

(2021.01 版)

技術コラム

(計測の巻)

目次

1. 高速電流測定について
2. 偉大なオームの法則
3. 1Ω の測定
4. 電子計測のツボ
5. 微小電圧と誤差
6. DMM とソースメータ
7. 4 端子法という測定
8. DMM とエレクトロメータ ソースメータ
9. 電圧パルスと電流パルス
10. パルス波形の測定についての捕捉
11. ナイキストの定理
12. 測定速度
13. オシロスコープ 縦と横の分解能
14. DMM とデータロガー
15. 計測器で使用するコネクタ
16. ダイナミック・レンジと分解能



アクシス・ネット株式会社

1. 高速電流測定について

新素材の開発が最近のキーワードになり、化学的には、画期的な素材として開発されても実際のアプリケーションでの応用時に電氣的な定量解析が必要となります。

実際に測るパラメータは、電圧、電流、抵抗、容量など基本的な測定です。

ところが、基本的な測定で問題が出た場合が大きな問題となってしまいます。

その一つが電流測定と言えます。電流は、電荷が単位時間に移動する量を測定します。

時間がゆっくりか、電荷が多ければ測定する方法は簡単です。高速な電流信号、10mA 50MHz 程度ならばオシロスコープと電流プローブで測定できます。

しかし、10nA 1MHz という電流信号を測定しようとするとうすばよいのでしょうか？シャント抵抗を使うのでしょうか？



電流 10nA を電圧を計測する測定器にあわせ 10mV 電圧に変換するには 1M Ω の抵抗が必要で 1M Ω に 1MHz が減衰せずに通すことは至難の技と言えます。

そこで、高速の電流電圧変換アンプが必要となります。

10 の 6 乗ゲインで立上がり 350ns のアンプであれば高精度に微小電流を測定できます。

2. 偉大なオームの法則

筆者は、確か小学生高学年で電池を使った実験でオームの法則を習った記憶と中学 1, 2 年くらいに試験で 電流 I 電圧 V 抵抗 R の関係を書く問題があったと遠い記憶にメモリされています。(ゆとり教育ではありません)。

さて、最新の半導体においてもよく使用される導電性膜 (ITO 等) がオーミックであるかどうかの評価が必要です。ITO だけに限らず抵抗を測定することは、簡単であると思われています。

まあ、抵抗を測定するには、一定の電流を流し電圧を測定し電圧/電流を計算します。

その何が問題やねん。

銅や金などの純粋な金属であれば電流と電圧は一定の比例関係を示しその比が抵抗です。温度を考えなければ簡単に測定できるものでしょう。

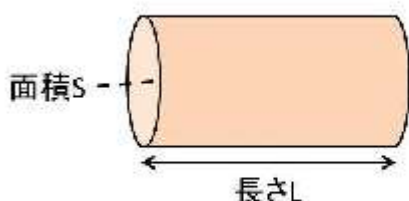
では、10cm の銅線の抵抗測定をする場合、何が必要なのでしょう。 ちょっと高級な DMM 6桁半の 100Ω レンジで4端子測定で出る値は、測定用のケーブルを使用せず端子を直結しても誤差は、3mΩ ほどはあります。

銅線の抵抗率は、 1.68×10^{-8} 乗 Ωm

断面積が 1mm² 乗で 10cm (100mm) 1.68×10^{-2} 乗

16.8mΩ の誤差 3mΩ の測定となります。

電気抵抗と抵抗率(比抵抗)の意味



$$\text{電気抵抗} R[\Omega] = \text{抵抗率} \rho[\Omega \cdot \text{m}] \times \text{長さ} L[\text{m}] \div \text{面積} S[\text{m}^2]$$

問題は、コレだけでなく熱起電力 銅と銅の接触でも $0.2 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ あり、片方が錆びていれば数 $1000 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ と温度によって変わります。

100Ω レンジの測定では、1mA の電流を流して測定しているので電圧として測定している値は、 $16.8 \mu\text{V}$ 誤差が $0.2 \times 20^\circ\text{C}$ $4 \mu\text{V}/1$ 接点なのでへたをすれば数 $10 \mu\text{V}$ (10mΩ) の誤差がでます。

銅の測定はどうしましょう。

私の経験では ITO 膜などでも別の問題があり、低い電圧や速い測定（電圧印加から 10ms 以内）では、抵抗値が思ったより高い場合があります。

低い抵抗は、問題があるのはわかりました。絶縁抵抗ではどうでしょう？

10 の 15 乗の測定をしたい場合、1000V 印加で 10^{-12} 乗 A (1 pA)の測定となります。最高級のエレクトロメータで誤差 3 f A (3×10^{-15} 乗 A) 普通のエレクトロメータで誤差 60 f A 何や簡単そう。でも 2つの問題が待っています。

サンプルを支える治具は、絶縁体でも 10 の 15 乗程度のものほとんどでエポキシなどは 10^{13} 乗程度でサンプルを支える治具が何でできているかを調べるのが重要です。サンプルよりも高抵抗であってもリークの電流が無視できない場合もありコレを防ぐ

配線（ガード）を正しくすることが重要です。

もし、高電圧がかけられずに高抵抗を測定する場合は、更に問題が複雑になります。10V しかかけれない場合は、エレクトロメータを使用しても 10 15 乗の抵抗測定はかなり難しい測定です。100 f A を精度良く測定するということです。ハムノイズの除去など困難を極めます。

一部の大変高額な半導体パラメータアナライザーで高いオプションをつけて電流分解能をあげて測定ができる場合もありますが、筆者の経験では、2 端子のデバイスであればエレクトロメータのほうが、絶縁体の測定では安定しているように思えます。測定する電流計が違えば、ガードが効果良くきいていると思うのですが。

測定器の限界近くの測定をする場合は、測定器の限界のみならず、治具や配線、周囲環境まで影響します。 たかが、抵抗されど抵抗といった感じです。

今回の結論は、1Ω－100MΩ までは、上等な DMM で測定できますが、限界測定は、環境までも問題になります。

更に、抵抗が一定であると考えていますが、材料によってはオーミックではない場合もあります。 電流（電圧）を変化させて電圧（電流）を測定すると抵抗であれば、直線的に比例しますが、ダイオードのような反応をする場合があります。

異種金属の接触では、ゼーベック効果（わかりやすくいえば熱伝対）がありますが金属と半導体の接合ではショットキーダイオードの効果があります。

これらの特性を正しく測定するには、電流（電圧）を変化させて電圧（電流）を測定する（IV 測定）が必要です。

逆にいうと 高精度な IV 測定で新素材の基礎特性がわかります。

3. 1Ω の測定

最近、2 次電池の電極材料の測定という話が増えてきました。

これも、極限の低抵抗測定といえ 1Ω 以下の測定と同じ問題が起こります。

何回かこのコラムでも書きましたが、抵抗測定でも標準的な DMM のレンジの外、1Ω 以下や 100MΩ 以上の抵抗測定は、注意が必要です。

1Ω の抵抗に 200mΩ の測定リードを繋いで 2 端子測定をすると 1.2Ω となり、20% の誤差となってしまいます。

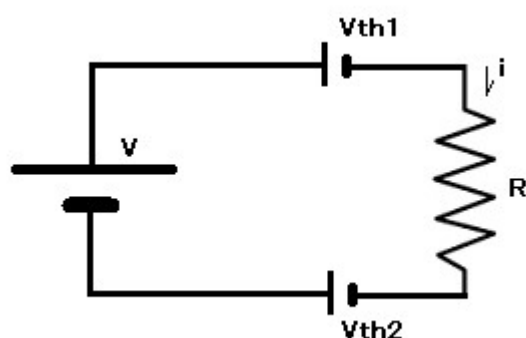
これは、通常 10mA の電流を 1Ω に流して電圧を測定するのですが測定する電圧計が 200mΩ の抵抗も合わせた 12mV を読んでしまうからで、4 端子法で電流パスとは別

に電圧測定の端子を 1Ω に当てれば電圧計の入力抵抗は 1 M 程度以上なので 10 mV となり 1Ω の抵抗を正確に測定することができそうです。

(4 端子法については、別に詳しく解説しています)

できそうということは、まだ問題があり微小抵抗測定時は、熱起電力が問題になります。異種金属の接合面でゼーベック効果により温度に依存した電圧が発生します。 20°C であれば数 mV の電池になることがあります。

この影響を除去するには、DC の測定であれば電流反転法か AC の 4 端子法になります。



V = 電池 $V_{th1} V_{th2}$ = 熱起電力 R = 抵抗 i = 電流

AC の 4 端子法のほうが価格が安くできますが、DC の電流反転法のほうが極限の低抵抗測定が可能です。

AC 測定は、周波数も電流値の決まった値でしか測定できません。

一番の違いは、AD の分解能と測定精度です。

キーになるのは、DC の測定器は、7 桁半のメータで 24 ビット相当の AD を使用して高分解能で高精度の測定が可能です。

尚且つ、電流の値を変えて測定することも可能です。電圧計が許す限りの電流で測定が可能です。現在販売されている最高性能の電圧計の誤差は 40 nV 程度なのでこれを 1% の誤差とすると電圧測定で $4\mu\text{ V}$ の測定となります。

1Ω の測定に $1\mu\text{ A}$ もしくは、 $1\mu\Omega$ の測定であれば 1 A になり熱起電力の誤差数 $\mu\text{ V}$ がなければ、簡単な測定です。

熱起電力のキャンセルには、精度の良い電流を反転させての測定が有効です。熱起電力のキャンセルには、精度の良い電流を反転させての測定が有効です。

このことを理解した上でコンタクトが確実にできる測定ジグが必要です。

4. 電子計測のツボ

1. DMM (デジタルマルチメータ)



メリット

なんにでも使えるが、電圧測定が基本。分解能が他の計測器より高い。

デメリット

速度は電源周波数 PLC が基本。高速信号の測定に不向き。微小抵抗や微小電流測定には、不向きなことが多い。

2. オシロスコープ



メリット

とりあえず時間軸で波形が見える。いろいろな条件でトリガがかけれる。差動プローブ、電流プローブなど豊富なオプションがある。FFT 機能があれば、スペアナの代わりになることがある。

デメリット

バンド幅やメモリー長、サンプリングなどの落とし穴がある。

3. 計測電源 (ソースメータ)



メリット

電源として2つのモード 電圧印加電流測定、電流印加電圧測定ができる。

(4象限の測定が可能) 半導体素子の基本測定に向いている。

デメリット

普通の電源より高い。パネル設定がややこしい場合が多い (個人の感想)

4. スペアナ



メリット

変調された高周波の解析が一発でできる。

デメリット

周波数が高くなると、価格もおもいきり高くなる。

筆者の個人的意見として電子計測 3 種の神器は、DMM、オシロ、計測電源。 高周波が来たら、スペアナ、微小電流ならエレクトロメータ 微小電圧ならナノボルトメータ、記録するならデータロガー

5. 微小電圧と誤差

新しい素材の開発によって、往々にてして問題になるのが、素材の定量化(測定方法)です。単純とされている直流電圧 電流の測定も μV 以下や nA 以下を測定する場合注意が必要です。

$10\mu\text{V}$ を測定する場合、誤差が 1% で測定すると分解能 100nV では足りません。 10nV 分解能 誤差 100nV で 1% 精度と言えます。

通常 100mV レンジの DMM であれば 10nV 分解能は 7 桁半以上(8 桁)必要になります。この時、注意しなければいけないのが熱起電力です。銅と酸化銅の接点で 1°C の温度で約 1mV 発電します。つまり銅の配線が錆びていれば、良い電池になります。

こうなっては、デバイスの測定どころではありません。高感度な DMM であれば、測定端子を入れ替えば、電圧が大きく変化して熱起電力があることが分かります。

これを利用して測定する電流を反転し高精度に微小電圧もしくは微小抵抗を測定する方法があります。微小電流 $100\mu\text{A}$ にてケーブルの抵抗数 $100\text{m}\Omega$ を測定することも可能です。

6. DMM とエレクトロメータ ソースメータ

人に得意不得意があるように、計測器にも得意不得意があります。



DMM

エレクトロメータ ソースメータ

一番よく使われる測定器は DMM（デジタル・マルチメータ）です。

電圧、抵抗、電流とオームの法則で測定します。あまりに簡単にデジタルの数字がでてくるのでその数字がすべて正しいと思われませんが、果たしてそうなのでしょうか？

DMM（マルチメータ）の計測部は、電圧計しか持っていません。

電圧を測定する場合は、もちろん OK です。では電流と抵抗はどうやって測定しているのでしょうか？

電流は、シャント抵抗を切替えて DMM が読みやすい電圧にして測定しています。

一般的に 20mV レンジが最高感度の DMM でシャント抵抗が 10K Ω ならば、20 μ A–1 μ A 程度が測定できるということです。でも、例えば、1 μ A しか流れない回路に 10K Ω を接続して大きな問題にならないければ良いのですが、そう都合の良いことばかり起こらないのが世の中です。例え問題が起こらなくても DMM で 1 mV の測定精度はどれくらいでしょうか？

エレクトロメータの測定原理は、電流帰還アンプを使用して微小電流を測定します。

このため、測定器の入力は通常イマジナリー・ショートで理想的には 0V です。

実際には、200 μ V 以下で先ほどのシャント抵抗よりも 5 分の 1 です。微小電流を測定するレンジに十分な分解能と精度を持っています。

抵抗測定での問題とはなんでしょう？

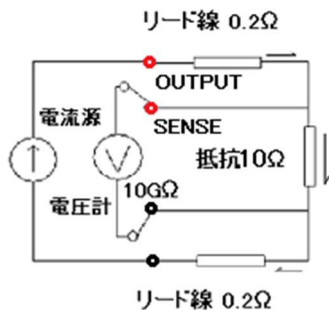
DMM の抵抗測定は、DMM が持っている電流源より電流を出し、やはり電圧を測定して抵抗を計算しています。生命線は、DMM の電流精度ですが多くの人はあまりこのことと気にしていません。更に 1 Ω の測定を DMM で 抵抗が 200m Ω ほどあるケーブルで測定した場合の値とはなんでしょう？

紙面もないので詳しいことは、また次回。。。 DMM は、電圧計というのが今回の結論でした。

7. 4 端子法という測定

抵抗測定で 4 端子法を使った測定は、2 端子と何がちがうの？

少し上等なマルチメータには、OUTPUT と SENSE という赤黒のペアが 2 つあります。



なんやねんコレ？と思われる方もいるでしょう。

OUTPUT は、電流印加用の出力で SENSE は、電圧測定用の入力です。

なんで2つに分けるねん。

10Ω 以下の抵抗測定を考えます。 OUTPUT から2本の接続ケーブル(1本 200mΩ)で測定する場合、通常 10mA 程度の電流が流れます。

抵抗では $10\Omega \times 10\text{mA} = 100\text{mV}$ ケーブルで $400\text{m}\Omega \times 10\text{mA} = 4\text{mV}$

合計 104mV 誤差 4% になります。

上等な DMM の SENSE 入力は 10GΩ あり 100mV に対して 10 pA しか流れません。

$400\text{m}\Omega \times 10\text{pA} = 4\text{pV}$ 測定器誤差の方が大きい領域です。

つまりケーブルのロスがほとんど誤差になりません。 10Ω 以下の測定では4端子測定が必要です。

また同様に微小電圧 例えば太陽電池セルの V_{oc} が 0.6V で電流が 5A ある場合もケーブルでの誤差が大きいので4端子測定が有用です。

8. DMM と ソースメータ

(DMM とソースメータ)

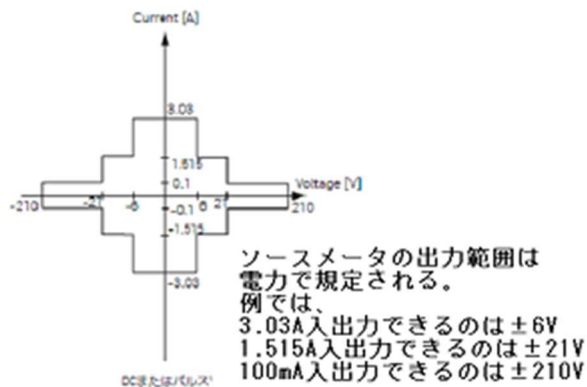
前回は、DMM とエレクトロメータについて述べましたが、今回は、計測電源 ソースメータです。まあ、ソースメータと言われても何のことという方が多いのではないのでしょうか？

DMM でお話をしましたが、抵抗測定するとき DMM は電流を出力し電圧を測定してます。

ソースメータは、設定した電流を出力し電圧を測定することと、逆に電圧を出力し電流測定も可能です。(メーカーとしては、キーサイト ケースレー ADC-MT があります)

ソースメータは、シンクモードもあり4象限の電源ということもできます。

別の意味でいう、バイポーラ電源も同等ですが、バイポーラ電源は電圧電流の精度が違います。

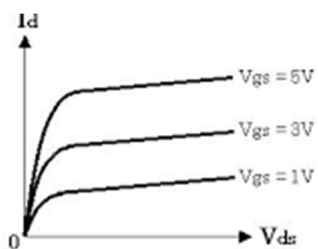


一般的なソースメータは、（と言ってもマイナーな製品ですが）電流分解能は pA 電圧分解能は μV あります。但し、接続がバナナ端子なので実際の測定は数 100 nA 数 $100\mu V$ が信用できる（1%程度のエラー）と言っても良いと思います。微小電流の主な誤差は電流ノイズでバナナケーブルなら数 10 nA 程度、微小電圧測定では、熱起電力が数 $10\mu V$ 程度の誤差を生じさせます。話が少しそれましたが、ソースメータは、電圧もしくは電流を変化させて電流、電圧を測定します。

何でそんなややこしいことするねん。。。

例えば、太陽電池 $V_{oc} 0.6V$ $I_{sc} 4A$ $P_{max} 1.6w$ 効率 15% という特性はどうやって測定するの一番簡単な方法、発電している太陽電池にソースメータを繋ぎ、 $-0.5V$ から $0.6V$ 以上 ($0.8V$ くらい) まで電圧を順次変化させ、ソースメータに流れる電流を測定し IV 特性を求め、それから計算します。時間にして数秒で終わります。

この他にも、半導体の特性試験に特によく使用されています。このソースメータを同期させ FET 等の半導体の特性検査をするものに半導体パラメータアナライザ（半パラ）があります。



9. 電圧パルスと電流パルス

通常パルスを測定するというと電圧パルスです。一番簡単な例は、オシロスコープで波形を見ます。最近のデジタル・オシロは、パルス・パラメータとして自動計測してくれるものがほとんどです。昔と比べるとメモリーも長くなり、サンプリングも速くバンド幅も十分広がっています。（昔とは、テクトロニクスがアナログのオシロスコープをやめたころ。

(コレで筆者の年齢がばれてします。)

さて、よく言われているバンド幅と立上り時間の関係

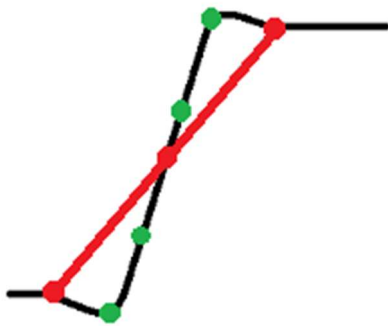
(立上り時間) = $0.35 / (\text{バンド幅})$ 簡単に書くと $350\text{MHz}/1\text{ns}$

1ns の立上り波形を見る場合 350 MHz のバンド幅の測定器が必要です。

2ns であれば 175MHz が必要です。

後は、サンプリングによるエイリアシングが起こらないことが必要です。

方形波の立上りを測定する場合、エッジに最低4点は欲しいので1ns の立上りを見るには、4GS/s 以上が必要です。 $10\mu\text{s}$ 間に発生する 1ns の立上りパルスを見つける場合、バンド幅350MHz サンプリング4GS/s メモリー40Kが必要でナイキストの定理よりかなり高速のサンプリングが測定には必要になります。(ナイキストの定理は、また別の機会に説明します)



さて、電圧パルスの測定はこのように3つのことに気をつけるのですが、これが、電流となるともう一ひねりという感じです。

高速電流をオシロと電流プローブで測定すると電圧レンジのバンド幅と電流プローブのバンド幅の違い、更に電流アンプの動作時間 (通常 数 10ns- 100ns)ずれてしまいます。

電流プローブは、ホール素子を使用して電流により発生する磁界で電流を測定します。

誘導を利用しているので電圧測定よりバンド幅が低いことがあります。

その上、誘導を利用しているので正確に測定できるのは、10mA 程度以上の電流測定となり微小電流測定は難しい。

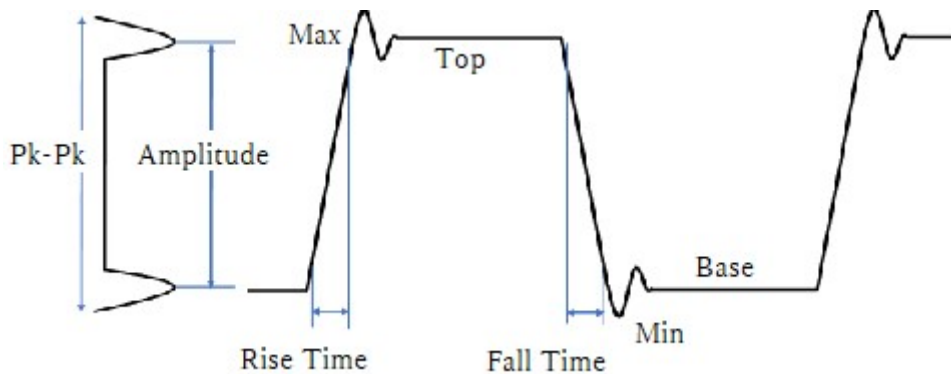
では、シャント抵抗を使ってオシロで見たらどうなるの？

高速信号 (だいたい 10MHz 以上) では、インピーダンスが問題になり 50Ω のマッチングを取らないと信号が正しく測定できません。

この為、微小電流を電圧に変換するには、インピーダンスの低く帯域のある電流アンプが必要になります。

10. パルス波形の測定についての捕捉

パルスという用語は、よく使いますがパルス・パラメータは、IEEE で規定されています。



方形波形をサンプリングし、ヒストグラムの上のピークをTop 下のピークをBaseとする。
波形の最大値をMax 最小値をMin とする。

Amplitude (振幅) = Top - Base

Peak-Peak = Max - Min

Rise Time (立ち上がり) Amplitude の 10-90%間の時間

Fall Time (立ち下がり) Amplitude の 90-10%間の時間

方形波を測定する場合には下記の注意が必要です。

第一に、周波数と方形波の関係としてデューティ 50%の方形波の周波数成分は、基本周波数の奇数次高調波となる。

例) 1kHz デューティ 50%の方形波の周波数解析 (FFT) をすると

基本周波数 1kHz 3 次高調波 3kHz 5 次高調波 5kHz 7 次高調波 7kHz・・・となる。

バンド幅とライズタイムには、 $\text{バンド幅} = 0.35 / \text{Rise Time}$ という関係式が成り立つ。

方形波の繰り返し周波ではなく、 Rise Time が速ければ 広いバンド幅が必要になる。

$1\mu\text{s}$ の Rise Time は、 $\text{バンド幅} = 0.35 / 1 \times 10^{-6}$ となり $\text{バンド幅} = 350\text{kHz}$ になる。

つまり、測定系のバンド幅が 350kHz ないと $1\mu\text{s}$ の変化は見えない。

350 kHz のバンド幅は、方形波を見る場合 5 次高調波が通ればほぼ方形波にみえるので 350kHz の 5 分の 1 70kHz までは 方形波として見えるがそれ以上は、サイン波のような波形に見える。

十分なアナログバンド幅を持った計測器でないと正確な測定ができません。

更に、サンプリングは、バンド幅の 2 倍以上の周波数が必要です。

11. ナイキストの定理

正確な 1 MHz のサイン波を 1MS/s (1 メガサンプル/秒) でサンプリングしたら

何が見えるでしょうか？ 答えは、直線しか見えません。

トリガが同期していないので、直線が上下するだけです。

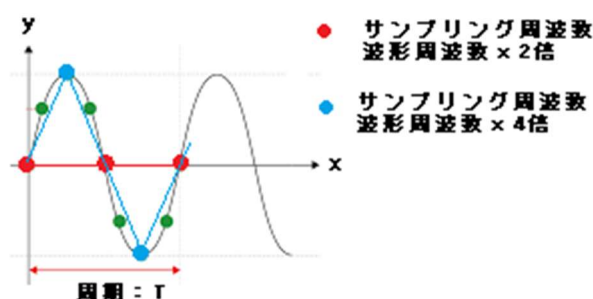
周波数成分を検出する最低限のサンプリング速度とはいくらでしょう？

答えは、2 倍の 2MS/s 以上が必要ですが、ちょうど 2 倍であれば、まだ直線が現れる可能性があります。 デジタイジングに必要なサンプリングは、サイン波であれば基本周波数の 4 倍以上 Duty50% の方形波では、10 倍以上が最低限必要です。

更に、測定器のバンド幅は、サイン波で 2 倍くらい 方形波では 5 倍くらいあれば良いといえます。

方形波は、5 次高調波が通れば形が方形波に見えますが 3 次高調波までしか通らなければサイン波のように見えます。

サイン波であっても 100MHz のサイン波をバンド幅 100MHz のオシロでみれば 振幅が 70% になります。



ここで、もうひとつ問題です。 1.1MHz のサイン波を 1MS/s でサンプリングすると何がみえるでしょう？

正解は、100Hz のサイン波形がはっきり見えます。これをエイリアジングと言い入力した波形とは違った波形が見えます。

また、デジタル・オシロも最近では、画面更新速度があがり、昔のように取り逃がしが少なくなったようですが、 サンプリングをしている限りサンプリングが追いつかない速いグリッジ（スパイク波形）は、見えません。 アナログオシロであれば、見えると言う方もいるかもしれませんが、遅い信号に乗った速いグリッジは輝度が暗くて見えないと思います。

方形波 50MHz の信号を見る場合、バランスの良い測定器は、
5 倍の周波数 250MHz 以上 10 倍のサンプリング 500MS/s でメモリーも 100K 以上あり、現象にあったトリガ機能があれば一番測定がしやすい。

やはり、デジタルでトリガ条件により信号をきちんと捕捉したほうが測定が容易であると筆者は思っております。

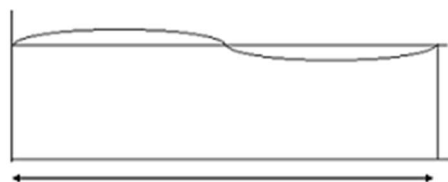
1 2. 測定速度

DC 測定では、時間の概念が無いのですが、実際の計測器では、どうやっているのでしょうか？

微小な信号を測定する場合、厄介な問題なのでハムノイズです。

測定時間に規定がないので DC 測定は、通常積分をしてハムノイズを除去します。

ハムノイズは、電源周波数 50Hz か 60Hz なので、この 1 周期分を積分すればハムノイズを除去できます。単位を 1 PLC (パワーラインサイクル) 20m s もしくは、16.666m s。



1PLC=16.666ms (60Hz) 20ms(50Hz)

つまり、電源ノイズがあるなら、1 周期分平均してしまえばノイズが消えるということです。

信号が十分大きい場合は、ハムノイズを無視して高速測定ができます。

ここで問題、高速な微小信号をどうやれば測定できるの？

たとえば、10mV 1GHz オシロスコープで波形を見ましょう。

時間軸なら、理解もしやすい。変調がかかっていたらどうでしょう？スペアナで見てみましょう。エネルギーの変化だから、電流を測定したい！！

10mA 以上 100MHz (立上り 3.5ns)までなら電流プローブとオシロしかないね。

電流が 10mA 以下になったらどうしたらいいの？

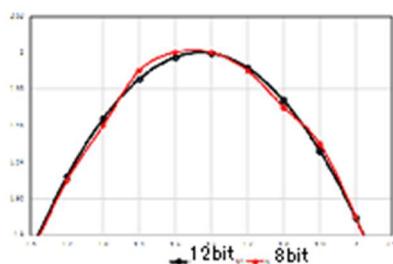
やはり、高速の電流アンプしかないのです。

1 3. オシロスコープ 縦と横の分解能

オシロスコープという波形測定の基準器について電圧(縦)一時間(横)の測定を考えます。

オシロスコープ(データーロガーも含む)は、人間の本能的に理解し易い、時間経過で電圧がどう変化したかをグラフ化してくれます。もちろん、電気の世界での動作なので回路上では、MHz や GHz の信号もあり、時間軸(横軸)の分解能は、ns 以下が必要になってきます。(この辺は、ナイキストの定理でも説明しています)

電圧軸(縦軸)は、もちろん分解能が、細かい方が良いのですが縦横どちらも高分解能というのは、不可能です。



オシロに搭載されている A/D で 8bit が現在でも標準です。

8bit(2 の 8 乗の分解能) つまり、 $1/256$ の分解能があるということです。

1V/div 設定では、 $\pm 4V$ $8V/256=31.25\text{ mV}$ 刻みの目盛で波形を見るということです。

12bit あれば、 $8V/4096=1.95\text{mV}$ 刻みの目盛で見ることになり 8bit の 16 倍の分解能になります。

ここで気をつけないといけないのは、波形を複数出すのにレンジを上げて、波形を小さくすると分解能が落ちます。

みじん切りする、玉ねぎが小さいと切りにくくて荒くなるイメージです。



2V/div として 上半分に波形を出すと、7 bit 128 分解能 つまり 1bit (チビット) 損をします。更にアンプのリニアリティも問題になるので、できれば、フルスケールに近い形で波形は測定する方が正確です。

アンプのリニアリティもフルスケールでしか精度保証していません。

ただ、最近のオシロ・スコープでは、縦軸分可能 16bit 20GS/s とかいうものもあるようです。この場合、メモリーも 100M ワード以上あり、大変なことになります。

(価格も大変なことになっています)

従来、オシロ・スコープは縦 8bit 分解能、

サンプリング 500MS/s 程度で十分でした。(バンド幅 200MHz)

このあたりに各メーカーの測定器が揃っていました。

測定波形をグラフに置き換えると、縦軸と横軸のメモリの細かいグラフに信号を長く書いてくればじっくり解析できそうです。ここで問題なのが、長く取ったデータの表示方法です。従来の液晶表示は高速で波形を出すために 500 点の表示に圧縮して表示しており 10M (10,000,000) のメモリーがあっても、0.005% の情報しか表示できず、拡大表示で波形を探すことになります。こうなると、宝さがしです。



ここで、もう一つ重要な項目が トリガ条件です。

出力の状態をモニターする場合は、AUTO で走らせておけば、現在の状況が見えます。

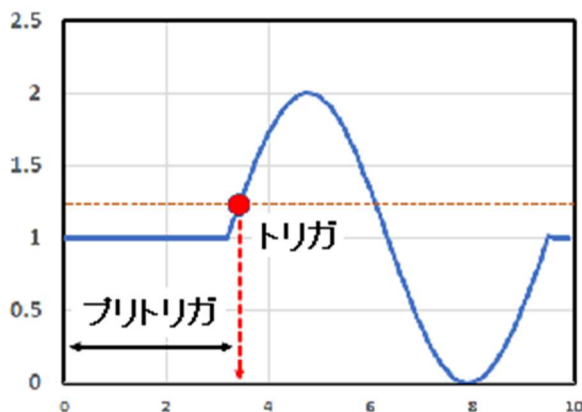
特異な現象が出た場合、その瞬間を記録したい場合、止めて記録する条件（トリガ条件）を決めて設定すれば波形を止めてみるすることができます。 一番簡単なトリガは、レベルトリガで、設定したレベルの信号がくれば波形を捕捉保持します。

この場合、POS エッジ（下から上への変化）か NEG エッジ（上から下への変化）もしくは両方を選ぶことによりトリガ・ポイントで波形を保持しますが、デジタルの良さは、トリガ・ポイントの前もデータが取れます。 デジタル・オシロスコープは、トリガがいろいろな種類で選べるものが多くあります。（今どき、アナログを探す方がたいへんですが）オシロスコープのトリガ回路は、捕捉回路とは別に専用回路で、条件を高速に判別し波形を捕まえます。 例えば、パルス幅が指定より狭いとか広いとかで捕捉できます。

トリガは、波形という獲物を捕らえる罠と言えます。



波形の補足条件がはっきりしておれば、トリガ条件をしっかりと決めて短いメモリーで波形を見ればいいのですが、とりあえず、全部とってから考える場合はロングメモリーです。メモリーには、いつでもデータがあり、トリガが来たら、その前後のデータを連続で保持します。 もちろん、トリガから後だけ長く取ることも可能ですし、トリガからある一定時をおいて波形捕捉もできます。



混乱しやすいのは、トリガ条件には、AUTO NORMAL SINGLE があります。
 AUTO は、時間軸を設定すれば、トリガが来なくても一定周期で波形補足を更新します。
 NORMAL は、トリガが来ないと波形補足を更新しません。
 SINGLE は、一度トリガがくれば、波形を保持し次にトリガがきても波形補足を更新しません。もし、STOP があれば、STOP を押したときに波形補足を止めます。

長々と書きましたが、オシロ・スコープは DMM と並んで基本中の基本の測定器と言えます。中国製のオシロも増え、ネットで買えるオシロまであります。(恐るべしアマゾン) ネットで買えるオシロもよいのですが、アクセサリやシステムに組む場合を考えると少し高いですがある程度名の通ったメーカーをお勧めします。
 (アット、うちの会社は、キーサイトをお勧めします。)

14. DMM とデータロガー

長時間データを取る場合、最初に思いつくのがデータロガーです。ただ、最新の DMM は長時間測定に対応するもの出てきています。ここで、使い勝手から比較をしてみます。

1. 分解能

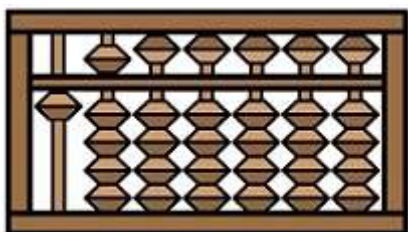
DMM のスペックは、

5.5 桁とか 6.5 桁 高分解能で 7.5 桁 8.5 桁と桁数で表現されます。

先頭の数字1の部分が、0 と 1 もしくは、0 1 2 というように 10 進数すべてを表示できないので 0.5 桁と言います。そろばんで、縦の棒を桁と言います。

このイメージで言うと DMM の最大桁は、珠が 1 個もしくは 2 個しかない。

(そろばんで電圧が測定できたら、1.5V 表示 おそらく世界最古のデジタル表示)



6.5 桁というと 100 万分の 1 の分解能 AD にして 21bit 分解能（±も含め）です。

測定速度は、桁数が少なければ速くなります。

このコラムでも、何度か取り上げていますが測定速度は、積分時間 PLC で決まります。

電源ラインの 1 周期が 1 PLC (20ms) 高速の DMM であれば 1 秒間に 50 回データが読めます。更に、高速にサンプリングできるオプションもあり、4 桁半であれば 0.001PLC (20 μ s) で計測できます。

データ・ロガーも、高分解能 16bit くらいで長時間捕捉が可能です。測定対象が、電圧と温度のみで、抵抗と電流が測定できません。

2. マルチチャンネル

DMM にマルチチャンネルのものもありますが、通常は AD が 1 個だけで、2 Ch タイプのものもありますが、3 CH 以上はリレーで入力を切り替えて測定になりマルチチャンネルの同時測定ができません。

マルチチャンネルの測定ではデーターロガーが優位で ユニットの組み合わせで 100CH 1 kS/s の測定器も可能です。

3. 測定レンジ

DMM のもう一つの特長は、mV~1kV と他の計測器には無い広い測定レンジを持つことです。

測定レンジは、100mV 1V 10V 100V 1000V が一般的で

1V を 1V レンジ測定した場合 6.5 桁では

1.000000 と表示されます。 分解能 1 μ V

10V レンジで 1V を測定すれば

1.00000 と表示されます。 分解能 10 μ V

同じ電圧でも、大きなレンジで小さい電圧を測定すれば分解能が落ちます。

まあ、最後の桁は、ノイズで信頼できないとしても、最適なレンジ設定によって、より正確な測定ができます。

データーロガーは、10mV レンジから 100V 程度です。

4. 入力インピーダンス

DMM は、更に正確な測定ため入力インピーダンスも、低いレンジ (100mV 1V 10V) では

10M Ω 10G Ω と切替えられます。

微小な電圧では、高インピーダンスで測定することは重要で、データロガーは1M Ω です。

5. オートレンジ

DMM は、電圧や抵抗が変化する場合オートレンジの設定があります。

データの変動に追随し、最適なレンジの測定ができる。

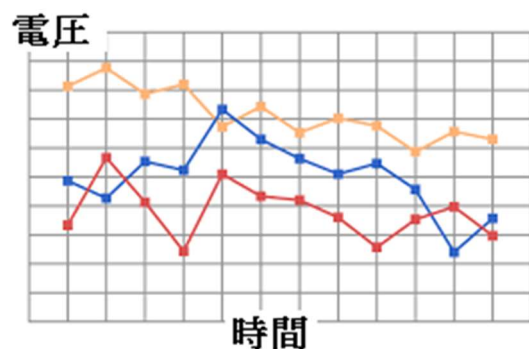
オートレンジの速度も 5ms 程度なので、高速の DMM なら 6.5桁で 50 回/秒の速度で測定ができる。

固定レンジで 4.5桁 (16bit 相当) の測定データでよければ、5000 回/秒で測定も可能です。

データ・ロガーには、オートレンジがなく、分解能 16bit 程度で長時間捕捉が可能です。

固定レンジで、3CH 以上のマルチチャンネルの電圧か温度の長時間測定ならデータローガー、それ以外は DMM の方がよさそうです。

DMM も最近性能が上がってきており、メモリーも増えてリアルタイムでデータを読めるようになり、高分解能のデータロガーとしてのアプリケーションもありそうです。



15. 計測器で使用するコネクタ

計測器の基礎としてコネクタの説明をいたします。

バナナ



昔から使われているコネクタで、DMM やソースメータの端子として使われ一番一般的な接続端子と言えそうです。

電流も通常 12A 程度流せます。 耐圧は 1000V あります。

ジョンソンターミナル

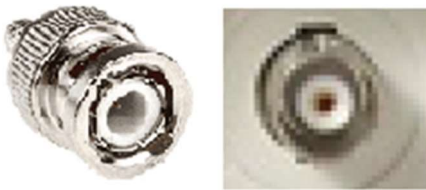


陸端（陸式ターミナル）



これらも規格は古く、またバナナが刺さることで汎用として使用されている。

BNC



測定器に汎用で使われているのは BNC である。

同軸コネクタの特性インピーダンスは絶縁体と中心コンタクトの材質（誘電率）及び寸法（内外径比）で決まります。

同軸コネクタは同軸ケーブルのインピーダンスに合致するように作られています。

同じ形状をしたコネクタでもインピーダンスが 50Ω と 75Ω のものとは絶縁体の材料もしくは形状が異なります。

但し、相互接続できてしまいます。 信号測定には注意が必要です。

高周波の測定としては、インピーダンス 50Ω のものでないと反射が起こり波形が歪みます。

ケーブル自体も RG-58A/U が 特性インピーダンス 50Ω です。

測定器では、バンド幅 500MHz 以下の装置が多く採用されている。
耐圧は、500V 以下。

SMA



高周波の測定器で 500-4000GHz くらいまでは、SMA が多く信頼されています。
取付けには、トルクレンチを使う必要があります。

SMB



主に、基板に信号入力用に使用します。ワンタッチで脱着可能。
信号の周波数は 1 GHz 程度まで。

N



18GHz 以上となれば、N 型コネクタ。 損失が少ないことが特徴。

TRX (トライアクシャル・ケーブル)



三重同軸ケーブル（微小電流測定用） 中心が信号、インナーシールドがガード、
外側がシールドになっている。外径が BNC と同じなので昔は誤挿入によりコネクタをよく

壊されていました。

そこで BNC は引っ掛けのピンが 2 本 (180°) で TRX は 3 本 (120°) にして誤挿入を防止しています。

ソースメータや半導体パラメータ・アナライザでは、ガードに信号と同じ電位をかけリーク電流が流れないようにして測定する。

微小電流測定専用のエレクトロメータでも使用しますが、ガードはグランドにつながっています。この辺りのお話は、また別の機会といたします。

ただ、計測器の世界で微小電流測定 (具体的には nA 以下) は、TRX ケーブルが必須です。

MHV

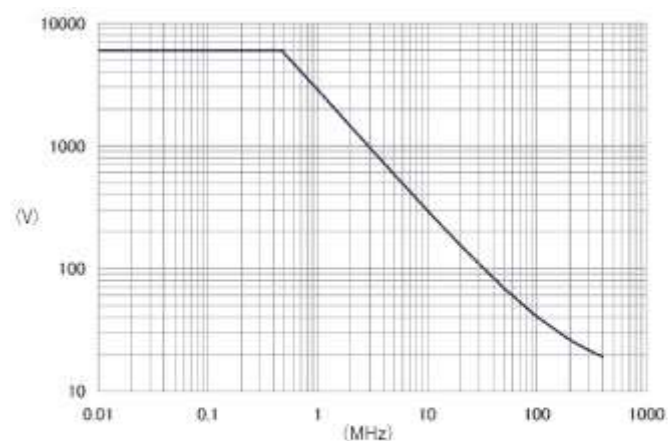


SHV



その他、各メーカーの特殊ケーブルはありますが、高電圧用は MHV SHV コネクタがあります。常識的には、 $\text{DC}500\text{V}$ を超えると BNC が使えず $\text{DC}1500\text{V}$ くらいまでが MHV $\text{DC}5\text{ kV}$ までが SHV になります。

但し、気をつけないといけないのが ディレーティング・カーブです。



ディレーティング・カーブ

プローブやケーブルには、容量があり周波数が高くなると電流が流れます。
耐圧の高い絶縁体ほど、誘電率が高く電極が接近していると容量が大きくなります。
高電圧で周波数を上げていくと、どんな絶縁体でも電流が流れます。
最高耐圧が5KV あっても3MHzでは、1kVもちません。
安全の為、ACの高電圧を印加する場合は注意が必要です。
また、速い立ち上がりの高電圧は、高い周波数を含むので立ち上りで放電することがあります。

1kV 以上は十分に注意が必要です。

16. ダイナミック・レンジと分解能

久しぶりに測定のお話を書こうと思います。
電気信号の波形測定をする装置というとオシロ・スコープ もしくは ロガー等が思い浮かびますが今回は、微小電圧測定について考えます。

ダイナミック・レンジ（入力レンジ）は、信号の変化が大きい場合デジタイジングの前のアンプがオーバーフローしないようにアッテネータによって減衰されます。
信号が、入力レンジがあてれば後は、デジタイザの分解能です。

例えば、600mV の振幅に信号で 2mV の変化を測定したい場合。アンプのリニアリティはもちろん重要ですが、まずはデジタイザの分解能です。

理論的には 16bit あれば、測定できそうですが実際には、最低ビット分はほとんどノイズで見えません。

16bit では $1/65536$ の分解能 ($9.15\mu\text{V}$) 218 ポイントは、当たりそう。

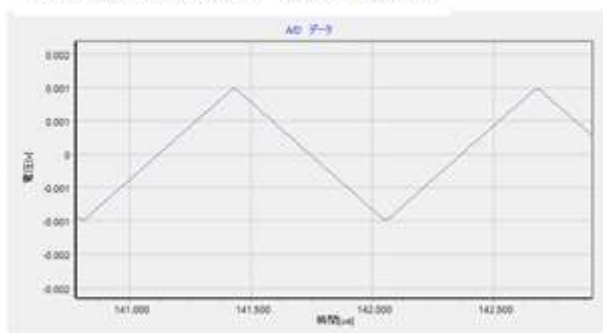
それと分解能が高いことに越したことはないのですが、高分解能は通常サンプリング速度とトレードオフになります。適正なサンプリング速度も顧慮する必要があります。
(信号の 10 倍程度のサンプリング速度。)

ドリフト 600mV 100Hz の信号の中に 2mV の特徴的な信号を見つける場合は
最新のデジタイザ 24bit サンプリング 10KHz で電圧分解能 $1/16777216$ ($0.3576\mu\text{V}$)
測定することができます。

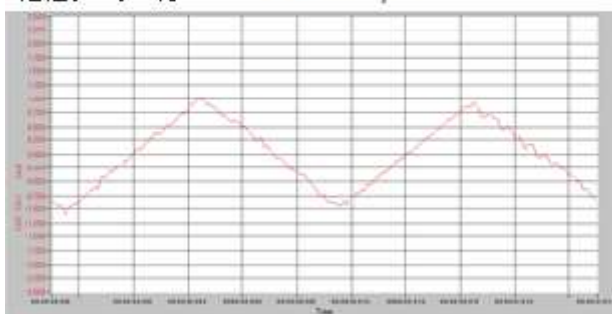
このような測定の場合、最小ビットが、どちらになるかが安定しないためデジタルのノイズとして見えてしまいます。

百聞は一見に如かず。 同じ信号で比較してみます。
(600mV のレンジで 2mV100Hz の三角波を測定)

Daq970/DAQM909A 24bit 10KS/s



他社データロガー: 16bit 10KS/s



やはり 16bit では、デジタルのノイズが見えてしまいます。
ここで使用した、24bit のデジタイザはキーサイトの Daq970/ Daqm909A
24 bit 800KS/s 12 Ch の同時測定が可能です。
加速度センサーや振動試験には高分解能のデジタイザが必要です。

技術情報 お問い合わせ先:



アクシス・ネット株式会社

URL:<http://www.axisnetinc.com>

本社

〒532-0011

大阪市淀川区西中島 6-8-8 204 号

TEL:06-4806-8570 FAX: 06-4806-8572

東日本オフィス

〒330-0854

さいたま市大宮区桜木町 1-9-18 Mio 大宮

TEL:048-611-6502 FAX: 048-611-6666