンテナは、回路内の放射ノイズの強い部分に反応します。図6.5は、プローブのグラウンド・リードをプローブ・チップに接続し、ロジック回路基板の上で動かしてみた様子を示しています。

プローブ・グラウンドに誘起されるノイズを最小限に抑えるには、グラウンド・リードを被測定基板のノイズ源から離します。さらに、短いグラウンド・リードを使用することで拾い出すノイズを減らすことができます。

正しいグラウンドのためのヒント

一般に、グラウンド経路が短いほど良い結果の測定につながります。究極のグラウンド・システムは、回路内PCB(プリント回路基板)とプローブ・チップ・アダプタです(図6.6参照)。PCBアダプタを使用することで、プローブ・チップを回路のテスト・ポイントに直接接続でき、アダプタのアウタ・バレルによって直接的に、最短の距離でプローブ・チップのグラウンド・リングと接続できます。

重要となる振幅、タイミングの測定では、回路基板設計時にテスト・ポイント用の基板テスト・ポイント/PCBアダプタを取付けることをお勧めします。テスト・ポイントの位置が明確になるだけでなく、信頼性の高いオシロスコープ測定のための、テスト・ポイントへの最適な接続が可能になります。

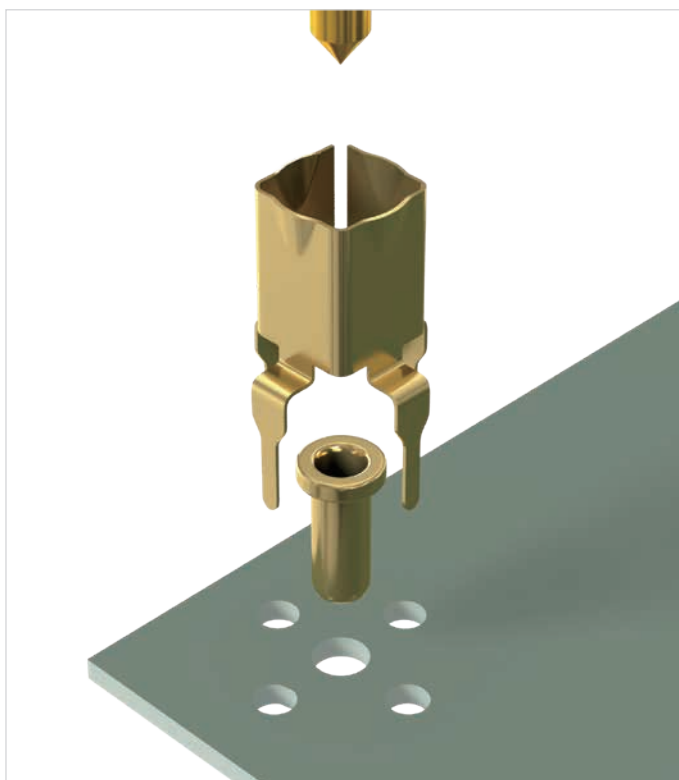


図6.6. 基板テスト・ポイント/PCBアダプタ。

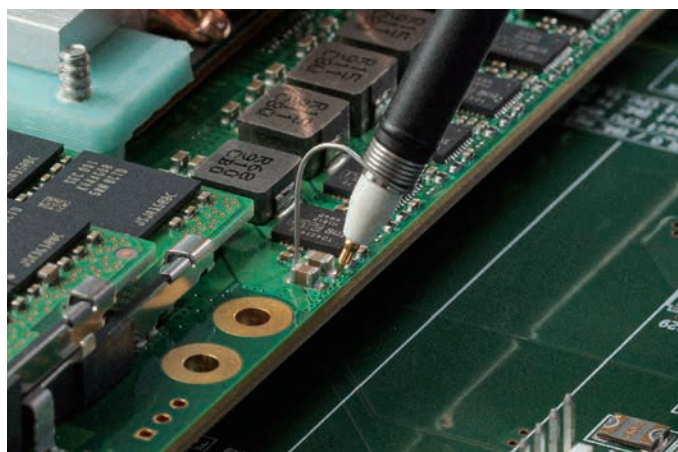


図6.8. 受動プローブで低電圧信号を観測するためのグラウンド・スプリング。グラウンド・リードに比べてより短いグラウンド経路が形成できる。

もう一度、図6.3の波形を見てみましょう。この波形は、15cmのグラウンド・リードを使用して取込んだものですが、次にこのグラウンド・リードを外し、基板テスト・ポイント/PCBアダプタにプローブ・チップを接続して同じステップ波形を取込みます。アベレーションのない、きれいな波形が取り込まれています(図6.7参照)。プローブのグラウンド・リードを使用せず、基板テスト・ポイント/PCBアダプタを使用してプローブを直接終端することで、波形表示からほぼすべてのアベレーションがなくなります。オシロスコープには、テスト・ポイントでの正確なステップ波形が表示されます。

短いグラウンド経路を実現するもう一つの選択肢が、MMCXコネクタと、このコネクタと互換性のあるTPP1000型1GHz、10:1受動プローブなどを使用することです。MMCXコネクタは、RFのアプリケーションでたびたび使用される広帯域同軸コネクタです。テスト・ポイントとしての使用に適しており、恒久的に取付けることも、一時的にはんだ付けすることもできます。(MMCXコネクタの使用例を図4.3に示しています。)

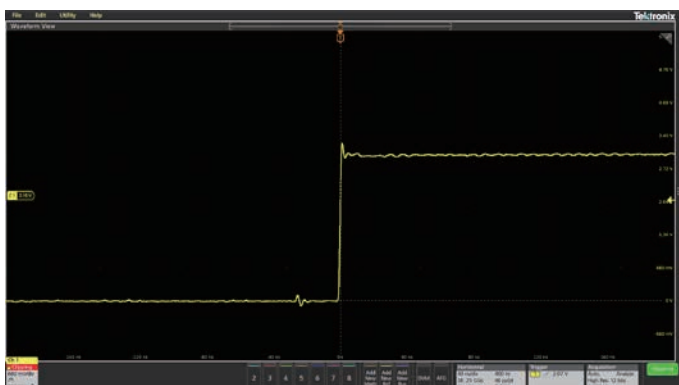
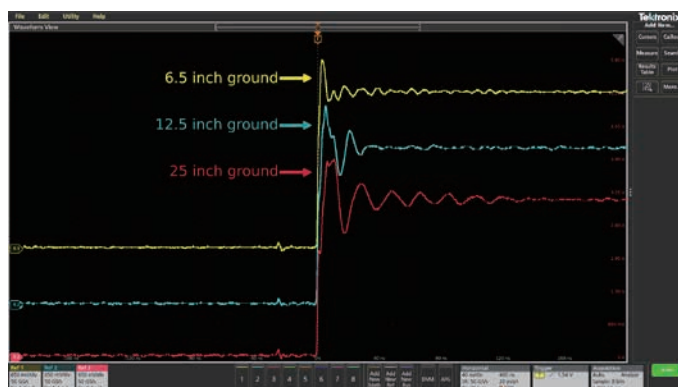


図6.7. 基板テスト・ポイント/PCBアダプタを使用して取込んだ1.5nsの立上り時間のステップ波形。

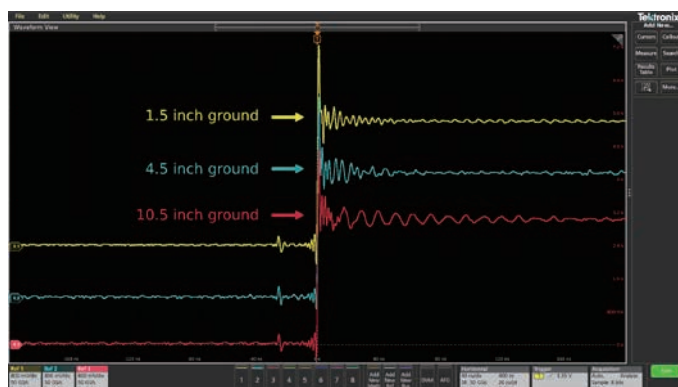
しかし、恒久的に取付けたテスト・ポイントは、多くの汎用的な測定では実用的ではありません。代替方法として最も一般的なのが、被測定回路のグランド・ポイントに短いグランド・リードをあてる方法です。プローブを被測定回路内のポイントからポイントへとすばやく移動できるため、この方がより便利です。ほとんどのプローブ・メーカーのプローブに付属している短い（通常15cm）グランド・リードは、特に100MHz以下の信号を測定する場合、または測定における通常のリングングが許容できる場合、多くの測定で十分な結果が得られます。

30Vrms以下の高周波信号の場合、グランド経路を短くするためにグランド・スプリングを使用することがあります。グランド・スプリングは、受動プローブのグランド・バレルに取付けます。接続ポイントに合わせて曲げることができ、図6.8に示す0402パッケージ・コンデンサのような表面実装部品を横切るプロービングに便利です。

もう一つの代替方法が、アクティブFETプローブの使用です。FETプローブは、入力インピーダンスが高く、チップ・キャパシタンスが極めて小さいため（多くの場合1pF以下）、受動プローブでのグランド・リードの問題を軽減することができます（図6.9参照）。



a. 受動プローブ



b. FETプローブ

図6.9. 受動プローブとFETプローブによるグランド・リードの影響を示す例。受動プローブを使用し、16cm、32cm、64cmのグランド・リードで測定した波形（a）。同じ波形を、FETプローブを使用し、3.8cm、11.4cm、26.7cmのグランド・リードで測定した波形（b）。

第7章 差動測定

厳密に言えば、すべての電圧測定は差動測定です。標準的なオシロスコープ測定では、プローブを信号ポイントにつなぎ、グランド・リードを回路グランドにつなぐことで、確かにテスト・ポイントと対地間の信号差を測定します。この意味では、グランド信号線とテスト信号線という2本の信号線があります。

しかし実際には、差動測定とは接地されていない2本の信号線の測定を言います。図7.7に示すように、2つの信号間の電圧差を求め、この電圧差をオシロスコープに入力するために、グランドを基準とした1本の信号線（シングルエンド信号）に変換する方法が必要になります。差分信号は、プロービング・システムの一部である特殊なアンプで生成することもできます。あるいは、波形演算が可能なオシロスコープであれば、各信号ラインを別々のチャンネルで取込み、2つのチャンネルを代数的に減算することで求めることもできます。差動アンプを内蔵したプロービング・システムが、差動電圧プローブと呼ばれています。いずれの場合も、どの程度同相信号を除去できるかが差動測定にとって極めて重要になります。

差動信号と同相信号について

理想の差動増幅器は、2つの入力端子間の「差動」信号 V_{DM} を増幅し、両方の入力端子に共通の電圧 V_{CM} があれば完全に除去します。その結果、出力電圧は次のようになります。

$$V_o = A_v(V_{+in} - V_{-in})$$

ここで、

A_v = 増幅器の利得

V_o = 対地間の出力信号

この電圧つまり差動信号は、差動電圧または差動モード信号と呼ばれ、次のように表されます。

$$V_{DM} = \text{上記式の } V_{+in} - V_{-in} \text{ の項}$$

なお、同相電圧 V_{CM} は上記式の一部ではありません。なぜなら、理想的な差動増幅器は、振幅や周波数に関係なく、同相成分をすべて除去するからです。

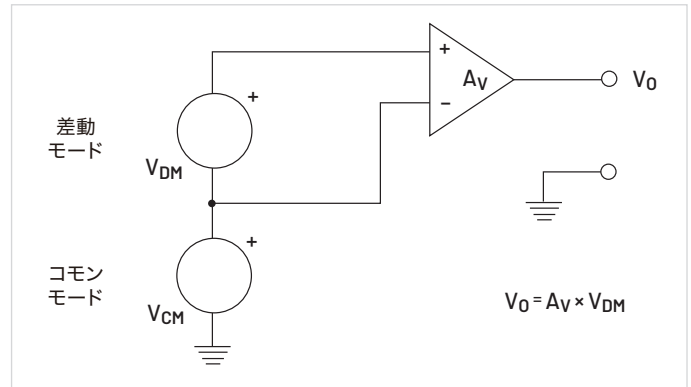


図7.7. 差動増幅器は2本の信号線の差から1本の対地信号を得る。

図7.8は、インバータ回路における上側のMOSFET素子のゲート・ドライブを差動増幅器で測定する例を示しています。MOSFETをオン/オフすると、ソース電圧は、プラスの供給電圧からマイナスの供給電圧までの範囲をスイングします。ゲート信号はトランスによって絶縁されているため、常にソースを基準にした信号になります。差動増幅器を使用すると、オシロスコープで正確な V_{GS} (数Vのスイング) を2V/divほどの十分な分解能で測定しながら、ソースとグランド間の数百Vのトランジションを除去することができます。

現実には、差動増幅器がすべての同相信号を除去できるわけではありません。わずかな同相電圧が、誤差信号として出力されます。この同相誤差信号は、差分信号と見分けが付きません。

望ましくない同相信号を最低限に抑える差動増幅器の機能が、同相除去比CMRR (common-mode rejection ratio) と呼ばれています。CMRRは、正式には「入力を基準にした、同相利得と差動利得の比率」と定義されています。

$$CMRR = \frac{A_{DM}}{A_{CM}}$$

評価目的では、CMRR性能は入力信号なしで評価できます。同相入力力で得られる出力では、CMRRが V_{DM} になります。この性能は、10000 : 1のような比率、または次のようにdBで表されます。

$$dB = 20 \log (A_{DM}/A_{CM})$$

例えば、10000 : 1のCMRRは80dBに相当します。図7.9のようなオーディオ・パワー・アンプのダンピング抵抗の電圧を測定する場合を考えてみます。全負荷時、このダンパーを横切る電圧 (V_{DM}) は35mVに達し、出力スイング (V_{CM}) は80Vp-pになります。使用している差動増幅器のCMRRの仕様は、1kHzで10000 : 1です。1kHzの正弦波によって増幅器をフル出力にすると、同相信号の1万分の1が誤差として差動増幅器の出力に V_{DM} として現れますが、この値は80V/10000、つまり8mVです。8mVの残留同相信号は、実際の35mVの信号では最大22%の誤差になります。

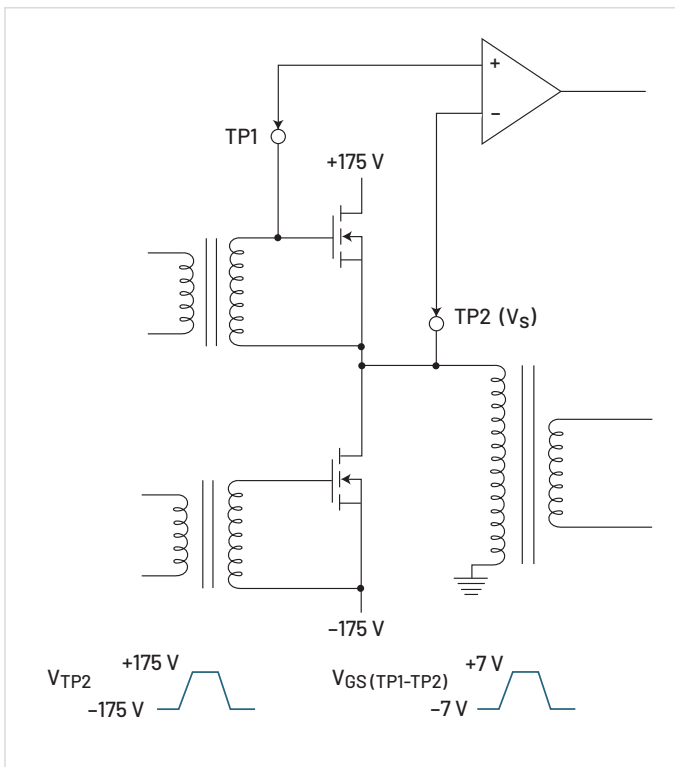


図7.8. インバータ・ブリッジ回路内の上側のトランジスタのソース電圧に対するゲート電圧を測定するための差動増幅器。測定中にソース電位が350V変化している。

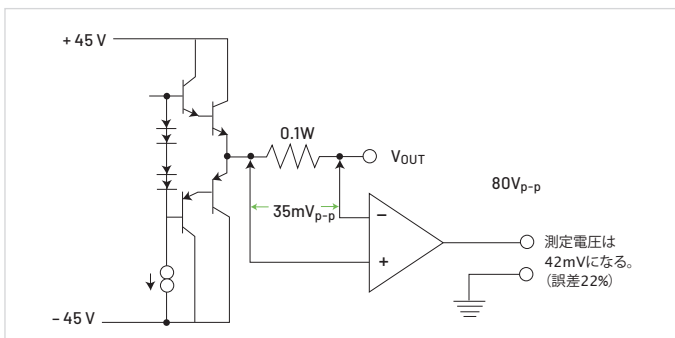


図7.9. CMRRが10000 : 1の差動増幅器による同相誤差

CMRR仕様は絶対値であることに注意してください。極性や位相シフトの度合いについては規定していません。したがって、表示波形から単に誤差を差し引けばよいということではありません。また、一般にCMRR性能はDCで最大値になり、 V_{CM} の周波数が上昇するとともにCMRR性能は低下します。差動増幅器によっては、CMRR仕様を周波数の関数としてグラフ化しているものもあれば、いくつかの周波数についてのみCMRR仕様を規定しているものもあります。いずれの場合も、差動増幅器やプローブを比較検討する場合は、同じ周波数におけるCMRRを比較することが重要です。

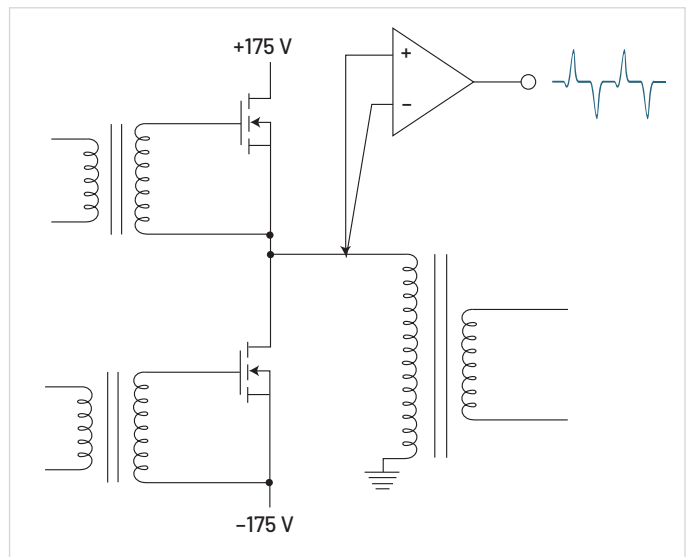


図7.10. 同相除去が十分かどうかを確認するための実験的なテスト。両方の入力端子は同一ポイントにより駆動されている。残った同相誤差が出力に現れる。このテストでは、2入力間の差動ソース・インピーダンスの影響を捕えることはできない。

またCMRR仕様は、同相成分を正弦波と想定している点にも注意が必要です。ただし、現実にはそうでない場合があります。例えば、図7.8のインバータの同相信号は30kHzの方形波です。方形波には30kHzよりはるかに高い周波数のエネルギーが含まれているため、CMRRは30kHzで規定されている値よりも低くなるはずですが。

同相成分が正弦波でない場合は、実験的なテストによってCMRR誤差の程度を判断するのが最も迅速な方法です(図7.10参照)。両方の入力リードをソースへ接続します。オシロスコープには、同相誤差のみが表示されます。これで、誤差信号のおよその大きさを判断することができます。ただし、 V_{CM} と V_{DM} の位相差は示されません。したがって、表示された同相誤差を差動測定値から引いても、正確に誤差が相殺されるわけではありません。

図7.10に示したテストは、実際の測定環境で同相除去誤差の程度を判断するのに便利です。しかし、このテストでは捕えることができない影響が一つあります。それは、入力端子が両方とも同じポイントに接続されていると、増幅器から見て駆動インピーダンスの差がないことです。このテスト環境は、最高のCMRR性能が得られる状況です。しかし、同じ差動増幅器の2つの入力端子が、大きく異なるソース・インピーダンスによって駆動される環境ではCMRRは低下します。

差動測定誤差の最小化

差動増幅器やプローブを信号源につなぐと、大きな誤差を生む可能性があります。両方の入力端子でマッチングを維持するには、両方の経路を可能な限り同一にする必要があります。ケーブルも、両方の入力において同じ長さになるようにします。

信号ラインごとに別々のプローブを使用する場合は、同じ機種で、ケーブル長も同じになるようにします。大きな同相電圧のある低周波信号を測定する場合は、減衰プローブは使用しないようにします。大きなゲインがある場合は、正確に減衰のバランスを取れなくなるため、使用できません。

距離を取って配置された入力ケーブルは変圧器の巻線として機能します。ケーブルによるループをAC磁場が通過すると、増幅器入力端子に差動電圧として誘導され、忠実に出力に加算されてしまいます。+と-の入力ケーブルのペアをより合わせることで、この問題を最小限に抑えます。こうすることで、電源周波数やその他のノイズの取込みも低減できます。図7.11のように入力リードをより合わせると、誘導電圧が V_{CM} の経路に入りやすくなり、最終的に差動増幅器によって除去されます。

過度の同相電圧にさらされる高周波信号を測定する場合は、フェライト・トロイダルコアに両方の入力リードを巻くことで改善されます。この方法で両方の入力端子に生じた共通の高周波信号を減衰させることができます。差動信号は両方向からコアを通過するため、影響を受けることはありません。

差動増幅器の入力コネクタの多くは、外側のシェルがグラウンドされ、BNCコネクタを備えています。プローブや同軸入力コネクタを使用する場合、グラウンドをどうするかという問題が必ずあります。測定アプリケーションによって異なるため、一定のルールはありません。

低周波数で低レベルの信号を測定する場合、グラウンドはオシロスコープ側のみで接続し、入力のプロローブ側は両方とも未接続のままにしておくのが最もよいとされています。

こうすることでシールドに誘導された電流の帰線ができ、しかも、測定や被テスト機器に支障をきたさずグラウンド・ループも形成されません。

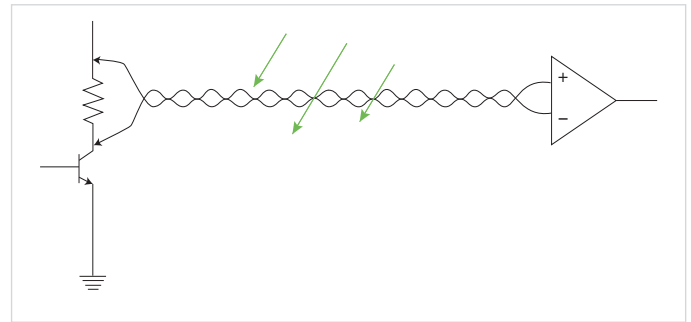


図7.11. 入力リードをより合わせると、ループ・エリアが非常に小さくなるため、通過する磁場も小さくなる。誘導電圧は V_{CM} 経路に入りやすくなるが、差動増幅器によって除去される。

周波数が高くなると、プローブの入力容量はリードのインダクタンスと連動して直列共振「タンク」回路を形成し、リングングを起こすことがあります。シングル・エンド測定では、グラウンド・リードをできるだけ短くすることで影響を最小限に抑えることができます。このようにしてインダクタンスが下がることで、実質的に共振周波数が上り、増幅器の周波数より高くすることもできます。差動測定は2つのプローブ・チップ間で行い、測定にグラウンドの概念は該当しません。しかし、同相成分の高速立上りによってリングングが発生する場合は、短いグラウンド・リードを使うと、共振回路のインダクタンスが低減されるため、リングングを起こす成分が減少します。この場合、高速の差動信号によって発生したリングングを、グラウンド・リードを取付けて低減できることがあります。高周波数において、同相ソースの対地インピーダンスが非常に低い場合、つまりコンデンサによってバイパスされている場合はリングングを低減できます。これに当てはまらない場合にグラウンド・リードを取付けると、かえって状況を悪化させてしまいます。このような場合は、プローブの入力側で両方のグラウンド・リードを一緒にします。こうすると、シールドによって実質的なインダクタンスが低下します。

もちろん、プローブ・グラウンドを被測定回路に接続すれば、グラウンド・ループが形成される可能性はあります。通常、高周波信号を測定する場合には問題にはなりません。高い周波数の測定では、グラウンド・リードがある場合とない場合で測定を行い、最良の結果が得られたセットアップを採用するのが最も有効な方法です。

グラウンド・リードを回路につなぐ場合は、必ず接地につないでください。差動増幅器を使用していると、どこが接地点だったのかを忘れがちになります。

第8章 微小信号の測定

振幅の小さな信号の測定には独自の課題があります。その中で最も重要となるのが、ノイズと測定感度です。

ノイズ低減

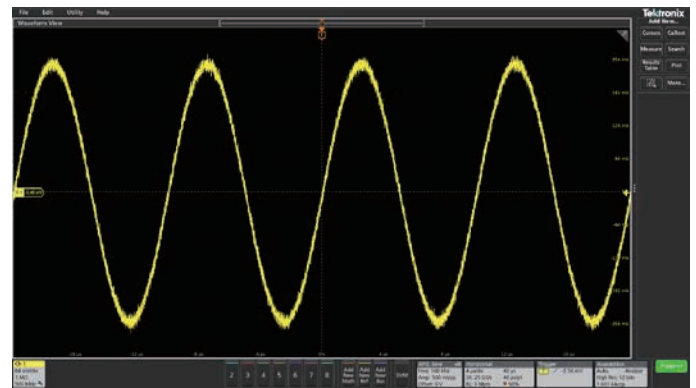
数百mV以上の信号を測定する際には無視できるレベルの周囲ノイズも、数十mV以下の信号測定では無視できなくなります。そのため、グランド・ループを小さくとり、グランド・リードをできる限り短くすることが、測定システムに取込まれるノイズを減らすために不可欠です。極端な例では、超低振幅信号をノイズなしで測定するために、電源ライン・フィルタやシールド・ルームが必要な場合もあります。

しかし、極端な手段に頼る前に、ノイズ問題にとってシンプルかつ安価な解決策として、信号アベレージングを検討する必要があります。測定する信号に繰り返し性があり、除去しようとしているのがランダム・ノイズであれば、**信号アベレージング**により、捕えた信号のSNR（信号対ノイズ比）を大幅に向上できます。その例を図8.1に示します。

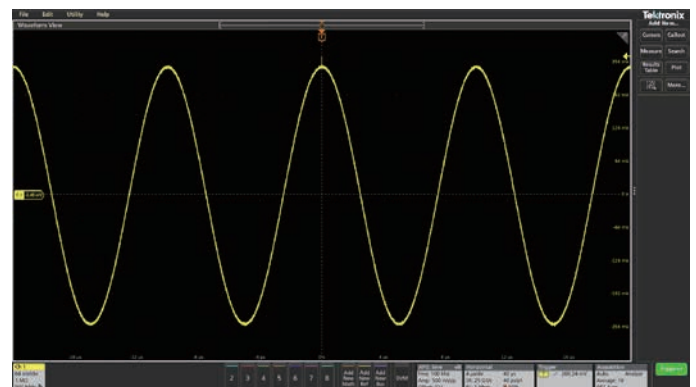
信号アベレージングは、ほとんどのデジタル・ストレージ・オシロスコープ (DSO) に標準で装備されている機能です。複数の繰り返し波形を取込み、そこから平均波形を算出する機能です。ランダム・ノイズの長期平均値はゼロになるため、信号アベレージングによって繰り返し信号のランダム・ノイズは低減されます。向上した度合いはSNRで表します。理想的には、2回の波形平均ごとに3dBずつSNRが向上します。したがって、2波形のみの平均 (2¹) では最大3dB、4波形 (2²) では6dB、8波形 (2³) では9dBのように向上していきます。

測定感度

オシロスコープの測定感度は、入力回路の機能です。入力回路は、入力信号を増幅または減衰し、振幅を補正した信号をオシロスコープ画面に表示します。信号表示に必要な増幅や減衰の量はオシロスコープの垂直感度設定により、表示目盛あたりの電圧値 (V/div) で調整します。



a.



b.

図8.1. ノイズの多い信号 (a) は、アベレージングによってノイズが除去された波形 (b) になる。

オシロスコープは、微小信号を表示・測定するのに、数目盛で信号表示できるだけの十分な利得、つまり感度を持っていない限りません。例えば、20mVのピーク・ツー・ピーク信号を2目盛で表示する場合、オシロスコープには10mV/divの垂直感度設定が必要になります。10mVの信号を同じく2目盛で表示するには、さらに高い5mV/divの垂直感度設定が必要です。目盛あたりの電圧値が小さいと高い感度設定になり、逆に、電圧値が大きくなると感度設定は低くなります。

微小信号測定では、オシロスコープの十分な感度だけでなく、適切なプローブも必要になります。ここで言う適切なプローブとは、オシロスコープに標準で付属している通常のプローブのことではありません。付属しているプローブは一般に10:1プローブであり、オシロスコープの感度を10分の1に低下させます。つまり10:1プローブを使うと、オシロスコープの5mV/divの設定は50mV/divになります。したがって、オシロスコープの測定感度を最も高い状態にするには、1:1の非減衰プローブを使用する必要があります。

しかし、これまでの章で述べたように、1:1プローブは、周波数帯域や入力インピーダンスが低く、チップ・キャパシタンスは大きくなります。つまり、測定する微小信号の周波数帯域、プローブによる信号源負荷の可能性について特に注意を払う必要があります。こうしたことが問題になるようであれば、より広帯域で負荷が小さい、1:1アクティブ・プローブを考えた方がよいでしょう。

微小信号の振幅がオシロスコープの感度範囲を下回っている場合は、プリアンプが必要になります。極小信号はノイズの影響を受けやすいため、一般には差動プリアンプが使用されます。差動プリアンプは、同相除去によってノイズ耐性を高めるとともに、微小信号を増幅することで振幅がオシロスコープの感度範囲内に入るようにします。

オシロスコープで使用するよう設計された差動プリアンプでは、 $10\mu\text{V}/\text{div}$ レベルの感度が得られます。このような特殊設計のプリアンプ機能を使用すれば、高ノイズ環境であっても、 $5\mu\text{V}$ 程度しかない信号を測定しても有効な結果が得られます。

ただし、差動プリアンプをフルに活用するには、それに適合する高品質の受動プローブを使用する必要があります。適合したプローブを使用しないと、差動プリアンプの同相ノイズ除去機能が働かなくなってしまいます。

また、差動測定ではなく、シングルエンド測定を行う必要がある場合は、差動プローブのマイナス側はテスト回路のグランドに接続することができます。これは本質的には、信号線と信号グランド間の差動測定です。ただし、信号ラインとグランドの両方に共通するノイズが存在しなくなるため、コモンモード・ノイズ除去は機能しなくなります。

最後になりますが、プローブやプローブ増幅器の接続や使用に関するメーカーの推奨手順に必ず従ってください。とりわけアクティブ・プローブでは、電圧による損傷を受けやすいコンポーネントがあるため、過電圧には特に注意が必要です。

第9章 プロービングによる影響への対処

ソース・インピーダンス、プローブ、そしてオシロスコープが、相互に影響し合うシステムを形成していることについては、これまでのさまざまな例や説明を通して述べてきた通りです。最善の測定結果を得るには、信号ソースに対するオシロスコープ、プローブの影響を、あらゆる手段を使って最小限に抑える必要があります。

その際に、以下に挙げる一般的ルールが役立ちます。

- オシロスコープ・メーカーの推奨にしたがって、オシロスコープに適合したプローブを選択します。
- 測定しようとする信号に対して、オシロスコープとプローブが十分な周波数帯域、立上り時間を備えていることを確認します。理想としては、立上り時間の仕様が、測定しようとする信号の立上り時間よりも3~5倍速いオシロスコープとプローブの組合せを選びます。
- プローブ・グランド・リードは、できるだけ短く、そして直接接続します。長いグランド・ループは、パルスにリンギングが発生することがあります。
- プローブ選定では、測定に対して性能が満たされているだけでなく、テスト・ポイントへの機械的な接続についても考慮します。
- そして、プローブが被測定回路に負荷をかける可能性があることにも留意します。信号の周波数が高くなるにしたがってプローブの容量が問題になってきます。多くの場合、プローブ負荷については、適切なプローブを選定することで最小限に抑えることができます。

プローブの種類ごとに注意すべきプローブ負荷を以下にまとめます。

受動プローブ

通常、1:1受動プローブは、10:1受動プローブに比べて抵抗は小さく、容量は大きくなります。そのため、1:1プローブのほうが負荷になりやすく、汎用のプロービングではできるだけ10:1プローブを使用するようにします。

電圧ディバイダ (Z₀) プローブ

このプローブは、チップ・キャパシタンスは非常に小さいものの、抵抗負荷は比較的大きくなります。電圧ディバイダ・プローブは、50Ωの環境でインピーダンスの一致が必要な場合に使用するためのプローブですが、周波数帯域、立上り時間の性能が優れているため、それ以外の高速タイミング測定的环境でよく使用されます。振幅の測定では、プローブの入力抵抗が小さいことを考慮に入れる必要があります。

アクティブ・プローブ

アクティブ・プローブは、非常に小さな抵抗負荷、非常に小さなチップ・キャパシタンスという優れた組み合わせを備えています。ただし、それと引き換えに、ダイナミック・レンジは狭くなります。しかし、ダイナミック・レンジ内で行える測定であれば、多くの場合、アクティブ・プローブが最良の選択です。

第10章 プローブの仕様について

ここまでの章では、プローブの種類、プローブが測定にどのような影響を与えるかなど、主なプローブの仕様について説明してきました。

この章では、それらの主な仕様項目をすべて集め、参照しやすいようにまとめました。

以下に、さまざまな仕様をアルファベット順に紹介しますが、各項目がすべてのプローブに該当するわけではありません。例えば、挿入インピーダンスは電流プローブのみに該当する仕様ですが、周波数帯域のようにすべてのプローブに共通して当てはまる仕様もあります。

アベレーション (共通)

アベレーションとは、入力信号への応答において、期待される状態または理想とされる状態から振幅がずれていることを言います。実際には、波形の急速な遷移の直後に発生することが多く、「リングング」と呼ばれることもあります。

アベレーションは、最終的なパルス応答レベルから逸脱している士の割合 (%) として表します (図10.1参照)。また、アベレーションに時間範囲を設定することもできます。例えば次のようになります。

最初の30ns以内に、アベレーションが±3%またはピーク・ツー・ピークでも±5%を超えないこと...

パルス測定で過度のアベレーションが見られる場合は、プローブの不具合によるものと決めてかかるのではなく、例えば、そのアベレーションが本当に信号源の一部なのか、あるいはプローブのグランド方法が原因なのかなど、あらゆる可能性を検討します。

電圧プローブの補正を忘れてたり、適切に調整しないことが、測定値にアベレーションが現れる最も多い原因の一つです。過度に補正されたプローブでは、パルス・エッジの直後に著しいピークが発生します (図10.2参照)。

確度 (共通)

電圧検出プローブの場合、確度は一般にDC信号に対するプローブの減衰を意味します。プローブの確度の計算と測定には、一般的にオシロスコープの入力抵抗を含める必要があります。したがって、プローブの確度仕様が正しい、あるいは適用できるのは、そのプローブが想定される入力抵抗を持つオシロスコープで使用される場合のみです。減衰確度の仕様の例を以下に示します。

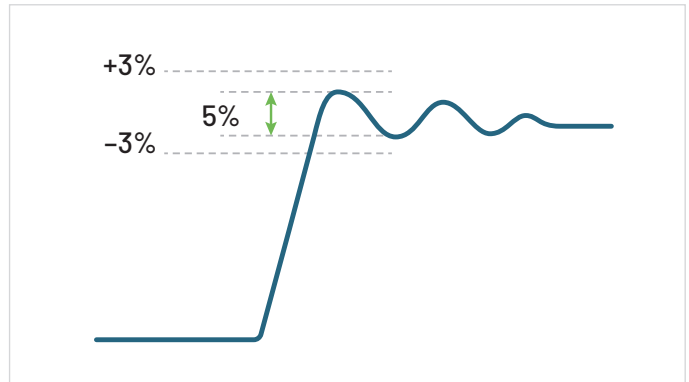


図10.1. 100%のパルスの高さに対するアベレーション測定の例。

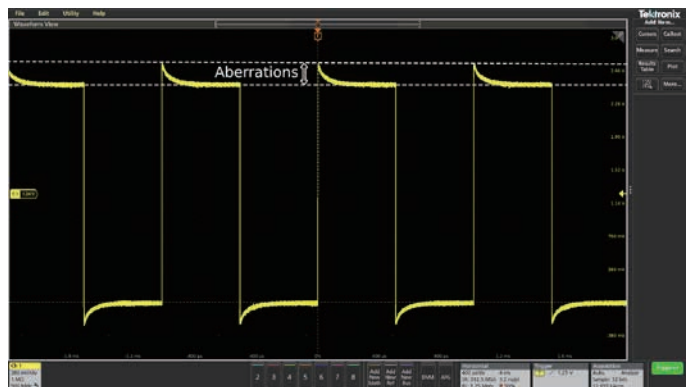


図10.2. 過補正のプローブによるアベレーション。

10 : 1のプローブで3% (1MΩ±2%の入力を持つオシロスコープにおいて)

電流検出プローブの場合、確度仕様とは電流から電圧への変換確度を意味します。これは、電流トランスの巻数比、終端抵抗の値と確度によって決まります。専用アンプで動作する電流プローブは、直接A/divで校正され、A/div設定のパーセンテージとしてのアッテネータ確度で示される確度仕様による出力機能を備えています。

電流時間積 (電流プローブ)

電流プローブにおける電流時間積は、電流トランスフォーマのコアのエネルギー処理能力を規定します。平均電流とパルス幅の積が電流-時間の定格を超えると、コアは飽和します。このコアの飽和は、飽和中に発生する波形部分のクリッピングや抑圧の原因になります。電流時間積の定格を超えなければ、プローブの信号電圧出力はリニアになり、正確に測定できます。

減衰比 (共通)

すべてのプローブには減衰比があります。プローブによっては減衰比が選択できるものもあります。代表的な減衰比は、1 : 1、10 : 1、100 : 1です。

減衰比は、信号振幅をどの程度減衰するかという比率です。1 : 1のプローブは信号を減衰することはありません。10 : 1のプローブは、元の信号振幅を1/10に減衰させます。プローブの減衰比によって、オシロスコープは測定レンジを広げることができます。例えば、100 : 1のプローブでは100倍の振幅の信号が測定できるようになります。

1 : 1、10 : 1、100 : 1という表記は、オシロスコープがプローブの減衰を自動的に感知し、それに応じてスケール・ファクタを調整していなかった時代に由来します。例えば10 : 1は、すべての振幅測定で10倍する必要があることを思い起させます。最近の多くのオシロスコープが持つリードアウト・システムは、プローブの減衰比を読み取り、それに応じてスケール・ファクタのリードアウトを自動的に調整します。

電圧プローブの減衰比は、抵抗分圧技術によって実現されています。従って、減衰比の大きなプローブは、一般的に大きな入力抵抗を持っています。また、ディバイダ効果によってプローブ容量が分割されるため、高い減衰比ではプローブ先端の容量が小さくなります。

周波数帯域 (共通)

すべてのプローブには周波数帯域があります。10MHzのプローブには10MHzの周波数帯域が、100MHzのプローブには100MHzの周波数帯域があります。プローブの周波数帯域は、プローブの出力振幅が70.7% (-3dB) まで低下するときの周波数を指します (図10.3参照)。

プローブによっては、低い周波数で制限があるものもあります。AC電流プローブがその例です。設計上、AC電流プローブはDCまたは低周波数の信号では機能しません。したがって、このようなプローブでは低い周波数と高い周波数の2種類が規定されています。

オシロスコープによる測定で重要なのは、オシロスコープとプローブを組み合わせたときの周波数帯域です。このシステム性能が測定能力を決めます。残念ながら、プローブをオシロスコープに接続すると、ある程度の周波数性能が低下します。例えば、100MHzの汎用プローブを100MHzのオシロスコープで使用すると、結果としてそのシステム性能は100MHzをわずかに下回る周波数性能になります。システム全体の帯域幅性能の不確実性を避けるため、テクトロニクスでは規定した受動電圧プローブとオシロスコープを組み合わせることで、プローブ先端において規定の測定システム帯域幅を実現しています。

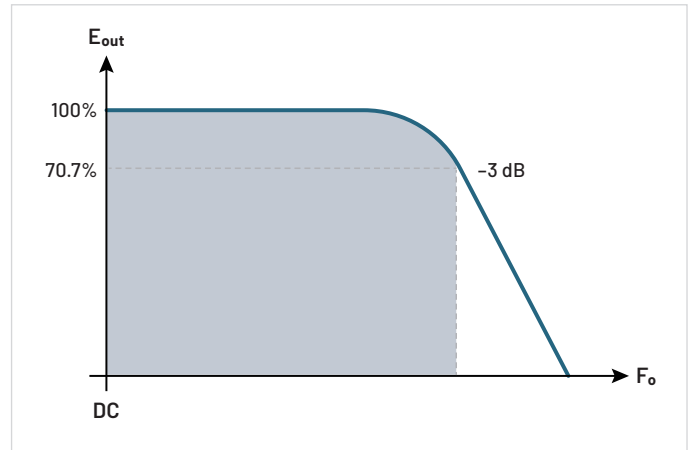


図10.3. 周波数帯域は、応答曲線において、正弦波の振幅が70.7% (-3dB) まで低下したときの周波数である。

オシロスコープとプローブを選定する場合、周波数帯域によって測定精度が影響を受けることを理解することが重要です。

振幅測定では、正弦波の周波数が周波数帯域限界に近づくにつれて、正弦波の振幅は減衰していきます。周波数帯域限界では、正弦波の振幅は、実際の振幅に比べて70.7%まで低下して表示されます。したがって、精度の高い振幅測定を行うには、測定する最高の周波数の数倍の周波数帯域を持つオシロスコープ、プローブを選択する必要があります。

波形の立ち上がり時間、立ち下り時間の測定でも同じことが言えます。パルスや方形波のエッジ部分などの波形遷移では、高周波成分が含まれています。周波数帯域制限によってこの高周波成分が減衰されると、波形の遷移部分は実際よりも遅く表示されます。立ち上り/立ち下り時間を正確に測定するためには、適切な周波数帯域の測定システムを使用することで高周波成分が維持され、正確な立ち上り/立ち下り時間が測定できます。測定システムの立ち上がり時間という意味で述べられることが多いのですが、通常、測定しようとする立ち上がり時間の4倍から5倍の速さが必要になります。

キャパシタンス、容量 (共通)

一般に、プローブのキャパシタンス (容量) の仕様は、プローブ先端におけるキャパシタンスを規定します。これは、プローブによって回路のテスト・ポイント、または被測定デバイスに加わるキャパシタンスです。

プローブ先端のキャパシタンス (図10.4) は、パルスの測定方法に影響するため重要です。プローブ先端のキャパシタンスが小さいと、立ち上がり時間測定の誤差が小さくなります。また、パルスの持続時間がプローブのRC時定数の5倍未満の場合、信号が最大振幅に達する前に立ち下がるため、パルスの振幅が影響を受けます。

プローブをオシロスコープに接続すると、オシロスコープ入力でもキャパシタンスが存在することになり、このキャパシタンスはオシロスコープのそれと一致する必要があります。10 : 1、100 : 1のプローブでは、このキャパシタンスは補正範囲と呼ばれ、プローブ・チップ・キャパシタンスとは異なります。プローブ・マッチングでは、オシロスコープの入力容量は、プローブの補正範囲内である必要があります。

CMRR (差動プローブ)

CMRR (Common-mode Rejection Ratio、コモンモード除去比) は差動プローブの性能であり、差動測定の2つのテスト・ポイント間に共通の信号を除去する能力です。CMRRは差動プローブの性能指数であり、次のように定義されます。

$$CMRR = \left| \frac{A_d}{A_c} \right|$$

ここで、

A_d = 差動信号の電圧ゲイン

A_c = コモンモード信号の電圧ゲイン

理想としては、A_dが大きく、A_cがゼロであればCMRRは無限大になります。実際には、-80dBのCMRR (10,000 : 1) は、非常に良い性能と言えます。これは、5Vのコモンモード入力信号は、出力で0.5mVまで除去されるということです。このような除去性能は、ノイズがある状態における差動信号の測定で重要になります。

CMRRは周波数が増えるにつれて低下するため、CMRRが規定されている周波数もCMRRの値と同様に重要です。高い周波数で大きなCMRRの値を持つ差動プローブの方が、低い周波数で同じCMRRの値を持つ差動プローブよりも優れています。

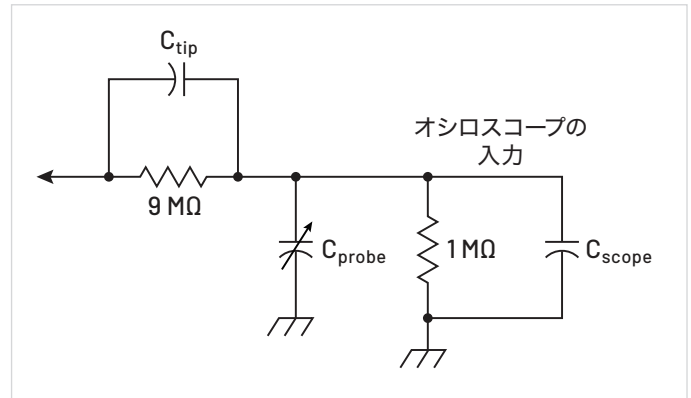


図10.4. 10 : 1プローブの回路モデルであり、チップ・キャパシタンス、補正用キャパシタンス、オシロスコープのキャパシタンスが含まれている。これはモデルであり、実際のプローブ回路は異なる場合がある。

光アイソレーション型プローブは特殊なカテゴリのものであり、プローブ・ヘッドとオシロスコープ間のガルバニック絶縁によって非常に大きなCMRRを実現しています。

減衰時定数 (電流プローブ)

減衰時定数の仕様は、電流プローブのパルス対応能力を示します。この時定数は、二次インダクタンス (プローブ・コイル) を終端抵抗で割ったものです。減衰時定数は、プローブL/R比とも呼ばれることがあります。

L/R比が大きいほど、振幅の大幅な減衰やドループ (垂れ下がり) なしに、より長い電流パルスが再現できます。L/R比が小さいと、時間の長いパルスは、実際にパルスが完了する前にゼロまで減衰するのに見えます。

直流 (電流プローブ)

直流 (DC) は電流プローブのコイル・コアの透磁率を低下させます。この透磁率の低下により、コイルのインダクタンスとL/R時定数が低下します。その結果、低周波のカップリング性能が低下し、低周波電流に対する測定応答性が損なわれます。AC電流プローブの中には、DCの影響を無効にする電流バッキング機能を備えたものもあります。

周波数ディレーティング (電流プローブ)

電流プローブの仕様は、周波数の上昇とコアの飽和を関連付ける振幅対周波数の曲線を含めるべきです。周波数の上昇によるコア飽和の影響は、平均電流が0Aの波形が、波形の周波数または振幅が増加するにつれて、振幅ピークのクリッピングとして現れます。

挿入インピーダンス (電流プローブ)

挿入インピーダンスは、電流プローブのコイル (二次側) から測定対象の通電導体 (一次側) に変換されるインピーダンスです。通常、電流プローブの反射インピーダンスの値は $m\Omega$ の範囲であり、 25Ω 以上のインピーダンスの回路ではあまり影響しません。

入力容量 (共通)

プローブ先端で測定されるプローブのキャパシタンス (容量) です。

入力抵抗 (共通)

プローブの入力抵抗とは、 0Hz (DC) においてプローブがテスト・ポイントに与えるインピーダンスのことです。

最大入力電流定格 (電流プローブ)

最大入力電流定格は、プローブが許容でき、なおかつ規定どおりの性能を発揮する総電流 (DC+ピークAC) です。AC電流測定では、最大総入力電流を計算するために、ピーク・ツー・ピーク値を周波数に対して軽減する必要があります。

最大ピーク・パルス電流定格 (電流プローブ)

この定格は超えることはできません。コアの飽和と危険な二次電圧の発生を考慮する必要があります。最大ピーク・パルス電流は、通常、電流時間積で表されます。

最大電圧定格 (共通)

プローブの最大定格に近い電圧は避けるべきです。最大定格電圧は、プローブ本体またはプローブ構成部品の測定ポイントにおけるブレークダウン電圧によって決まります。

伝搬遅延 (共通)

どのプローブにも、信号周波数によって変化するわずかな時間遅延や位相シフトがあります。これは、プローブの部品と、プローブの先端からオシロスコープのコネクタまで、これらの部品を信号が通過するのにかかる時間の関数になります。

通常、最も大きなシフトはプローブのケーブルによって発生します。例えば、 65cm の特殊プローブ・ケーブルの信号遅延は 5ns です。 1MHz の信号の場合、 5ns の遅延は 2° の位相シフトになります。さらに長いケーブルを使用すると、さらに信号遅延は大きくなります。

伝搬遅延は通常、2つ以上の波形を比較測定する場合にのみ問題となります。例えば、2つの波形の時間差を測定する場合、マッチングのとれたプローブを使用して波形を取込みます。こうすることで2本のプローブで同じ伝搬遅延となり、正確な時間差が測定できます。

もう一つの例は、電圧プローブと電流プローブを組み合わせて使用する電力測定です。電圧プローブと電流プローブは構造が大きく異なるため、伝搬遅延も異なります。この遅延が電力測定に影響するかどうかは、測定する波形の周波数によって異なります。Hz、kHzの信号では、一般に遅延の差は大きな問題にはなりません。しかし、MHzの信号の場合は、この差が大きな影響を及ぼします。

立上り時間 (共通)

ステップ波形を使ったプローブの10~90%の周波数応答は、プローブのパルス応答特性を表します。パルスの立上り/立下り時間を正確に測定するには、測定システム (オシロスコープとプローブの組み合わせ) は、測定対象のパルスよりも3~5倍速い立上り時間が必要です。

タンジェンシャル・ノイズ (アクティブ・プローブ)

タンジェンシャル・ノイズは、アクティブ・プローブにおいて、プローブから発生したノイズを規定するのに使われていた手法です。タンジェンシャル・ノイズの数値は、RMSノイズの約2倍になります。

温度範囲 (共通)

電流プローブの最高使用温度は、コイルの磁気シールドに誘起されるエネルギーによる加熱効果によります。温度が高くなるにつれて、磁気損失が大きくなります。このため、電流プローブには周波数に対する最大電流のディレーティング曲線が規定されています。

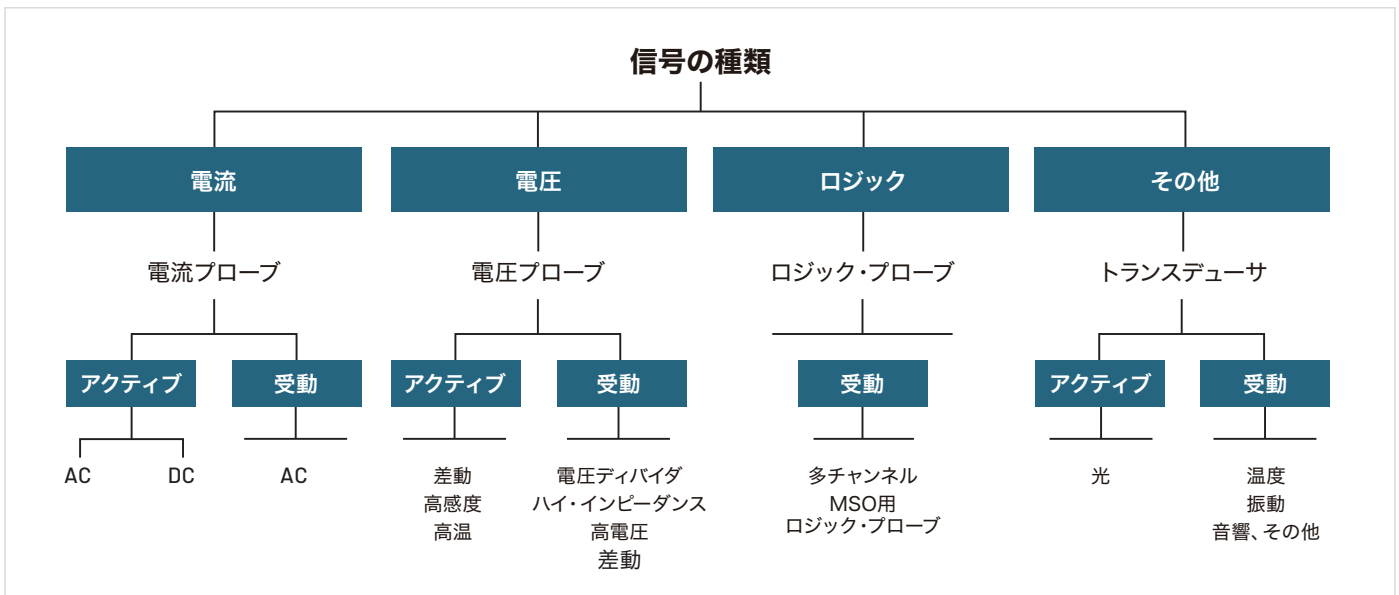
減衰電圧プローブ (10:1、100:1など) は、温度によって確度が変わることがあります。

スレッシュホールド電圧(ロジック)

ロジック・プローブは、他のオシロスコープ・プローブとは異なった方法で信号を測定します。ロジック・プローブは、信号のアナログ部分の詳細は測定しません。その代わりに、論理的なスレッシュホールド・レベルを検出します。ロジック・プローブを使用してミックスド・シグナル・オシロスコープとデジタル回路を接続する場合、信号の論理状態のみに注目することになります。この場合、2つの論理状態のみに注目します。入力がスレッシュホールド電圧 (V_{th}) より大きい場合、そのレベルは「ハイ」または「1」に、逆に V_{th} より小さいレベルは「ロー」

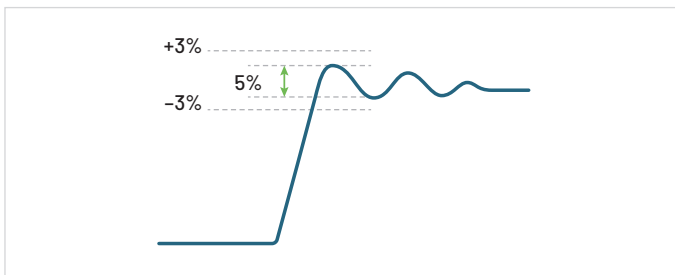
または「0」となります。入力がサンプリングされると、ミックスド・シグナル・オシロスコープは電圧スレッシュホールドと比較した場合の信号レベルに応じて「1」または「0」を保存します。

一度に数多くの信号が取込めるというのが、ロジック・プローブと他のプローブで大きく違う点です。このようなデジタル・アキュイジション・プローブがDUT (被測定回路) に接続されると、プローブ内部のコンデンサで入力電圧とスレッシュホールド電圧 (V_{th}) が比較され、信号の論理状態 (1または0) が決まります。スレッシュホールド・レベルはTTL、CMOS、ECL、ユーザ設定など、さまざまな値に設定できます。



第11章 用語解説

アベレーション – 理想や基準からずれていること。通常は、波形やパルスの上部のフラットな部分、下部のベース部分に関して使われます。信号のアベレーションには、信号源の回路状態に起因するものと、測定システムによって信号に加わるものがあります。アベレーションをとまなう測定では、そのアベレーションが本当に信号の一部なのか、あるいは測定プロセスによるものなのかを判別することが重要です。アベレーションは一般に、フラットな部分からずれている割合 (%) で示されます。



アクティブ・プローブ – 信号調整回路網の構成要素として、トランジスタや能動素子が含まれているプローブ。

減衰プローブ – 信号を減衰することによって、実質的にオシロスコープの倍率範囲を増大させるプローブ。例えば、減衰比10:1のプローブでは、オシロスコープの表示を実質的に10倍に拡大します。このようなプローブでは、プローブ・チップに印加される信号を減

衰させることで過倍を実現します。したがって100Vの信号は10:1プローブではピーク・ツー・ピークで10Vに減衰されます。減衰された信号は、オシロスコープの倍率を10倍にすることで、100Vのピーク・ツー・ピーク信号としてオシロスコープに表示されます。

周波数帯域 (BW) – ネットワークまたは回路が、中間域の振幅から3dB以上減衰することなく通過できる連続的な周波数の範囲。

キャパシタンス (容量) – 電荷が蓄積される電気現象。

同相除去比 (CMRR) – 差動プローブの性能であり、差動測定の2つのテスト・ポイント間に共通の信号を除去する能力。差動プローブおよび増幅器の主要な性能指数で、次のように定義されます。

$$CMRR = \left| \frac{A_d}{A_c} \right|$$

ここで、

- A_d = 差動信号の電圧利得
- A_c = 同相信号の電圧利得

電流プローブ – 導体を流れる電流を検出し、相当する電圧信号に変換してオシロスコープで測定するためのデバイス。

ディレーティング – 1つまたは複数の動作変数に基づいて、部品やシステムの定格を下ること。例えば、振幅測定の確度は、測定する信号の周波数によって低下することがあります。

差動プローブ - 差動アンプで2つの信号の差を求めて1つのシングル・エンド信号とし、オシロスコープの1つのチャンネルで測定するためのプローブ。

差動信号 - 対地間ではなく、相互の信号を基準にした信号。

分布素子 (L, R, C) - 導体全体にわたって分散している抵抗およびリアクタンス。分布素子の値は集中素子の値より小さいのが普通です。

電界効果トランジスタ (FET) - ゲート端子の電圧によって、通過する電流量が制御されている素子。

フローティング測定 - 接地電位のかかっていない2点間で行う測定。

接地 - 測定を行うには、信号源から電流を引出す必要があるため、その電流の帰線が必要です。回路接地またはコモンにつながれたプローブ・グランド・リードがこの帰線になります。

ホール効果 - 導電性材料を流れる電流と外部磁場に対して垂直に磁場をかけると、両方に対して垂直な電位が発生すること。

高調波 - 方形波、鋸歯状波形などの周期的な非正弦波形には、波形の基本周波数 (1/周期) と、高調波と呼ばれる基本波の整数倍 (1x, 2x, 3x...) の周波数からなる周波数成分が含まれています。二次高調波の周波数は基本波の2倍、三次高調波は基本波の3倍...のようになります。

インピーダンス - AC信号の流れを障害、制限するプロセス。インピーダンスはΩで表される抵抗成分 (R) と、リアクタンス成分 (容量リアクタンス (Xc) または誘導 (Xl) リアクタンス) で構成されます。インピーダンス (Z) は次のような式で表されます。

$$Z = R + jX$$

振幅と位相に着目すると、振幅 (M) は次のようになります。

$$M = \sqrt{R^2 + X^2}$$

位相φは次のようになります。

$$\theta = \arctan \left(\frac{X}{R} \right)$$

インダクタンス - 回路内または隣接する回路で起きた電流の変化によって、起電力が回路内に誘導されるという電気回路の特性。

ジッター - デジタル信号が、時間的に理想の位置から短期間ずれること。

線形位相 - 印加された正弦波の位相が、周波数の上昇にともなって直線的にシフトする回路網の特性。線形位相シフトの回路網では、非正弦波に含まれる高周波の相対的位相関係が維持されているため、位相との関連で波形が歪むことはありません。

負荷 - 信号源にかかるインピーダンス。オープン回路であれば「無負荷」の状態になります。

負荷効果 - 信号源に負荷をかけて電流を引き出す効果。

ロジック・プローブ - オシロスコープまたはMSO (ミックスド・シグナル・オシロスコープ) で使用し、スレッシュホールド電圧と比較して論理状態 (1または0) を決定するためのデバイス。

低容量プローブ - 入力容量が非常に低い受動プローブ。

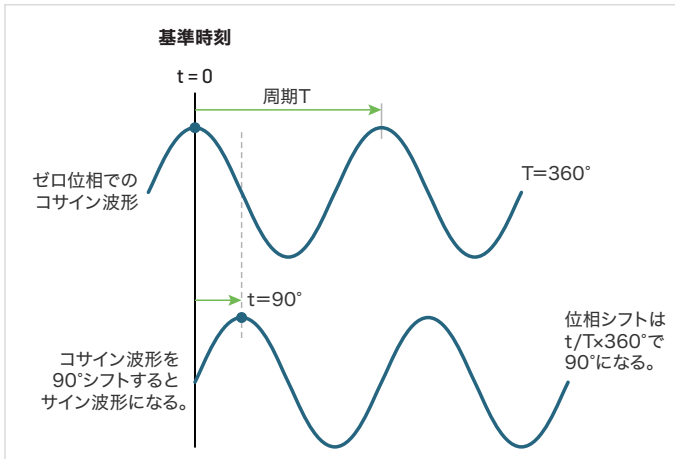
MOSFET - 金属酸化膜半導体電界効果トランジスタ。2種類の主要なFETのうちの1つ。

ノイズ - オシロスコープの表示波形に現れる信号歪みの一種。

光プローブ - 光信号を検出し、相当する電圧信号に変換してオシロスコープで測定するための機器。

受動プローブ - 回路網に相当する部分が抵抗素子 (R)、誘導素子 (L)、または容量素子 (C) のみで構成され、能動素子が含まれていないプローブ。

位相 - 基準点や基準波形に対する、波形や波形成分の時間的位置を表わす手段。例えば、コサイン波は定義上ゼロ位相であり、正弦波はコサイン波を90度位相シフトさせたものです。



プローブ – テスト・ポイント（信号源）とオシロスコープを物理的かつ電氣的に接続する機器。

プローブ・パワー – オシロスコープ、プローブ増幅器、被テスト回路などの電源からプローブへ供給される電力。一般に、電力が必要なプローブは何らかの能動素子を有しているため、アクティブ・プローブと呼ばれます。

リアクタンス – AC信号に反応し、信号周波数に基づいてAC信号電流の流れを制限するインピーダンス要素。キャパシタ (C) によってAC信号にかかる容量リアクタンス (単位: Ω) は、次のような関係で表されます。

$$X_C = \frac{1}{j\omega C}$$

ここで、

- X_C = 容量リアクタンス (単位: Ω)
- ω = 角周波数 (ラジアン/秒)
- C = キャパシタンス (単位: F)

インダクタ (L) によってAC信号にかかる誘導リアクタンス (単位: Ω) は、次のような関係で表されます。

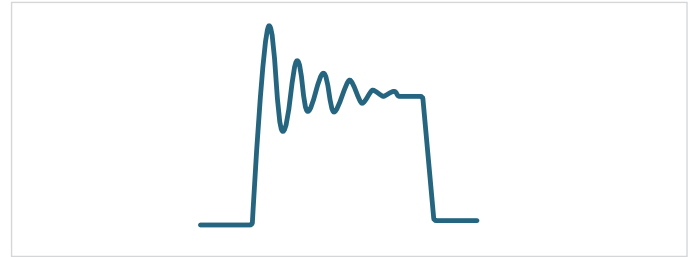
$$X_L = j\omega L$$

ここで、

- X_L = 誘導リアクタンス (単位: Ω)
- ω = 角周波数 (ラジアン/秒)
- L = インダクタンス (単位: H)

リードアウト – オシロスコープ画面に表示され、波形の倍率や測定結果などを提供する英数字の情報。

リングング – 回路が共振した際に発生する変動。一般には、パルスに現れる減衰正弦波の変動がリングングと呼ばれます。



立上り時間 (Tr) – パルスの上昇遷移において、振幅レベルが10%から90%まで上昇するのに要する時間。

シールドイング – 回路と外部ノイズ源の間に、接地したシート状の導電物質を配置することで、回路にノイズ信号が入らないよう遮断すること。

信号アベレージング – 複数の繰り返し波形を取込み、そこから平均波形を算出すること。

信号忠実度 – 信号が、プローブ先端で検出された状態のまま、オシロスコープ入力端子で複製できること。

シングルエンド信号 – 対地間の信号。

SNR (信号対ノイズ比) – 信号振幅とノイズ振幅の比率。単位はdBで、通常は次のように表されます。

$$SNR = 20 \log \left(\frac{V_{\text{signal}}}{V_{\text{noise}}} \right)$$

ソース – 信号電圧や電流の発生点/要素。また、FET(電界効果トランジスタ)の要素の一つ。

ソース・インピーダンス – ソースの反対側から見たインピーダンス。

時間領域反射率測定 (TDR) – 伝送経路に高速パルスを印加してパルスの反射を解析することで、伝送経路における不連続の位置や種類(障害、不整合など)を判断する測定技術。

お問い合わせ先：

オーストラリア 1 800 709 465
オーストリア 00800 2255 4835
バルカン諸国、イスラエル、南アフリカ、その他ISE諸国 +41 52 675 3777
ベルギー 00800 2255 4835
ブラジル +55 (11) 3530 8901
カナダ 1 800 833 9200
中央／東ヨーロッパ、バルト海諸国 +41 52 675 3777
中央ヨーロッパ／ギリシャ +41 52 675 3777
デンマーク +45 80 88 1401
フィンランド +41 52 675 3777
フランス 00800 2255 4835
ドイツ 00800 2255 4835
香港 400 820 5835
インド 000 800 650 1835
インドネシア 007 803 601 5249
イタリア 00800 2255 4835
日本 81 (3) 6714 3086
ルクセンブルク +41 52 675 3777
マレーシア 1 800 22 55835
メキシコ、中央／南アメリカ、カリブ海諸国 52 (55) 88 69 35 25
中東、アジア、北アフリカ +41 52 675 3777
オランダ 00800 2255 4835
ニュージーランド 0800 800 238
ノルウェー 800 16098
中国 400 820 5835
フィリピン 1 800 1601 0077
ポーランド +41 52 675 3777
ポルトガル 80 08 12370
韓国 +82 2 565 1455
ロシア +7 (495) 6647564
シンガポール 800 6011 473
南アフリカ +41 52 675 3777
スペイン 00800 2255 4835
スウェーデン 00800 2255 4835
スイス 00800 2255 4835
台湾 886 (2) 2656 6688
タイ 1 800 011 931
イギリス、アイルランド 00800 2255 4835
アメリカ 1 800 833 9200
ベトナム 12060128
2022年2月現在



www.tek.com/ja

テクトロニクス／ケースレイインスツルメンツ

各種お問い合わせ先：<https://www.tek.com/ja/contact-tek>

技術的な質問、製品の購入、価格・納期、営業への連絡、修理・校正依頼
〒108-6106 東京都港区港南2-15-2 品川インターシティB棟6階