

測定する

1 はじめに

前回の講義では錯覚を例にあげて、情報を把握したり、人に伝えたりする際に、人間の感覚だけでは正しくできないことを説明しました。それでは、どのようにすべきでしょうか。

そのポイントは二つあります。一つは客観化です。長さについて、「長い」とか「短い」といった表現を私たちは用います。けれども、そうした表現には主観が入っています。人によって「長い」の基準が違います。そこで、客観性を欠くような「長い」という表現では、情報として他の人に伝わりません。

それでは、「1m の物差しよりも長い」という表現ではどうでしょうか。これは客観的な対象物に比べて「長い」と表現しているのだから、客観化された情報ではあります。しかし、どれくらい長いのでしょうか。その量(どれくらい)が情報として与えられないと、情報量としては極めて少ないと言えるでしょう。そこで、もう一つのポイントである定量化が必要になります。すなわち、数値で表すことが必要になるのです。例えば 1m32cm という具合に数値で表すと、定量化されたために、情報量が格段に多くなり、人により正しく伝えられることになります。

このように、人に正しく情報を伝えるためには、客観化され、定量化された情報を伝えると良いことがわかります。ところが、定量化には注意が必要です。というのも、1m32cm という情報よりも、1m32cm2.3mm という情報の方が、一般的には情報量が多くて好ましいと考えられるために、測定する際に注意深く、より正確に測定するべきであると考えられるからです。どれくらい正確ならばいいのでしょうか。また、どのようにすれば正確に測定できるのでしょうか。

今回は、測定にまつわるいろいろなことを考えていきたいと思います。

2 測定の正確さ

例えば、配布してあるリアクションペーパーについて、その横幅の長さを測ってみましょう。そして、リアクションペーパーにその長さを書いてみましょう。そして、その測定結果を教えてください。どれくらいの長さになったでしょうか。

例えば、その長さが 13.7cm になったとします。この 13.7 cm という値は正確でしょうか。正確と言えないとしたら、どうして正確ではない可能性があるのでしょうか。「物差しが正確ならば正確だけれど、物差しが正確でなかったら正確ではない」ということになるのでしょうか。もしも物差しが非常に正確であったとしたら、測定結果は正確だと言えるのでしょうか。

いいえ、そうではありません。なぜならば、紙の長さを測定したとき、目で目盛を見ながら紙の長さとの照合します。ところが、今使っている物差しで紙の長さとの照合できるのは、せいぜい 1mm の 1/10 である 0.1mm 程度です。そこで、目分量で 0.1mm まで値を読んで、13.74 cm と読んだとしたら、これは正確な値でしょうか。いいえ、まったく同じ理由で、これも正確な値ではありません。

せん。単に、それ以上正確に測定できない、というだけの話です。正確な値が、13.7421235487... cm であるのに、それを測定できずに、13.74cm としているだけです。このように考えると、いくら精密な測定装置を用いても、正確な値を求めることはできないことに気づきます。つまり、人間は「本当の値」を知ることはできないのです。

それでは、実験結果はすべて、測定値が正確ではないから何も言えない、ということになるでしょうか。それも違います。まず、より「本当の値」に近い値を測定で求めるように努力することができます。技術・技能を高めることで可能になります。また、不確定さがあっても言えることがあります。それは、不確定さを前提にしながら議論する方法があるからです。有効数字とか、統計学の検定とか推定とか、そういった考え方は不確定な数字を扱うための技術です。この講義でもある程度は扱います。しかし、機会をとらえてきちんと勉強してほしいと思っています。

3 時間の測定とその技術

より正確に値を求めるためには技術が必要だとお話ししました。それでは、具体的にどのような技術が必要でしょうか。ここでは、例として、時間と長さについての測定技術をお話ししたいと思います。

3.1 時間の測定の始まり

私たちは時間を測定するために時計を用います。この時計は、どのように開発されたものでしょうか。

皆さんはガリレオ・ガリレイを知っているでしょうか。イタリアの有名な学者です。私とはちょうど 400 歳違います。ガリレオは、最近では小説のタイトルなどでも知られています。そうしたタイトルに使われるように、卓越した成果を人類にもたらしました。

たとえば、ガリレオは、20 歳ごろに振り子の等時性を発見しました。振り子の等時性とは、振り子が 1 往復するのにかかる時間（これを周期といいます）が振れ幅の大きさによらず一定であるという性質のことです。振れ幅が大きいと、移動する長さが長くなり、移動するのにかかる時間も長くなりそうです。一方、振れ幅が大きいと真下にきたときの速さが速いので、短時間で往復しそうです。この両者の兼ね合いで、1 往復するのにかかる時間は振れ幅によらずに一定であるという性質があります。皆さんがこの法則の発見者だとしたら、どのように発見すると想像しますか？当然のようにストップウォッチを用いて往復する時間を測ると思います。ところが、ガリレオの時代、ストップウォッチはありませんでした。それでは、どのようにして等時性を確かめたのでしょうか。

これについて有名な逸話があります。ある時、教会で天井から吊るされているランプが風で揺れる様子を見ていたガリレオは、振り子の等時性に気づきました。そして、それを確かめたいと思いました。彼は、自分の脈（心臓の鼓動）をとり、それと振り子の周期を比べることで時間を測ったそうです。

3.2 周期的な現象

ガリレオの振り子の等時性に関する逸話について、いくつかの側面で興味深い議論を行うことができます。その一つは周期的な現象との関わりについて、もう一つは精度についてです。

1. 周期的な現象とのかかわり

まず、周期的な現象とのかかわりについて考えてみましょう。ガリレオの時代に、ストップウォッチが無かったとお話ししました。それでは、時間を測る手段が全くなかったのか、ということではありません。水時計とか砂時計とか、物が落下する時間を用いて時間を測る方法がありました。そして、もっとも古くからあったと考えられるのは、日時計とか、暦(カレンダー)です。これを時計というのは少し違和感があります。しかし1日とか、1年とか、あるいは、月の満ち欠けに基づく1ヶ月とか、そうした時間の長さを測るという意味では立派な時計です。

一方、ガリレオ以降、どのような時計が開発されたかということ、振り子時計です。ガリレオが発見した振り子の等時性を利用したものです。振り子の周期に基づいて時間を測ります。振り子時計は改良を重ね、一時期は最も高性能な時計として活躍した時代がありました。

ところが現在では、振り子時計はあまり作られなくなりました。それは水晶発振子と呼ばれる装置が開発されるようになったからです。水晶(クォーツ, SiO_2 の結晶)には、歪み(ひずみ)を加えると電気を発生させる性質があり、水晶の振動の特性とを組み合わせることで、周期的な電気信号を安定して得ることができます。これを利用して時計を作っています。ストップウォッチはもちろん、パソコンの中に組み込まれている時計もこのような仕組みです。

このようにして考えると、周期的に変動する現象は時計として使えることがわかると思います。ガリレオが用いた自分の心臓の鼓動も、等時性を発見した振り子の周期的な運動も、時計として使えるわけです。

2. 精度について

さて、もう一つの側面として、精度について考えてみましょう。もちろん、心臓の鼓動の周期は一定に近いだけであって、一定ではありません。だから、おおよそのことがわかるだけであって、正確なことはわかりません。それはガリレオもわかっていました。それではより正確に、振り子の等時性を確かめるにはどうしたらいいでしょうか。

それには、同時に二つの振り子を振幅を変えて振動させればいいのです。実際にガリレオもそのような実験を行いました。そして、どんなに大きく振動させても周期が一定であると述べています。

ところが、現代ではこれが誤りであることがわかっています。振り子の等時性については近似的には成り立つものの、より正確に測定すると、振り子の等時性は成り立ちません(それは物理学実験で確かめて下さい。)。ガリレオはどこで間違ってしまったのでしょうか。それは引き込み現象と呼ばれる現象が起こったためであると考えられます。引き込み現象とは、二つの微妙に周期の異なる振動系が弱く接続されている時に、周期が一致しやすくなる現象のことです。二つの振動子を全く独立にしないで、比較のしやすさのために、すぐ近くで振

動させたために、お互いに影響しあったのだと考えられます¹。

いずれにしても、ガリレオの成果は、正確ではなかったと言えます。それでは、ガリレオの成果が間違っていたことは、ガリレオの成果が無価値だということの意味するでしょうか。もちろん、ぴったり一致することが重要であることもあります。しかし、一般的には、そうではありません。近似的に成り立つ性質にも、重要な価値があることが多いのです。例えば、ガリレオが等時性を唱えなければ、振り子時計は作られず、時間の測定技術の進展は遅れたことでしょう。ガリレオが等時性を唱えたことは、とても価値あることだったのです。皆さんも、データが汚いから意味がない、などと考えず、近似的にどのような性質が導かれるのか、考えてみてほしいと思います。

3.3 時間の基準

時間は、地球の自転周期 (約 1 日) を基準にして、1 日の 24 等分して 1 時間とし、それを 60 等分して 1 分とし、それを 60 等分して 1 秒とし、これらを基準としました。ところが、時間の測定精度が高まると、不都合が発生しました。それは、例えば、地球の自転周期の変化です。実は、太陽の日周運動はぴったり 24 時間周期ではありません。季節によって異なります²。また、自転周期も 23 時間 56 分で一定ではありません³。様々な要因で、地球の自転は速くなったり遅くなったりしています。

このような事態を避けるためには、地球とは無関係な周期的な現象を時計に使う必要が出てきます。もちろん、水晶発振子は有力な候補ではありますが、しかし、より正確な基準が必要です。そうして考え出されたのが、原子の性質を基準にすることです。質量数 (陽子と中性子の数の合計) が 133 であるセシウム原子 (Cs) の出す特定のマイクロ波の振動数を基準にすることができます。この波の振動を基準にしたものがセシウム原子時計です。時間の基準は、1967 年からは、セシウムのマイクロ波の振動を基準にしています。

3.4 様々な時間の測定方法

少し難しい話になってしまいました。以下では、時間を測定する様々な方法と関連がある話題を提供したいと思います。皆さんも、どうしてそれが時間の測定と関係があるのか考えてみてください。

1. しましま

世の中にはしましま模様 (縞模様) になっているものが沢山あります。例えば、木の年輪です。年輪を数えると、その木が何年間生きてきたかがわかるとされています。

地層も縞々の典型的な例の一つです。地層の重なり具合を見ることで、時代の前後関係が分かります。縞状鉄鉱床と呼ばれる縞模様に入った鉄鉱床は、縞模様に対応した何らかの時間変化が記録されていると考えられています。

¹この部分の話は、「SYNC: なぜ自然はシンクロしたがるのか」(スティーヴン・ストロガッツ著)に関連した話を含めて詳しく書いてあります。

²天文学に興味のある皆さんは、なぜ季節によって違うのか、考えてみましょう。

³物理学に興味のある皆さんは、なぜ自転周期が変化するのか、考えてみましょう。

ただし、縞模様から分かるのは前後関係だけですから、何らかの基準がないと時間は分かりません。年輪の場合には、表面だったり、他の年輪だったりします。地層の場合には、示準化石(標準化石)と呼ばれるもので時間を特定することがあります。

2. 振動反応・生物時計

ある種の化学反応は、時間の周期を持っていることが知られています。このような反応は振動反応と呼ばれています。BZ 反応(ペロソフ・ジャボチンスキー反応)はその一つです。シャーレに入れられた薬品が色を変えながら波のように変動する様子は、まるで生き物のようです。

BZ 反応が発見された当時、そのような反応が起こるはずはないと考えられていました。皆さんが学校で学んできた反応も、基本的には一方通行で、振動するような反応は見たことがないと思います。過去の科学者も、そのような反応があることを、すぐには信じることができなかったのです。

しかし、よく考えてみれば、私たちの体は化学物質でできていますし、私たちの体には様々な振動的な現象があります。それは、人間だけではなく、動物にも共通です。例えば、ガリレオが用いた心臓の鼓動はその一つです。それ以外にも、眠気や目覚めは、1日周期で訪れます。蛍の発光にもリズムがあります。こうした周期的な運動は、動物の体中に振動反応があることを示唆しています。その詳しい仕組みは、まだ完全にわかっていません。

4 長さの測定とその技術

4.1 長さの測定の始まり

それでは長さについてはどうでしょうか。長さを測る技術は、商売するとき、また、建築物を作るときには欠かせない技術です。そこで、昔から長さの測定はよく行われていました。ところが、昔は世界的な統一基準があるわけでもなく、物差しが大量生産できるわけでもなく、その結果、体の一部を長さの基準として測ることが多かったようです。例えば、ヨーロッパで使われる長さの単位としてフィートがあります。これは、文字通り、足の大きさを基準にしていると考えられます。古代メソポタミア文明に起源があると考えられるキュビットは、肘から中指の先までの長さです。

4.2 長さの基準

時間の場合には、1日とか1年とか、世界中の人々が共通して認識できる時間の長さの自然な基準がありました。ところが、長さについてはその自然な基準はありません。だから、国ごとにキュビットの長さが変わったり、あるいは、王様が変わると、それに応じて基準を変えたりする場合もあったでしょう。日本でも、表面積の基準である「畳」は、東日本と西日本で畳の大きさが異なるために、それに応じた違いがあったようです。

このような状態は、流通が発達し、人々の共通理解が必要になってくると不都合です。どうしても基準を統一する必要が出てきます。その中で成功した試みはフランス人によってなされたも

ので、地球の大きさを基準にしたものでした。こうして考え出された長さの基準がメートルです。1メートルは地球の赤道から北極点までの距離の1000万分の1として定義されました。そして、ぴったり1メートルであるような「メートル原器」と呼ばれる「もの」を作成し、改めて、これを基準にすることにしました。

このようなことをすると、当然、問題が発生します。例えば、メートル原器を基準に地球の大きさを測ると、もはや、赤道から北極点までの距離は1000万メートルではありません。技術が発達すれば、測定精度が高まり、値が違ってくるのです。また、メートル原器は金属ですから、特に端が錆びたり、変質したりすることも考えられます。

そこで、1983年以降は、より普遍的な決め方として、光の速さを利用して1mの基準を定めています。具体的には、光の速さを299,792,458 m/sと定め、セシウムで決めた時間の基準と組み合わせることで1mを決めることになりました。

4.3 長さの測定

基準がわかったところで具体的な長さの測定方法について考えてみましょう。基本的には長さを測定する時には、比の考え方をを用いることが多いです。

1. 物差しで測る

例えば、物差しを当てて紙の幅を測ります。このとき、比の考え方をを用いていないように思うかもしれませんが、実際には用いています。ぴったり当てた物差しと紙は、長さの比が1:1の割合で対応しています。そこで、物差しの目盛を読むと対象物の長さが分かるのです。

2. 写真を撮るときにコインを入れる

私たちは屋外で観測する時に写真を撮ります。その時に、必ずと言っていいほど、写真にコインやタバコ、あるいは人を画面に入れておきます（もちろん、物差しなど、長さが直接的に分かるものでも構いませんけれど）。こうすることで、写真に写っていたものの大きさを推定することができます。その時にも、やはり比の考え方を使います。

3. 視差を用いる

例えば太陽系に比較的近い星までの距離の測定を考えましょう。地球が太陽のまわりを回ることによって、その星は見える方向が変わってきます。この変化を年収視差といいます。

5 技術と測定

ここまで、測定とは何か、また、長さと時間の基準についてお話してきました。こうした話は、単に豆知識として覚えておけばいいような話でしょうか。そうではありません。測定には、科学技術には本質的な意味があると考えられます。測定と科学技術は、いわば、車の両輪です。その意味について考えてみましょう。

原因は結果をもたらします。もたらされた結果が、今度は原因に影響を与えることがあります。そして結果が変化します。そのような仕組みはフィードバックと呼ばれています。

例えば計算機（パソコン）の技術の進展はフィードバックで考えることができます。計算機の設計はとても複雑なので、計算機を用いて設計します。そこで、より高度な計算機を作成すると、より高度な計算機を設計できるようになります。このようなフィードバックによって急速に技術が進展していくと考えられます。

同じように、測定と科学技術もフィードバックの関係にあります。科学や技術が発展すると、その成果を用いてより高精度な測定ができるようになり、より詳しい情報（測定結果）を得ることができるようになります。その結果、科学や技術は進歩します。このように、測定と科学技術は、互いに互いを高めあっていく関係なのです。車の両輪であるというのは、そういう意味です。

私たち（特に若い人たち）は、発達した測定器が身の回りにあるために、測定することの価値を忘れがちです。測定の意義や、測定に費やされた努力を知ることで、私たち自身も測定を大切に考えるようにしましょう。

6 残された課題

測定では、真の値を原理的に知ることができないことを強調してきました。そこで、まず、できるだけ正しい値が得られるように努力すべきです。この講義では、その努力や工夫の一端も紹介してきました。

しかし、真の値でないまま、測定値を扱う方法については、ここでは学びませんでした。つける必要があります。今後、そうした方法を身につける機会がありますので、ぜひ、しっかり学んでほしいと思います。