



プロービングで失敗しないための オシロスコープ応用講座

組み込みエンジニアにとって、オシロスコープは必須のアイテムです。ところが実際にオシロスコープを使って測定を始めると、すぐに悩ましい問題に直面します。それは、「測定点とオシロスコープをどうやって接続するか」（どうやってプロービングを行うか）という問題です。正しい測定のためには、正しくプロービングを行うことが必要です。そこで本連載では、この「プロービング」について解説していきます。

マイコミジャーナルで
驚異の400,000
ページビュー突破の
人気連載、
ついに冊子化!



第1回 2008/08/19 連載
いい加減なプロービングが
悲劇を招く

→ 1 ページ



第2回 2008/08/22 連載
受動プローブを
使いこなそう

→ 2 ページ



第3回 2008/08/26 連載
グラウンドリードの罠

→ 4 ページ



第4回 2008/08/29 連載
注意しないと壊れるぞ!!
- アクティブプローブ

→ 6 ページ



第5回 2008/09/02 連載
差動プローブを
使う

→ 9 ページ



第6回 2008/09/05 連載
注意しないと命にかかわるぞ!!
- 高電圧プローブ

→ 13 ページ



第7回 2008/09/09 連載
フローティング測定に最適
- 高電圧差動プローブ

→ 16 ページ



第8回 2008/09/16 連載
電流波形を観測する
電流プローブ

→ 19 ページ

1

いい加減なプロービングが悲劇を招く

入力コネクタと同軸ケーブル

多くのオシロスコープは同軸構造の入力コネクタ (写真1) を備えているので、測定点も同軸構造の出力コネクタならば、測定点とオシロスコープを同軸ケーブル (写真2) により接続できます。信号伝送において、これは理想的な接続です (注1)。ところが多くの場合、測定点は同軸構造の出力コネクタではありません。スクウェアピンであったり、ICのリード (ICの"足") であったり、ボードのビアであるため (写真3)、機械的に接続するのさえ容易ではありません。機械的な接続ができたとしても、次にはさらに複雑かつ困難な電気的接続問題が浮上します。



▲写真1 入力コネクタ ▲写真2 同軸ケーブル ▲写真3 測定点—ここどうやって接続するかが問題

注1 ただし、インピーダンス整合に注意を払う必要がある。伝送経路のインピーダンスは同軸ケーブルのインピーダンスにも支配される。測定点の出力インピーダンス、ケーブルのインピーダンス、オシロスコープの入力インピーダンス、それぞれが整合している必要がある。整合していない場合は、十分な配慮を要する。

2本のケーブルで失敗

測定点と接続し、信号をオシロスコープに導くことを「プロービング」と呼びます。オシロスコープで扱う信号の周波数を考えると、多くの場合は2本のライン (シグナルラインとグラウンドライン) による伝送がなされます (注2)。測定点と接続し、信号をオシロスコープに導くことを「プロービング」と呼びます。オシロスコープで扱う信号の周波数を考えると、多くの場合は2本のライン (シグナルラインとグラウンドライン) による伝送がなされます (注2)。2本の接続で済むのですから、そこらに転がっている2本のケーブル (写真4) を使ってみてはどうでしょう。果たして、使い物になるのでしょうか。

実際にテスタケーブルでプロービングし、そのケーブルを経由したパルス波形を見てみましょう (図1)。本来のパルス波形は上の波形で、立上り直後がほぼ直角で綺麗な形です。テスタケーブルを通過した波形は下の波形です。パルスが立ち上ってから数100nsくらいの時間、波形は大きな振動 (リングング) を繰り返し、本来の波形とは違った形に歪んでいます。これは周波数の異な



▲写真4 このケーブルは果たして使いものになるのだろうか

注2 20GHzくらいの周波数にもなると、薄皮管と呼ばれる中空の金属筒が使われることもある。

るサイン波の振幅を比べてみてもよく分かります (図2)。信号発生器のサイン波の信号振幅を1Vに保ちながら、その周波数だけを変化させてみました。信号発生器からの振幅は一定なのにテスタケーブルを通過した振幅は大きく変化してオシロスコープに伝わったことが分かります。約4MHzを超えると振幅が変化を始め、17MHzで約2倍、24MHzではなんと7倍以上 (誤差+700%) もの大きさに見えます。その後34MHzで約1Vの振幅に戻り、それ以上の周波数では信号はケーブルを通過できず、振幅が減少し続けます。この動きを周波数特性で描くと図3のようになります。

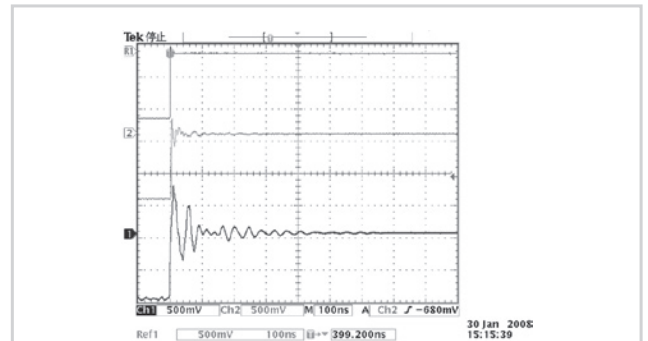


図1 写真4のケーブルを使用したときの波形上の波形が信号発生器からのもので、下の波形がケーブルを使用したもの。下の波形は振動 (リングング) が生じている

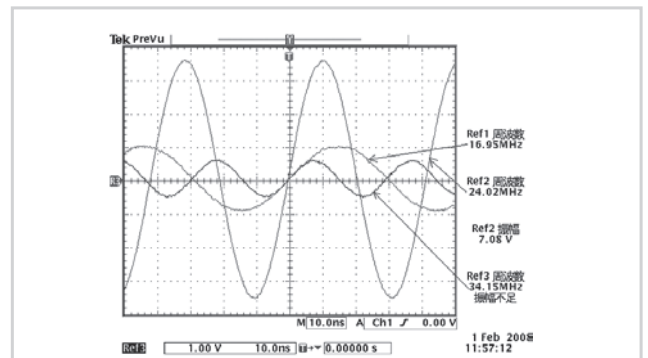


図2 写真4のケーブルを使用したときの波形周波数が変わると振幅が大きく変動する

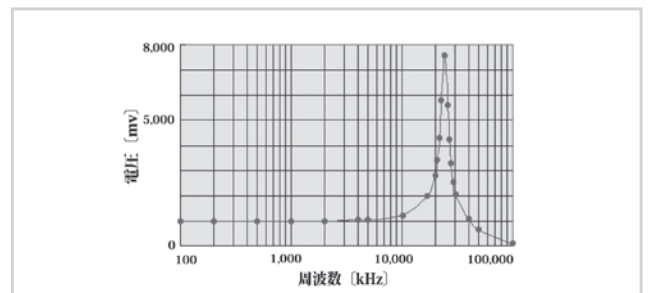


図3 写真4のケーブルの周波数特性

プローブに関する基本的な理解

測定点とオシロスコープは、ただつなげば良いというものではないのです。そこで、信号の正しい伝送ができるよう十分に考慮された「プローブ」と呼ばれる接続ツールが登場することになります。その詳細は次号にゆずり、ここではプローブに関する認識を新たにしておきましょう。

誤解を恐れず言いますが、「完璧なプローブなど世の中にはない」のです。言い換えると、プローブを被測定回路にプロービングした時点で「被測定波形は変形する」のです。その変形を最小にする

べく、被測定波形を知り、どの種類のどの性能のプローブを選び、どのような接続方法でどう使うべきかを知らなければなりません。"プロービング"とはプローブの不完全を補うためのノウハウのかたまりなのです。このノウハウは「知っていればさらに良い」ものではなく、「知らなかったために失敗し、自分の信用を失う」ほど怖いものなのです。この連載では、プロービングで失敗しないよう、その謎を解き明かし、正しいプロービングテクニックについて解説していきます。



いい加減なプロービングをすると、後で大変な事態に陥ることになる

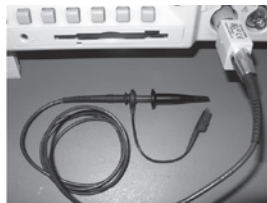
2008/08/22連載

2

受動プローブを使いこなそう

受動プローブ

オシロスコープで使用されるプローブの中で、もっとも汎用的なプローブは「受動プローブ」(または受動電圧プローブ)と呼ばれるものです(写真1)。受動プローブは、多くのオシロスコープに標準で添付されています。信号の正しい伝送ができるよう十分に考慮されたプローブなので、これさえ使えば何の苦勞もなく正しいプロービングができるかと言え、実はそうではありません。受動プローブという正しい信号伝送を可能とするツールが提供されているだけで、正しい測定のためには正しく使いこなすノウハウを知る必要があるのです。



▲写真1 受動プローブ

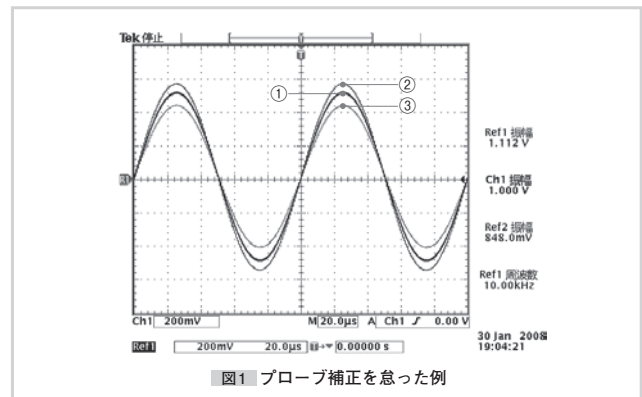


図1 プローブ補正を怠った例

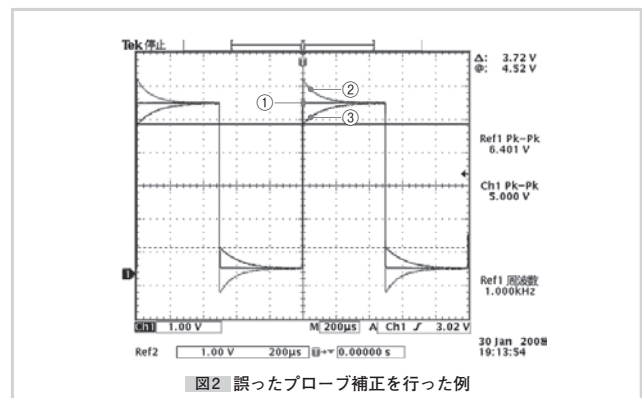


図2 誤ったプローブ補正を行った例

プローブ補正による失敗例

まず、受動プローブはオシロスコープとの組み合わせによる使用前調整(これを「プローブ補正」という)が必須です。これを怠ると、受動プローブを使う意味がありません。それどころか、受動プローブ自身が大きな測定誤差の発生原因になってしまうのです。図1に実例を示します。

図1は発信器から発生させた周波数10kHz、振幅1Vの安定したサイン波(①の波形)を、補正不良のプローブで観測した例です。補正不良である上下2つのサイン波(②と③の波形)は振幅が違います。大きいものは1.112V(誤差+11%)、小さいものは0.848V(誤差-15%)と測定されています。

続いて、図2をご覧ください。図2は、周波数1kHz、振幅5Vの安定したパルス波であるにもかかわらず、上下2つのパルス波(②と③の波形)の形そのものが異なります。先端部の振幅に注目してみると、本来5Vのはずの電圧が、上の波形は6.4V、下の波形は3.72Vとなっています。プローブ補正がずれた場合、測定結果はこんなに大きな誤差を生じてしまうのです(図3)。

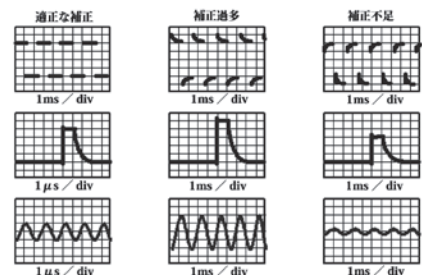


図3 プローブ補正の影響
受動プローブの高域周波数特性をフラットに保つように調整する必要がある

振幅に差が出る理由

このように振幅に差が出る理由は、プローブとオシロスコープの組み合わせられた周波数特性が平坦ではないからです。図4にプローブ補正が適切でない場合、周波数特性がどのくらい平坦でなくなるかを示します。1kHzを超えると影響が現れ、平坦ではなくなります。特に10kHz以上になると大きな誤差が見られます。プローブ補正という使用前調整がなされていない場合、本来1000mVであるはずの電圧が-15%にも+10%にも見えてしまうのです。

特性が平坦でなくなる理由

受動プローブがこのような性質をもつ原因は、その構造にあります。受動プローブは、オシロスコープの入力部をそのまま発展拡大したものなのです。受動プローブにより、オシロスコープはさらに大きな電圧を測定できるうえに、プローブを接続した際の負荷に与える影響をおおいに低減することができます。したがって受動プローブとオシロスコープの関係は密で、共に1つの電気回路を形成します。この回路を非常に簡素に表すと（これを等価回路という）、図5のように描けます。

この電気回路において平坦な周波数特性を得る条件は、式1が成立することです。構成要素のR1とR2は固定ですが、オシロスコープの入力容量C2はオシロスコープの型名ごとに異なる値で、チャンネルによっても異なります。このため、式1が成立するためには、つねにプローブ側においてC1を調整する必要があります。これがプローブ補正です。調整することにより、初めて式1の関係が成立し、平坦な周波数特性が実現できます。

$$R1 \cdot C1 = R2 \cdot C2$$

▲式1 平坦な周波数特性を得る条件

プローブ補正の方法

プローブ補正のための作業は簡単です。オシロスコープのフロントパネルにあるProbe Compen信号をプローブに入力し、調整用ドライバを回して図6の真ん中の波形のように、先端部を直角にするだけです（写真2）。この調整は受動プローブとオシロスコープを組み合わせたときに毎回必要な調整です。例えば受動プローブを職場の同僚に貸して、戻ってきたときなどは要注意です。同僚はほかのオシロスコープに合わせてプローブ補正をしてしまったかもしれません。つまり、C1の値が変わっているかもしれないのです。受動プローブをオシロスコープに接続するたび、プローブ補正を行うよう習慣づけてください。



▲写真2 プローブ補正の例

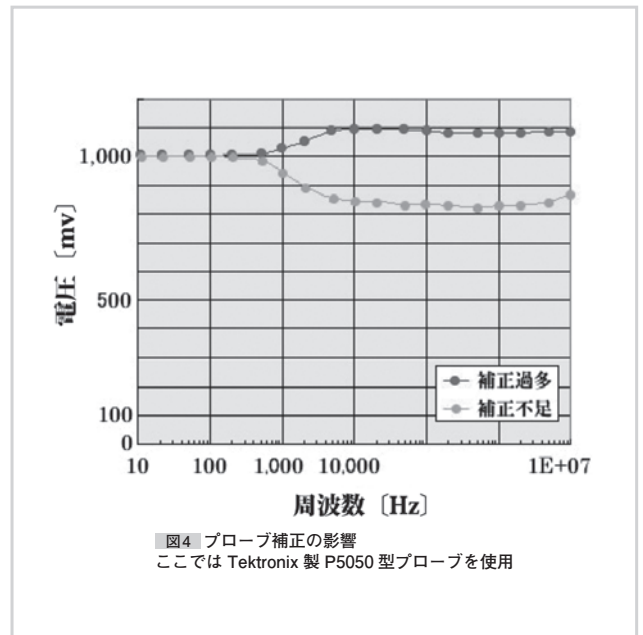


図4 プローブ補正の影響
ここでは Tektronix 製 P5050 型プローブを使用

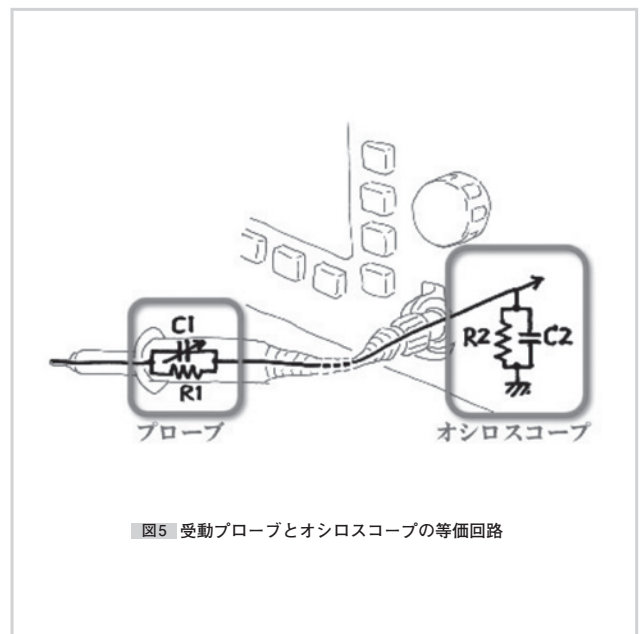


図5 受動プローブとオシロスコープの等価回路

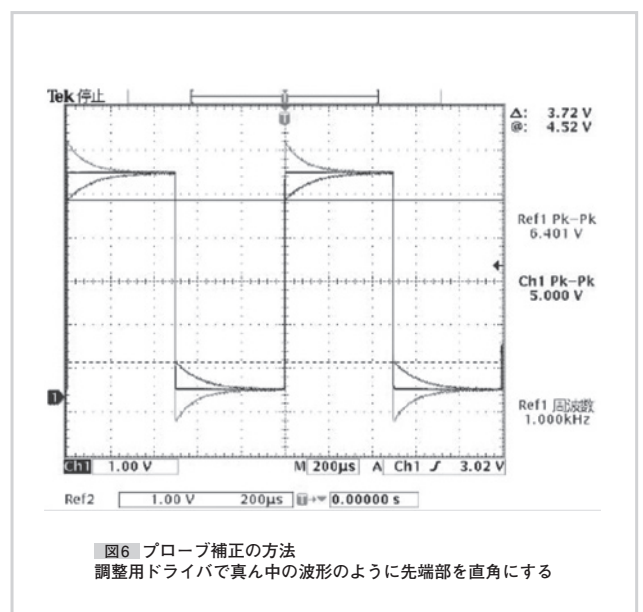


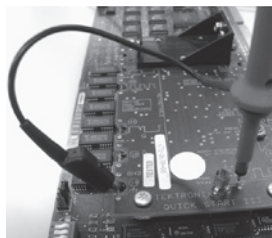
図6 プローブ補正の方法
調整用ドライバで真ん中の波形のように先端部を直角にする

3

グラウンドリードの罠

グラウンドリードによる失敗

測定点へのプロービングにおいて、多くの場合は付属のグラウンドリードのワニ口クリップとプローブ先端針を接続することでしょう(写真1)。ところが周波数が高くなると、この接続は問題を生じます。実例をご覧ください(図1)。プローブのグラウンドリードを使ってサイン波信号発生器につなぎ、オシロスコープで波形振幅を観測しました。信号発生器の信号振幅は1Vに保ちながら、その周波数だけを変化させてみました。信号発生器からの振幅は一定なのに、プローブを通過した振幅は大きく変化していることが分かります。50MHzを超えると振幅が変化を始め、59.9MHzと100.1MHzではサイン波が極小値と極大値をとっています。この



▲写真1 ローピングの例
グラウンドリードのワニ口クリップとプローブ先端針を接続

周波数の振幅を測定したら、その結果は-20%、+50%もの誤差を生じます。ちなみに理想的なプロービングをした場合のプローブ通過波形は図2のようになります。周波数が変わっても、振幅はほとんど変わりません。パルス波の形の変化でもグラウンドリードの影響を見ることができます。理想的な接続を行った②の波形に比べ、グラウンドリードを使った①の波形は大きく振動しています(図3)。この状態でマスクテストをしても、テストはパスしないでしょう。グラウンドリードによる影響は周波数特性でも見ることができます。理想的なプローブ接続における特性はほとんど平坦なはずですが、50MHzあたりから振幅に変化が表れ、60MHz付近において大きな谷を生じ、100MHzを越えると激しく特性が変動しています(図4)。

ここで示した例は出力インピーダンスが50Ωの信号発生器を使った場合の波形ですが、グラウンドリードの使用が測定結果に深刻な影響を与えることは事実です。一概には言えませんが、数10MHzを超える周波数成分を持つ信号のプロービングにおいては、付属のグラウンドリードは要注意です。

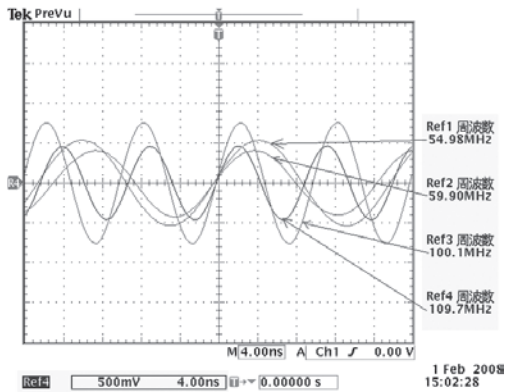


図1 グラウンドリードを使ったプロービングの失敗例

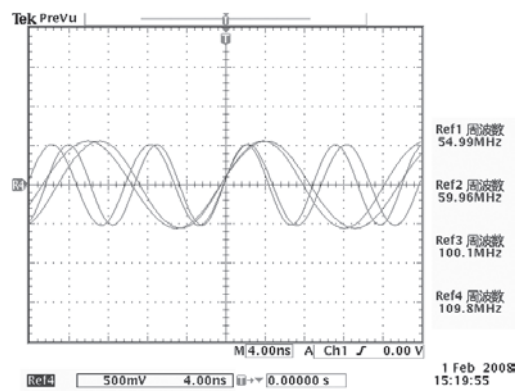


図2 理想的なプロービングの例

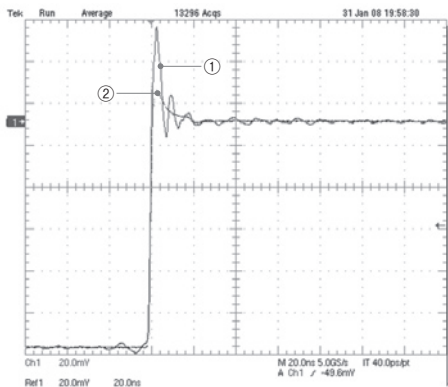


図3 グラウンドリードを使用した際のパルス波 (①の波形)

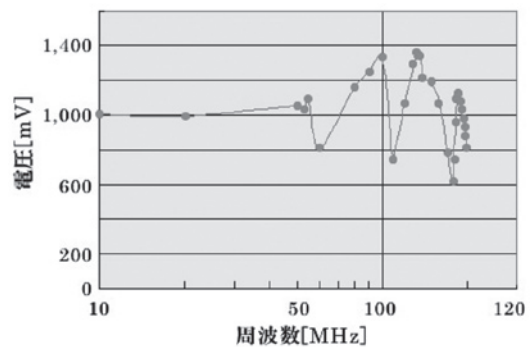


図4 グラウンドリードを使用した際の周波数特性

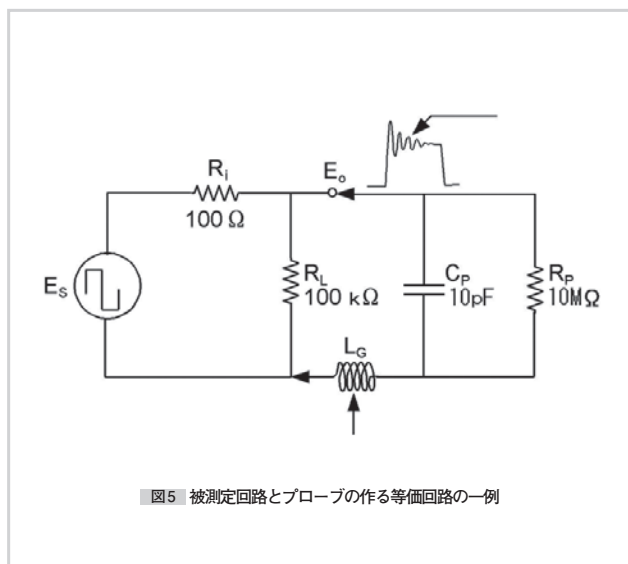
特性悪化の理由

ここで「グラウンドリードを標準付属しておきながら、何を言う!」とお怒りにならず、その原理を知ってください。原理を知れば取るべき対応策が見えてきます。プロービングにおいて、被測定回路とプローブの作る等価回路の一例を示します(図5)。 L_g は受動プローブのグラウンドリードの誘導成分(インダクタンス)、 C_p は受動プローブの入力容量成分(キャパシタンス)です。これらの L_g と C_p が共振(固有の周波数において大きなエネルギーの流入出現象)を起こし、元信号 E_s とは異なる波形 E_o を作り上げてしまうのです。そこで、この共振を防ぐことが肝心です。プロービングにおける共振を防げば、元波形に忠実な波形が得られ、正しい測定ができます。なお、共振は L_g と C_p との直列共振です。共振周波数は式1により求められます。 L_g を小さくするか、 C_p を小さくすれば改善されます(固有の共振周波数を高くし、測定機器の周波数帯域の帯域外へ押し出してしまふ)。入力容量の小さな受動プローブを選ぶことにより、 C_p は幾分小さくできますが、だいたい10pF程度の値です。10倍も改善するのは困難です。ところが L_g はグラウンドリードの長さ(1mmあたり数nHくらい)、短くしさえすれば、10倍くらいの改善が容易です。

$$\text{共振周波数} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_g \times C_p}}$$

L_g : プローブのグラウンドリードのインダクタンス
 C_p : プローブの入力容量

▲式1 共振周波数



受動プローブ特性改善アダプタ

写真2と写真3の先端アダプタをごらんください。これは短いグラウンドリードアダプタです。通常のグラウンドリード(写真4)と比べればその短さは明らかです。これらを使った測定では大きな改善が見られ、サイン波の振幅誤差は小さく、パルス波の変形も極小になります。受動プローブ接続ポイントをあらかじめ

めボードに設けておけば、理想的なプロービングとなります(写真5)。つまり、グラウンドリードによる失敗は、受動プローブのグラウンドリード長を短くすることで防げます。



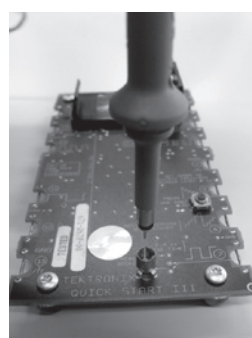
◀写真2



◀写真3



◀写真4



◀写真5 理想的なプロービング

受動プローブの2つの限界

しかし、受動プローブには逃れられない問題が2つ残ります。1つ目は周波数帯域です。およそすべての受動プローブの周波数帯域は500MHz止まりなので、それより高い周波数は観測できません。2つ目は10pFもある受動プローブ自体の入力容量です。受動プローブの入力容量が波形を変形させる場合があります。これらが受動プローブの限界です。そこで、さらに高い周波数の測定や軽い負荷を実現できる新たなプローブが求められます。

4

注意しないと壊れるぞ!! —アクティブプローブ

今回は「アクティブプローブ」(「FETプローブ」とも呼ばれる)について述べていきます。アクティブプローブは高価で壊れやすいため、エキスパートだけが使いこなすことのできるプローブです。

高性能なアクティブプローブ

受動プローブの限界を超え、さらに高い周波数の測定や軽い負荷を実現できるプローブが「アクティブプローブ」です(写真1)。アクティブプローブは、先端の入力部に半導体素子を用いています。受動プローブ(本連載第2回目2ページ~を参照)のような構造ではないため、面倒なプローブ補正も不要です。半導体素子の小さい入力容量が寄与して、アクティブプローブは自体の入力容量も非常に小さな入力容量値を実現しています。受動プローブに比べると優に10倍以上の改善が図れ、1pFより小さな入力容量のアクティブプローブもあります。



▲写真1 アクティブプローブ — グラウンドを基準としたシングルエンド信号を取り扱うプローブ。「FETプローブ」とも呼ばれる

$$Z = \frac{1}{2\pi f C_p}$$

f: 周波数
C_p: プローブの入力容量
Z: 容量 C_p による負荷

▲式1 プローブの入力容量による負荷

本連載第1回目(1ページ~を参照)に述べたように、プローブを被測定回路に接触させただけで、多かれ少なかれ波形に影響を与えます。その一因が入力容量です。周波数が高くなると入力容量は重い負荷となり、被測定回路の動作を変えます(式1)。

グラウンドリードのインダクタンスと共振回路を形成し、被測定波形を変形させます(本連載第2回目2ページ~を参照)。アクティブプローブはこれらの原因である入力容量 C_p が小さいため、高い周波数においても優れた特性が期待できます。高い周波数成分を含む高速パルス波形の観測において、同じ長さのグラウンドリードを使い、受動プローブとアクティブプローブの特性を比べて見ましょう(図1)。受動プローブの波形(上の波形)に比べ、アクティブプローブの波形(下の波形)はパルス立ち上り部のリングングが小さくなり、パルスをより忠実に再現しています。同様に周波数特性を比較して見ましょう(図2)。15cmのグラウンドリードが付いた受動プローブでは50MHzを過ぎたあたりから振幅が変化し始めています。一方、やはり同じ15cmのグラウンドリード付きのアクティブプローブは120MHzあたりまでは

振幅の変化がほとんどなく、振幅誤差も3%以内に収まっています。受動プローブに比べ、はるかにグラウンドリードの影響を受けにくいことが分かります。

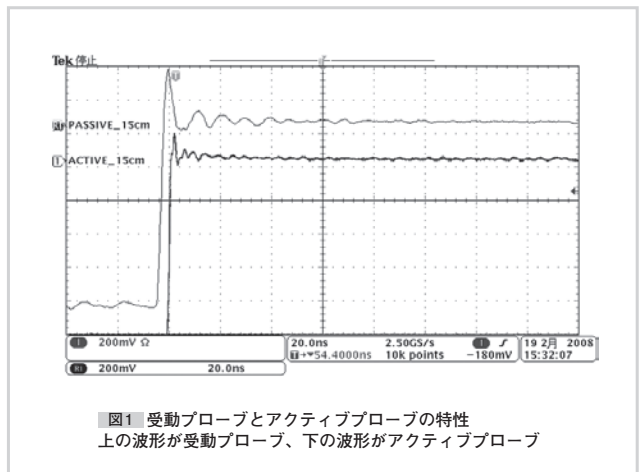


図1 受動プローブとアクティブプローブの特性
上の波形が受動プローブ、下の波形がアクティブプローブ

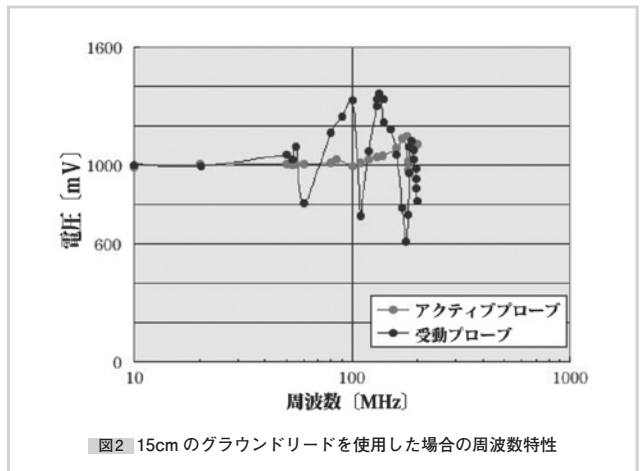


図2 15cmのグラウンドリードを使用した場合の周波数特性

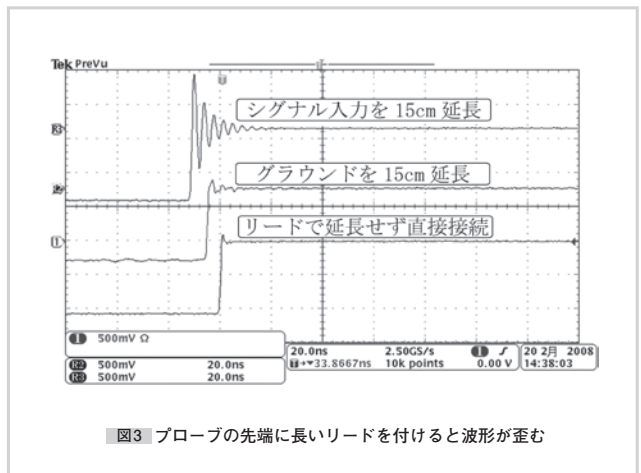
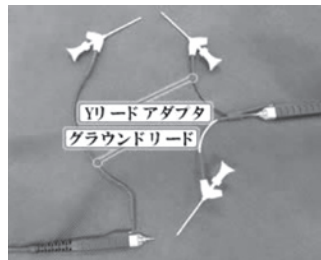


図3 プローブの先端に長いリードを付けたと波形が歪む

プローブ先端を延ばすことによる失敗例

これで入力容量が10倍くらい改善し、グラウンドリードの延長による影響を受けにくくなるのが分かりました。しかし、これに安心して長いリードを使用するのは要注意です。特にグラウンドリードではなく、プローブの先端（シグナル入力部）に長いリードを付けると、リードのインダクタンスが共振を起こしやすく、容易に波形が歪みます（6ページ図3）。測定ポイントがグラウンドから離れている場合は、グラウンドリード側を延長するように努め、プローブ先端の延長は最小にとどめましょう。この観点から、Yリードアダプタではプローブ先端を延長することになるので、使用には十分な注意が必要です（写真2）。Yリードアダプタを使用して取り込んだパルス波形は、大きなリンギングを生じます（図4）。

周波数特性も見てみましょう。Yリードアダプタを使った周波数特性は90MHzを過ぎると共振が始まり、288MHzでは17.4dBものピーク値となります。このアクティブプローブ本来の素直な周波数特性と比べれば、いかにリードの延長が特性を悪化させるかが分かります（図5）。Yリードアダプタを使用する場合は、数十MHzまでの周波数範囲にとどめる必要があります。



▲写真2 Yリードアダプタで延長したプローブとグラウンドリードで延長したプローブ

抵抗器を挿入して失敗を回避

そもそも、アクティブプローブの扱う周波数は受動プローブのそれに比べずっと高い周波数なので、リードの延長は極力避けたいものです。しかし延長せざるを得ない場合は、まずグラウンドリード側を延長しましょう。プローブ先端側を延長しなくてはならない場合は、20～60Ωの小抵抗を介して信号をプローブ先端に入力する効果的な手法があります（図6）。

図6の例では、Yリードアダプタによる大きな共振波形（①の波形）に比べ、Yリードアダプタに60Ωの小抵抗を直列挿入した波形（②の波形）は、共振がダンプされ共振波形の振幅を小さくできます。

見分け方のポイント

この例では入力した波形がきれいな基準信号だと分かっているので、歪んだ波形が現れた場合、プロービングの問題だと分かります。しかし、実際のプロービングにおいては、現れた波形が本来の形なのか、それともLC共振による創られた形なのかを見極めなければなりません。LC共振波形を実波形だと誤認しては大失敗です。

見分け方は簡単です。延長したリードやYリードアダプタを指で触れるかひねるかして、リードの位置や引き回しを変えてみてください。共振による波形ならば、リードのインダクタンスが変化し、歪み方が変わります。変わるようなら本当の波形ではなく、LC共振でつくられた波形です（図7）。

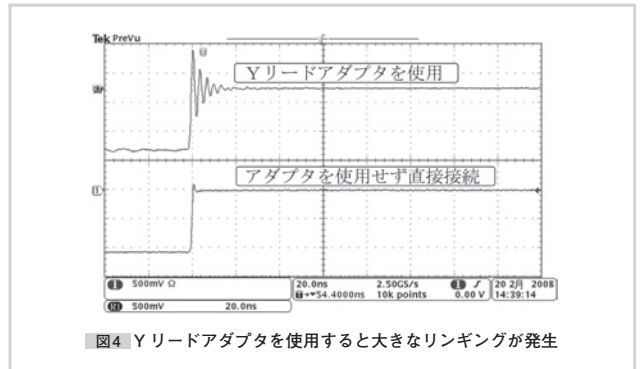


図4 Yリードアダプタを使用すると大きなリンギングが発生

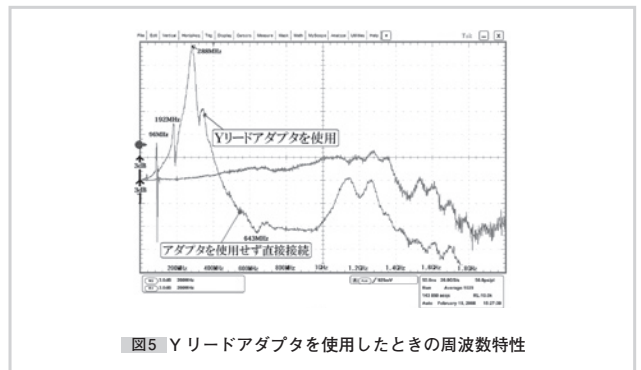


図5 Yリードアダプタを使用したときの周波数特性

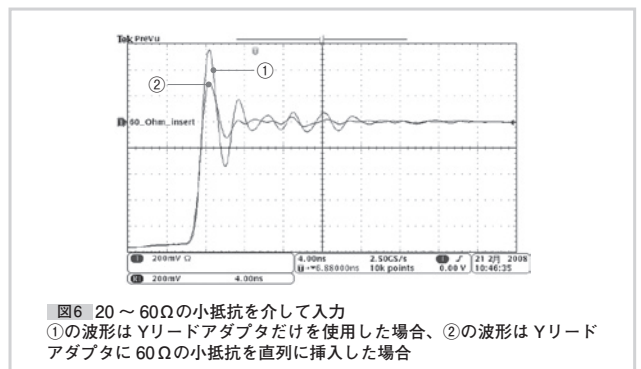


図6 20～60Ωの小抵抗を介して入力
①の波形はYリードアダプタだけを使用した場合、②の波形はYリードアダプタに60Ωの小抵抗を直列に挿入した場合

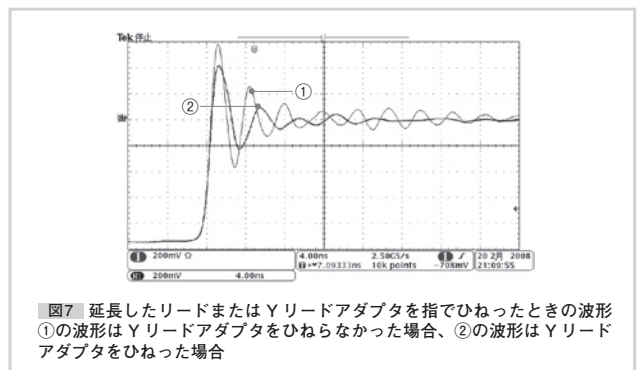


図7 延長したリードまたはYリードアダプタを指でひねったときの波形
①の波形はYリードアダプタをひねらなかった場合、②の波形はYリードアダプタをひねった場合

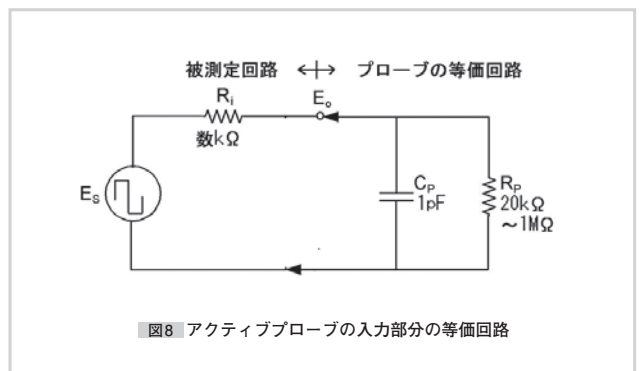


図8 アクティブプローブの入力部分の等価回路

入力抵抗で失敗

アクティブプローブの入力を最もシンプルな等価回路で描くと、入力抵抗と入力容量の並列回路となります(7ページ図8)。入力容量 C_p が小さいことは既に説明しましたが、アクティブプローブで注意しなくてはならないことのひとつは、入力抵抗 R_p が多少小さく、20k Ω ~1M Ω (機種による) くらいの値だということです。被測定回路の出力抵抗 R_i が大きな場合は注意が必要です。本来の振幅 E_s が分圧され、実際より小さな振幅 E_p に見えます(式2)。

$$E_p = E_s \times \frac{R_p}{R_i + R_p}$$

▲式2 ただし、 C_p の無視できる低い周波数において成立

入力抵抗 R_p が20k Ω のアクティブプローブを例に取れば、出力抵抗 R_i が4.7k Ω の回路を測ると、19%も小さく見えます。省電力のフラットパネル駆動回路やC-MOS水晶発信回路等の高インピーダンス回路にプロービングする際には、注意が必要です。しかし、全周波数帯域に渡る入力抵抗(入力インピーダンス)として考えた場合、アクティブプローブは優秀です。低い周波数では受動プローブ(10M Ω という高い入力抵抗により負荷が軽くなる)が魅力的ですが、高い周波数になると瞬間に低下します。一方でアクティブプローブは入力インピーダンスがあまり低下しないので、高い周波数においても軽い負荷となり、被測定回路に与える影響を小さくできます(図9)。

壊れるぞ! —大きな振動は加えない

さらに注意しなくてはならないことは、アクティブプローブに大きな振幅を印加しないことです。プローブ入力端子がほぼ半導体素子に直結された構造のため、大きな振幅の波形を加えると壊れます。ダイナミックレンジ $\pm 4V$ 、非破壊電圧 $\pm 30V$ と規定されたアクティブプローブに、実際に大きな振幅の波形を入力してみましょう。+5Vを超えると頭のつぶれが目立ち始め、+6.6V、+10Vの振幅では完全に形が歪んでいます(図10)。

振幅が非破壊電圧+30Vを超えたなら、このアクティブプローブは壊れます。一側もほぼ同じように歪み、-30Vを超えたら壊れます。つまり、このアクティブプローブに印加する波形は-4V~+4V、8Vp-pのダイナミックレンジ内に収まる小さな波形でなくてはなりません。ダイナミックレンジを超えると波形は歪んでしまい、正しい測定ができません。

壊れるぞ! —静電気に注意

このアクティブプローブの例では、壊れてしまう電圧(非破壊電圧)はたった $\pm 30V$ です。"バチッ"と放電音のするほどの静電気が印加されるとひとたまりもありません。「音がしなければ大丈夫」などと夢にも思わないでください。放電音がなくても、静電気放電はあちらこちらで発生しています。たった数十Vの静電気放電によってアクティブプローブは簡単に壊れるものなのです。静電気対策用リストバンドは万能ではありません。ケーブルに溜まった静電気や、ボードの一部に留まる静電気に対しては、役に立たないこともあります。測定点の静電気の放電を行った後、プロービングする必要があります。

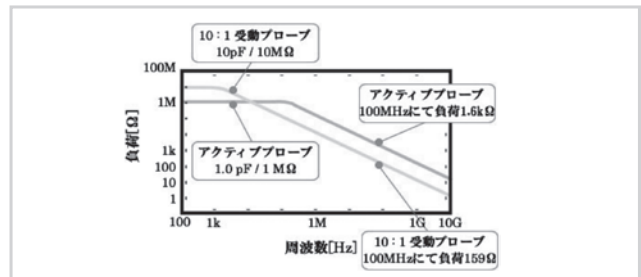


図9 アクティブプローブは高い周波数において被測定回路に与える影響を小さくできる

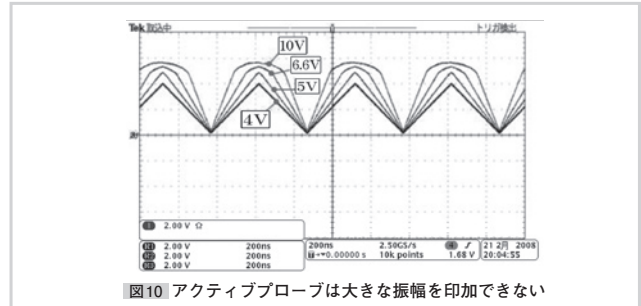


図10 アクティブプローブは大きな振幅を印加できない

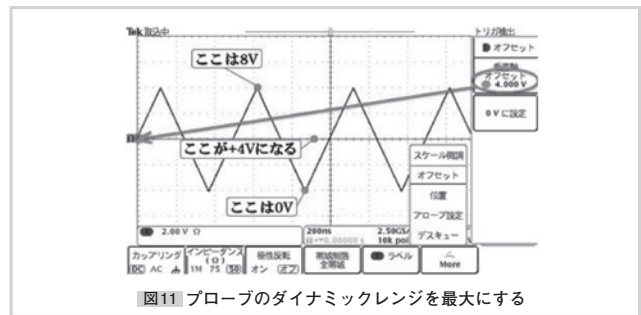


図11 プローブのダイナミックレンジを最大にする

入力範囲を拡大する方法

アクティブプローブを歪ませずに印加できる電圧範囲(ダイナミックレンジ)は小さく、この例ではたった $\pm 4V$ です。0~+5VのTTL信号さえその範囲を超えてしまいます。このようなアクティブプローブを使ってTTL信号を測る手法があります。それは、オシロスコプのオフセット機能を使う手法です。 $\pm 4V$ 、8Vp-pのダイナミックレンジを正方向、負方向にシフトできるのです。つまり、8Vp-pを-8V~0Vにも0~+8Vにもできるのです。図11は、オシロスコプのオフセット電圧を+4Vと設定し、+4Vを中心に $\pm 4V$ 、つまり0V~+8Vの範囲に設定した例です。こうすれば、0~5VのTTL信号は無理なく測定できます。

アクティブプローブを使えるのはエキスパートだけ

アクティブプローブは安価ではありません。壊さないために、波形振幅がプローブの限界を超えていないか、静電気破壊の恐れはないか、常に注意を払い続ける必要があります。それができるエキスパートだけが、アクティブプローブの優れた性能を享受できます。使用に際しての煩わしさを加味しても、アクティブプローブは大いに価値のあるプローブです。その高い性能は積年の問題を解決し、大きな利点をエンジニアにもたらします。

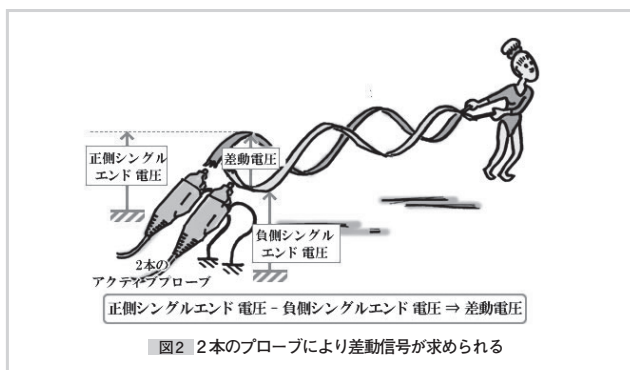
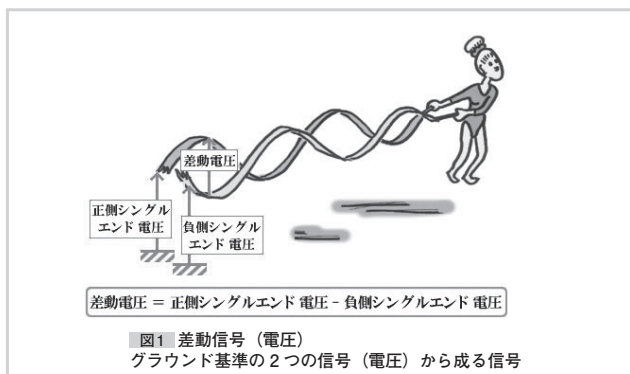
5

差動プローブを使う

今回は差動プローブについて述べていきます。差動プローブを使いこなすには熟練した技術が必要です。くれぐれも静電気などで壊さないよう、慎重に扱ってください。

差動信号が主流

USBやEthernet、SATAからPCI-Expressまで、今日の多くの信号は、数々のメリットを有する「バランス伝送」と呼ばれる方式で伝送されます。バランス伝送にはペアとなったワイヤが使われており、そこを極性が互いに反転した差動信号(図1)が流れます。この差動信号は、既述のアクティブプローブ(本連載第4回目6ページ~を参照)を使ってプロービングできますが、いくつかの困難が伴います。アクティブプローブはグラウンドを基準に信号を測定するプローブなので、2本の信号線を通る2つの信号をプロービングするためには、2本のアクティブプローブが必要です。オシロスコープのチャンネルも2つ占有します。2本のプローブからの信号は、オシロスコープ機能(MATH)の引き算(正側シングルエンド電圧-負側シングルエンド電圧)により、ひとつの差動信号波形に合成しなくてはなりません(図2)。この引き算においてプローブに特性差があれば、その波形は正しく表示されません。特に高い周波数においては2本のプローブの特性に差が生じやすく、波形品質が劣化しがちです。

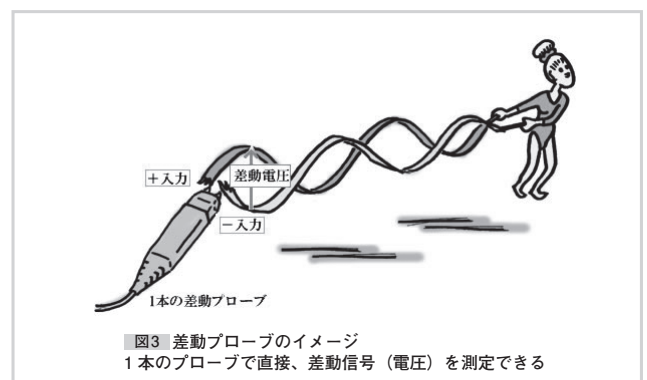


差動信号に最適なプローブ

差動信号のプロービングに最適なプローブは「差動プローブ」と呼ばれるプローブです。これは、特性のぴったり揃った2本のアクティブプローブをひとつにまとめたものです。入力部分はプラス入力端子とマイナス入力端子があり、直近に差動素子が置かれています。両入力端子は正側シングルエンド電圧と負側シングルエンド電圧に接続します(図3)。差動プローブを使用すれば、オシロスコープのチャンネルもひとつ使用するだけで済みます(これらの入力端子に加え、プローブ先端にグラウンド端子を装備した差動プローブもある)。

差動動作電圧と対地動作電圧を知らない……失敗!!

プローブ先端の2入力間に加えることのできる動作電圧(差動動作電圧)のみならず、差動プローブの一方の入力とグラウンド間に加えることのできる電圧にも制限があります。これを差動プローブの規格では「対地動作電圧」(コモンモード電圧やコモンモード入力電圧とも呼ばれたこともある)と呼びます。差動動作電圧 $\pm 8.5V$ 、対地動作電圧 $\pm 7V$ という規格を持つ差動プローブを例にとって、加えることのできる波形例を描いてみました(10ページ図4)。どの波形も $\pm 7V$ という対地動作電圧を超えていないことに注目してください。



差動動作電圧=±8.5V、対地動作電圧（コモンモード入力電圧レンジとも呼ばれた）=±7Vの差動プローブに印加できる差動波形の例

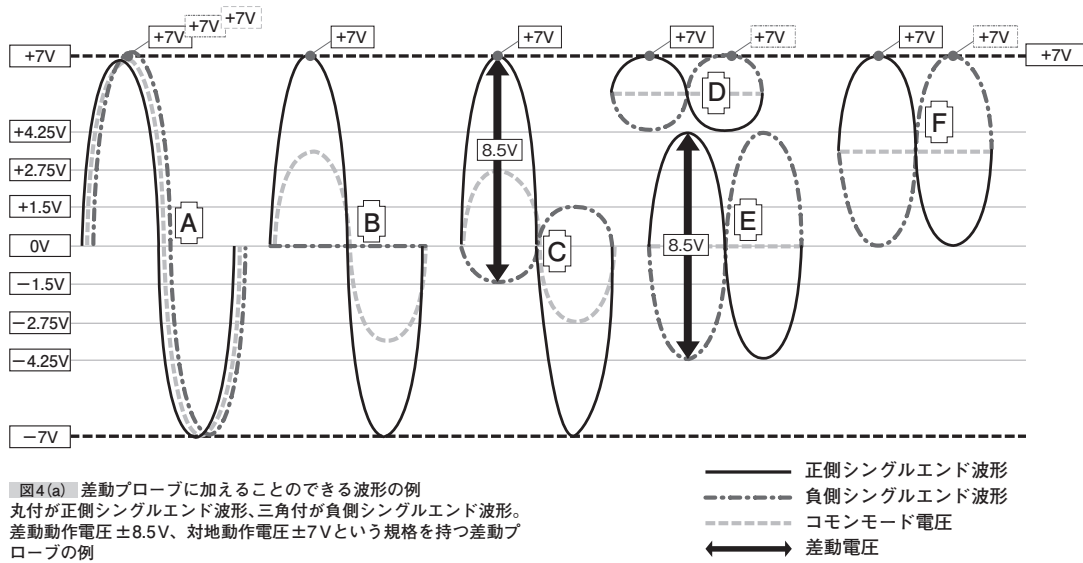


図4(a) 差動プローブに加えることのできる波形の例
丸付が正側シングルエンド波形、三角付が負側シングルエンド波形。
差動動作電圧±8.5V、対地動作電圧±7Vという規格を持つ差動プローブの例

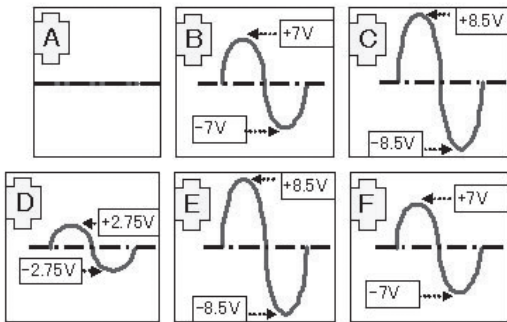


図4(b) オシロスコープに表示される波形

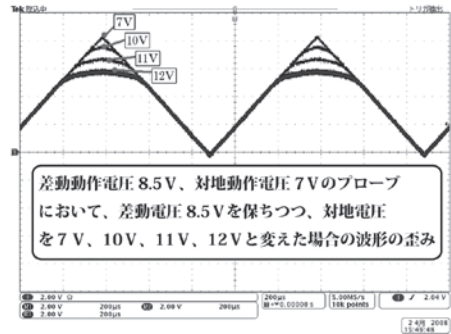


図5 差動プローブの波形が歪む例

グラウンドからの電圧で壊れるぞ!! — 過大対地電圧で失敗

多くの場合、プローブ先端のグラウンド端子を接続しなくても差動プローブは動作するので、ある落とし穴にはまりがちです。それはプラスとマイナス間の電圧（差動電圧）のみに気を取られて、グラウンドからの電圧（対地電圧）をチェックしない場合に起こります。対地電圧がプローブの対地動作電圧を超えてしまうのです。対地動作電圧を超えた波形は歪み始め、やがて差動プローブが壊れます。図5は対地電圧が7Vを超えたとき、差動プローブ波形が歪んでいく実例です。差動プローブは過大な対地電圧に弱く、15Vを超えると壊れるものも多くあります。

グラウンド接続による失敗

被測定回路がアースに接続されていない（フローティング）状態では、対地電圧は複雑になります。被測定回路の発生する電圧に、被測定回路のもつフローティング電位が加わります。この電位が加算されたり、減算されたりするからです。これら

の合算波形がプローブの対地動作電圧を超えるか超えないかによって波形品質が変動します。均一だった波形（11ページ図6）の品質が、電源周波数に同期したフローティング電位により悪化と軽減を繰り返す例を11ページ図7に示します。

このフローティング電位の影響から逃れる方法は、被測定回路のフローティングを止めることです。プローブ先端のグラウンド端子を被測定回路に接続すれば、被測定回路は接地されフローティングではなくなるので、電位はゼロになります。しかし、先端にグラウンド端子を装備していない差動プローブもあり、フローティングを止めるわけにいかない被測定回路もあります。その場合は、対地電圧（被測定回路の発生する電圧+被測定回路の持つフローティング電位）がプローブの対地動作電圧を超えていないことを確認してください（フローティング電位は、プローブのグラウンドを対地にプローブの先端を対象点に繋がれば簡単に測れる）。差動プローブは十数ボルトの電圧で壊れるものも多くあります。この程度のフローティング電位は、あらゆるところに存在します。「大きな差動電圧を測っていないのに、いつの間にか差動プローブが壊れる」という場合は、このフローティング電位が原因かもしれません。

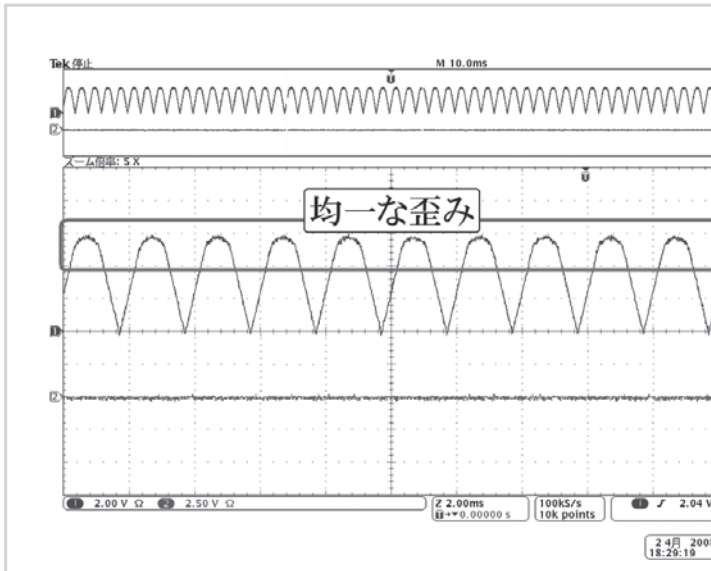


図6 波形品質が均一な波形の例
プローブの先端のグラウンド端子を接続した場合、または被測定回路がフローティングしていない場合、どの三角波も均一に歪んでいる (比較のため、規格をわずかに超えた対地電圧を故意に印加している)

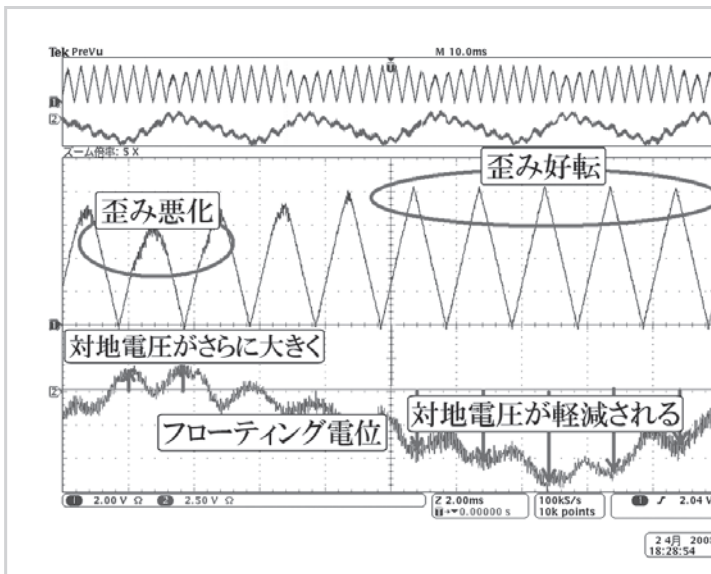


図7 電源周波数に同期したフローティング電位により悪化と軽減を繰り返す例
被測定回路がフローティングしている場合、被測定回路とアース間のフローティング電位が、被測定回路自体が発生する電圧に加算・減算される。したがって、三角波の歪みは一定ではなくなる。ある部分では対地動作電圧を大きく超え、歪みが悪化したり、またある部分では対地動作電位内に収まり、歪みが好転したりする

差動動作電圧に注意

差動プローブは、プラス端子とマイナス端子間に印加できる電圧 (差動動作電圧) にも限界があります。この電圧を超えた場合も波形は歪み始め、やがて壊れます (図8)。

静電気で壊れるぞ!!

差動素子にはほぼ直結された構造のため、差動プローブは大きな入力電圧が苦手です。"パチッ"と放電音のする静電気などが印加されるとひとたまりもありません。十数ボルト程度の放電音のしない放電によっても簡単に壊れます。「大きな電圧を測っていないのに、いつの間にか差動プローブが壊れる」という場合は、音のしない放電が原因の可能性があります。静電気対策用リストバンドを着用するのは当然ですが、これだけでは万全ではありません。リストバンドもケーブルに溜まった静電気やボードの一部に溜まる静電気に対しては役に立ちません。測定点の静電気を放電した後、プロービングする必要があります。

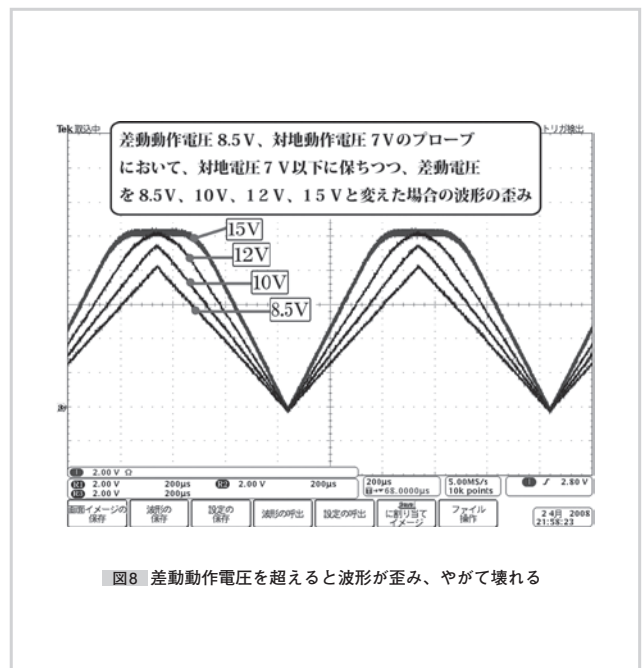


図8 差動動作電圧を超えると波形が歪み、やがて壊れる

先端に抵抗器をつけて改善

実際のプロービングにおいては、被測定点が狭い場所にあり差動プローブ先端を触れさせることができないこともあります。この場合、差動プローブの先端をケーブルで延長して被測定点につなぐ方法が使われます(写真1)。しかし、本連載第4回目(6ページ~を参照)でも述べたように、先端を延長することはLC共振を生み、波形品質を劣化させることを知っておかなければなりません。そこで先端に20~60Ωの抵抗器を取付けてLC共振をダンピングする手法が有効です。図9のように、大きなリングングがある①の波形に比べ、抵抗入り延長リードを使った②の波形は大きな改善が見られます。しかし、抵抗入り延長リードを使った差動プローブが理想かという点も違います。最も波形特性に優れた方法は、先端部のみを延長させたような方式の差動プローブを使うことです(写真2)。受動素子によるアッテネータネットワーク部がプローブ本体から分離されており、狭い測定点にもアクセスできます。この手の差動プローブは非常に性能が高く(例えば周波数帯域が4GHz以上)、パルス特性もリングングのほとんどない最高の特性を示します。

図10は抵抗入り延長リードを使った差動プローブと比較した波形です。先端が延長された方式の差動プローブはほとんどオーバーシュートのない理想的な特性をしています。

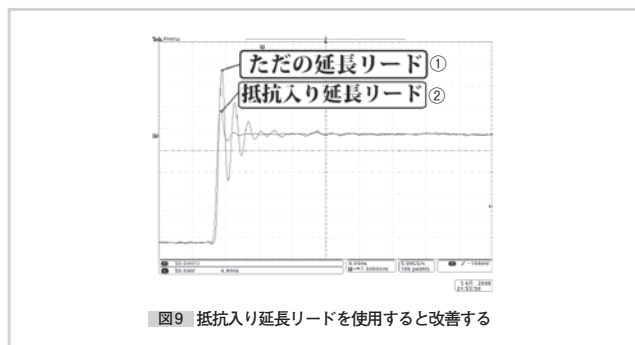


図9 抵抗入り延長リードを使用すると改善する

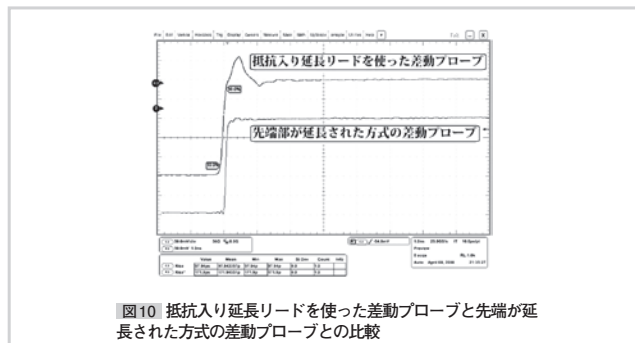
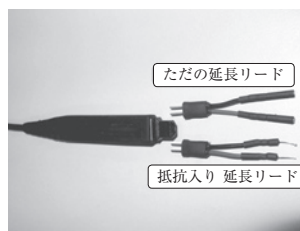


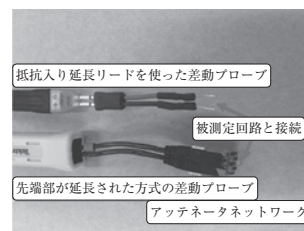
図10 抵抗入り延長リードを使った差動プローブと先端が延長された方式の差動プローブとの比較



図11 差動プローブにだまされるな!!



▲写真1 差動プローブの先端をケーブルで延長して被測定点につなぐ方法



▲写真2 先端部のみを延長させたような方式の差動プローブの例

差動プローブは万能

差動プローブは差動信号も測れるうえに、グラウンド基準の信号(シングルエンド信号)も測れます。使い方は簡単で、プラス入力端子を信号に、マイナス入力端子をグラウンドに接続するだけです。振幅が2倍になるでもなく、特別に意識することなくアクティブプローブのように使えます。欠点はアクティブプローブより高価であること、「抵抗なし延長リード」を使うと大きなリングングが出ることです。

差動プローブにだまされるな!!

差動プローブを使ってシングルエンド信号を観測している場合、プローブのマイナス入力端子が測定点に接続されていないのに、正しいような波形を示すことがあります。マイナス側が外れてオープン状態になっても、オシロスコープと被測定回路の間は共通グラウンドによって繋がれています。少々長いグラウンド経路ですが、プラス入力端子とこのグラウンドによりシングルエンド測定ができてしまいます。少し遅い信号を観測する場合は、大きく波打つ波形形状によりこの異常にすぐ気付くのですが、図11のように高速の信号を観測する場合にはだまされてしまいます。

高速の信号をプロービングする場合、プローブの入力端子が2つとも確実に接触していることを確認してください。とはいえ手動で2つの入力端子を均等に接触させることは簡単ではありません。もっともよい方法は「プロービングアーム」(写真3)と呼ばれるプローブ保持装置を使うことです。プラス側入力端子とマイナス側入力端子を均等な圧力で測定点に接触させることができます。



▲写真3 プロービングアーム

差動プローブを使えるのはエキスパートだけ

差動プローブは安価ではありません。差動電圧と対地電圧がプローブの規格を超えていないか注意を払うのに加え、静電気を防ぐ方法を常に取らなければなりません。それらの注意を払えるエンジニアだけが、差動プローブの優れた性能を享受する権利があるのです。これらの煩わしさを加味したとしても、差動プローブは大いに価値あるプローブです。その高い性能は積年の問題を解決し、大きな利点を技術者にもたらすことができます。

6

注意しないと命にかかわるぞ!! —高電圧プローブ

今回は、高い電圧を測定できる「高電圧プローブ」について述べていきます。高電圧測定においては、操作や接続方法などを誤るとケガをしたり命に関わる恐れがあるので十分注意してください。

壊れるぞ!! —プローブは高周波・高電圧が苦手

本連載第2回(2ページ~参照)で取り上げた受動プローブは、数百Vを超える高い電圧を加えると壊れてしまい、測定することができません。高い電圧を測定する際には、「高電圧プローブ」と呼ばれる専用プローブを用います。高電圧プローブには、数千~数万ボルトもの高い電圧が測れるものがあります。ここで"高電圧プローブさえ使えば安心"と思った読者もいらっしゃるかもしれませんが、ここに大きな落とし穴があります。実在の高電圧プローブ(写真1)を例にとってみましょう。

写真1のプローブは、最大入力電圧2万Vをうたう大型のプローブで高電圧測定によく使われています。このプローブで周波数10MHzの電圧5千Vを測れるでしょうか。最大入力電圧2万Vのプローブなので、5千Vは問題なく測れると考える読者もいらっしゃるでしょうが、答えは「NO!」です。測れません。なぜでしょう。それは10MHzという高い周波数が原因です。高い周波数になればなるほど、プローブに印加できる電圧は低下するのです(図1)。最大入力電圧とは、そのプローブに印加できる電圧のうち、最大の値を意味し、低い周波数においてのみ実現できる値なのです。注意を促すため、ほとんどの高電圧プローブには周波数と印加できる電圧の関係を表すグラフが添付されています(図2)。

図2はP6015A型(Tektronix製)の「デレーティング特性」と呼ばれるグラフで、周波数と印加できる電圧の関係を示しています。印加できる最大の入力電圧は2万Vですが、低い周波数に限定されています。400kHzを超えて周波数が高くなると、印加できる電圧はだんだん小さくなり始め、グラフから読み取ると10MHzにおいて約4千V、20MHzにおいて約3千Vしか印加できないことが読み取れます。

数100kHzより低い周波数ならほぼ安心ですが、MHz近くの周波数を測るときにはデレーティング特性グラフを見て印加できる電圧を確認しましょう。特に高電圧プローブにおいては、大きな事故につながりますので、十分に注意する必要があります。写真2は、高い電圧による絶縁破壊の例です。



▲写真1 高電圧プローブの例
—Tektronix製 P6015A型



▲写真2 高い電圧による絶縁破壊の例

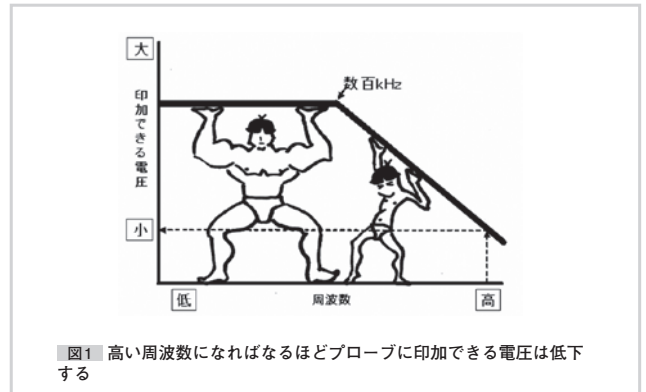


図1 高い周波数になればなるほどプローブに印加できる電圧は低下する

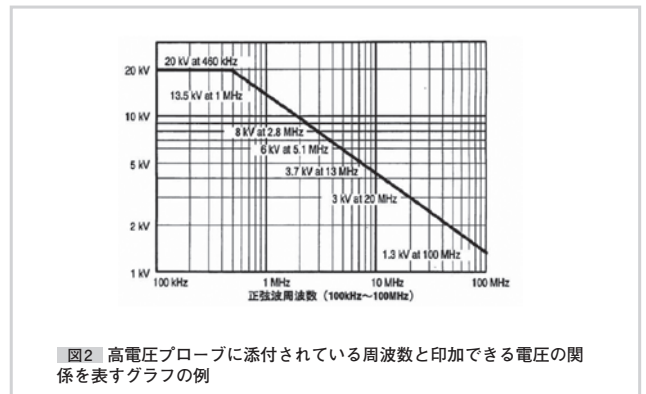


図2 高電圧プローブに添付されている周波数と印加できる電圧の関係を表すグラフの例

プローブが溶ける!! 火傷する!!!

高電圧の測定においては、火傷にも注意が必要です。高い周波数の大きな電圧を測定すると、プローブは容易に発熱します。発熱による火傷に注意すべき領域をグラフ上に示しているプローブもあります(図3)。高電圧測定においては、測定時間を極力短くし、プローブが過熱するのを防がなくてはなりません。長時間測定を続けると、熱によりプローブの一部が溶解することすら起こりえます。

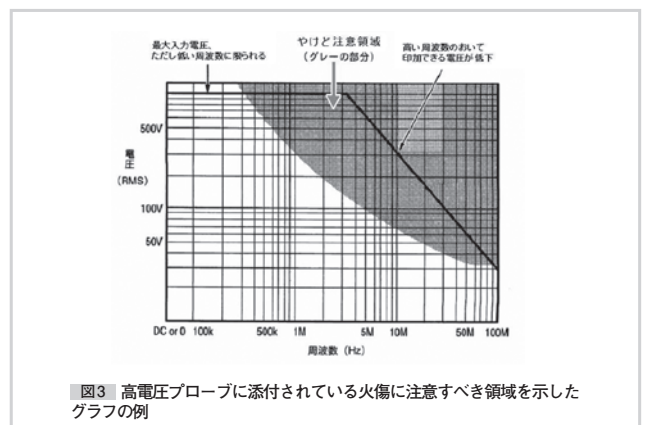
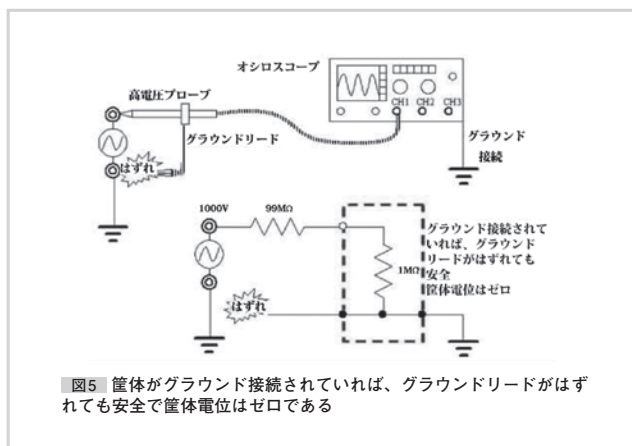
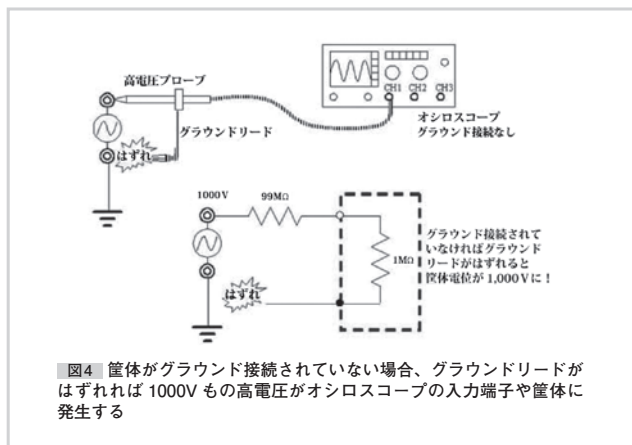


図3 高電圧プローブに添付されている火傷に注意すべき領域を示したグラフの例

グラウンドの接続が外れると危険!! 命を落とすぞ!!!

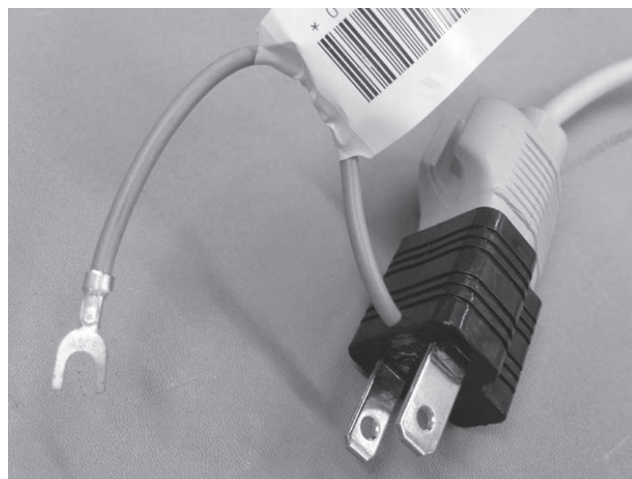
受動プローブについても同じですが、特に高電圧プローブのグラウンド接続は確実にとらなければなりません。接続順番もまずグラウンドを接続し、続いてプローブ先端を接続するよう習慣づけてください。グラウンドワニ口が外れてしまったり、接続順番を守らなかったりすると、測定しようとしている1000Vもの高い電圧がオシロスコープの入力端子や筐体に発生します(図4)。高電圧に気付かず筐体や金属部に触れてしまえば命にかかります。グラウンド付き電源ケーブルにより筐体を常にグラウンド(アース)に接続してください。こうすれば、人命に関わるような最悪の事態を防ぐことができます(図5)。



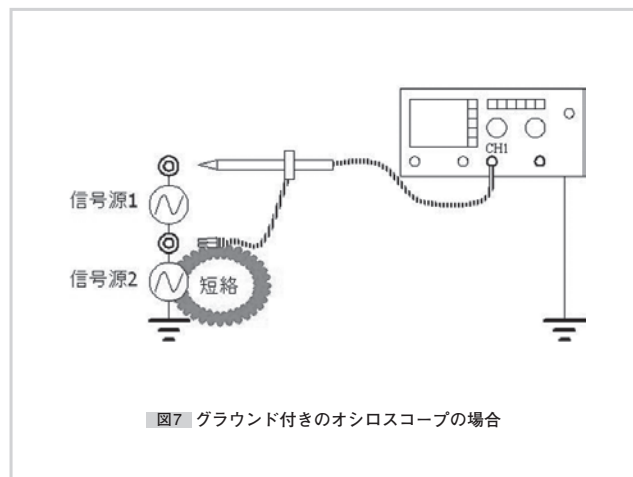
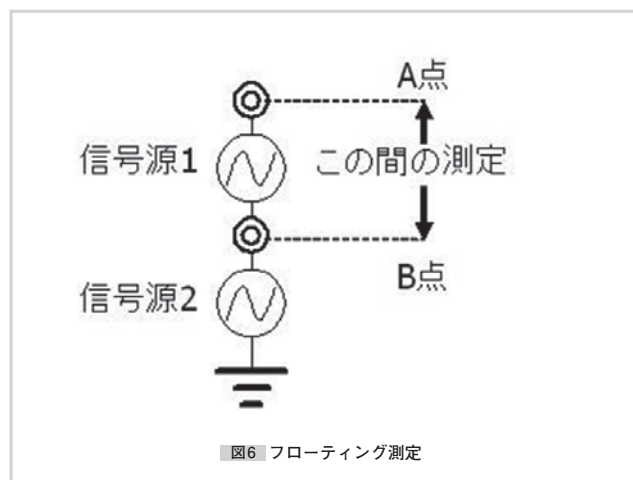
フローティング測定の落とし穴

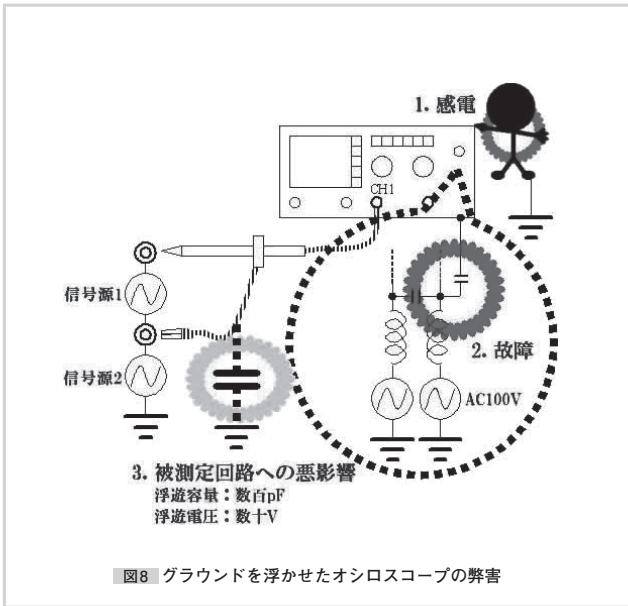
図6のように、電位のある一点とさらに電位のある別の一点間の電圧を測定することを「フローティング測定」といいます。また信号源1を「差動電圧」、信号源2を「コモン電圧」と呼びます。初心者が犯しやすいまちがいは、不用意にプローブのグラウンドリードをB点に接続しようとする事です。接続した瞬間に悲劇が起こります。信号源2は図7のように短絡されるので、信号源2自体が壊れるか、グラウンドリードを含む電流経路を焼き切ってしまう。そうなれば、電流経路を取り去ってしまうという乱暴な方法を使う中級者もいます。電源ケーブルのグラウンドピンをあえて繋がないのです(写真3)。これはフローティング測定において全く正しくない方法です。1.感電、2.電源回路の故障、3.被測定回路への悪影響という3つの問題が生じます(15

ページ図8)。オシロスコープの筐体や金属部が信号源2の電位をもつことになるので、金属部に触れると感電します。信号源2の電圧が高い場合は、人を死に至らしめます。人が触れないとしても、電源回路はAC100V電圧にさらに信号源2の電位が加わることで、電源回路を故障させるなど、故障にいたるストレスを蓄積させることになります。信号源の出力インピーダンスが高い場合は、数百pFもある浮遊容量が回路の動作を狂わせます。筐体やグラウンドワニ口に数十Vの浮遊電圧が生じていることも多く、プローブのワニ口を測定点に接続するとその電圧により被測定回路が壊れることさえあります。



▲写真3 正しくない方法 — “電源ケーブルのグラウンドピンをあえて繋がない” というような乱暴な方法はやってはいけない

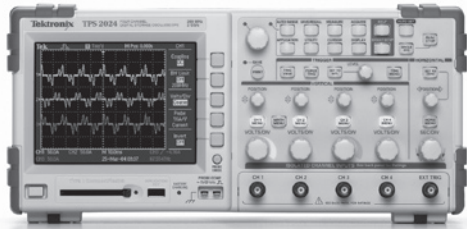




フローティング測定できるオシロスコープ

フローティング測定において電源ケーブルのグラウンドをきちんと接続しながら、既述のような数々の失敗をしないためには、どうすればよいのでしょうか。1つ目の答えは、フローティング測定を念頭に設計された専用オシロスコープ（写真4、図9）を使うことです。

一般的なオシロスコープの入力 BNC 端子の外側金属部はオシロスコープの筐体に繋がれており、すべての外側金属部は互いに接続されています。ところが、この専用オシロスコープでは金属部分の露出を極力なくし、各入力 BNC 端子の外側金属部はオシロスコープの筐体からも、互いに外側金属部からも絶縁されています。したがって、各チャンネルはグラウンドから独立しており、プローブのワニ口を測定点に接続しても、コモン電圧は短絡しません。金属露出部のない専用プローブを使って、差動電圧は1000Vまで、コモン電圧は600Vまでのフローティング測定ができます。

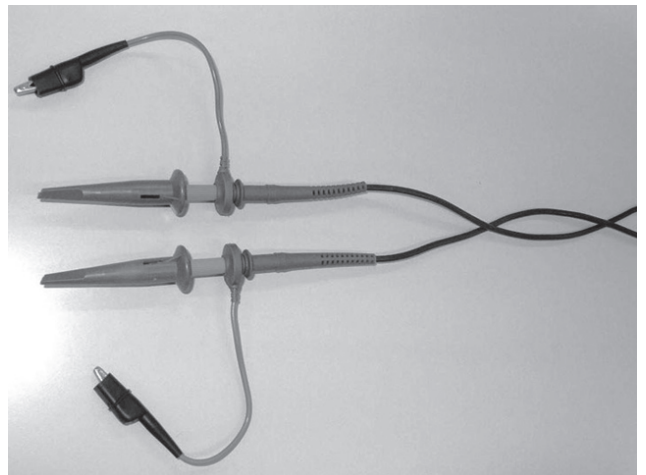


▲写真4 フローティング測定用オシロスコープの例
—Tektronix 製 TPS2000 シリーズ

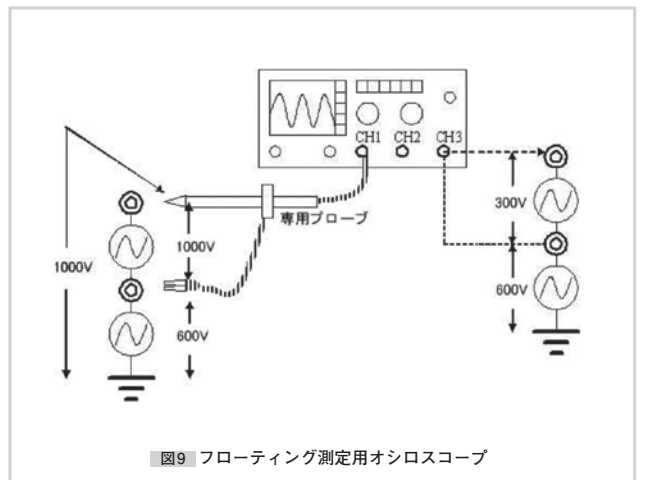
擬似差動プローブ

2つ目の答えは、プローブ2本で擬似的に差動プローブを作ることです。接続は2本のプローブの先端をA点B点に接続します。グラウンドワニ口は16ページ図10のようにアースに接続するか、16ページ図11のように互いを接続したまま中空にぶら下げておきます。後は、オシロスコープの機能を使い、CH1とCH2の引き算をするだけです。こうすれば、A点B点間の差動信号だけがオシロスコープに表示されます。手持ちの2本のプローブがあれば、手軽にこの擬似差動プローブが作れます。しかし、擬似差動プローブを使うには2つの点に注意してください。第1に、特性と伝播遅延時間を合わせるため同じ型番のプローブを用いることです。第2に、オシロスコープで引き算する前に2つの波形を画面内からはみ出させない範囲で最大になるようオシロスコープの垂直軸感度を正しく設定することです。2本のプローブどうしを軽くねじっておくと、グラウンドシールド線に飛び込むノイズをキャンセルできるのでノイズが軽減する、ということを知っておくと役立ちます（写真5）。

そして3つ目の答えは「高電圧差動プローブ」を使うことです。これについては、次回に詳しく解説していきます。



▲写真5 2本のプローブどうしを軽くねじっておくとグラウンドシールド線に飛び込むノイズをキャンセルできるのでノイズが軽減する



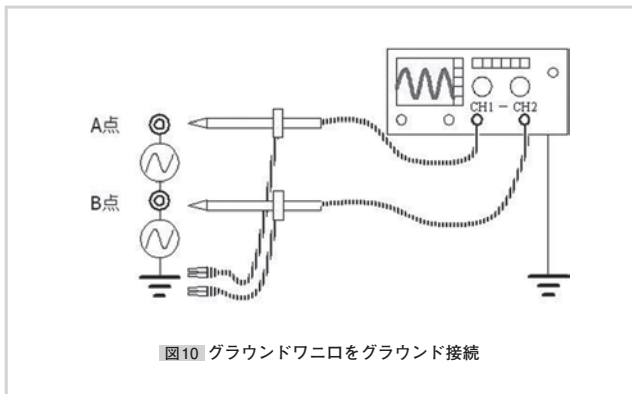


図10 グラウンドワニ口をグラウンド接続

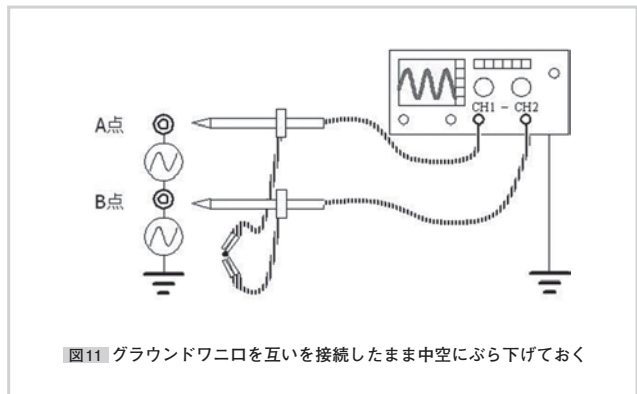


図11 グラウンドワニ口を互いを接続したまま空中にぶら下げておく

2008/09/09連載

7

フローティング測定に最適 —高電圧差動プローブ

前回は、高電圧プローブとフローティング測定について説明しました。今回は、まさにフローティング測定に最適である「高電圧差動プローブ」について述べていきます。

高電圧差動プローブ

フローティング測定にもっとも適したプローブは、フローティング測定のために設計された「高電圧差動プローブ」です。測定対象の電圧があまり大きくない場合、信号忠実度の優れた小型の高電圧差動プローブ（写真1）がおすすめです。写真1の小型の高電圧差動プローブに印加できる電圧は、差動電圧として42V、対地電圧と



▲写真1 小型の高電圧差動プローブの例—Tektronix製 TDP1000型

して35Vを超えることはできません。この関係を図1に示します。差動電圧で42V、対地電圧で35Vを超える場合、大型の高電圧差動プローブを選ぶことになります（写真2）。写真2のプローブでは、差動電圧が最大4400V、対地電圧が最大2200Vまで測定できる反面（17ページ図2）、形状が大きくなり、特に入力リード線の扱いに注意が必要になります。長いリード線は共振やノイズ飛び込みの原因となり波形品質が悪化する可能性があります。

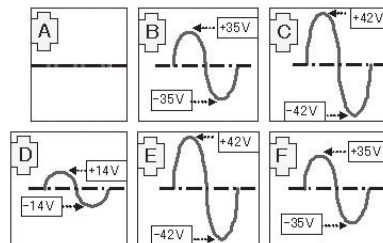


図1(b) オシロスコープに表示される波形

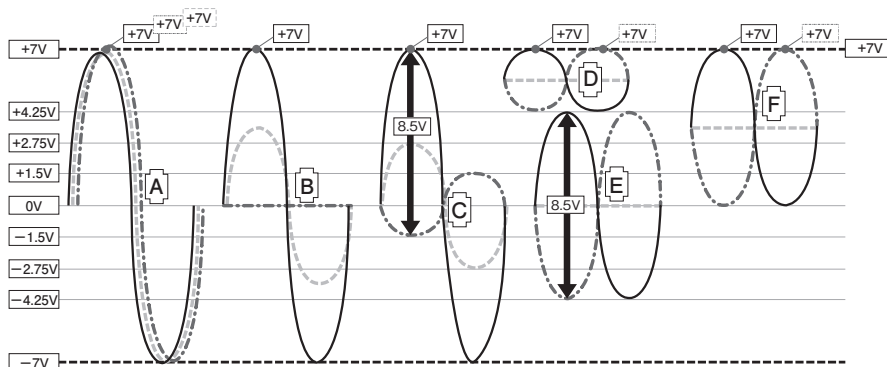
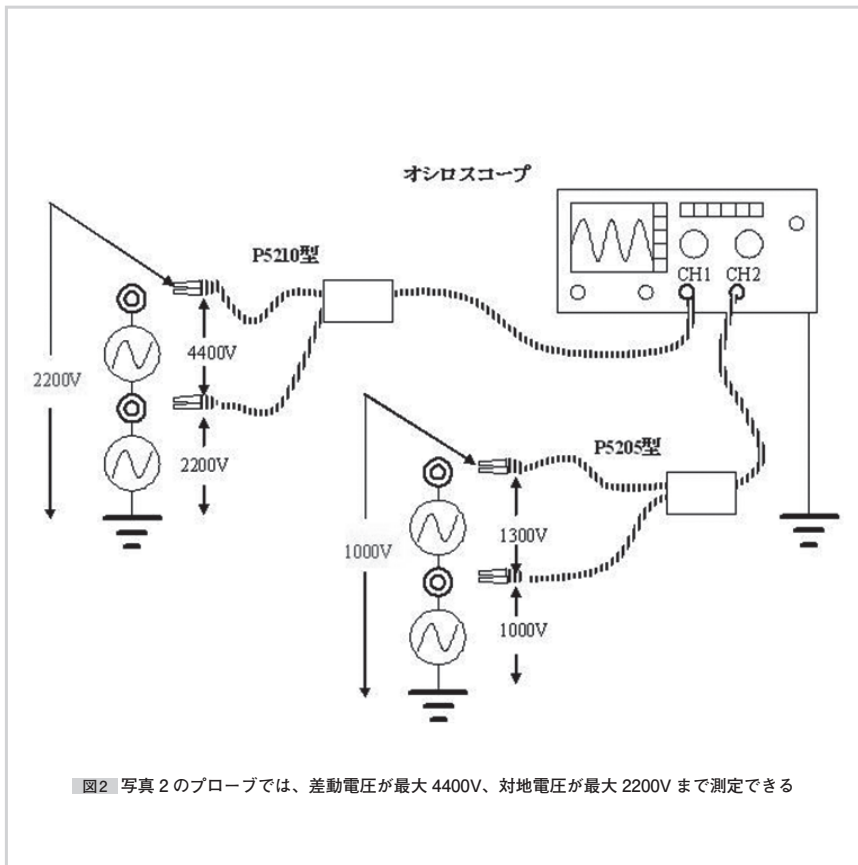


図1(a) 差動動作電圧±42V、対地動作電圧±35Vの高電圧差動プローブに印加できる差動波形の例

—— 正側シングルエンド波形
 - - - 負側シングルエンド波形
 - - - コモンモード電圧
 ⇄ 差動電圧



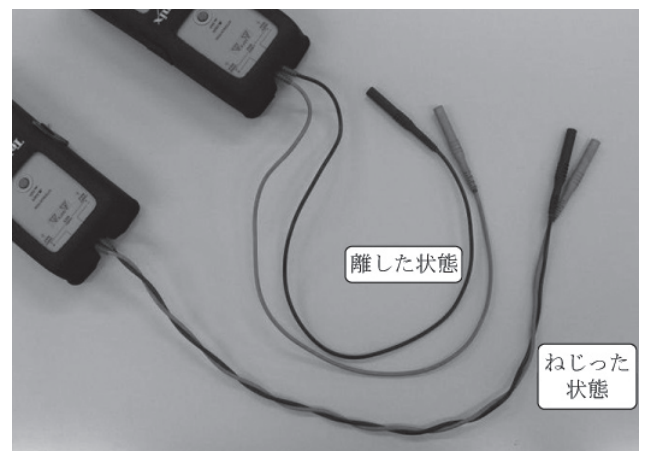
▲写真2(a) 大型の高電圧差動プローブの例
—Tektronix 製 P5205 型



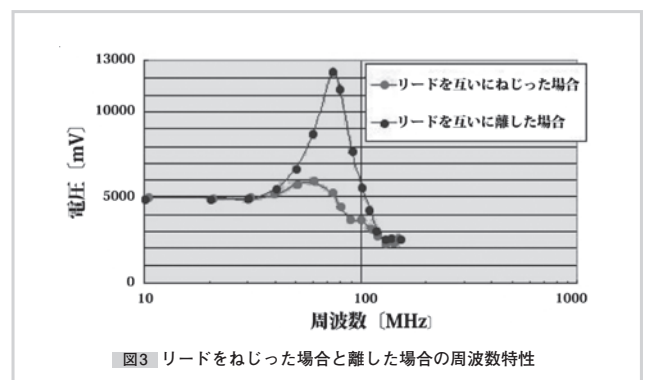
▲写真2(b) 大型の高電圧差動プローブの例
—Tektronix 製 P5210 型

2本のリードの扱いによる特性変化

大型の高電圧差動プローブを使うコツは、2本のリードどうしを軽くねじっておくことです。しかし、リードを接続すべき2つの接続点が離れている場合は、リードどうしをねじることができません(写真3)。P5205を実例にして、リードをねじるか離すかにより、特性が変化するように見てみましょう。図3は、サイン波をプローブに入力し、振幅を一定に保ちながら周波数を10MHz～150MHzと変化させ、プローブ通過後の振幅変化をグラフにしました。リードを互いにねじった場合、プローブの特性は理想的になり、ほぼ素直な特性で周波数帯域100MHzを実現しています。ところがリードを離した場合は、特性は約74MHzにおいて大きなピークを持ち、振幅が2倍以上も変化します。オシロスコープの画面において40MHz、50MHz、60MHz、74MHz、80MHzのサイン波を観測すると、74MHzのピークに向かって振幅が徐々に大きくなるようすが分かります(18ページ図4)。18ページ図5に理想的な特性をしたパルス波形をプローブに入力し、プローブ通過後の応答特性も示します。リードをねじった場合のほぼ素直な特性に対し、リードを離した場合の特性は大きなリングングを生じていることが分かります。なお、リングングのピーク間の周期(13.5ns)から共振周波数(1/13.5ns: 約74MHz)が計算できます。大型の高電圧差動プローブでよい特性を出すには、入力のリードを互いにねじっておくことが大切です。ねじることができない場合は、リングングを起こす周波数より低い周波数範囲で使用すると、良い結果が得られます。



▲写真3 2本のリードをねじった状態と離れた状態



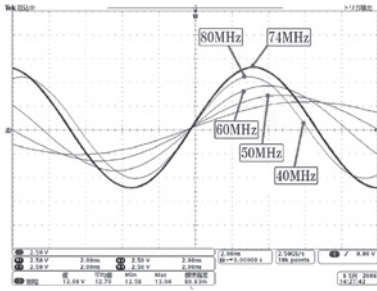


図4 40MHz、50MHz、60MHz、74MHz、80MHz のサイン波を観測しよう

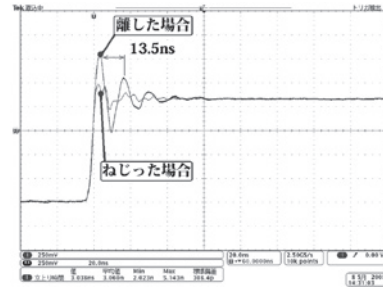


図5 プローブ通過後の応答特性
リングングのピーク間の周期 (13.5ns) から共振周波数 (1/13.5ns: 約 74MHz) が計算できる

CMRRは有限

高電圧作動プローブが使われる多くの場面は、スイッチング電源回路です (図6) 非常に大きな V_{ds} 電圧が変動しているなかで、小さな V_{gs} 電圧を観測するときに、問題が起きます。 V_{ds} (対地電圧) の変動が V_{gs} (差動電圧) に影響を与えるのです。どのくらい影響を与えるかは高電圧差動プローブの CMRR という性能で決まります。CMRR が無限大なら理想です。 V_{ds} (対地電圧) の影響を全く受けずに V_{gs} (差動電圧) のみを測定できることとなりますが、CMRR は無限大ではありません。つまり、必ず V_{ds} (対地電圧) の影響を受けてしまいます。

例えば 300V も V_{ds} (対地電圧) が変動するなか、数 V の V_{gs} (差動電圧) を CMRR が 50dB (300 : 1) の高電圧差動プローブ

で観測するとしましょう。この場合、 V_{ds} (対地電圧) が 300V の 300 分の 1 である 1V は除去できずに残ることになります。測定したい数 V の V_{gs} 波形がこの 1V の波形によって変形されることとなります。ローサイドのスイッチング素子を観測する場合は何の問題も起こさないのに、ハイサイドのスイッチング素子を観測すると変な波形になるようならば、まず高電圧差動プローブの CMRR 不足を疑ってみましょう。

上記の現象を分かりやすくするため、実験回路 (図7) において、高電圧差動プローブで観測した 1V の差動電圧波形 (短波形) が、15V の対地電圧 (サイン波) によって変形されるようすを示します (図8)。フローティング測定において、高電圧差動プローブの CMRR は有限であることを忘れてはなりません。

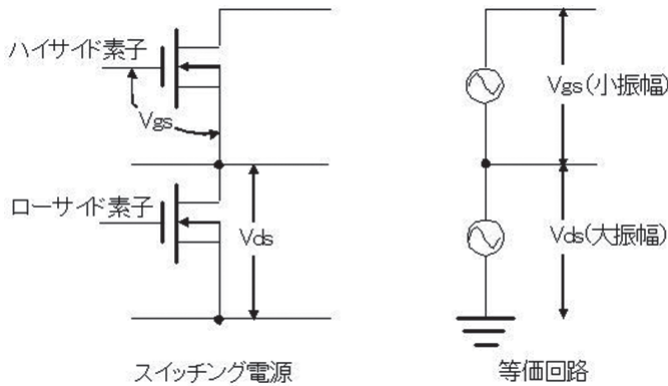


図6 スwitchング電源回路

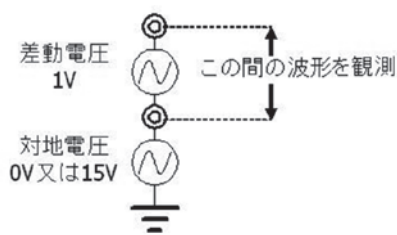


図7 実験回路—有限なCMRRによる歪みを実験する

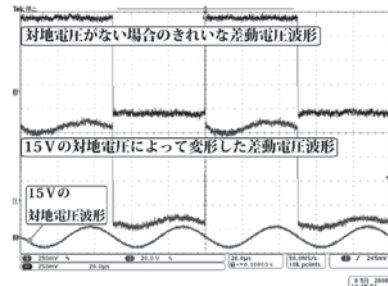


図8 図7の実験回路にて、高電圧差動プローブで観測した 1V の差動電圧波形が 15V の対地電圧によって変形されるようす

8

電流波形を観測する電流プローブ

最終回となる今回は、電流プローブについてお話しします。

電流波形と電圧波形は違うのが当たり前

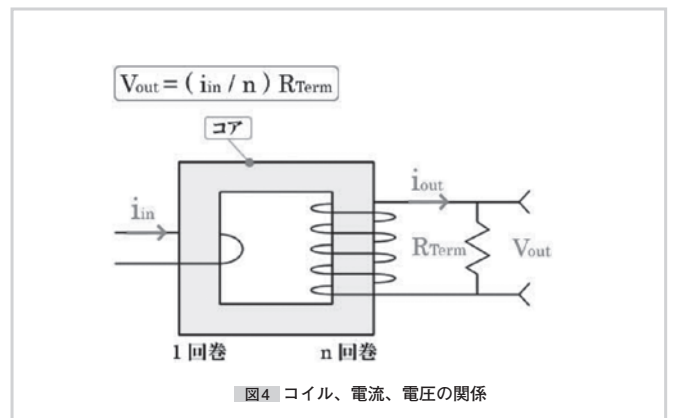
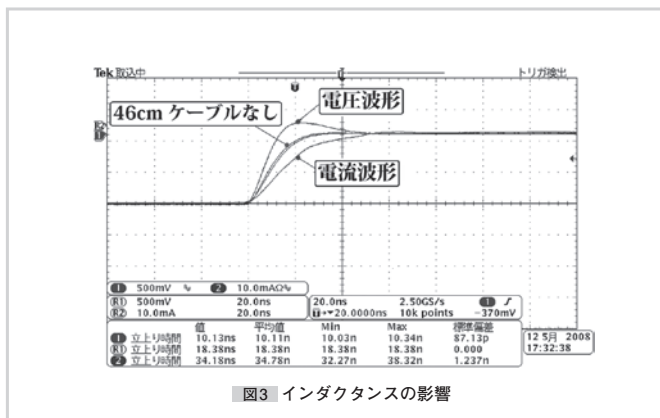
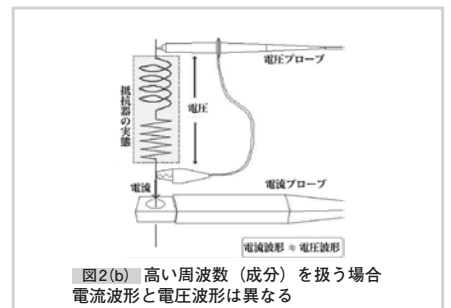
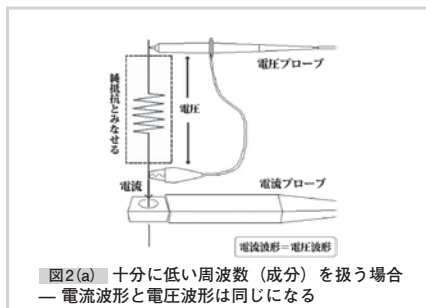
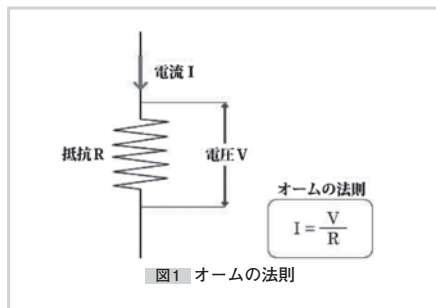
オームの法則（図1）により、電流は抵抗器によって電圧に変換することができます。電流波形を観測するとき、電流経路に抵抗器を挿入し電圧に変換後、電圧波形として電圧プローブで観測する手法があります。この手法において陥りやすいまちは、抵抗器を安易に純抵抗とみなしてしまうことです。十分に低い周波数（成分）を扱う場合、抵抗器はほぼ純抵抗とみなせますが、高い周波数になると、抵抗器はもはや純抵抗ではありません。コイル（インダクタンス）を含んだインピーダンスと考えなければなりません。このような場合、抵抗器を流れる電流波形と抵抗器に生じた電圧波形は異なります（図2）。

実際に周波数帯域 20MHz のオシロスコーププローブシステムにおいて、インダクタンスの影響を見てみましょう。純抵抗に 46cm のケーブルを加えるだけでインダクタンスは増加し、電流波形と電圧波形にはっきりとした差がでます。電流波形は立ち上りが鈍り、電圧波形はオーバershoot を生じます（図3）。このシステムにおいて数十 cm 分のインダクタンスがあるだけで、抵抗器を挿入する手法は、電流波形の観測に向かないことが分かります。もっと高い周波数を扱うシステムならば、もっと小さなインダクタンスによって同様の状況となります。抵抗器を挿入する方法では、いかにインダクタンスを軽減できるかが成否を決定します。

こんなとき電流プローブを使わないと失敗する

電流の観測において、直接電流を観測するに越したことはありません。電流波形を観測するために作られたプローブが「電流プローブ」です。ケーブルに流れる電流がつくる磁束を捉え、電圧に変換します。既述の電圧プローブ群（受動プローブ、アクティブプローブ、差動プローブ、高電圧差動プローブ、高電圧プローブなど）とは、かなり動作が異なります。磁束を捉えるための検出部はコイルを巻いたトランスです。トランスのコアを通過する被測定ケーブルは、トランスの 1 回巻きの一次巻線として働きます。トランスのコアにあらかじめ n 回巻かれたコイルが二次巻線となり磁束を捉えて電圧を発生します。その電流が負荷抵抗により電圧に変換され、オシロスコープに入力されます（図4）。

被測定経路に抵抗器を挿入して抵抗器の電圧降下を測る手法では、抵抗器を入れるため回路を切断しなければなりませんし、抵抗器を入れること自体が被測定回路の動作を乱します。それに比べると、電流プローブを用いた測定は、回路に与える影響の少ないより正確な測定が可能となります（20 ページ図5）。なお、電流プローブを回路に取り付けることは、被測定回路に小さなインピーダンスを挿入することになり、わずかながらも被測定回路の動作を乱します。そのインピーダンスを「電流プローブの挿入インピーダンス」と呼び、プローブごとに規格されています。挿入インピーダンスは総じて小さな値となります。



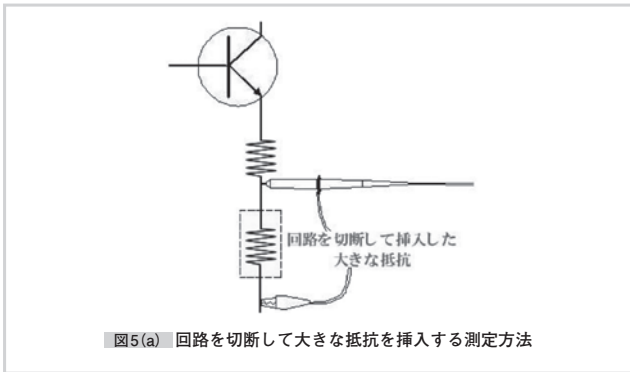


図5(a) 回路を切断して大きな抵抗を挿入する測定方法

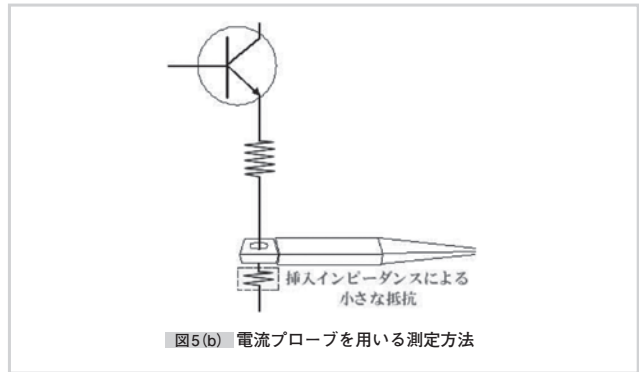


図5(b) 電流プローブを用いる測定方法

低い周波数に気を付けろ !!

電圧プローブではほとんど気にする必要のないことですが、電流プローブでは低い周波数の観測において注意が必要です。検出部にトランスを使う構造なので、多くの電流プローブは直流および低い周波数の信号を検出が得意ではありません。このようなプローブを「AC電流プローブ」と呼びます。周波数が低くなるにつれて検出感度が下がり、波形の振幅や波形の形に影響が表れます。120Hzの低域周波数帯域をもつAC電流プローブを例にとると、サイン波形状の周波数50Hzの電流はAC電流プローブで検出すると実際より小さくなり60%以下の振幅にしか見えません(図6)。電流波形が矩形波の場合は周波数が低くなるにつれ、波形の形が違って見えます(図7)。これらの形が電流プローブによるものと気付かなければ、まちがった測定をしてしまいます。

AC電流プローブに直流が重畳した場合も注意が必要です。直流が重畳すると、低い周波数がさらに検出できなくなり、さらに矩形波の形が変形します(図8)。このように波形が変形してしまっただけでは、真の波形とはほど遠くなり、正しい測定ができません。重畳したDC電流による不具合は、不具合を起こすDC電流と同量の逆電流(バックアップ電流)を流すことにより解消できます(図9)。

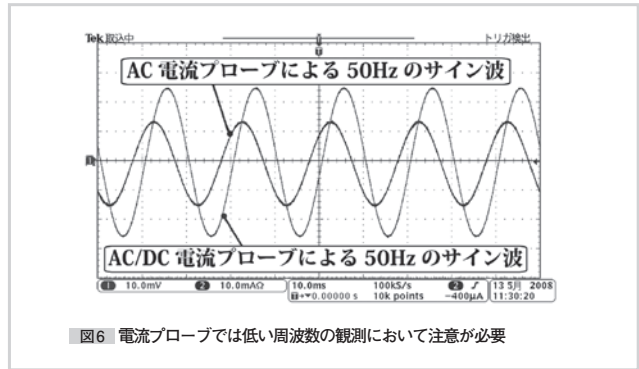


図6 電流プローブでは低い周波数の観測において注意が必要

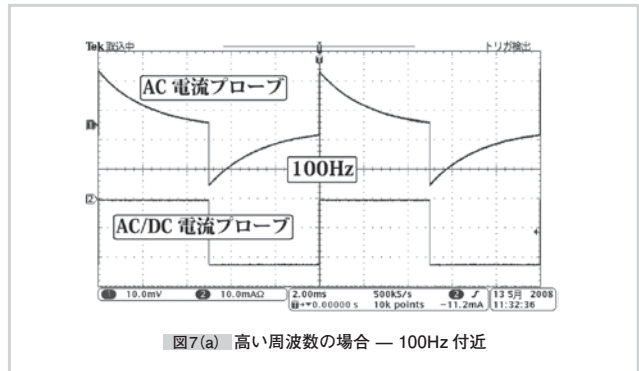


図7(a) 高い周波数の場合 — 100Hz 付近

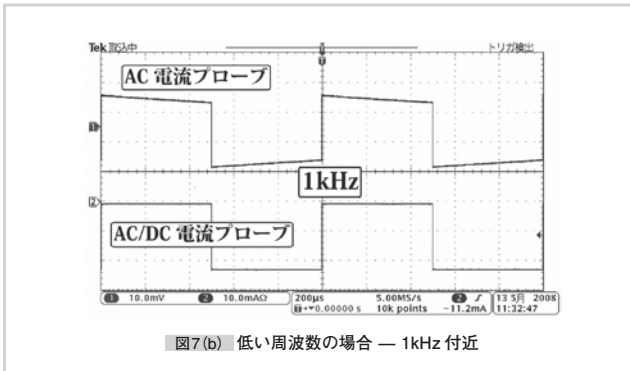


図7(b) 低い周波数の場合 — 1kHz 付近

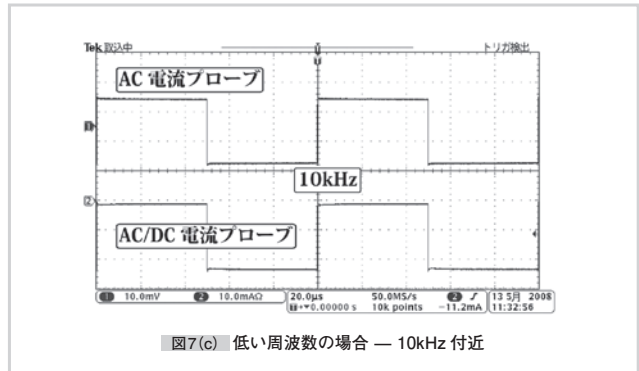


図7(c) 低い周波数の場合 — 10kHz 付近

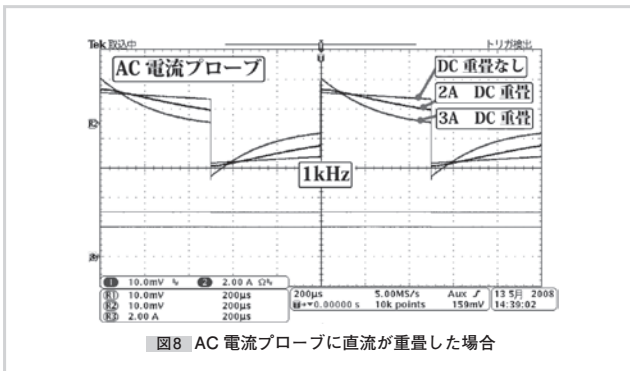


図8 AC電流プローブに直流が重畳した場合

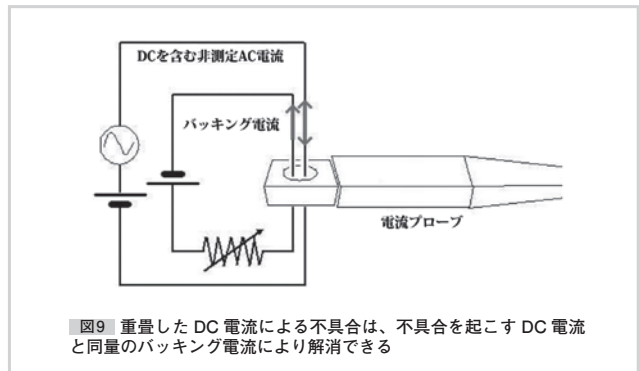


図9 重畳したDC電流による不具合は、不具合を起こすDC電流と同量のバックアップ電流により解消できる

DCも測れる電流プローブ

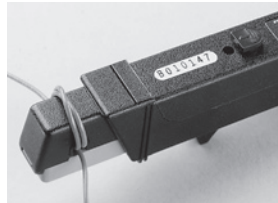
AC電流プローブにとってDCおよび低い周波数はやっかいなものです。これらを苦しめない電流プローブがあります。「AC/DC電流プローブ」と呼ばれるプローブで、DC（および低い周波数）測定において、感度の低下もなく波形の変形もありません。DC（および低い周波数）を検出するホール素子をコアに内包しており、つねにDC（および低い周波数）をキャンセルするように逆電流を流すことにします。これにより、AC電流プローブで見られた諸問題を解決しています。AC/DC電流プローブは、DCおよび低い周波数の信号に対する煩わしさから開放され、さらに高域周波数帯域も最高120MHzまで伸びている理想的な電流プローブといえます（写真1）。



▲写真1 AC/DC電流プローブの例 - Tektronix製TCP0030型

小さな電流を測定するには

電流プローブはかなり高感度ですが、 μA （マイクロアンペア）程度の小さな電流になると振幅が足りず、波形がノイズに埋もれます。このような場合、微小電流の流れるリード線をコアに複数回巻きつけると、巻き数に比例して振幅を大きくすることができます（写真2）。ただし、多少難があり、挿入インピーダンスが増加します。n回巻くと、挿入インピーダンスは1回巻きのnの2乗倍になります。挿入インピーダンスの増加による影響も考慮する必要がありますが、振幅増加には有効な手段です。



▲写真2 リード線をコアに複数回巻きつける

高い周波数の大きな電流は苦手 —壊れるぞ!!

電流プローブには、高い周波数の大きな電流は印加できません（図10）。実際の電流プローブ（写真3）を例にとって説明します。このプローブは最大連続ピーク電流212Aをうたう大型のプローブで、大電流測定によく使われます。このプローブに周波数1MHzのピーク電流100Aを印加できるでしょうか。212Aのプローブなので、100Aの電流なら「できる」と思うかもしれませんが、答えは「できない」です。それは1MHzという高い周波数が原因です。高い周波数においてプローブに印加できる電流は低下します。最大連続ピーク電流とはそのプローブに印加できる連続電流の最大の値を意味し、この値は低い周波数において実現できる値なのです。

図11はTCP303型（TCP300シリーズの電流プローブ）の「デレーティング特性」と呼ばれる



▲写真3 電流プローブの例 - Tektronix製TCPA300シリーズ

グラフです。周波数と印加できる電流の関係を示しています。1kHzより低い周波数において印加できる電流は最大212Aですが、1kHzを超えて周波数が高くなると、だんだん小さくなり始めます。グラフから読み取ると1MHzにおいては約50Aしか印加できないことが分かります。

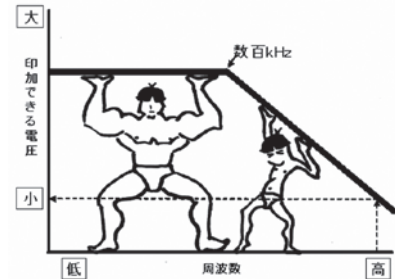


図10 電流プローブには高い周波数の大きな電流は印加できない

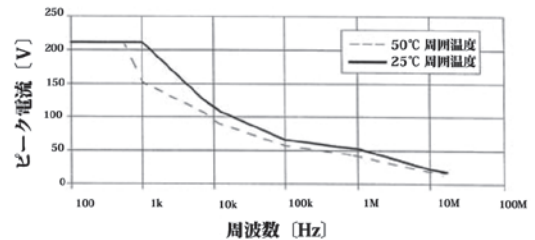


図11 TCP303型のデレーティング特性

電流時間積に要注意

連続した電流ではなく、単発的に流れる細いパルス性の電流なら、最大連続ピーク電流を超えてさらに大きな電流を印加することができます。TCP303型について、どのくらいのパルス幅ならどのくらいのピーク電流が印加できるかを図12に示します。最大で500Aを超えることはできませんが、パルス幅が細くなるにつれ212A以上の電流が印加できることが分かります。図12中の「 $15000\text{A}\cdot\mu\text{s}$ 」が「電流時間積」と呼ばれる値です。パルス幅とピーク電流の積が15000を超えない条件で、例えば30 μs なら500Aが、71 μs なら212Aが印加できます。ただし、連続しない単発パルスについてのみの適応となります。

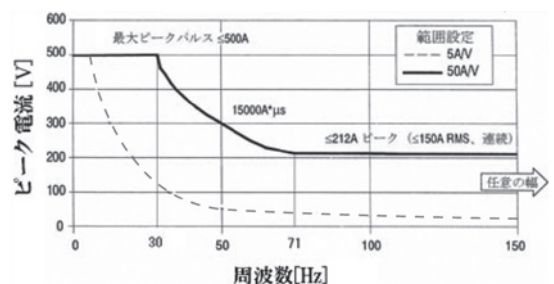


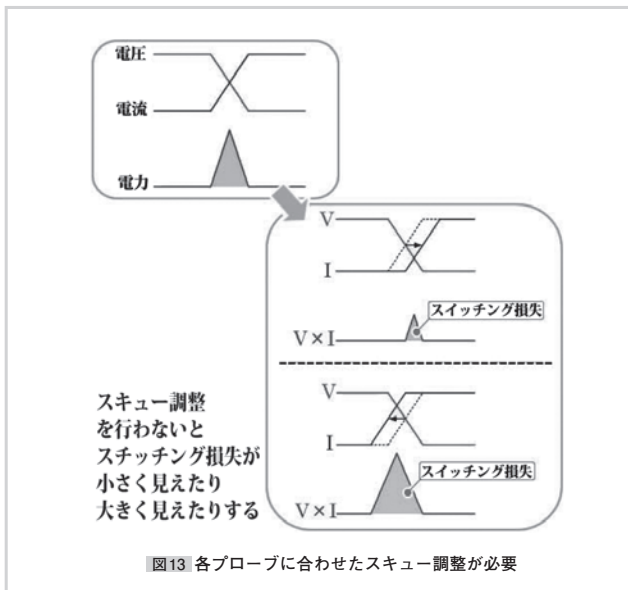
図12 TCP303型の最大ピーク電流

プローブが熔ける !!

大電流の測定においては、プローブの発熱に考慮し、測定時間は短時間に留めなくてはなりません。写真4は発熱によりプローブが熔けた例です。



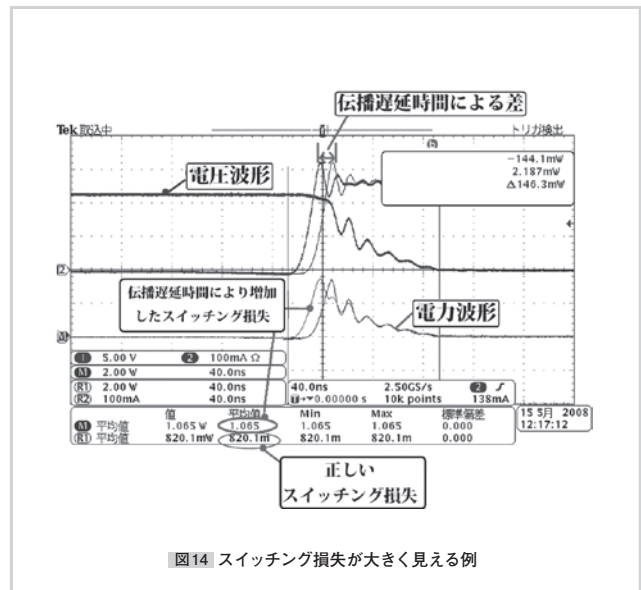
◀ 写真4 プローブの発熱に注意



◀ 図13 各プローブに合わせたスキュー調整が必要

プローブケーブルの長さに注意

電力測定においては、電流プローブと電圧プローブを使用します。電流波形と電圧波形との掛け算によって電力波形を作ることが測定のスタートです。多くのユーザは電流プローブと電圧プローブの選択に際し、それらの伝播遅延時間（信号がプローブに印加されてからオシロスコープに到達するまでの時間。ケーブルの長さや内部回路により決まる）には無頓着です。伝播遅延時間に差があれば、電流波形と電圧波形とに時間差が生じ、計算した結果（電力波形）が正しく作れません（図13）。図14は伝播遅延時間に10nsの差があるだけで20%以上もスイッチング損失が大きく見えてしまう例です。プローブの伝播遅延時間の差による問題を解決するには、時間差をキャンセルする機能（デスキュー機能）をもつオシロスコープが有効です。



◀ 図14 スイッチング損失が大きく見える例

最後に

本連載では、プロービングにおいて陥りやすい事から例として取り上げてきました。あまりの多さに驚いた読者もいらっしゃるかと思います。プロービングはまさにノウハウの塊です。言い換えれば、これらの失敗例をクリアすれば、多大なノウハウを身につけることができます。

言うまでもなく、ほとんどの測定において最初にすることは信号へのプロービングです。プローブなくして測定は始まらないのです。プローブにつまずくと、その後の測定すべてが台無しになるほどの重要なパートです。

測定したい信号の種類や大きさはさまざまで、それらに合わせた数多くのプローブが準備されています。測定対象は電圧なのか、電流なのか、光なのか、音なのか、圧力なのか。信号は小さいのか大きいのか、信号が変化するとすればその変化はどの程度の速さなのか——信号を知り、最適なプローブを選ぶノウハウと共にそれを使いこなすプロービングのノウハウを知ってしまえば、プローブのプロフェッショナルです。測定をもっと効率よく、もっと正確に行うことにより、皆様の仕事は大きく前進することで

しょう。本連載が皆様の仕事のお役に立てれば幸いです。
※ 本連載記事は今回が最終回です。ご愛読いただきまして、誠にありがとうございました。



著者 稲垣 正一郎 (いながき・しょういちろう)
日本テクトロニクス
テクニカルサポートセンター センター長



日本テクトロニクス株式会社

東京都港区港南2-15-2 品川 インターシティB棟6階 〒108-6106

製品についてのご質問・ご相談は、お客様コールセンターまでお問い合わせください。

TEL 03-6714-3010 E-mail ccc.jp@tektronix.com
電話受付時間／9:00～12:00・13:00～18:00 月曜～金曜 (休祝日は除く)

当ホームページをご覧ください。 www.tektronix.co.jp
お客様コールセンター ccc.jp@tektronix.com

TEKTRONIXおよび TEKは、Tektronix, Inc.の登録商標です。記載された商品名はすべて各社の商標あるいは登録商標です。掲載されている記事・写真・図表などの無断転用はご遠慮ください。

10/08 DM 51Z-23098-0