

9 歴史的な実験にみる観察と仮説と検証

月食に関する情報
水の真空の実験
ブラウン運動の動画

これまでみてきたように、私たちは観察と仮説と検証という作業を繰り返すことによって新たな法則性を発見してきました。今までは私達の身の回りの現象について考えてきました。しかし、これまでの歴史の中でも数多くの実験が繰り返されてきました。そのいくつかをここで紹介したいと思います。

ただし、歴史上の人物たちが、この講義でお話しした ABC というプロセス通りに考えたわけではありません。この点はあらかじめお断りしておきたいと思います。

9.1 地球の形

地球が丸いということは、実は古代ギリシャの哲学者が活躍した時代にはわかっていました。特にピタゴラスは地球が球体であるということを唱えたことでも知られています。では、どのように地球の形が丸いと気づいたのでしょうか。実際には、その過程ははっきりとはわかっていないようです。ピタゴラスも直感的に球であると考えたようです。そこで、実際に ABC という形で発見されたのかどうかは、私にはわかりません。

ここでは、この講義に則した形でこの話題を、ABC の形でまとめてみましょう。

A 遠ざかる船は、なぜ最後まで帆の上部が見えるのか

B 地球が丸いからである

C 地球が丸いとすれば、また、月食が地球の影によって起こるのであれば、月に映る影の形を調べればよい。

この話には少し説明が必要です。まず、船が港を出て遠ざかることを考えてみましょう。遠ざかる船を眺めていると、船はだんだん小さくなっていきます。そしてやがて見えなくなります。ところが、この「見えなくなる」なり方に特徴があることに気づいた人々がいたのです。具体的には、船の下の方から見えなくなり、船の帆の先端は見えつづけるのです。(余程長い時間観察しなければ気づきませんね。)

この現象の理由は、地球が丸いと考えerことで説明できます。では、本当に地球は丸いのでしょうか。これを検証するにはどうしたらいいのでしょうか。古代ギリシャの時代の哲学者たちは、月食を観察しました。そして、月が欠けるのは、地球をはさんで、丁度、太陽と月が反対側に来たときであることから、月食は地球の影の中に月が入るために起こるのであることを知っていたようです。月食の時の月の欠け方を観察すると、その縁は円の一部のように見えます。これは地球が丸いことの検証になります。

実はその他にも地球が丸いことを検証した人がいます。エラトステネスは、同じ日に、井戸の中に差し込む太陽の光の様子について調べました。

C 太陽が南中したときに、井戸に差し込む日の光の深さを調べてみる。

南の方にいくと、深いところまで太陽の光が差し込みます。一方、北の方にいくと、あまり深いところまで太陽の光が差し込みません。もしも地球が平面であったなら、このようなことは起こらないはずで、エラトステネスは、こうした事実を使い、また、数学的な知識も用いて、地球の大きさまで計算しました。

9.2 模型と実物の強度

ガリレオ・ガリレイは、その著書「新科学対話」の最初の方で興味深い話を展開しています。それは、船の製造に関する話です。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、船を支える柱などを確かめるそうです。そして、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、強度が足りず、もっと太い材料を使わなければならない、というのです。

この話も、実際には ABC という形をとらず、ガリレオは数学的な計算も用いて理論的な話を続けています。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ものよりも、太い材料を使わなければならないのはなぜか。

B サイズを大きくすると、強度は強くなる。しかし、それ以上に重量が増えて重みに耐えられなくなるからである。

先ほども書いたように、その著書の中でガリレオはその理由を解き明かしています。しかし、それだけではなく、それは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。

実際に、それは確かめることができます。一般に体の大きな動物は体の中に占める骨の太さの割合が大きくなっています。

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、火星に二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。

9.3 斜面を用いた実験

もう一つ、ガリレオのエピソードについてお話ししたいと思います。ただし、これも推測に基づいた話ですし、この講義に則して ABC に当てはめるとこうなります、ということです。

ガリレオは、質量によらずに物体は同様に落下するという落体の法則について、詳しく調べたいと思ったに違いありません。ところが、当時のガリレオには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、次のように考えたに違いありません。

- A 落体の法則を詳しく調べるの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てみました。

- C 斜面を作って斜面の上を滑らせる

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。ガリレオは、非常に精密な斜面をつくって実験したそうです。また、当時は時間の測定が難しかったことから、斜面を滑らす玉が通過すると鈴が鳴るような工夫をしました。複数の鈴を、同じ時間間隔で鳴るように配置することで、移動距離と時間の関係について調べました。

9.4 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を、やはり、ABC に当てはめながら紹介してみます。それは、振り子の等時性です。ガリレオは、振り子が振れるとき、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。

- 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

- 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。

9.5 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高さまでジュースを飲むことができるでしょうか。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、次のように整理されます。

- 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。水が、水自身の重みで引っ張られるのであるとすると、水の 14 倍ぐらいある水銀であるならば、 $1/14$ の高さで真空ができるはずです。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ます。これは、その後、気圧計として使われることになります。

9.6 ブラウン運動

1820 年代、イギリスのブラウンは、水に浮かべた花粉を顕微鏡で観察していて奇妙なことに気づきました。花粉が破裂して中から出てきた粒子が、水の中をピコピコ動いていたことに気づいたのです。この運動をブラウン運動といいます。ブラウンは、どうして動いているのか、考えました。

今回もブラウンの行ったことを ABC へ当てはめて考えます。ただし、クイズ形式にしてみたいと思います。次のような A, C に対応する B を考えてみてください。

- A 花粉から出てきた粒子は、どうしてピコピコ動くのか
- B ?
- C 一度、花粉をアルコールに浸してから同じ実験をしてみる。また、ガラスを細かくすりつぶして、花粉から出てきた粒子の代わりに、ガラスで実験してみる。

ブラウンは、一体、どんな仮説を立てて C のような検証を行ったのでしょうか。それは、「花粉から出てきた粒子が生きているので、生命活動によってピコピコ動いている」という仮説です。ア

ルコールに浸して生命活動を停止させたり、もともと生命とは無関係なガラスで実験するすればどうなるでしょうか。生命活動によって運動しているなら、どちらも動かないことが予想されます。こうした方法で仮説を検証しようとしたのです。

ちなみに、この結果は、どちらの場合も動きました。どうやら生命活動によって動いているのではなさそうです。それでは一体、何が運動を引き起こしているのでしょうか。この疑問は、おおよそ 80 年近くになってアインシュタインによって解明されました。実は、非常に小さな物体は、目に見えない分子が、様々な速度で衝突してくるために、ピコピコ動いているのである、ということがわかったのです。

9.7 レオナルド・ダ・ビンチの見た山の色

数年前 (2007 年) に、レオナルド・ダ・ビンチの名画「受胎告知」が日本で展示されました。ほとんどイタリアを出たことすらない名画が日本にやってきたので、とても話題になりました。その時のビデオを見てみましょう。このビデオの中でも ABC が見られます。

- A レオナルド・ダ・ビンチは精細な絵を描いたのに、どうして聖母マリアだけは腕の長さの配慮が欠けているように見えるのか。
- B この絵が右斜め下からしか鑑賞できない場所に置かれると、あらかじめ知っていたために、この絵にエナモルフォーズの技法を取り入れたからである。
- C レオナルド・ダ・ビンチが描いた絵にアナモルフォーズの技法を用いたものがあるかどうかを検討する。

実は、レオナルド・ダ・ビンチ自身が、それ以前には無かったアナモルフォーズの技法を開発しています。検証としては弱い検証ですがありません。しかし、仮説を支持する材料にはなっています。

もう一つ、重要な点があります。これも、実際にレオナルド・ダ・ビンチの考えたプロセスをたどっているわけではないので、以下の ABC へのあてはめは、おそらくこのように考えたのだろうという私の推測です。

- A 空が青いのはなぜか
- B 空気が青いからである
- C あらかじめ色がわかっている物体と観察者の間に大量の空気をおいて、色の変化を調べる。

レオナルド・ダ・ビンチは、空が青いのは何故か、と考えたのだと思います。そして、おそらく、彼の仮説は空気が青いからである、というものだったと思われます。そして、それを検証するための素材として、遠くの山を観察したのだと思います。ビデオの中でも説明されていたように、レオナルド・ダ・ビンチは、途中にある大量の空気のために、遠くの山は青みががって見えると説明しています。

この性質は、レオナルド・ダ・ビンチ自身が開発した絵画の技法である「空気遠近法 (大気遠近法)」として今日まで活用されています。すなわち、青く灰色がかった色にすることで、遠くにあることを表現するという技法です。

余談ですが、1600年代の人であったレオナルド・ダ・ビンチは、絵を描く芸術家であると同時に科学者でもありました。いろいろなものに興味を持ち続けなければ、こうした発見・発明はできなかったでしょう。

9.8 ダーウィンの進化論

ここからはいくつかの生物学的な例を挙げてみましょう。

生命の多様性について、ダーウィンは進化論を唱えました。書籍として出版したのは1860年ころのことです。古代には現代に見られないような生物がいること、また地域の環境に応じた生物が生息していること、などを説明する仮説として進化論を考えました。

- A 多様な生物が生息している (していた) のは何故か
- B 突然変異と適応した生物だけが選択された結果である
- C 環境とそこに住む生物との対応関係を調べてみる

実際には、Cが先だったようです。ガラパゴス諸島で観察したイグアナは、島の環境の特徴に応じて、少しずつ形態が異なりました。そうした生物を観察することで進化論を仮説Bとして提唱したようです。

進化論については長い話がありますので、別途勉強してみてください。

9.9 条件反射

ロシアの生物学者パブロフは、犬の唾液腺を研究していました。ある時、飼育員の足音を聞いた犬が唾液を出すことに気づきました。

- A 飼育員の足音だけで餌を見ない段階から、犬が唾液を出すのはなぜか
- B 経験によって後天的に反射行動 (条件反射) が形成されるからである
- C メトロノームの音を聞かせてから餌を与えると、メトロノームの音だけで唾液を出すようになるか調べる

わたしたちも、梅干しを想像しただけで口の中に唾液が分泌されます。食べて酸っぱかったから、というのではなく、また、特に意識するわけでもなく、唾液がでるわけです。ところが、これは赤ちゃんには当てはまらないでしょう。経験によって、無意識のうちに反射するようになってしまったのです。

もしかしたら、「物理学」と聞いただけで眠くなってしまうのも条件反射かもしれません。

9.10 コッホの4原則

細菌学者のコッホは、結核菌、コレラ菌など、感染症の病原体を発見した学者として有名です。コッホの弟子たちも多くの病原体を発見しました。このような活動の中で、コッホは特定の病気の

原因となる病原体を特定するに当たって、コッホの 4 原則と呼ばれる次のような指針を提示しました。

- ある特定の病気の病巣に、一つの微生物が見出されること
- その微生物を分離できること
- その微生物を動物に感染させることで同じ病気を起こさせることができること
- そしてその病巣部から、再び同じ微生物が分離されること

これは直接的ではありませんが、ABC に対応していることがわかります。病気の原因がわからないとき (A)、よく観察して、微生物を見つけ、それを病原体だと仮定します (B)。もしもそれが病原体であるならば、その微生物を感染させた動物に同じ病気を起こさせることができるはず (C)。また、その病巣部からも最初に発見された時と同様に微生物が発見できるはず (C)。

このように対応関係がはっきりしています。

ただし、近年は必ずしもこれに当てはまらない例もあるために、いくつかの感染症は、その原因特定が難しくなっています。

9.11 社会学

最後に紹介したいのは社会科学における ABC です。

社会学という学問分野の源流の一つは、マックス・ウエーバーに求められます。マックス・ウエーバーは、宗教と産業との間に関係があると考えました。

A 経済発展のスピードが地域によって違うのはなぜか

B 宗教が違うからである

C ドイツの宗教の違う地域で職業意識について比較してみる

- プロテスタント (主に北部)
- カトリック (主に南部)

社会学を勉強すると、必ずといっていいほど読むことになるウエーバーの著書「プロテスタンティズムの倫理と資本主義の精神」の最初の方に、ドイツの地域による職業観の違いについてかかれています。その他にも沢山の仮説と検証が書かれているので、その分野に興味のある人はぜひ読んでみてください。

9.12 ろうそくの科学