

# 「測定する」ということ

宮崎 仁

## ● 何でも測れる時代

原子のサイズから銀河のサイズまで、近くのものから宇宙の果てまで、触れるものから触れないものまで、見えるものから見えないものまで、技術の進歩によってさまざまな量が測れるようになってきました。しかし、それだけに、うっかりすると本当に測りたい情報とは違う測定データを集めてしまう危険があることを忘れてはいけません。

たとえば象の大きさを測ってその外形を知りたいとき、1cm目盛りで10m ぐらいの巻き尺を使って手作業で測定を行えば、

目的に合った測定値が得られるでしょう。しかし、やろうと思えば体表のしわまで mm 単位で測定したり、毛の1本まで  $\mu\text{m}$  単位で測定することも、さらには細胞レベルや分子レベルまで nm 単位で測定することだってできてしまいます( 図1)。

人体の測定でも、ウエストが何 cm か測ることも、しわや毛穴の大きさを測ることも、表皮細胞の大きさを測ることもできます。必要以上に細かい測定を行っても、データ量が膨大になるだけで、実用的なデータとはいえません。何を測りたいかを明確にして、目的に合わせて測定方法と測定レンジ(最小測定量～最大測定量)を決めることが大切です( 図2)。

## ● 測定対象のゆらぎ

さらに、測定対象のゆらぎも十分考慮する必要があります。ウエストを測るときお腹を引き締めてしまった、などという人為的な大きなゆらぎは別としても、あらゆるアナログ量は多かれ少なかれゆらぎをもっています。散発的なゆらぎもありますし、周期的なゆらぎもあります。測定対象自体のゆらぎもありますし、電気的な方法で測定する場合には外部からのノイズの影響も強く受けます( 図3)。

ゆらぎを考慮しないと、測るたびに測定値が違う(再現性がない)という問題を生じます。一方、ゆらぎの処理をうまく行えば、ゆらぎの中に埋もれた信号を取り出せる場合もあります。

ゆらぎの処理としては、ゆらぎを無視できる程度の粗い測定にとどめておく、積分回路などでアナログ的にゆらぎを平均化

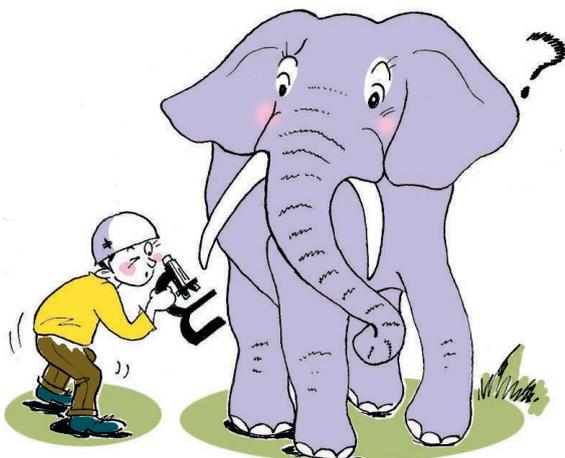


図1 確かに何でも測ることができるのだが……



図2 細かく測れば良いという話ではない

する、ゆらぎまできちんと測定してデジタル演算でゆらぎを平均化する、ゆらぎの性質(周期性など)に着目してゆらぎをキャンセルする、ゆらぎを含むありのままのデータを収集するなど、さまざまな方法があります。これまた、測定の目的に合わせて処理方法を選ぶことが大切です。

### ● 測定とA-D変換

測定とは測りたい量をものさし(基準量)と比較して、もっとも近い値と対応付けることです。すなわち、測定値というのはつねに近似値です。真値に近づけることはできますが、真値そのものではありません。

また、測りたい量は無限桁のアナログ量であり、近似値は有限桁のデジタル量です。これは広い意味のA-D変換(アナログ-デジタル変換)といえます。デジタル計測器では装置が自動的に近似(アナログ-デジタル変換)を行います。アナログ計測器では人間が目盛りを読み取ることによって近似(アナログ-デジタル変換)を行います。

測りたい量が直接比較しにくい量の場合には、前処理によって比較しやすい量に変換してから比較を行います。実際の測定では、最終的な比較・近似は電気量として行うのが普通です。

たとえば、測りたい量を電圧信号に変換し、基準量に対応する基準電圧と比較します。これは狭い意味のA-D変換で、A-Dコンバータで実行できます。そのため前処理では、測りたい量をセンサを用いて電気量に変換し、さらに電圧変換回路や増幅・補正回路、フィルタ回路などを用いて前処理を行います。

したがって、測定の誤差は大別して前処理の誤差、基準値(ものさし)の誤差、比較の誤差の三つに分けられ、基準値の誤差と比較の誤差はA-D変換の誤差といえます。

### ● A-D変換の誤差

A-D変換の誤差は、また量子化誤差とそのほかのアナログ的誤差に分けられます。量子化誤差は分解能によって直接決まるもので、ものさしの最小目盛り、すなわちデジタル値のLSBに相当します。分解能が8ビットなら最小目盛り(1LSB)はフルスケール(FS)の $1/256 = 0.39\%FS$ の重みをもち、量子化誤



図3 ノイズの影響も考えなければならない

差は $\pm 1/2LSB = \pm 0.19\%FS$ です。分解能が16ビットなら1LSBは $1/65536 = 0.0015\%FS$ 、量子化誤差は $\pm 1/2LSB = 0.00076\%FS$ となります。

かりにものさしが理想的でアナログ的誤差がゼロだとしても、量子化誤差は必ず発生します。すなわち、量子化誤差はほかの誤差要因をゼロに近づけたときの誤差の極小値です。

量子化誤差は分解能を上げることでいくらでも小さくできます。しかし、実際の変換誤差は、量子化誤差とアナログ的誤差を合わせたものです。量子化誤差のほうが大きい場合は分解能を上げることで全体の誤差を小さくできます。しかし、アナログ的誤差のほうが支配的な場合は、それ以上分解能を上げて誤差の改善は頭打ちです。

また、アナログ的誤差が量子化誤差、すなわち $\pm 1/2LSB$ より小さければ、全体の誤差は $\pm 1LSB$ の範囲に収まり、変換値はすべて有効といえます。しかし、アナログ的誤差が量子化誤差、すなわち $\pm 1/2LSB$ を上回る場合には、上位の桁にも誤差をもつ可能性があり、変換値はすべて有効とはいえません(図4)。

この場合のアナログ的誤差は、A-D変換部分だけでなく、前



図4 誤差と有効数字

処理まで含めた全体のアナログ的誤差が影響してきます。A-D変換の分解能を1ビット増やすのは最近では難しいことではありませんが、それに対応してアナログ的誤差を1/2に低減するのは決して容易ではありません。

### ● A-D変換とサンプリング

A-D変換では1個の電圧値を基準値と比較して、デジタル値に変換します。すなわち、1次元の変換を行います。測定対象が2次元以上の量、たとえば時間とか平面、空間などの次元をもつ量の場合、一般にその次元に沿ってサンプリング(スキャン)しながら連続的にA-D変換を行っていきます。このとき、サンプリングの粗さや誤差にも注意が必要です。

デジタル・オーディオのような音声信号のA-D変換では、サンプリングによって電圧(振幅)方向と時間(周波数)方向の2次元の量をもつデータ列を収集します。このとき、時間方向の分解能はサンプリング周期(サンプリング周波数)で決まり、サンプリング周期よりも短時間のデータ変化は測定できません。また、前処理まで含めた時間方向のアナログ的誤差は、電圧方向の誤差と同様にオーディオ・データの誤差となります。

このサンプリング周期は、時間方向の分解能を決めるだけでなく、エイリアス(実際には存在しない低周波の偽情報)の発生原因となるので、十分な注意が必要です。サンプリング周波数の1/2以上の周波数成分が被測定信号に含まれる場合、その周波数成分は測定できないだけでなく、サンプリング周波数より低い周波数のエイリアスを生じます。

エイリアスを防ぐには、サンプリング周波数を測定したい信号周波数の2倍以上に選ぶとともに、被測定信号の不要な高周波成分はアンチエイリアス・フィルタで取り除きます。

エイリアスはオーディオ信号だけの現象ではなく、たとえばパソコン画面をビデオ・カメラで写したときに変な帯が現れたり、自動車などのタイヤを写したときに逆回転したり止まって見えるのもエイリアスの一種です。

### ● 波形歪みと高調波

電圧(振幅)と時間(周波数)の2次元量としてサンプリング・データを扱うときに、もう一つ注意が必要なのは、電圧方向の非直線性によって生じる高調波です。

測定系にジッタなど時間方向のアナログ的誤差があれば、測定データにも時間方向のアナログ的誤差を生じます。それによって、本来含まれていない周波数成分を生じます。

それだけでなく、測定系が電圧方向の非直線性誤差をもつ場合でも、測定データに波形歪みを生じます。歪んだ繰り返し波形には、もともとの波形にはない高調波成分が含まれており、振幅誤差が原因となって周波数誤差が生じたこととなります。このように、サンプリングによる測定には、単なる1次元の測定とは異なる注意が必要です。

### ● 空間でのサンプリング測定

空間的な2次元形状、3次元形状を測定する場合にも、このようなサンプリング測定の注意は共通です。直線軸(X軸)に

沿って一定間隔で直交方向(Y軸)の値をサンプリングすれば、2次元形状を測定できます。X軸、Y軸の2軸についてZ軸方向の値をサンプリングすれば、3次元形状を測定できます。

同様に一定間隔でスキャンしながら、寸法ではなくて紙面上の明るさ(色)を測定すれば、画像の取り込みになります。

これらの場合も、やはりエイリアスや高調波は発生します。たとえば、サンプリング間隔の1/2以上の周波数で測定形状や明るさが変化すれば、エイリアスを生じます。細かい模様を原稿をコピーすると、複製版に粗い変な模様が現れることがありますが、これも一般にエイリアスに相当します。空間方向のサンプリングの場合、時間方向と違って、被測定信号に簡単にフィルタをかけられないので、エイリアスはやっかいです。

コピー機のように元原稿と複製版を簡単に見比べられる場合はこのような問題が発生しても、すぐ気付くことができます。一般の測定の場合には、問題に気付かずそれが意味のあるデータだと思い込んでしまう危険が大きいので、より注意が必要でしょう。

### ● 本特集の構成

まず、第1章では、PCを用いてデータを測る実験を行ってみます。センサと入力ボードをつないでアプリケーション・プログラムを動かせば、いとも簡単にデータが取れるということを示します。

次の第2章では、「測定する」ということをいま一度考え直すため、「物理実験」にまで立ち戻り、データ計測の目的、データの測り方、誤差の考え方などを復習します。

そして第3章では、少ないデータ数や雑音を含むデータでも、なるべく精度よく種々の統計量や周波数スペクトル求める方法や雑音を抑圧する方法について、マルチレート信号処理やウェーブレット変換を用いて解説していきます。

たとえデータが正確に測定できて、後の解析に役立てなければ意味がなくなります。そこで第4章では、データを正確に取得することと同様に重要な、測定したデータを安全に貯め込むためのテクニックについて解説します。

第5章では、センサを使った「位置計測」の応用例として、「モーション・キャプチャ・システム」の実現例を示します。計測したデータを、どのように計算し、どのようにアプリケーションに生かすのか、その応用例として読んでください。

最後の第6章では、「何を測れば良いのか」を導き出す例として制御システムを取り上げます。制御しようとしているシステムのモデリングと数式化により、どんなデータが必要になるのか、しいてはどんなセンサが必要になるのか、また測れない値を計算で割り出すことすら可能だということが見えてくるはずです。