

第5章 実験科学とその方法

5.1 科学の ABC 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・疑問：観察して疑問を持つ

B 仮説：その理由について仮にこうではないかと考える

C 検証：その仮説が正しいならこうなるはずだ、ということを実行して確かめる。仮説が支持されるかを検討する

こうした方法は、ガリレオ・ガリレイ (1564-1642) によって確立されました。実に明解で合理的な方法です。

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。

まず、仮説 (B) が支持されなかったとしましょう。前回の赤ちゃんの運動能力の獲得について思い出してみましょう。赤ちゃんが本能的に科学の ABC を行う場合、仮説 (B) が支持されないことの方が圧倒的に多いはずで、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繰り返すことで、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、やがては支持される仮説 (B) にたどり着くはずで、

次に、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なくても、別の検証方法ではうまくいかなくても、仮説が支持されたと思って、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

科学の ABC の方法を確立したガリレオは、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」の最初の方で興味深い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のです。

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よう。(実際にそのようにガリレオが語っているわけではありません。この講義に則して考えてみる、ということです。)

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、体の大きな動物と小さな動物について、骨の形を比較する。もしも仮説 B が正しいならば、

1. 骨は相似形になっていないはずである。
2. 仮説に基づくと、大きな動物は相対的に重いために、太めの骨になっているはずである。

これらが観察されれば、仮説は支持される。

余談になりますが、ガリレオよりも後の時代に活躍するジョナサン・スウィフト(1667-1745)は、火星に2つの月があることなどをガリヴァ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す。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。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が難しいのはなぜか。

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。測定が容易になれば、仮説は支持される。

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ば、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。

これが実現すれば、仮説は支持される。

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。振れ幅が大きいとき、速く動くものの移動距離が長く、小さいときは、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。測定できれば、仮説は支持される。

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 (1608-1647) は、この理由について考えました。例によって、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。

つまり、ポンプが吸い上げようとしても、真空ができることでポンプが水と接触しなくなるので、吸い上げられなくなるという仮説です。これに対しては、

C 10m 以上の長さの試験管（一方が閉じたガラス管）を作って、水を詰めて逆さにする。開いた口は水の中に入れる。上端に隙間ができれば真空ができることが確認でき、仮説は支持される。

と確かめればいいのですが、当時はそのような実験はできなかったようです。つまり、10 m の高さの試験管を作って、水をこぼさないようにひっくり返すことは難しかったようです。

ちなみに、今では、「ホース」が使えます。ホースであれば曲がるので、水を詰めたまま、10m の高さまで試験管を逆さに立てるようなことができます。実演も可能です。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えません。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。

A 実験が難しいのはなぜか。

B 試験管をつくってひっくり返す実験には、10 m は長すぎるからである。

C 10 m よりも短くなるような方法で実験して、うまくいけば仮説は支持される。

それでは、この仮説はどのように確かめたらいいのでしょうか。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 倍ぐらい重い水銀ならば、 $1/14$ の高さで真空ができるはずで、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、大気圧（大気圧）に関係しているのです。大気圧とのバランスで、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とはなぜか。

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）で光を感じること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）を感じることができるかどうか、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。

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、感触では区別がつかないようになっています。これを、私が目でみてわからないように黒い袋に入れて、黒い面を上にしながらか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。目で見えていても、うっかり表裏を間違えて取り出すこともあるくらいです。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。それは偶然そうっただけなので、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 科学で用いる確率論と統計学

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。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。つまり、どちらも確率50%で発生する出来事。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、超能力が全くなくて、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結果になる、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。

5.4.4 まとめ

前回までの講義では、人間が科学の ABC の方法を無意識に実行していること、また、これを意識的に実行することで、私たちの行動パターンや能力を向上できるのではないか、ということを強調してきました。

今回、科学の ABC の方法が、学問の中でどのように位置づけられ、また、応用されるか、について、その入り口をお話ししました。一見、すぐには科学の ABC の方法を適用できないと思ってしまうような例でも、統計学の力を借りることで適用することが可能になります。

科学の ABC の方法を得て、科学は飛躍的に発達することになります。これからの講義の中では、様々な学問分野で科学の ABC の方法がどのように適用されるかを見ていきます。ただ、次回は、課題のために、発想法についてお話ししたいと思います。