

analog
design
series

■アナログ・デザイン・シリーズ



Multimeter

Peak-to-Peak

Root Mean Square

Oscilloscope

Passive probe

Digital & analog circuit

Active probe

Phase margin

Time domain reflectometry

Differential transmission line

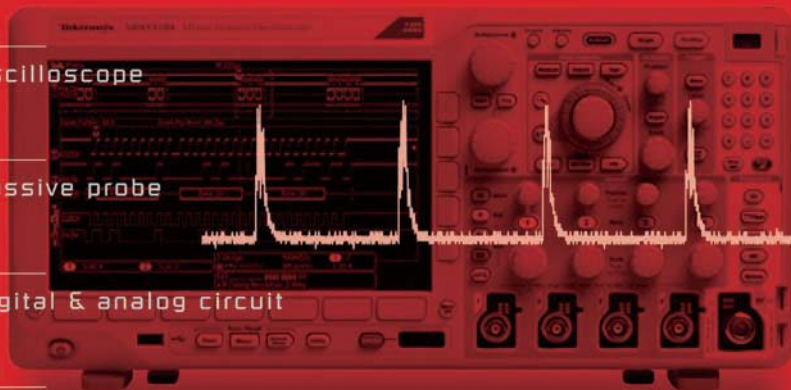
Common mode noise

Spectrum analyzer

アナログセンスで正しい 電子回路計測

高速時代は回路の理解&プロービングが成功のかぎ

石井 聡 [著]
Satoru Ishii



見本

CQ出版社

第 1 章

【成功のかぎ1】 計測には誤差がつきもの 実験とオームの法則で分かる測定器の内部抵抗の影響

回路が高速化・高精度化している昨今では、回路で生じている現象を計測し、動作を検証したり問題点の把握や動作の確からしさを確認したりするためのテクニックがより高度化しています。

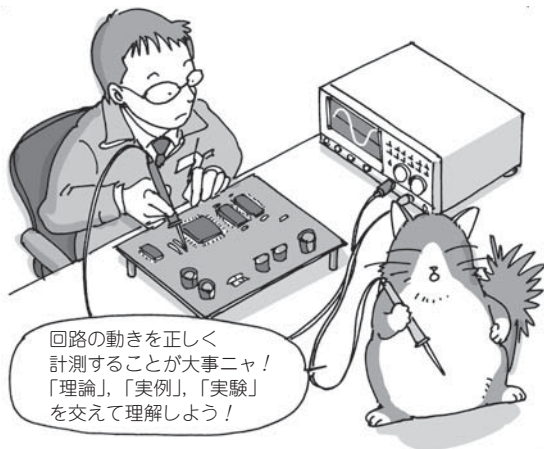
本書では、回路理論の基本的な考え方をベースに、どのように電子回路を適切に計測していけばよいかについて「理論」、「実例」、「実験」を交えて解説していきます(図1-1)。

1-1

現場の視点で基本から高度な応用まで

● 「計測理論」からではなく「実験」から入る

「電気計測」の教科書だと、いきなり「計測理論」みたいなものが最初に出てきます。それではせっかく、計測・プロービングに興味を持った方の気持ちが萎えてしまいますね。



[図1-1] 一緒に正しい計測方法を考えていきましょう

第2章

【成功のかぎ2】 振幅と周波数特性の計測 「ひずみ」や「寄生成分」が誤差を生む

前章では、電圧計と電流計を用い、直流回路について電圧計測と電流計測を考えてきました。本章では交流信号(交流回路)の計測について、基本的な考え方を解説します。交流といっても急しゅんに変化するデジタル信号にも同様のことがいえます。

併せて計測のときの小技(といっても結構大事なもの)も紹介します。

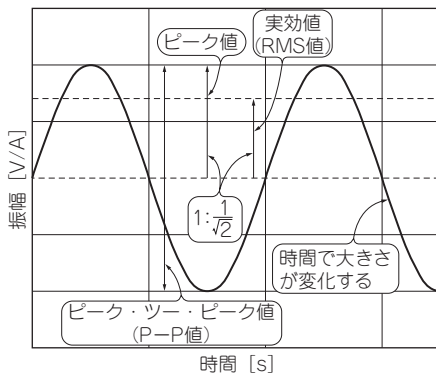
2-1

まずはおさらい：交流で計測する値

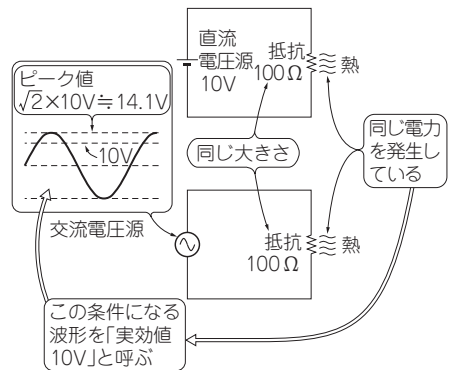
● 交流は振幅が時間変化するので計測する値の定義が必要

直流は電圧や電流の大きさが、そのまま単純に、本来の計測値となります。一方交流は、図2-1のように時間で大きさが変化しますから、どの点をその波形の計測値として定義するかが問題です。

交流(特に正弦波)の場合には「実効値」というものを主に用います。



[図2-1] 交流波形(正弦波)の大きさの表し方



[図2-2] 実効値を使えば直流と交流を同じ量として取り扱える

第3章

【成功のかぎ3】

高周波信号の集まり「デジタル信号」の計測 正しいグラウンドで正しく計測する

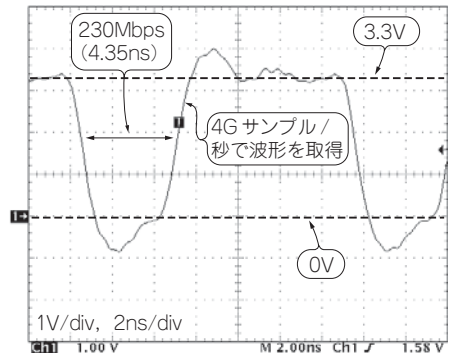
本章から第5章までは、デジタル回路の計測とプロービング方法を説明していきます。デジタル回路とはいえ、結局は電気信号です。そのことを考えれば、デジタルでもアナログでも考え方に全く差異がないということを説明していきます。

3-1 デジタル信号は高い周波数成分があるので計測には注意

● 10 MHzのクロック信号には100 MHzを超える周波数成分が含まれている

「デジタル回路はつなげば動く」といわれたのは、既に20年以上前の昔話なのかもしれません。最近ではデジタル回路が高速になり、数百MHz、場合によってはGHzの動作速度もあり得ます。

そうでなくても、デジタル信号の立ち上がりはもともと高速です。例えば10 MHzの繰り返シクロック信号であっても、信号には5～9倍(50 M～90 MHz)、またさらに高次のとても高い周波数成分つまり「高周波信号」が含まれています。



【図3-1】 デジタル信号も実はアナログ信号
230 Mbpsの3.3 V CMOS信号

第4章

【成功のかぎ4】

数十MHzのデジタル信号を 50Ω系計測で忠実に計測

プロービングによる信号波形の変化を抑えるテクニック

本章では高速化してきているデジタル信号を、オシロスコープで適切に計測する「50Ω系計測テクニック」を紹介します。クロック速度が数十MHz程度までのデジタル信号を、忠実に計測できるようになります。日ごろのデバッグ・問題解決に活用できるものと思います。

4-1 数十MHzのデジタル信号をオシロで忠実に計測する

● パッシブ・プローブで高速のデジタル信号を正しく観測できるか

図4-1(a)にパッシブ・プローブを用いて、40MHzのクロック・ラインをプロービングしたものを示します。波形が大きく暴れているのが分かります。というよりは、(実際のケースでは)よく見る波形ではないでしょうか。

この波形は果たして「インテグリティ」が高いと、確からしい計測だといえるでしょうか。少なくとも、余計な容量やインダクタンス成分がプローブにあるので、「正しくないのではないか？」と予想できると思います。

図4-1(b)は本章で紹介するテクニックを用いて計測した波形です。驚くほど波形のようすが異なっています。

4-2 パッシブ・プローブの限界

● おさらい：デジタル信号のプロービングの基本

これまで説明してきた、デジタル信号の波形を忠実に捉える基本的な注意点を、おさらいとして示します。

5 第5章

【成功のかぎ5】 デジタル回路の放射ノイズの計測と対策 基板上の電圧/電流の変化が放射ノイズを生む

本章では、解決の難しいデジタル回路の放射ノイズの計測・プロービング方法について解説します。放射ノイズを計測したり対策したりするためには、基板上で発生する反射やリングングを理解しておかなければなりません。本章の後半では反射やリングング発生のメカニズムも解説します。

5-1

電磁波の性質を理解して対策する放射ノイズ

● デジタル回路では放射ノイズ対策に苦勞する

現代の電子回路設計は、放射ノイズ対策が切り離せないものとなってきました。機器が放射する電磁界に対してのEMI (Electro-Magnetic Interference；電磁妨害) 規格や、放射/感受性に対してのEMC (Electro-Magnetic Compatibility；電磁両立性) 規格を満たさなければならないケースが増えています。VCCI規制やCISPR規格、IEC規格が代表的です。

特にデジタル回路ではこの問題は深く、規制をパスするためはかなり苦勞しているようすを見聞きます。

また規制を満たす必要がなくても、ノイズを大きく放射しているのは、回路の動作に無駄があるということなので、ノイズを放射しないに越したことはありません。

● 対症療法ではなく現象を理解して対策すべき

EMI (電磁妨害) は基板からノイズが電磁波として放射され、それが他の電子機器に影響を与えるというものです。この「ノイズが電磁波として放射」されるしくみというものは、マジックのような、理解不可能な発生原因ではなく、**図5-1**に示すように、基板上の電圧の変化と、電流の変化が元となって発生します。

対症療法でいろいろと放射ノイズ対策をするよりも、「電圧/電流の変化」をい

第6章

【成功のかぎ6】

精度よく電圧や抵抗値を計測する

回路図にないインダクタンス/容量/抵抗成分が誤差になる

第2部ではデジタル信号(回路)での計測を中心に説明してきました。第3部では、アナログ信号(回路)を計測するための考え方やテクニックを紹介합니다。これらはデジタル信号の計測にも生かせるものです。

特に直流で精度よく計測するというだけでなく、周波数が高くなっても精度を維持できる計測方法について考えていきます。なお「温度変化」も精度よく計測するには重要な点ですが、本書では踏み込まないことにします。

6-1

「精度よく計測する」には

● 「精度よく計測する」とは目的の精度を維持すること

計測全般にいえることですが、「精度よく計測する」とは、目的とする精度で測定対象を計測することです。当たり前といえば当たり前のことですが、これから説明するような、いろいろな要因が実際には影響を与えるため、なかなか思ったおりに計測できないことが現実です。

● 「精度よく計測する」には「プロービング」が重要

測定器の限界に直面する前に、だいたい計測方法(つまりプロービング)が不適切であるために、きちんと計測できない場合がよくあります(図6-1)。誤差要因が何であるか、それが誤差としてどれだけ影響を与えるかをきちんと考える必要があります。これにより計測の確からしさを高めることができます。

ここでは特に高精度かつ適切に電氣量を計測するためのプロービング(オシロスコープに限定していない)を説明します。

精度よく計測を行うには、表1-2で示したように、測定対象と計測の誤差要因を考える必要があります。

7章

【成功のかぎ7】

知って得するアナログ信号の 電圧 / 電流計測テクニック

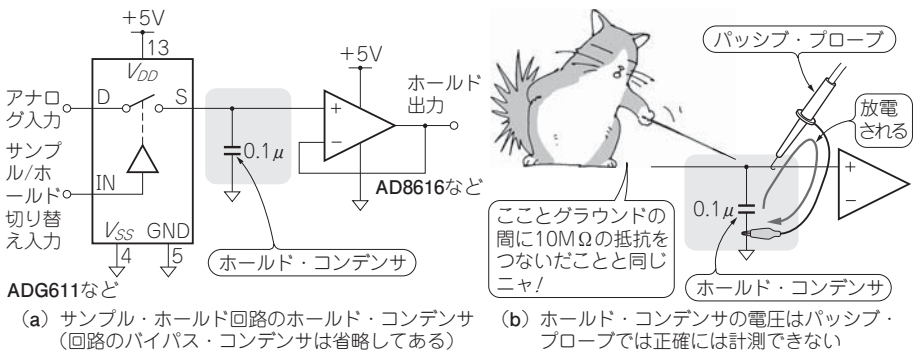
原理を理解すれば簡易計測したり精度よく計測したりできる

第6章では、電圧計測におけるグラウンドの影響についておさらいし、電圧や抵抗値を正しく知るための計測方法を解説しました。本章ではより具体的な電圧や電流の計測方法や考え方、ノウハウなどを紹介します。オシロスコープだけでなく、他の計測系(測定器)でも共通する一般論として説明します。

7-1

電圧を的確に計測する その1:プロービングの影響を受けやすいハイ・インピーダンス回路

サンプル・ホールド回路やピーク・ホールド回路では、電圧値を維持(ホールド)するためにホールド・コンデンサが用いられます。このコンデンサはホールド動作中に放電してはいけませんから、かなりハイ・インピーダンスな回路であるべきです。



【図7-1】パッシブ・プローブを安易に接続すると正しく電圧を計測できない例①…サンプル・ホールド回路のホールド・コンデンサ

プローブのインピーダンスは測定対象(ホールド・コンデンサ)で必要なインピーダンスより十分大きくなければ誤差になる

第8章

【成功のかぎ8】 確実に動く回路を作るために…位相の計測 アナログ回路の安定度が分かる

電子回路では「位相(位相差)」を計測するケースが意外と多くあります。位相が分かれば、入出力の位相特性などが把握できるだけでなく、回路が確実に動くかどうかを示す「安定度」も分かります。本章では位相を計測する方法についていくつか紹介し、実際に計測も行ってみます。さらにOPアンプや電源回路などの負帰還系の安定度も評価してみます。

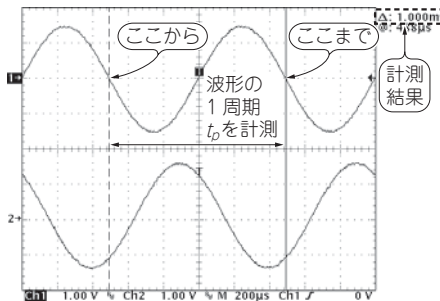
8-1

二つの信号の位相差を計測する

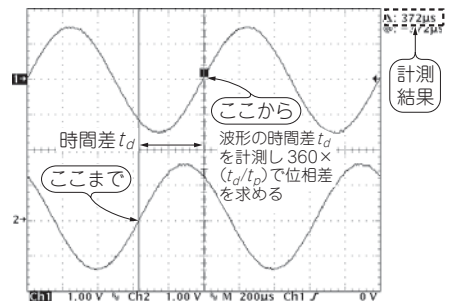
● オシロスコープを使ってカーソル機能で値を読む

信号の位相を計測するには、図8-1のように、単純にオシロスコープのカーソル機能を用いて2信号間の位相差を計測する方法があります。現実的にはこの方法でも精度的に十分な場合が多いです。

最初に図8-1(a)のように基準位相量(360°)に相当する1周期の時間 t_p [s]を計測します。次に図8-1(b)のように位相差に相当する時間 t_d [s]を計測し、以下の式で



(a) 波形の周期をまず計測する



(b) 時間差を計測し、周期との関係で位相を計算する

【図8-1】 オシロスコープのカーソル機能を活用して位相差を計測する

第9章

【成功のかぎ9】

原因不明?…同相モード電圧ノイズを回避する計測テクニック

グラウンドの電位はどこでも同じだと思ったら大間違い

回路には、さまざまなノイズが発生しており、計測の妨げになっています。なかでも回路全体が揺さぶられて発生する「同相モード電圧」と呼ばれるノイズは、回路の2点間の電圧(電位差)や波形を正しく計測することを難しくしています。この話題は第6章でも簡単に紹介しました。

本章では、同相モード電圧の発生メカニズムとこの影響を回避する計測のテクニックを紹介します。ここではオシロスコープを例にした対策方法を紹介しますが、どんな計測器を使う場合にも有効な一般論です。

9-1 計測でノイズの原因になる同相(コモン)モード電圧とは？

● グラウンドの電位はどこでも同じだと思ったら大間違い

同相モード電圧とは、グラウンドの場所ごとに生じる電位差です。「グラウンド間電圧差」という意味だといえます。発生原因の例を図9-1に示します。

図9-1(a)の例は、左右二つのグラウンド間にループが形成されており、このループ内には周辺回路やAC電源(商用交流電源)の電流により発生する磁界が通り抜けています。同相モード電圧は、これらの磁界によって生じる起電力(もしくはその起電力により流れる電流での電圧降下)を主な原因として、二つのグラウンド間に発生した電位差です。

また図9-1(b)の例は、二つのグラウンド間に別回路の電流が流れており、この二つのグラウンド間の抵抗/インダクタンス成分の電圧降下により電位差が発生してしまう、というものです。これも同相モード電圧の原因になります。

いずれにしても計測系のグラウンドに想定外の電圧が発生しています。

第 10 章

【成功のかぎ 10】

スペクトラム・アナライザの原理と基本的な計測

高周波だけでなく高速・微小信号にも応用できる

電子回路は、高速化・高精度化してきていますが、一番身近な測定器「オシロスコープ」だけを使っていたのでは、これらの高速で微小な信号に潜むひずみや、大振幅の信号に紛れ込んだ振幅レベルの小さい信号を正しく観測することができません。電子回路を開発するときにも、行き詰まるケースが増えてきています。

高速化・高精度化した現代の電子回路の信号を分析するには、横軸を時間で表示するオシロスコープに加えて、横軸を周波数で表示してくれるスペクトラム・アナライザが欠かせません。第10章から12章では、そんなスペクトラム・アナライザのさまざまな使い方を解説します。

10-1

スペクトラム・アナライザでできること

● 横軸が時間のオシロでは分からないことが横軸が周波数のスペアナで分かる

たとえばオシロスコープで観測した図10-1(a)のような信号波形に、ノイズのようなものが見えていたとします。単に時間軸の波形を見ているだけでは、このノイズの素性を見極めることは困難です。

スペクトラム・アナライザ(以降、スペアナと呼ぶ)を用いてこの信号波形を周波数軸で計測してみると、図10-1(b)のような周波数スペクトルになっていることが分かりました。オシロスコープで見えていたノイズは、同図の4.3 MHzの成分であり、これが信号波形に重畳していることが確認できました。またスペアナは縦軸がdB(対数)表示なので、相対的に小さい信号レベルもきちんと表示してくれます。

スペアナを使うことで4.3 MHzの混入を見つけることができました。この4.3 MHzが回路のどこかに混入しているはずで、その混入経路を特定していく、というデバッグ手順になるわけです。

第 13 章

【成功のかぎ 13】

TDR 配線診断の準備…原理と波形発生器の製作

簡易的なステップ波形発生器とオシロで伝送線路のようすが診断できる

プリント基板の配線パターンや同軸ケーブルなどの伝送線路^{注1}のようすを簡単に推定できる計測方法に、Time Domain Reflectometry 計測法(以降、TDR 計測)があります。伝送線路のインピーダンス特性やインピーダンス不整合、途中や出力端にある抵抗/容量/インダクタンス成分などを、完全に確からしくとはいえないまでも、計測(配線診断)することができます。

以後では、このTDRの原理や簡易的な測定器の製作、実際の計測方法などを紹介していきます。

本格的な超高速TDR計測を例としてはいませんが、ここで示す考え方は、高速デジタル信号の伝送品質劣化問題の解決にもそのまま応用できます。

13-1

時間軸で計測する伝送線路の診断術「TDR」

● 配線パターンのようすをオシロスコープで調べられる

プリント基板上の配線パターン(伝送線路でもある)で、信号が正しく伝送しているかを確認するために、特性インピーダンスや電気的な不連続、負荷IC端の入力インピーダンスなどを調べたいことがあります(図13-1)。

通常このような計測を行うためには、ネットワーク・アナライザ(ネットアナ)が必要です。しかしこの計測器は高価であり、使う機会も少なく、かつ使い方も難しいなど、ハードルが低くありません。

とはいえ実際のところは「それほど精度よく計測できなくても、だいたいの特性が分かればよい」ということがほとんどでしょう。それをいつものオシロスコープを使って「時間軸で等価的に計測できる」としたら、とても便利なことですね。それを実現できるのがTDR計測なのです。

注1：第5章でも説明したが、「伝送線路」とは、電気信号を伝える、その物理的長さも考慮したほうがよい、ケーブルやプリント基板上の配線パターンのこと。本書ではその中でも特に、以降に示していく「特性インピーダンスが一定なもの」を伝送線路と定義する。

第20章

【成功のかぎ20】

オシロスコープ自体もノイズ源になりうる

標準機能や自作のロー・ノイズ・プリアンプで波形を正しく捉える

最近では高性能(広帯域)なオシロスコープも低価格になってきたため、広帯域なオシロスコープで作業することも増えてきているのではないのでしょうか。

一方で、そのオシロスコープで計測する回路側としては、それほど高い周波数の信号を取り扱っていない、というケースも多いのではないかと思います。さらに、それが微小なアナログ信号であるケースも多いでしょう。

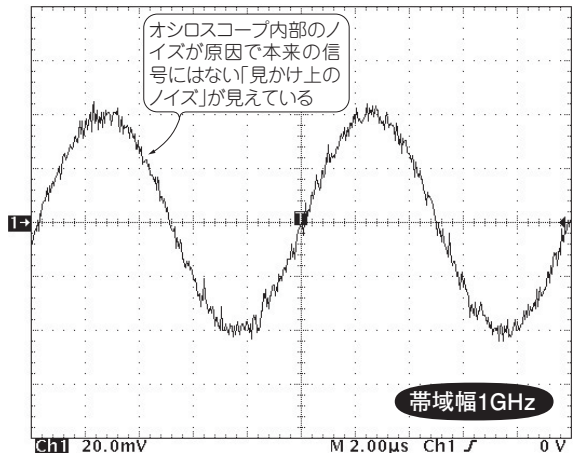
このようなとき、広帯域オシロスコープ内部で発生しているノイズがこの測定対象の信号に乗って、ノイズっぽい波形を観測してしまうことがあります。

そこで本章では、オシロスコープ内部そのものから発生するノイズの影響を低減するテクニックを紹介します。

20-1 オシロスコープ内部で発生するノイズが計測に影響を与える

- オシロスコープ自体から発生するノイズが原因で、本来の信号にはない「見かけノイズ」が表示される

電子機器は機器内部からノイズが発生します。このノイズは「ホワイト・ノイズ」



【図20-1】 要注意！ 信号源の振幅が小さいと(電圧レンジが低いとき)ノイズと一緒に観測される
帯域幅1GHzの場合

第 16 章

【成功のかぎ 16】

差動信号の伝わり方と波形の確認

差動モードと同相モードに分けて考える

近年は、アナログ信号、デジタル信号を問わず、信号伝送^{注1}の手法として「差動伝送」が多用されています。差動伝送は高速な信号を安定に伝送できるからです。USBやイーサネットなど、高速化・シリアル化が進む近年の信号伝送のコモンセンスといえるのではないのでしょうか。古くからある高信頼性シリアル伝送のRS-422やRS-485などでも差動伝送が活用されています。

本章から第19章までは、シングルエンド伝送との違いや、差動伝送での信号の伝わり方、差動伝送線路のようす、正しい計測方法などを説明していきます。どのように差動伝送を考え、取り扱えばよいか分かります。

ちょっと難しそうな差動伝送も、実は単純な回路計算から考え方を延長したものの、そしていくつかの考え方を足し合わせたもの、ということが分かります。

16-1 差動伝送はすごい! 信号をノイズ少なく良好に伝送できる

● シングルエンド伝送と差動伝送の違い

▶ シングルエンド伝送：信号は1本の電線、リターンはグラウンドを経由

図16-1(a)に、よく用いられている信号伝送方式である、シングルエンド伝送方式を示します。これは電子回路とすれば当然ともいえるような回路で、信号は1本の電線(もしくはプリント基板上のパターン)を伝わり負荷側に伝送されます。一方でリターン電流は、グラウンドを経由して出力側(信号源側)に戻っていきます。

▶ 差動伝送：振幅が逆方向の2信号を使って2本の電線で伝送

図16-1(b)に差動伝送方式を示します。差動伝送方式では信号を伝送するための電線(もしくはプリント基板のパターン)が2本になっています。この2本の電線それぞれに、振幅量が同じで、かつ振幅が逆方向(逆極性)の信号が加わり、この2本がペアとなって「差の信号量」として伝送します。

注1:「伝送」という用語を用いて説明していくが、IC出力から別のIC入力に信号を伝えるようなケース(インターコネクト)もこの一つとしている。

第 21 章

【成功のかぎ 21】

パッシブ・プローブの等価モデルと正しい計測 調整の必要性から性能を 100 % 引き出すコツまで

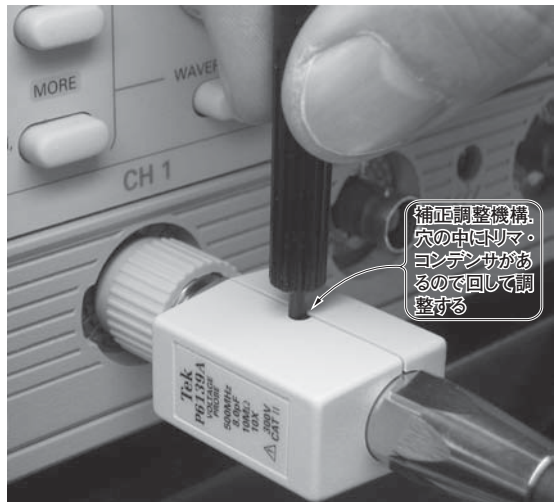
オシロスコープには通常、パッシブ・プローブが付属しています。すぐ使えるようにというわけですが、何もせず適当につなぐだけで正しい計測ができるわけではありません。まず、オシロスコープに合わせた調整(補正)が必要です。そして性能を引き出すには、回路とのつなぎ方にもコツがあります。

この章では、調整の必要性と、計測においてパッシブ・プローブの性能を引き出すコツについて解説します。

21-1 パッシブ・プローブは調整しておかないと正しく計測できない

● パッシブ・プローブには調整機構がついている

オシロスコープで一番活用されるプローブは、パッシブ・プローブです。パッシ



[写真21-1] オシロスコープをかうとついてくるパッシブ・プローブは周波数特性を調整(補正)してから使うプラスチックなど絶縁体でできた調整棒を使うこと

第22章

【成功のかぎ22】

入力容量1 pFの自作アクティブ・プローブによる計測

パッシブ・プローブでは対応できない高周波アナログ信号計測に挑戦

本章ではオシロスコープを用いた計測において、測定対象に影響を与えずに、アナログ信号の確からしい計測を実現する方法を紹介します。パッシブ・プローブの限界を解説し、より測定対象に影響を与えにくい簡易アクティブ・プローブを製作して実験してみます。また、アクティブ・プローブによる計測に限界があることにも触れておきます。

「測定対象に影響を与えないで計測する」の意味はいろいろ考えられますが、ここでは周波数特性について考えます。

22-1

パッシブ・プローブで計測できる周波数の上限

オシロスコープ計測で一般的に用いられるパッシブ・プローブは、周波数特性を補正しないと、確からしい波形として計測できません。またグラウンド・リードがインダクタとなって、周波数特性の乱れを生じさせ、さらにワンターン・コイルとなって、計測する波形に外部磁界からの誘導ノイズが乗るため、グラウンド・リードは極力短くした方がよいことを前章で説明しました。

しかしながら高周波アナログ信号を計測する場合は、グラウンド・リードを極力短くするだけでは不十分なのです。そのことを以下に説明します。

● プローブは回路の動作に必ず影響を与えている

図22-1は前章の図21-5で示したパッシブ・プローブのモデルのうち、グラウンド・リードの長さをゼロとして、入力部分だけを取り出したものです。

プローブ・チップ先端とグラウンド間には入力容量があり、P6139Aの場合、データシートでは 8 pF_{typ} になっています。

このモデルを用いて、プローブの入力インピーダンス特性を計算した結果を図22-2に示します。

CQ出版社

このPDFは、CQ出版社発売の
「アナログ・センスで正しい電子回路計測」の一部見本です。

内容・購入方法などにつきましては以下のホームページをご覧ください。

内容 <http://shop.cqpub.co.jp/hanbai/books/42/42031.htm>

購入方法 <http://www.cqpub.co.jp/order.htm>

Multimeter

Peak-to-Peak

Root Mean Square

Oscilloscope



Passive probe

Digital & analog circuit

アナログ・センスで正しい 電子回路計測

高速時代は回路の理解&プロービングが成功のかぎ

Active probe

Phase margin

Time domain reflectometry

Differential transmission line

Common mode noise

Spectrum analyzer

見本