

第5章 実験科学とその方法

5.1 ABC についてのまとめ

これまで、科学の ABC の方法論について勉強してきました。これを改めまとめます。

- A 観察して疑問点を発見する
- B その理由について仮説を立てる
- C 検証によって仮説が支持されるかどうかを検討する

こうした方法は、ガリレオ・ガリレイによって確立されました。実に明解な方法であるので、ガリレオ自身が自賛しているそうです。どうして自分よりも前にこのような方法を考えなかったのか、と。

この方法についてまとめた放送大学のビデオも見てみましょう。

このビデオで強調されているのは、検証 (C) の結果、仮説 (B) が支持されても、されなくても、終わりではない、ということです。仮説 (B) が支持されなかったとしましょう。特に、赤ちゃんの場合、仮説 (B) が支持されないことの方が圧倒的に多いでしょう。つまり、うまくいかないわけです。うまくいかないことを承知でくり返すことで、次第に手や足を自由にコントロールして動かすことができるようになるわけです。一般に、検証 (C) を行って、うまくいかない場合には、その結果の検討に基づいて、改めて仮説 (B) を立て直して、検証 (C) も改めて行う必要があります。これを繰り返せば支持される仮説 (B) にたどり着くはずですよ。

支持された場合を考えてみましょう。それで仮説 (B) は確かなことになったと考えていいのでしょうか。いいえそうではありません。もしかしたら、その検証方法ではうまくいかもしれないけれども、別の検証方法ではうまくいかないかもしれません。仮説が支持されたと思っても、繰り返し検証する必要があります。

実際、私たちが知っている法則の多くはそうです。何回も繰り返し替えて、様々な検証に耐えて、ようやく確固たる法則として成り立っているのです。

5.2 ガリレオの功績

そんなガリレオは、どんな功績があるのか、そのいくつかを紹介したいと思います。

模型と実物の強度

ガリレオは、その著書「新科学対話」の最初の方で興味船の製造に関する話を展開しています。船大工が船を作るとき、まず、最初に小さな模型で、製造時の船の土台や、船を支える柱なども含めて作るそうです。ところが、模型で強度が確かめられても、実物の土台や支える柱を作るときには、模型と実物との比率で柱の太さを太くしても、強度が足りなくなるということです。

ここでも、この講義に則して、ABC という形で話を組み立て直してみましょう。

A ミニチュアをそのまま大きくした船の土台や船を支える柱は、強度が足りなくなるのはなぜか。

皆さんは、どのような仮説を立てるでしょうか。端的に言えば、次のようなことです。

B 一定の割合で拡大すると、柱の強さの増え方よりも、柱の重さの増え方が大きいので、自分の重さを支えられなくなるからである。

数学的には、断面積と体積の増え方の違いです。それが原因と考え、他の材料(石材など)の例で検証(C)しています。

さらに議論を発展させ、動物の骨を観察することでもわかる、としています。

C 近い種類の動物で、骨の太さを比較してみる。もしも仮説 B が正しいならば、体の大きな動物の骨の方が、相対的に太い骨になっているはずである。

余談になりますが、ガリレオよりも後の時代に活躍するスウィフトは、火星に2つの月があることなどをガリバー旅行記に記していて、天文学的な知識があったとされています。しかし、ガリレオの「新科学対話」は読んでいなかったのかもしれませんが。もしも読んでいたら、巨人の国の巨人たちは、わたしたちの体に比べて、比率としてより太い骨を持っているとしなければならなかったはずで。また、小人の世界では、骨はもっと細くても良かったでしょう。

斜面を用いた実験

空気抵抗を避けるために斜面で実験したことは、既にお話しました。しかし、この実験にたどり着く発想が、あったはずで。それを考えてみましょう。

ガリレオが、実験した当時、十分な実験環境はありませんでした。ストップウォッチなどはもちろんありませんし、カメラもありません。そこで、次のように考えたかもしれません。

A 落体の法則を詳しく調べることはなぜ難しいのか。

B 落下速度が速すぎるからである。

そこで、落下速度を遅くするために次のような工夫をしてみました。

C 速すぎるから詳しく調べられないのなら、斜面を作って斜面の上を滑らせ、ゆっくり落下させれば調べられるはずである。

同時に、ストップウォッチもなかった時代に、時間と運動との関係について調べるときにも工夫をします。

A 斜面の実験での時間と滑降距離との関係を研究するのが難しいのはなぜか。

B 長さは測れるけれども時間が計れないからである。

そこで、音楽の教育を受けていたガリレオは、次のような工夫をします。

C 時間を計れないから研究が難しいのなら、一定のリズムを刻むことを使って、対応した長さを測ってみればよい。

具体的には、斜面に鈴を複数置き、玉が通過したら鈴が鳴るようにしておく。鈴が鳴るタイミングが等間隔になるように鈴を配置してみれば、一定時間間隔ごとの移動量がわかって研究することができるはずである。

やや強引に ABC に当てはめてしまいました。

ここで強調したいことは、全部 ABC で考えられる、ということではなく、ABC の考え方をすることで、「何が問題か」「どうしたら解決するのか」という意識を高められるということです。「速すぎてわからない」「速すぎて空気の抵抗が大きい」ということが問題であるなら、「ゆっくりさせる方法はないか」と考え、「時間を測ることができない」のであれば、「どうすれば時間についての情報が得られるか」を考えるべきです。ABC を意識することで、こうした考え方の道筋ができるのではないのでしょうか。

これは現代的な言葉でいえば「問題解決能力」と言えるでしょう。問題に直面したとき、その問題の背後の理由を考えて、対策をとるというのは、問題解決の基本的な態度です。

振り子の等時性 ガリレオの問題解決能力の高さを示す別のエピソードは、振り子の等時性です。

ガリレオは、ある振り子を大きく振らせたときと、小さく振らせたときを比較して、ある規則性を発見しました。大きな振れ幅の時は、速く動くものの移動距離が長く、小さな振れ幅の時は、遅く動くものの移動距離が短く、その結果、周期 (同じ状態に戻るまでの時間) は、振れ幅によらず同じであることを発見しました。これが振り子の等時性です。

ガリレオは、教会の天井から吊り下げられたランプが揺れる様子を見てこれに気づいたと言われています。しかし、当時は正確な時計がありませんでした。どのようにそれを確かめたのでしょうか。

A 教会の天井から吊り下げられたランプの周期が、振れ幅に関係ないことを示すのが難しいのはなぜか

B 一定のリズムを刻むものが無いからである

逆に言えば、一定のリズムを刻むものがあれば、周期が一定であるかどうかを判別できるはずです。

C ほとんど一定のリズムを刻む自分の脈で時間を測ってみる

振り子の等時性は、ガリレオが 20 歳ごろの発見です。

5.3 トリチェリの真空

皆さんはストローでジュースを飲むことがあると思います。このストローを長くしていったとき、果たしてどれくらいの長さまでジュースを飲むことができるのでしょうか。この問題は実は古くから知られた問題でした。どんなに強力なポンプを用いても、おおよそ 10m を越えて水を吸い上げることはできないとわかっていました。

ガリレオの弟子であったトリチェリは、この理由について考えました。例によって実際の経緯については詳しくわかりませんが、この講義で扱ってきた ABC に則して書いてみると、次のように整理できるでしょう。

A ポンプで水を 10m 以上吸い上げられないのはなぜか

B 10m よりも長いと、水の重みによって真空が生じてしまって水を吸い上げられなくなってしまうからである。

C 水よりも重い水銀で試してみる。

まず、水について、本当に 10m 以上ポンプで水を吸い上げることができないのかどうか、確かめてみましょう。ここでは、ポンプを用いずに、栓をしたホースの中に水を入れて、ホースを伸ばしながら階段をあがってみます。するとどうでしょう。ホースの先端は閉じてあるはずなのに、水の上にすき間ができてきました。このすき間は、周りから入り込んだ空気ではありません。しっかり封をしていますから。そこで、これは(ほぼ)真空であると考えられます。このような真空ができると、ポンプが水に接していないために、吸っても吸い上げられなくなってしまうのだと考えられます。

それでは、この仮説はどのように確かめたいのでしょうか。当時は丈夫で曲がるホースがありませんら、同じような実験はできません。水が、水自身の重みで引っ張られるのであるとすると、同じ体積でも水の 14 倍くらい重い水銀ならば、1/14 の高さで真空ができるはずですが。細長い丈夫な試験管に水銀を用いて実験すると、確かに、10m の 1/14 程度の高さ(760cm 程度の高さ)で真空が発生しました。この真空は、「トリチェリの真空」と呼ばれています。

トリチェリは、真空ができる水銀の高さが、日によって違うこと、また、実験する場所の高度によっても違うことに気づいていたようです。実は、真空ができる水銀の高さは、大気の圧力(大気圧)に関係しているのです。大気の圧力とのバランスで、真空ができる水銀の高さが決まっているのです。これは、その後、気圧計として使われることになります。

5.4 「超能力」はあるか

5.4.1 「超能力」実験

私には、指先で色を感じる超能力¹があるように思うのです。そこで、実験をすることにしました。

- A ポケットの中のペンの色を、触って区別できるような気がするのなぜか。
- B 私には指先で光を感じる能力がある
- C 見えないところで表裏の色が違う札を受け取り、特定の色が上になるように出せるか調べる。出せれば、仮説が支持される。

2015 年 1 月 14 日の講義で、私は超能力の実験を実施しました。実験には 5 枚の札を使いました。札の片面は白、もう片面は黒です。札の表面はプラスチックで被われるようにしたので、触感では区別がつかないようになっていました。これを、私が目でみてわからないように黒い袋に入れて、黒い面を上にながら取り出すことができれば、指で色(少なくとも明るさ)を判定できると考えることができます。実験の結果、5 枚中 4 枚は黒を上にして取り出すことができました。しかし、1 枚だけは白が上でした。これは、学生の皆さんの前で行った実験ですから、当日の受講生は証言してくれると思います。

5.4.2 実験結果の解釈

さて、ここまで書いたような実験結果から、私には常人には無いと思われるような超能力があると、判断できるか考えてみましょう。目で見えても、うっかり表裏を間違えて取り出すことも

¹ ちなみに、目以外にも、人間の脳には光を感じる組織があると聞いたことがあります。少なくとも進化の段階をさかのぼると、光を感じる組織だったものが脳にはあります(松果体というようです)。もしかしたら、人間には常人でも指先(あるいは皮膚)で光を感じるができるのではないかと、という議論もあります。つまり、超能力ではなく、常人が備えている能力であるということです。ここでは、超能力かどうか、全員ができるのかどうか、などの点は議論しません。ここで議論したいのは、私が、指先で、光(あるいは明るさや色)を感じるができるかどうか、について議論することです。以下ではわかりやすさのために、超能力の実験、と表現することにします。

あるくらいです。黒い面を出すことが 100% できなくてもいいでしょう。それに、普通はこのようなことが全くできないと思われるのに、5 枚中 4 枚もうまくいったので、私は指先で黒と白を判別できると考えていいのではないのでしょうか。

これに対して、もちろん、反論がありえます。それは偶然そうなたただけなので、これでは指先で色を判別したことにはならないという主張です。

さて、どうしたものでしょうか。どちらの考え方も、もっともであるように思われます。せっかく実験したのに、結局は何も結論が得られないような実験をしてしまったのでしょうか。私の超能力について何もいうことができないのでしょうか。

5.4.3 統計学

そんなはずはありません。せっかくデータを出したのだから、このデータを基にして議論することができるはずです。そのための、最初のステップとして、私が超能力を持っていることを証明する、という発想を、一度、捨ててしまいましょう。逆に、私は超能力が無い人間であるという仮説を立てて議論することを試みます。

超能力がないとしたら、黒い面を上にして札を取り出すのも、白い面を上にして札を取り出すのも、同じ確率で起こるはずです。つまり、どちらも確率 50% で発生する出来事です。確率が決まっているとすれば、5 枚中 4 枚以上が黒となる事象の確率も計算することができます。その計算方法は決して難しくありません。しかし、ここでは、その計算をすることが目的ではないので、途中は省略します。結果は約 18.8% です。つまり、超能力が全く無くて、確率 50% で黒が出るにしても、同じ実験を 100 回すれば、19 回ぐらいはこのようなけっかになる、ということです。このようなことを考えると、次のように結論づけられます。

超能力がないのに 5 枚中 4 枚以上が黒になるのは、起こりにくいことではある。しかし、滅多に起こらないこと、ほとんどありえないこと、ではなく、5 回に 1 回程度は起こりうる事である。

結局、断言はできません。しかし、ここまでくると、話は具体的になりました。少なくとも、議論しやすい数字になったのは間違いありません。

このような数学を検討するのが統計学です。統計学は、実験科学にとって、とても大切な学問であり、実験で何かを述べるときに、便利に使える考え方を提供してくれています。

後日、別の超能力実験についてご紹介することがあるでしょう。