

## はじめに

理系女性教育開発共同機構の4つの柱の一つである「大学理工系教育開発プロジェクト」  
として、2015年度から開講されている2科目に加え、2016年度から全学共通教養科目とし  
て「ベーシックサイエンスⅠ」「ベーシックサイエンスⅡ」を開講している。この科目の目  
標は次のとおりである：

現代社会において科学はなくてはならないものになっているが、文系の学生が科学  
について学ぶ機会は少なく、理系の学生も広い視野に立って科学を考えることなし  
に専門に進むことが多い。そこで、文系と理系の両方の学生を対象とし、幅広い科  
学の活動の一端を講義するとともに、学問をする上で自分の考えを正確に言葉で表  
現するための方法を講義する。

2017年度は、次の4人がそれぞれのテーマで担当した。

- ベーシックサイエンスⅠ（前期）
    - 第2回～第8回 寺内かえで（理系女性教育開発共同機構）
    - 第9回～第15回 船越紫（理系女性教育開発共同機構）
  - ベーシックサイエンスⅡ（後期）
    - 第2回～第8回 山下靖（理学部）
    - 第9回～第15回 和田葉子（理系女性教育開発共同機構）
- （第1回はオリエンテーション）

本テキストは、この2つの講義で使用した資料などをまとめたものである。ただし著作  
権の関係で再録できなかつたものなどがあることをお断りしておく。

2018年2月28日  
奈良女子大学  
山下靖

## 目次

ベーシックサイエンス I (前半)	寺内かえで.....	1
ベーシックサイエンス I (後半)	船越 紫.....	51
ベーシックサイエンス II (前半)	山下 靖.....	82
ベーシックサイエンス II (後半)	和田葉子.....	105



## ベーシックサイエンス I (前半部)

理系女性教育開発共同機構・特任講師

寺内 かえで

前半部については、学習・教育目標を「物事を科学的に観察し、自分の言葉で科学的に表現することを学ぶ。また、社会と科学技術の関係について理解する」こととした。

寺内が担当した第2回から第8回までの授業計画を下記に示す。

第2回 科学とは何か・科学的とはどういうことか

第3回 人類と科学技術とのつきあい

第4回 エネルギーの科学 その1 物理的基礎

第5回 エネルギーの科学 その2 化石燃料エネルギーとその利用

第6回 エネルギーの科学 その3 再生利用エネルギー

第7回 私たちの生活とエネルギー消費を資料から読み解く

第8回 トランス・サイエンスの時代を生きる

テキストとして、2016年度に同機構において発行された LADy SCIENCE BOOKLET No.6 『エネルギー読本 I』（寺内かえで・寺内衛著）を用いた。このテキストは、同機構のホームページ(<http://www.nara-wu.ac.jp/core/booklet/index.html>)から無料でダウンロードして使用できる) また、授業時に使用するパワーポイントから編集したものを毎回「授業用資料」として配布した。これらについては本ブックレットで付録「授業資料」として公開する。その他、何回かの授業において、寺内らの著した論文を参考文献として配布した。

以下、テキスト『エネルギー読本 I』と重複を避けつつ、科学・技術の本質及び科学技術と人間社会について扱った第2回、第3回(一部)、第8回の内容を本報告執筆時の加筆訂正も含めて記す。

## 第2回（詳細は付録の第2回授業資料を参照）

### ★大学で学ぶということ

大学での学びのイントロダクションとして位置づけ、大学で学ぶとはどういうことか、ということ少し掘り下げて考えてみた。まず、高校までは「生徒」と呼ばれる。大学では「学生」と呼ばれる。高校までは受け身で学んでもよかった。しかし、大学では、自ら学ばなければ何も得られないという結果もありうるということである。このような自己への責任が「生徒」と「学生」の呼称の違いとして現れている。このような違いは知識を修得する、即ち「覚える」ということにも同様に適用できる。高校までは「とりあえず覚える」でもよかった。これは高校での学びの多くは、定期試験や大学受験の問題だけがターゲットとなっていることと結びついていると考えられる。一方、大学では「理解⇒覚える⇒適用」が重要となる。これは、大学卒業後(或いは大学院終了後)には社会に飛び立つことになるが、現実社会は応用問題ばかりなので、とりあえず覚えただけでは対処できないからである。

また「創造するために知識は必要ないか？」という問を投げかけた。創造的であることが重視されているが、創造性は無から湧き出してくるものだろうか。最近急速にその存在感を増してきた人工知能(AI)の例を思い出してみよう。囲碁で世界のトップレベルのプロ棋士に勝った人工知能の囲碁プログラム、Alpha GO\*、は人間の思いつかない手を指すという。つまり創造性を持ったと言ってもいいだろう。AI においてもまず今までに知られている情報(囲碁で言えば棋譜)を大量にインプット(学習)しなければならない。ここからも、知識の学習が非常に重要であることがわかると思う。つまり、創造とは、学習した多くの知識が連関し、結びついたときに生まれるのではないだろうか。このようなことを踏まえると、大学での学びは、教養及び専門的な知識の修得することに加えて、科学的な思考の訓練を行うものであると考える。

### ★STEM とは何か、科学的とはどういうことか

次に、科学技術でよく用いられる科学・技術・工学・数学を表す略語、STEM(Science, Technology, Engineering, Mathematics)について若干詳しく説明する。『新英和大辞典(第6版)』(研究社)によれば、"stem"の本来的な意味は、植物の茎、木の幹などである。また、最近医療用語としてよく耳にする、多様な細胞に分化する能力を保持した「幹細胞」は"stem cell"という。このように、"STEM"という略語は単なる略語ではなく、根幹となるもの、潜在的な力を秘めたものといった意味合いも含めて作られたのであろう。次に、科学(S)、技術(T)、工学(E)及び数学(M)の各言葉について説明しておく。日本では科学技術と括られ、科学と技術を同じものとして使う或いは混同して使う例が散見される。辞書・辞典の詳細な定義は付録の授業資料をごらんいただきたい。エッセンスをまとめると、科学(science)

\* 2017年10月には、人を介さず、ソフト同士を戦わせるだけで学習し、Alpha GOをも打ち負かす力をつけた、Alpha GO Zeroという改良バージョンが発表された。

とは学問的知識をいい、自然科学だけでなく、人文科学，社会科学も科学の範疇である。日本では科学とは自然科学の事を指していることが多い。自然科学は自然現象を対象として取り扱い，そのうちに見出される普遍的な法則性を探求する学問をいう。物理，化学，生物学，地学などいわゆる日本での理科科目が具体的な分野である。技術(technology)とは自然に人為を加えて人間の生活に役立てるようにする手段或いは科学を実際に応用する手段をいう。つまり，科学という知識を用いて技術を開発していくという関係があることが分かる。しかし，望遠鏡や顕微鏡というものを思い起こすと，これらは光学の知識を応用して作られた技術であるが，この望遠鏡や顕微鏡を用いることにより今まで肉眼では見ることができなかった天体や宇宙の姿，生物の構造など新しい知識(=科学)を知った。即ち技術によって新たな科学の世界が広がったわけである。現代ではもっと多岐にわたり科学と技術は相互に結びつき合って発展していつている。このため，科学と技術を切り離して考えることはかなり難しい場合もあり，科学技術(science and technology, S&T)という言葉は便利ではある。ただ，科学技術には正の側面と負の側面があるとか，科学技術のメリットとデメリットという言い方をする場合について考えてみよう。科学(知識)には「良い・悪い」の価値は含まない。なぜならそれは事実を記述しているだけだからである。しかしその知識をどう利用するか，即ち技術には良い利用と悪い利用があることは歴史的にも枚挙に暇がない。次に工学(engineering)は，大規模に物品を生産するためとか，ある事を実現させたりするためとかの目的を達成するために科学技術を適所に応用していく学問である。科学技術を適所に利用していくためには，科学技術の素養だけでなく，目的を達成するためのシステムをデザインする能力も必要である。デザインをするに際しては，倫理観や機能美を含めたある種の美的感覚も問われる。こう考えると，工学とは理学とは異なり総合的な側面を持つように思われる。最後に数学(mathematics)は，周知のように数量および空間に関して研究する学問である。日本では理科と数学は科目としては分かれているが，むしろ「理系科目」という括りの中で捉えられ，その根本的な違いについて考えてみることはまずない。そこで，数学と理科の違いを，科学的であるとはどういうことであろうか，という観点から考えてみたい。「科学的」についていろいろな定義があるが，異論のない確実なところとして，①事実(fact)に基づく，②再現性(reproducibility)及び検証可能性(verifiability)を有すること，③論理的(logical)であることを挙げたい。以下この3点について記す。

科学的とはどういうことか

#### ①事実(fact)に基づく

観察や測定によって得られた事実(データ)に基づくことが重要である。自分の都合のよいように作為的に作成(選択)したものや，想像や憶測を含んだものは事実ではない。

#### ②再現性(reproducibility)及び検証可能性(verifiability)を有すること

本当にそうなのかを検証できることができ，同じ方法で行なえば，誰がやっても必ず同様な結果が得られる再現性があることが必要である。従って，科学論文では，それを読んだだけで誰でも再現できるように記述しなくてはならない。

### ③論理的(logical)であること

誰でも納得できるように論理的でなければならない。研究を進める段階の思考過程でも、記述をする際にも当てはまる。「結論」は「事実」に基づいて、論理的に導かれたものでなくてはならない。論理の飛躍は「独りよがり」であり、科学論文では、論理のステップを飛ばさずに丁寧に記述することが必要である。

この観点から自然科学(science)と数学(mathematics)とを比較してみる。

#### 数学と科学(自然科学)との違い

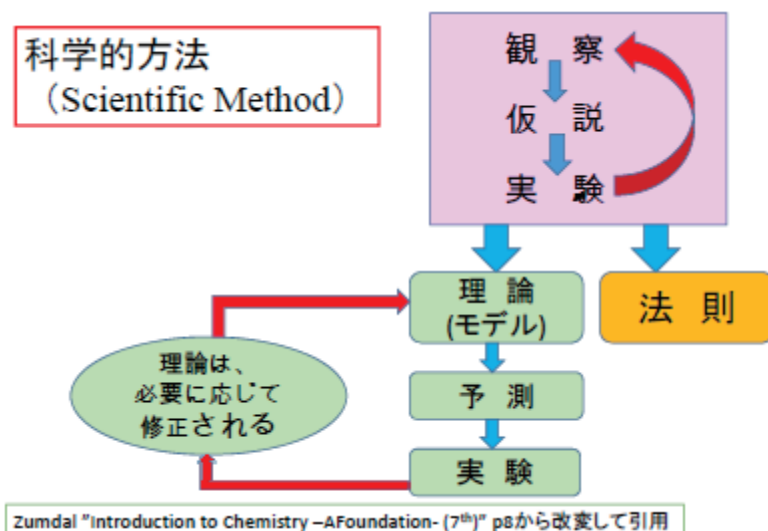
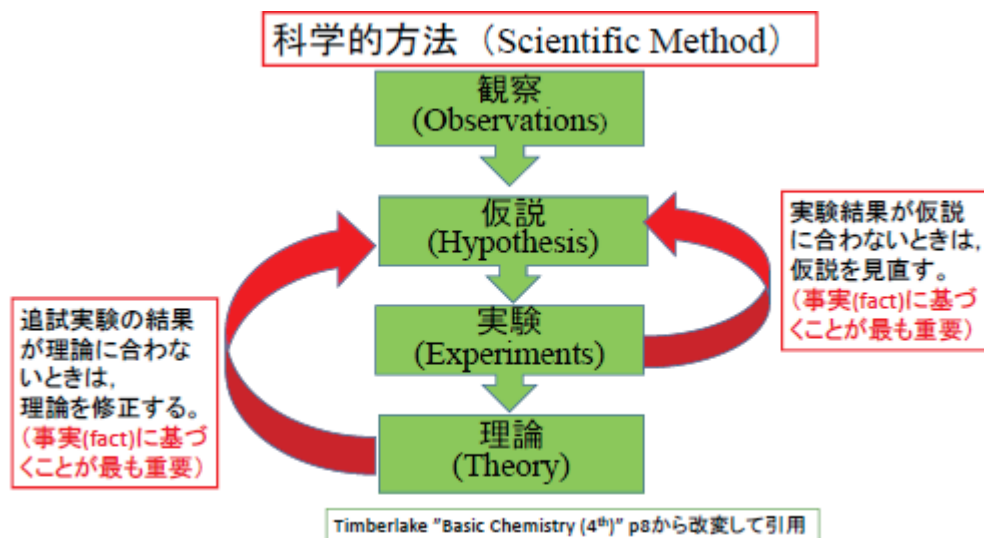
	科学(自然科学)	数学
事実(fact)に基づく	Yes	公理/定理/定義に基づく
再現性がある(reproducibility)	Yes	Yes
検証可能性がある(verifiability)	Yes	Yes (証明することが、数学そのもの)
論理的(logical)である	Yes	Yes

この比較で最も特徴的なことは、自然科学は「事実に基づく」ことである。つまり自然現象に基づくのである。一方、数学は公理/定理/定義に基づく。極端な言い方をすれば、定義という人為的に規定したものに基づいて成り立つ。

それでは自然科学の根幹となる「事実」をどう得るのだろうか。自然科学の研究においては、「事実」は実験・観察・観測(以下、実験等という)によって得られる。得られた「事実」を「データ」という。信頼できるデータとは、再現性のあるものである。このようなデータを得るためには、実験等での条件設定が重要となる。そこで、実験等の記録には、単に結果だけでなく、条件等も漏らさず記載する必要がある。都合の良い解釈に合わせて、データを捏造したり改ざんしたりすることは決してしてはいけない。これは「事実」を捻じ曲げる行為だからである。そして、捏造や改ざんされたデータは当然のことながら再現性も担保しない。

次に、科学的に行われる研究方法について示しておきたい。日本の教育では科学的方法(Scientific Method)とはどのようなものか、ということについてあまり言及しないが、米国の大学の教養課程の教科書では最初に明記されているものが多々ある。化学の教科書の例を以下に2つ示す。若干表現方法が異なるものの、両者は根本的には同じことを示しており、「実験結果」即ち「事実」が最も拠り所とするものであることが理解できる。技術の進歩により測定精度が向上し、新規な観測機器・測定機器が開発されることにより検出不可能であったものが検出できるようになり、新たなデータへと更新されていく。そして、新たに得られたデータにより、理論は書き換えられていく。このことは数学と科学の大きな違いとなると思われる。例えば、古代ギリシア時代の数学(ピタゴラスの定理、ユーク

リット幾何学など) は、表記法に違いはあるかもしれないが、古びることはなく、本質的には現代でも通用する。



上記いずれの表記でも、Scientific Method では「観察」→「仮説」→「実験」という流れから始まっていることも特徴的である。最初の仮説は、自然現象の注意深い観察から生じる、ひょっとしたらこういう関係性があるのではないかと、こういうメカニズムではないだろうかというものであろう。そして、それを確かめる(検証する)ために実験をして確かめる。実験は、仮説が正しいかどうか確かめられるように、条件、比較対象、方法などをデザインしなければならない。そして、実験結果を考察して、さらに改良された仮説を立てることになる。このときには、定量性のあるときには関係式を提示することもできるかもしれない。「観察」→「仮説」→「実験」の繰り返しは Scientific Method を学ぶ者にとって、最も大切なステップであるといってもよいだろう。



## ★科学の作法

先にも述べたように、再現性のあるデータを得ることは非常に重要である。このことを担保するために、捏造や改ざんは研究不正行為として厳しく禁じられている。ここで、世界各国で研究不正行為として共通認識のある行為について示す。捏造(**fabrication**)、改ざん(**falsification**)、盗用(**plagiarism**)の頭文字をとって”FFP”と略されることもある。

<b>世界各国で共通して研究不正行為と認めているもの ⇒FFP</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>・捏造(<b>fabrication</b>) 存在しないデータ、研究結果等を作成すること。</li><li>・改ざん(<b>falsification</b>) 研究資料・機器・過程を変更する操作を行い、データ、研究活動によって得られた結果等を真正でないものに加工すること。</li><li>・盗用(<b>plagiarism</b>) 他の研究者のアイデア、分析・解析方法、データ、研究結果、論文又は用語を該当研究者の了解又は適切な表示なく流用すること。 例えば、「コピペ」</li></ul>
日本学術振興会 「科学の健全な発展のためにー誠実な科学者の心得ー」
<a href="https://www.jsps.go.jp/j-kousei/rinri.html">https://www.jsps.go.jp/j-kousei/rinri.html</a>

捏造や改ざんが不正行為である理由は上述したように Scientific Method で重視する「事実に基づく」ということを担保するためである †。それでは、盗用はなぜ不正とされるのであろうか。各自でよく考えてもらいたい。一般的には、著作権法違反であるという説明がなされる。つまり研究のプライオリティーを重視しているわけである。これももちろんである。私見ではあるが、盗用、特にコピペは自ら思考活動を放棄しているように思われ、学習する者、学問する者として失格であると考ええる。

ここで、Scientific Method と科学の作法の観点から、科学の研究における、記録について補足しておきたい。実験等の記録はノートに記載する。事実を時系列的に記録することが重要であることから、ルーズリーフなどページの前後が入れ替えできるものではなく、綴じたノートを使用する。また、改ざんを防止するためには、原則として記録は鉛筆ではなく、ボールペンのように消せない筆記用具を使う。ノートへの記録は必ず年月日を記載する。なお、米国では 2013 年まで先発明主義を採用していたため、発明日を示す証拠としてラボノートの位置づけは非常に重要なものであった。2013 年 3 月 16 日から米国もようやく先願主義に移行したが、グレースピリオドという特殊な制度に対するリスク管理の意味からもラボノートは不要になったということは決してないことを付記しておく。

† 昨今、日本でも、捏造や改ざんが問題となることが多い。この主要な原因の一つとして、任期つきの非正規雇用の若手研究員が著しく多くなり、業績をあげて任期無しのポストを得る熾烈な競争が挙げられている。



### 第3回（詳細は付録の第3回授業資料を参照）

#### ★科学と技術の始まり

科学と技術はどちらが先に誕生したのだろうか。人類の、人類以外の生物と違う大きな特徴として「道具を作り(発明)、生活を便利にしてきた」ことを挙げることに異論はないであろう。そこで、技術の始まりを「発明の始まり」として調べてみると、紀元前260万年前に東アフリカのOldwanで見つかった石器が最古の発明として挙げられる(Wikipedia「発明の年表」など)。それでは科学の始まりはいつとされるであろうか。多くの科学史の本を紐解けば、科学は古代ギリシア文化の一つである「自然哲学」から始まっている。最も古い時代に栄えたのは、イオニアを活動中心とする紀元前6世紀頃から始まるものである。この時代の代表的な自然哲学者としてタレス、ピタゴラスなどを挙げるができる。科学と技術はどちらが先に誕生したのか、その軍配は当然「技術」に上がる。それではなぜ、科学の始まりは技術の始まりより圧倒的に遅いのだろうか。私見ではあるが、技術は人類が生活の必要のために発達させてきたものと言ってもよいと思う。「必要は発明の母」といった言葉もあるくらいである。だから、早くから、おそらく人類の誕生と共に始まったのだろう。一方、科学は「自然哲学」という言葉も表すように、哲学、つまり人間の思想ないしは思考から誕生した学問であった。じっくりと思索するためには、現実の生活からしばし離れることができる、経済的・時間的なゆとりが必要なのではないだろうか。古代ギリシア時代は奴隷の存在を前提とした市民社会であった。市民にとっては、奴隷という労働力によって食べるための労働から解放され、経済的にも時間的にもゆとりが生まれた社会であったと思われる。そこでは、古代ギリシア彫刻や建造物に見られるように芸術が栄え、知的活動としての自然哲学が誕生した。このようなゆとりを得るためには、当然、食糧を生産する農業などの分野において技術が進歩するための時間が必要であったであろう。

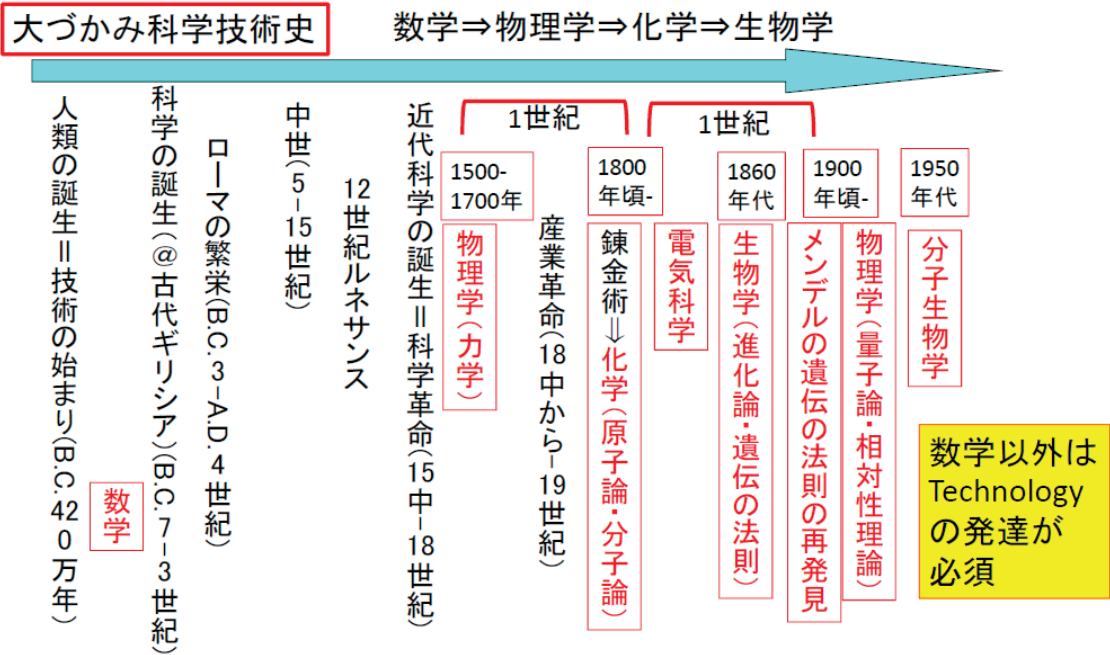
ちなみに、古代ギリシアの自然哲学の中で、最も発達を遂げたのは数学である。ピタゴラスの定理、ユークリッド幾何学など現代でも本質的に変わらない内容を学校で習っている。なぜ、数学だったのだろうか。数学は原則として思索する(研究する)場所を選ばない。また、必要な道具も極論すれば筆記用具だけである。また、先に述べた科学と数学との違いを思い出してみれば、観測や測定手段が発達していなかったその時代において、思索を中心として発達した自然哲学には数学がその性質上最も適していたと推測できる。

#### ★科学・技術の発達と科学的方法(Scientific Method)の関係

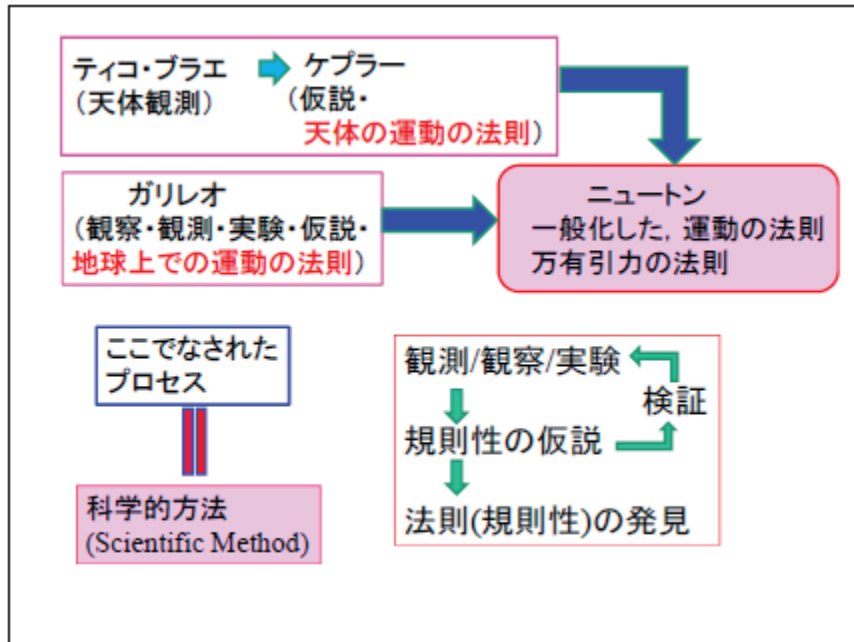
本授業は科学・技術史の各論を扱うのが目的ではないので、ざっくりと科学技術の流れを見てみるだけにします。年表風の下図を見てみよう。世界史でおなじみの名称「ルネサンス」の次に「科学革命」という名称があり、その次に、よく知られた名称「産業革命」と並んでいることが分かる。余談ではあるが、高校生るとき、筆者には世界史は単なる暗記科目と思え、大嫌い不得意であった。45歳を過ぎて科学技術史を授業で担当する機会を得て、その必要性から科学史を学んだ。そのとき、「科学革命」について自分なりの意味づけを行うにつれて、世界史との結びつきを強く感じた。そして、少なくとも西洋史につい



では、世界史についての認識も大きく変わった。



物理を皮切りに科学の近代化が始まり、現在私たちが理科科目で習う内容に直結していく。科学史ではこの近代化の時代を「科学革命」といっている。科学史でよく扱われる、ティコ・ブラエからニュートンに至るまでの、力学分野の流れとつながりを図解したのが次の図である。



ここで、第2回で示した Scientific Method の図を見て比較してみたい。科学革命という時代においては、観測・観察・実験などが実際に行われ、そこから得られたデータから一般化した法則を導くということが実に明確になされている。つまり、科学革命とい

うのは科学的方法(Scientific Method)の確立と言い換えてもよいであろう。科学の近代化とは、科学的方法(Scientific Method)の確立なのである。ここでは、古代ギリシアの哲学者、アリストテレスが提唱した宇宙観、運動論などがことごとく否定された。アリストテレスの理論はヨーロッパ中世の終焉まで約 15 世紀もの長い間信じられたが、現代では科学の発達を阻害するものとまで言われる。私見ではあるが、アリストテレスの時代の技術では定量的議論に耐えうる観測などできなかつた。そこで、その当時の知見をもとに、哲学を繰り広げた。アリストテレスは実にさまざまなことについてその当時の知見に想像を加えて大きな学問体系を作り上げた。それが、後の時代に権威と結びつきすっかり悪者にされてしまった。筆者にはアリストテレスの哲学を権力と結びつけて利用した後の世代の責任であるように思われる。

一般に科学史で科学革命として扱われるのは上記の物理分野でのことである。それでは化学、生物学はどうだったであろうか。先の年表風の図にも示したが、大雑把に見れば、化学の近代化は物理に遅れること約 1 世紀、生物の近代化はさらに化学に遅れること 1 世紀である。この遅れは何を意味しているのだろうか。再度 Scientific Method を思い出して欲しい。例えば化学では、物質の変化(化学変化)の前後で、精度良く、再現性のある質量の測定が可能となって初めて定量的議論ができるようになった。このような測定技術(錬金術の時代から考案され続けた様々な実験器具も含む)が確立されるのに要した時間であったと推測される。生物学は最も定量性や再現性と結びつきにくいものである。このため、最も近代化が遅れたのであろう。現代でも物理を典型的な科学と考える人の中には、生物学は科学ではない、と言う人もいる。

数学以外の、物理、化学、生物学においては、望遠鏡や顕微鏡に代表されるような観測・観察をするための「観る技術」が必要であり、長さ・重さ・時間を定量化するためには「はかる(測る・計る・量る)技術」が必要となる。つまり、科学の発達には技術が必要である。現代においては、ますます科学と技術の発達には相互の結びつきが欠かせなくなっている。

科学革命といわれる時代の次に登場するのが「産業革命」である。産業革命に至る科学技術史に概要については前述した『エネルギー読本 I』第 1 章の記載を参照されたい。科学革命を「近代的科学(特に物理の力学分野)の確立」とまとめたように産業革命をまとめるとすると「近代工業の誕生」といえるだろう。

ここでこれまでに記述してきた Science(S)・Technology(T)・E(Engineering)・M(Mathematics)の誕生についてまとめておく。なぜこのような順で誕生してきたのかをもう一度考えてみて欲しい。

人類の出現 ⇒ 技術(T)の誕生



ギリシア文化の誕生 ⇒ 自然哲学の誕生  
数学(M)の発達

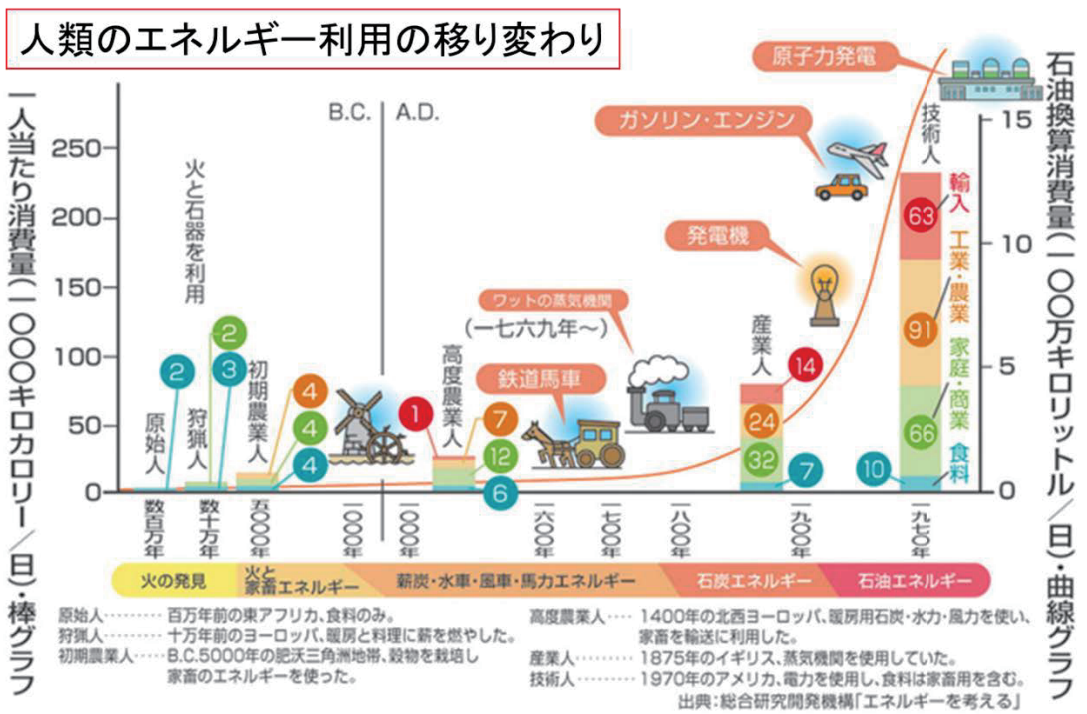


科学革命 ⇒ 近代物理学(S, physics)の誕生



産業革命 ⇒ 近代的工業(E)の誕生

次の図に示すように、産業革命を境に、人類のエネルギー消費量は急速に増加していった。ここで使用されるエネルギーはほとんどが化石燃料である。エネルギー消費量の推移については『エネルギー読本 I』第1章1節、化石燃料については同テキスト第3章1節に少し詳しく記載したので参考にして欲しい。



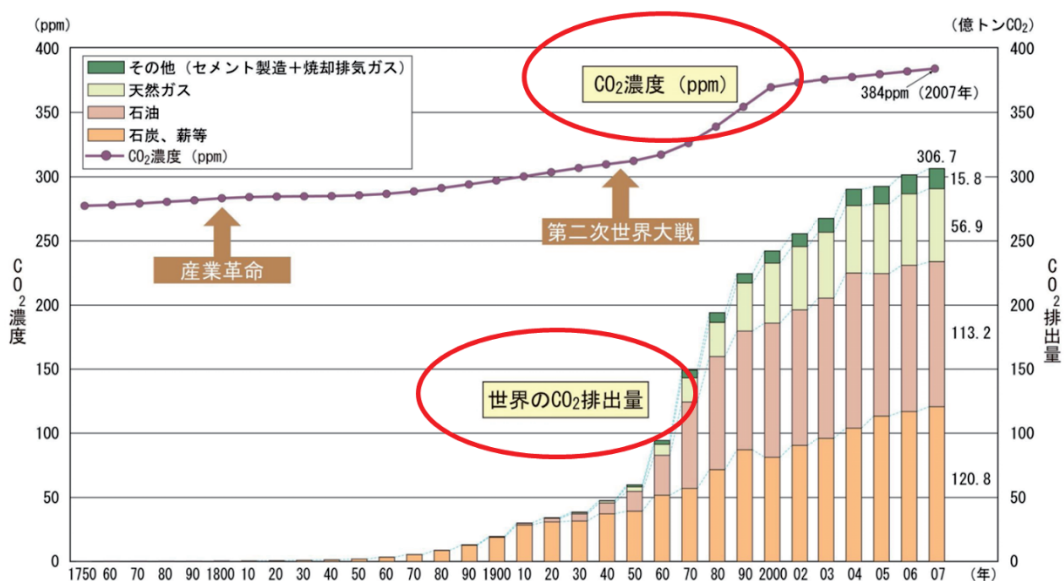
四国電力HP

<http://www.yonden.co.jp/life/kids/museum/energy/history/001.html>

化石燃料の使用が増加すると共に、当然のことながら二酸化炭素の排出量も増加した。排出される二酸化炭素が増えるにつれて、大気中の二酸化炭素濃度も上昇した(下図参照)。

このグラフで棒グラフの部分は排出された二酸化炭素がなにに起因するかも示している。1990年まではほとんどが石炭や薪等の燃焼に起因している。第二次大戦が終わった後、1950年から1970年までは石油の燃焼に起因する二酸化炭素が急速に増え、10年ごとにほぼ2倍の勢いで増加している。これに伴い、世界の二酸化炭素排出総量も1950年からいっそう増加し始めた。つまり、産業革命を境に急速に増加し始めたエネルギー増加の傾向は、1950年以降その増加を加速させたわけである。日本では高度成長期といわれる時代がここに符合する。大気中の二酸化炭素濃度は1970年から2000年ごろまで増加曲線が急上昇した。これが、産業革命以降の約200年間の近代化社会の発達と共に起こった事実である。

### 化石燃料等からのCO<sub>2</sub>排出量と大気中のCO<sub>2</sub>濃度の変化



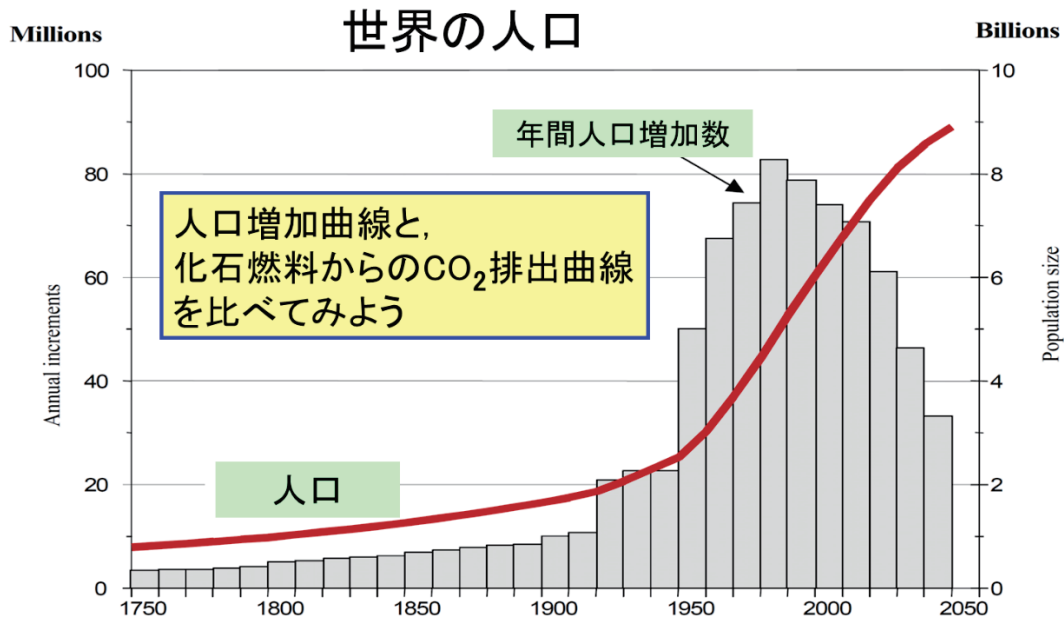
(注) 四捨五入の関係で合計値が合わない場合がある

### エネルギー消費量が多くなるとCO<sub>2</sub>の排出量は増える

<http://www.fepec.or.jp/library/publication/pamphlet/nuclear/zumenshu/> (電気事業連合会)

次に、世界の人口の推移を見よう(下図参照)。1950年以降の年間人口増加数が急激に上昇していることがわかる。第二次大戦後には日本でもベビーブームが起こり、人口が急激に増加したように、世界大戦後の世界の安定化が要因になっていると思われる。ここで考えてみたいのは、人口増加を支えるものについてである。生まれた子どもが成長していなければならない人口は増加していかないであろう。即ち、成長していけるだけの食糧が必要となるわけである。

Figure 1. Long-term world population growth, 1750 to 2050

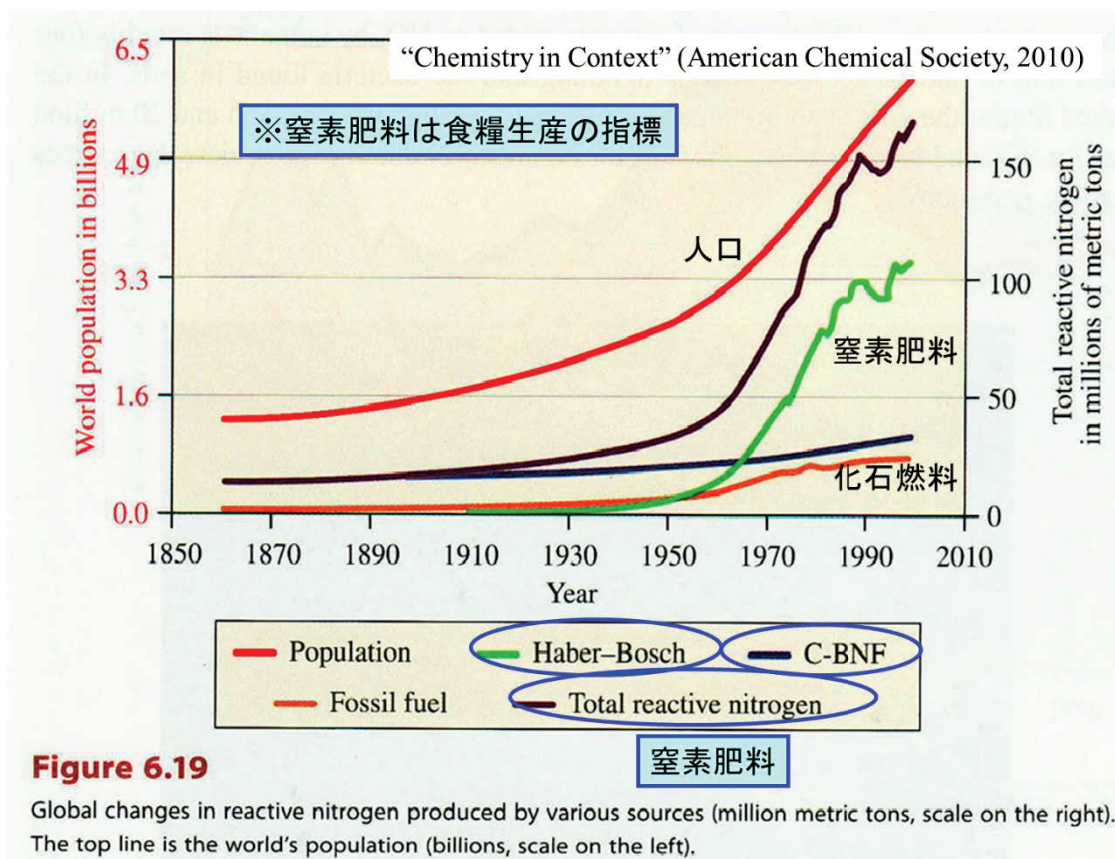


The World at Six Billion

<http://www.un.org/esa/population/publications/sixbillion/sixbillion.htm>

食糧増産を考えると、米、麦、トウモロコシなどの穀類を増産することが最も確実である。近代になり農作物の増収の必要が出てきたため、肥料というかたちで有機窒素を人工的に補うことが農業に不可欠となった。そこで、空気中の窒素を固定する研究が進められ、1913年にドイツのBASF社がHaber-Bosch法によるアンモニアの工業的生産を開始した。この画期的な発明により、食糧生産を支える窒素肥料を人工的に生産できることとなった。このようなことから、窒素肥料の生産量を食糧生産の一つの指標をしてみることができる。下図は、窒素肥料の生産量と人口を重ねたものである。





この図から、人口の上昇曲線は窒素肥料の生産量増加とよく符合していることに気づくであろう。Haber-Bosch法は100年を経た現在でも原理的には主流のアンモニア合成法である大変優れた方法である。しかし、この方法は高温・高圧を必要とするため、合成のためには大きなエネルギーを投入する必要がある。単純化すると、人口増加→食糧増産→窒素肥料の増産→エネルギーの大量消費という流れができる。つまり、人口増加はエネルギー消費によって支えられている、ということができる。



この数十年をピックアップしてみても、科学技術の進歩の速度は加速度を増していることが実感される。そして、科学技術の進歩は社会の形態も変えていった(インターネット以前とインターネット普及後の社会や私たちの生活形態の変化を思い出して欲しい)。果たしてこれほどのスピードの変化に人間は追従していけるのだろうか(メンタリティーとして数世紀前、いや十世紀以上前の文化に共感できるほどに変化していないのに)。こんな素朴な疑問も感じる。

私見ではあるが、人類はこれまでの歴史の中で、これほどまでに科学技術の知識を必要とする時代はなかったのではないかと思う。避けて通ることができない様々な諸問題について、決して個人個人が専門家レベルの知識を有する必要はないが、科学技術についてのある程度の素養(リテラシー)は必須であろう。また、科学技術の話に対して、頭から「難しい」と決め付け、顔を背ける風潮は改めていかないといけないと思う。



また、最近、日本において、大学での軍事研究についての議論がなされるようになった。この議論の中で必ず繰り返られるのは、科学技術の二重用途(dual-use technology)である。つまり、軍事目的で開発された技術が民生用に広く使われていることや、純粋に学術的な目的でなされた研究が軍事技術にも転用できるというものである。具体的にはどのようなものがあるであろうか。下記に例示をした。

## 科学技術の発達と人間社会との関係

### 軍사용か民生用か、悪用か善用か

#### 科学技術の二重用途 dual-use technology

- ① 原子力 (原爆⇔原子力発電)
  - ② インターネット (ARPANET⇔商用利用)
  - ③ 病原性ウイルスのゲノム配列 (医療・医薬品⇔生物兵器・テロ)
  - ④ ドローン (軍事利用⇔民生利用)
  - ⑤ ロボット (軍事利用⇔民生利用)
- etc.

原子力については、特に日本では広く知られるところであるが、現代の生活に欠くことのできないインターネットもそうである。インターネットは第2次世界大戦後の冷戦時代に軍事目的で開発された技術であるが、冷戦終結に伴って民生用に転用された好例である。

一方、純粋に学術的且つ人道的な目的でなされた病原性ウイルスのゲノム解読の研究成果も、テロリストがバイオテロの有益な情報として利用し、生物兵器の開発という軍事目的に利用される可能性も否定できない。そこで、ゲノム解読の結果を公表すべきかどうかということも、この dual-use の観点から議論された経緯があった。近年、ゲノム解読技術



が飛躍的に進歩し、さらに、ゲノム編集という新たな技術も実用的な段階となった。よりいっそう、議論の対象となっていくであろう。

### インターネット←ARPANET 由来(国防総省高等研究計画局)

ARPA: Advanced Research Projects Agency

冷戦下で進められた ARPANET の目的:

**核戦争時**においても国家情報機能の維持が可能なコンピュータネットワークの実現(fault tolerant であることが最重要)

核弾頭による攻撃:

1. 複数個の拠点の同時破壊
2. 放射能( $\alpha$ 線)によるコンピュータのソフトエラーの発生

冷戦の終結→ARPANET 用の技術の民間転用が必要  
(雇用確保・投資回収目的?)

→インターネットの商用利用開始(1993)

もう一つ挙げたいことは、科学に対してさほど信頼感がないというか、無力感を感じているようにも思われる風潮である。科学は必ず答えを出してくれるものと思っていたけれど、実はそうではなかったというような感覚かもしれない。日本では、2011年3月11日の大震災によって起こった東京電力の原子力発電所の事故を発端に顕在化してきたのではないだろうか。1972年に米国の Alvin Weinberg は「科学に問いかけることはできるが、科学では答えることのできない問題」に対して、トランス・サイエンスという表現を使った。

このようなことを是正するために各所でサイエンス・コミュニケーションといわれる活動がなされていたりもする。だが、自らの経験も踏まえれば、一般の人と科学技術の専門家とが真に対話できるまでにはまだまだ時間が必要であろうと感じている。

トランス・サイエンス(trans-science)  
「科学に問いかけることはできるが、科学では答えることのできない問題」(Questions which can be asked of science and yet which cannot be answered by science)  
1972年 ワインバーグ(米国)

原著論文 Weinberg, Alvin M. (1972). Science and Trans Science, *Minerva*, Vol. 10, pp. 209-222.  
<http://www.quantamike.ca/pdf/Weinberg-Minerva.pdf>

#### アルヴィン・ワイバーグ(Alvin Weinberg)

アメリカの核物理学者。オークリッジ研究所<sup>※</sup>所長。  
※オークリッジ研究所は1942年に原子爆弾開発のためのマンハッタン計画により設立され、プルトニウムの抽出の研究を担当した研究所である。その後、資源エネルギー庁傘下のアメリカ最大の科学研究所となり、原子力開発や核物理学の研究の中心の一つ。  
科学技術と社会に新たな関係が生まれていることを指摘。  
⇒「トランス・サイエンスの出現と拡大」

=====◆補足：トランス・サイエンスの三類型◆=====

小林傳司『トランス・サイエンス時代 ―科学技術と社会をつなぐ』(2007年,NTT出版)から引用して、トランス・サイエンスの三類型を挙げる。

- ①知識の不確実性、解答を得ることの現実的不可能性
- ②対象の性質による不確実性
- ③科学と価値

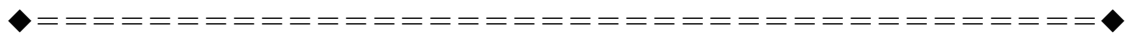
まず、①知識の不確実性、解答を得ることの現実的不可能性の例を2つ挙げる。第1の例として、低レベル放射線障害の生物学的影響が挙げられる：ハツカネズミの自然突然変異率の2倍の遺伝的突然変異を起こすのに必要な放射線量が30レントゲンであることがわかった。放射線の量と突然変異率が正比例するのであれば、150ミリレントゲンの放射線は突然変異率を0.5パーセント上昇させることになる。しかし実際に正比例しているかどうかは実験によって確かめるほかはない。そこで実験をしようとした場合、95パーセントの信頼度を持った結果を得るためには80億匹のハツカネズミが必要になるのである。これは事実上、実験が不可能である。このような範疇の事例として、微量物質の環境に対する影響や、遺伝子組み換え作物(GM作物)の人体への影響を挙げることができる。第2の例として、発生の可能性がきわめて低い事象の確率が挙げられる。具体的には、原子力発電所での事故の事例、巨大地震の発生確率などがこの範疇に該当する。このタイプの事例に対しては十分な時間と資金を投入すれば科学的に解答を出すことができるように見えるが、これは抽象的可能性であって、現実には不可能である。

次に、②対象の性質による不確実性(社会科学の不十分さ)とはどのようなものだろうか。物理科学では、天体のような巨視的な物体の場合には、初期条件と自然法則からその振る舞いをかなり正確に予測できる。微視的な世界でも原子や分子の動きは統計的にかなり正確にその振る舞いが予測できる。しかし社会現象になると、その予測能力は極端に低下する。個人の行動や社会集団の行動を物理科学と同じように予測することはまず不可能であ

る。これは、研究対象である人間に多様性と意識があるからである。

最後に、③科学と価値の例を2つ挙げる。1)純粋科学と応用科学のどちらを推進すべきか、2)調査研究と理論的体系化を目指す研究のどちらの価値が高いか。こうした事例は科学についての問題ではあるが、諸科学(あるいは研究手法)の価値を評価するという課題であり、「社会の中でどのような科学研究を優先的に進めるべきか」といった科学技術政策的な問題である。即ち、この類の課題の解決は科学を超越(トランス)している。「社会がどのような科学を求めているか」という価値の問題が浮き彫りにされ、科学的解決は不可能になる。

参考文献：小林傳司『トランス・サイエンス時代の科学技術と社会』(文部科学省，[http://www.mext.go.jp/b\\_menu/shingi/gijyutu/gijyutu18/siryu/\\_icsFiles/fieldfile/2012/05/07/1319626\\_09.pdf](http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu18/siryu/_icsFiles/fieldfile/2012/05/07/1319626_09.pdf))



同等な問題について、日本の池内了氏(宇宙物理学者)は、下記の3つの視点から言及している。

=====池内了氏の3つの視点=====

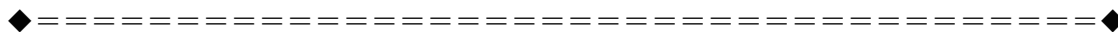
- ①技術の妥協点
- ②共有地の悲劇
- ③非倫理性を含む科学や技術

以下、池内了著『科学のこれまで、科学のこれから』(2014年)岩波ブックレットから引用する。まず、①技術の妥協点とはどのようなものだろうか。福島原発事故で専門家がしきりに使った「想定外」という言葉は、原発の設計に地震動の強さや津波の高さへの上限が「想定」されていて、それを超える事態となったのだから自分たちには責任がないとの言い訳であった。絶対に壊れない人工物は存在せず(建造することができず)、すべての人工物には安全基準が定められていて、それを満たせば合格となって世の中に流通させることができる。その安全基準は、材料の強度や耐用年数のような科学で測れる要素以外に、技術を現実生活に活かすため、その対策のための経費とか手間とかが余りに過大にならないというような条件を考慮する。このような技術の安全基準をどう決めるか(どう想定するか、どこで妥協するか、どのような条件とするか)はトランス・サイエンス問題の典型といえる。次に、②共有地の悲劇については以下のように説明されている。誰でもが使える共有地(より一般的には公共物)があると、羊飼いはなるべく多くの羊を飼おうとする。それが個人としての利益であり、合理的な選択でもある。しかし、われもわれもと羊飼いが多く集まり、かつより多くの羊を飼おうとすれば、たちまち共有地は荒れ果てて使い物にならなくなってしまいうだろう。これは個人が責めを負うのではなく、みんなの損失である。このような共有物に関わる悲劇は、個人が責めを負わないから罪の意識がなく、損失はみんなが被るから薄められ、なかなか解決しないことが多い。具体的な例として、1)海洋での漁獲(早い者勝ち)、2)温室効果ガスの放出(出しっ放し)、3)空中に漂う人工衛星の残骸(捨

てっ放し), 4)どこにも広がる環境ホルモン問題(化学物質の使いつ放し)などが挙げられる。「共有地の悲劇」に絡まる問題について科学ができることは、どこまで規制すれば悲劇を回避できるかの目安を示せるだけであって、具体的にどのような方策を採用すべきかについては科学は何も言えない。つまり、科学はその問題に対して重要な情報を与えるが、参照事項としてしか機能しない。③非倫理性を含む科学や技術について原発を例に説明する。原発は、(1) その大きな潜在的危険性から過疎地に押しつけていること、(2) ウランという放射性物質を扱うために、採掘・精錬・装填・定期検査・廃棄物処理・廃炉の全過程において携わる作業員に放射線被曝を押しつけていること、(3) 放射性廃棄物を10万年にわたって厳重管理を子孫に押しつけていること、(4) 事故が起これば立地する地域や人々、そして全世界に放射能汚染を押しつけること、という反倫理性を必然的に帯びている。いずれも、多数の人間や強い立場の人間が少数の人間や弱い立場の人間に「押しつける」という形をとっていることが反倫理性を如実に物語っている。そのような反倫理性を最初から帯びている科学なのだから、社会として採用するかどうかは科学以外の要素で決められるのは自明である。

以上が池内了氏の主張である。

これらの考え方に全て賛成するか、一部賛成かは私たち一人一人が考えるべきことであろうが、いずれにしても、科学・技術に携わる者も、社会における自らが携わる研究・開発の位置づけやどのような影響を与えるかということについて無関心でいてはいけない時代になったことを示しているのではないだろうか。また、職業として科学・技術に携わっていない者も、無関心であってはいけない時代であることも示しているのではないだろうか。



### ★試行的討論型授業

科学的な考え方、答えのない問題をどう考えるかということトレーニングする試みとして、科学的知見をもとに「水素燃料について」議論を試みた。水素燃料について調べるための基礎情報は予め前の回(第7回)に資料を配布しておき、第8回の授業では資料を基に調べた知識を有していることを前提とした。

議論のテーマ

①電気自動車か、燃料電池車(水素燃料)か？

②水素燃料に未来はあるだろうか？

①については、各自の考え方を述べてもらった(ウォーミングアップの意味)。

②については、対立構造での議論をするため、当日の着席位置で適当に「未来はある派」と「未来はない派」に分けた。そして、科学的知見をもとに、論理的に自分の派の主張や相手方への反論をしてもらった。

この試行の結果、①については、各自がそれぞれの見解を述べることができた。②については、「未来はある派」の学生の方が主張の展開に困難を感じていたようであった。「未来はある派」と「未来はない派」の立場を入れ替えてもこの傾向は同じであった。また、相手方の主張への反論については試みてくれる学生がいなかった。このような授業を展開するには、単に資料配布だけでなく、授業形態で事前に学習する機会を持つなどの準備が必要だと感じた。

付録「授業資料」  
(第 2 回～第 8 回に配布した資料)



大学での学びは、高校までとは違い、

- ・自分で責任を持ってやる  
生徒: 受け身で学んでもよかった  
学生: 自ら学ばなければ何も得られない
- ・理解して覚える  
高校までは「とりえず覚える」でもよかった  
(定期試験・受験の問題だけがターゲット)  
大学では「理解⇒覚える⇒適用」が重要  
(現実社会は応用問題ばかり)

学習と創造  
創造するために知識は必要ないか？

創造するってどういうことだろう？  
創造(creation)と想像(imagination)の違いは？  
最近めざましい進歩を遂げている人工知能(AI)を思い浮かべてみよう

創造とは、インプットとした多くの知識が連関し、  
結びついたときに生まれるのではないだろうか。  
つまり、知識のインプットは不可欠。

大学での学びは、教養及び専門的な知識の修得  
+ 科学的な思考の訓練

STEMとは何か？

一般的な意味 出典:『新英和大辞典(第6版)』  
(研究社)

名詞

1【植物】a 茎. b (木の)幹. c 葉柄, 花梗(かこう), (果物の)果柄, 軸; (菌の)柄. d (バナナの)果房(房(hand)が段状についた茎). 2a (種々の物の)茎状のもの. b (たばこパイプ・工具などの)柄. c (杯・ワイングラスなどの)脚. d (スプーン・錐(きり)などの)柄. e (寒暖計の)胴. f (錠前の中の)鍵のはまる円棒. g (機械の)案内桿(かん), 操作桿. h 羽軸. i【電子工学】(電球電子管などの)ステム. 3【言語】語幹(基体(base)と同形または基体に語幹形成母音や派生接辞の付いた形; 語の文法的屈折部に対し変化しない部分で通例辞書の見出し語に用いられるもの). 4 種族(race), 系統, 血統, 家系; 直系. 5【海軍】船首材, 艦首骨; 船首. 6《米俗》主要街路; (鉄道の)主要幹線。(以下略)

他動詞

1(葉・果物など)から茎[果柄]を取り去る. 2(造花など)に茎をつける. 3【電算】(検索語を)語幹処理する

stem cell: 幹細胞

今日の授業で使う“STEM”とは

Science, Technology, Engineering, Mathematics  
科学 技術 工学 数学

科学(science)

今日の授業では“自然科学”に限定

- ①学問的知識。学。
- ②自然や社会など世界の特定領域に関する法則的認識を目指す  
合理的知識の体系または探究の営み。

実験や観察に基づく経験的実証性と論理的推論に基づく体系的整合性を  
その特徴とする。

出展: ス・パ・大辞林(三省堂)

science

1. a branch of knowledge or study dealing with a body of facts or truths systematically arranged and showing the operation of general laws: *the mathematical sciences.*
2. systematic knowledge of the physical or material world gained through observation and experimentation.
3. any of the branches of natural or physical science.
4. systematized knowledge in general.
5. knowledge, as of facts or principles; knowledge gained by systematic study.

語源: [1300-50; ME < MF < L *scientia* knowledge]

出展: Random House Webster's

技術(technology)

- ①物事を巧みにしとげるわざ。技芸。
- ②自然に人為を加えて人間の生活に役立てるようになる手段。  
また、そのために開発された科学を実際に応用する手段。科学技術。  
出展: ス・パ・大辞林(三省堂)

technology

1. the branch of knowledge that deals with the creation and use of technical means and their interrelation with life, society, and the environment, drawing upon such subjects as industrial arts, engineering, applied science, and pure science.

2. the terminology of an art, science, etc.; technical nomenclature.

語源: [1605-15; < Gk *technologia* systematic treatment.]

出展: Random House Webster's

工学(engineering)

⇒基礎科学を工業生産に 응용して生産力を向上させるための  
応用的科学技術の総称。

古くは専ら兵器の製作および取扱いの方法を指す意味に用いたが、  
後に、土木工学を、

さらに現在では、物質・エネルギー・情報などにかかわる広い範囲を含む。

出典: 『広辞苑(第4版)』(岩波書店)

→科学知識を応用して、大規模に物品を生産するための方法を研究する学問。  
広義には、ある物を作り出したり、ある事を実現させたりするための方法・  
システムなどを研究する学問の総称。

出展: 『ス・パ・大辞林』(三省堂)

数学(mathematics)

①数量および空間に関して研究する学問。  
代数学・幾何学・解析学(微分学・積分学およびその他の諸分科)、  
ならびに、それらの応用などを含む。

②数についての学問。すなわち今の算術(arithmetic)。  
出典: 『広辞苑(第4版)』(岩波書店)

古くは数に関する学問。すなわち算術の意。

現在では数・量および空間に関して研究し、さらに抽象的な概念を扱う学問  
になっている。

出展: ス・パ・大辞林(三省堂)

(also treated as sing.) the abstract science of number, quantity, and space studied in its own right (pure mathematics), or as applied to other disciplines such as physics, engineering etc. (applied mathematics)

出典: Oxford Dictionary(COD)

### 科学と技術の関係

科学→技術を進歩させる  
 技術の進歩→科学の地平を切り開く=新たな知(科学)の発見  
 新たな分野の科学の創設  
 例:望遠鏡/顕微鏡  
 X線回折法  
 スーパーカミオカンデ(光電子増倍管, 建造物等)  
 高エネルギー加速器  
 etc.

科学と技術は相互に関係し合っている

Q: 医学は科学か技術か?

### 技術と工学は何が違うか?

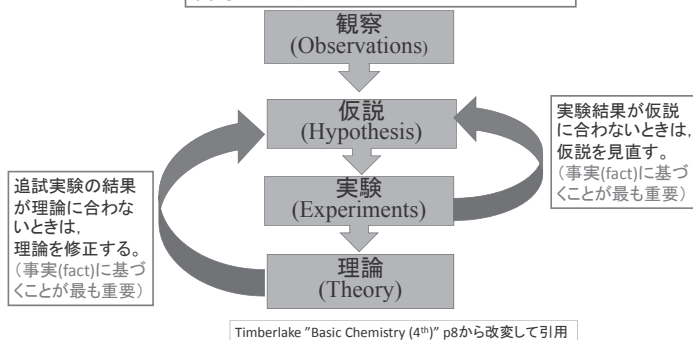
技術(technology)  
 自然に人為を加えて人間の生活に役立てるようになる手段。  
 また、そのために開発された科学を実際に応用する手段。⇒科学技術  
 出展: スパ-大辞林 (三省堂)

工学(engineering)  
 →科学知識を応用して、大規模に物品を生産するための方法を研究する学問。  
 広義には、ある物を作り出したり、ある事を実現させたりするための方法・システムなどを研究する学問の総称。 出展: スパ-大辞林 (三省堂)

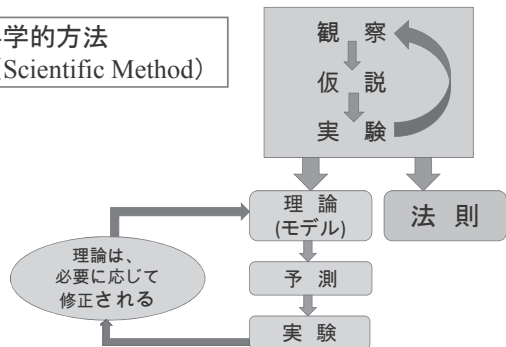


### 数学は科学(自然科学)とは、どのような点が違うか?

### 科学的方法 (Scientific Method)



### 科学的方法 (Scientific Method)



### 科学的であるための要件

- ① 事実(fact)に基づく  
 観察や測定によって得られた事実(データ)に基づくことが重要である。自分の都合のよいように作為的に作成(選択)したものや、想像や憶測を含んだものは事実ではない。  
 事実(fact)に基づく
- ② 再現性(reproducibility)及び検証可能性(verifiability)を有すること  
 本当にそうなのかを検証できることができ、同じ方法で行えば、誰がやっても必ず同様な結果が得られる再現性があることが必要である。従って、科学論文では、それを読んだだけで誰でも再現できるように記述しなくてはならない。  
 再現性がある (reproducibility)  
 検証可能性がある (verifiability)
- ③ 論理的(logical)であること  
 誰でも納得できるように論理的でなければならない。研究を進める段階の思考過程でも、記述をする際にも当てはまる。「結論」は「事実」に基づいて、論理的に導かれたものでなくてはならない。論理の飛躍は「独りよがり」であり、科学論文では、論理のステップを飛ばさずに丁寧に記述することが必要である。  
 論理的(logical)である

### 数学と科学(自然科学)との違い

	科学(自然科学)	数学
事実(fact)に基づく	Yes	公理/定理/定義に基づく
再現性がある (reproducibility)	Yes	Yes
検証可能性がある (verifiability)	Yes	Yes (証明することが、数学そのもの)
論理的(logical)である	Yes	Yes

→ 数学との比較で、(自然)科学の、最も特徴的なことは、「事実に基づく」ことである。

事実をどう得るか? (事実を得る方法)  
 ⇒ 実験/観察(観測)  
 ★ 得られた事実を「データ」という

信頼できるデータとは?  
 ⇒ 再現性のあるもの

このようなデータを得るためには、実験等で条件設定が重要  
 ⇒ 結果だけでなく、条件等も漏らさず記録する。

★ 決して、捏造や改ざんをしてはいけない。



世界各国で共通して研究不正行為と認めているもの ⇒FFP

- ・捏造(fabrication)  
存在しないデータ、研究結果等を作成すること。
- ・改ざん(falsification)  
研究資料・機器・過程を変更する操作を行い、データ、研究活動によって得られた結果等を真正でないものに加工すること。
- ・盗用(plagiarism)  
他の研究者のアイデア、分析・解析方法、データ、研究結果、論文又は用語を該当研究者の了解又は適切な表示なく流用すること。  
例えば、「コピー」

日本学術振興会  
「科学の健全な発展のためにー誠実な科学者の心得ー」

<https://www.jsps.go.jp/j-kousei/rinri.html>

研究不正を「科学的であるための要件」との関係で考えてみよう

- ①**事実(fact)**に基づく  
観察や測定によって得られたデータに基づくことが重要である。自分の都合のよいように作られたデータ、想像や憶測を含んだものは事実ではない。
- ②**再現性(reproducibility)及び検証可能性(verifiability)を有すること**  
本当にそうなのかを検証できる方法で行えば、誰がやっても必ず同様な結果が得られる必要がある。従って、科学論文では、それを読んだだけで誰でも再現できるように記述しなければならない。
- ③**論理的(logical)であること**  
誰でも納得できるように論理的でなければならない。研究を進める段階の思考過程でも、記述をする際にも当てはまる。「結論」は「事実」に基づいて、論理的に導かれたものでなくてはならない。論理の飛躍は「独りよがり」であり、科学論文では、論理のステップを飛ばさずに丁寧に記述することが必要である。

事実(fact)に基づく

再現性がある(reproducibility)

検証可能性がある(verifiability)

論理的(logical)である

盗用は？

覚えていますか？ STAP細胞事件(2014年)

STAP細胞事件は、「研究不正行為」の宝庫

その事件の中の一つ：  
小保方さんが早稲田大学に提出したとされる博士論文の序論の、ほとんどが米国の国立の研究所(NIH)のホームページが一般に公開している解説文のコピペだった。

コピーについて考えよう

レポートや論文でコピペが許されない理由は何か？

- ・法律（著作権法）違反という考え方  
オリジナルの著者を保護する趣旨が著作権  
⇒引用は引用と分かるようにルールに従って  
明記しなければならないことを無視している。  
※引用のルールは、ホームページの場合は  
「著作権について」などの項目で記されていることが多い。

自然科学系の論文の基本的な構成要素

(実験のレポートも原則的に同じ形式)

- (1) タイトル(Title)
- (2) 著者名(Author(s))と所属(Affiliation(s))、(著者の貢献(Contributions))
- (3) 要旨(Abstract)
- (4) 本文 (IMRD構造)  
序論(Introduction)  
方法(Method(s), M&M, Experiment, etc.)  
結果(Results)  
考察(Discussion)
- (5) 結論(Conclusion)
- (6) 引用文献(References)
- (7) 謝辞(Acknowledgments)

コピーについて考えよう

レポートや論文でコピペが許されない理由は何か？

さらに、勉強や研究に対する態度という点でも考えてみよう

- ・思考を放棄しているという考え方  
「序論」は特に、これまでに知られていることを勉強し、その内容を咀嚼し、自分の言葉で書かなければいけない。また、自分の研究目的と関連づけて書くことが要求される。つまり、「自ら考える」ということが必要不可欠である。⇒「自ら考える」という過程を無視（軽視）している。

インターネットの情報をそのままコピーすることのもう一つの問題

CNET JAPAN ITジャーナリスト高橋暁子 2015/12/05  
「インターネットはすべて正しい」--危険な10代の情報リテラシー-  
[http://japan.cnet.com/sp/smartphone\\_native/35074265/](http://japan.cnet.com/sp/smartphone_native/35074265/)  
から抜粋引用

「検索結果は真実」と考える子どもたち  
インターネットは何でも教えてくれるか？  
「クチコミは正しいから自分の感覚が間違っているはず」  
インターネットでは見つかからないこともある

あなたは、ネット情報の真正性(authenticity)をどう判断しますか？  
RADY SCIENCE Boollet\_3  
「高校生のための科学論文の書き方」p21-23を参照

参考文献の紹介

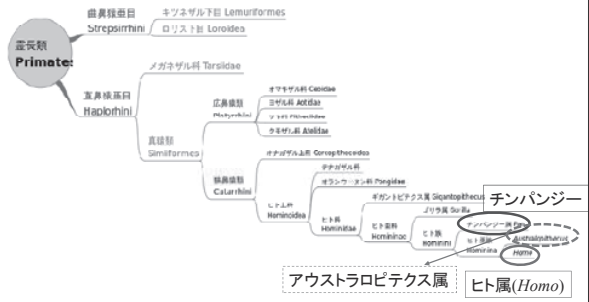
- ★木下是雄著『理科系の作文技術』(中公新書)  
何十年もの間高い評価を受けている良書。
- ★東京大学教養教育高度化機構初年次教育部門編『科学の技法』(東京大学出版会, 2017年発行)  
基礎編(p1-65), は今日の授業と趣旨
- ★RADY SCIENCE Boollet\_3, 寺内かえで著『高校生のための科学論文の書き方』  
理系女性教育開発共同機構のHP(<http://www.nara-wu.ac.jp/core/booklet/index.html>)から無料でダウンロードできる。  
書き方についての実用できなことだけでなく、ネット情報の真正性(authenticity)をどう判断するか(p21-23)など、類似書よりやや踏み込んだ記述もあるので、一度目を通してみることを勧める。

# ベーシック・サイエンス I

第3回 今日のテーマ  
 ・人類と技術の歴史  
 ・科学史におけるScientific Methodの位置づけ  
 ・現代社会と科学技術

第2回～第8回担当  
 寺内かえで  
 (理系女性教育開発共同機構・特任講師・博士(農学))

## 霊長類の樹形図



Wikipedia [人類の進化]から引用

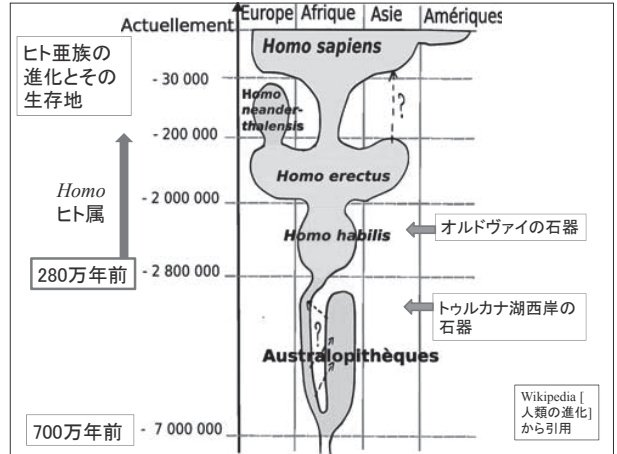
## 人類と技術の歴史

通説: 複雑な道具(石器など)の製作はヒト属(Homo)の出現により始まった

1930年代にタンザニアのオールドヴァイ峡谷で石器が発見された。(260万年前のものとして推定)→最古の石器

しかし、2010年に、ケニアのトウルカナ湖西岸で、330万年前のもの(ヒト属の登場以前)と推定される石器が発見された。

Nature ダイジェスト Vol. 12 No. 7 | doi (Digital Object Identifier): 10.1038/ndigest.2015.150114  
 原文: Nature (2015-04-23) | doi (Digital Object Identifier): 10.1038/520421a | Oldest stone tools raise questions about their creators (http://www.nature.com/doi/10.1038/520421a)



Wikipedia [人類の進化]から引用

動画: Monkeys can make stone tools too  
 引用元: nature video  
<https://www.youtube.com/watch?v=0jqJUF1nOs>

ヒトとサルの違いは、単に石器が作れることではなく、**製作した道具を、生活に役立てて利用する**

科学技術はいつから始まるか？

ヒト属(人類)の登場と共に始まった

## 技術の発達史

紀元前3000—600年

- ピラミッド
- 水道の発明、運河建設
- ガラスの製法発見(フェニキヤ商人)
- 織物製造における小さな改良
- 冶金術(製鉄の分野での進歩、貴金属の精錬法の改善)
- 貴金属→物々交換から貨幣へ

21世紀までの間に、人間の生活を大きく変えた技術を挙げてみよう

- 火の利用
- 蒸気機関の発明
- 原子力の発見と利用
- インターネットの発明と利用
- 未来→人工知能(AI)&ビッグ・データ

## 科学の始まり

一般的に、科学史はギリシャ文化(B.C.1500—B.C.300)から扱う

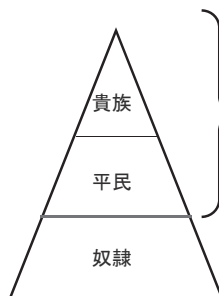
なぜここを起点にするのか？  
 Where When

Q: なぜ高度な技術の栄えた文明の地、エジプトではなかったのか？

自然科学的な思考(論理的思考)を育む条件が整っていたから

- エジプトは中央集権国家
- ギリシアは小都市国家(ポリス)
- ギリシアには裕福な市民層が存在

## ギリシアの市民社会の構造



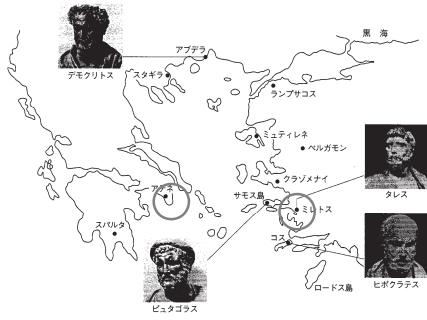
特徴:  
 奴隷を前提とした社会  
 市民間は比較的平等

市民は食べるための労働から解放される

経済的・時間的ゆとり

思索のゆとり

ギリシア時代  
イオニア期(B.C.7-) ミレトス(小アジア植民地)  
アテネ期(B.C.5-) ギリシア本土  
ヘレニズム期(B.C.4-) アレキサンドリア(エジプト)



ミレトス、アテネ、アレキサンドリアの位置関係



図表1-19 2世紀初めのローマ帝国の領土  
ギリシャ時代は、「数学」が顕著に発達した

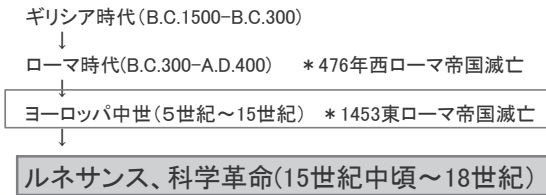
ギリシアの文化とローマの文化の比較

	ギリシア	ローマ
純粋科学への興味	自然の根元を問う	関心なし
国家の形態	小さな都市国家が多数ある	広大な領土の単一国家
市民の生活	時間のお金のある自由市民	領土拡張のための戦争に明け暮れる
市民の精神	進取の気性に富む	純粋科学に対するゆとりはない。戦争や領土拡大に関わる技術への関心が高い
建造物等	彫刻・神殿などの美術が発達	道路・水道などの土木技術が発達

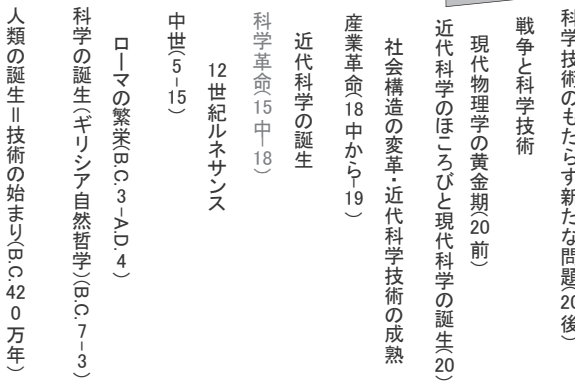


ローマ時代に作られた水道橋

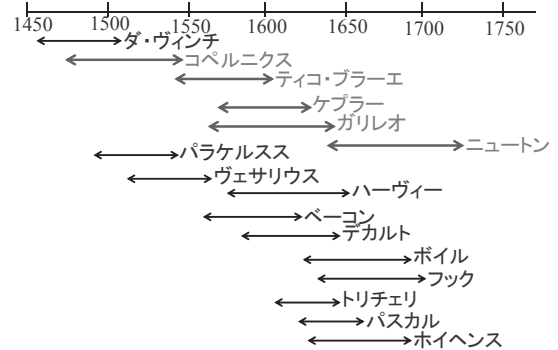
西洋社会の大雑把な流れ



科学史・技術史の概略



ルネサンス・科学革命の代表的人物の生存期間



ケプラーは何をしたのか？

ティコ・ブラーエの助手(1600-1601)  
ティコ・ブラーエ(1546-1601):  
⇒ 私財を投じて天文台 精密な観測  
ティコ・ブラーエの死後、ケプラーは観測結果を詳細に検討  
⇒ 惑星(火星)の運動の規則を発見  
ケプラーの第一法則(軌道が楕円であること)  
ケプラーの第二法則(面積速度一定の法則)

精密な観測 = 抜群の視力と観測機器の開発  
⇒ ティコ・ブラーエ  
緻密な解析(根気の要る手計算) ⇒ ケプラー

ケプラーの第三法則

(惑星の周期の2乗と、軌道の長径の3乗の比は全ての惑星について等しい)

現代の観測による実測値

惑星	周期T(年)	軌道長半径a(AU)	T <sup>2</sup> 乗/a <sup>3</sup> 乗
水星	0.24	0.39	0.971
金星	0.61	0.72	0.997
地球	1.00	1.00	1.000
火星	1.88	1.52	1.006

## ガリレオの見つけたこと

- ・第一法則  
真空中では全ての物質は同じ速度で落下  
重い物ほど速く、軽い物ほど遅く落下するへの反証  
(ピサの斜塔での実験)
- ・第二法則(落下の法則)  
物体の自由落下の距離が時間の2乗に比例する  
落下距離 = 比例定数 × (時間)<sup>2</sup>  
落下物体の速度は時間に比例  
落下速度 = 比例定数 × 時間  
※この2つは同じことを意味している  
(速度 = (距離の変化量) / (時間の変化量))
- ・慣性の法則の概念  
(ニュートンが完成させる)

## ガリレオの(思考)実験

- ・第一法則  
真空中では全ての物質は同じ速度で落下  
「重い物ほど速く、軽い物ほど遅く落下する」への反証



- ここがすごい
- ★落とす物体についての考慮  
(摩擦の影響に差がないもの)
  - ★当時はまだ真空が  
作れなかったが、  
理想化して結論を導いた

## ガリレオの斜面の実験



<http://blogs.bu.edu/ggarber/bua-py-25/galileo-aristotle-and-inertia/>

<http://www.physics.utah.edu/~cassiday/p1050/lec02.html>

## ガリレオの斜面の実験

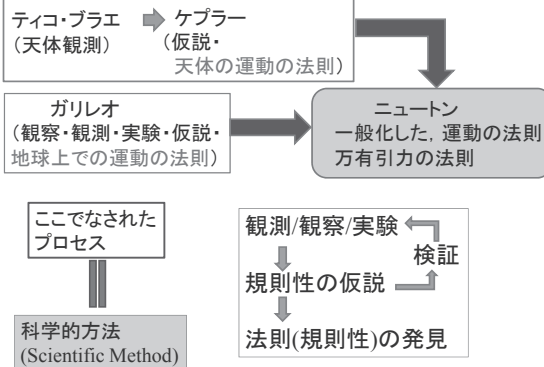
- ・第二法則(落下の法則)  
★物体の自由落下の距離が時間の2乗に比例する  
★落下物体の速度は時間に比例

ワイン樽



- ここがすごい
- ★距離と時間の精度を高くする  
(斜面を使う)
  - ★一定の時間を測る工夫  
(ワイン樽からの流量)

図5 ガリレオによる「斜面の実験」  
[G. ガセフ『物理学の探検』日知社、1992年より]



## 科学革命

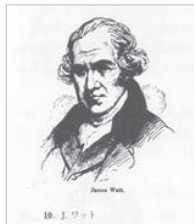
科学的方法  
(Scientific Method)  
の確立

ただし、  
物理学の中の、  
力学分野に限る

近代的な物理学の確立

## 産業革命(イギリスから始まり全世界へ)

ワットによる蒸気機関の発明から始まる



ジェームズ・ワット  
(1736-1811)

1769年に特許取得(最も重要な特許)

本格的な蒸気機関の普及: 特許切れの19世紀以降  
⇒ 石炭(化石燃料)の消費量が飛躍的に増加



Science Museum (London)

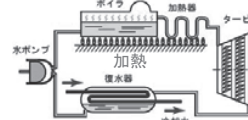
## 蒸気機関のしくみ

高校レベルの化学の復習

1769年: J. ワット 復水器を用いた往復動蒸気エンジン



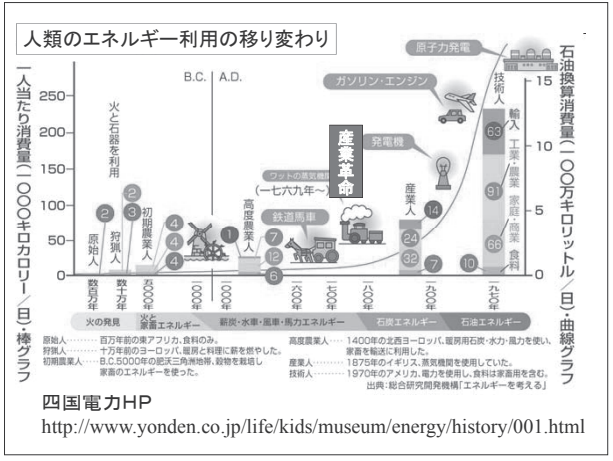
1883年: C. ラバール 蒸気タービン ⇒ 火力発電所などで利用



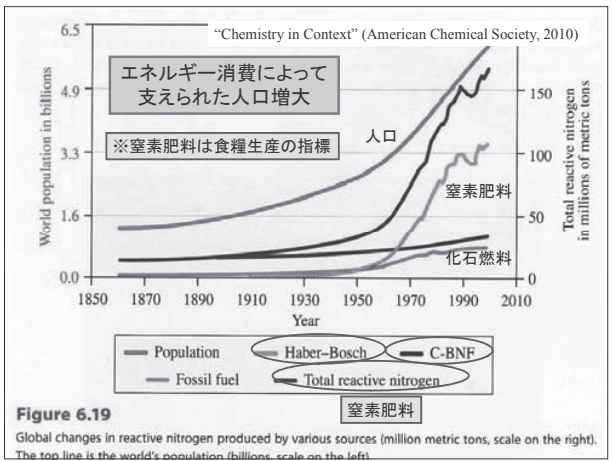
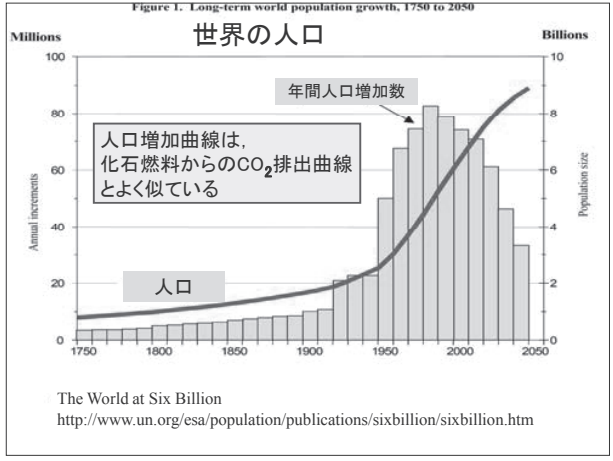
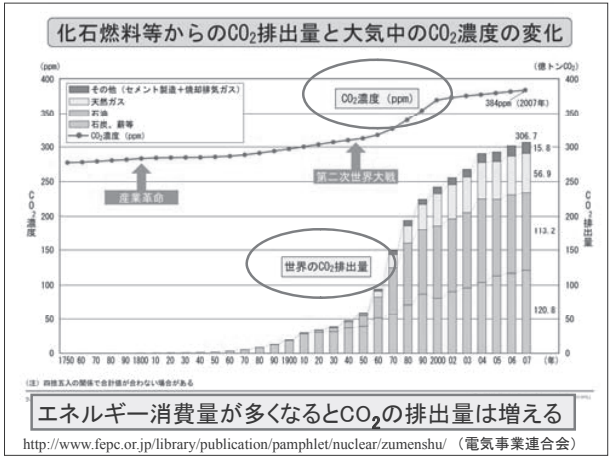
加熱は  
石炭・石油・天然ガス  
などの「化石燃料」の  
燃焼で出る熱を利用

(独) 会場技術安全研究所HPから  
[http://www.nmri.go.jp/eng/khiraata/stirling/engines/general\\_j.html](http://www.nmri.go.jp/eng/khiraata/stirling/engines/general_j.html)





産業革命  
近代化的な工業の誕生



次回(5月1日)の授業について

予習事項:  
①RADy SCIENCE Boollet\_6  
「エネルギー読本Ⅰ」第2章を読んでおく。  
②上記第2章の【例題】を解いてみる。  
③配布したプリントの問題を考えてみる。

★「エネルギー読本Ⅰ 基本編」を持参すること  
★5月24日の課題を提出すること

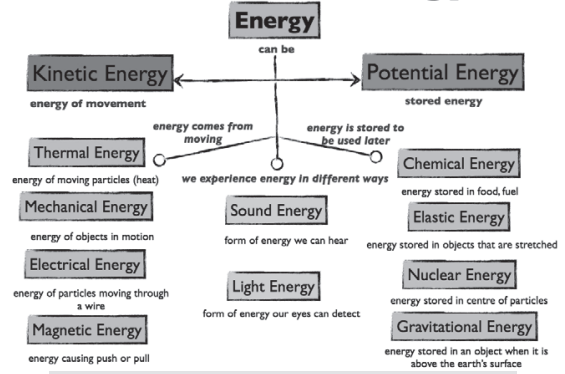
# ベーシック・サイエンス I

第4回 今日のテーマ エネルギーの科学-I

- ・エネルギーの形態
- ・異なる形態のエネルギー間の変換
- ・エネルギーの単位
- ・エネルギーを定量的に扱う

第2回～第8回担当  
寺内かえで  
(理系女性教育開発共同機構・特任講師・博士(農学))

# Forms of Energy



引用: <http://mskuksclass.weebly.com/lesson-2-forms-of-energy.html>

## 熱力学第一法則 エネルギー保存の法則

熱はエネルギーの一形態であり、  
孤立した系の全エネルギーの総和は一定である。  
(エネルギーは保存される)

- ★ 力学的エネルギー保存の法則の拡張  
(力学的エネルギー) = (位置エネルギー) + (運動エネルギー)  
熱を含むあらゆる形のエネルギーに対して成り立つ  
⇒ エネルギーは自然発生しない!  
エネルギーを作るには他のエネルギーを投入してやらなければならない!

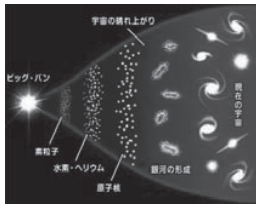
## 熱力学第二法則

いろいろな表現があるが、すべて同じ本質を示している

- ・高温の物質と低温の物質を接触させておくと、熱は、高温の物質から低温の物質に移動し、外部から何らかの操作を行わない限り、低温の物質から高温の物質に熱が戻ることはない
- ・一定の温度の物質から正の熱を奪ってこれをすべて外部に対する正の仕事に変換することはできない (第二種永久機関の実現は不可能)
- ・熱エネルギーを動力として利用するには温度差が必要である
- ・エネルギーや物質の出入りがない系においては、エントロピーは増大する (エントロピー: 系の乱雑さ・無秩序さ・不規則さの度合を表す量)  
⇒ 自然界の時間の流れを決める  
意味するところの深遠さのため、社会現象にも比喩的に使われる

## 熱力学第三法則 どんな物も絶対零度に達することはできない (絶対零度: 0K = -273°C)

もう少し物理っぽく、  
すべての完全結晶固体のエントロピーは、  
絶対零度においてゼロである



ビッグ・バンの名残  
宇宙背景放射 2.73K

液体ヘリウム 大気圧下4.3Kで沸騰、絶対零度でも液体

## どのようにして電気が利用できるようになったか?

・1750年頃 アメリカ ベンジャミン・フランクリン  
電気の研究(雷と風、避雷針の発明など)

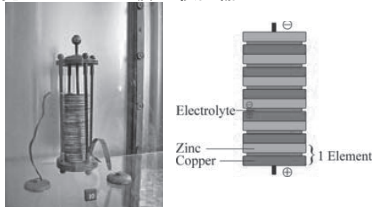
★ 電気を得る方法 ⇒ 物を擦ってできる静電気、雷  
便利かつ安定して得られない

・1780年代 イタリア ガルバーニ  
「動物電気」を偶然発見

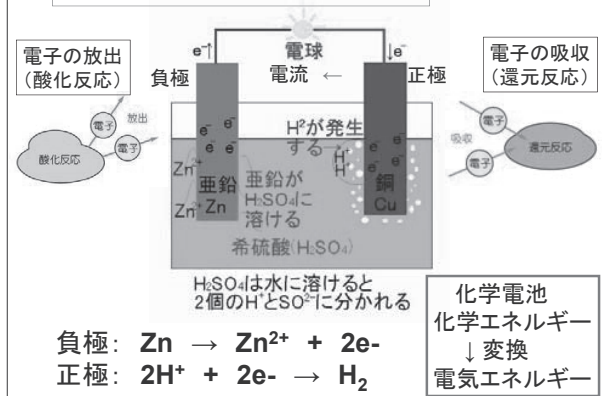
皮をはいだカエルの脚の神経にメスを触れながら放電→脚がピクリと動く  
↓  
雷でも同様の現象観察  
↓  
雷がなくても、脊髓に刺した真ちゅう釘を鉄欄に押さえつけても起こる  
↓  
2種類の異なる金属を接合した釘を神経や筋肉に触れると脚が動く  
↓  
カエルそのものから電気が発生すると考えた(動物電気)

★ ガルバーニ電池  
異種の電気伝導体の相が直列につながっていて、  
そのうち少なくとも1つがイオン伝導体の相であり、  
かつ両端の相が同じ化学的組成の電子伝導体  
(例: ダニエル電池、ボルタの電池など)

1800年 ボルタの電池(希硫酸+亜鉛+銅)の発明  
電気はカエルの脚から発生するのではなく2種類の金属  
から発生→カエルの脚は検出器



## 化学電池の原型 ボルタの電池



(化学)電池の発明の意義

電気が便利で、安定して利用できるようになった  
電気の実験が安定してできる

⇒ 電気科学の飛躍的發展をもたらした

ボルタの電池の功績をたたえて  
電圧の単位  
ボルト(V)

電力P(W)

$$P(W) = I(A) \cdot V(V)$$

(電力は電流と電圧の積)

★1ワット(W)の定義

1秒間に1Jの仕事をする仕事率

★電子(電気の根源)を主体にした定義

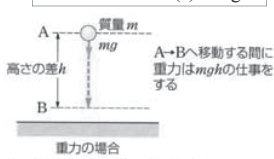
1A; 1秒間に1クーロン(C)の電荷量が流れる

1C; 電子 $6.241\ 510 \times 10^{18}$ 個分の電気量

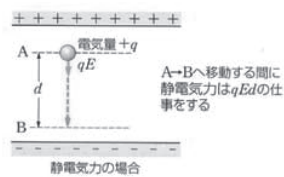
電子1個の電気量;  $1.6021917 \times 10^{-19}$  [C]

1W; 1秒当たり $6.241\ 510 \times 10^{18}$ 個の電子が流れる

重力  
位置エネルギー(J)=mgh



静電気力



▲図16 重力と静電気力のする仕事

静電気力による位置エネルギー  
(位置エネルギー: potential energy)

$$qEd (J) = q(V/d)d = qV$$

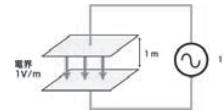
東京書籍「物理基礎」から引用

電界の強さE(V/m)  
 $E = V/d$

即ち、静電気力は、1Vの電位差を、1秒間に1Cの電荷量が移動する間に1Jの仕事をする

電界の単位「V/m」(ボルト/メートル);

平らな金属板を平行に1m離して置き、  
この間に1Vの電圧をかけたときに生じる電界の強さが1V/m



磁界の単位「G」(ガウス), 「T」(テスラ);

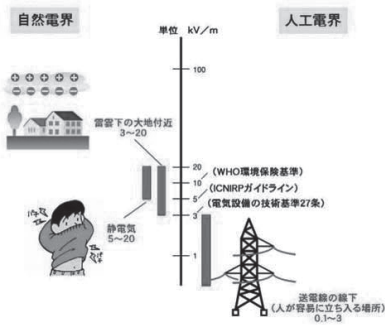
5アンペアの電流を流した電線から1m離れた場所での  
磁界の強さが、10mG(ミリガウス) = 1μT(マイクロテスラ)



ミリ; 1000分の1  
マイクロ; 1000000分の1 (100万分の1)

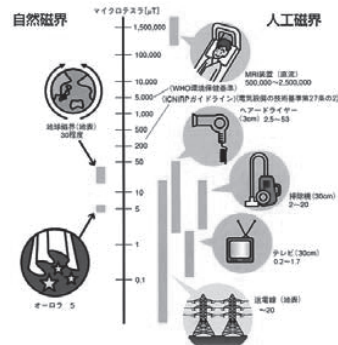
電気事業連合会HP  
中部電力HP

電界の強さ



北海道電力HPから

磁界の強さ



北海道電力HPから

1820年から約10年の間に、  
電気と磁気に関する多くの基本法則が発見された

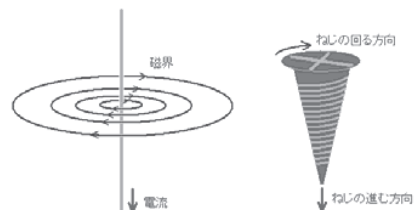
電気と磁気の相互作用に関するもの

- ・ビオーサバルの法則
- ・エルステッドの実験(発見) → アンペールの法則
- ・ファラデーの電磁誘導の法則
- ・レンツの法則
- ・フレミングの法則(左手、右手)
- ・右ねじの法則
- ・右手親指の法則 等

電流がつくる磁界

右ねじの法則(またはアンペールの右ねじの法則)

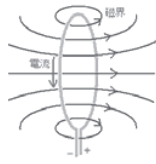
(1)直線電流



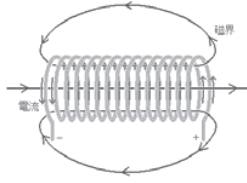
参考 <http://www.wakariyasui.sakura.ne.jp/1-2-0-0/1-2-1-2-dennryuugatukurujikai.html>

電流がつくる磁界  
右ねじの法則(またはアンペールの右ねじの法則)

(2) 円形電流



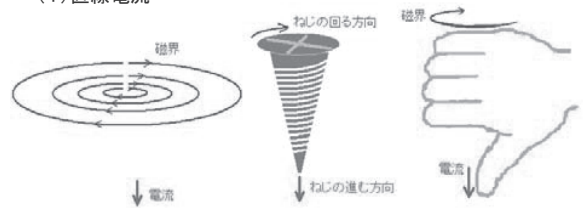
(3) ソレノイド(コイル)



参考 <http://www.wakariyasui.sakura.ne.jp/1-2-0-0/1-2-1-2denryuugaturukujikai.html>

「右ねじの法則」は「右手の法則」にも置き換えられる

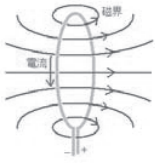
(1) 直線電流



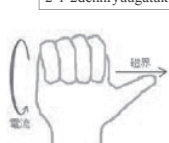
参考 <http://www.wakariyasui.sakura.ne.jp/1-2-0-0/1-2-1-2denryuugaturukujikai.html>

「右ねじの法則」は「右手の法則」にも置き換えられる

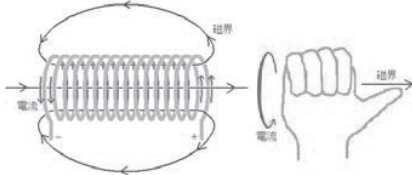
(2) 円形電流



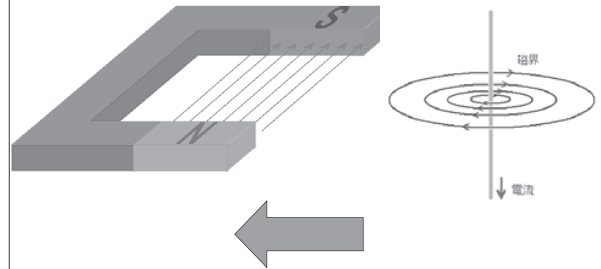
参考 <http://www.wakariyasui.sakura.ne.jp/1-2-0-0/1-2-1-2denryuugaturukujikai.html>



(3) ソレノイド(コイル)



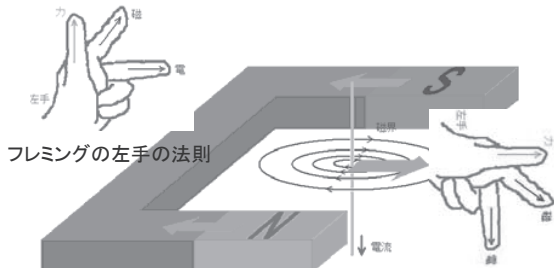
電流は磁界から力を受ける



右図のような直線電流を左図のような磁石の間におくと、どうなるか？

参考 <http://www.wakariyasui.sakura.ne.jp/1-2-0-0/1-2-2-1denryuugajikaikarukerutikara.html>

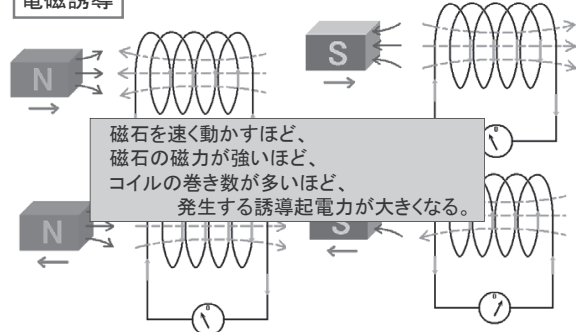
電流は磁界から力を受ける



磁石は左側へ、電流が流れる導線は右側へ動くとする

参考 <http://www.wakariyasui.sakura.ne.jp/1-2-0-0/1-2-2-1denryuugajikaikarukerutikara.html>

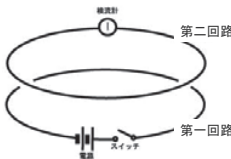
電磁誘導



コイルと磁石を近づけたり遠ざけたりすると、コイルに電流が流れる。  
コイルも磁石も動かさないと電流は流れない。  
コイル内の磁界が変化するときだけ、電流が流れる。

ファラデーの電磁誘導の法則

参考 <http://www.eml.hiroshima-u.ac.jp/gallery/Education/applet/setsumei.html>



1. 第一回路のスイッチを閉閉する瞬間のみ、第二回路に電流が流れる
2. スイッチを閉じるときと開くときで、検流計の振れが逆である
3. スイッチを閉じたままで、第一回路を遠ざけたり近づけたりすると第二回路に電流が流れる

電流の誘導は、閉回路内の磁界が時間的に変化することによって発生した起電力によるものである

式で表わすと

$$e = - \frac{d\Phi}{dt}$$

ある回路に電磁誘導によって誘起される起電力 $e$ は、その回路と鎖交する磁束数 $\Phi$ が時間的に変化する割合 $d\Phi/dt$ に等しい

このマイナス(-)の符号は、「磁束 $\Phi$ が変化する場合には、その変化を妨げる方向に電流を流そうとする起電力が誘起される」ということ(レンツの法則)

実験により個別に発見された法則の体系化  
1865年 マックスウェル方程式

$$\epsilon_0 \nabla \cdot E = \rho$$

電荷があると電場ができる(ガウスの法則)  
(電場(電界)の源は電荷である)

$$\nabla \cdot B = 0$$

磁気単極子は存在しない  
(磁場(磁界)には源がない)

$$\nabla \times E = - \frac{\partial B}{\partial t}$$

時間的に変化する磁場は電場に渦を作るが、それは磁束密度の時間変化を妨げる向きである  
(ファラデーの法則 + レンツの法則)

(磁場(磁界)の時間変化が電場を生む(電磁誘導))

$$\nabla \times B = \mu_0 \left\{ j + \frac{\partial}{\partial t} (\epsilon_0 E) \right\}$$

時間的に変化する電場は、電流と同様に磁場に渦を作る  
(アンペールの法則を一般化したもの)  
(電流、電場の変化(変位電流)が磁場を生む)



### マックスウェルの予言したもの

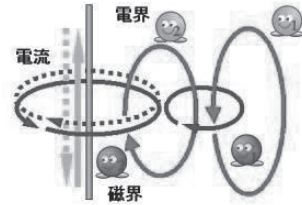
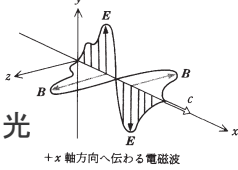
前掲の4つの式から、**数学的操作**によって、以下の二つの**波動方程式**を導いた

$$\begin{cases} \Delta E = \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \\ \Delta B = \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 B}{\partial t^2} \end{cases}$$

電場と磁場はそれぞれ波動であってそれぞれ同一の速度で進む  $c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}$

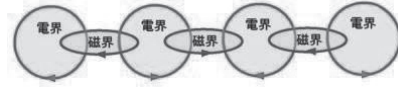
この速度  $c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}$  は、当時測定されていた光速に等しい(←フィゾーの実験)

- ⇒ 光は、電場と磁場が互いに関連しながら伝播する波である
- ・ EとBとは互いに直交する(横波) ⇒ **偏光**

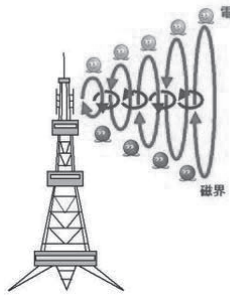


磁界(電流)の向きが変わる時、とりに電界の環ができます。

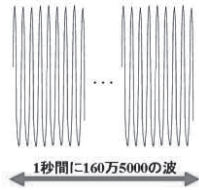
電流の向きが変わるタイミングで磁界の向きも変わって、反対まわりの電界が生まれる。これを繰り返していくと、



### 電界と磁界の相互作用の連鎖が電波(電磁波)



磁界と電界の環(=電波)がどのくらいの速さで作られるかを表したのが『周波数』。1秒間に磁界と電界の環がどのくらい作られるかをHz(ヘルツ)という単位で表す。例えば周波数が1605kHzのAMラジオは、波の絵で表現すると、



### 次回(5月8日)の授業について

予習事項:

- ①RADy SCIENCE Boollet\_6 「エネルギー読本I」第3章を読んでおく。
- ②上記第2章の【例題】を解いてみる。
- ③配布したプリントの問題を考えてみる。

★「エネルギー読本I -基本編-」を持参すること

5月1日の課題はありません

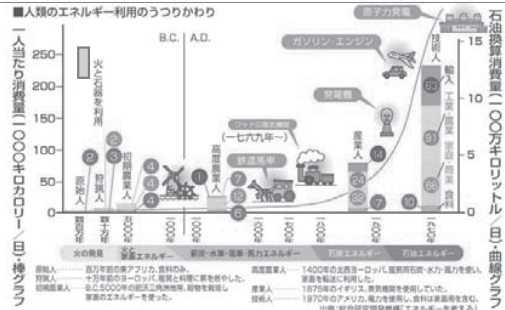
### BASIC SCIENCE I\_5

今日のテーマ:化石燃料エネルギーとその利用

- ・化石燃料
- ・化石燃料の用途
- ・火力発電のしくみ
- ・エネルギー効率(熱効率)

奈良女子大学・理系女性教育開発共同機構  
特任講師 寺内かえで (博士(農学))

### ワットによる蒸気機関⇒産業革命(蒸気機関は火力発電所の生みの親)



四国電力HP  
<http://www.yonden.co.jp/life/kids/museum/energy/history/001.html>

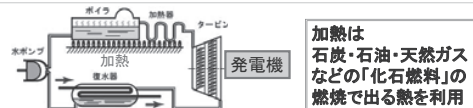
### 蒸気機関と火力発電の仕組みの比較

boollet『エネルギー読本1』p13

1769年:J.ワット ボイストンの動きを動力として利用



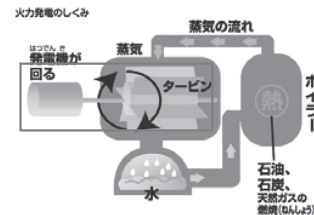
1883年:C.ラバール 蒸気タービンの回転を発電機で電気エネルギーに変換



(独)海上技術安全研究所HPから  
[http://www.mmri.go.jp/eng/khirata/stirling/engines/general\\_j.html](http://www.mmri.go.jp/eng/khirata/stirling/engines/general_j.html)

### 化石燃料のエネルギー・原子力エネルギー・自然エネルギー発電の原理は同じ

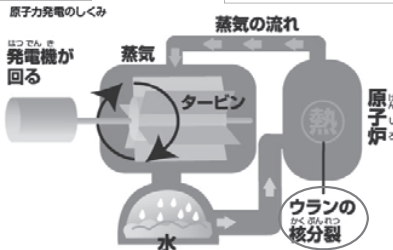
- 石油
- 石炭
- 天然ガス(LNG)
- 原子力
- 水力
- 地熱
- 風力
- 波力



⇒タービン ⇒発電機 ⇒電気エネルギー  
(力学的エネルギー→電気エネルギー)

プラスα  
原子力発電の仕組み

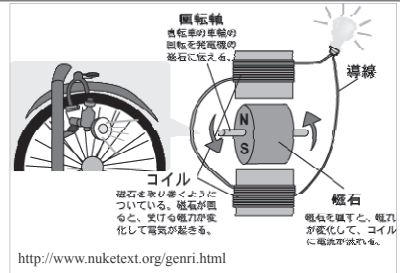
火力発電との違い  
⇒熱の発生させかた



原子力:核分裂反応における質量欠損  $E=mc^2$

関西電力HP  
[http://www1.kepcoco.jp/pr/elcity/econenergy/dictionary/50on/dictionary\\_ka.html](http://www1.kepcoco.jp/pr/elcity/econenergy/dictionary/50on/dictionary_ka.html)

タービン発電機の原理としくみ(電磁誘導という現象を利用)



<http://www.nuketext.org/genri.html>

参考:「東芝タービン発電機のしくみ」から引用  
発電機の原理は、磁極を持つ回転子を回して、ファラデーの法則により固定子の電機子導体に交流電圧を誘導させるものである。その起電力(発生電圧)の方向は、フレミングの右手の法則により求められる。

私たちが利用できるエネルギー源には  
どんなものがあるか?

石油  
石炭  
天然ガス(LNG)

太陽光  
熱  
光

化学電池  
(マンガン、アルカリ、  
リチウム、ニッケル、鉛、etc.)

原子力  
水力  
地熱  
風力  
波力  
潮汐力

燃料電池

バイオエタノール  
バイオマス

赤色、オレンジ色は全て「化学エネルギー」  
赤色 ⇒ 燃焼エネルギー(化学結合)  
オレンジ色 ⇒ 化学ポテンシャル

化石燃料の起源

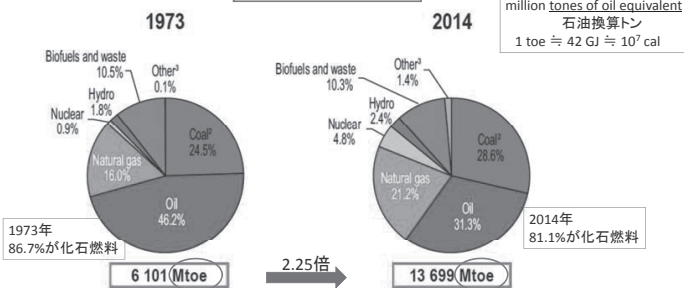
石炭  
3億6000万年以上前の古生代の石炭紀に  
生息していた植物の遺骸などが地中に埋没し、  
炭化したもの

石油  
プランクトンなどが地下で高圧によって変化したもの

天然ガス  
地中に埋もれた有機物がバクテリアによって  
分解されて生まれた

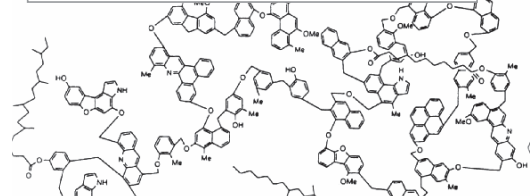
化石燃料は、太古の生物の残骸の蓄積  
⇒再生産することのできない有限性の資源

世界の1次燃料供給



1. World includes international aviation and international marine bunkers.  
2. In these graphs: 出展:IEA Key World Energy Statistics 2016 (p6)  
3. <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2016.pdf>

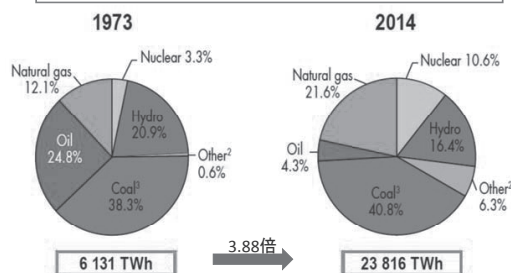
石炭の平均分子構造モデル 資源環境技術総合研究所HP  
<http://www.nire.go.jp/public/news-2001/2001-03-2.htm>



石炭が燃焼するとSOx(硫酸酸化物)やNOx(窒素酸化物)、ばいじん(すすや燃えカス)が発生する

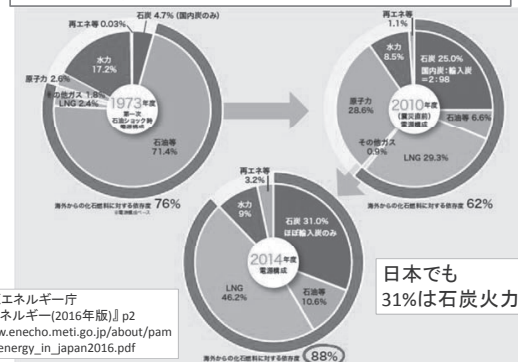
排煙脱硫装置が必須  
日本の技術力はトップレベル

世界の発電燃料 ⇒41% (2014年)は石炭火力発電



1. Excludes electricity generation from pumped storage.  
出展:IEA Key World Energy Statistics 2016 (p24)  
<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2016.pdf>

日本の電源構成(発電のためのエネルギー源)の推移



出展:資源エネルギー庁『日本のエネルギー(2016年版)』p2  
[http://www.enecho.meti.go.jp/about/pamphlet/pdf/energy\\_in\\_japan2016.pdf](http://www.enecho.meti.go.jp/about/pamphlet/pdf/energy_in_japan2016.pdf)

石油にはどういった元素が含まれるか？

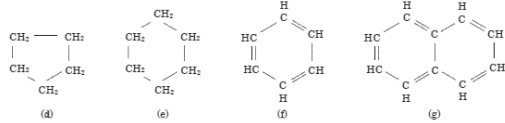
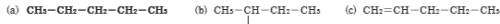
炭素:83~87%、水素:11~14%

硫黄:5%以下、窒素:0.4%以下

酸素:0.5%以下、金属:0.5%以下

→ 大気汚染物質

炭化水素 ガソリン:炭素数4~10個



JX日鉱日石エネルギーHP 「石油便覧」から  
<http://www.noe.jx-group.co.jp/binran/part04/chapter01/section01.html#anc02>

炭化水素の一般的な性質

- ・水に溶けない
- ・エーテル等の有機溶媒によく解ける
- ・燃焼により二酸化炭素と水を生じる

名称	分子式	沸点(°C)	融点(°C)	常温、常圧での状態
メタン	$\text{CH}_4$	-161	-183	gas
エタン	$\text{C}_2\text{H}_6$	-89	-184	gas
プロパン	$\text{C}_3\text{H}_8$	-42	-187	gas
ブタン	$\text{C}_4\text{H}_{10}$	-0.5	-138	gas
ペンタン	$\text{C}_5\text{H}_{12}$	36	-130	liquid
ヘキサン	$\text{C}_6\text{H}_{14}$	69	-95	liquid
ヘキサデカン	$\text{C}_{16}\text{H}_{34}$		18	liquid
ヘプタデカン	$\text{C}_{17}\text{H}_{36}$		22	solid
オクタデカン	$\text{C}_{18}\text{H}_{38}$		28	solid

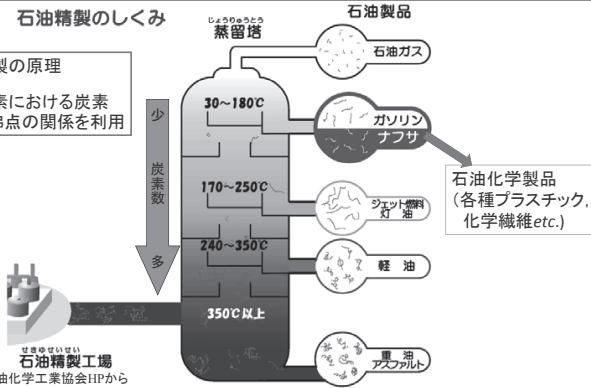
炭素数が多いほど(分子量が大きいほど)沸点や融点が高くなる

炭素数が多いほど、二重結合が多いほど、不完全燃焼によるススがやすい

石油精製のしくみ

原油精製の原理

炭化水素における炭素の数と沸点の関係を利用



天然ガスとは

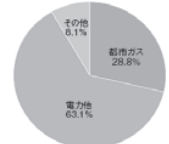
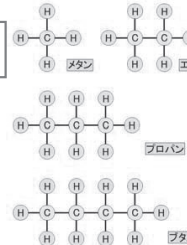
石油の副産物、ガス油田

主成分:メタン

他の成分:エタン、プロパン、ブタンなど

都市ガスは天然ガスを用いている

“アルカン”の混合物



資料:資源エネルギー庁「エネルギー白書2016」

出展:東京ガスHP「日本のエネルギーの使い方方を調べよう」  
[http://www.tokyo-gas.co.jp/kids/genzai/g4\\_2.html](http://www.tokyo-gas.co.jp/kids/genzai/g4_2.html)

新たな天然ガス資源→これも化石燃料

★今まで、油田又は天然ガス田から採取している

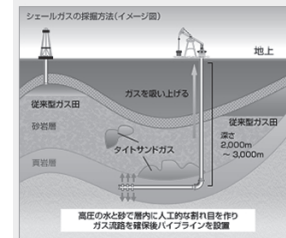
☆新たな天然ガス資源

シェール層 → シェールガス (既に商業化、日本は輸入国)  
 深海 → メタンハイドレート

得られるガスが、“メタン”であることは従来と同じ  
 ⇒二酸化炭素を発生  
 ⇒環境問題解決の救世主ではない

シェールガス →頁岩層に埋蔵されている天然ガス

■ シェールガスとは



三菱商事HPから

<http://www.mitsubishicorp.com/jp/ja/mclibrary/evolving/vol01/page4.html>

メタンハイドレート⇒燃える氷

天然ガスの主成分であるメタンを、カゴ状の水分子が取り囲んだ物質で、低温高圧の海底下や凍土下に存在する

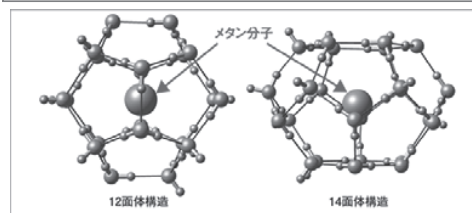
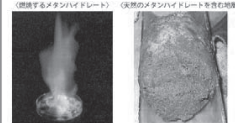


図1 メタンハイドレートのかご状構造 (青い球は酸素原子、オレンジ色の球は水素原子を示す。12面体構造と14面体構造が組み合わさって結晶が作られる。)

出展: [http://www.hpci-office.jp/pages/k-san\\_cu13](http://www.hpci-office.jp/pages/k-san_cu13)

メタンハイドレートは日本近海にも分布する  
 しかし、実用化にはまだ課題が多い

最新のBSR分布図(2009年)

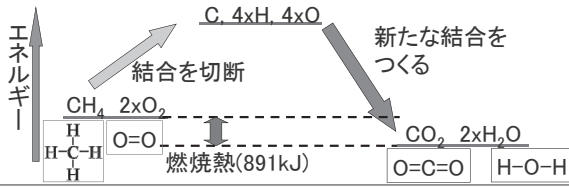
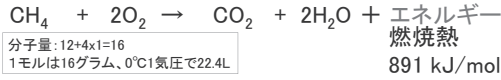


(出典)メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム(2009)

総務省:平成25年版情報通信白書から  
<http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h25/html/nc122210.html>

燃焼により生じるエネルギーを定量的に表わす(燃焼熱)

メタン1molを燃焼させる

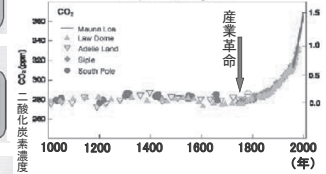


もっと長い時間スケールで見てみる

1750年ごろ始まった産業革命以降、人間は化石燃料を大量に燃やして使用した。

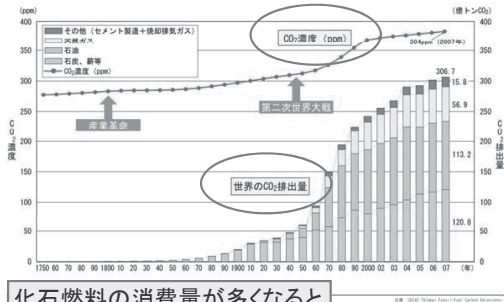
このため、人間活動による二酸化炭素の排出量が急増し...

大気中の二酸化炭素濃度が増加した。



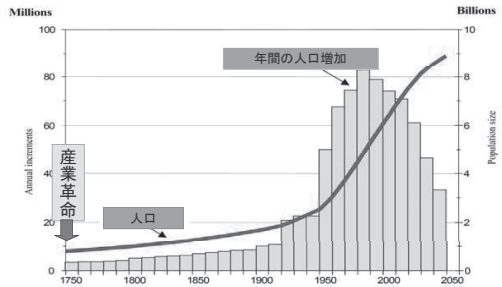
環境省地球環境局 地球温暖化の影響・適応・情報資料集から

化石燃料等からのCO<sub>2</sub>排出量と大気中のCO<sub>2</sub>濃度の変化



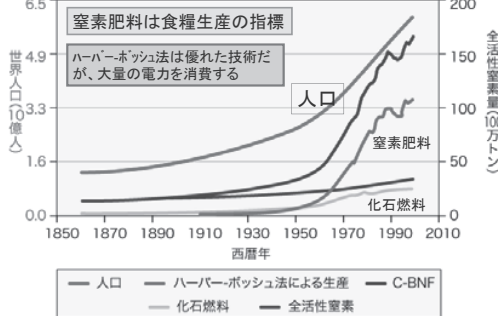
化石燃料の消費量が多くなると二酸化炭素の排出量は増える menshu (電気事業連合会)

産業革命以降、世界の人口は加速度的に増えている



The World at Six Billion <http://www.un.org/esa/population/publications/sixbillion/sixbillion.htm>

エネルギー消費によって支えられた人口増加



「実感する化学」(NTS発行) 図6.23 原著: "Chemistry in Context" (American Chemical Society, 2010)

産業革命 ⇒ 鉄鋼業 ⇒ 熱力学 ⇒ 統計力学 ⇒ 前期量子論

この、流れ(関係)については、参考文献として配布した、「教養としての科学 -Newton力学/量子力学「技術」との関連について」及び、『エネルギー読本』1章 § 1.4「産業革命の世界への波及」(pp.14-15)を参照

熱とは何か？

熱とは、分子(或いは原子)の持つ運動エネルギー

感覚的な理解

金属は熱すると柔らかくなる(原子の動きが活発になる)  
暖めると気体は膨張する(分子が活発に動き回る)

温度とは何か？

温度とは、分子(或いは原子)の運動エネルギーを測定したもの

$$\text{運動エネルギー} = 1/2 \times \text{質量} \times (\text{速度})^2$$

窒素分子の速度の分布状態

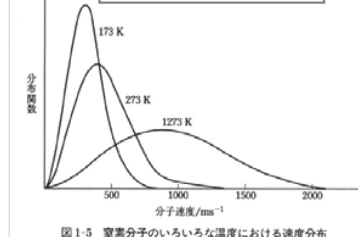


図 1-5 窒素分子のいろいろな温度における速度分布

分子の運動の速度は、広がりを持つが(速度分布)、低い温度では、速度分布のピーク速度は小さく、高い温度では、速度分布のピーク速度は大きい。

図の引用元 <http://www.campus.ouj.ac.jp/~hamada/TextLib/rm/chap1/Text/Cr990104.html>



**問題**  
この部屋の中で酸素(分子量32)と二酸化炭素(分子量44)のどちらが速く飛び回っているか？

**答え** 酸素  
★温度が同じなら、軽い分子は、重い分子よりも(平均して)速い速度で動く

絶対温度(単位:ケルビン)  
 $E = 2 \times 10^{-23} T_k$   
 摂氏(°C)は生活感覚の単位  
 ケルビン(K)は物理的定義の単位  
 分子1個あたりの平均の運動エネルギー  
 (単位:エルグ)  $1 \text{ erg} = 10^{-7} \text{ J}$

$\text{運動エネルギー} = 1/2 \times \text{質量} \times (\text{速度})^2$

理想気体の状態方程式  
 $pV = nRT$

p: 気体の圧力  
 v: 気体の体積  
 n: モル数  
 R: 気体定数  
 T: 絶対温度

分子1個あたりの平均の運動エネルギー  
 $E = 2 \times 10^{-23} T_k$

上の式を見比べてみよう  
 ・気体の圧力は絶対温度に比例する  
 ・分子の運動エネルギーは絶対温度に比例する

⇒ 気体の圧力は分子の運動エネルギーが本質

**熱力学の法則**

- 第0法則 互いに接するものは同じ温度になる
- 第一法則 エネルギーは保存される
- 第二法則 熱の移動は不可逆変化であって、高温の物質から低温の物質へと移動し、低温から高温へ移動することはない
- 第三法則 絶対零度に達することは不可能

**第0法則 熱平衡の法則**

物体 A と物体 B が熱平衡にあるとき、同時に物体 B と物体 C が熱平衡にあるならば、物体 A と物体 C も熱平衡にある。

もっと砕いて言うと、  
 接するもの同士は同じ温度になろうとする  
 例: 冷蔵庫に入れたジュースは・・・  
 温かい湯につかると体の表面は・・・

**熱力学第一法則 エネルギー保存の法則**

熱はエネルギーの一形態であり、孤立した系の全エネルギーの総和は一定である。(エネルギーは保存される)

★ 力学的エネルギー保存の法則の拡張  
 (力学的エネルギー) = (位置エネルギー) + (運動エネルギー)

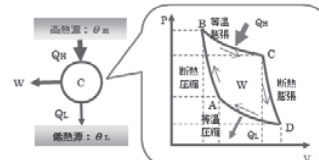
熱を含むあらゆる形のエネルギーに対して成り立つ  
 ⇒ エネルギーは自然発生しない!  
 エネルギーを作るには他のエネルギーを投入してやらなければならない!

**第二法則 自然界の重要な法則**

いろいろな表現があるが、すべて同じ本質を示している

- ・高温の物質と低温の物質を接触させておくと、熱は、高温の物質から低温の物質に移動し、外部から何らかの操作を行わない限り、低温の物質から高温の物質に熱が戻ることはない
- ・一定の温度の物質から正の熱を奪ってこれをすべて外部に対する正の仕事に変換することはできない(第二種永久機関の実現は不可能)
- ・熱エネルギーを動力として利用するには温度差が必要である
- ・エネルギーや物質の出入りがない系においては、エントロピーは増大する(エントロピー: 系の乱雑さ・無秩序さ・不規則さの度合を表す量)  
 ⇒ 自然界の時間の流れを決める  
 意味するところの深遠さのため、社会現象にも比喩的に使われる

**熱効率とカルノーサイクル 熱エネルギーを使って動力を得る**



カルノーサイクル

- ① 高熱源から熱エネルギー  $Q_H$  を吸収する
- ② 熱エネルギーの一部を仕事  $W$  に変換する
- ③ 熱エネルギーの残り  $Q_L$  を低熱源に変換する

熱機関の熱効率は、理論的に、100%にはなり得ない

仕事  $W = Q_H - Q_L$   
 $\text{熱効率 } \eta = \frac{\text{外部にした仕事}}{\text{与えた熱}} = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H}$

カルノーサイクルから導かれる関係を使って式を少し変形

$\text{熱効率 } \eta = \frac{\text{外部にした仕事}}{\text{与えた熱}} = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} = \frac{T_H - T_L}{T_H}$

温度差がなければ、エネルギーは得られない  
 熱機関の効率は温度差が本質

上の式を少し変形してみる

$\text{熱効率 } \eta = \frac{T_H - T_L}{T_H} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$

高熱源の温度( $T_H$ )が高い方が熱効率がよい

**熱効率を計算してみる**

低温熱源(排熱先)を300K(=27°C)とする

高温熱源の温度	熱効率
100°Cの水蒸気 (=373K)	0.195
300°Cの水蒸気 (=573K)	0.476

発展的考察:  
 地熱発電では、どのくらいの熱効率になるか考えてみよう

現在の技術では、東京電力が有する「改良型コンバインドサイクル火力発電所」では、538°Cの水蒸気タービン+1300°Cのガスタービンが用いられているが、この発電所の発電効率は49%とされている。  
[http://web.archive.org/web/2005111100320/http://www.tepco.co.jp/custom/LapLea/rn/ency/fir01\\_02-j.html](http://web.archive.org/web/2005111100320/http://www.tepco.co.jp/custom/LapLea/rn/ency/fir01_02-j.html)

# ベーシック・サイエンス I

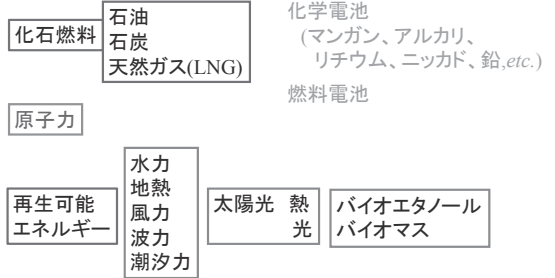
第6回 今日のテーマ 再生可能エネルギー

- ・太陽光・太陽熱・風力・波力・潮流力・地熱・その他
- ・原理・メリット/デメリット
- ・利用の現状

「再生可能エネルギー」についての定義等

第2回～第8回担当  
寺内かえで  
(理系女性教育開発共同機構・特任講師・博士(農学))

私たちが利用できるエネルギー源には  
どんなものがあるか？



## 非化石エネルギー源(エネルギー供給構造高度化法)

電気、熱又は燃料製品のエネルギー源として利用することができるもののうち、化石燃料(政令第3条)以外のもの

## 再生可能エネルギー源(エネルギー供給構造高度化法)

- 太陽光、風力その他の非化石エネルギー源のうち、エネルギー源として継続的に利用することができるもの(法律第2条第2号イ)
- 利用有効性があると認められるもの(法律第5条第1項第2号イ)

大規模水力、地熱(フラッシュ方式)、空気熱、地中熱 (政令第4条)

## 新エネルギー源

- <新エネルギー利用等(新エネルギー)>
- 非化石エネルギー利用等のうち、
  - 経済性の面における制約から普及が十分でないものであって、
  - その促進を図ることが非化石エネルギーの導入を図るため特に必要ないと認定されるもの(政令第5条)
- これらが「新エネルギー」として以下が想定される。

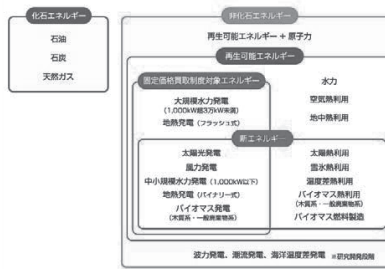
太陽光、風力、中小水力、地熱(バイナリー方式)、太陽熱、水素熱源とする熱、蓄氷熱、バイオマス(燃料製造・発電・熱利用)

海洋温度差  
波力  
潮流(海流)  
潮力

(新エネルギー法第4条)

経済産業省・資源エネルギー庁HP「なっとく再生可能エネルギー」から引用  
[http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving\\_and\\_new/saiea/renewable/outline/](http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiea/renewable/outline/)

再生可能エネルギー: 絶えず資源が補充されて枯渇することのないエネルギー  
新エネルギー: 再生可能エネルギーのうち、技術的に実用段階だが、経済的理由から普及が十分進んでいないエネルギー



「新エネルギー」  
太陽光発電や風力発電など、オイルショックなどによる石油等の価格高騰や地球温暖化防止を背景に、『非化石エネルギー』のうち、技術的には実用段階であるが経済的理由から普及が十分に進んでおらず、利用促進を図るべきエネルギー源(新エネルギー利用等の促進に関する特別措置法)として分類されるもの。  
新エネルギーは再生可能エネルギーの中に含まれる位置づけ。

関西電力HP「新エネルギーとは」から引用  
[http://www.kepco.co.jp/energy\\_supply/energy/newenergy/about/index.html](http://www.kepco.co.jp/energy_supply/energy/newenergy/about/index.html)

化石燃料  
エネルギー

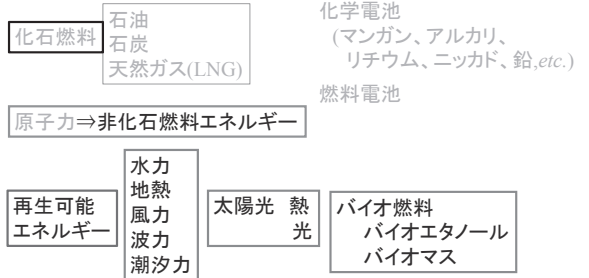
非化石燃料エネルギー

再生可能エネルギー

新エネルギー

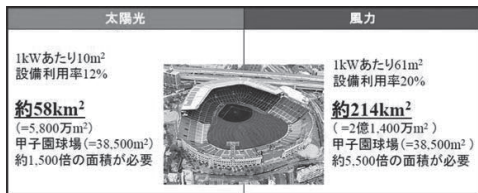
「新エネルギー」開発の発端  
オイルショック(1970年代)  
地球温暖化防止(21世紀)

私たちが利用できるエネルギー源には  
どんなものがあるか？



## 再生可能エネルギーの課題

課題1. エネルギー密度が低いため、大きな設備を必要とします



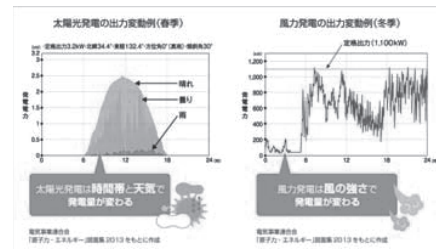
【参考】[50万kW級の火力発電所1基と同等の電力量を得るために必要な面積]  
※火力発電所50万kW級1基=1,433km<sup>2</sup>、設備利用率90%で試算  
太陽光: 約533km<sup>2</sup> (甲子園球場の約800倍) 風力: 約121km<sup>2</sup> (甲子園球場の約3,100倍)

出典: 低炭素電力供給システム研究会資料(2008)を基に当社試算

関西電力HPから引用  
[http://www.kepco.co.jp/energy\\_shttp://www.kepco.co.jp/energy\\_supply/energy/newenergy/about/task.html](http://www.kepco.co.jp/energy_shttp://www.kepco.co.jp/energy_supply/energy/newenergy/about/task.html)  
[http://www.kepco.co.jp/energy\\_supply/energy/newenergy/about/index.html](http://www.kepco.co.jp/energy_supply/energy/newenergy/about/index.html)

## 再生可能エネルギーの課題

課題2. 天候など自然状況に左右され不安定であり、需要に合わせて発電できません

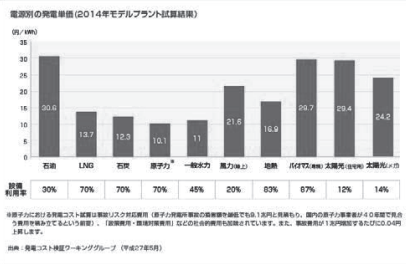


関西電力HP「再生可能エネルギーの課題」から引用  
[http://www.kepco.co.jp/energy\\_shttp://www.kepco.co.jp/energy\\_supply/energy/newenergy/about/task.html](http://www.kepco.co.jp/energy_shttp://www.kepco.co.jp/energy_supply/energy/newenergy/about/task.html)



### 再生可能エネルギーの課題

#### 課題3. 発電コストが比較的割高になります



関西電力HP「再生可能エネルギーの課題」から引用  
[http://www.kepcoco.jp/energy\\_shttp://www.kepcoco.jp/energy\\_supply/energy/newenergy/about/task.html](http://www.kepcoco.jp/energy_shttp://www.kepcoco.jp/energy_supply/energy/newenergy/about/task.html)

### 再生可能エネルギーの課題

課題1. エネルギー密度が低いため、大きな設備を必要とします

課題2. 天候など自然状況に左右され不安定であり、需要に合わせて発電できません

課題3. 発電コストが比較的割高になります

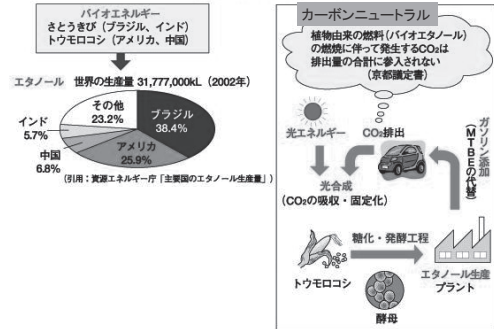
自然の性質から考えて、本質的なものは？

課題解決のためにどういう方策が考えられるか？

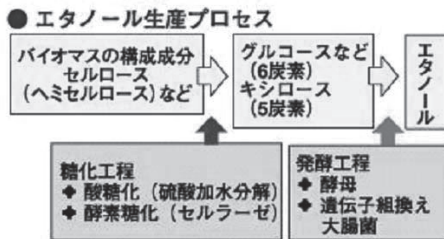
### バイオ燃料 バイオマス・バイオエタノール

バイオマスとは？  
 バイオエタノールとは？  
 ⇒ トウモロコシや小麦の価格高騰との関係は？  
 ⇒ セルロース分解酵素を組み込んだ「スーパー酵母」  
 カーボンニュートラルとは？

図2 バイオエタノール



### バイオエタノール 微生物によるエタノールの生成



### バイオエタノールと トウモロコシや小麦などの穀物の価格高騰？

普通の酵母はセルロースから直接エタノールを生産しない  
 → 酸による化学処理またはセルロースを分解する酵素  
 (セルラーゼ) による処理によりブドウ糖に分解  
 → 酵母による発酵(お酒の製造と一緒に)

「スーパー酵母」の開発  
 月桂冠総合研究所HP  
<http://www.gekkekikan.co.jp/RD/bio/bio01.html>  
 セルラーゼを作る遺伝子を、遺伝子工学技術により  
 普通の酵母に組み込んだもの。(研究段階)

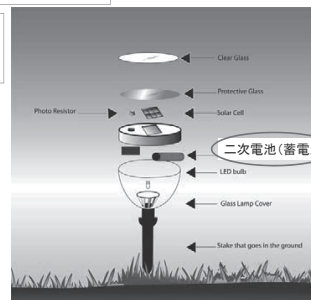
穀物(デンプン)を使おうとすると、食糧と競合して価格が高騰。  
 茎や葉など食糧にはならない部分(セルロース部分)を  
 利用しなければバイオエタノールの意義は低い。

### エタノールは水とも油とも溶け合う



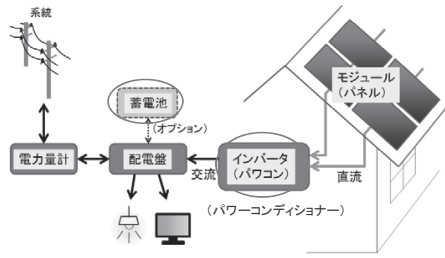
### 太陽光発電とシリコン太陽電池の科学

明かりはよる必要だが、  
 太陽は夜は出ていない。  
 どういう工夫が必要か？



Wikipedia 太陽光発電  
<https://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%A4%AA%E9%99%BD%E5%85%89%E7%99%BA%E9%9B%BB>

住宅用太陽光発電設備(系統連系型)の構成例



Wikipedia 太陽光発電  
<https://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%B9%E7%99%BA%E9%9B%BB>

蓄電システム



繰り返し充電して、家庭内の電気機器に電気を供給するシステム

蓄電システムを貯水槽に例える



パナソニック  
<https://sumai.panasonic.jp/chikuden/about/>

パワーコンディショナー

直流(太陽電池モジュールからの出力電流)  
 ↓変換  
 交流(送電線を流れている電流)

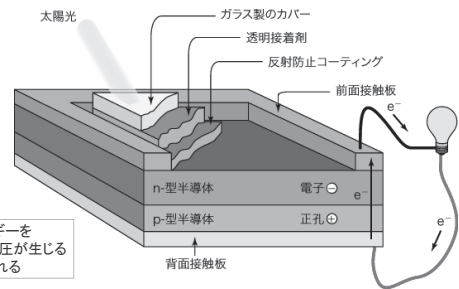


パワーコンディショナーの電力変換効率? 例: パナソニック製では96%

パナソニック  
<https://sumai.panasonic.jp/solar/construction.html>

太陽電池の原理(1/2)

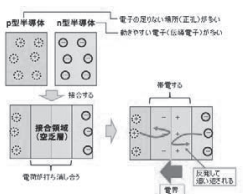
太陽電池は、薄いn型とp型の半導体を積み重ねた構造をしている



光のエネルギーを吸収して、電圧が生じる  
 ⇒電流が流れる

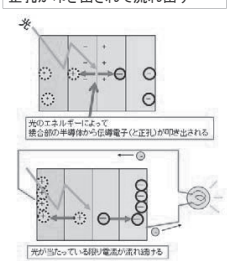
太陽電池の原理(2/2)

n型とp型の半導体を重ねると、接合部に空乏層と電界が出来て安定する



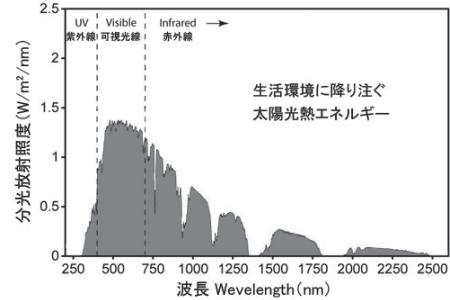
産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター  
[https://unit.aist.go.jp/rcpv/c/about\\_pv/principle/principle\\_3.html](https://unit.aist.go.jp/rcpv/c/about_pv/principle/principle_3.html)

空乏層に光が入射すると、電子と正孔が叩き出されて流れ出す



$$\text{変換効率} = \frac{\text{出力電気エネルギー}}{\text{入射する太陽光エネルギー}} \times 100(\%)$$

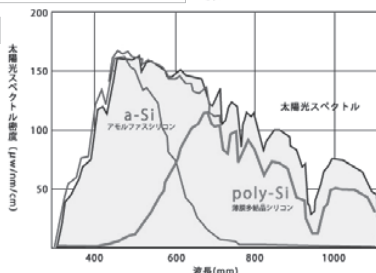
太陽光放射線スペクトル



<http://www.maruyosangyo.jp/etc/74>

シリコン太陽電池で利用する光の波長域

主に可視光域

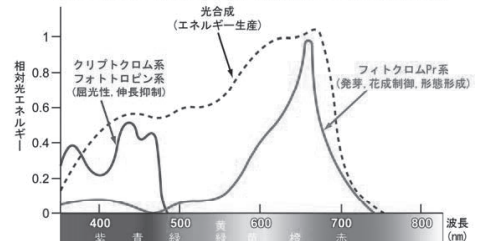


太陽電池の材料シリコン Si  
 ※有機太陽電池も開発されている。

黄色は代表的な太陽光スペクトル。アモルファスシリコン及び薄膜多結晶シリコンで示した部分は、太陽光スペクトル中で各太陽電池が光電変化する感度帯域を表している

<http://www.nedo.go.jp/hyoukaku/articles/200809kaneka/index.html>

植物の光要求スペクトル(チャンパー作物20種の平均 K. J. McCree 1972)



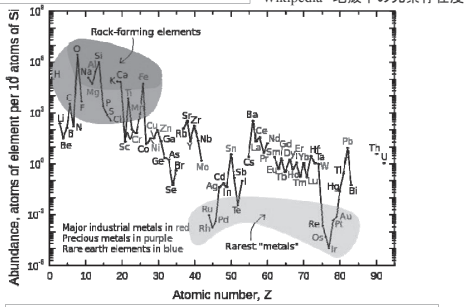
参考:『エネルギー読本』, pp-76  
 一つ前のスライドと共に、3~6行目の内容に対応

Living Farm LED



<http://www.living-farm.com/category/1757926.html>

地殻における元素の存在度



地殻での最も稀な元素(黄色)は最も重いものではなく、むしろゴールドシュミット分類でいう親鉄元素である。

クラーク数(地殻における元素存在度)

順位	元素	存在度 (%)	順位	元素	存在度 (%)
1	O	49.5	16	N	0.03
2	Si	25.8	17	F	0.03
3	Al	7.56	18	Rb	0.03
4	Fe	4.7	19	Ba	0.023
5	Ca	3.39	20	Sr	0.02
6	Na	2.63	21	Cr	0.02
7	K	2.4	22	V	0.015
8	Mg	1.93	23	Ni	0.001
9	H	0.83	24	Zn	0.008
10	Ti	0.46	25	Cu	0.007
11	Cl	0.19	26	Li	0.006
12	Mn	0.09	27	Co	0.004
13	P	0.08	28	Sn	0.004
14	C	0.08	29	Pb	0.0015
15	S	0.06	30	Mo	0.0013

微量元素

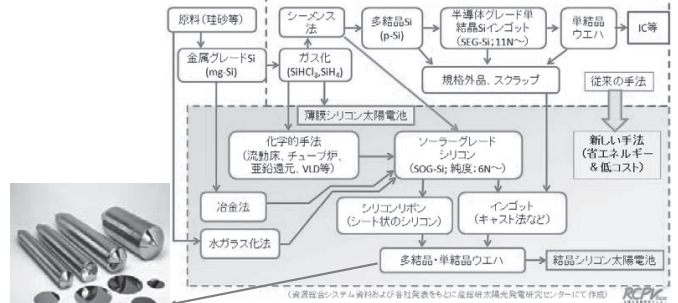
クラーク数第2位 ケイ素(Si)

シリコン半導体 ケイ素(Si)が主体

ケイ素の酸化物:水晶(SiO<sub>2</sub>), 石英光ファイバー



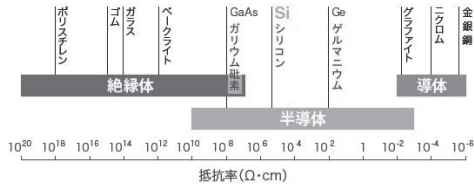
シリコンの精製工程



シリコンの単結晶インゴットとウェハ

産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター  
[https://unit.aist.go.jp/rcpv/ci/about\\_pv/types/c-si.html#fig3](https://unit.aist.go.jp/rcpv/ci/about_pv/types/c-si.html#fig3)

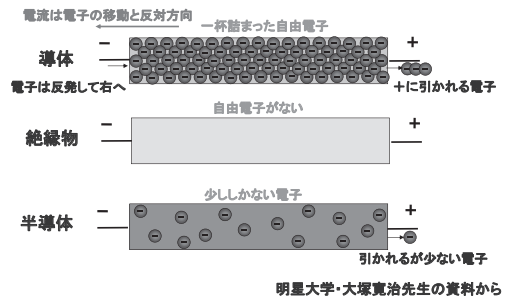
半導体とは何か



絶縁体: 電気が流れない  
 半導体: 中間の性質  
 導体(金属など): 電気が流れる

エルピーダHP  
<http://www.elpida.com/ja/ir/glossary.html#flashmemory>

電流の流れを「電子」で理解する

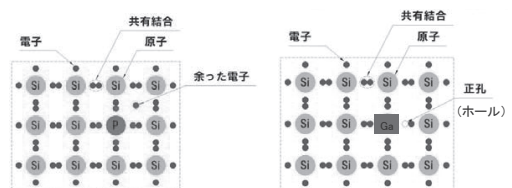


明星大学・大塚寛治先生の資料から

半導体となる元素を周期表で確認する

シリコンSi、ゲルマニウムGeは炭素Cと同属元素  
 ⇒ 価電子は4つ

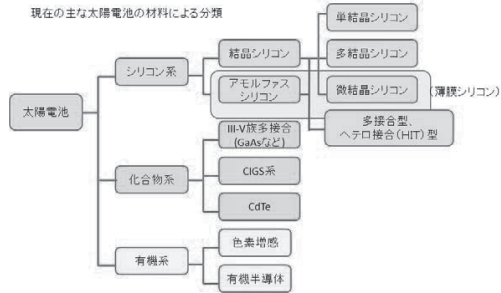
n型Siとp型Siの仕組み  
 (Siは14族元素 元素周期表参照)



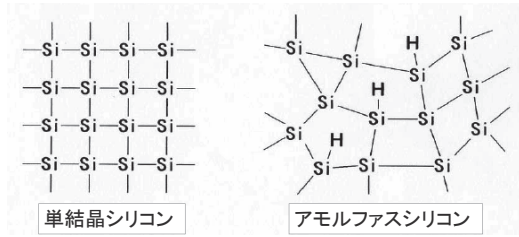
N型シリコン(Si)  
 リン(P)は15族元素  
 Siより最外殻電子が  
 一つ多い

P型シリコン(Si)  
 ガリウム(Ga)は13族元素  
 Siより最外殻電子が  
 一つ少ない

### 太陽電池のおおまかな分類

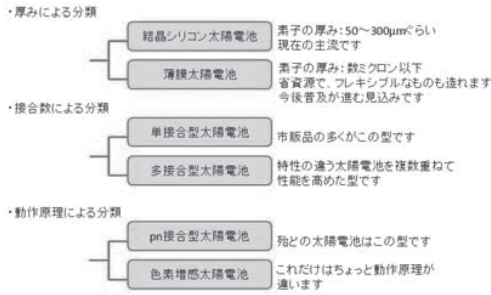


産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター  
[https://unit.aist.go.jp/rcpv/ci/about\\_pv/types/groups.html](https://unit.aist.go.jp/rcpv/ci/about_pv/types/groups.html)



出所:京セラソーラーエネルギー事業部編  
 『太陽エネルギーの挑戦』53頁(清文社1994)

### 太陽電池の他の分類方法



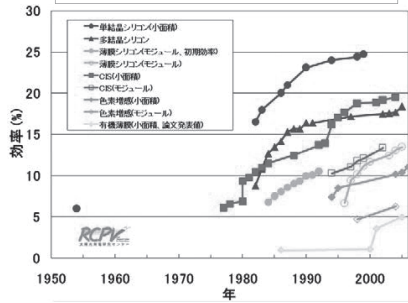
産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター  
[https://unit.aist.go.jp/rcpv/ci/about\\_pv/types/groups.html](https://unit.aist.go.jp/rcpv/ci/about_pv/types/groups.html)

### 各種太陽電池のおおまかな特徴

	変換効率	省資源性	フレキシブル化	価格低下余地
単結晶シリコン	◎	△	×	△
多結晶シリコン	○	△~○	×	○
薄膜シリコン	△	◎	◎	◎
HIT	◎	○	×	○
CIGS	○	◎	◎	◎
CdTe	△	◎	○	◎
色素増感	△	◎	△	◎
有機半導体	△	◎	◎	◎
III-V族多接合	◎◎	△	△	△

産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター  
[https://unit.aist.go.jp/rcpv/ci/about\\_pv/types/groups.html](https://unit.aist.go.jp/rcpv/ci/about_pv/types/groups.html)

各種の太陽電池の変換効率向上の歩み  
 (世界記録の推移、民生向け非集光型のみ)



産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター  
[https://unit.aist.go.jp/rcpv/ci/about\\_pv/types/groups.html](https://unit.aist.go.jp/rcpv/ci/about_pv/types/groups.html)

### EPT/EPRの定義(1/2)

**エネルギーペイバックタイム(Energy Payback Time, EPT):**  
 ライフサイクル中に投入されるのと同じだけのエネルギーを、発電によって節約できるまでに必要な稼働期間を表します。これが短いほど優秀です。

**エネルギー収支比(Energy Payback Ratio, EPR):**  
 ライフサイクル中に投入されるエネルギーに対する、発電によって節約できるエネルギーの倍率を表します。これが大きいほど優秀です。

概要は下記のように表されます。  
 Ein: ライフサイクル中に必要になるエネルギー  
 eav: 単位期間中の発電量で節約できたエネルギー投入量  
 Eav: ライフサイクル中の発電量で節約できたエネルギー投入量  
 Lifetime: 想定寿命(稼働期間)

$$EPT = Ein / eav$$

$$EPR = Eav / Ein = eav \cdot Lifetime / Ein = Lifetime / EPT$$

産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター  
[https://unit.aist.go.jp/rcpv/ci/about\\_pv/supplement/Supplement\\_EPT.html](https://unit.aist.go.jp/rcpv/ci/about_pv/supplement/Supplement_EPT.html)

### EPT/EPRの定義(2/2)

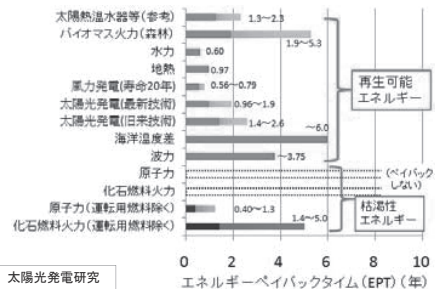
エネルギー源としては、  
 EPTが寿命(Lifetime)より十分小さいこと、  
 EPRが1より十分大きいことが求められます。  
 再生可能エネルギーの多くは、この条件を満たします。

太陽光発電の場合、ライフサイクル中の投入エネルギーには、下記のようなものが含まれます。

- ・設備の生産に用いる材料(シリコン・ガラス・金属・プラスチックなど)の原料採掘・精製・運搬
- ・設備の製造・設置
- ・保守用部品の製造・運搬
- ・使用後処理(解体・廃棄・リサイクルなど)

産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター  
[https://unit.aist.go.jp/rcpv/ci/about\\_pv/supplement/Supplement\\_EPT.html](https://unit.aist.go.jp/rcpv/ci/about_pv/supplement/Supplement_EPT.html)

### 各種エネルギー源のエネルギーペイバックタイム(EPT)の比較

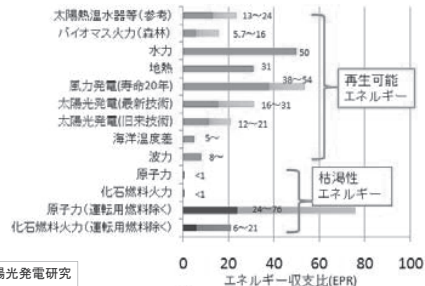


産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター  
[https://unit.aist.go.jp/rcpv/ci/about\\_pv/e\\_source/RE-energypayback.html](https://unit.aist.go.jp/rcpv/ci/about_pv/e_source/RE-energypayback.html)

※資料: AIST RCPV, 2008  
 ・全て日本国内での見積り。出典は別項。  
 ・風力は設計寿命の20年、概は30年。  
 ・電力と海洋温度差のデータは古く、これよりも向上が予想される。



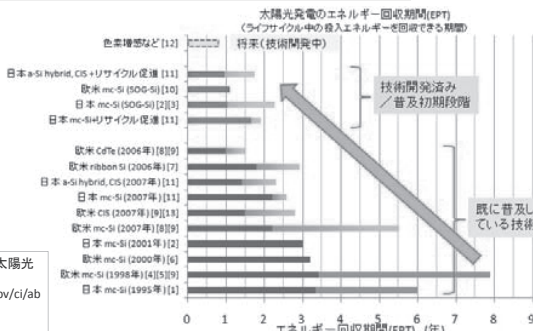
各種エネルギー源のエネルギー収支比(EPR)の比較



産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター  
[https://unit.aist.go.jp/rcpv/ci/about\\_pv/e\\_source/RE-energypayback.html](https://unit.aist.go.jp/rcpv/ci/about_pv/e_source/RE-energypayback.html)

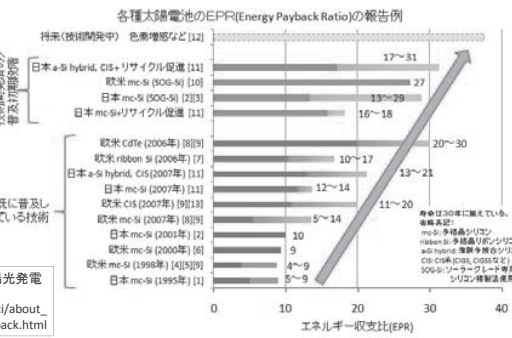
資料: IAI RCPV, 2008  
 \*全て日本国内での見積もり。出典は別記。  
 \*風力は設計寿命の20年、地上30年。  
 \*波力と海洋温度差の数字はあく、これよりも向上が予想される。

太陽光発電のエネルギーペイバックタイム(EPT)の推移状況



産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター  
[https://unit.aist.go.jp/rcpv/ci/about\\_pv/e\\_source/PV-energypayback.html](https://unit.aist.go.jp/rcpv/ci/about_pv/e_source/PV-energypayback.html)

太陽光発電のエネルギー収支比(EPR)の推移状況



産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター  
[https://unit.aist.go.jp/rcpv/ci/about\\_pv/e\\_source/PV-energypayback.html](https://unit.aist.go.jp/rcpv/ci/about_pv/e_source/PV-energypayback.html)

寿命は30年に換えている。  
 参考文献: mc-Si 多結晶シリコン、ribbon Si 多結晶シリコン、a-Si hybrid 非晶シリコン、CIS CIS (CIS, CISSE, CIS), SOG-Si ソーラーガラスコート層のシリコン電解液使用

今日の課題

復習: 自分が担当した以外の再生可能エネルギーについて、復習して理解しておく

予習: 来週の授業のため、『エネルギー読本』第4章をよく読み、例題等の問題をやってみること。  
 (来週の授業ではこれらの問題について、皆さんに答えてもらいます)

BASIC SCIENCE I 7回

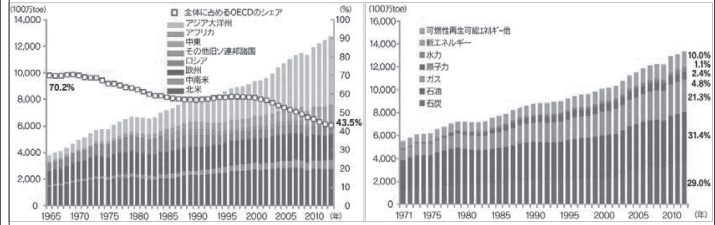
今日のテーマ:  
 データの見方(読み方)  
 -エネルギー関連資料を例に-

奈良女子大学・理学系女性教育開発共同機構  
 特任講師 寺内かえで (博士(農学))

p48 【例題】 エネルギー白書2015 第2部 第2章 第1節

<http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2015html/2-2-1.html>

項目(凡例のもの)に着目して、経時変化を見てみる



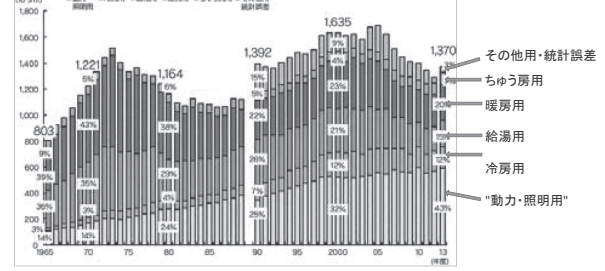
【第221-1-1】世界のエネルギー消費量の推移 (地域別、一次エネルギー)

【第221-1-2】世界のエネルギー消費量の推移 (エネルギー源別、一次エネルギー)

p51 【例題】(前者)

<http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2015html/2-1-2.html>

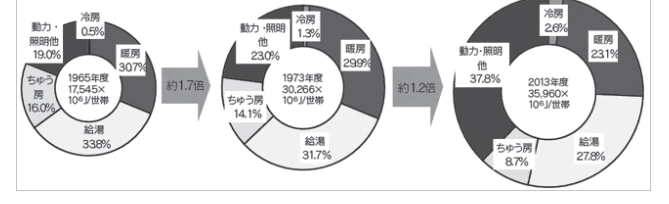
【第212-1-9】業務部門エネルギー消費原単位の推移



p51 【例題】(後者)

<http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2015html/2-1-2.html>

【第212-2-4】世帯当たりのエネルギー消費原単位と用途別エネルギー消費の推移



p51 【応用】

情報社会を支えるIT機器や情報インフラは、統計データではどのようなエネルギー消費増加として現れるだろうか？  
(同ページの2つの例題の分類でどこに当たるか？)

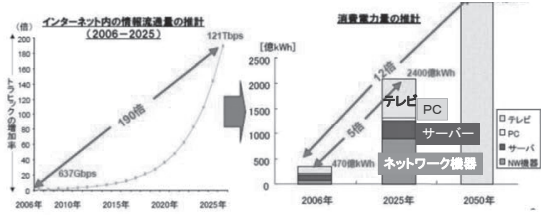
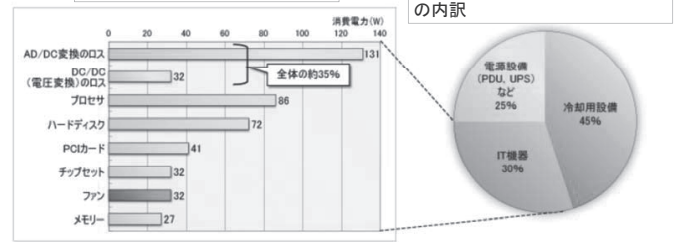


図1 情報流通量とIT機器消費電力の推移予測

出展：環境省・参考資料  
[http://www.env.go.jp/air/tech/model/heat\\_aeh-wg2-20\\_02/ref01.pdf](http://www.env.go.jp/air/tech/model/heat_aeh-wg2-20_02/ref01.pdf)

サーバー、データセンターの消費電力

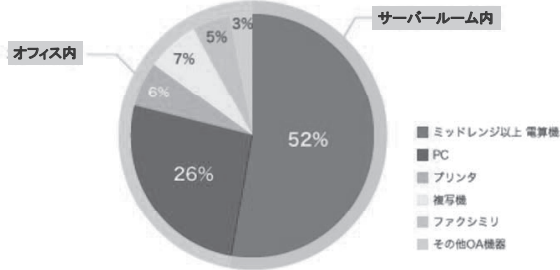
サーバー内の電力消費量



出典：米インテルの調査

出展：環境省・参考資料  
[http://www.env.go.jp/air/tech/model/heat\\_aeh-wg2-20\\_02/ref01.pdf](http://www.env.go.jp/air/tech/model/heat_aeh-wg2-20_02/ref01.pdf)

事務所ビルのOA機器等の電力消費量



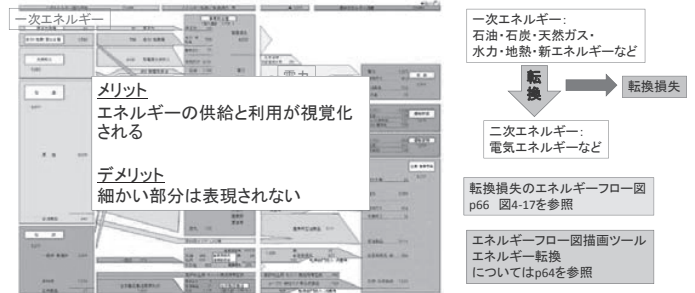
住環境計画研究所「オフィスビルにおけるOA機器のエネルギー消費実態」より

出展：環境省・参考資料  
[http://www.env.go.jp/air/tech/model/heat\\_aeh-wg2-20\\_02/ref01.pdf](http://www.env.go.jp/air/tech/model/heat_aeh-wg2-20_02/ref01.pdf)

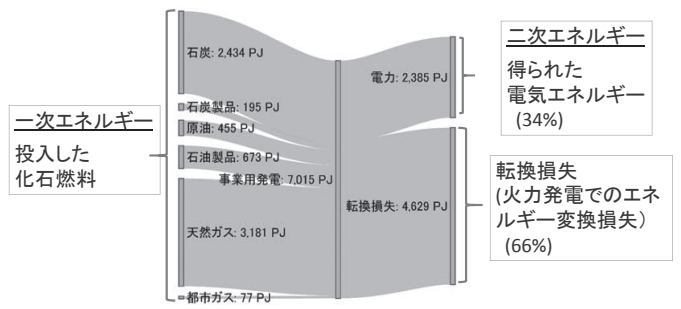
p53 エネルギー白書2015 第2部 第1章 第1節

<http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2015html/2-1-1.html>

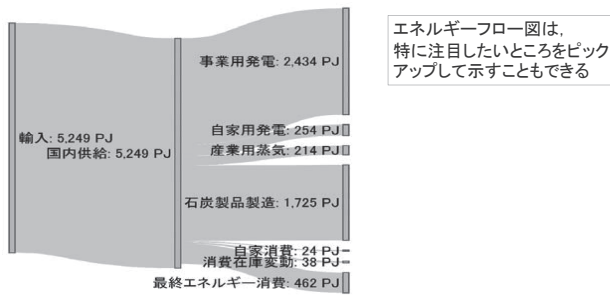
【第211-1-2】我が国のエネルギーバランス・フロー概要(2013年度、単位1015J)



p.66 図4-17 化石燃料による事業用発電(2013年度)



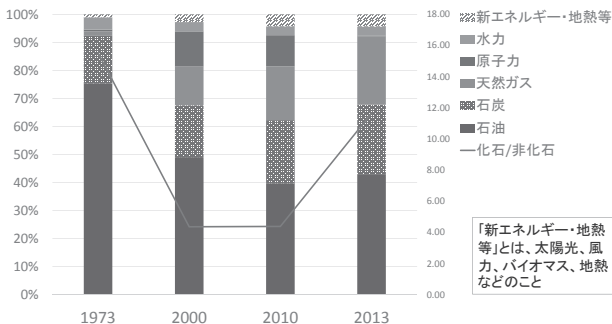
p.65 図4-16 2013年度の石炭の使用内訳



エネルギーフロー図は、特に注目したいところをピックアップして示すこともできる

最終エネルギー消費：462 PJ

p.54 【応用】

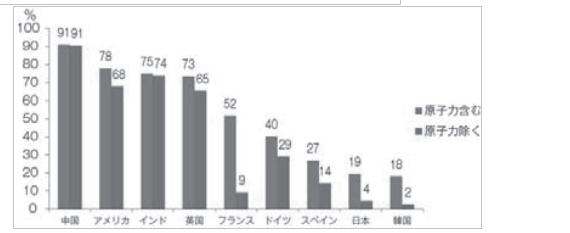


「新エネルギー・地熱等」とは、太陽光、風力、バイオマス、地熱などのこと

p56 【応用】

エネルギー白書2013 <http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2013html/1-1-1.html>

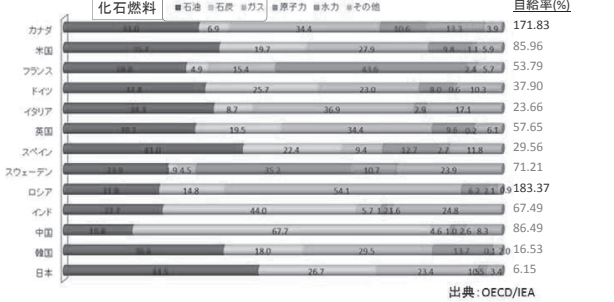
【第111-4-1】各国のエネルギー自給率の比較(2010年)



(出典) IEA "Energy Balance of OECD Countries 2012" IEA "Energy Balance of Non-OECD Countries 2012" IEAの原子力の扱いについてはp64(注90)を参照

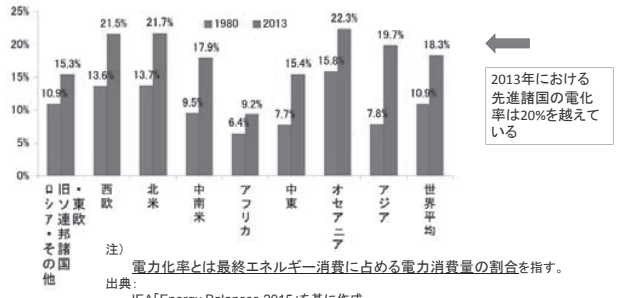


【第122-1-1】一次エネルギー消費構成の国際比較(2008年実績)



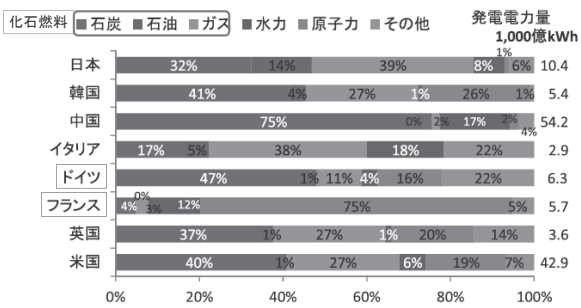
テキストとの対応  
【第122-1-1】一次エネルギー消費構成の国際比較(2008年実績) 出典: 一般社団法人 海外電力調査会HP <https://www.jppec.or.jp/data/graph01.html>

【第223-1-3】電力化率(地域別)



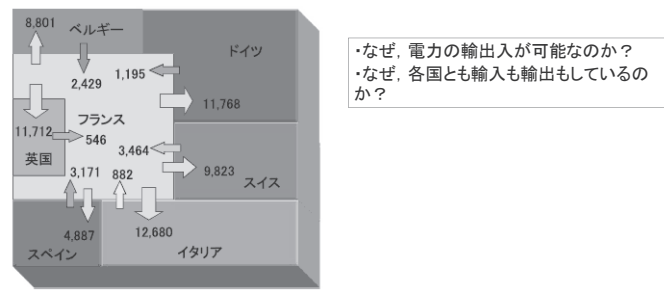
エネルギー白書2016 <http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2016html/2-2-3.html>

【第223-1-6】主要国の発電電力量と発電電力量に占める各電源の割合(2013年)



エネルギー白書2016 <http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2016html/2-2-3.html>

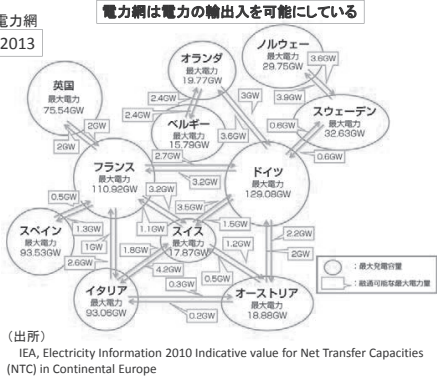
【第223-1-7】欧州の電力輸出入の状況(フランスの例)(2013年)



エネルギー白書2016 <http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2016html/2-2-3.html>

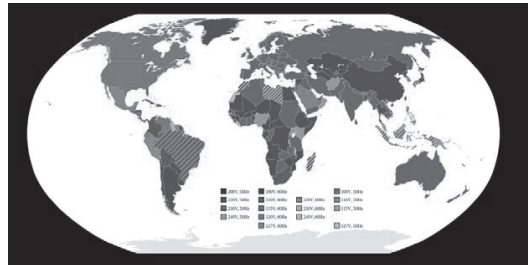
【第122-1-3】欧州の電力網

エネルギー白書2013 <http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2011/html/1-2-2.html>

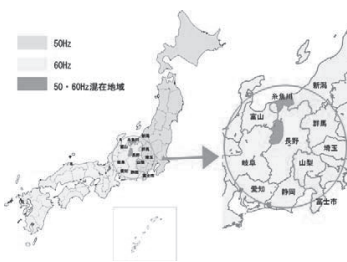


世界の商用電源周波数

ヨーロッパ+英国は50Hzの地域  
⇒周波数変換無く、送電可能



電源周波数地域(50Hz地域/60Hz地域)



[http://www.sharp.co.jp/support/info/info\\_hz\\_1.html](http://www.sharp.co.jp/support/info/info_hz_1.html)

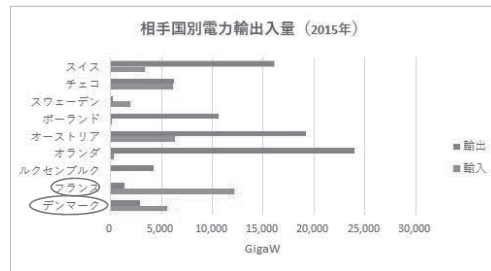
関東  
1887年から直流送電を行っていた東京電燈が、交流の優位性の高まりに応じて交流送電への転換を決めた。そこで、50Hz仕様のドイツ・AEG製発電機(AC 3kV 265kVA)を導入し、1893年に浅草火力発電所を稼働させた。

関西  
1888年に設立された大阪電燈が当初から交流送電を選択し、60Hz仕様の米・GE製発電機(AC 2.3kV 150kW)を採用した。

(<https://ja.wikipedia.org/wiki/商用電源周波数>)

ドイツの電力輸出入

ドレステン情報ファイルから引用 <http://www.de-info-net/kiso/atomdata03.html>



データ出所: 連邦統計庁貿易統計(GENESIS ON LINE)、速報値

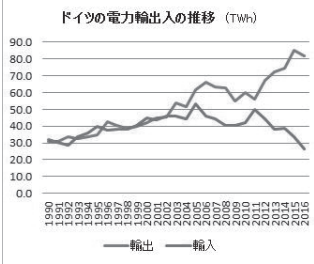
電力が物品のように売買されている

フランス、デンマークからは、輸入超過。両国の主要な発電源は？  
フランスは、デンマークは、

なぜ単純に、輸入または輸出だけではないのか？  
①安い国から買って、高い国に売る  
②安い国からの輸出最終国への経由点

結局のところ、ドイツは電力については輸出>輸入の国

ドレスデン情報ファイルから引用  
<http://www.de-info-net/kiso/atomdata03.html>

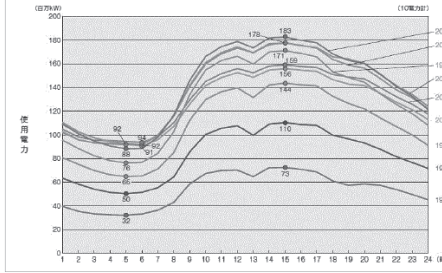


データ出所: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen, Stromerzeugung in Deutschland ab 1990 nach Energieträgern (2015年は暫定値)

p60 エネルギー白書2015 第2部 第1章 第4節

<http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2015html/2-1-4.html>

【第214-1-3】夏季1日の電気使用量の推移(年間最大電力を記録した日)

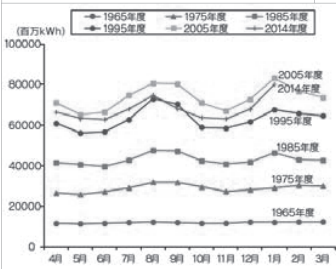


ピークを低くするという発想はあるか?

p61 エネルギー白書2015 第2部 第1章 第4節

<http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2015html/2-1-4.html>

【第214-1-4】1年間の電気使用量の推移



生活スタイルの変化

どんな変化が考えられるか?  
住居の様式

夏の冷房使用→排熱→ヒートアイランド化  
→都心部の気温の上昇  
(夜間も気温が下がらない)

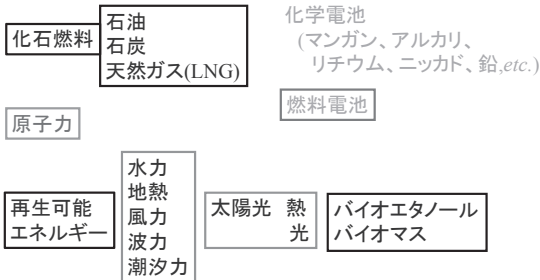
来週の予定

科学的知見をもとに議論してみよう  
「水素燃料について」

以下のスライドは、来週のための予習用参考資料 その1

配布論文は、来週のための予習用参考資料 その2

私たちが利用できるエネルギー源にはどんなものがあるか?



水素燃料電池自動車 トヨタ MIRAI

メーカー希望小売価格  
¥7,236,000 (消費税込み)

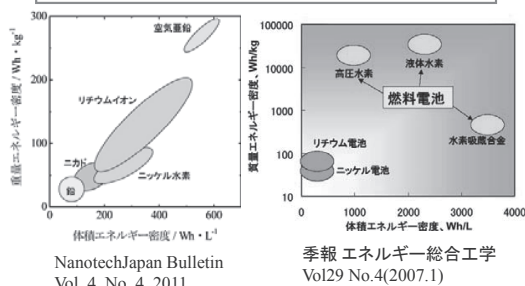
一充填走行距離(参考値) 約650 km

TOYOTA TOYOPET  
 取扱販売店  
 詳しくはこちら



出展: 2017年5月8日現在 トヨタ自動車WEB

いろいろな化学電池のエネルギー密度比較



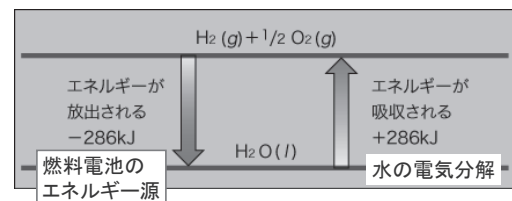
NanotechJapan Bulletin  
Vol. 4, No. 4, 2011

季報 エネルギー総合工学  
Vol.29 No.4(2007.1)

自動車に搭載されているバッテリーについて考えてみよう

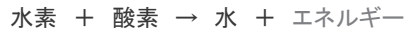
(水素)燃料電池のエネルギーの本質

水素 - 酸素 - 水のエネルギー関係



水素 + 酸素 → 水 + エネルギー  
燃焼と同じ?

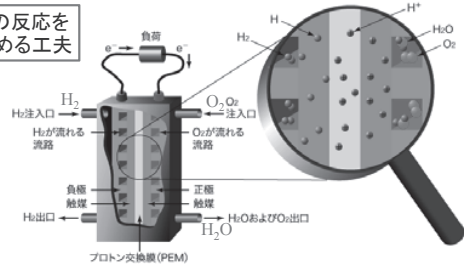
「水素の燃焼」と「水素燃料電池」の比較



比較対象	燃料	酸化剤	生成物	備考
燃焼	水素 H <sub>2</sub>	空気中の酸素 O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O、熱 光、音	急激な過程 炎が出る 低効率 熱の生産に最適
燃料電池	水素 H <sub>2</sub>	空気中の酸素 O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O、電力 光、音	緩やかな過程 炎が無く、静か 高効率 電力生産に最適

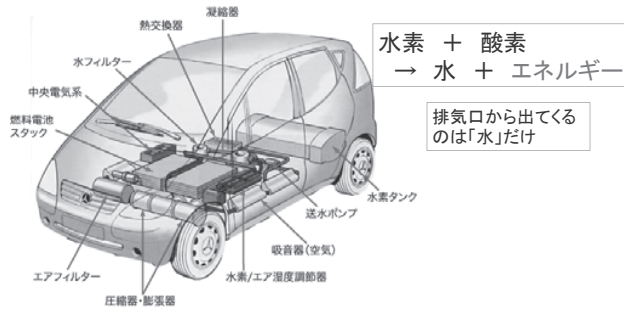
PEM型水素燃料電池の構造と反応  
PEM(プロトン交換膜)

水素と酸素の反応を  
緩やかに進める工夫



[http://highered.mcgraw-hill.com/sites/0073048763/student\\_view0/chapter8/figures\\_alive.html](http://highered.mcgraw-hill.com/sites/0073048763/student_view0/chapter8/figures_alive.html)

水素燃料電池駆動自動車



燃料としての水素の優れた点

1gが反応(燃焼)したときに出す熱が最も多い

水素 143kJ

石炭 30kJ

オクタン(ガソリンの主成分) 46kJ

メタン(天然ガス) 54kJ

水の電気分解から水素を得れば、

CO<sub>2</sub>ゼロエミッション

実質的に、原料は無尽蔵である

※ただし

電気分解に必要なエネルギーは

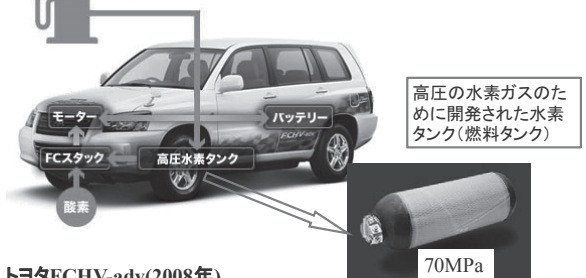
水素を燃やして得られるエネルギーより大きい

ことに注意(エネルギー収支としてマイナス)

水素の不利な点

- 水素は、化学反応を得なければ得られない  
(水素を生産するための工業的設備が必要)
- 大気中の酸素との直接混合で容易に爆発する
- 分子の大きさが小さいため、漏れ、透過しやすい
- 室温・大気圧下での体積 1g当たり約12L  
高圧で充填することが必要  
⇒大型で肉厚の金属ボンベが必要→重すぎる
- 高圧での液化が高コスト (臨界温度(沸点))  
水素 -240°C(-253°C)  
メタン -82.6°C(-161.5°C)  
プロパン 96.1°C(-42°C)

水素ステーション



トヨタFCHV-adv(2008年)

1回の水素充填の航続距離: 約830km

マイナス30°Cの寒冷地での低温始動走行も可能

(トヨタ自動車HP)



次世代ソーラー水素ステーションと  
燃料電池電気自動車「FCXクラリティ」  
(2010年)  
本田技研工業 HP

CO<sub>2</sub>ゼロエミッション  
を目指した、水素ステーション

太陽電池パネルにより得られた  
電気で水の電気分解を行い、  
水素を製造する

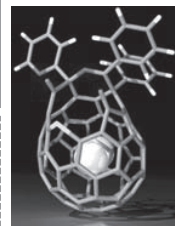
燃料電池自動車の実用化への課題

燃料となる水素の  
貯蔵方法(技術)  
製造方法(技術)  
水素ステーションの設置

工業的水素の製造の課題

水素(H<sub>2</sub>)は、自然界に単体ではほとんど存在せず、水(H<sub>2</sub>O)や化石資源(C<sub>m</sub>H<sub>n</sub>)などに組み込まれて存在している。これをどう取り出すか?

⇒取り出すためにはエネルギーが必要  
(=コストがかかる)



工業的水素製造技術の現状

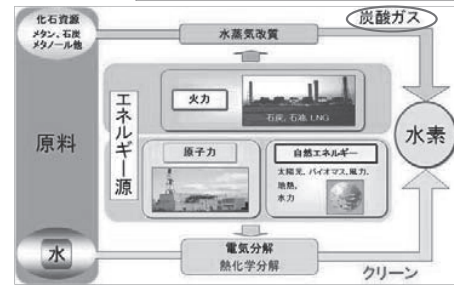
引用元: 原子力水素・熱利用研究センター

	水素製造法	原料	エネルギー	特徴
既存技術	水蒸気改質法	水 メタン	熱	安価(世界の90%を生産), 炭酸ガス排出
	電気分解法	水	電気	電力が安価な地域で商用
将来技術	副生水素・製鉄・ソーダ工業	石炭 海水	熱 電気	2020-2030年頃まで燃料電池自動車に供給可能な水素量
	石炭ガス化法 + 炭酸ガス処理	水 石炭	熱 (化石燃料)	高密度で水素生産, 低質炭素廃棄物
	・熱化学法 ・高温水蒸気 ・電気分解法	水	熱, 電気 (原子力)	高密度で水素生産, 放射性廃棄物
	放射線分解法	水	放射線 (原子力)	放射性廃棄物の有効利用, 大量生産に難
	・熱化学法(バイオマス, 光(電気)分解, 等)	水	熱, 電気, 光 (再生エネルギー)	自然環境の活用, 低密度

[http://www.jaea.go.jp/04/o-arai/nhc/jp/data/H2\\_product/data\\_H2\\_product.htm](http://www.jaea.go.jp/04/o-arai/nhc/jp/data/H2_product/data_H2_product.htm)

水蒸気改質法

メタン、石炭等の化石資源に、化石を資源とする火力で熱を与えて水素を作る。大量の炭酸ガス(CO<sub>2</sub>)が排出される。



[http://www.jaea.go.jp/04/o-arai/nhc/jp/data/hydrogen/data\\_hydrogen.htm](http://www.jaea.go.jp/04/o-arai/nhc/jp/data/hydrogen/data_hydrogen.htm)

日本経済新聞

水素発電所が燃料電池車の命運を握る 編集委員 西條都夫  
2014/2/19 7:00 | 日本経済新聞 電子版

■「クルマと別に大量の水素を消費する新使途が必要」

日本経済新聞

水素発電設備、川重が世界初の量産 17年メド  
2014/2/18 2:00 | 日本経済新聞 電子版

日本経済新聞

「燃料電池車に勝ち目なし」テスラCEO、EVIに自信  
2014/9/9 23:00 | 日本経済新聞 電子版



マスク氏:我々は、今まで様々な技術を実験的に試してきたが、燃料電池車に向かうべきではないと考えている。燃料電池車が必要となる水素ガスを作るのに要するエネルギーは、燃料電池から得られるエネルギーよりも多いし、水素ガスの貯蔵や輸送も困難だ。信頼性の高い再生可能エネルギーで発電できるEVと比較すれば、燃料電池車にはエコカーとしての勝ち目はないと思う。

朝日新聞  
DIGITAL

トヨタ燃料電池車、実質520万円 国が200万円補助

大日向寛文 2014年11月14日05時35分



トヨタ自動車12月に発売する燃料電池車「MIRAI (ミライ)」

トヨタ自動車が世界に先駆けて市販する燃料電池車(FCV)の実質的な購入負担額が520万円程度になることが13日、わかった。

12月に発売されるFCV「MIRAI (ミライ)」の価格は消費税込みで700万円を超えるが、国が202万円の補助金を出し、次世代エコカーの普及を後押しする。

トヨタが今月18日に発表する。複数の関係者によると、ミライの価格は税抜き約

水素燃料について議論してみよう

議論のテーマ

- ①電気自動車か、燃料電池車(水素燃料)か?
- ②水素燃料に未来はあるだろうか?

①については、各自の考え方を述べてもらいます(ウォーミングアップ)。②については、対立構造での議論をするため、当日適当に「未来はある派」と「未来はない派」に分かれてもらいます。そして、科学的知見をもとに、論理的に自分の派の主張や相手方への反論を試みましょう。



## BASIC SCIENCE I 8回

今日のテーマ:

- ① 科学技術と社会
- ② 科学的知見をもとに議論してみよう

奈良女子大学・理系女性教育開発共同機構  
特任講師 寺内かえで (博士(農学))

## 科学技術の発達と人間社会との関係

軍事用か民生用か、悪用か善用か

科学技術の二重用途 dual-use technology

- ① 原子力 (原爆⇔原子力発電)
  - ② インターネット (ARPANET⇔商用利用)
  - ③ 病原性ウイルスのゲノム配列 (医療・医薬品⇔生物兵器・テロ)
  - ④ ドローン (軍事利用⇔民生利用)
  - ⑤ ロボット (軍事利用⇔民生利用)
- etc.

インターネット←ARPANET 由来(国防総省高等研究計画局)  
ARPA: Advanced Research Projects Agency

冷戦下で進められた ARPANET の目的:

核戦争時においても国家情報機能の維持が可能なコンピュータネットワークの実現(fault tolerant であることが最重要)

核弾頭による攻撃:

1. 複数個の拠点の同時破壊
2. 放射能( $\alpha$ 線)によるコンピュータのソフトウェアの発生

冷戦の終結→ARPANET 用の技術の民間転用が必要  
(雇用確保・投資回収目的?)

→インターネットの商用利用開始(1993)



日本学術会議

軍事研究否定見直し検討 年内に見解

毎日新聞 2016年5月21日 東京朝刊

日本経済新聞

学術会議「軍事向け研究せず」 声明を決定

2017/3/24 20:29 | 日本経済新聞 電子版

トランス・サイエンス(trans-science)

「科学に問いかけることはできるが、科学では答えることのできない問題」(Questions which can be asked of science and yet which cannot be answered by science)  
1972年 ワインバーグ(米国)

原著論文 Weinberg, Alvin M. (1972). Science and Trans Science, *Minerva*, Vol. 10, pp. 209-222.  
<http://www.quantamike.ca/pdf/Weinberg-Minerva.pdf>

アルヴィン・ワイバーグ(Alvin Weinberg)

アメリカの核物理学者。オークリッジ研究所<sup>※</sup>所長。

※オークリッジ研究所は1942年に原子爆弾開発のためのマンハッタン計画により設立され、プルトニウムの抽出の研究を担当した研究所である。その後、資源エネルギー庁傘下のアメリカ最大の科学研究所となり、原子力開発や核物理学の研究の中心の一つ。

科学技術と社会に新たな関係が生まれていることを指摘。  
→「トランス・サイエンスの出現と拡大」

★トランス・サイエンスの三類型

- ・知識の不確実性、解答を得ることの現実的不可能性
- ・対象の性質による不確実性
- ・科学と価値

参考文献

小林博司「トランス・サイエンス時代の科学技術と社会」 | 文部科学省  
→[http://www.mext.go.jp/b\\_menu/shing/gijyutu/gijyutu18/siryo/\\_icsFiles/afielldfile/2012/05/07/1319626\\_09.pdf](http://www.mext.go.jp/b_menu/shing/gijyutu/gijyutu18/siryo/_icsFiles/afielldfile/2012/05/07/1319626_09.pdf)

[http://homepage3.nifty.com/tanemura/re3\\_index/4T/to\\_trans\\_science.html](http://homepage3.nifty.com/tanemura/re3_index/4T/to_trans_science.html)

トランス・サイエンスの三類型 ①

- ・知識の不確実性、解答を得ることの現実的不可能性

例1) 低レベル放射線障害の生物学的影響

ハツカネズミの自然突然変異率の二倍の遺伝的突然変異を起こすのに必要な放射線量が30レントゲンであることがわかった。放射線の量と突然変異率が正比例するのであれば、150ミリレントゲンの放射線は突然変異率を0.5パーセント上昇させることになる。しかし実際に正比例しているかどうかは実験によって確かめるほかはない。そこで実験をしようとした場合、95パーセントの信頼度を持った結果を得るためには80億匹のハツカネズミが必要になるのである。これは事実上、実験が不可能である。

⇒微量物質の環境影響を実験的に確かめる際につねにつきまとう  
(遺伝子組み換え作物(GM作物)もこのタイプ)

例2) 発生の可能性がきわめて低い事象の確率

- ・原子力発電所での事故の事例(東電福島原発など)
- ・巨大地震の発生確率などもこのタイプ

⇒十分な時間と資金を投入すれば科学的に解答を出すことができるように見えるが、これは抽象的可能性であって、現実には不可能である

[http://homepage3.nifty.com/tanemura/re3\\_index/4T/to\\_trans\\_science.html](http://homepage3.nifty.com/tanemura/re3_index/4T/to_trans_science.html)

## 遺伝子組み換え作物 米機関「安全」

関連ニュース

毎日新聞 2016年5月21日 東京夕刊

農林業 アメリカ 科学・技術 すべて表示する

米科学アカデミーは、現在市場で取引されている遺伝子組み換え作物を食べて、健康被害の心配はないとする報告書を公表した。市場に出回っているトウモロコシや大豆などの遺伝子組み換え作物について、過去20年の約900の研究成果を分析した。報告書は、一般の人も含めた約800人の意見を総合し「長期間の影響も含め、人体に害を及ぼす証拠はなかった」としている。アカデミーは政府や議会から独立した立場で科学技術政策を助言している。【共同】



## トランス・サイエンスの三類型 ②

・対象の性質による不確実性(社会科学の不十分さ)

内容) 物理学では、天体のような巨視的な物体の場合には、初期条件と自然法則からその振る舞いをかなり正確に予測できる。微視的な世界でも原子や分子の動きは統計的にかなり正確にその振る舞いが予測できる。  
しかし社会現象になると、その予測能力は極端に低下する。個人の行動や社会集団の行動を物理学と同じように予測することはまず不可能である。  
(研究対象である人間に多様性と意識があるから)

[http://homepage3.nifty.com/tanemura/re3\\_index/47/to\\_trans\\_science.html](http://homepage3.nifty.com/tanemura/re3_index/47/to_trans_science.html)

## トランス・サイエンスの三類型 ③

・科学と価値

例1) 純粋科学と応用科学のどちらを推進すべきか  
例2) 調査研究と理論的体系化を目指す研究のどちらが価値が高いか  
⇒こうした事例は科学についての問題ではあるが、諸科学(あるいは研究方法)の価値を評価するという課題であり、**この課題の解決は科学を超越(トランス)している**

「社会の中でどのような科学研究を優先的に進めるべきか」といった**科学技術政策的な問題**  
☆「**社会がどのような科学を求めているか**」という**価値の問題**が浮き彫りにされ、科学的解決は不可能になる

[http://homepage3.nifty.com/tanemura/re3\\_index/47/to\\_trans\\_science.html](http://homepage3.nifty.com/tanemura/re3_index/47/to_trans_science.html)

池内了、2014『科学のこれまで、科学のこれから』岩波ブックレット(902)。

・技術の妥協点

・共有地の悲劇

・非倫理性を含む科学や技術

[http://homepage3.nifty.com/tanemura/re3\\_index/47/to\\_trans\\_science.html](http://homepage3.nifty.com/tanemura/re3_index/47/to_trans_science.html)

・技術の妥協点

池内了、2014『科学のこれまで、科学のこれから』岩波ブックレット(902)。

福島原発事故で専門家がしきりに使った「想定外」という言葉は、原発の設計に地震動の強さや津波の高さへの上限が「想定」されていて、それを超える事態となったのだから自分たちには責任がないとの言い訳であった。絶対に壊れない人工物は存在せず(建造することができず)、**すべての人工物には安全基準が定められていて、それを満たせば合格となって世の中に流通させることができる。**

その安全基準は、**材料の強度や耐用年数のような科学で測れる要素以外に、その対策のための経費とか手間とかが余りに過大にならないというような条件を考慮(技術を現実生活に活かすため)**

このような技術の安全基準をどう決めるか(どう想定するか、どこで妥協するか、どのような条件とするか)はトランスサイエンス問題の典型

[http://homepage3.nifty.com/tanemura/re3\\_index/47/to\\_trans\\_science.html](http://homepage3.nifty.com/tanemura/re3_index/47/to_trans_science.html)

・共有地の悲劇

池内了、2014『科学のこれまで、科学のこれから』岩波ブックレット(902)。

誰でも使える共有地(より一般的には公共物)があると、羊飼いはなるべく多くの羊を飼おうとする。それが個人としての利益であり、合理的な選択でもある。しかし、われもわれもと羊飼いが多く集まり、かつより多くの羊を飼おうとすれば、たちまち共有地は荒れ果てて使い物にならなくなってしまおう。これは個人が責めを負うのではなく、**みんなの損失**である。

このような共有物に関わる悲劇は、個人が責めを負わないから罪の意識がなく、損失はみんなが被るから薄められ、なかなか解決しないことが多い。

例1) 海洋での漁獲(早い者勝ち)  
例2) 温室効果ガスの放出(出しっ放し)  
例3) 空中に漂う人工衛星の残骸(捨てっ放し)  
例4) どこにも広がる環境ホルモン問題(化学物質の使いっ放し)  
⇒多くの共通する問題 ⇒ 今や世界全体の課題

「共有地の悲劇」に絡まる問題について科学ができること  
どこまで規制すれば悲劇を回避できるかの目安を示せるだけであって、**具体的にどのような方策を採用すべきかについては科学は何も言えない。**  
☆科学はその問題に対して重要な情報を与えるが、参照事項としてしか機能しない

[http://homepage3.nifty.com/tanemura/re3\\_index/47/to\\_trans\\_science.html](http://homepage3.nifty.com/tanemura/re3_index/47/to_trans_science.html)

・非倫理性を含む科学や技術

池内了、2014『科学のこれまで、科学のこれから』岩波ブックレット(902)。

事例) 原発は、

(1) その大きな潜在的危険性から過疎地に押しつけていること、  
(2) ウランという放射性物質を扱うために、探掘・精錬・装填・定期検査・廃棄物処理・廃炉の全過程において携わる作業員に放射線被曝を押しつけていること、  
(3) 放射性廃棄物を10万年にわたって厳重管理を子孫に押しつけていること、(4) 事故が起これば立地する地域や人々、そして全世界に放射能汚染を押しつけること、  
という**反倫理性を必然的に帯びている**。いずれも、多数の人間や強い立場の人間が少数の人間や弱い立場の人間に「押しつける」という形をとっていることが**反倫理性を如実に物語っている**。そのような**反倫理性を最初から帯びている科学なのだから、社会として採用するかどうかは科学以外の要素で決められるのは自明**

生命科学・医療にかかわる科学技術にはこのタイプのものが多くある  
例を挙げてみよう

[http://homepage3.nifty.com/tanemura/re3\\_index/47/to\\_trans\\_science.html](http://homepage3.nifty.com/tanemura/re3_index/47/to_trans_science.html)

科学は万能ではない。

だからこそ、科学に携わる者は、信頼される情報を発信しなくてはならない。

研究不正は、信頼を損なう行いである。

研究不正行為とは(世界各国で共通しているもの)

- ・捏造(fabrication)
- ・改ざん(falsification)
- ・盗用(plagiarism)

☆それぞれの頭文字をとって、「FFP」と呼ばれる。  
その他、「二重投稿」「守秘義務違反」「インフォームドコンセントの欠落」「被験者の虐待」「材料の乱用」etc.

・捏造(fabrication)

存在しないデータ、研究結果等を作成すること。

・改ざん(falsification)

研究資料・機器・過程を変更する操作を行い、データ、研究活動によって得られた結果等を真正でないものに加工すること。

・盗用(plagiarism)

他の研究者のアイデア、分析・解析方法、データ、研究結果、論文又は用語を該当研究者の了解又は適切な表示なく流用すること。

日本学術振興会

「科学の健全な発展のために—誠実な科学者の心得—」

<https://www.jsps.go.jp/j-kousei/rinri.html>

## ベーシックサイエンス I (後半)

### 第9回 高校までの数学について考える 1

(高校・大学までの数学についての振り返り・アンケートを行った)

### 第10回 高校までの数学について考える 2

(高校までの数学を改めて振り返り、興味を持ったことについて調べた)

### 第11回 数について考える

(四則演算や、そのルールについて改めて考えた)

### 第12回 身の回りに隠れている数学について考える 1

(人工知能とは何か、身近にどのような人工知能があるのかについて考えた)

### 第13回 身の回りに隠れている数学について考える 2

(3Dデータとはどのようなものかについて考えた)

### 第14回 物の形を考える 1

(3Dスキャナ・3Dプリンタを実際使用し、3Dデータを出力した)

### 第15回 物の形を考える 2

(立体がどのように見えているかを考え、3Dアートを作成した)

ベーシックサイエンス I (後半) においては、数学は計算や公式の暗記や反復訓練を行うだけの学問ではなく「考える学問」であることを理解することを目標として授業を行った。

特に算数・数学の教科書や問題集にあるような問題とその解き方・答えではなく、それらを考える中で生じるさまざまな「疑問」に注目し授業を行った。特に、

- ・日常的に感じている疑問、
- ・疑問として認識はしていないが実は理解できていないこと、
- ・過去に感じていたが既に気にならなくなってしまった疑問や不満

などに注目し、それらに対して他者や自分自身が納得できるよう、ときには表現を様々に工夫しながら自らの言葉を用いて説明することを目指した。

学生たちは実際に「疑問をもつ」ということを自ら意識することで、たくさんの数学に囲まれて生活しているということを改めて認識することができていたように感じた。また授業においては問題に対する答えではなく各テーマに対する個人の意見や感想を求めるということが多かったからか、学生たちは非常に生き生きと議論を交わし、たくさんの意見を聞かせてくれた。

ここでは、実際に授業の中で出た学生の意見やレポート、授業で取り上げた内容のうちのいくつかを記録として残すことにする。

担当：理系女性教育開発共同機構 船越 紫

## 数学に関するアンケート

### 第9回 高校までの数学について考える1

(高校・大学までの数学についての振り返り・アンケートを行った)

- (1) 数学・算数は得意ですか？
- (2) その理由をお答えください
- (3) そうなる原因やきっかけは何かありましたか？
- (4) 数学・算数は好きですか？
- (5) その理由をお答えください
- (6) そうなる原因やきっかけは何かありましたか？
- (7) 数学・算数の中で、特に好きな範囲(分野)・嫌いな範囲(分野)はありますか？
- (8) どんどころが好き(嫌い)ですか？
- (9) これまで数学を学んできた中でどのような疑問を持ったことがありますか？
- (10) その他、自由にお書きください

(1) 得意：2名 普通：2名 分野による：1名 苦手：3名

(2) その理由をお答えください。(3) そうなる原因やきっかけは何かありましたか？

得意：

- ・高2前半くらいまでは得意でした。たぶん私の頭の理解に及ぶ範疇だったから。
- ・中学まで暗記教科が得意だったから数学は1番苦手だった。  
高校生になって暗記が苦手になって他の教科の成績が下がって数学が1番得意になった。

普通、分野による：

- ・得意な分野もあれば苦手な分野もある。
- ・良くも悪くもなかったから。
- ・確率・ベクトルが特に苦手だったから。

苦手：

- ・難しいから。問題が解けないから。
- ・単なる暗記では済まないから…。文系には酷だ！  
原因はおおかた受験のせい。  
まず中学受験算数に苦しみ、中高一貫だったので高校受験はなかったけど、大学受験(センター試験)でまた大変な思いをしました。  
試験は時間制限もあるのが苦しい。
- ・定理とか定義の使い方を覚えきれない。  
応用になると解けない。(微積分・数列・確率)

(4) 好き：5名 少し好き：1名 普通：1名 嫌い：2名

(5) その理由をお答えください。(6) そうなる原因やきっかけは何かありましたか？

好き：

- ・解けたら楽しい。  
わからない問題を友達に教えてもらったりして理解するのが楽しかった。
- ・中学の時1番得意な教科は数学だった。  
高校でも嫌だった思い出がないから。  
(ただ高校で行列の単元がなかったので、大学では線形代数に苦しんだ。)  
あと高校は課題が多かったから好きではなかったけど、問題を解くことは好き。
- ・(高校の)先生が良かった。  
答えがひとつに決まっていたから。  
でも実際は答えがいくつもある国語とかの方が得意でした。
- ・苦手だけど嫌いにはなれない。  
できると楽しい・かっこいいから！  
他教科より充実感がある。苦しいけど。  
好きになるきっかけは、解いているとある時パズルのピースがカチっとはまったような瞬間があって、そこからスラスラと答えまでたどりつけると楽しい！みたいな経験。  
あと人に教えるのが結構好きなので、苦手だけど基本的なところはうまく教えられる自信があります。
- ・(少し好き) スッキリ解けたら嬉しいからです。  
でも高校数学の印象が足を引っぱっているんで、好きとは言い切れません。  
浪人したときにゆっくり考える時間があったので、センター数学の問題を時間制限を外して解くと普段は思考停止して解けない問題が解けたことがきっかけだと思います。
- ・あと少しで解けそうなときのわくわく感がなんとも言えない。  
試行錯誤するのが楽しい。

普通：

- ・解けたときは達成感や嬉しさを実感できるのに対して解けないときはもやもやするから。

嫌い：

- ・先生が厳しかったから  
宿題が多かった。
- ・ひらめきが必要で、努力しても解けないような部分が多いため。(微積分とか)

(7) 数学・算数の中で、好きな範囲（分野）・嫌いな範囲（分野）はありますか？

(8) どんなところが好き（嫌い）ですか？

○好き：数 IA, 嫌い：数 III

→ 数 III は全体的に難しい。特に極限は最後まで理解できなかった。IA・IIB の中で特にこの分野が苦手とかはなかったのので、センター試験の選択問題は毎回どれを解くか迷っていました。

●好き：二次関数

→ 1 年のときひどい点数をとったけど、そこからちゃんと復習して理解できるようになって、楽しい！と感じるようになりました。

●嫌い：ベクトル

→ どれだけ頑張っても理解できないまま高校生活が終わりました。

○好き：数学 III C IIB, 嫌い：数学 IA

→ 確率が嫌い。なにをしているのかよくわからない。

●好き：相似 複素数 2 次までの関数, 嫌い：確率 極限 ベクトル

→ どれだけ頑張っても解けない問題があるから嫌い。でも理解できたら（正答できたら）楽しいから好き。きつともっと時間があって、じっくり考えることができたら好きだったろうと思う。

○好き：ベクトル, 嫌い：確率

→ ベクトルは目に見えて分かりやすいし面白かった。確率はあらゆるパターンをもらさず考えなければいけないので嫌だった。

●好き：どの範囲も超基本のところ, 嫌い：数列 空間 ベクトルの場合分けが出てくるやつ

→ 基本なら私にもできるから！数列は計算が苦しい。空間図形を把握するのが苦しい。場合分けは、自分では全ての場合を網羅できないので苦しい。

○好き： $\Sigma$  ベクトル, 嫌い：数列 確率 図形と方程式

→  $\Sigma$  は公式を操作するだけだし、ベクトルはどうかどうにかしたら解けるからです。数列と確率は種類がありすぎてなにを使えばいいのかわからなくなるからです。図形と方程式は軌跡がむりです。

●好き：ベクトル 図形, 嫌い：確率 極限

→ なにも考えることなく淡々と解いていく分野が好き。(ベクトル 漸化式)  
特にベクトルは 2 つまたは 3 つの基本ベクトルを使用して点の位置を明記できるところが好き。確率は解き方・考え方が数多くあるところが嫌い。(条件付け・反復)

○好き：ベクトル 図形全般 確率

→ 目に見えたり、想像できるところ。

○嫌い：漸化式

→ 何度説明を受けてもしっくりこず理解できない。 $n, k$  など文字がたくさん出てくる。



(9) これまで数学を学んできた中でどんな疑問を持ったことがありますか？

- ・数III 漸化式の問題で「問題の式がこの形だったら  $a_n = **$  とおく」と決められているのがどうしてなのか謎だった。  
数IIIの問題は式の形を見て解答を考えて行かなければならないのが多かったので難しかったです。
- ・なんでこんな問題を解ける人が世の中にいるんだろう。
- ・なんで方程式とかに出てくる文字が  $x$  とか  $y$  なのか。
- ・なんで横軸が  $x$  で縦軸が  $y$  なのか。
- ・定理とか考えた人がすごすぎる。
- ・この内容将来いつ使うんだろうと思った分野がいくつかありました。
- ・数学脳とか数学的センスのある人ってどこでなにがあってそうなったんだろう。
- ・なんで問題集がこんなに分厚いんだろう…とっていました。
- ・定理や定義発見のきっかけ（歴史）、数学の活躍する場面はどこか、できる人とできない人の違いなど。
- ・数学は未知数をすぐに文字でおくのでややこしくなる。  
なんで  $\square$  とか  $\circ$  にしなかったのだろうか…

(10) その他、自由にお書き下さい。

- ・数学は解けると単純にうれしいです。
- ・数学はひらめきが必要な学問だと思う。
- ・鶴亀算が今だに分からない。

## アンケートから

### 第10回 高校までの数学について考える2

(高校までの数学を改めて振り返り、興味を持ったことについて調べた)

- ・定理とか考えた人がすごすぎる
- ・この内容，将来いつ使うんだろうと思った分野がいくつかありました
- ・定理や定義発見のきっかけ（歴史），数学の活躍する場面はどこかなど。

**課題：～高等学校で用いられるの数学（算数）の教科書の中から、改めて気になったものについて調べる。**

- ・定理の発見について？
  - ・どんなところで使われている？
  - ・どこがスゴイ？
- など。

学生が調べてきた内容の一例。

#### 漢数字（命数法）

一（10の0乗）、十（10の1乗）、百（10の2乗）、千（10の3乗）、  
万（10の4乗）、億（10の8乗）、兆（10の12乗）、京（けい）（10の16乗）、  
垓（がい）（10の20乗）、秭（じょ）（10の24乗）、穰（じょう）（10の28乗）、  
溝（こう）（10の32乗）、澗（かん）（10の36乗）、正（せい）（10の40乗）、  
載（さい）（10の44乗）、極（ごく）（10の48乗）、恒河沙（こうがしゃ）（10の52乗）、  
阿僧祇（あそうぎ）（10の56乗）、那由他（なゆた）（10の60乗）、不可思議（ふかしぎ）（10の64乗）、  
無量大数（むりょうたいすう）（10の68乗）、矜羯羅（こんがら）（10の112乗）、  
阿伽羅（あから）（10の224乗）、最勝（さいしょう）（10の448乗）、摩婆羅（まばら）（10の896乗）、  
阿婆羅（あばら）（10の1792乗）、多婆羅（たばら）（10の3584乗）、界分（かいぶん）（10の7168乗）、  
普摩（ふま）（10の14336乗）、禰摩（ねま）（10の28672乗）、阿婆鈴（あばけん）（10の57344乗）、  
弥伽婆（みかば）（10の114688乗）、毘羅伽（びらか）（10の229376乗）、  
毘伽婆（びかば）（10の458752乗）、僧羯邏摩（そうがらま）（10の917504乗）、  
毘薩羅（びさら）（10の1835008乗）、毘瞻婆（びせんば）（10の3670016乗）、  
毘盛伽（びじょうが）（10の7340032乗）、毘素陀（びすだ）（10の14680064乗）、  
毘婆訶（びばか）（10の29360128乗）。

聞いたことがある単語が幾つかあるけれど、（特に位の大きい数字は）漢数字を表す言葉だとは思っていなかったので驚いた。

黄金比  $1 : \frac{(1+\sqrt{5})}{2}$  (近似値  $1 : 1.618$ , 約  $5 : 8$ )

誕生：

古代ギリシャの彫刻家ペイディアスがはじめて使ったといわれている。20世紀～。

すごいところ：

美しい連分数表示や、指数関数表示ができる。星型や正五角形、五芒星から容易に得ることができる。安定的で美しい比率。

フィボナッチ数列から導き出される。(隣り合う2項の比が黄金比に近づく)

フィボナッチ数列

$$a_1 = 1, a_2 = 1, a_{n+2} = a_{n+1} + a_n \quad (n=1,2,\dots) \text{ により定まる数列}$$
$$1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, 144, 233, \dots$$
$$\text{一般項 } a_n = \frac{1}{\sqrt{5}} \left\{ \left( \frac{1+\sqrt{5}}{2} \right)^n - \left( \frac{1-\sqrt{5}}{2} \right)^n \right\}.$$

フィボナッチ数列をよく観察して見つけ出したのがすごいと思う。

どこにあるか：

建築物：パルテノン神殿 (ペイディアス)、サクラダファミリア、鹿苑寺金閣。

自然界：松ぼっくりのかさ、螺旋状のライン、花びらの数、葉の生え方。

デザイン：企業のロゴ、デジタルカメラ、名刺、はがき。

芸術：ミロのヴィーナス、モナリザの微笑 (生え際から顎先まで黄金比)。

日本には、他にも「白銀比」「大和比」「第二貴金属比」などがある。

サッカーボールの形はなぜ正五角形×12と正六角形×20か？

「正五角形の周りには正六角形が5つ、正六角形には3つの正五角形が接している」…(2)  
正五角形が $n$ 個、正六角形が $m$ 個あるとする。

オイラーの多面体定理より、頂点の数 - 辺の数 + 面の数 = 2 …(1)

1つの頂点の周りでは3つの図形が接しているので、頂点の数の和は  $\frac{5n+6m}{3}$  である。

辺の数は  $\frac{5n+6m}{2}$ 、面の数は  $m+n$  なので、(1)より  $\frac{5n+6m}{3} - \frac{5n+6m}{2} + m+n = 2$

となり、これを解くと  $n=12$  を、さらに (2)より  $m = \frac{5n}{3} = \frac{5 \times 12}{3}$  となり、 $m=20$  を得る。

よって正五角形12個と、正六角形20個からなることが分かった。

<なぜ五角形と六角形なのか？>

正多面体…正四面体、正六面体、正八面体、正十二面体(五角形)、正二十面体(六角形)  
上の証明より、正五角形12個、正六角形が20個であったことと、正十二面体が正五角形から、正二十面体が正六角形から出来ていることが関係していると考えられる。

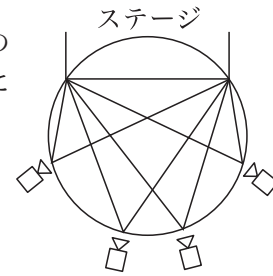
正十二面体の頂点数は20である。これはサッカーボールの正六角形の数と等しい。

正二十面体の頂点数は12である。これはサッカーボールの正五角形の数と等しい。

以上から、正十二面体、もしくは正二十面体の頂点を切って、正多面体をさらに球に近づけた形がサッカーボールに使われていると思う。

## 円周角の定理 (ユークリッド幾何において)

日常生活の中で使うことはあまりないが、カメラを取るとき  
の角度で円周角の定理を使うと、円上にカメラをおけば、どこに  
おいてもステージ全体を写すことができる。



## 対数について

対数の誕生:スコットランドのジョン・ネイピア (1550-1617) が考案。ケプラーやガリレオ  
などが活躍した時代、すなわち天文学が隆盛した時代、非常に大きな数の計  
算が必要だった。

対数のココがスゴイ:

対数の概念を使えば、掛け算を足し算に変換できて計算が非常に楽になる。

「対数の発明は天文学者の寿命を2倍にした」by ラプラス

対数の使いみち:

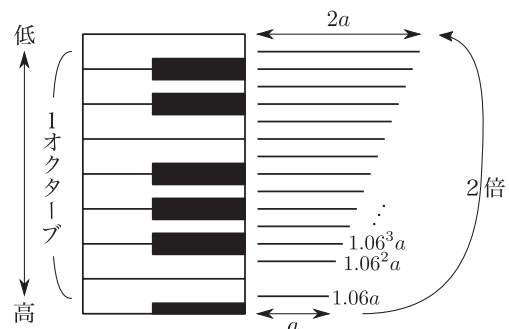
見やすい棒グラフ。対数を使うと「大きい値の差は小さく、小さい値の差は大きく」  
できる。(どんぐりの背比べ状態で見づらいグラフが見やすくなる。)

地震の震度

(自身計が計測した単位 (Gal) で表された揺れの大きさの対数をとったものが震度)  
音の大きさデシベル (db)、星の明るさ (等星)、酸性 or アルカリ性 (pH)、音階 (ドレミ)  
など。

## 数列とピアノについて

ピアノの音階では、1 オクターブは白鍵と黒  
鍵合わせて12個の音からなる。弦の長さは、  
半音低くなると  $^{12}\sqrt{2}$  倍、すなわち約 1.06 倍  
に、1 オクターブ低くなると 2 倍になるよう  
に決められている。すなわち、弦の長さは、公  
比が 1.06 の等比数列になっている。



「和音」はそれぞれの音の周波数が簡単な整数比で表されるときに心地よいと感じると  
いわれているそう。

有名な和音「ドミソ」の周波数比は、およそ  $1 : 1.26 : 1.498 \approx 4 : 5 : 6$ 。

「ファラド」「ソシレ」も音階が等比数列なので、それぞれの音を平行移動させても周波  
数比は変わらないため、同じ周波数比である。

## 微分積分学について

### ○微分積分学の始まり○

「積分法の基本的機能でもある体積や面積の計算は、エジプトのモスクワパピルス（紀元前1820年ごろ）までさかのぼり、その中で角錐の切頭体の体積を正しく求めている。ギリシア数学では、エウドクソスが極限の概念の先駆けとなる取り尽くし法で面積や体積を計算し、アルキメデスがそれを発展させて積分法によく似たヒューリスティクスを考案した。取り尽くし法は紀元3世紀ごろ、中国の劉徽も円の面積を求めるのに使っている。5世紀には祖沖之が後にカヴァリエリの原理と呼ばれるようになる方法を用いて、球の体積を求めた。」

私の疑問「普段微分積分がが使われているところを見かけない。何に使われているのか？」

### ○微分積分学の利用○

「弾道学において砲弾の速度や弾道曲線の計算に用いられるようになった。微分計算を行う機械式計算機の多くはこの目的のために作られてきた歴史があり、世界初のコンピューターもそうであった。また、大砲の強度計算や、火薬の爆発や挙動の計算にも微分積分は必須であり、火砲の歴史とは密接な関係がある。」

#### 微分法

速度・加速度に関わる計算  
曲線の接線の傾きの計算  
最適化問題の計算

#### 積分法

面積・体積・曲線の長さの計算  
重心・仕事・圧力の計算  
冪級数・フーリエ級数

シャトルが宇宙ステーションとドッキングする際の起動計算や、道路上の積雪量の計算にも用いられている。

微分積分学を確立したのは、ライプニッツとニュートンであるとされている。ニュートンは物理学全般に積分学を適用することを初めて行い、ライプニッツは今日も使われている微分積分学の記法を開発した。

## 参考文献

- [1] 「永野数学塾塾長日記 高校数学の内容（新課程）と数学史」 <http://blog.donaldoplan.com/archives/3535>
- [2] 「高校数学を100倍楽しく 対数は地震にも音楽にも理科のpHにも使われている！」 <http://enjoymath.pomb.org/?p=1216>
- [3] 「数学B」数研出版（2012）
- [4] 「高校数学の美しい物語 音階と数学」 <https://mathtrain.jp/onkai>
- [5] 「微分積分学」Wikipedia <https://ja.wikipedia.org/wiki/微分積分学>

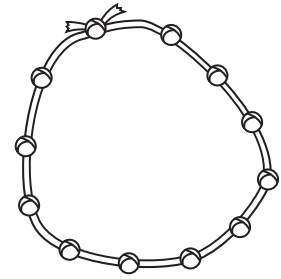


## ヒモを用いて、様々な図形を作る

例：

直角 直角三角形

→ ヒモを12等分し、ヒモがたるまないように3：4：5に分ける点を外側に引っ張る。



学生のアイデアの一例

(1) 直線

→ ヒモをたるまないように引っ張る。

(2) 円

→ ひもをコンパス代わりに。

(3) 正三角形

→ ひもを3等分した各点を外側に引っ張る。

(4) 正奇数角形

→ ひもを等分した各点を外側に引っ張る。

(5) 六角形

→ 正三角形を6個作って合わせる。

(6) 二等辺三角形

→ ひもを3：4：5にした直角三角形を2つ組み合わせる。

(7) ひし形

→ (3) の二等辺三角形を2つ組み合わせる。

(8) 平行四辺形

→ 3：4：5の直角三角形の長さが同じ辺同士を合わせる。

(9) 長方形

→ 3：4：5の直角三角形の斜辺同士を合わせる。

(10) 正方形

→ (9) の長方形を12枚並べる。

→ 4つの直角三角形を同じ長さの辺が正方形の各辺になるように並べる。

(11) 直角二等辺三角形

→ 正方形に対角線をひく。

(12) 四角錐

→ 正方形 + 正方形の一辺と同じ長さの底辺を持つ二等辺三角形4枚。

## 人工知能

第12回 身の回りに隠れている数学について考える1

(人工知能とは何か、身近にどのような人工知能があるのかについて考えた)

お掃除ロボット

全自動衣類洗濯物折りたたみ機

温冷感センサー付エアコン

- ・ スпам検知 ..... Email
- ・ 数字認識 ..... 手書き文字の認識
- ・ 顔検出 ..... デジカメ、自動顔認識
- ・ 音声認識 ..... 文字入力
- ・ 会話理解 ..... Siri
- ・ 商品推薦 ..... レコメンド機能
- ・ ネットワーク解析 ..... 知り合いかも？

問：「人工知能」に、どのようなイメージを持っていますか？

学生の回答の一例

- ・ 感情を持っているように見えて、すごく人間に似ているのですごく怖いと感じる
- ・ 便利
- ・ 将来人間の仕事を奪ってしまう
- ・ 話し相手
- ・ 管理できなくなったら大変なことになりそう
- ・ 新聞などでよく話題になっている

など

問：人工知能と聞いて、思いつくものを全てあげてください。

学生の回答の一例

- ・ 工場、介護、案内、掃除、将棋、囲碁などのロボット、
- ・ 映画館のチケット販売、無人レジ、コールセンター、
- ・ 校正ツール、電子地図、エアコン、自動調節のランプ、スマホ、指紋認証、
- ・ ゲームの対戦相手、車の衝突回避

など

問：今後、どのような人工知能が出てきて欲しいと思いますか？また、それは実現されると思いますか？

学生の回答の一例

- ・全自動の自動車・電車・タクシーや、家事（料理・掃除）ロボットは実現されそう。  
（医療用などの）クローンは実現されたら怖いと思う。  
荷物を持ってついてきてくれるロボットや毎日の着る服のコーディネートを決めてくれるロボットは、実現してほしいけど実現しそうにないと思う。
- ・朝と昼、または場所によって気候が違うことがあるので、（持っている服、TPO、その日の天気なども把握して）その日の服装を決めてくれる人工知能があったら良いと思う。
- ・運転ができないけどドライブがしたいから、全自動の車があったら良いなと思う。
- ・自分の考えてること、頭に思い浮かべたことが自動で文字になる機械が欲しい。
- ・（パソコンや携帯、スマートホンだけではなく）色々な物の場所を認識する知能。  
物ひとつひとつの情報を登録さえすれば実現できると思う。
- ・汎用型AI（人間の脳全体を模倣するもの）。今のAIは人間の脳の昨日の一部を模倣しているだけに過ぎないので、思考したり、多様な条件が交絡する現実世界の中で活躍するにはまだ至らない。ある機能に限定するのではなく、今後社会一般に利用されていくことを考えると、汎用的に様々な問題に対して対処することができるAIが必要になってくると思う。ただしルールを自分で見つけていく学習がもっと良い制度で行えるアルゴリズムが発見されないと、汎用型AIはしばらく実現できないと思う。
- ・紙の本を読み込んで、必要な言葉を検索できるもの。ニーズはかなりあると思う。
- ・陸、海、空で使える、一人乗りタクシー。
- ・持ち運べるエアコン（涼しくする範囲を決めて使える）。
- ・人間くさく相談に乗ってくれるAI。その人の精神状態などを詳細に分析し、複雑な心境も分かってくれる。人に言いづらい（けど1人で抱え込むのもしんどい）ような内容などもコンピュータ相手だと思えば気軽に話すことが出来て良いのではないかと思う。
- ・冷蔵庫の中にあるものを言うだけで、その材料で作れるレシピを教えてくれるAI。
- ・手持ちの服を画像データとして登録して、したいコーディネートを言うと登録されている服の中でそれに合わせたコーディネートを提案してくれるAI。

## 3Dデータ

第13回 身の回りに隠れている数学について考える2  
(3Dデータとはどのようなものかについて考えた)



## 映像・画像

記録・解析

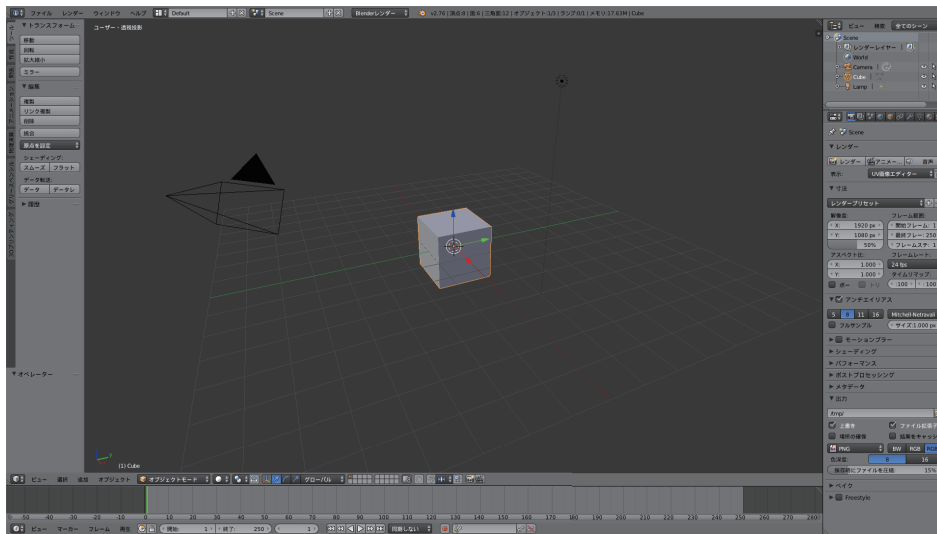
可視化・医用画像

コンピュータグラフィックス

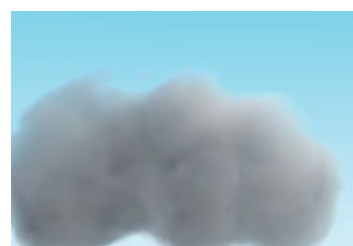
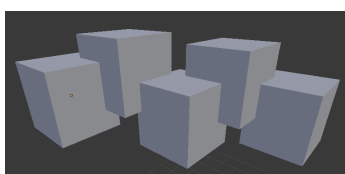
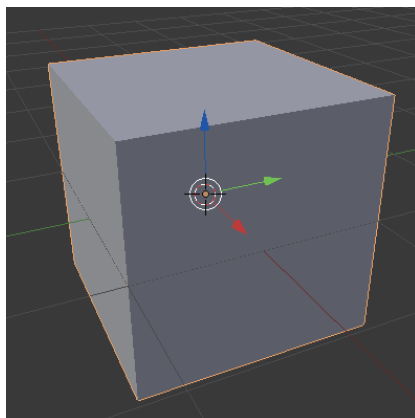
シミュレーション

# Blender

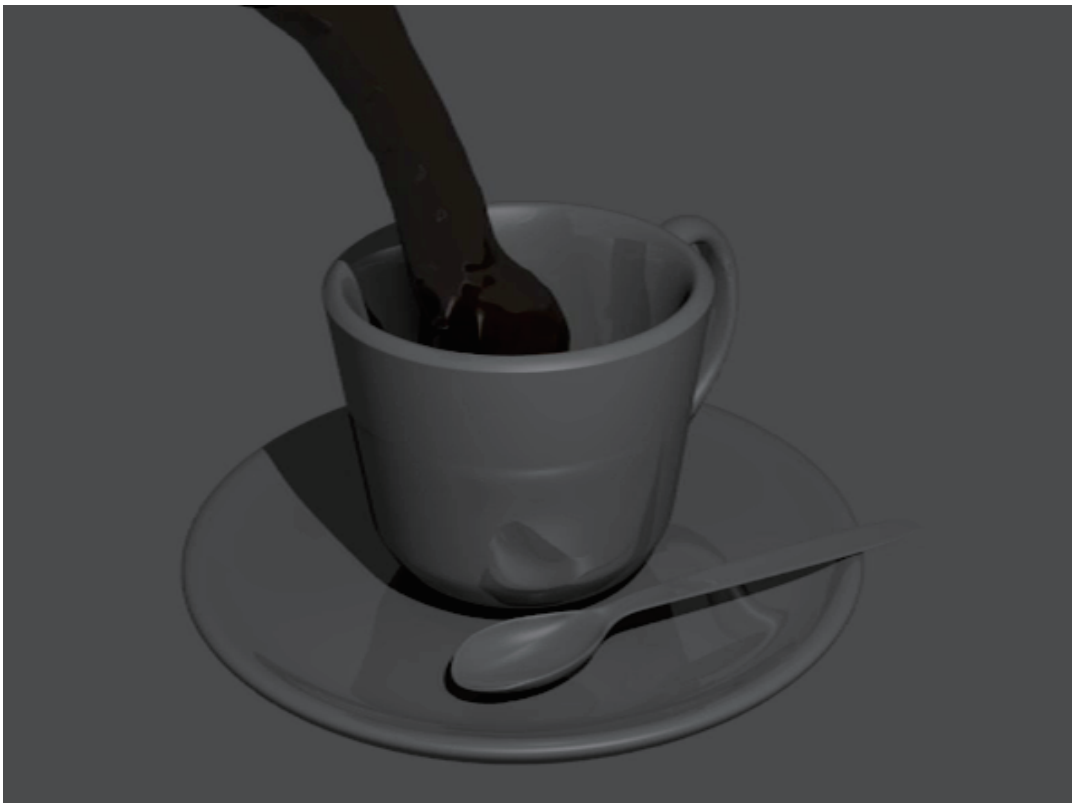
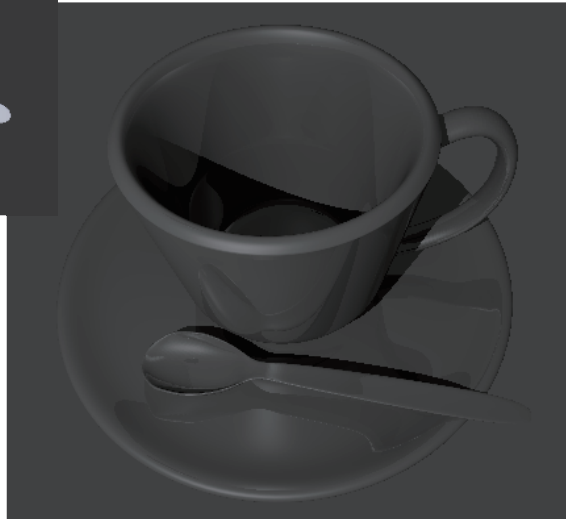
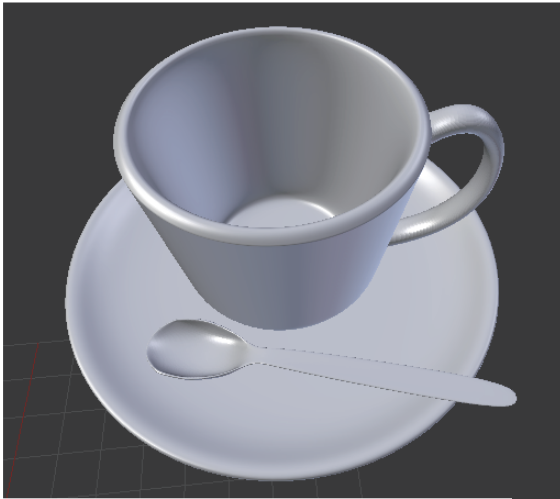
<https://www.blender.org/>

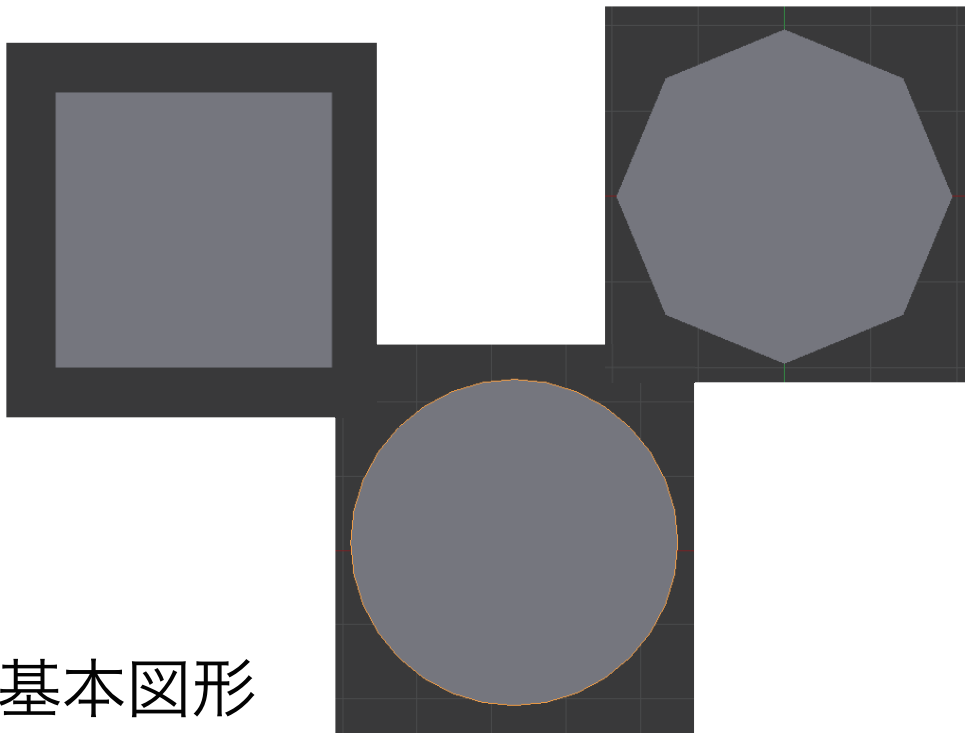
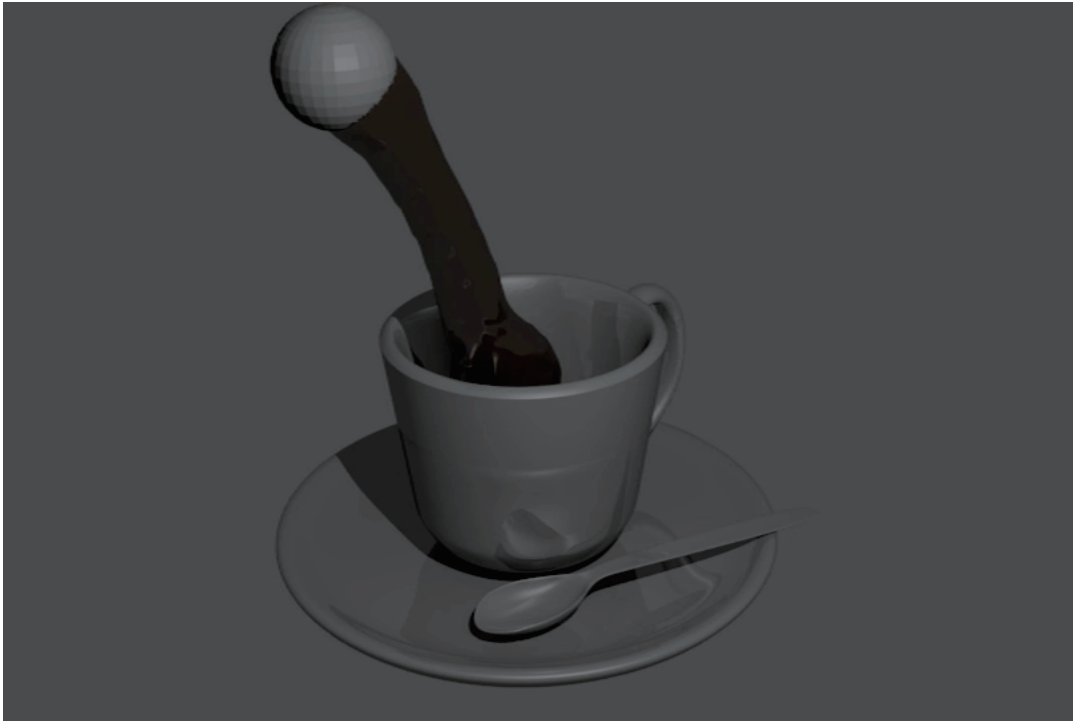


オープンソースの3次元コンピュータグラフィックスソフトウェアの一つで3Dモデルの作成、レンダリングのほかアニメーション、コンポジット機能も備える。

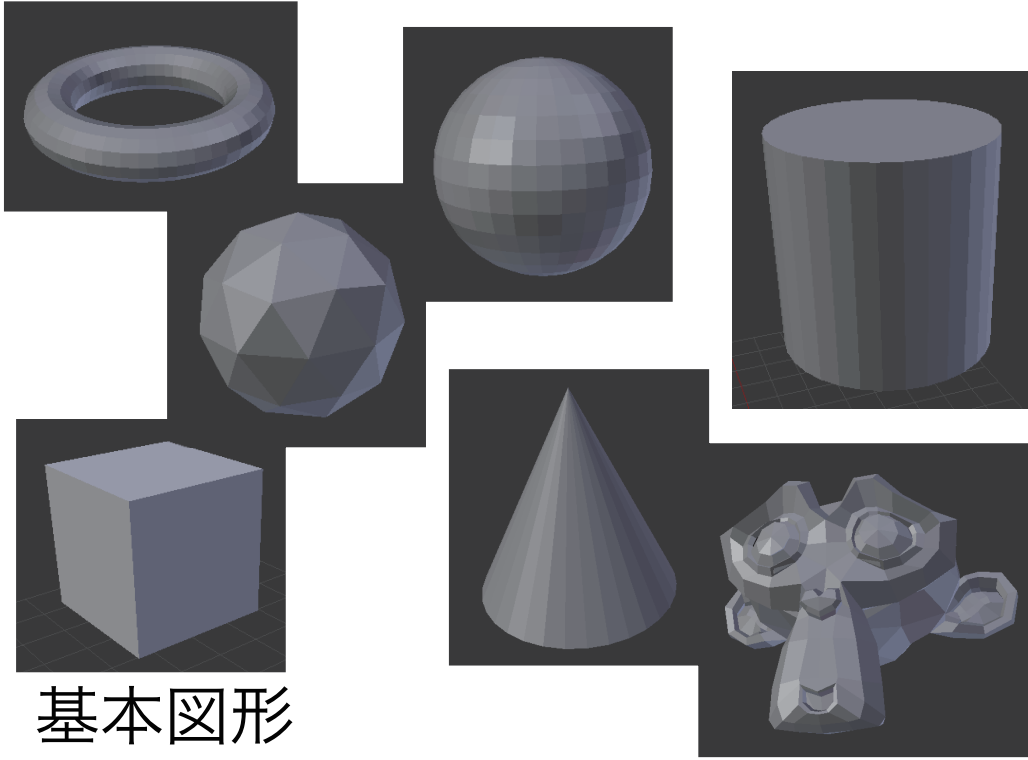




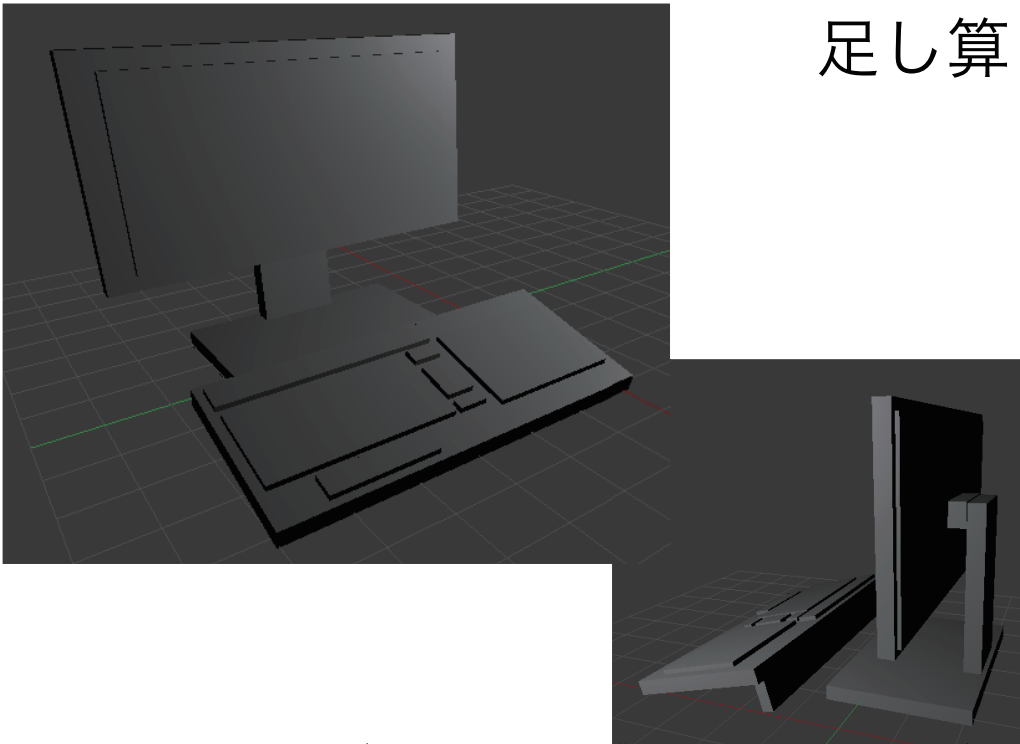




基本図形

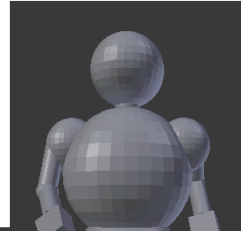
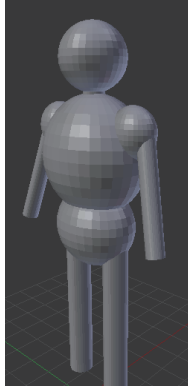
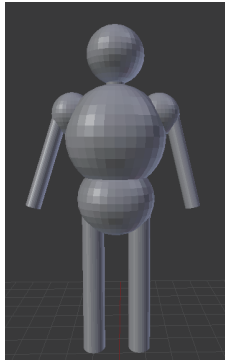


基本図形

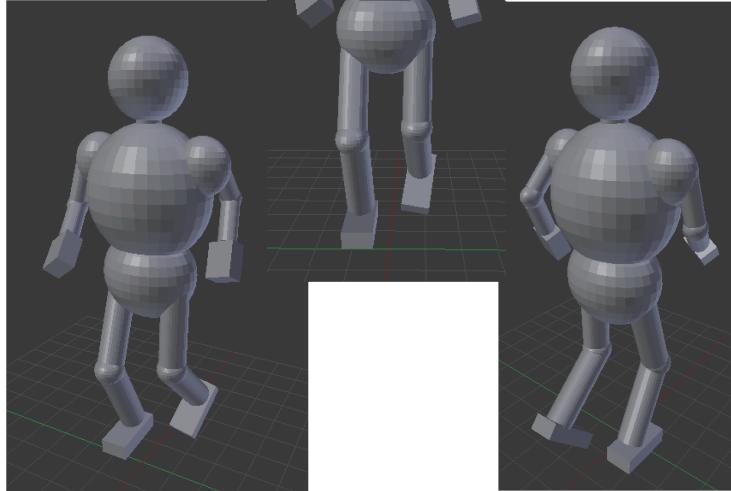


足し算

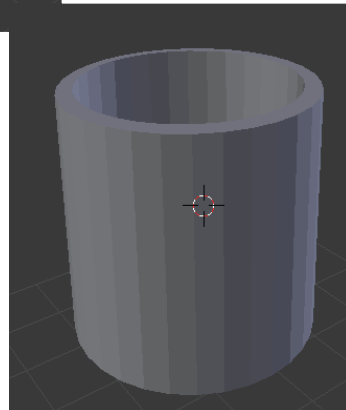
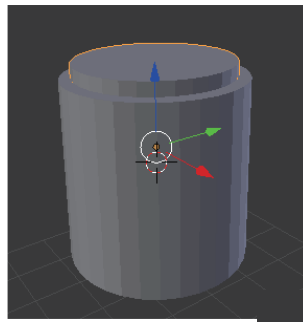
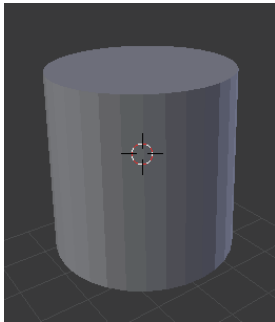
テキスト：Blenderスタートアップガイド - オープンソースで作る3Dモデル、アニメーション、ゲーム



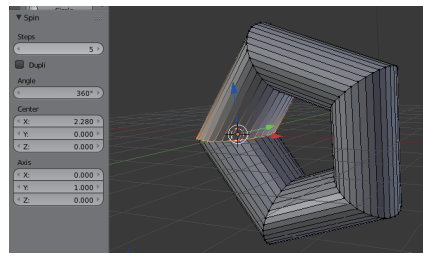
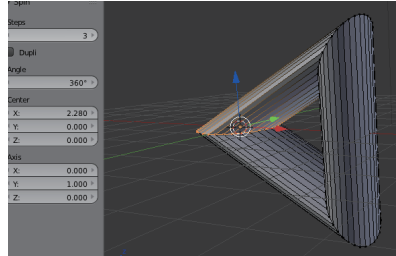
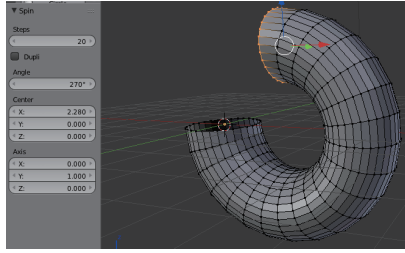
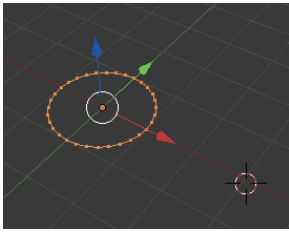
足し算



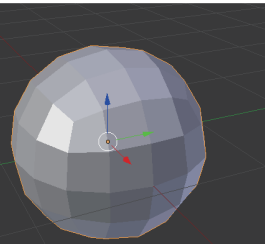
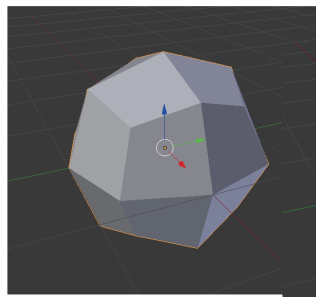
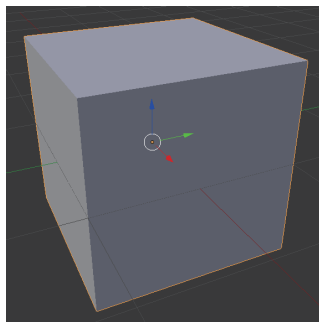
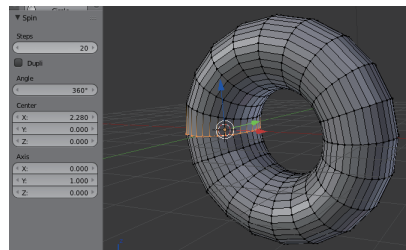
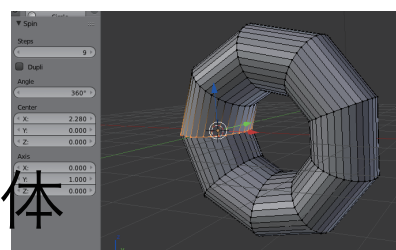
テキスト：Blenderスタートアップガイド - オープンソースで作る3Dモデル、アニメーション、ゲーム-



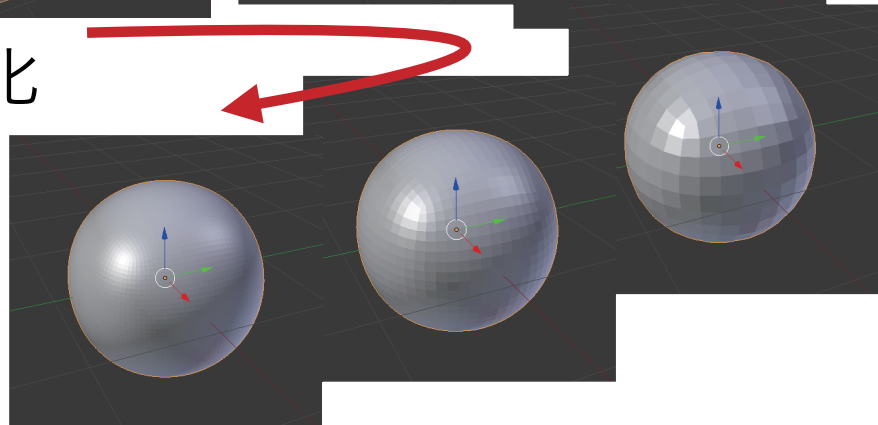
引き算



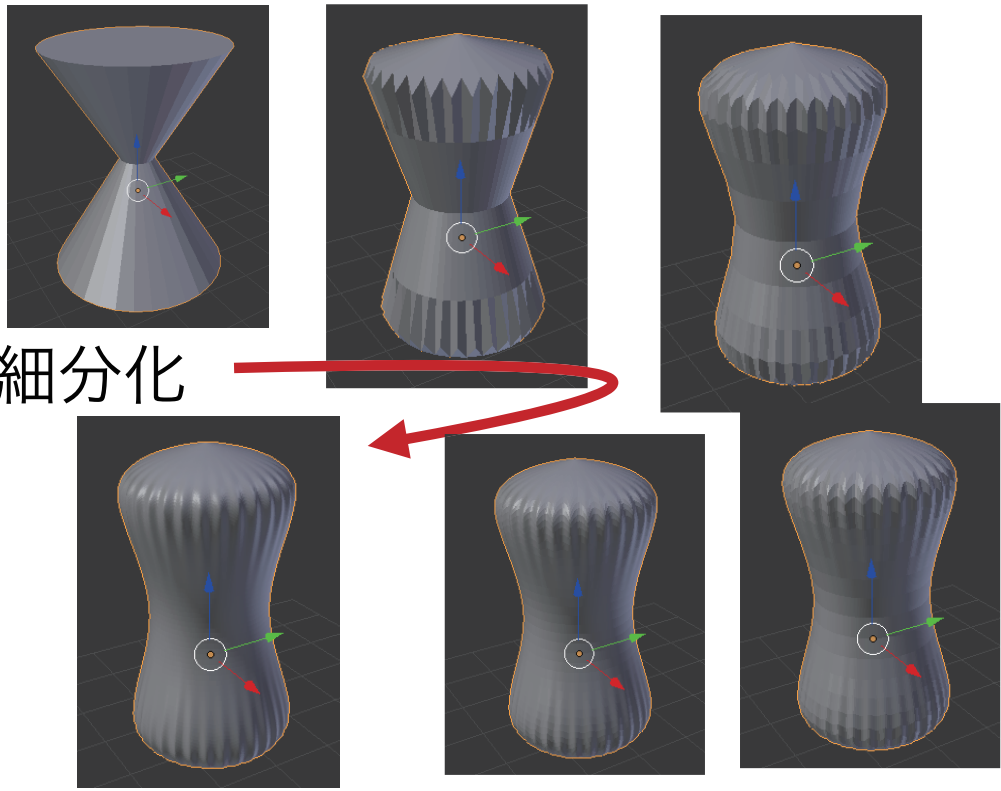
回転体



細分化

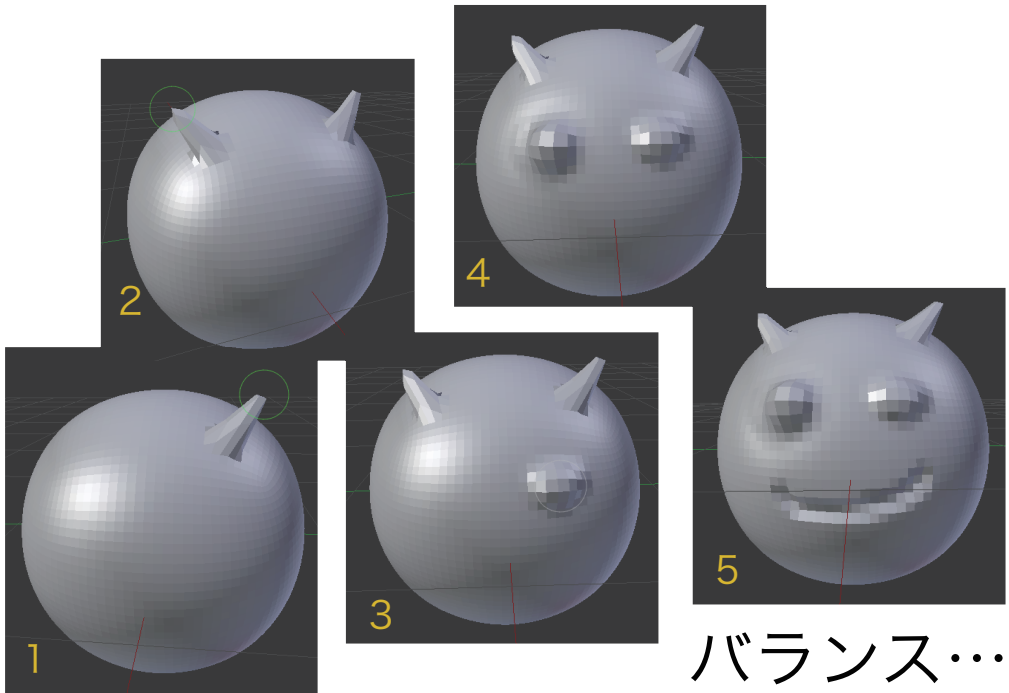




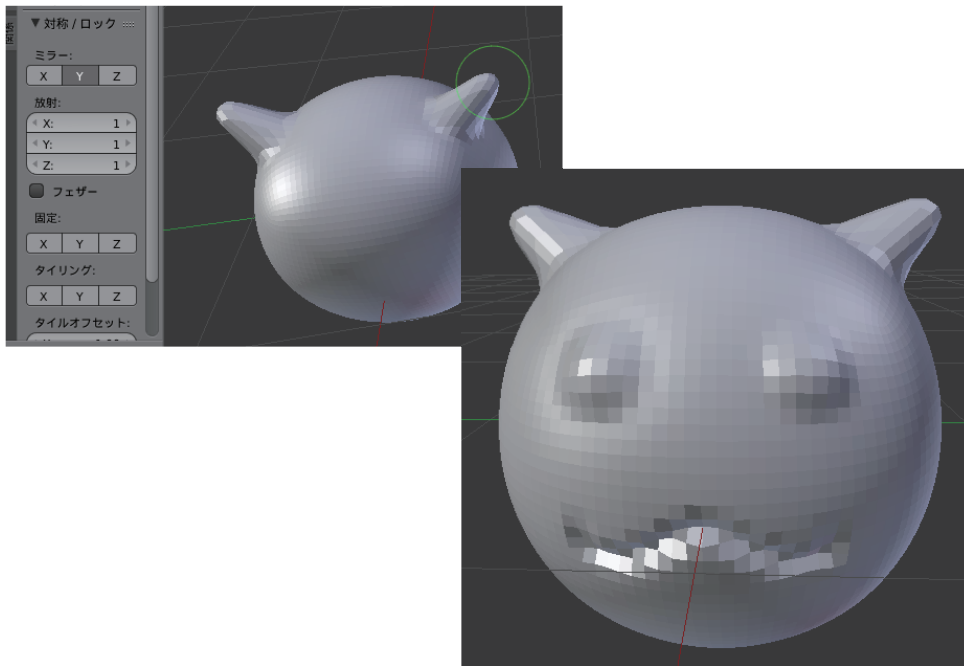


細分化

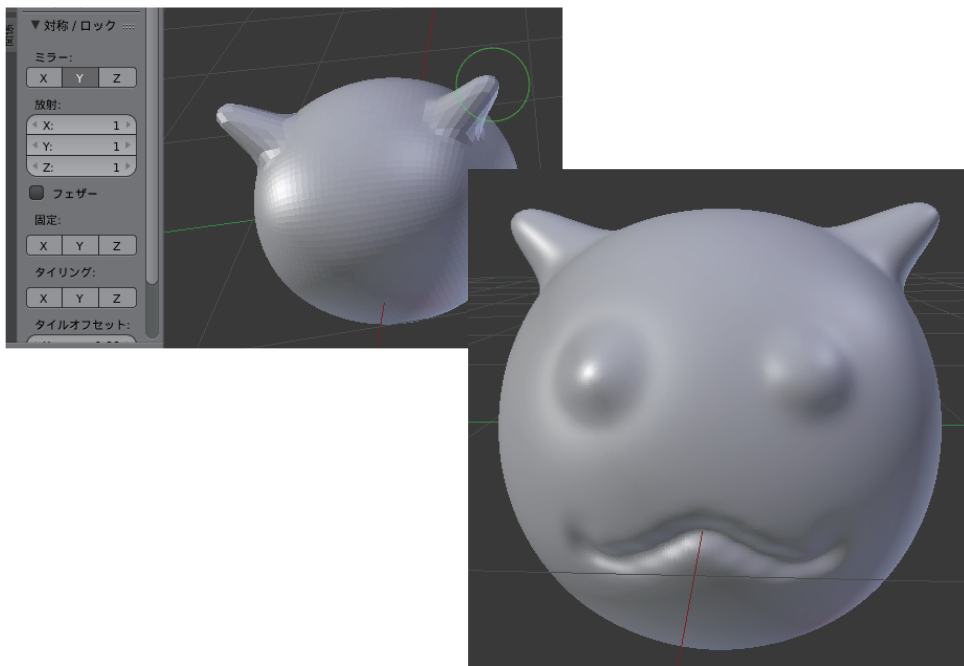
## スカルプ (彫刻) モード



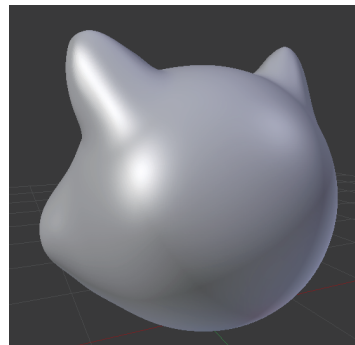
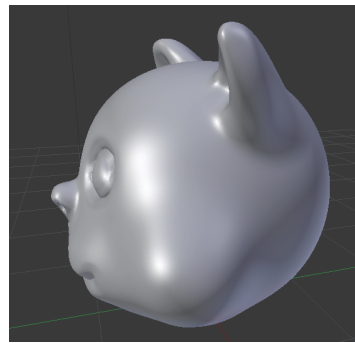
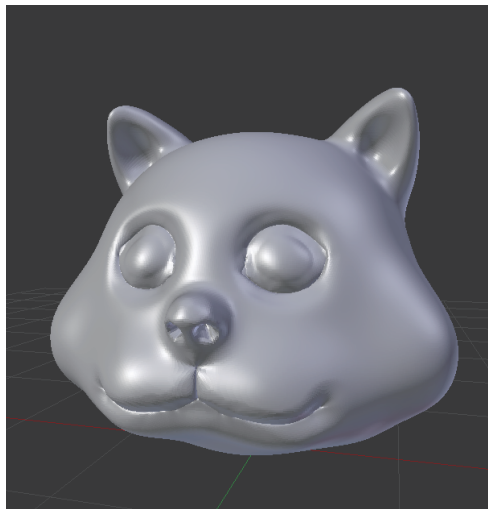
バランス...



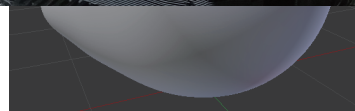
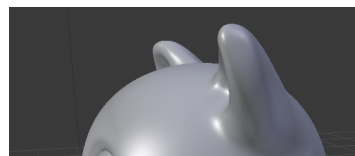
y軸に関して対称



細分化



テキスト : Blenderスタートアップガイド -オープンソースで作る3Dモデル、アニメーション、ゲーム-



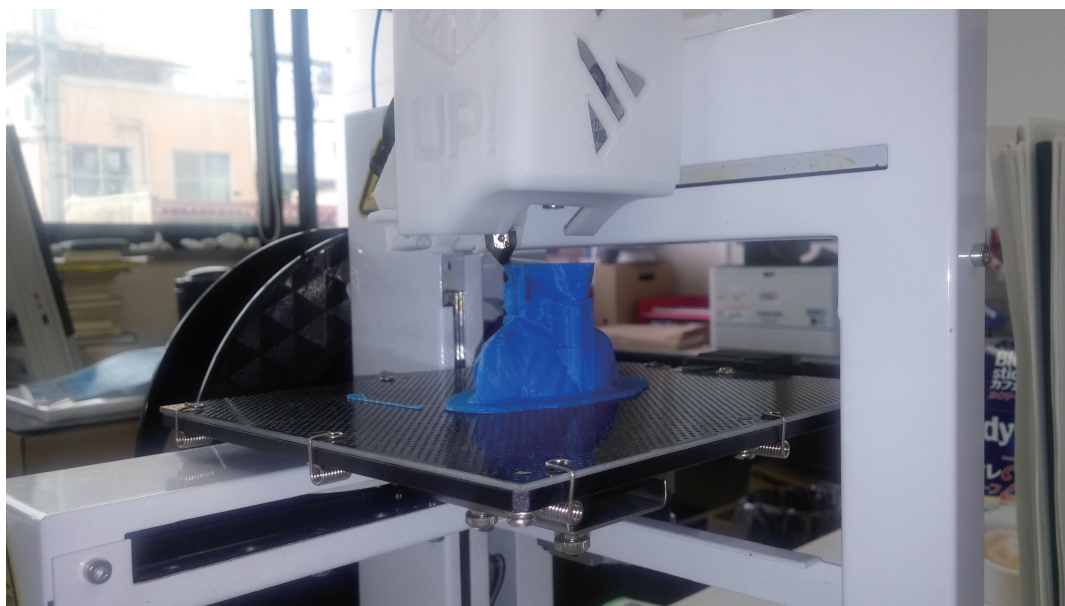
テキスト : Blenderスタートアップガイド -オープンソースで作る3Dモデル、アニメーション、ゲーム-

## 3Dプリンター・3Dスキャン

第14回 物の形を考える1

(3Dスキャナ・3Dプリンタを実際使用し、3Dデータを出力した)

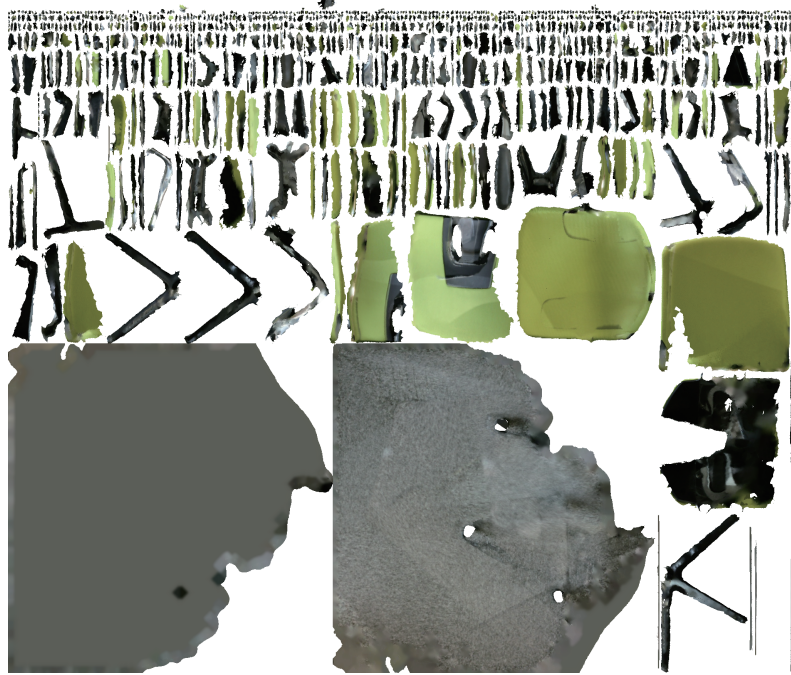
# 3Dプリンター



# 3Dスキャナー



## スキャンによる3Dデータの作成



これは何のデータでしょうか？



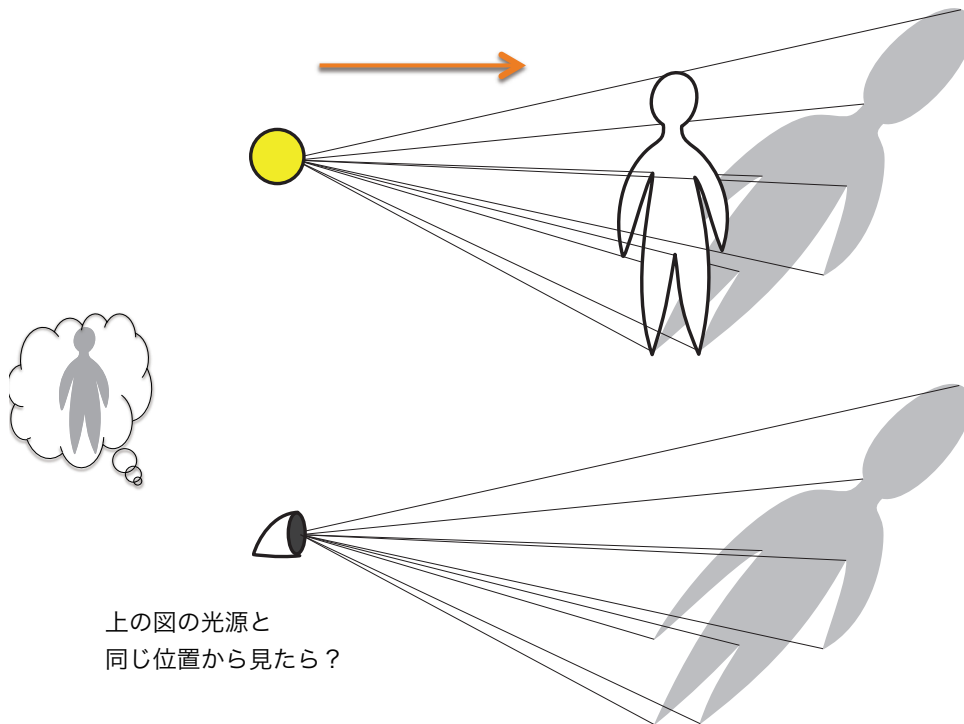
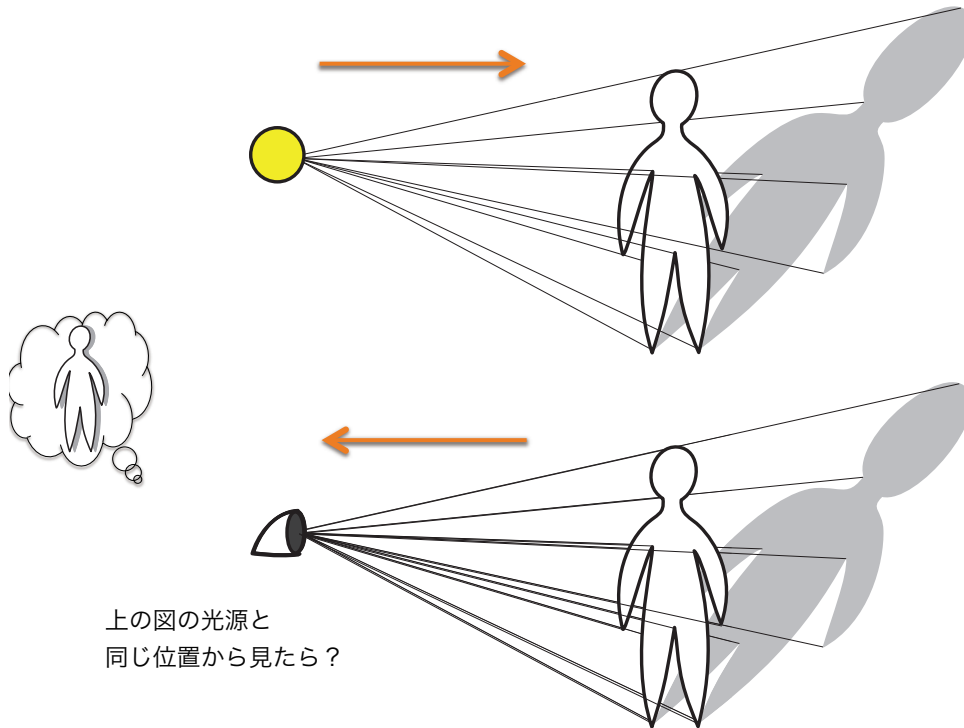
正解：私の職場のイスと、ちょっと床

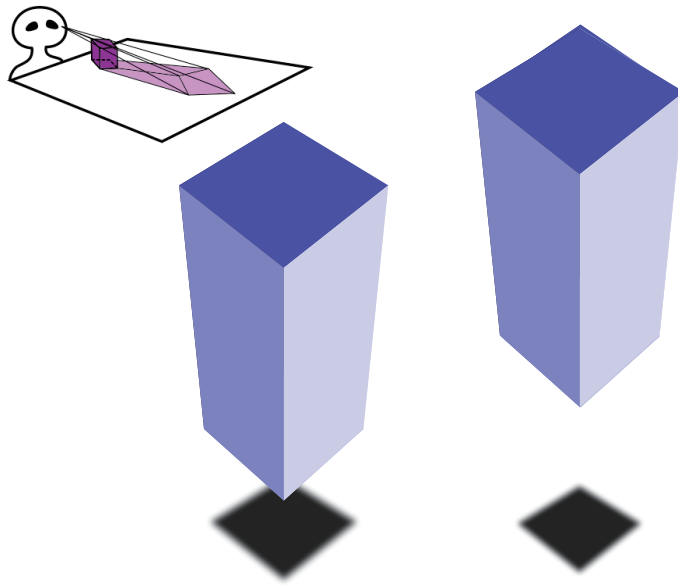


## 3Dアート

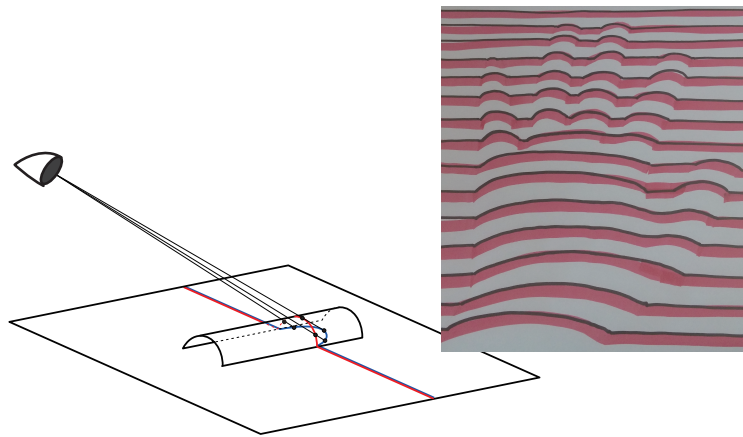
### 第15回 物の形を考える2

(立体がどのように見えているかを考え、3Dアートを作成した)

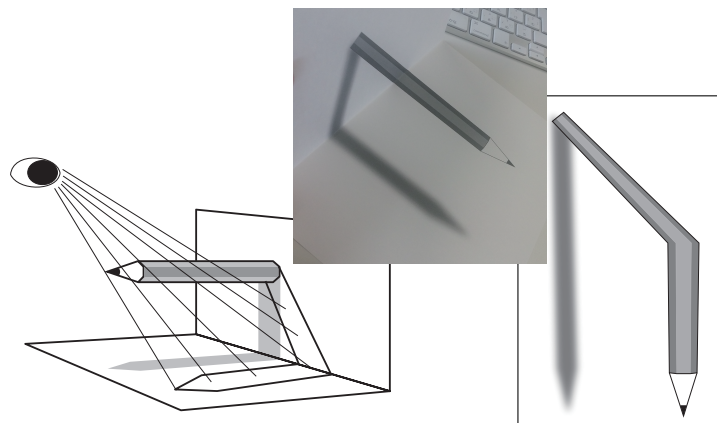




### 3Dアート



### 3Dアート



## 最終レポート

(1) この授業でよかったこと、またこの授業で改善を望むことを書いてください。

- ・一般教養の授業の中で、この授業のようにディスカッション形式の授業はなかなかないと思うので、その点ではとても良い授業だと思いました。前半の科学についての授業で毎回課題が出るのは正直きつかったです。
- ・<前半>今まで科学について考える機会が少なかったので、曖昧だった背景知識を整理することができました。レポートやプレゼンに早い時期から取り組めて良かったです。課題や問の意図がわかりにくく答えづらい部分もあったので、その部分の改善をお願いします。  
<後半>先生との距離感が近く話しやすかったです。授業で取り上げる内容も身近で興味が湧く内容でした。数学にあまり興味がなかったのですが、少し数学のことを見直しました。来年も楽しい授業でがんばってください！
- ・どの回の授業もとても興味を持てるものでした。  
前半の授業では自分の考えを言うことで、それまでに考えるプロセスが必要だったので、色々なことを考えることができてよかった。また他の人の意見を聞くことで、そんな意味もあるのか、そんな考え方があるのか、と、発見があり、それに対する自分の考えを深めることができたのもよかった。ただ物理などの計算は難しいものも多く、どの学部でも受けることができる授業だから、それはなくても良かったのではないかと思った。  
後半の授業は、毎回の授業に行くのが楽しみなくらい楽しくて、とても良かった。毎回の授業で不思議と発見があり、一回一回の授業でしたことが印象的のためになった。また体感できるものも多く、数学は今まで紙の上のつかめないものだったので、今回の授業で面白さを知れた。
- ・毎回の授業が楽しかったです。特に後半の授業の、3Dプリンターや、錯視が面白かったです。身近な気になっていることに触れられたので役に立ちました。毎回月2が楽しみでした。エネルギーの授業では、小学校～高校で少しずつ触れてきた内容のいい復習や、より深く知れるいい機会となりました。全体的に「へー！」となることを知れて良かったです。半期ありがとうございました。
- ・最初から最後まで楽しかったです。ちゃんと考える時間もあって、行き詰まったら友達と相談できる環境も良かったです。
- ・実際に手を動かしての学習というのは初めての経験だったので、とても楽しかったです。一本のひもで色々な図形を作ったり考えたりも楽しかった。特に3Dプリンターはとてもわくわくした。見たのもさわったのも初めてだったので、自分でスキャンしたり、スキャンされたり、完成したものを色々な方向から見ることで、改めて新しい発見ができました。

- ・授業内容が面白く、興味を持てるが多かった。学生に意見を求めることが多く、全員が授業に「参加している」という状況が良かった。また、意見が求められたとき、何か答えがあるものについて聞かれることがほとんどなく、自由に自分の意見を述べて良いという雰囲気が良かった。前半の先生は少し課題が多かったように思う。
- ・少人数だったのは個人的には良かったです。
- ・プロジェクターで写すタイプではなく電子黒板だったのでスライドが見やすかったです。
- ・前半・後半共に自分で考える機会が多い点も良かったです。
- ・「サイエンス」だけど文系にもやさしい内容だったので安心しました。
- ・どんなに拙い回答や意見でも先生がしっかり聞いてくれたのが良かったです。
- ・前半で使用したブックレットが少し読みづらかったです。
- ・前半の、1回の授業で使用されるスライドの数が少し多いかなあと思いました。
- ・少人数なので話し合いやすかったです。3Dプリンターを実際に使って模型を作ってくれて分かりやすかった。ベーシックサイエンスの前半は来るのがとてもつまらなかったけど後半は楽しいこともあって来るのが辛くなくなった。でもレポートがほぼ毎回あるのはめんどくさかった。
- ・前半は真面目な感じで意見を言いにくかった。あと、内容が難しかった。前で発表するのも人前に立つのも苦手なのでしんどかった。

(2) その他の意見、感想、提案など自由に書いてください。

- ・約半年間ありがとうございました。同じ部活の仲間たちと授業を受けていましたが先生方は小学生みたいにするさい集団に対してもしっかり反応してくださり、私達も授業を受けていてとても楽しかったです。
- ・3Dプリンタの話から立体の見え方、3Dアート…と話がつながっていたので分かりやすかったです。
- ・錯視のガレージは時間があるときに組み立ててみたいです。
- ・実際に手を動かして何かを作ったり考えたりする授業のやり方が新鮮で楽しかったです。
- ・せっかくiPadが人数分あるので、それを活かしてもいいと思いました。
- ・wi-fiが繋がりにくいのを改善してほしいです。
- ・とても楽しかったです。ありがとうございました。
- ・みんなでわいわい話しながら考えてできたのがすごく良かったなって思いました。少し私語しすぎてたかな?と、ちょっと反省しました。
- ・授業内容には関係ないですが、終わる時間が少し遅くていつも食堂のお楽しみランチが食べれなくて残念でした。
- ・同じベーシックサイエンスを受講している他学年の子とも仲良くなれて嬉しい。
- ・毎回Z棟に行くのは遠いから奈良女の敷地内にして欲しい。課題の提出先が部屋の中なので提出時間が限られていて出すのに苦労したので、学務課や、部屋の外にボックスを設置して欲しい。
- ・前半のエネルギーに関する内容は、身近なものではあるけれど、ひとつの問題として捉えるとなると規模の大きなものにもなるので、考えたり意見を述べたりするのが難しいと感じた点が多々ありました。それでも、エネルギーについて考える良い機会になりました。
- ・後半の数学は、初めこそ「難しい問題を解かされたりするんじゃないか」と身構えたけれど、いざ授業が始まってみると、数学が苦手でも興味を持てるような内容で、受験数学に苦しんだ身としては、「ああ、数学ってこういうものだったんだ!」というふうに、数学の本質を再認識できたように感じました。
- ・参考文献が会員制なのはどうかと思う。あと少人数なのは良いけど、あるグループがかたまっても話したりしていたら、その人達が沢山意見を言って、1人で受けに来ている私みたいな人は発言しにくいなと思った。
- ・3Dプリンタで作ってくれた模型がすごく、友達みんなに自慢した。自分でも作ってみたくなった。



## 感想

今年度のベーシックサイエンスI(後半)では小学校から高校までの間に学んできた算数・数学についての振り返りを始めとし、近年ますます身近な存在になってきているAI(artificial intelligence, 人工知能), 3Dスキャナ・3Dプリンタを主として、身の回りにある数学などについて考えた。授業の前半, 算数・数学についての振り返りにおいては,

- ・ どうして足し算より掛け算を先にしなければならないのか
- ・ どうして分数の割り算はひっくり返してかけるのか

などの幾つかの疑問を取り上げそれらを「自分の言葉で説明をする」ということを目標に議論を行った。特に算数・数学に関する話し合いの中では、数学が苦手だという学生だけでなく、高校までの数学はよく理解できていたという学生からも、理解せずに(深く考えずに)暗記していただいだけのもの(ルールや公式等)が実は多いことに気付いた、という発言があった。私自身、特に中学・高校の頃の数学の学びに関して同様の経験がある。もちろん最初から何の疑問も持たずに「暗記」していたわけではなく、算数の範囲では素直に感じる事が出来ていた疑問も、中学・高校の数学の範囲では内容にともなう疑問も徐々に複雑になり、自分の中で質問をまとめることができないまま終わってしまうということが重なってしまったのだ。その結果、数学を学ぶ過程ですんなり解決することが出来ない疑問に出会ってしまった場合に、とりあえず暗記することで次のステップに進むことができたという経験をしたことが「暗記」のきっかけだったように記憶している。もちろん大学以降の知識を用いないと完全には説明できない部分もあるが決してそれだけではなく、十分に時間があり、納得するまで悩んでも良い環境であれば、解決することが出来た内容もあったのではないかと感じている。学校の授業や試験等ではどうしても時間に制限があり全ての疑問に対して考える時間を十分に確保することは難しいため、このような経験がある人は実は多いのではないだろうか。またこれに関連して、授業内で行ったアンケートにいくつか気になる解答があった。

- ・ 試験は時間制限があるのが苦しい
- ・ もっと時間があってじっくり考えることができていたら数学が好きだっただろう
- ・ 浪人したときに時間制限を外して取り組んだことでそれまで解けなかった問題がとけたことがきっかけで数学が少し好きになった

数学が得意ではない・好きではないという学生のこのような解答は、数学が楽しいという事は知っているが、授業や試験での数学は全くの別物だったという意見ではないかと感じた。これらの意見からは授業や試験における時間の制約が数学の楽しさを覆い隠してしまっているような印象を受けたと同時に、限られた時間内に正解を出せるかどうかで能力が測られるような数学ではなく、時間を確保して数学を自由に体験する機会さえあれば、数学の楽しさを知り、数学を好きだと言える人が増えるのかもしれないという可能性を感じた。

授業の後半は身の回りにある数学を題材にした。数学だけではないだろうが、「なぜこんなものを学ぶのか」「これを学んで将来何の役に立つのか」「社会でどのように活用されているか」というような問は昔からあり、それに対する解答もさまざまである。このような問

は、学問が自分たちの生活の中の何かと結びついているという実感が持てない場合に生じるのではないかと感じている。「面白くもない上に役にも立たないものを学ばされている」と感じてしまっているのだとすると、たしかに自然な問である。さらに数学では数式や図形など抽象的な対象を扱っていることもあり、実際に生活の中で扱ったことがなければ、直接生活と結びついているということを実感するのは決して容易なことではない。これらのことについて考える機会を持ってもらうため、身の回りにある数学について授業で扱うことにした。個人的には、身の回りにある数学は以下の2つに分けることが出来ると考えている。

- ・様々なものや現象に潜んでいる数学
- ・物理学, 工学, 気象学…など, 役に立つ数学

現在はテクノロジーの進化が著しく、実現が難しいと思われていたような技術がここ数年で急激に増えてきている。ユーザインターフェイスもこれまでとは比べ物にならないほど直感的に扱いやすい形（触れる・話しかける・ジェスチャーなど）で、一般家庭にまで浸透し始めている。これらの技術について学生がどのような認識を持っているのかをはじめとして、2種類の身の回りにある数学のうちの後者としてそこで数学がどのように役に立っているかなどについて考え、体験する時間を設けた。

今回の授業では現在多くの学生が活用しているSNS等に注目したが、今後はさらにAIの進化が加速し、人々が生活の中で直接テクノロジーを通して数学と関わる機会が増えていくのではないかと考えられる。我々の生活と数学との関係がどのように変化していくのかについても注目していきたいと思う。

## 参考文献

- [1] 「Blender.jp」 <https://blender.jp/>
- [2] 「Blender スタートアップガイドーオープンソースで作る3Dモデル、アニメーション、ゲームー」 ボーンデジタル出版, ランス・フラベル (Lance Flavell) (著), 平谷早苗 (編集), 永井勝則 (翻訳).
- [3] 永野裕之 (2013), 「永野数学塾塾長日記 高校数学の内容(新課程)と数学史」  
<http://blog.donaldo-plan.com/archives/3535>
- [4] 「高校数学を100倍楽しく 対数は地震にも音楽にも理科のpHにも使われている!」  
<http://enjoymath.pomb.org/?p=1216>
- [5] 「数学B」数研出版(2012)
- [6] 「高校数学の美しい物語 音階と数学」 <https://mathtrain.jp/onkai>
- [7] 「Wikipedia 微分積分学」 <https://ja.wikipedia.org/wiki/微分積分学>

## 1. 幾何学のイメージ

私たちは中学校や高等学校の数学の授業で幾何を学びます。幾何は古代エジプトの時代から研究され、数学者ユークリッドにより『原論』という書物にまとめられました。私たちが学校で学ぶ幾何もこの『原論』の体系に含まれるもので、ユークリッド幾何学などと呼ばれることがあります。本稿では私たちに馴染み深いユークリッド幾何学とは別の幾何学である「非ユークリッド幾何学」について考えてみたいと思います。

非ユークリッド幾何学を導入するには、そもそも幾何とは何か、という問いを考える必要があります。実はこの問いに対する一定の答えを現代の数学は持っているのですが、ここではすぐにそのような立派な答えに進むのではなく、この授業の受講者の皆さんが自分なりに持っている「幾何学」のイメージや、授業で記憶に残っていることを聞き、幾何とは何かについて考える出発点とすることにしました。

### Aさん（文学部）

「中学の時に定規やコンパスで作図をしたことを覚えている。」

私が正三角形の作図法について例として説明したところ、

「自身で三角形の内心や外心を作図した」

とコメントしてくれました。さらに、コメントの内心や外心の作図には、2点の垂直二等分線や角の二等分線などの作図を使用していたことを確認しました。

### Bさん（文学部）

「大理石の模様」

これは大理石によるタイル張りなどの幾何学模様のことを指しているようでした。

「万華鏡」

これも上の大理石と同様に、繰り返しパターンに幾何学を感じているとのことでした。そこで、正三角形によるタイル張りの絵を描き、線対称や点対称など、どのようなパターンが生じるのか簡単に確認しました。

「三平方の定理」

ピタゴラスの定理という呼び方も受講生の皆さんは知っていました。授業で習ってしまうと当たり前の事実のようにも感じられますが、よく考えてみると直角三角形という図形の辺の長さが、掛け算と足し算を使った簡単な公式で結びついていることの不思議さについて、私がコメントしました。一番簡単な  $3^2 + 4^2 = 5^2$  の例について復習し、巻き尺で直角を作る方法になっていることを思い出しました。

「中点連結定理」

定理の内容が、三角形の2辺の中点を結んで得られる線分が残りの辺と平行になる、という

ことを確認しました。さらにこの受講生は、新しい線分の長さが残りの辺の長さの半分になっていることもよく覚えていました。私が、この定理は内容もさることながら言葉として覚えやすいという印象を語ったところ、受講生も同じ印象のようでした。

Cさん（理学部）

「ユークリッドの『原論』」

これはこの受講生が大学に入ってから学んだことかもしれません。まさにこれから取り上げようとしている事柄でしたが、授業の際にはその時点ではあまり深入りせずに、歴史的な書物としてそのようなものがあることの確認にとどめました。

「オイラーの多面体公式」

これは、多面体が与えられたとき、(点の数) - (辺の数) + (面の数) が常に2と等しくなるというものです。高校までの数学の内容ではないので、受講生が大学に入って学んだことかと思われます。他の受講者は内容を知らないと思われるので、定理の内容を説明し、立方体の例では点は8個、辺は12本、面は6枚なので  $8 - 12 + 6 = 2$  となっていることを説明しました。さらに四面体や六角柱の例でも計算を行ってみて、やはり2になっていることを確認しました。この受講生は、そもそもこのような定理を考えた動機が不思議だという感想と、証明を知りたいということを述べてくれました。

Dさん（理学部）

「一筆書き」

これが幾何学なのかわからないと断ってからのコメントでした。パズルとしての一筆書きについて確認した後、関連して大学の数学の専門科目である「グラフ理論」におけるオイラーの定理について聞いてみたところ、既に知っているようでした。オイラーの定理とは、頂点と辺でできた図形（グラフ）が与えられたとき、すべての点において接続している辺の数が偶数個ならば、すべての辺をちょうど1回通って出発点に戻ってくるグラフ上の進み方があるというのですが、専門的になるので詳しい説明は本稿では省略します。Cさんの「オイラーの多面体公式」と、Dさんの「オイラーの定理」のオイラーは同じ人物で、18世紀に活躍した数学者であることをコメントしました。

Eさん（理学部）

「ポアンカレの定理」

理学部の専門の授業で最近習ったとのことでした。ただし定理の内容を覚えているわけではなく、当該の専門の授業も内容よりは歴史的な面にスポットを当てているようでした。私からは、ポアンカレは20世紀前半に活躍した数学者であることをコメントしました。また、幾何学における「ポアンカレ予想」というものが21世紀になって大きな進展を遂げ、数学全体で話題になっていたことを簡単に触れました。

Fさん（理学部）

「黄金比とフィボナッチ数列」

黄金比などが自然界にも現れることを大学の授業で習ったとのことでした。A4などの紙の

縦横比と黄金比との関係を確認しました。また、フィボナッチ数列の定義を復習し、フィボナッチ数列の2項の比が黄金比に収束するということをコメントしました。

上記の6通り答えは非常に興味深いものです。この授業の時点ではまだ何も説明をしていない本稿のテーマ(非ユークリッド幾何学の一つである双曲幾何学)に至る道には何通りもありますが、上の学生のそれぞれの答えが今回のテーマにつながっています。

- A) 作図問題からのアプローチ
- B) タイル張りなどの対称性からのアプローチ
- C) ユークリッド幾何学の公準(の否定)からのアプローチ
- D) グラフ理論からのアプローチ
- E) ポアンカレ予想など位相幾何学からのアプローチ
- F) 数列とその2項の比など周期性からのアプローチ

それぞれ数学的に意味がありますが、この授業ではまず自分の手を動かして(まだ何も説明をしていない)もう一つの幾何学を体感するため、阿原一志氏による「ハイプレイン」を学ぶことにしました。

## 2. ハイプレイン

### 2-1 紙工作によるハイプレイン

「ハイプレイン」は阿原一志氏により2000年頃導入された多面体です。立方体は正方形からなる多面体で、正四面体や正八面体などは正三角形からなる多面体ですが、ハイプレインは63度、63度、54度という二等辺三角形からなる多面体で、各頂点の周りには63度が6つ集まるか、54度が7つ集まるかのどちらかのみとなっているものです。面の数は一定ではなく、上記の条件をみたす多面体の総称がハイプレインです。

上で与えられた角度に関する条件を、私たちがよく知っている多面体について考えてみます。正四面体のそれぞれの頂点のまわりには正三角形の角が3つ集まっているので、頂点のまわりの角度の和は $60 + 60 + 60$ で180度となっています。立方体の頂点のまわりには正方形の角が3つ集まってきているので、頂点の周りの角度の和は $90 + 90 + 90$ で270度です。同様に、正八面体、正十二面体、正二十面体の場合はそれぞれ240度、324度、300度になっています。どれも360度より小さくなっていて、これが多面体の曲がり方と関係しています。

ではハイプレインの場合はどうなっているのでしょうか。63度の角が6つ集まると合計は378度ですし、54度が7つ集まっても合計は同じく378度です。360度よりもやや大きくなっていますね。通常の多面体の頂点のように角度の合計が360度より小さくなっている頂点を「正の向きに曲がった頂点」とよび、360度より大きくなっている頂点を「負の向きに曲がった頂点」とよぶことにすると、ハイプレインは負の向きに曲がった頂点からなる多面体ということが出来ます。



この授業では紙工作で実際にハイブレインを作成してみました。まずは63度、63度、54度の二等辺三角形をたくさん描いた紙を用意します。

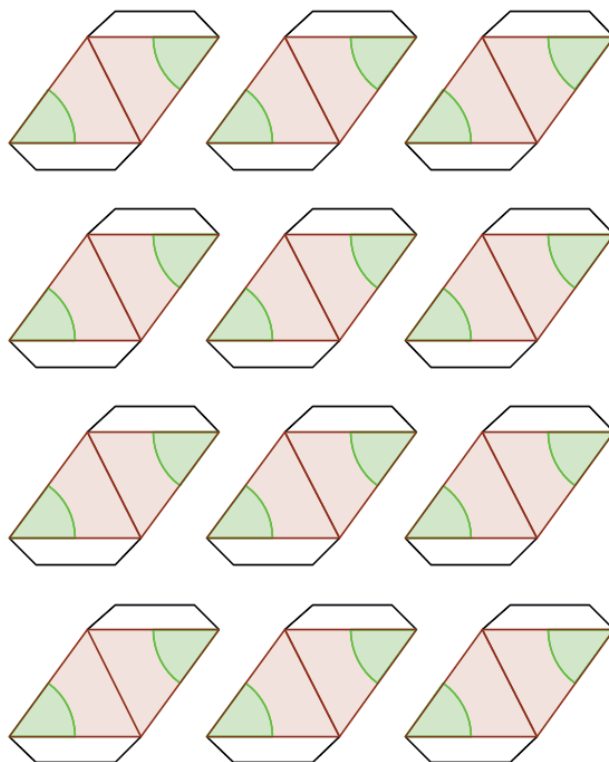


図1 ハイブレインの台紙の例

2つの63度の角に挟まれる辺を底辺とすると、上の図では三角形の2つのコピーを底辺で張り合わせた状態になっていて、扇型のしるしがついている角が54度の角です。また、三角形の横についている細い台形はハイブレインを作成する際にのりしろとして使う部分です。これを切り取り、ハイブレインの条件に合うように張り合わせていきます。

各頂点のまわりの角度の合計は378度なので、各辺のところで適当に折り曲げながら三角形をつなげていくのですが、どうしても山折りと谷折りが混ざったようなモコモコとした感じになります。最初のうちはそれなりにうまく張り合ってくれるのですが、続けていくうちにだんだん作業がやりにくくなってくるのを参加者のみなさんも感じているようでした。また、正多面体と違って出来上がる多面体は一通りでありません。頂点の周りの局所的な条件しか指定していないことと、曲がり方が負の方向であることにより、全体の形には様々なバリエーションがあることが、作業をしていくうちに感じられます。次のページに実際に作成した例を掲載します。

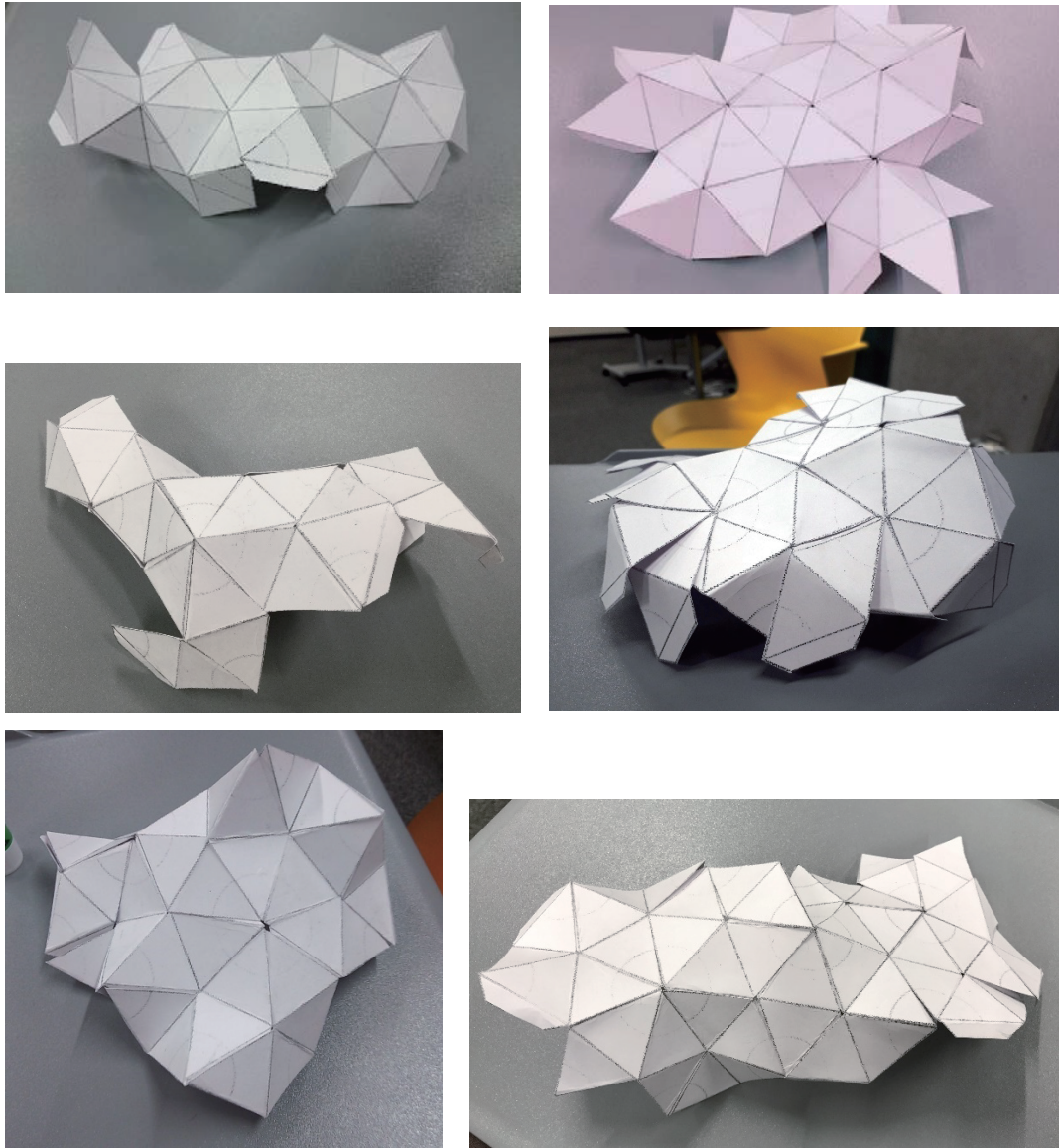


図2 ハイプレイン

写真からでは分かりにくいのですが、手に取ってみて山折り谷折りなどの折れている方向を変えようとする、三角形の数が少ないうちはぐにゃぐにゃと変形しますが、数が増えるにつれ動かすにくくなってきます。

以下に授業の参加者からの感想の一部を引用します。

久しぶりに工作をしたので楽しかったです。丸くしようと思っていたのですが、気付いたら平べったくなっていました。6人ともそれぞれ出来上がった形が異なっているところがおもしろいなと思いました。

パーツを作る際、はじめは山折りのものと谷折りのものを同数だけ作っていましたが、組み立てている途中で「山折りや谷折りが組み合わせの際に必ず当てはまるとは限らない」と気づき、そこからパーツをどちら

の方向にも曲げられるように何度も折り返しました。山折りと谷折りのどちらが何枚必要か、どの時点でどちらが必要かなどの思考が、数学幾何に繋がってくるのかなと思いました。

実際に手で作ってみて、三角形を合わせたところが360度にならないように組み合わされた図形でできた空間は、でこぼこしているということがわかったのですが、より多くの三角形をつなぎ合わせていって、でこぼこが見えなくなるくらい遠目からみたときに、この図形が作る空間と、もともとなめらかな空間とで違いはあるのか、気になりました。また、今回つなぎ合わせた三角形の角度には、どのような意味があるのか、他の角度の組み合わせでもよいのか、などが知りたいです。

途中で崩れたり、パーツがうまく付けられなかったりと大変ではありましたが、講義後、友人に見せましたところ、大変興味を持ってくれました。今回は作成のみでしたので、なぜ $378^\circ$ や $54^\circ$ や $63^\circ$ など微妙な値で統一されているのか、規則性はあるのだろうか、「ハイプライン」という言葉が何を意味するのか、数学との関係は何であるのか、等の疑問がわきました。

授業中、ひたすら紙を切ったり、貼り付けたりするだけだったけど、途中から貼り付けるコツがわかってきて普通に楽しかったです。このまま続けていってできた図形が不思議な形をしていて、公園にある子供たちが遊ぶ遊戯用トンネルみたいだなと思いました。

どんどん繋げていく時に、 $54^\circ$ を7つ組み合わせるのが難しかったです。最初に $54^\circ \times 7$ を作って、そこにどんどんなんとなく円を描くように繋げていき、全部繋げた時、でこぼこになりました。同じ方向に繋げていったらどうなるのか、また、もっと繋げていって筒にすると、どんなでこぼこが出来上がるのか気になりました。山折り谷折に規則性があるのかも気になりました

## 2-2 ハイプラインの数学

今まで考えてきた二等辺三角形の角度はどのようにして決められたものなのでしょうか。ここではハイプラインの定義を見てみることにします。

3つの正の整数  $a, b, c$  が以下の2つの条件をみたすとします。

1.  $\frac{1}{a} + \frac{1}{b} + \frac{1}{c} < \frac{1}{2}$

2.  $a$  が奇数ならば  $b = c$ 、 $b$  が奇数なら  $c = a$ 、 $c$  が奇数なら  $a = b$

このとき三角形 ABC の角度を次で決めます。

$$\angle A = \frac{bc\pi}{bc + ca + ab}$$

$$\angle B = \frac{ca\pi}{bc + ca + ab}$$

$$\angle C = \frac{ab\pi}{bc + ca + ab}$$

もちろん角度だけでは三角形の大きさは決まりませんが、例えば面積を1とするなど、適当な条件を加えることにより三角形ABCの形が1つ定まります。このような三角形のコピーを大量に用意して張り合わせを行うのですが、頂点Aは他の三角形の頂点Aとだけ張り合わされ、張り合わせによってできる頂点のまわりに集まる角の数がちょうど $a$ になるようにします。B, Cについても同様とし、これらをみたす多面体を $(a, b, c)$ -ハイプレインと呼びます。

まず、上の条件をみたすような3つの正の整数 $a, b, c$ はたくさんあることに注意してください。例えば $a, b, c$ が十分大きな偶数ならば、1つ目の条件はみたされますし、2つ目の条件は偶数に関しては何も要求をしていないので自動的にみたされます。従ってハイプレインには無限通りのバリエーションが考えられます。計算をするとすぐに確かめられますが、前節の紙工作では $(6, 6, 7)$ -ハイプレインを使用していました。この数字は1つ目の条件をみたすためのギリギリの数になっています。実際 $6, 6, 6$ だと得られる三角形は正三角形に対応しますが、1つ目の条件に関して等号が成立してしまいます。

ハイプレインの定義からは離れてしましますが、1つ目の条件を無視することになると、 $(3, 3, 3)$ は正四面体に、 $(4, 4, 4)$ は正八面体に、 $(5, 5, 5)$ は正二十面体に対応することがわかります。また上で注意した $(6, 6, 6)$ は平面の正三角形格子によるタイル張りに他なりません。この自然な延長としては $(7, 7, 7)$ が考えたくりますが、これはハイプレインの1つ目の条件もみたしています。三角形ABCは正三角形になり、各頂点の周りに7つの三角形が集まる多面体になります。紙工作ではこれを採用してもよかったですのですが、1つの頂点の周りの角度の合計が420度になるため、三角形の枚数が少し増えると工作がすぐに難しくなります。この欠点を補うようにして考えられたのが $(6, 6, 7)$ -ハイプレインで、上で繰り返したように1つの頂点の周りの角度が378度になっています。

### 2-3 ハイプレインと非ユークリッド幾何学

紙工作に夢中になって、そもそもなぜこのような多面体を考えるのかの説明を忘れました。このヒントは私たちが参照している参考文献『ハイプレイン』の副題にあります。副題は「のりとはさみでつくる双曲平面」となっていました。本稿で考えたい非ユークリッド幾何学の名前は双曲幾何学というもので、この幾何学が展開される2次元の平面は双曲平面と呼ばれます。正二十面体が球面を多面体で近似しているように、 $(a, b, c)$ -ハイプレインは、双曲平面を近似しています。

次節では、その双曲平面を定義します。

### 3. 双曲平面

この節では、本稿で幾何学を考える舞台である双曲平面を導入します。xy 平面において中心が原点で半径が1の円を単位円といいました。その内側を単位円板といいます。

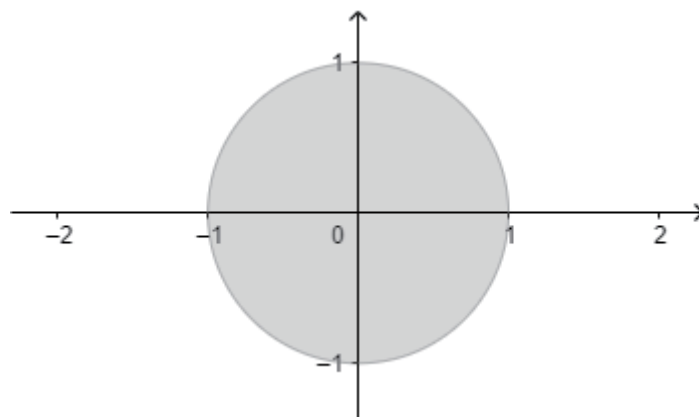


図3 単位円板

本稿では、円といったら針金のような1次元的な図形で、円板といったら中身の詰まった2次元的な図形を指すこととします。単位円板を平面の部分集合とみなす際に、普通は境界の単位円も含むことにするかもしれませんが、ここでは単位円は単位円板に入っていないと約束します。そして、双曲平面を次で定義します。

定義 双曲平面とは単位円板のことである。

古代エジプトの時代から研究されてきたユークリッド幾何学とは異なる非ユークリッド幾何学などという大げさな導入からするとなんだか拍子抜けしてしまうかもしれませんが、以下ではこの単位円板の内部で展開される幾何学を考えます。普通に考えると、平面全体ではなくて単にいつもより狭い領域でその中に生じる図形たちを考えるだけなら、何も新しいことなどないような気がしてきます。しかしそうではありません。双曲平面上では、通常とは異なる「直線」「2点間の距離」「合同変換」などが定義され、それらを用いて幾何学が展開されていくこととなります。まずは直線を定義することにしましょう。

定義 単位円に直交する円と双曲平面との共通部分を、双曲平面上における双曲直線とする。

この定義は一体何を言っているのでしょうか。まず、2つの円の交わる角度というのが何かを少し説明します。双曲平面のことは少し忘れて、普通のxy平面を考えます。xy平面上に2つの円がある場合、それらは

- 交わらない
- 1点で接する
- 2点で交わる

の3通りのいずれかになります。ここで交わらない場合は角度を考えることができないので除外します。1点で接する場合も少し後回しにして、まず2点で交わる場合を考えましょ



う。

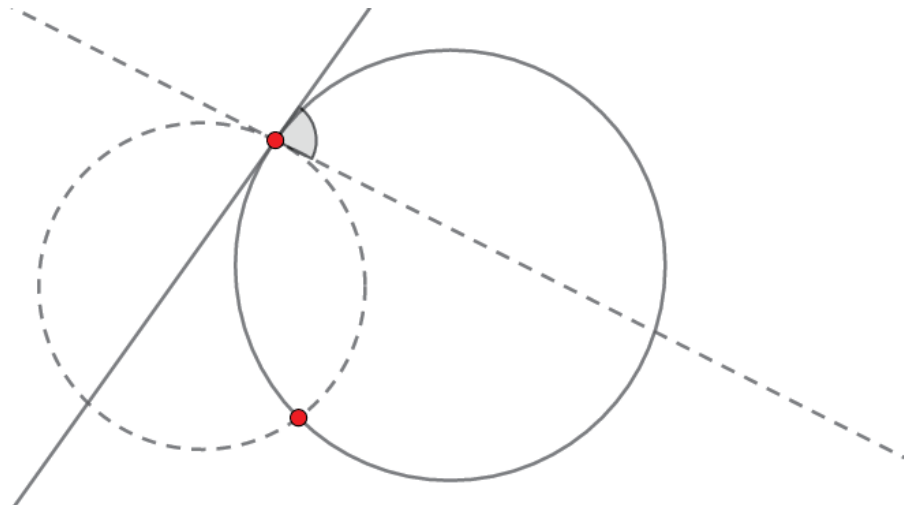


図4 2円の交わる角度

図をご覧ください。実線の円と点線の円が2点で交わっています。交点を1つ選び、その点でのそれぞれの円への接線を引きます。図で実線の直線が実線の円への接線で、点線の直線が点線の円への接線です。そして、この2つの直線の交わる角度を、元の2つの円の交わる角度と約束します。ただし、そもそも2つの直線の交わる角度を決めるには、「どちら側」に分度器をあてるのかを決めていく必要があります。図では角度が80度くらいになっていますが、違う側で測ると100度くらいになります。本稿では90度以下になる方の角度を採用することにします。

後回しにしていた1点で接する場合の角度ですが、この場合にも上と同様の作図をする  
と実線の直線と点線の直線が重なることになり、0度と約束することにします。

ここまで説明すると「単位円に直交する円」という意味が分かってくるかと思います。

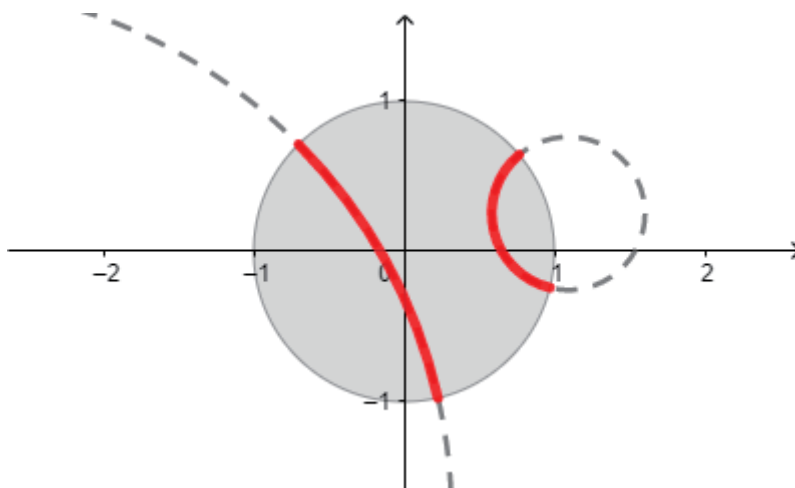


図5 単位円に直交する円と双曲平面との交わり

図では単位円に直交する円の例が点線で2つ描かれています。様々な中心や半径をもつものが  
あり得ることが想像できると思います。

私たちが行おうとしていることは、双曲平面における直線すなわち双曲直線の定義を与えることでした。双曲平面が私たちにとっての世界のすべてです。そこで今考えている単位円と直交する円に関して単位円板の外にある部分は無視して、単位円板の内部に入っている円弧を双曲直線とします。上の図ではやや太くなっている円弧がこれにあたります。これが私たちにとっての直線です。

直線というのは真っすぐで曲がっていないという意味だと思いますが、ここで定義を与えた双曲直線は常識的に考えて曲がっているとしか思えません。一体これはどういうことなのでしょう。

話が突然変わりますが、世界地図を考えてみます。地球は丸いので紙の上に地図を描こうとするとどうしても無理があり、直線や角度や面積を同時に忠実に表示することができません。何を重視するかにより、メルワイデ図法、メルカトル図法、正距方位図法など様々なものがあります。例えばメルカトル図法は経度と緯度が縦と横の直線になっていますが、北極や南極の付近が実際の面積より大きく膨らみ、例えば奈良からニューヨークへ飛行機で最短距離を飛んだ場合、実際の航路が北寄りに曲がって見えます。つまり球面上の幾何学をメルカトル図法で表示した場合には最短線が曲がって見えます。

双曲平面としての単位円板において双曲直線が曲がって見える理由も、これと同じような事情によります。別の言い方をすると、単位円板は双曲平面そのものというよりも、メルカトル図法のような図法の一つなのです。幾何学では図法という言い方はせずモデルという言葉を使い、今考えている双曲直線が単位円に直交する円弧に見えるモデルはポアンカレディスクモデルとよばれています。そう、第1節で出てきたポアンカレです。双曲平面のモデルには他にもいくつか代表的なものがあるのですが、ここではあまり他には目を向けなくて、双曲平面といったら単位円板とすることにします。

ところで、メルカトル図法にはその元となる地球という本来の幾何学的対象があります。より幾何学的には3次元空間内の原点を中心とする半径1の球面と思ってもよいでしょう。では単位円板すなわちポアンカレディスクモデルの元となる幾何学的対象としての本来の双曲平面なるものはどこかに存在しているのでしょうか。この疑問に答えるためには、問題を正しく設定するために大学での専門的な数学の準備が必要となってしまうのであまり深入りしませんが、考える領域を双曲平面内の狭い範囲に限定しない限り、よい方法はありません。つまり私たちは地球儀全体にあたるものを見ることができずに世界地図だけで幾何を考えていくことになります。ただし、考える範囲を十分小さくするならば可能で、「双曲平面の局所モデル」というものを普通の3次元空間内に構成することができます。

また、その「双曲幾何の本来」に多面体近似からアプローチするというのも自然は発想です。正二十面体がおおよそ球面を近似しているように、双曲平面を近似しているのがハイプレインです。双曲平面を英語で hyperbolic plane というのですが、ハイプレイン (hyplane) という言葉は、この多面体が hyperbolic plane そのものではないがそれを近似するものであるという考案者の阿原一志さんの思いが込められているのだと私は理解しています。いかなる意味でハイプレインが双曲平面を近似しているのかを理解するには、双曲平面の性質をもう少し紹介する必要があります。

#### 4. 2つの双曲直線の関係

2つの異なる双曲直線の関係としては

- 交わらない
- 1点で交わる

などがあり得ることは、実際に作図をしてみるとすぐに観察できます。

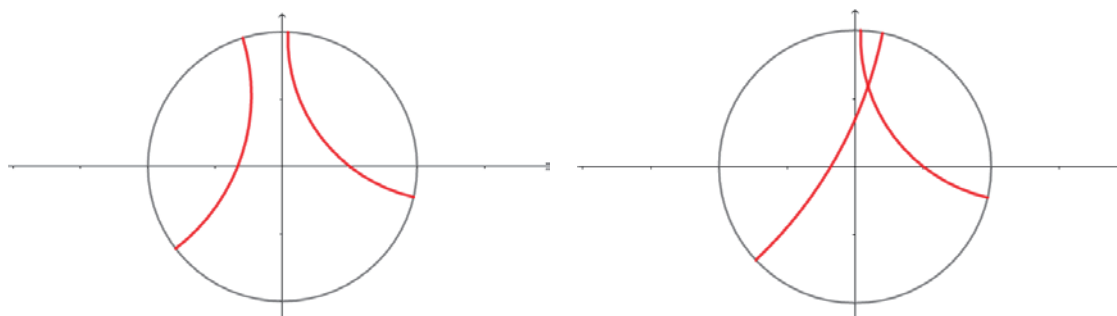


図6 2つの双曲直線の関係 (左: 交わらない、右: 1点で交わる)

双曲直線が普通の  $xy$  平面の言葉では円弧であったことを思い出すと、これ以外にも

- 2点で交わる
- 1点で接する

という可能性もありそうですが、単位円に直交するという条件を使うことにより、このような場合は起こらないことを示すことができます。最後の1点で接する場合についてはもう少し注意が必要です。これも作図をしてみれば観察できますが、2つの異なる双曲直線が単位円上で接することは可能です。ただし単位円は双曲平面に含まれないと約束したので、この場合は上の「交わらない」という場合に分類することにします。

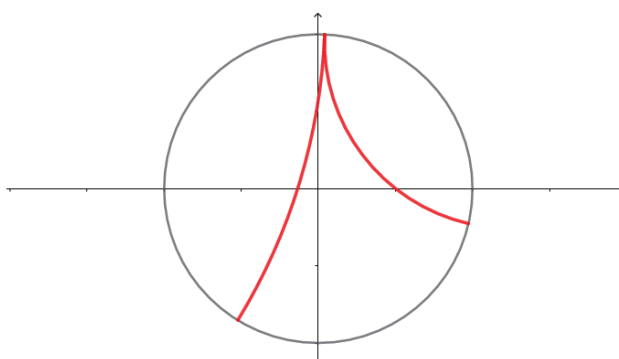


図7 単位円で接する双曲直線

ここまで別に何も不思議なことはないような気がしますね。

ここで普通の  $xy$  平面の幾何を思い出してみます。2つの異なる直線の間関係は

- 平行
- 1点で交わる

の2通りで、平行というのは2つの直線が交わらない場合に他なりません。そこで双曲幾何

においても2つの双曲直線が交わらない場合を「平行」と呼ぶことにします。すると次が成立します。

双曲直線  $m$  とその直線上にない1点  $P$  が与えられたとすると、 $P$  を通り  $m$  と平行な双曲直線が無数存在する。

これは普通の  $xy$  平面の幾何では成立しません。普通は以下のような状況ですよ。

直線  $m$  とその直線上にない1点  $P$  が与えられたとすると、 $P$  を通り  $m$  と平行な直線がただ1つ存在する

実はこの命題はユークリッドの『原論』に登場するもので、幾何学の研究を開始する際に証明なしで認めることにした「公準」とよばれる5つの命題の中の1つなのです。他の4つの公準が非常に単純で自然な命題であるのに対し、この命題だけ何やら複雑な感じがするので、多くの人々が、この命題は証明なしで認めなければならない「公準」である必要はなく、むしろ残りの4つの公準から議論を始めればこの命題は定理として証明可能なのではないかと考え、その努力がなされました。

しかし上で観察したように、双曲幾何においてはユークリッドの第5公準は成立しません。双曲幾何が非ユークリッド幾何と呼ばれる理由です。第1公準から第4公準までは双曲幾何でも成立しているので、双曲幾何が矛盾のない論理体系になっているならば、上で紹介した平行線に関する命題は4つの公準からのみでは証明可能ではなく、ユークリッド幾何では公準として必要となります。

ここまでの議論に納得されましたでしょうか。単位円に直交する円弧を直線と呼ぶことを思いついたら、古代からの幾何学の難問を解決し新しい非ユークリッド的な数学の世界を切り拓いたことになるのでしょうか。なんだか単なる言葉遊びでダマされているような気がします。この疑問をについて考えるには、第3節の最後で名前だけ紹介した「局所モデル」などを用いて議論する必要があるのですが、結論だけを述べておくと、ユークリッド幾何が矛盾のない体系ならば双曲幾何も同様に矛盾のない体系であることが知られています。

ところで、本稿は平行線の公準から離れた世界を考えようというのですが、私たちにとってより馴染みのあるユークリッド幾何学について振り返ってみると、この公準とするにはやや微妙にも見える命題を公準に採用して幾何学の構築を成功させるというユークリッドの数学的感覚は素晴らしいですね。これが天才の個人的な発想によるものなのか、当時の発達した文明社会の中での人々の議論の中から生まれてきたのかは私にはわかりませんが、人類の貴重な財産であることは確かだと思っています。

さて、幾何と言いながらこれまでミステリアスに定義された直線しか登場してこなかったので、もう少し幾何学らしいものを次に考えてみることにします。

## 5. 双曲距離と双曲角度

幾何学というと、やはり長さや角度ですね。まずは長さを考えるために2つの点の間の距離について考えます。

2点の間の距離を定めるには、それらがどれくらい離れているのかを測るモノサシが必要です。ここで単位円板は双曲平面のモデル、すなわちある種の「地図」であったことを思い出してください。メルカトル図法で2つの都市の間の距離を測ろうとすると、モノサシの目盛りの細かさが場所によって違ってくるはずですね。双曲平面としての単位円板においても同様になっています。複雑になるので一般的な2点間の双曲距離の公式は与えませんが、原点(0, 0)とx軸上で原点より右の点  $X(x, 0)$  (ただし  $0 < x < 1$ ) の双曲距離を例として考えることにします。

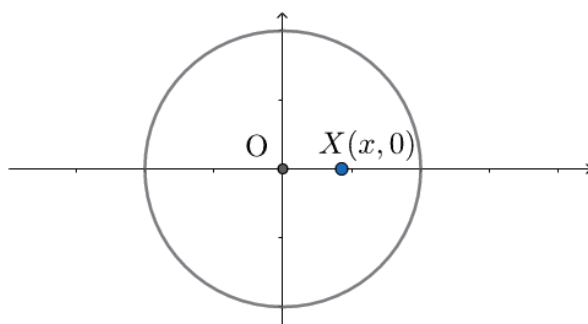


図9 原点とx軸上の点

この双曲距離を  $f(x)$  とすると、これは以下の計算式で与えられます。

$$f(x) = \log \frac{1+x}{1-x}$$

$\log$  という関数に馴染みのない読者は気にしなくても大丈夫です。この関数のグラフをプロットしてみます。

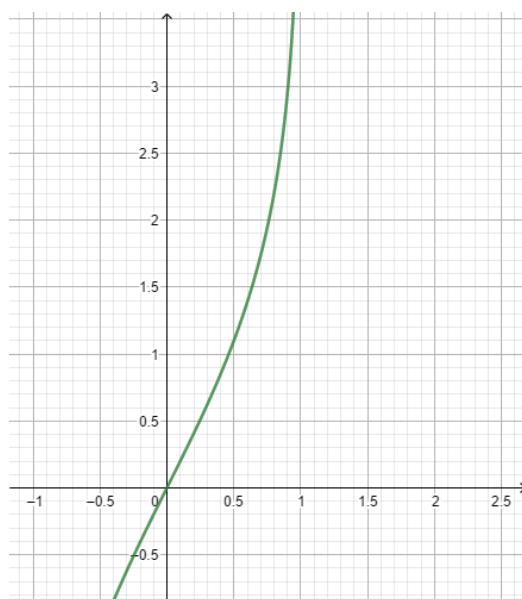


図10  $f(x)$  のグラフ



図では  $x$  が 0 未満の部分もプロットしていますが、私たちに必要なのは 0 から 1 の範囲です。  $x$  が 1 に近づくと  $f(x)$  の値が急激に大きくなるのが分かります。実際  $x$  が 0.9, 0.99, 0.999, … と 1 に近づくと  $f(x)$  は無限に大きくなります。

$$\lim_{x \rightarrow 1} \log \frac{1+x}{1-x} = \infty$$

すなわち原点から見て(1,0)などの単位円上の点は無限の彼方ということの意味します。単位円の点は双曲平面に入れていませんでしたが、単位円板としての双曲平面もこの双曲距離に関しては無限の拡がりを持っていることが分かります。

先ほどのモノサシの話に戻ると、単位円の近くつまり単位円板の端の方の目盛りは見かけ上は細かくなっていて、見かけ上少ししか移動していなくてもこの世界での距離としてはたくさんの距離を動いたことになります。逆に単位円板の中心近くはモノサシの目盛りが荒くなっていて、ある程度移動しても距離はそれほど大きくありません。これはメルカトル図法では上下の北極や南極近くの方が距離のモノサシの目盛りが荒くて赤道近くの目盛りが細かくなっているのと対照的です。そこで、双曲平面内を移動するには、なるべく真ん中の方を通るのが近道であることが想像できます。こちらもメルカトル図法では航空路線が  $xy$  平面の直線より北極や南極の近くを通るのと対照的です。実際、第3節で与えた双曲直線がこの双曲距離に関する最短線であることが知られています。

いかがでしょうか。双曲直線が少しは「まっすぐな」感じがしてきましたでしょうか。

ここでもう一度ハイプレインのことを思い出してみます。ハイプレインの紙工作を続けていくと、だんだん三角形がたくさんモコモコとつながってきて作業が面倒になりました。これは単位円板でいうと、端に向かって進んでいくとモノサシの目盛りが細かくなってユークリッド幾何の場合よりもたくさんの三角形が出現することにちょうど対応しています。

ここまですべて距離のことばかり考えていて、角度のことが後回しになっていました。2つの双曲直線が交わっているとします。それらがなす角度を定義したいのですが、双曲直線がユークリッド幾何としては円の一部であったことを思い出しましょう。ユークリッド幾何では円の交わる角度は交点でのそれぞれの接線のなす角でした。そこでその角度をそのまま双曲直線の間で双曲角度と定義します。つまり、双曲平面の地図としての単位円板は、双曲距離に関してはモノサシの目盛りの細かさが場所によって違ってくるあまりよろしくない地図でしたが、角度に関しては見た目そのままという「角度にやさしい地図」と言えます。これは私たちが何度も対比しているメルカトル図法の地図でも同様です。例えば緯度と経度は地球上でも地図上でも直交していますね。

距離と角度などの準備ができたので、次にいよいよ幾何学らしい対象物すなわち図形について考えてみることにします。

## 6. 双曲三角形

3つの互いに交わる直線に囲まれた領域が三角形です。双曲幾何でもユークリッド幾何と同様に定義します。

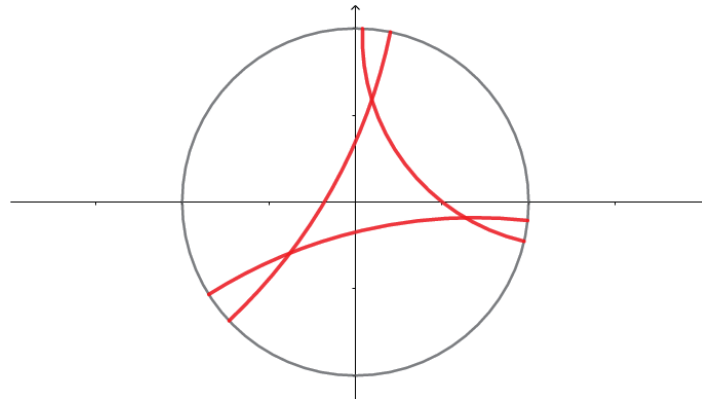


図8 双曲三角形を与える3つの双曲直線

三角形が与えられると、幾何としては例えば次のようなことを考えたくになります。

- 3つの辺の長さ
- 3つの角の角度
- 面積

辺の長さは前節で簡単に説明した双曲距離を使って与えられます。今のところ私たちは辺がちょうど  $x$  軸上に乗っていないと計算できませんが、何らかの数値が決まるだろうということだけ認めて次に進むことにします。

さて、問題は角度です。これは「見た目通り」でした。図8をご覧ください。双曲幾何としては「まっすぐ」な双曲直線ですが、ユークリッド幾何の目で眺めると円弧でできた円弧三角形とでもいうべきもので、ユークリッド幾何の意味での直線による三角形を円弧が内側にえぐるようになっています。そのため

三角形の内角の和が  $180$  度より小さい

という変な感じの命題が成立します。変というより、むしろこれこそが非ユークリッド幾何というわけです。

このようにユークリッド幾何と双曲幾何ではいろいろと異なった命題が成立します。本稿ではあまり扱うことができませんが、中心の点と双曲距離としての半径を指定すると双曲円が自然に定義されるのですが、これがユークリッド幾何としての見た目も普通の円になっていることが知られています。すると双曲円の面積や双曲円周の長さを求めたくになりますが、ユークリッド幾何とは違った式になります。双曲半径を  $r$  とするとそれぞれは以下で与えられます。

- 双曲円周： $2\pi \sinh r$
- 双曲面積： $4\pi \sinh^2(r/2)$

ここで  $\sinh$  という関数は双曲線正弦関数 (hyperbolic sine) と呼ばれているものですが、本稿においては別に知らなくても構いません。双曲という単語が出てくる関数があって、掛け算だけではなくてそれらを使って円周や面積が求められるという不思議な様子だけを眺めておくことにします。

双曲円の話はこれくらいにして双曲三角形に戻ります。長さ、角度の次は面積ですね。これまでの様子から、面積の公式はすごく難しい式になると思われるかもしれませんが、むしろ双曲幾何の面積はユークリッド幾何よりも簡単とってよいくらいです。双曲三角形の内角が  $A, B, C$  となっているとします。ここで角度は「度」ではなくて弧度法による「ラジアン」とします。すなわち角度を 360 度で測るのではなくて、半径 1 の円におけるその角度に対応する円弧の長さとしてします。例えば 360 度は  $2\pi$ 、180 度は  $\pi$ 、90 度は  $\pi/2$  に対応します。面積は次で計算されます。

内角が  $A, B, C$  である双曲三角形の面積は  $\pi - (A + B + C)$  である。

ここで、双曲三角形の内角の和  $A + B + C$  は 180 度すなわち弧度法では  $\pi$  より小さいという前のページの観察を思い出します。これは面積が正の数になるはずということとうまく対応していますね。それにしても、ユークリッド幾何の普通感覚ですと、面積というものは基本的に辺などの長さを使って計算するもので、角度は出てきても脇役みたいな感じでした。辺の長さは一体どこに行ったのでしょうか。そもそも三角形の角度を変えずに拡大や縮小をしたら面積が変わる気がしますが、この公式は大丈夫なのでしょうか。

まず、双曲幾何にはユークリッド幾何と同じような意味での「拡大」「縮小」という操作はできません。そのために、上の段落の私の議論は公式が間違っていることを意味しません。私たちは学校で、(ユークリッド幾何の) 三角形の合同条件として

- 三辺の長さが等しい
- 二辺の長さとそのはさむ角が等しい
- 一辺の長さとその両端の角が等しい

などというのを学びました。双曲幾何ではこれに加えて

- 3つの角が等しい

でもよいのです。双曲幾何の世界に住んでいる人は、三角形の面積の学習が簡単だし、相似について勉強する必要がないのですね。そのかわり円周率の勉強がややこしすぎですが。

ところで上でうっかり合同という言葉を使ってしまいましたが、双曲幾何における合同変換つまり大きさや形を変えない操作にはどんなものがあるのでしょうか。私たちは  $xy$  平面において

- 平行移動
- 線対称
- 回転移動 (点対称は 180 度の回転移動とみなすことにします)

などを習います。これらは図形の形や大きさを変えない「合同変換」でした。双曲幾何における変換は、単位円板を単位円板に写像しなければなりません。単位円板ですぐに思いつくのは原点中心の回転移動や、原点を通る直線による線対称くらいですが、それ以外に合同変換はあり得るのでしょうか。次節ではこのための準備を行います。

## 6. 円による反転

双曲幾何における合同変換を導入するための準備として、ユークリッド幾何における「円による反転写像」を説明します。

中心の点が  $A$  で半径が  $r$  である円  $C$  が与えられたとします。この円  $C$  による反転写像で平面上の点  $P$  が写像される点を  $P'$  とすると、これは以下の作図で求められます。

- 円の中心の点  $A$  と点  $P$  の間の距離を  $d$  とし、点  $A$  と点  $P$  を通る直線を  $m$  とします。
- 直線  $m$  上の点で、点  $A$  から見て点  $P$  の方向に距離が  $\frac{r^2}{d}$  と等しい点を  $P'$  とします。

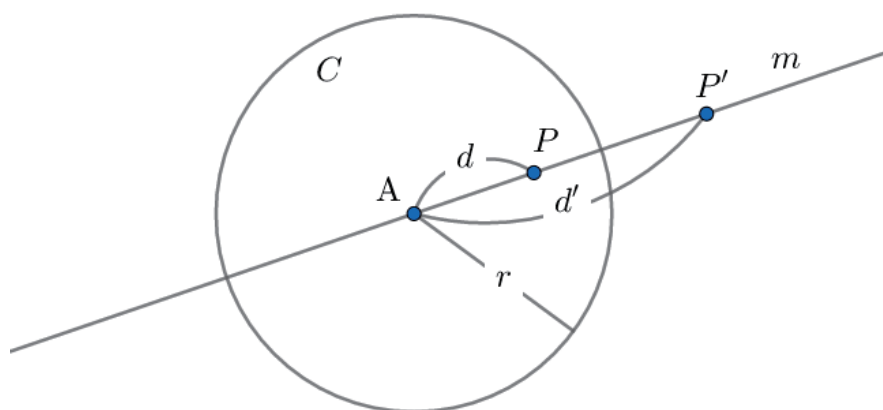


図 11 円に関する反転 ( $d' = r^2/d$ )

以下では  $d' = r^2/d$  と書くことにします。まだこのままでは円の中心点  $A$  がどこに写像されるのが定義ができません。点  $A$  にとっては  $d = 0$  で、 $d'$  を求めようとする  $d' = \frac{r^2}{0}$  という式になってしまい  $0$  による割り算が生じてしまうからです。これを回避するには「無限遠点」という点を新たに付け加えて考えて、円による反転によって

- その円の中心は無限遠点に写像される
- 無限遠点は反転の円の中心に写像される

と約束します。反転に使用する円としては様々な中心点や半径の場合を考えますが、いつも円の中心は無限遠点に写像され、無限遠点は円の中心に写像されるとします。

これで円に関する反転の定義ができました。以下では円  $C$  に関する反転写像を  $F_C$  と書くことにします。

もう一度図 11 を見てください。図 11 は反転させる点  $P$  が円  $C$  の内側の場合を描いています。この場合は  $d < r$  なので

$$d' = \frac{r^2}{d} > \frac{r^2}{r} = r$$

より点  $P'$  は円の外側に位置することになります。もし点  $P$  がちょうど円  $C$  の上にある場合はどうなるでしょうか。そのときは  $d = r$  なので、

$$d' = \frac{r^2}{d} = d$$

となり、点 P と点 P' は同じ点です。点 P が円 C の外側なら  $d > r$  より

$$d' = \frac{r^2}{d} < \frac{r^2}{r} = r$$

であり、点 P' は円の内側です。まとめると、円に関する反転は、

- 円の内側の点を外側に写像
- 円の上の点は固定したまま
- 円の外側の点を内側に写像

となっています。ただし、無限遠点は円の外側にあるとしています。

この写像がなぜ反転と呼ばれるかという、円 C に関する反転を 2 回行くとすべての点が元の場所に戻ってくるからです。つまり

$$P' = F_C(P), \quad P'' = F_C(P')$$

とおくと、 $P = P''$  です。これは、円 C の中心を先ほどと同様に A とし、半径を  $r$  としておくと、定義から A, P, P', P'' が同じ直線  $m$  上にあることと、A から P, P', P'' までの距離をそれぞれ  $d, d', d''$  とおくと

$$d' = \frac{r^2}{d}$$

より

$$d'' = \frac{r^2}{d'} = \frac{r^2}{\frac{r^2}{d}} = d$$

となることから分かります。

円に関する反転は、ユークリッド幾何の意味では合同変換ではありません。下の図は、円の内側に描いた格子模様をその円に関する反転で移したものです。元の直線が曲線になっていますし、2 点間の距離もだいぶ変化している様子が観察できます。

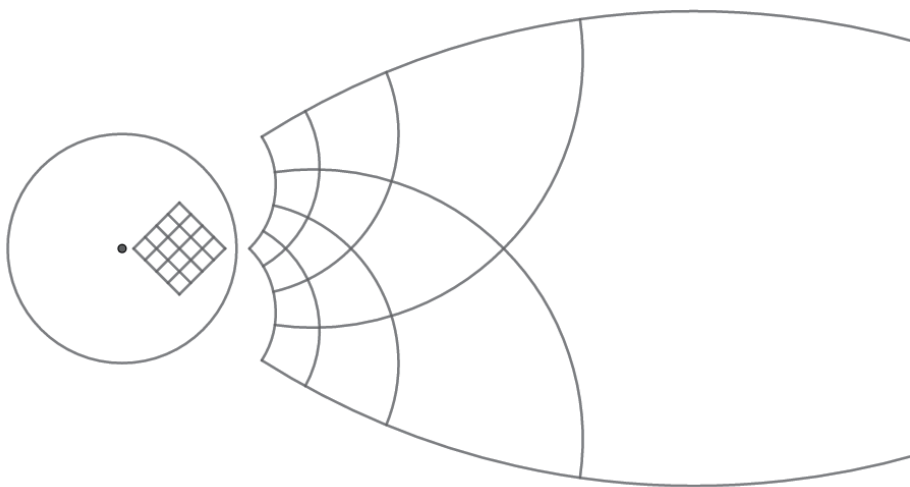


図 1 2 正方形の反転像



## 7. 双曲合同変換

前節は双曲幾何が全然出てこずに、 $xy$  平面の作図の話ばかりでした。本節ではこれを使って、双曲平面上の図形の大きさや形を変えない双曲合同変換を与えます。双曲直線はユークリッド幾何の目で見ると円弧でした。この円に関する反転を、その双曲直線に関する反転と呼ぶことにします。すると次が成立します。

双曲直線に関する反転は、単位円板を単位円板に写像する

証明の概略を簡単に紹介します。これにはユークリッド幾何の「方べきの定理」の特別な場合を用います。図の双曲直線  $C$  のユークリッド幾何での円としての中心を  $A$  とします。単位円上の点を  $P$  とし、直線  $AP$  と単位円との交点で  $P$  と異なる方を  $P'$  とします。

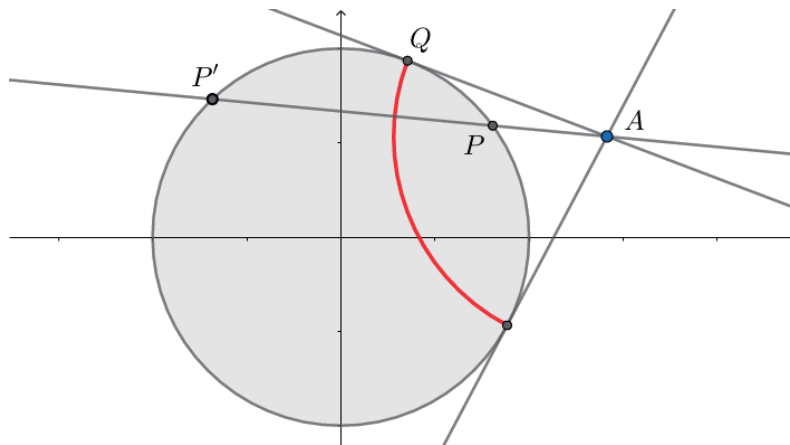


図 1.3 双曲直線に関する反転

点  $A$  から単位円には2つ接線を引くことができますが、それらの接点が双曲直線の端点になっています。そのうちの1つを  $Q$  と書くことにすると、方べきの定理は

$$AP \cdot AP' = AQ^2$$

(ただし式の中の  $AP$  などは2点間のユークリッドの意味での距離) を意味するのですが、 $AQ$  が反転円の半径であるので、これは  $P'$  が  $P$  の反転像であることに他なりません。すなわち双曲直線による反転で単位円は単位円に写されます。これがわかると、単位円の内側の単位円板が単位円板に写されることを見るのは比較的簡単で、照明が終わります。

円に関する反転は、もともとは平面全体および無限遠点を対象とする写像ですが、上の定理により、双曲直線に関する反転は双曲平面から双曲平面への写像ということで考える範囲を限定することにします。そして、このような反転が合同変換を与えることが分かります。

双曲平面における合同変換は、双曲直線に関する反転およびそれらの合成写像である。

双曲直線に関する反転の様子を図で見てみましょう。

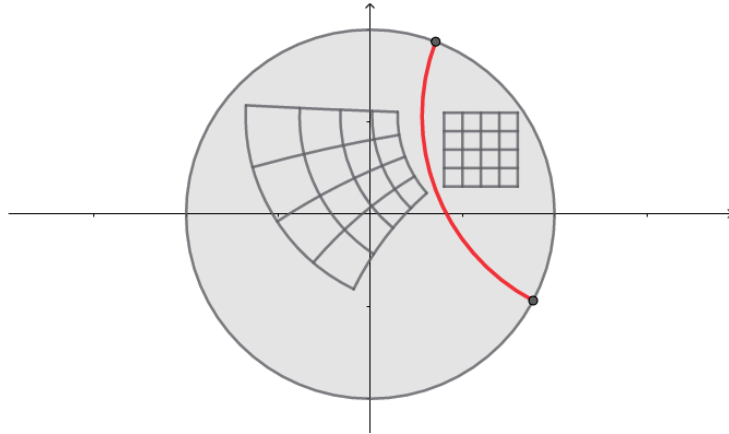


図1 4 双曲合同変換

図1 4 は双曲直線の右側にある格子模様を、この双曲直線による反転で左側に写像される様子を描いています。もちろん左側のものが右側に写像されると思っても間違いではありません。合同というのは図形の形と大きさを双曲幾何の意味で変えないということでした。図では右と左で形が違うように見えますが、双曲幾何としては合同になっています。双曲距離についてはやや複雑な計算が必要となりますが、角度については、図の中の2つ格子模様はどちらも直交しているように見えることと、双曲角度はユークリッド角度と見た目が同じであることを合わせると、うまく保たれていることが見て取れるかと思えます。

双曲直線に関する反転は、ユークリッド幾何でいうところの直線に関する線対称に対応しているとみなすのが自然です。どちらもそれぞれの幾何での直線ですし、2回同じ操作を行うと元に戻りますし、それぞれの幾何における合同変換です。次節ではこれを繰り返し行うことで得られる対称性について考えることにします。

## 7. 双曲平面のタイル張り

$xy$  平面が正三角形や正方形や正六角形によってきれいに埋め尽くされることはご存知だと思います。ここではこれらを多角形によるタイル張りおよびよぶことにします。

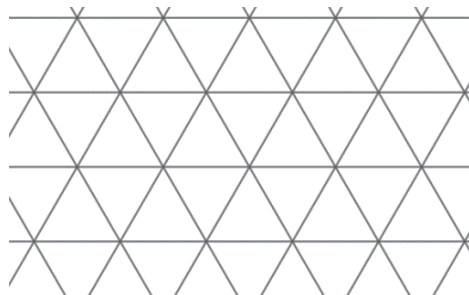


図1 5  $xy$  平面の正三角形によるタイル張り (万華鏡)

第1 節の幾何学のイメージでも挙げられていましたが、万華鏡はその美しい幾何学模様で

多くの人を魅了します。これは、模様をついた正三角形が与えられたとき、その三辺についての線対称を繰り返して得られる模様です。双曲幾何においても、双曲多角形が与えられたとき、双曲直線に関する反転を利用した「双曲万華鏡」とでもいべきものを私たちは考えたいとなりますが、果たしてそれはどのようなパターンを生み出すのでしょうか。

ユークリッド幾何の場合は、正三角形・正方形・正六角形などタイルのパターンが限られていましたが、双曲幾何における双曲万華鏡にはタイルの種類が無限で、数学的にも非常に豊かな世界となっています。ここでは簡単な例を紹介することにします。

図16を見てください。双曲平面の中心のあたりに「双曲直角五角形」が描かれているのがわかりますでしょうか。ユークリッド幾何ではそのような図形は存在しませんが、三角形の内角の和が180度より小さい双曲幾何の世界では可能です。そして、5つの辺に対応する双曲直線をほかの辺に対応する双曲直線に関する反転で写したものたちまで描いたのが図16です。そしてこの反転を繰り返し行うことにより互いに合同な双曲直角五角形が双曲平面を埋め尽くします。境界の単位円に近づくにつれて見た目での五角形が急速に小さくなっていくことが観察できます。

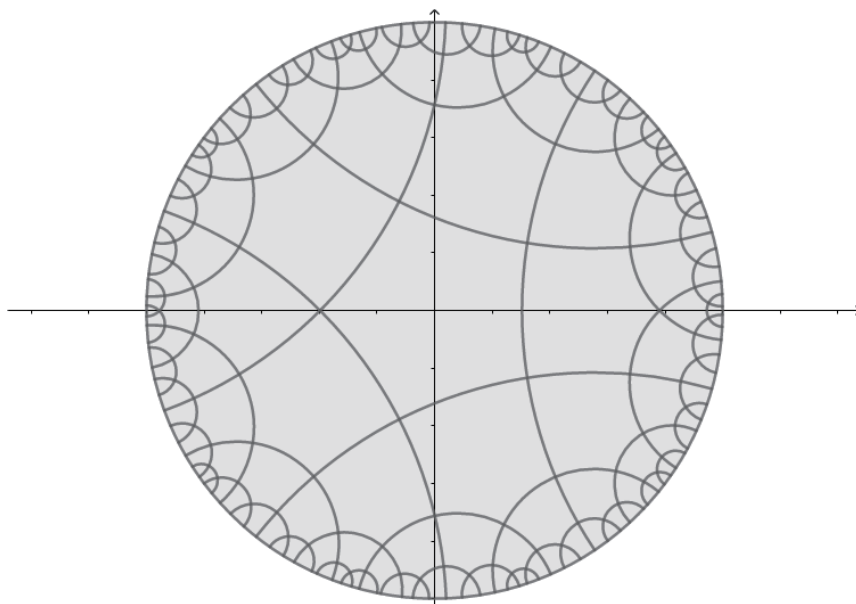


図16 双曲直角五角形によるタイル張り

双曲幾何の対称性は、20世紀のオランダの画家マウリッツ・エッシャーにも影響を与えました。ここでは作品を紹介することはできませんが、興味のある方はぜひ調べてみてください。エッシャーは数学者のコクセターから影響を受けて双曲幾何の対称性をもつ作品を制作したのだそうです。彼の作品は数学者の目から見ても非常に興味深いもので、ユークリッド幾何とは別の種類の無限の拡がりについて、思いをめぐらすことができます。

上の図は双曲五角形によるタイル張りでしたが、ハイプレインとの関係について考えるため、双曲三角形によるタイル張りについて考えてみます。

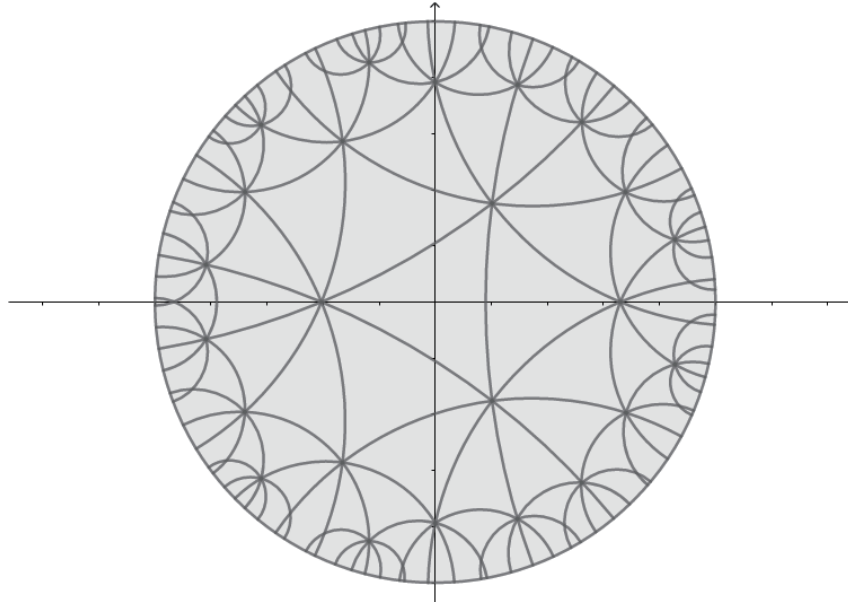


図17 双曲三角形によるタイリング

図17は内角が3つとも45度の双曲正三角形によるタイリングです。これは(8,8,8)ハイプレインとタイルの張り合わせパターンが同じになっています。45度というのは360度を8で割った角度であるため、各頂点の周りには自然に8つの角が集まってきてこのパターンになるのです。ここで阿原氏による本来の(8,8,8)-ハイプレインの部品となる三角形はユークリッド幾何の正三角形であったことを思い出しておきます。その意味では両者は違いますが、上でも述べたように各頂点のまわりに8つの角が集まっていることと、三角形がそれぞれの幾何の意味でどれも合同であることが共通点です。

図18は(6,6,7)-ハイプレインに対応したものです。タイルである双曲三角形の角度は360を7で割った約51.4度と60度が2つです。他のハイプレインも同じパターンを共有する双曲タイリングが存在します。

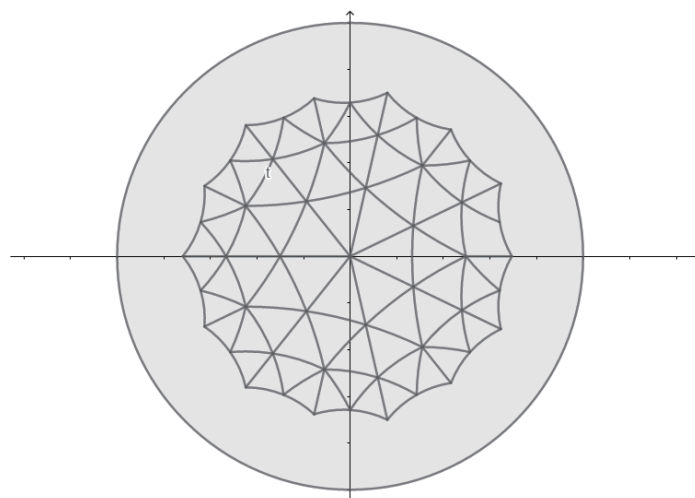


図18 667ハイプレインに対応した双曲タイリング

ここで描かれている双曲三角形たちはどれも双曲幾何の意味で合同です。もちろん見た目では端の方に行くにしたがって小さく見えてはいます。そしてこれらが双曲幾何的に小

さくならないように私たちの住んでいるユークリッド幾何の世界で近似しようとしたものがハイプレインです。これでハイプレインが双曲平面の近似になっていることが理解できるかと思います。

ユークリッド幾何の世界で(6,6,7)-ハイプレインを作るとモコモコしてしまいますが、ユークリッド幾何の世界で(6,6,6)に対応する正三角形の格子がモコモコしないように、双曲幾何の世界では(6,6,7)-ハイプレインに対応するタイリングが全くモコモコしないで実現できていました。そして第2節でみたようにハイプレインは2つの条件をみたす $(a, b, c)$ から無限に作り出すことができるので、無限通りのタイリングが存在する世界であることがわかります。

## 8. おわりに

ここまで、私たちが中学校や高等学校で学ぶものとは異なった幾何学世界の紹介をしてきました。しかし双曲幾何の話はこれでおしまいではありません。本稿では説明をすることができませんでしたが、双曲幾何学は数学の他の分野との様々な関係が近年明らかになり、現在でも活発に研究が進められている領域になっています。本稿の読者が少しでも興味を持ってくださればと願っています。

最後になりましたが、2017年度後期のベーシックサイエンスIIの受講生の皆さんに感謝をしたいと思います。受講生の皆さんとの対話をしながら、やや手探りで授業を進めた形になりましたが、皆さんの協力で充実した時間になったと思っています。どうもありがとうございました。

## 参考文献

阿原一志 ハイプレイン のりとはさみでつくる双曲平面 日本評論社 2008

## 生物について考えよう

担当 和田葉子

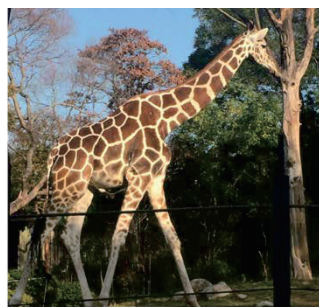
目的：生物に触れ、生物についてじっくり考えてみる

そのために生物の進化や行動、生物どうしのつながりを学ぶ

本授業では、アクティブラーニンググループを最大限に利用し、学生全員に iPad を渡し、授業中に登場した生物をその都度調べてもらい、壁に映してもらいながら授業を進めた。以降、“写真をさがして！”や“写真を出して！”と書いてある部分では、学生に写真を調べ、壁に映してもらっていつつ説明をしている。また、毎週ワークシート（参考資料 1～5）を配り、授業を聞きながら、質問に対する答えを書き込んでいってもらった。

### I. 生物について考えよう

#### 1. 生物とは



動物園に行くと、色や形、大きさの全く異なる動物たちを見ることが出来る。特徴的な模様を持つチーターやシマウマ、たてがみがある雄ライオン、鼻の長いゾウ、首の長いキリン、ピンク色のフラミンゴ。

これらの動物は、なぜこのような色、形をしているのだろうか。どのようにその形質を手に入れたのだろうか。動物以外にも、植物や昆虫など、この地球には多種多様な生物が生息している。

しかし、組織・細胞レベルで見ると、共通点が存在する。

生物とは何なのか



## 生物 せいぶつ

- ・生命現象を営むもの

生物のもっとも基本的な属性は、核酸のつかさどる遺伝と、  
蛋白質のつかさどる代謝の関与する増殖  
(岩波 生物学辞典 第4版)

- ・全ての生物は、約 38 億年前後に誕生した生命の性質を受け継いでいる  
＝共通の祖先がいて、以下の3条件を満たす

- 1)自己境界性：細胞は細胞膜で外界と内側が隔たっている
- 2)自己維持性：細胞内エネルギー通貨 ATP を用いて生命活動を維持
- 3)自己複製性：DNA をもち、親世代の細胞から子世代の細胞へ遺伝情報が受け継がれる  
(生態学入門 第2版)

全生物は、もともと共通の祖先から誕生している！

## 2. 分類してみよう

ここで、自分の好きな生き物について考えてみよう（写真を出して！）。

- ・イグアナ
- ・シマリス
- ・ハリネズミ
- ・犬
- ・猫
- ・カワウソ・・・

この地球にはどれくらいの生物がいて、あなたの好きな生物はどこに分類される？

現在の分類群

ドメイン・界(kingdom)・門(phylum)・綱(class)・目(order)・科(family)・属(genus)・種(species)

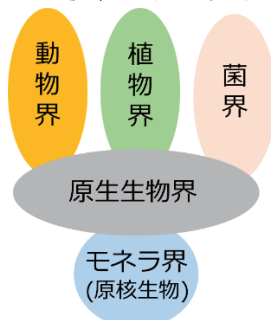
例：ヒト

真核生物・動物界・脊索動物門・哺乳綱・サル目・ヒト科・ヒト属

20 世紀初めまで、生物は動物と植物にのみ分類されていた。

動物界 — 植物界

その後、生物は以下の5つに分類されるようになった（五界説 L.Margulis）。



- 原核生物（原核細胞からなる単細胞性の生物。  
構成細胞に核がない。）

モネラ界：真正細菌（腸内細菌、発酵細菌、病原細菌、  
藍藻…）と古細菌（メタン菌、  
高度好塩菌、好熱好酸菌、  
超好熱菌…極限環境に生息する生物が  
多い）を含む。

○真核生物（構成細胞に核膜に包まれた核がある生物）

- ・動物界：脊椎動物と無脊椎動物を含む
- ・植物界：葉緑体を持ち光合成を行う
- ・菌界：キノコ、カビ、地衣類からなる・葉緑体を持たず、光合成をおこなわない。  
胞子を作って増える
- ・原生生物界：原生動物、粘菌、藻類を含む  
(藻類だけでも9つの門がある！：紅色植物門、灰色植物門、  
緑色植物門、クリプト植物門、不等毛植物門、ハプト植物門、  
渦鞭毛植物門、クロララクニオン植物門、ユーグレナ植物門)

その後、分子系統学研究から遺伝子の塩基配列の違いを基に生物が分類される。その結果、真正細菌と古細菌は、同じ原核生物でも、真核生物と細菌ほど離れていること、原生生物は非常に多様に分化していることから、古細菌、細菌、真核生物の**3ドメイン説**が提唱されるようになった（が、諸説ある）。

好きな生き物はどこに分類されるだろう？

#### 分類学 SYSTEMATICS (TAXONOMY)

生物の種をその諸特徴によって類別し、整理体系としての分類体系を作成し、生物の多様性を認識・解明するための学問（岩波 生物学辞典 第4版）

生物の種や群としての特徴をまとめて分ける

→その種や群を理解する上で重要であり、生物学の基礎ともいえる学問

生物を考える上ではほかにも、生理学や発生学等さまざまな学問がある。その中で今回は生態学にフォーカスを置いて授業をする。

### 3. 生態学という学問

#### 生態学 ECOLOGY

生物の生活の法則をその環境との関係で解き明かす科学（生態学入門 第2版）

生物は様々な面で周囲の環境に対応し、ある程度の環境変動に対応しつつ、多数の生物種と相互作用しながら生活→共通性ととともに多様性が生じる

共通性（前述）と多様性の両視点から生物を理解しようとする学問

#### ●多様性について考えてみよう

生息環境の多様性がもたらす種や生態系の多様性

例☆熱帯雨林・サンゴ礁：多種が存在し、多様な種間関係を維持

→種多様性は緯度が低くなるほど高い傾向

☆深海の熱水噴出孔（サーマンベルト）：水深400～1500m

化学合成細菌が硫化水素やメタンを用いて有機物を合成

→化学合成細菌との共生で生息可

## 多様性の歴史

約 45 億年前 地球誕生 (深さ数千 m のマグマの海)

微惑星の衝突が繰り返されたことによる

→衝突が収まる

→温度低下・マグマ消失

→大気中の水蒸気が水となり雨が降り続け海が出来る

→二酸化炭素は海洋に吸収され、温室効果なくなり冷却進む

約 35 億年前 最古の細菌化石

約 30 億年前 シアノバクテリアなどの原核生物誕生層状に重なる

→“ストロマトライト”(調べてみて!)

～6 億年前 4 回の氷期→寒冷化

多細胞生物からなる群集出現 (エディアカラ動物群)

5.3 億年前 カンブリア爆発 (バージェス動物群)

鰓を用いた呼吸が主流に+体制面の多様化 (現在と同レベル)

←捕食者が出現し複雑な食物網が形成されたことによる

約 4 億年前 陸上へ進出

藻類が生成した酸素からオゾン層が成立。紫外線の影響が緩和

→動・植物は相次いで本格的に陸上進出

絶滅と多様化を繰り返し現在の生物層へつながる

## ●生態学の細分化

生態学も細分化されている

生態系生態学 / 群集生態学 / 個体群生態学 / 行動生態学 / 進化生態学 / 生理生態学 / 分子生態学 (細分化は問題視もされており、各学問を結びつけた総合的な研究の重要性が叫ばれている)

今回は進化生態学、行動生態学、群集生態学のお話

## ●生態学の歴史

1800s J.B.Lamarck 生物にはより高等になろうとする内的生命力があり、生物の系統は時間とともに直線的に変わっていく。その過程で、多くの動物は役に立つ適応を獲得する (用不用説)。

C.R.Darwin イギリスの自然科学者。卓越した地質学者・生物学者でもあり、種の形成理論を構築“種の起源”を著す。

自然選択のプロセスを通し、生物が進化したことを示す

E.H.Haeckel ダーウィン進化学を広める (生態学 Ecology 名付け親)

1900s C.S.Elton “生態学とは生物の生活を研究する学問”

ネズミを用いた個体数変動調査・ニッチ

E.P.Odum “生態学とは様々な生物グループと環境との関係性を研究する学問”  
物質生産の面から生物群集を捉える

## II. 進化 ～ダーウィンが教えてくれたこと～

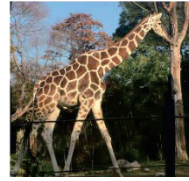
動物はなぜこのような形をしているの？

“進化なくして生態なし”

進化について考えてみよう

短い鼻口  
小さい耳  
長い首  
細い胴  
細い脚

長い鼻口  
大きい耳  
短い首  
太い胴  
太い脚



### 1. ダーウィン誕生以前の世界

・ダーウィン誕生（1809年）以前のイギリス “全ての生物は神によって創造された”

→生物の種は互いに関係のない別々の存在として創造され、そのあと変化することもなかった。人間は特別場存在で、自然界の外側、その頂点に位置（キリスト教 天地創造説に基づく）。

・地球年齢

“地球が誕生してから 6000 年しか経っていない “

→この年月で進化できるわけがない！（実際は 45 億年の歴史あり）

・化石

偶然に出来上がった神のいたずら→ノアの洪水で滅びた生物が保存されたもの。太古の生物種の遺体であり、絶滅した種も含まれる（各種は神が創造）。

・ダーウィンが誕生したころ

産業革命を経験し、変革の時代を向かえ、社会は変わりつつあった

### 2. ダーウィンが“進化”という考えにたどり着くまで

●科学大好き少年

・スコットランドエディンバラ大学 医学部に入学（させられる）

・自然史学者グラントと出会う

グラント “あらゆる植物と動物は、単純な海生の祖先種を共有しているのでは？”

・(研究のできる)牧師を目指し、ケンブリッジ大学に入学

・昆虫採集マニアグループの一員になる

・植物学者ヘンズローと出会い、種に関して学ぶ

・地質学者セジウィックと出会う

セジウィック “地球は長い年月をかけて大々的に変化を受け、現在も変化している”

・卒業後、「自然史学者として軍艦ビーグル号に乗らないか？」との誘いを受ける

●ビーグル号に乗って世界へ

ビーグル号（全長 27m・ダーウィンの部屋 3m × 3.3m）

目的：南アメリカの海岸線を調査し、港の海図を作成すること

ダーウィンの目的：科学調査。全航海の 3 分の 2 を陸地で過ごす

無給・無支援

持ち物

調査道具（クリノメーター・望遠鏡・顕微鏡・磁石…）・聖書・ピストル・こん棒

5年(1831~1836年)の航海 →1500種以上の標本をイギリスに持ち帰る

●ガラパゴス諸島へ(写真を探して!)

○黒一色の世界

- ・黒い溶岩でできた土地。それと同じ色のトカゲ
- ・多くの種は環境に完璧に適合しているよう
- ・人間を恐れないため、観察しやすい

○大陸に生息するグリーンイグアナと違うイグアナ

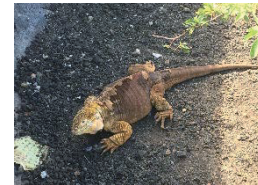
・ウミイグアナ(写真を探して!)

あしと頑丈な爪はゴツゴツとした海岸の上を這うことに対応している。海中で採食できる  
1時間の潜水が可能。脚をわき腹にぴったりとつけ、尾を使い、ワニのように泳ぐ



・リクイグアナ(写真を探して!)

ウチワサボテンをトゲごと食べる。サボテンに含まれる水を摂取することで1年は水分を取らずに生活できる



→でも大陸には生息せず、島の環境に対応したイグアナはどこから来た?

○島ごとに違いがある



・ダーウィンフィンチ(写真を探して!)

各島に、そこにしかない固有種がいる

→数キロしか離れていない上に、物理的環境も同じガラパゴス諸島の各島に生息する多くの固有種は、どうやって生まれたのか? 神様が各島の環境に合うように創生したのか?

・ガラパゴスマネシツグミ(写真を探して!)

それぞれ肉眼で見える範囲の島に住んでいて、自然界の同じ場所を占めつつも、形態は少しずつ異なる。これらはただの変種に過ぎないように思える。



(変種: 動物分類学において、種内のあらゆる変異型をさす。)

→しかし、あるとき、1種のマネシツグミが大陸からわたってきて、ガラパゴス諸島に広がり、別々の島でそれぞれが変わり始めたと考えたらどうだろう? 変種がどんどんと変化し、交雑できなくなり、別種となりたらどうだろう

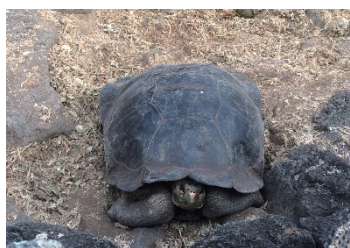
○同じ種なのに違う形

・ガラパゴスゾウガメ(写真を探して!)

甲羅: ドーム型と鞍型



鞍型→首を持ち上げて高い場所のサボテンを摂餌



ドーム型→地面に食草が生えている島にしか生息していない



→環境に適応するように変化したのでは？

“大陸の種が何とかガラパゴスにたどり着き、そこで自分が目にしたような種に変わった可能性はないだろうか”

=島の特殊な環境に特異的に適応したのでは？

●フォークランド諸島と大陸を比較して

○諸島のマゼランガン（写真を探して!）→人間を恐れない

大陸のマゼランガン→警戒心が強い

→少なくとも本能的な行動は生息環境に応じて時間と共に変化している

○同じ鳥でも

諸島の鳥の羽色：諸島の大地の色に似てくすんでいる

大陸の鳥：鮮やかな羽色を持つ

一方で、

・諸島と大陸で同じ環境でも、同じ種が生息していない

・違う環境でも大陸の種と諸島の種が似ている

環境に合うように神が生物を創生したわけではなさそう

→みな共通の祖先から起源し、各環境下に合うように変化しているのでは？

●化石と生物を比較して

○生物は神による創造物ではない？

化石から見る過去に創造された種と、現存する種には違いがある

新しい種も神が創造しているわけではない

→昔の種は死滅し、新しい種が次々と出現している

○アルマジロ（写真を探して!）

絶滅種の化石よりもサイズは小さいが驚くほど化石と似ている

→たくさんの種が絶滅し、その後、新種に置き換わっている？

置き換わったのではなく、ゆっくりと変化してきたのだろうか？

○ナマケモノ

大陸で生活するナマケモノの大型個体は絶滅し、化石として発見

樹に登って生活する小型個体は生存し続けている

→似ている死者と生存者から、地球上への出現と消滅を明らかにできそう



ビーグル号を降りたのち、標本や航海中のノートを見ながら、進化という考えを深める

●ロンドンでの日々

船上で思いついたアイディアは正しいのであろうか？

新しい種は以前からいた種から誕生する？だとしたら、どのように？そしてなぜ？

\* Key words 至近要因 How(どのように)? / 究極要因 Why(なぜ)?

生態学の問題に取り組むには

行動・生理・生化学的視点：How?—至近要因

進化的視点：Why?—究極要因

の2つの視点が重要となる

鳥類学者 ジョン・グールドへ標本を見せた結果、ダーウィンが別の種類であると渡していた鳥類の標本は、どれも同一種の“フィンチ”であった

どのように (How?) 違いがもたらされたのか？

なぜ (Why?) 違う形態を持つようになったのか？



ダーウィンフィンチ (14種)：周囲の環境に適応し姿を変えた

How?—島ごとに植生が異なる→それに合わせてくちばしや顎・頭部の形が変わる

(そこには特定遺伝子の発現が関わっている)

Why?—①簡単には島間を移動しにくい (異所的種分化)

②島内で餌を食べ分けた (同所的種分化)

ことにより、長い世代を繰り返して、14種類にまで種分化した。

### 3. 種の起源 The Origin of Species

・生物は神が創造したもの、と言われ続けてきた中で、“進化”という概念は受け入れられるのだろうか。ビーグル号から降りて20年近く、自説の公表をためらう。

・1858年6月 自然史学者アルフレッド・ラッセル・ウォレスから、自身の学説とよく似た進化論を説いた手紙を受け取る。

・約1年後“種の起源”出版

種の起源 を読んでみよう！

Key word 適応

環境に対して形態・生理・生態・行動の面で対応すること。

遺伝的変異が関連し、進化的な適応がおこる。

さらにそこに、生物個体はその表現型を環境条件に応じて変化させる能力などが介在し、適応が成り立つ。

一方、一世代内での環境への対応は”順応”という

以下の課題からひとつ選び、その問いに答えよ。  
分からないこと、知りたいことを述べても良い。

1. 自然選択とは？

自然選択とは何か？種の起源に書いてある内容を要約し、端的に述べよ。  
また、自然選択が起こりやすい環境とはどんな環境であると述べているか。

2. なぜ個体数は増え続けない？

何もなければ生物は増加し続けるが、実際は増加し続けることはない。ダーウィンは、増加を抑制する原因が何であると述べているか、それが生じた例を挙げつつ答えよ。

●解説①自然選択

○自然選択とは

“有用で、しかも遺伝する変異を備えた個体のほうが（環境により良く適応した個体のほうが）、そうでない個体よりも長生きし、その形質の変異を子孫に伝える。

このように、種が環境に適応した方向に変化する過程を自然選択という”

身の回りにいる生物は、自然選択の結果生じている

- ・ 生息環境に最も適応しており、生存率、繁殖率が高い
- ・ 同じように適応した子孫をたくさん残す
- ・ 繁殖が何世代も繰り返され、少しでも適応した個体がどんどん多数を占める
- ・ 一方、適応していない個体は自然の作用によりふるい落とされる

つまり自然選択は、

- ・ ある形質が個体間で異なること
- ・ その変異が遺伝すること
- ・ その変異が原因となって繁殖や生存に個体差が生じること

の3条件を満たせば必ず作動する。

○より詳しく説明すると

1. DNA配列の複製ミス（ $10^9 \sim 10^{10}$ /塩基）により生じる（X線や紫外線、放射線等の物理的刺激や化学物質による刺激などが原因とされる）→突然変異が生じる
2. 集団を構成する個体が祖先から子孫へ受け継ぐ対立遺伝子に複数の種類ができる  
→対立遺伝子の組み合わせにより遺伝子型の異なる個体が生じる  
\*偶然に生じる複製ミス 変化の方向性はない  
\*配偶子や生殖細胞が出来る時の細胞分裂で生じた突然変異（遺伝に関連）だけが進化に寄与する
3. 遺伝的に異なる同種内の個体間で、より生存に有利な個体が生き残り（選択）、そのDNAを持った子孫を増やす
4. 環境に適応した形質は、世代を経てよりたくさんの子孫に受け継がれる。  
時間を経て集団内にいきわたる→進化

○自然選択の例

オオシモフリエダシヤクの工業暗化

短期間で自然選択が進んだ例（写真を探してみて！）

英国で工業化が進む

→石炭が燃やされ、建物は黒色化、白色の樹皮はむけ黒い樹皮がむき出し

→それまで白色（明色型）しかいなかったが、とても目立って鳥に食べられちゃう！

→黒色の個体（暗色型）が出現

→わずか100年で暗色型がほとんどを占める

原理

暗色遺伝子  $C$  は明色遺伝子  $c$  より優性で、 $CC \cdot Cc$  は暗色型に、 $cc$  のみ明色型になる

しかし、突然変異で暗色型が現れても捕食者に食べられ、死んでしまっていた

暗色型が明色型よりも有利な環境になると、暗色型がより長く、多く生き残るようになり、そのDNAを子孫に残した

●解説②個体数はなぜ増え続けられない？

○トマス・マルサス著「人口論」

人口増加は簡単に食糧供給を上回るが、食料や居住空間をめぐる競争が人口を絶えず抑制する方向に働く→ダーウィン “野生生物にもあてはまるのでは？”

生き残れる以上の動物が生まれるが、成長・生存に必要な餌や空間をめぐった競争が絶えず起きている

○個体数の増加を抑制する諸要因（種の起源より）

競争・捕食・気候・伝染病

○個体数の増加（マッカーサー&ウィルソン 1967）

個体数の増加率は内的自然増加率  $r$  と環境収容力  $K$  によって説明される

$$\begin{aligned} \text{個体数の増加率 } dN/dt &= \text{瞬間出生率 } (B=bN) - \text{瞬間死亡率 } (D=dN) \\ &= (b-d)N \quad \text{この時の } b-d=r \text{ と置く} \end{aligned}$$

$N$ : 個体数

$r$ : 内的自然増加率

よって個体の増加率 =  $r$  内的増加率  $\times N$  個体数

しかし、個体数が無限に増加しない力が働く  $K$ : 環境収容力

$$dN/dt = r(1 - N/K)N$$

$r$ - $K$  選択説: 生物の進化の方向を二分類すると、

$r$  を大きくする方向と  $K$  を大きくする方向がある。

$r$  : 密度が低く競争者少ない時に、どれだけ個体群が増殖できるか

$r$  戦略: 競争能力を犠牲にして潜在的な繁殖能力を高める

$K$  : 特定条件で生息できる最大密度

$K$  戦略: 潜在的な繁殖能力を犠牲にし、競争能力を高める

“種の起源”には他にもダーウィンが疑問に思い、調べ、考えた多くのことが載っている

#### ●ハトから学べること

“様々なハトはみんな別々の祖先を持つ”

望みの特徴を選択して固定する→品種改良

人間による選択育種・品種改良は自然選択に近いことをやっているのでは？

#### ・みんなの興味

野生のカワラバトから、特別な羽色、くちばしの形を持つハトを作り出すこと

#### ・ダーウィンの興味

動物の1つのタイプにどれほどの遺伝的な変異があるのか？

→品種改良は、自然界で新種が生じる過程をスピードアップさせているのではないか？

ハトは間違いなく共通の祖先から様々なタイプに変化した。何十年かの人為的な選択で

これほどの多様性が生み出せるのなら、何百年もかけた自然選択が生み出せる多様性は

すごいだろう

#### ●系統樹

進化の結果生じた分類群間のつながり(系統)を記したもの

手は物をつかむため、コウモリの翼は飛ぶため、イルカのひれは泳ぐため。前あしは見かけも機能も異なるが、骨格は良く似ている

ダーウィンは、これらは祖先を共有しているのではないかと考え、それらのつながりを図にする→系統樹

生物の類縁関係を時間軸に対応させて表すことで、生物進化の過程を示した

## 4. 進化とは？

自然選択の結果生じる

世代を経るうちに異なる性質を持つ生物が現れること

その性質は親から子、子から孫へ代々遺伝する

- ・小進化(～種分化)：対立遺伝子や遺伝子型の頻度の世代を超えた変化
- ・大進化(種分化～)：種が分かれ、別の系統群を形成

#### ●進化の結果①：周期ゼミ

・米国に生息、強い定住性・集合性

・成虫は13年、または17年に一度大量発生

13・17と聞いて何か思いつく???

13・17は素数(1とそれ自身以外では割り切れない自然数)

なぜこの周期？

How?→卵から帰った幼虫が地中にもぐって13(17)年を体内時計より数えている

Why?→氷河期のころ、幼虫でいる期間が伸びた→運よく成虫に羽化し、交尾できた個体

は、子孫同士が確実に出会えるよう周期性を獲得した

素数どうしの最小公倍数は両者の積

→他の周期せみと出会う確率かなり低く、同周期の多くの子孫残せる！

## ●進化の結果②：共進化

幼虫ー植物

植物の進化

幼虫に食べられないようにするため、防御物質を含んだ化学物質を放出

→植食者は動けなくなる

幼虫の進化

防御物質を免れられるようになる種が出現

→・先に液の出る葉脈を噛み切り、毒を出し切る

・解毒作用を持つ種もいる

・共進化：互いに影響しながら進化すること

・軍拡競争：互いの対抗形質がどんどんエスカレートする競争

・順次進化：方向性のある進化 植物進化→昆虫進化

## Ⅲ. 動物の行動 ～奈良公園の鹿はなぜおじぎをするのか～

### 1. 助けあったり闘ったり

・同種どうし協力し互いに利益を得たり助け合う行動→社会性の誕生（授業の後半で）

・資源（エサやすみか、雄にとっての雌…）をめぐる争う(闘争)行動

アブラムシ：ポプラの新葉上で子育て→葉を独り占めしたい→雌同士が後脚でけりあう

イチジクコバチ：雄同士が樹上で大あごを使いケンカ

→傷ついたり真っ二つにされた個体が見られる

○雄どうしの闘争行動

例1.ライオンの子殺し

ライオンの群れ（成体雄1頭&複数雌）

成体雄が他のオスに追い払われ、オスが入れ替わる

→授乳中の雌は妊娠できないため前の雄の子は新しい雄に殺される

例2.キリンの首

キリンの首は雄のほうが雌よりも太くて長い

(性的二型：雌と雄間に、配偶子の大きさ以外に差が見られる)

雌をめぐる、首をこん棒のようにふってぶつけ合うため、大きな雄のほうが有利

クワガタ、シカ…

例3.交尾後の競争 精子競争

雌が複数の雄と交尾し、メス体内に複数の雄の精子が存在する場合に生じる

トンボ：交尾期の先についたトゲで精子貯蔵器官にためられて

いる前に交尾した雄の精子をかき出す

### 2. 配偶相手システムと行動

一夫一妻：特定の雄と雌がつがい関係を持ち、子育て

一夫多妻：雄が複数の雌と交尾

・例1. シオカラトンボ、アオハタトンボなどのトンボ

資源防御型：雌の餌を雄が防御し、寄ってきた雌と交尾

- ・例2. ゾウアザラシ（調べてみて！）

雌防御型：集合した雌（ハレム）を守る

- ・例3. レック型：餌に関係なく雄が集まり、求愛ディスプレイをし、そこに集まってきたメスと交尾

- ・例4. カブトガニ（繁殖期短い）

スクランブル競争型：雄が活発に動き回って次々に交尾

一妻多夫：雌が複数雄と交尾 養育は雄に任せる

アカエリヒレアシシギ（調べてみて！）

乱婚：雌も雄も交尾相手が複数

スニーカー：なわばり外の雄。縄張りに近づく雌と交尾してしまう

スニーカーがなわばり雄より小さいときに生じやすい（条件付き戦略）

○雌が交尾相手を選ぶ

- 例1. ツマグロガガンボモドキ（調べてみて！）

交尾の際に雄が雌に餌を渡す（婚姻給餌）

餌が大きいほど長時間交尾をし、多くの精子が雌の体内に移動する

- 例2. カワセミ

雌が餌をねだると、雄は魚を捕らえ、雌に与える（婚姻給餌）

雄の捕まえてくる魚の大きさと数から、雄の能力、なわばりの質を判断し、交尾相手を選ぶ

- 例3. アマガエルの一種

雌は、より長く鳴く雄を選ぶ

長く鳴ける雄の精子と受精させた方がオタマジャクシの成長が早い

### 3. 海は貝のパラダイス～家を持つ貝～

#### ●カサガイ（笠貝・傘貝）

- ・巻貝のグループの中でもっとも原始的な貝
- ・波が打ち寄せる岩上で生活（競争者や捕食者がたくさん）
- ・藻類を食べている

→快適に過ごすために家（家痕）をつくる

粘液に含まれる酸性の化学物質で岩を溶かし、柔らかくして歯で削り取る

くぼみと傘型の殻が軟体部を乾燥や気温、外的から守る

#### ●帰家行動

出勤時間：波が打ち寄せる時間

移動距離：3 cm ～ 4 m

ほぼ家に帰れる（帰家行動）→なぜ帰れる？

- ・地形記憶仮説

家近くの岩削る／家と違う場所に移す→処理の程度によって結果はバラバラ



・移動経路記憶仮説

帰る個体の位置ずらす→処理の程度によって結果はバラバラ

・粘液道しるべ仮説

粘液消す／他個体の粘液と交換→家に戻れない！どうやら粘液が関係していそう

●粘液ってすごい

成分：90% 水分／約5% 有機物質（糖たんぱく質）／残り 塩化ナトリウム、塩化カルシウム、塩化マグネシウム

・貝類の軟体部を守る衣服

乾燥、雨から身を守る / 汚れを落とす / エサの獲得 / 排泄物生成と排泄 / 岩への固着・移動 / 道しるべ / 岩を削る / 敵の撃退（毒入り粘液） / 肥料・・・

・農業をする貝

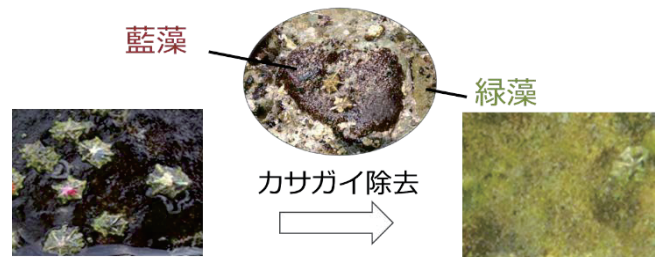
家の周辺でエサを調達する必要がある

→特定の海藻（藍藻）を育ててしまおう！

肥料：粘液（タンパク質や糖）

草取り：緑藻を食べる

害虫駆除：敵の侵入を防ぐ



#### 4. 社会行動

群れの中での個体間の協力的な行動

例1. 社会性昆虫（アリ、ハチの一部）

自分は繁殖せず、他個体の繁殖を助ける（ワーカー）

→ワーカーは繁殖に不利なので、進化できない？

←× 血縁関係にある個体の利益を上げることで、結果的に自分と同じ遺伝子を残すことになる

例2. ベルディングジリス

捕食者が近づくと、警戒声を出し、それを聞くと穴に逃げる

血縁関係のある相手（親子、兄弟姉妹）に対して出す

例3. 鳥・哺乳類の一部

繁殖シーズンに、自分は交尾せずに、他個体の繁殖を手伝う（ヘルパー）ワーカーと違い、のちの繁殖シーズンには繁殖する

（ハダカデバネズミ：不妊のワーカーを持つ真社会性哺乳類）

#### 5. 文化的行動

一つの行動が他の個体に伝播し継続するような行動

例1. ニホンザルの芋洗い行動

一頭のサルが小川でサツマイモの泥を落とす

→それを見ていた他のサルが真似をし、行動が広がる

例2. チンパンジーのシロアリ釣り

アリ塚に穴を開け、小枝を挿入し、小枝についたアリを食べる

小枝は自分で選び、歯で形を整える

ある個体がこの行動をはじめ、他個体がこれを真似し、広がった

### 例3. シジュウカラの牛乳ビン開け

配達された牛乳ビンのふたを開けてしまう

ある一羽がこの方法をあみだし、他個体が模倣した

### 例4. 鹿のおじぎ行動

奈良公園の鹿はおじぎのような行動をする。なぜ？

#### ●鹿のおじぎ行動 (Akita et al. 2016)

・おじぎ行動は宮島の個体よりも奈良公園の個体がより多く行う

・奈良公園内では、人の少ないところよりも多いところでより頻繁におじぎをする

→おじぎ行動は人との出会いによって獲得された

・鹿のおじぎ行動は成体で最もよく見られ、一歳仔、小鹿と続く

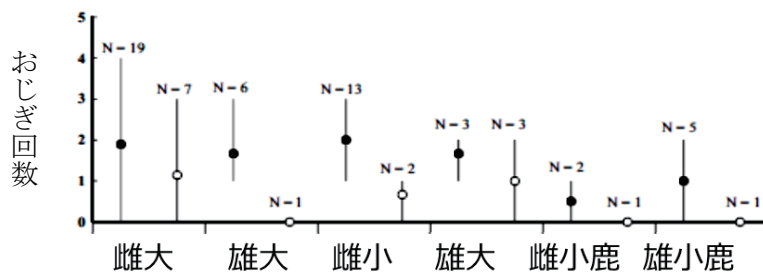
・成体では上下の、小鹿では斜め方向のおじぎが見られた

→おじぎは年を経るごとに上達する

・若い個体のおじぎ行動頻度は、成体のおじぎを見た後増える

→個体間伝播の可能性

おじぎは文化的行動の一つといえるのでは？



その後、おじぎがどのような時に起こるか調べられ、その結果、オスがオスに向けて行うことが多いことが示唆された

→ニホンジカが行うおじぎ行動は攻撃の前行動を起源とする行動では？

おじぎ行動をしている鹿（攻撃をしようとしている？）と、それを見ている人間（おじぎをしてくれていると思っている）との間に考え方のずれが生じている可能性

→人々はおじぎ行動をどう捉えているのだろうか

おじぎの文化のある日本とない海外で考え方に違いはあるのだろうか？

人がおじぎ行動をどう考えているかアンケートを取ってみよう！

●鹿のおじぎ行動実習 アンケート内容

1. どちらの都道府県から来られましたか。
2. 奈良の鹿が人に対して頭を上下に振る行動を行うことを以前に聞いたことはありますか。  
はい →3へ  
いいえ →4へ
3. 事前情報から、鹿が人に対して頭を上下に振る行動は鹿にとってどのような意味があると考えていましたか。以下の選択肢から1つお選び下さい。  
a.感謝 b.あいさつ c.催促 d.威嚇 e.その他  
( )
4. 実際に鹿と接して、鹿が人に対して頭を上下に振る行動は鹿にとってどのような意味があると考えましたか。以下の選択肢から1つお選び下さい。  
a.感謝 b.あいさつ c.催促 d.威嚇 e.その他  
( )
5. 鹿に鹿せんべいをあげたことがありますか。  
はい  
いいえ
6. (1) 鹿から攻撃を受けたことはありますか。  
はい →(2)へ  
いいえ →質問は以上です  
(2) どのような攻撃を受けましたか。(複数選択可)  
a.かむ b.鼻先でつつく c.前足でたたく d.角を使う e.追いかける  
f.その他 ( )  
(3) 攻撃を受けた前後で鹿が頭を上下に振る行動は見られましたか。  
a.攻撃前 b.攻撃後 c.みられなかった d.わからない
7. オス(角あり)とメス(角なし)で行動(攻撃性など)に違いはありましたか

(上記アンケート項目7は、参加学生の希望により追加)

●鹿のおじぎ行動実習 アンケート取り方

1. 鹿せんべいをあげていた人(少なければそれを見ていた人)に近づく
2. 素性を明かし、アンケートへのご協力を懇切丁寧をお願いする
3. 海外の方にも臆せずアンケートのお願いをしよう!  
We are students of NWU.  
We are studying about behavior of deer in Nara Park.  
Please tell me your opinions about deer!
4. アンケートに答えてくれた方には鶴を渡し、懇切丁寧にお礼を言おう!

楽しむことが最優先!新たな発見を一緒にしましょう!

- ・服装：とにかく温かい格好で！  
そして鹿にかまれてもいい格好で！（去年スカーフを取られた子も）
- ・持ち物：アンケート用紙とペンはこちらで用意しますが、最後のプレゼン用に鹿や人の様子を観察しておくといので、メモ用紙があると GOOD！

#### IV. 鹿はおじぎをしているの？（野外実習）

2017年12月25日 奈良公園にて野外実習を行う

#### V. 実験データを解析しよう！（データ解析・発表資料作成）

取ったデータを解析しよう！

##### 1. データを理解する

データを理解するために、

- ・データをまとめ数値化する
- ・グラフを書く …

しかし、今回のアンケート結果には一般性があるのだろうか？

単一の観察を一般化できる例

- ・素粒子の質量
- ・異なる酸の PH の値 など

出来ない例

- ・ある日本人 2 人にアンケートを取った結果、2 人とも鹿のオスの方が攻撃性が強いと答えたため、この世には、雄の攻撃性が強いと考えている人の方がそう考えていない人の数よりも多いと結論付ける

雄と雌の攻撃性の違いを、2 人の解答から結論づけられる？

学年ごとの学力の違いをみんなの成績だけから判断できる？→とても危険！

→すべて同一の素粒子とは違い、生物には変動性あるから

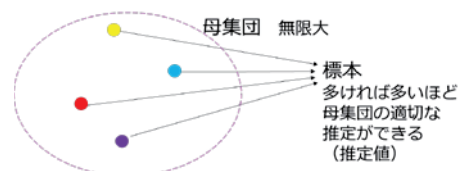
そこで重要なのが、統計！

統計によって、変動性の問題を克服できる

##### 2. 取ったデータをどうとらえるか

###### ●統計の基礎的な考え方

- ・母集団：無限に大きな可能性を持つ集団  
(奈良公園に来たことのある人全員)
- ・標本：母集団から無作為抽出される部分集合  
(アンケート対象者)



ここから得られる測定値は、母集団のパラメータを推定するために用いられる

今回は・・・

- ・雄と雌の鹿の攻撃性の違いについて、20 人（標本）に聞く
- ・それぞれの人数が母集団の推定値となる

←しかし、特定の人々を選んだことによって、偶然に得られた結果である可能性は？

### Next Step

導かれた結果が、偶然出現した可能性を計算する。

この確率が十分に低い場合にのみ、偶然起こった可能性がほとんどない

(=必然的に起こった) と判断し、結果が有意であると結論する。

### →統計的検定

主観的→客観的判断へ

### ●統計的検定の基本ステップ

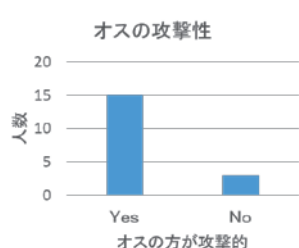
Step 1. 帰無仮説の設定

Step 2. 検定統計量の推定

Step 3. 有意確率算出

Step 4. 帰無仮説棄却の判断

### Step 1. 帰無仮説の設定



帰無仮説: 証明したい仮説と真逆の仮説

“オスの方が攻撃性が高いと思った人とそう思わなかった人の数は同じ”

対立仮説: 証明したい仮説

“オスの方が攻撃性が高いと思った人とそう思わなかった人の数は違う”

本来証明したい対立仮説を採用するために、帰無仮説を設定し、それに適合するデータを偶然に取れる確率を算出する。もし、帰無仮説が偶然取れたのであれば、帰無仮説が正しくないと言う確かな証拠になる

→帰無仮説棄却

→対立仮説採用

“帰無仮説が正しくないとする確かな証拠がない限り、帰無仮説は棄却しない”

### Step 2. 検定統計量の推定

標本に含まれる変動性に対し、何らかの有効な結果の度合いを吟味する

度合いが大きいほど検定統計量が大きくなる

どれくらい違うかの度合いを数値化

### Step 3. 有意確率算出

検定統計量と標本数から、帰無仮説が真実である場合に、そうした測定値の結果が偶然得られる確率 (有意確率)  $P$  値 を算出する

(検定統計量と標本数が多いと有意確率は小さくなる)

### Step 4. 帰無仮説棄却の判断

最後に、帰無仮説を棄却し、対立仮説を採用するかの判断を行う

一般的に、有意確率が 5% (0.05) 以下の場合に帰無仮説を棄却できている

(棄却しなければならぬほどの強い証拠があったことになる)

有意確率が 5% を超える場合、帰無仮説を棄却する証拠はない

(ただし、このことは、帰無仮説を支持する証拠を示しているわけでもない)

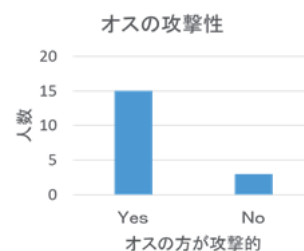
### 3. 鹿データを使って統計的検定を試みよう

#### ○疑問

オスの方がメスよりも攻撃的だと感じた人の方が多い？

明らかにオスの方が攻撃的だと回答している人の方が多い

うだが、統計的検定によってもそれが証明できそうか？



#### ○観測度数と期待度数

攻撃的だと答えた人とそうでないと答えた人 (観測度数) が、それぞれ期待される数 (期待度数) とどう違うか知りたい

→ 差に対する  $\chi^2$  検定を用いる

期待度数 = オスのほうが攻撃的と思った人 : 思わなかった人 = 1 : 1

$\chi^2$  = 検定統計量

= 観測数と期待数との差をあらわす尺度

=  $\sum (\text{観測度数} - \text{期待度数})^2 / \text{期待度数}$

\* 観測度数と期待度数の差が大きければ大きいほど、 $\chi^2$  の値が大きくなり、両者がたまたま少しだけ違うという可能性が低くなる

#### ○統計的検定スタート

##### 疑問

オスの方がメスよりも攻撃的だと感じた人の方が多い？

Step 1. 帰無仮説を設定しよう

オスの方がメスよりも攻撃的だと感じた人と感じなかった人の比は、

期待される比 (1 : 1) に等しい

Step 2. 検定統計量 ( $\chi^2$ ) を算出しよう

Step 3. 有意確率を算出しよう

① Excel を開いて

② データを打ち込もう

オスの方が攻撃的	人数	期待数
Yes	15	9
No	3	9
計	18	18

(15+3) ÷ 2



### ③計算していこう

(Excel の場合、まず有意確率を出してしまいます)

#### Key word 自由度

平均の周りでの標本のばらつきの独立な情報要素  
 今回は、雄の方が攻撃的 Yes or No の 2 択なので、  
 独立な情報要素は  
 $2-1=1$  (片方が決まれば、もう片方も決まる)

オスの方が攻撃的	人数	期待数
Yes	15	9
No	3	9
計	18	18

確率( $\rho$ ) = CHITEST (実測値範囲, 期待値範囲)  
 $\chi^2$ 値 = CHIINV (確率, 自由度)

オスの方が攻撃的	人数	期待数
Yes	15	9
No	3	9
計	18	18

確率( $\rho$ ) = 0.004677735  
 $\chi^2$ 値 = 8

#### Step 4. 帰無仮説棄却の判断をしよう

帰無仮説：オスの方がメスよりも攻撃的だと感じた人と  
 と感じなかった人の数は同じだ

=オスの方がメスよりも攻撃的だと感じた人と感じなかった人の比は、期待される比  
 (1 : 1) に等しい

有意確率が 0.05 より小さい

=帰無仮説を棄却できる強い証拠がある

→オスの方がメスよりも攻撃的だと感じた人と感じなかった人の比が 1 : 1 でないことが  
統計検定によって証明された

## 4. 発表

結果をまとめて、スライドを作り、次回の授業で発表しよう！

○発表内容

- (1) 名前と所属
- (2) 背景と目的
- (3) 方法
- (4) 結果

特に自分が注目したい結果をピックアップし、  
 目で見て分かりやすいようにグラフや表などを  
 作ろう

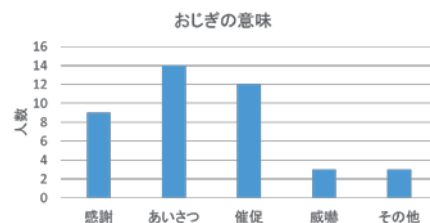
#### (5) 考察

結果から分かることはもちろん、様々な観点から考察してみよう

また、今後の課題として、アンケートの取り方の改善点、自分で内容を考えるなら、  
 聞きたいこと、その理由が発表できるとさらに GOOD!

例 ・ 鹿のおじぎを見たことがある人とない人で、鹿のおじぎの捉え方が  
 違いそうか

- ・ 鹿に攻撃された人とされていない人で、鹿のおじぎの捉え方が違うか
- ・ 鹿にせんべいをあげる前と後でどのように意見が変わっているか  
 回答を得られた人のうちのどれくらいの人がそう思っているか
- ・ もっと〇〇の日にアンケートを取ればいいのか
- ・ もっと〇〇に意見を聞ければよかったのか



(6) 感想

○発表形式：2人1組 or 1人

発表時間：発表7分 質疑応答3分

発表準備：この後と次の授業の前半30分で作る（もし必要なら各自作ってくる）

評価：全員で点をつけあってもらいます！

VI. 発表

履修学生6人が発表したスライドと各発表へのコメントを載せる。

<p><b>シカのお辞儀行動 出身国別の意識の違い</b></p> <p>理学部数物科学科 吉田奈都子</p>	<p><b>背景と目的</b></p> <p>奈良公園に外国人観光客が来るようになったのはごく最近のこと</p> <p>↓</p> <p>外国人が日本人と違ったとらえ方をしたら、これまでのシカの行動が変化していくかも</p>
---	--

<p><b>お辞儀の意味(質問4)</b></p> <p>全体</p>	<p><b>日本</b>      <b>欧米圏(アメリカ、カナダ、オーストラリア)</b></p>
-------------------------------------	--

<p><b>中国</b>      <b>欧米(さつきと同じもの)</b></p>	<p><b>事前に知っていたか？</b> YESと答えた人</p> <p><b>中国...17人中11人(約68%)</b></p> <p><b>欧米...11人中2人(約18%)</b></p> <p><b>日本...12人中4人(約33%)</b></p> <p><b>全体...52人中24人(約46%)</b> 24人の内アジア人(日本を除く)は18人</p>
---	--

<p><b>その他アジア人 (東南アジア+台湾)</b></p>	<p><b>考察</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・事前に「お辞儀」と認識しているかいないかで、意識に差はある。</li> <li>・外国人が増えたとしても、意識に関係なく餌を与えるので、シカはこれからもお辞儀するだろう。</li> <li>・外国人観光客の増加という環境の変化が新たにシカの文化的行動が行われるかもしれない。</li> </ul>
--------------------------------------	---

コメント：海外の方々が奈良公園にこんなにも来るようになったのは最近のことなので、今後、海外の方との関わりのなかで、おじぎとは異なる何か新しい行動が生み出される可能性があるのではないかと、という視点は非常に重要。新たな行動が海外の方

との交流の中で生み出されれば、いまだはっきりとは示せていない、鹿が文化的行動をする、ということを示せるかもしれない。

## 奈良公園の鹿の、餌付けと攻撃の関係

文学部 言語文化学科 2 回生

### 背景と目的

歴史的価値があるとして名高い奈良公園には、日々数多くの観光客が、国内のみならず国外からも訪れている。

そんな奈良公園で、観光客を集める大きな要素となっているのが鹿である。

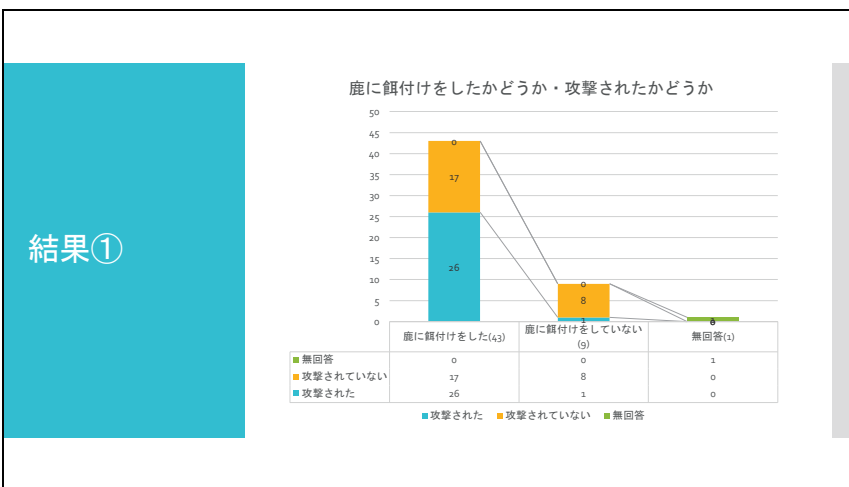
奈良公園には何匹もの鹿が生活しており、観光客は写真を撮ったり餌付けをしたりすることができる。

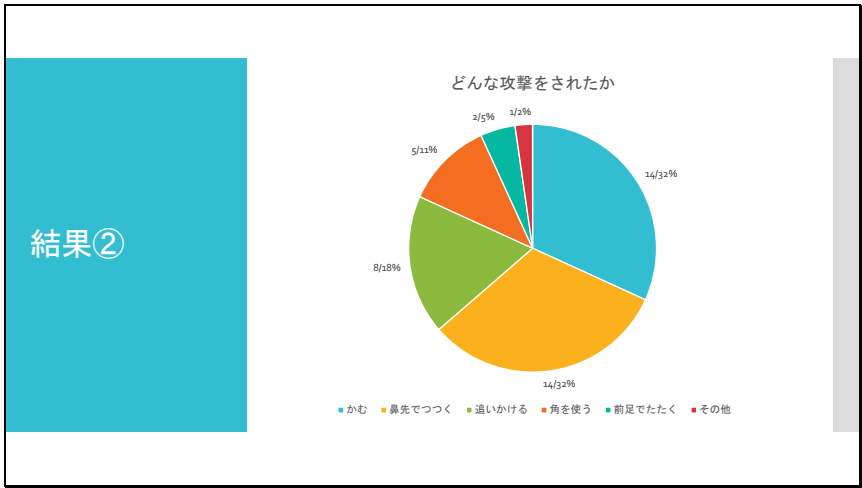
しかし、時折、餌付けをする観光客が鹿に攻撃されている光景を目にする。

そこで今回、観光客のうちどれほどの人数が鹿に攻撃されたのか、そこに餌付けは関係あるのか、どのような攻撃をされたかを調べる。

### 方法

- 奈良公園を散策する国内・外の観光客53人に、鹿に餌付けをしたかどうか、攻撃をされたかどうか、またどのような攻撃をされたかアンケートをとった。





考察

- 結果①から、奈良公園を訪れる観光客の多くは、鹿に餌付けをすることがわかった。また、鹿に餌付けをした観光客の半数以上が攻撃される一方、餌付けをしていない観光客の大半は攻撃されていないことがわかった。
- 結果②から、鹿からの攻撃は「かむ」と「鼻先でつつく」が多いことがわかった。
- 鹿の餌付けと攻撃は関係があり、餌付けをした観光客の方が攻撃されることが多い傾向がみられたが、その攻撃は鹿の口や鼻先によるものが多く、これは、一度餌付けをされた鹿が、再度その観光客に餌をねだっていることを意味しているのではないかと考えられる。

感想

- 課外活動の経験があまりなく、更にアンケート調査も行ったことがなかったため、今回の調査は私にとって非常に新しく、興味深いものであった。
- アンケートを調査を行うにあたり、日本人・中国人をはじめとするアジア人よりも、アメリカ人などの欧米人の方が愛想よく調査に協力してくれた。国民性などを考えるのも面白いだろう。

コメント：攻撃の中でも、口を使う攻撃は、攻撃というよりは催促に近いのではないかという考察はとても良い視点である。今回は攻撃というカテゴリーに入れたが、もしかしたら、シカは攻撃するつもりではない可能性がある。

# Basic Science II

理学部数物科学科  
数物連携コース 4回

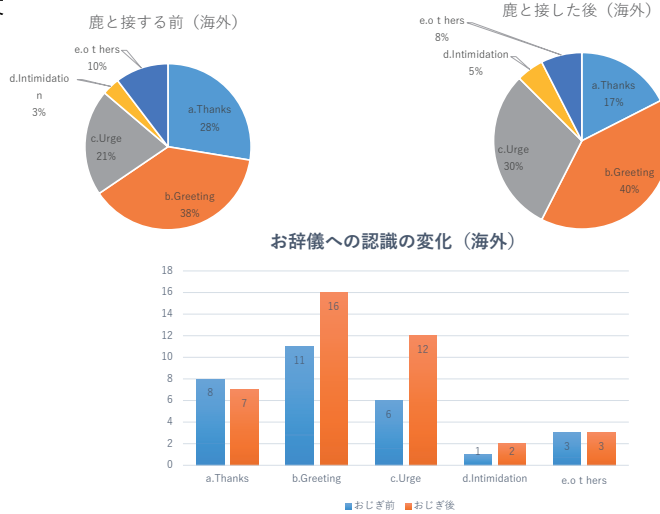
## 背景と目的

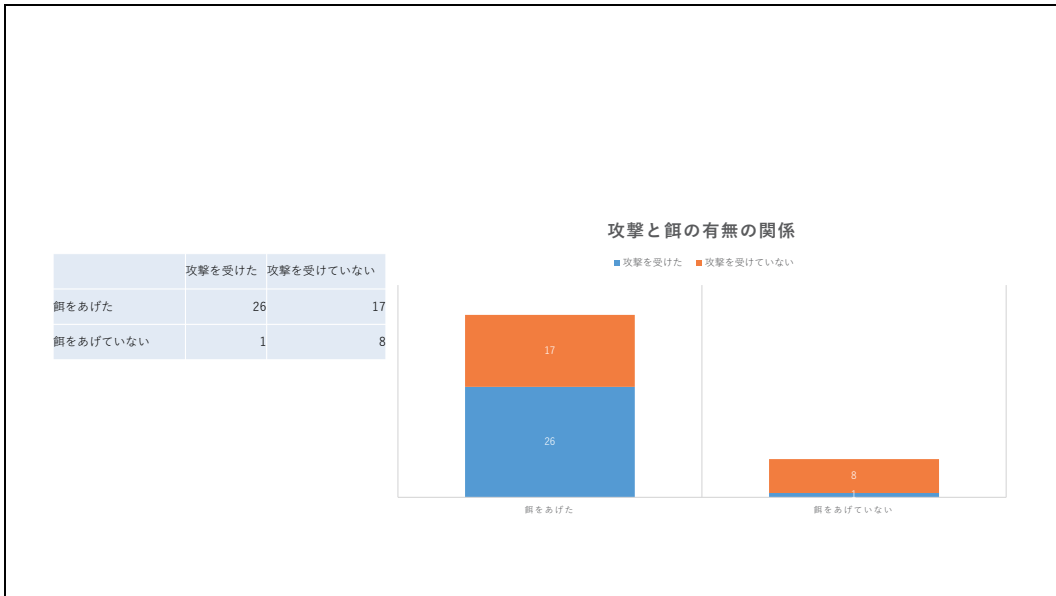
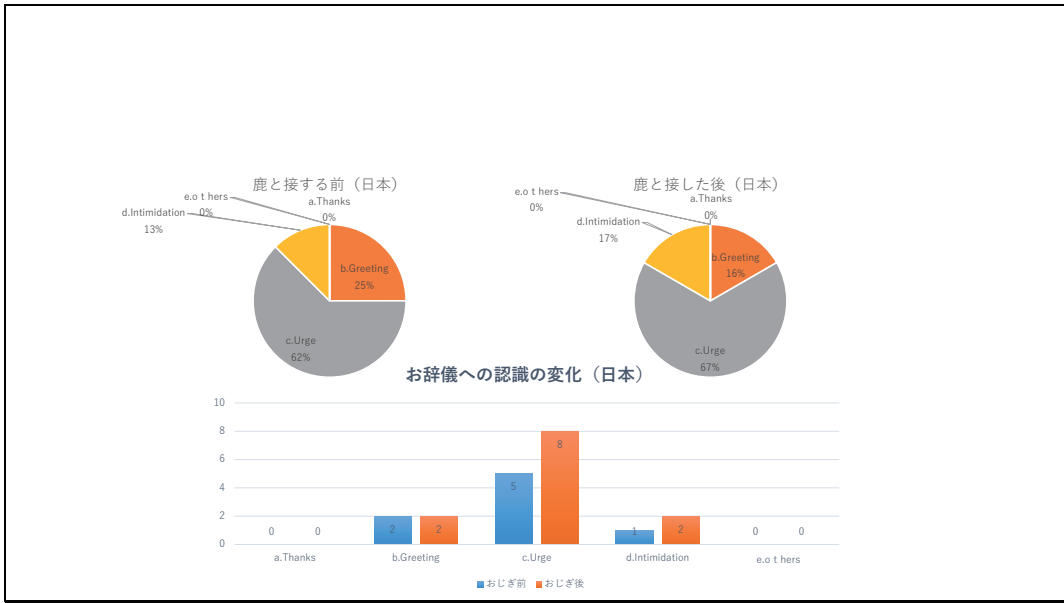
- 奈良公園の鹿は、人間から鹿せんべいをもらう際に、おじぎをするといわれている
- 鹿が頭を上下に振る行動について、人間がどのように認識しているのか、また、人の認識がどのように鹿の行動に影響を与えているのかを調べたい

## 方法

- 奈良公園にいる観光客にアンケートを実施
- エクセルを用いて集計を行い、分析する

## 結果





考察と感想

- 鹿は攻撃や威嚇をする事で餌が得られると考えているとも言えるのではないかな
- 日本人と海外の人のデータ量に差があるので、比較がしづらかった
- 人間も女性か男性かのデータがあったら面白いのではないかな

コメント：日本人と海外の方の回答数の差をなくしたい、そのためにより多くの方にアンケートに答えてもらう必要がある、という考察は重要である。より多くの標本を集めることが、母集団の推定の精度を上げる。女性か男性かで感じ方に違いがありそうなので、それを知りたかったという感想も興味深い。



## 鹿のおじぎ行動について

文学部1回生

### 背景と目的

- 奈良公園にいる鹿はおじぎのような行動をするといわれている。
- そしてその行動は年々増加している。
- 鹿がおじぎをする仕組みについて「餌・攻撃・おじぎの関係性」についてまとめたグラフを用いて考察する。

### 攻撃と餌の関係性

餌あり攻撃あり	26
餌あり攻撃なし	14
餌なし攻撃あり	1
餌なし攻撃なし	8

- 攻撃された27人の内26人が餌を与えていたことから、
- 攻撃は餌が与えられたときに発生しやすいということがわかる。

### 攻撃とおじぎの関係性

攻撃とおじぎの関係性あり	15
攻撃とおじぎの関係性なかった	8

攻撃を受けた前後で鹿がおじぎをしたと答えた人の割合は65パーセントであり、餌・攻撃・おじぎの3つは一連の流れとして発生しているということがわかる。

### 結果

- 鹿が餌をもらう時に攻撃・おじぎを頻繁にしていることから、鹿の攻撃・おじぎは人間に餌をもらうための芸なのではないか。
- 観光ガイドブックなどの影響でおじぎを期待する観光客の増加により、鹿のペット化がこれからさらに加速するのではないかと思う。
- 時間をかけて何度も同じことを教えれば、人為的に鹿におじぎをさせることができるかもしれない。
- また、攻撃をやめさせておじぎをさせることや、ふせやその場で回ったり、といった芸を教えることができるかもしれない。

### 今後の課題

- 鹿がおじぎをしていたかどうかを尋ねる質問が、攻撃を受けた前後に見られたかという限定した質問だけだったので、おじぎをしているのを見たかどうか、どのタイミングで見たのか、という質問があってもよかったかもしれない。
- 鹿に餌を与えた時におじぎをしたかどうか、という直接的なデータがなかったので、また機会があれば聞いてみたいと思った。

コメント：海外の方向けの観光ブックに、鹿のおじぎ行動に関して載っているものがあるので、鹿がおじぎ行動をすることを分かっている、おじぎをさせている海外からの観光客がいる。そのことがおじぎ行動をする頻度をさらに加速させている、という考察はその通り。人とのかかわりの中で生じたおじぎという行動は、それに興味を持っておじぎさせ、鹿せんべいをあげる観光客の登場で、今後ますます広がっていくだろう。

## 鹿のおじぎ行動と 攻撃の意味

理/化学生命環境/環境科学  
理/数物科学/数物連携

### 背景と目的

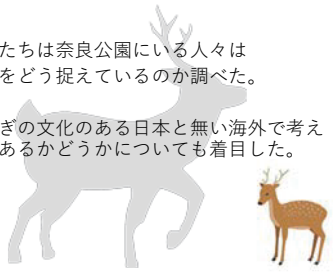
奈良公園の鹿はおじぎをするが、それは果たしてどういった意味のおじぎなのだろうか？

おじぎ行動をしている鹿（攻撃しようとしている？）  
それを見ている人間（おじぎをしてくれていると思っている）

との間に考え方のずれが生じているのではないだろうか？

そこで、私たちは奈良公園にいる人々はおじぎ行動をどう捉えているのか調べた。

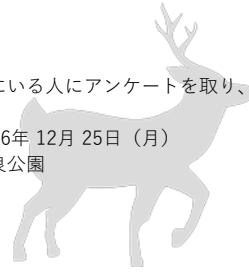
また、おじぎの文化のある日本と無い海外で考え方に違いがあるかどうかについても着目した。



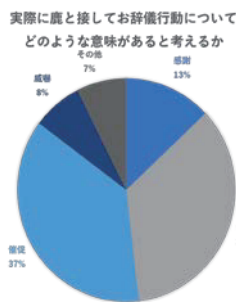
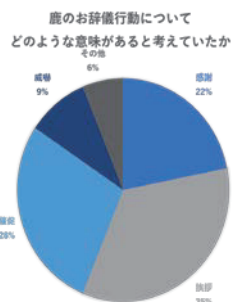
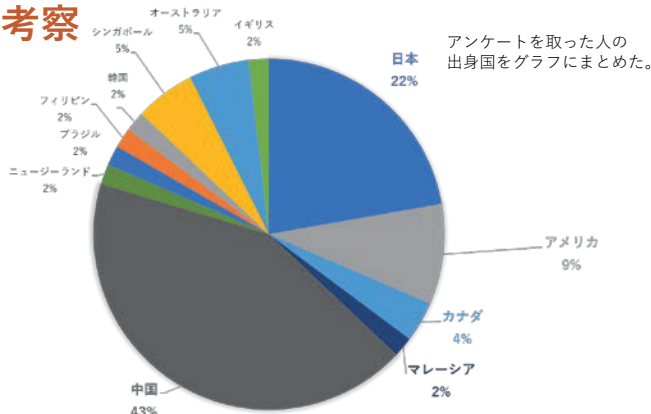
### 方法

奈良公園にいる人にアンケートを取り、統計を取る。

日時：2016年 12月 25日 (月)  
場所：奈良公園



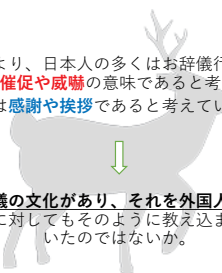
## 結果・考察



上のグラフより実際に鹿に接する前と後で、**感謝だと考えていた人の割合が減り、催促だと感じる人の割合が増加**した。また、アンケート結果より、鹿せんべいをあげた人は53人中43人と大半を占めているので、これは、鹿せんべいを持っている人に対して、鹿が近づいてお辞儀行動をし、鹿せんべいを欲しがるからであると考えた。

アンケート結果より、日本人の多くはお辞儀行動について、事前情報から**催促や威嚇**の意味であると考えていた。しかし、外国人は**感謝や挨拶**であると考えていた人が多かった。

**日本人にはお辞儀の文化があり、それを外国人は知っているから**こそ、日本の鹿に対してもそのように教え込まれていると考えていたのではないが。

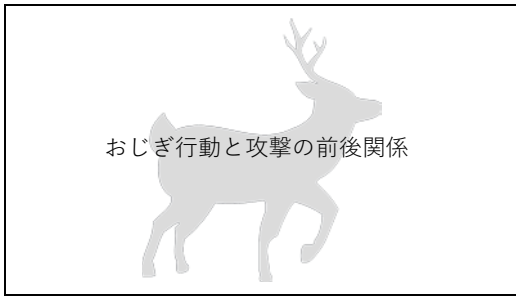


また、鹿から攻撃を受けたかという質問では、yesと答えた人が27人、noと答えた人が25人と、**半数が攻撃を受けていた**。

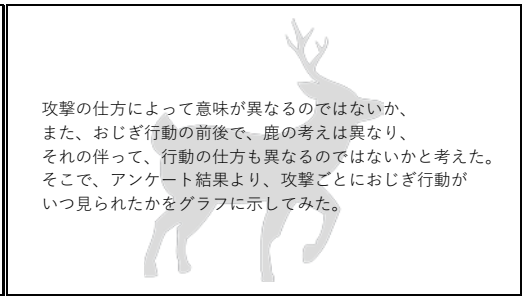
yesと答えた人がどのような攻撃を受けたのか、右の図に示した。

また、yesと答えた人のうち、攻撃前にお辞儀行動を見た人が8人、攻撃後にお辞儀行動を見た人が7人、見ていない人が8人、わからない人が6人だった。

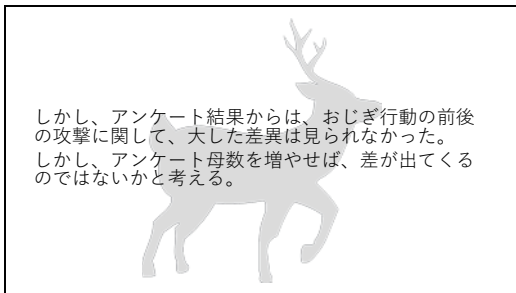
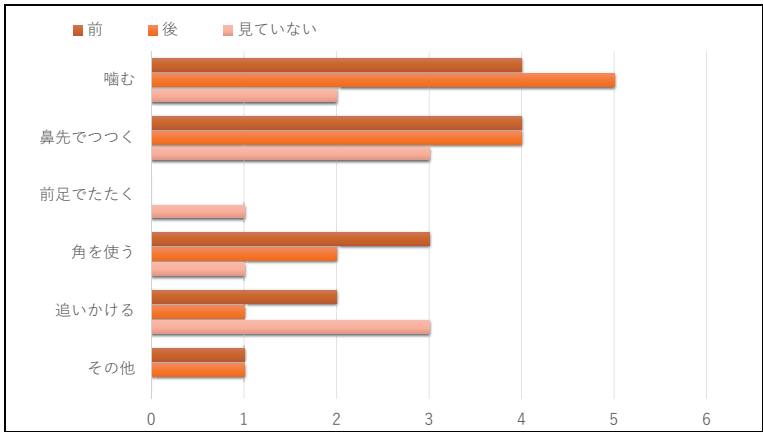




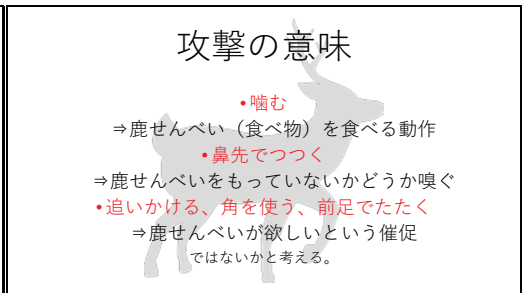
### おじぎ行動と攻撃の前後関係



攻撃の仕方によって意味が異なるのではないかと、また、おじぎ行動の前後で、鹿の考えは異なり、その伴って、行動の仕方も異なるのではないかと考えた。そこで、アンケート結果より、攻撃ごとにおじぎ行動がいつ見られたかをグラフに示してみた。

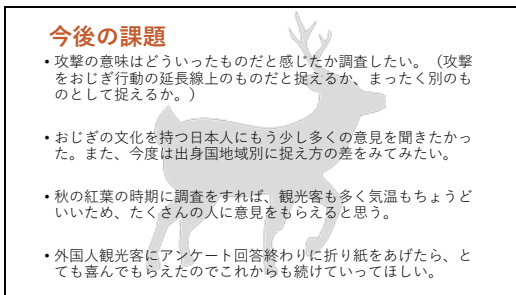


しかし、アンケート結果からは、おじぎ行動の前後の攻撃に関して、大した差異は見られなかった。しかし、アンケート母数を増やせば、差が出てくるのではないかと考える。



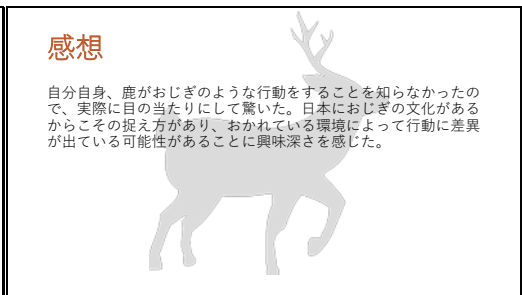
### 攻撃の意味

- ・噛む  
⇒ 鹿せんべい（食べ物）を食べる動作
- ・鼻先でつつく  
⇒ 鹿せんべいをもってないかどうか嗅ぐ
- ・追いかける、角を使う、前足でたたく  
⇒ 鹿せんべいが欲しいという催促ではないかと考える。



### 今後の課題

- ・攻撃の意味はどういったものだと感じたか調査したい。（攻撃をおじぎ行動の延長線上のものだと捉えるか、まったく別のものとして捉えるか。）
- ・おじぎの文化を持つ日本人にもう少し多くの意見を聞きたかった。また、今度は出身地域別に捉え方の差をみてみたい。
- ・秋の紅葉の時期に調査をすれば、観光客も多く気温もちょうどいいため、たくさんの人に意見をもらえらと思う。
- ・外国人観光客にアンケート回答終わりに折り紙をあげたら、とても喜んでくれたのでこれからも続けていってほしい。



### 感想

自分自身、鹿がおじぎのような行動をすることを知らなかったもので、実際に目の当たりにして驚いた。日本におじぎの文化があるからこそその捉え方があり、おかれている環境によって行動に差異が出ている可能性があることに興味深さを感じた。

コメント：攻撃の意味を人間がどうとらえているのか聞いてみたいし、それを聞かないと、攻撃に関するアンケートを取る意味がないのではないかと、という意見は重要。今回こちら側が攻撃として挙げているものも、実際にやられた方々がどう思っているかによってそれは攻撃ではないかもしれないし、催促されたととらえている人もいる可能性がある。また、母数を増やすために、また比較のためにも、前年度の授業のデータがほしかったと言う感想は、その通りだと感じた。

## VII. 生物はつながっている

### 1. 雲の上の王国で生きるためには

- ドラえもん のびたと雲の王国 をみてみよう！

用意されたもの：土地・水源(川と湖)・植物(花、草原、森の元)・住居

←彼らはこのまま雲の上の王国で生き続けられるだろうか？

彼らは何を食べて生きていくの？

もし魚を育てられるとして、ではその魚は何を食べる？

植物はどうやって増えていくのだろうか。

花が繁殖するために送粉者は必要ではないか？

枯葉を分解する分解者がいるのではないか・・・

- 実際に小地球を作ってみた！

Biosphere 2 (アメリカ アリゾナ州)

物質的に閉鎖的であるがエネルギー的には開いている

面積 1.27 ha / 高さ 28 m

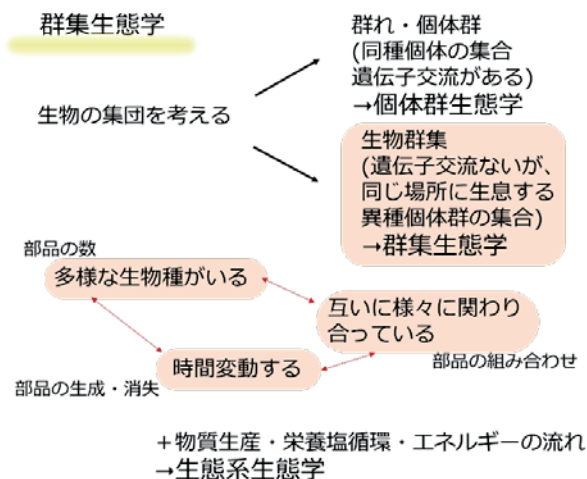
- ・1991年9月スタート
  - ・宇宙に移住した際、閉鎖空間でどれだけ生息できるか検証する
  - ・環境問題について研究する
  - ・2年交替で科学者8名が滞在、100年間継続される予定
- 大気や植物の問題で2年と20分で終了

原因

- ・O<sub>2</sub>不足：微生物の働き&日照不足などで植物が光合成をしない
- ・CO<sub>2</sub>不足：建築物のコンクリートに大量に吸収→光合成できない
- ・食糧不足：植物が育たず、家畜が死亡
- ・...

私たちが生き続けるためには、多くの種との共存が必要

- 生物の集団を考える学問には、個体群生態学と群集生態学がある



## 2. 生物どうしのつながり

- ①捕食-被食関係
- ②種内競争、種間競争
- ③共生
- ④寄生

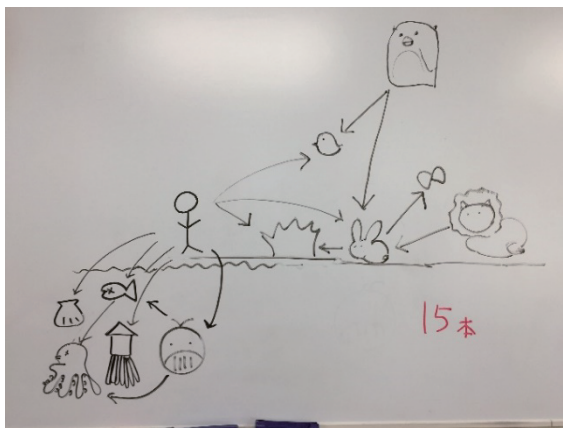
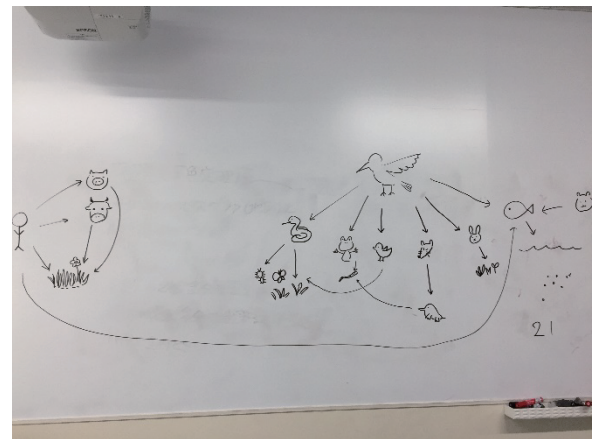
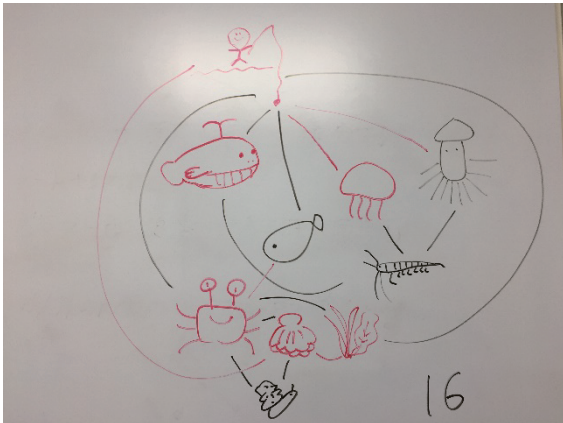
### ①捕食-被食関係

食物網

捕食者とそのエサ生物の関係を結び付けたもの

オリジナル食物網をみんなで作ろう！

- ・各ペアで食う-食われる関係を絵で描いていく
- ・制限時間は5分
- ・アラームが鳴った時に一番多く絵を描いていたチームが優勝



陸も海も生物の捕食-被食関係で  
つながっている！

- ・動物は捕食者にも被食者にもなり得る
  - ・動物や植物は生きているときに限らず、死んだ後も何かのエサとなる
- 捕食-被食関係は生物界に  
広くみられる

### ②種内競争、種間競争

○種内競争

動物が同種内でエサや住み家を巡って争うこと

植物が同種内で、光や土壌中の栄養塩類、水分をめぐる争うこと

## ○種間競争

ガウゼの法則「競争排除則」

同じ資源を要求する2種間では、競争の結果どちらかの種が排除される

動物が異種間で、同じエサや生息場所をめぐって争う

ナナホシテントウ vs ナミテントウ

異なる種の植物が、光や土壌中の栄養塩類、水分をめぐって争う

ヨモギ vs カラスノエンドウ

- ・ 干渉型競争：相手への干渉(攻撃)を行い、他個体を排除
- ・ 消費型競争：共有する資源を取ることで、他個体を排除

## ③共生

異種の生物が一緒に生活をしている現象

### ○片利共生

2種のうち一方は利益を受けているが他方は利益も害も受けていない

例) フジナマコ-カクレウオ (調べてみて!)

カクレウオは、天敵に襲われにくくするために、昼間はフジナマコの肛門から腸内に入り、夜になると外へ出る

フジナマコにとってカクレウオの存在は、得にも損にもならない

例) ウマノズクサ属の花 (雌性期と雄性期を繰り返す) と虫

この属の花は、雌性期に虫を中に閉じ込める

→花粉を持っていれば受粉

→その後雄性期に花粉をつけさせ、虫を外に出す

→雌性期に再び閉じ込め、受粉させる

虫にとっては特にも損にもならない

### ○相利共生

2種が互いに利益を与え、受けている

例) ヤドカリ-ヤドカリイソギンチャク (調べてみて!)

ヤドカリへの利益：イソギンチャクが乗っているため食われにくい上に、ヤドカリの捕食者に触れられると毒を出す種もいる

イソギンチャクへの利益：ヤドカリの食べ残しをもらえる。移動が可能になる

例) サンゴ-褐虫藻

例) ハゼとテッポウエビ (調べてみて!)

例) ハタゴイイソギンチャクとカクレクマノミ

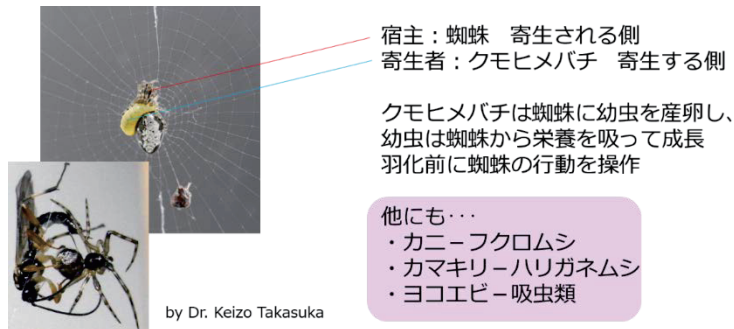
例) ハチと花などの送粉シンドローム

## ④寄生

2種のうち一方のみが利益を得て、他種に負の影響を与える



- ・他の生物の組織や細胞を住み場にし、その生物の栄養分を奪う
- ・DNAの複製機構を使って子孫を増やしてしまう
- ・最悪の場合、宿主は死亡する



生物は色々なかたちでつながりあっており、それぞれ単独では生きていけない

## VIII まとめ

目的：生物に触れ、生物についてじっくり考えてみる

そのために生物の進化や行動、生物どうしのつながりを学ぶ

生物について考える－分類は？生物はどう生まれたの？

ダーウィンが教えてくれたこと－進化とは何か

ダーウィン著“種の起源”からわかること

奈良公園の鹿はなぜおじぎをするのか？－動物の社会性行動・文化的行動

野外実習によるおじぎ行動の解明

実験データの解析方法

実験結果発表

生物はつながっている－生物は単独では生きられず、それぞれが複雑に関係し合っている

目の前にいる生物の祖先は何か、どんな特徴があり、どう行動しているか

何に興味があり、どう実験したらそれが明らかになるか、

その生物は周りの生物とどう関わっているか

生物を見つけたら、そんなことを考えてみよう！

## 参考文献

- ・生態学入門 第2版 日本生態学会編集 東京化学同人発行
- ・生物学辞典 第4版 八杉龍一, 小関治男, 古谷雅樹, 日高敏隆編集 岩波書店発行
- ・貝のパラダイス 岩崎敬二著 東海大学出版会発行
- ・ダーウィン展 国立科学博物館, 渡辺政隆, 読売新聞東京本社事業開発部編集 読売新聞東京本社発行
- ・Variation and social influence of bowing behavior by sika deer (*Cervus nippon*). Akita, S., Wada, Y., Wada, K., and Torii, H. 2015. *Journal of Ethology* 34: 89-96.
- ・種の起源 ダーウィン著 八杉龍一訳 岩波書店発行
- ・Statistical and Data Handling Skills in Biology, Second Edition, Roland Ennos 著, 打波守, 野地澄晴訳, 羊土社発行
- ・Modern Statistics for the Life Science, Alan Grafen and Rosie Hails 著, 野間口謙太郎, 野間口眞太郎訳, 共立出版発行

Basic Science II ワークシート①

所属 \_\_\_\_\_

名前 \_\_\_\_\_

1. 生物である 3 つの条件は？

- \_\_\_\_\_
- \_\_\_\_\_
- \_\_\_\_\_

2. あなたの好きないきものは？

\_\_\_\_\_

3. 五界説における 5 つの分類は？

\_\_\_\_\_

4. 好きな生き物の分類は？

\_\_\_\_\_

5. 生態学とはどんな学問？

\_\_\_\_\_

6. 現在の生物相はなぜ多様？

\_\_\_\_\_

7. ダーウィン誕生以前、主にキリスト教徒の間で、生物は何によって作られたと考えられていた？

\_\_\_\_\_

8. ダーウィンが乗った船の名前は？

\_\_\_\_\_

9. ガラパゴス諸島で出会ったゾウガメの型は？

\_\_\_\_\_ 型                      \_\_\_\_\_ 型

10. それぞれどんな特徴？

- 型： \_\_\_\_\_
- 型： \_\_\_\_\_

参考資料 2

Basic Science II ワークシート②

所属 \_\_\_\_\_

名前 \_\_\_\_\_

1. ガラパゴス諸島で出会ったゾウガメの型は？

\_\_\_\_\_ 型                      \_\_\_\_\_ 型

2. それぞれどんな特徴？

• \_\_\_\_\_ 型 : \_\_\_\_\_

• \_\_\_\_\_ 型 : \_\_\_\_\_

3. 生態学の問題に取り組むために必要な 2 つの要因は？それぞれどんな視点？

• \_\_\_\_\_ —

• \_\_\_\_\_ —

4. ダーウィンの著書のうち、進化という概念について説明した本のタイトルは？

\_\_\_\_\_

5. 適応とは、環境に対し、どんな面に対応すること？

\_\_\_\_\_

6. 自然選択が作動する 3 条件は？

• \_\_\_\_\_

• \_\_\_\_\_

• \_\_\_\_\_

7. 個体数はなぜ増え続けない？

\_\_\_\_\_

8. 系統樹とは何か？

\_\_\_\_\_

9. 進化とは何か？

\_\_\_\_\_

Basic Science II ワークシート③

所属 \_\_\_\_\_

名前 \_\_\_\_\_

1. 雄どうしの闘争行動で、ライオンが行う行動は何か

\_\_\_\_\_

2. 交尾などの際に、雄が雌に餌を与える行動を何というか

\_\_\_\_\_

3. 海岸の波打ち際、競争者や捕食者が多数存在する過酷な環境を生き抜くためにカサガイが作るものは何か？

\_\_\_\_\_

4. 粘液の役割のうち、一番すごいと思ったのは何？

\_\_\_\_\_

5. 生涯繁殖せず、他個体の繁殖を助ける社会性昆虫をなんと呼ぶか

\_\_\_\_\_

6. 文化的行動とは何か？

\_\_\_\_\_

7. 12月25日の集合時間と場所は？

\_\_\_\_\_ . \_\_\_\_\_

8. 鹿の調査で他に聞きたいことはありますか？

\_\_\_\_\_

9. 鹿の調査に関する質問はありますか？

\_\_\_\_\_

## Basic Science II ワークシート④

所属 \_\_\_\_\_

名前 \_\_\_\_\_

1. 素粒子の質量や、酸の PH の値と違い、生物にはどんな特徴がある？

\_\_\_\_\_

2. 無限に大きな可能性を持つ集団のことを何と呼ぶか？

\_\_\_\_\_

3. 2 から無作為に抽出される部分集合をなんと呼ぶか

\_\_\_\_\_

4. 統計的検定とは？

\_\_\_\_\_

5. 証明したい仮説と真逆の仮説は？

\_\_\_\_\_

6. 5 に対し、証明したい仮説は？

\_\_\_\_\_

7. 一般的に、有意確率が何%の時に、5 を棄却できる？

\_\_\_\_\_

8. 今回使う検定の名前は？

\_\_\_\_\_

9. 有意確率  $P$  値は？

\_\_\_\_\_

10. 検定統計量  $X^2$  値は？

\_\_\_\_\_

Basic Science II ワークシート⑤

所属 \_\_\_\_\_

名前 \_\_\_\_\_

1. 実際に地球を再現して作られた小地球はなんと呼ばれているか？

\_\_\_\_\_

2. 生物の、食う一食われる の関係を結んだものを何と呼ぶか

\_\_\_\_\_

3. 2種のうち、一方のみが他方に害を及ぼすことを何というか？

\_\_\_\_\_

4. 共生のうち、片方のみが利益を受けるものを何と呼ぶか？

両方が利益を受ける共生を何と呼ぶか？

• \_\_\_\_\_

• \_\_\_\_\_

5. 授業の感想をお願いします！

\_\_\_\_\_



LADy SCIENCE BOOKLET 18  
ベーシックサイエンス I・II 報告書

---

2018年3月31日発行

奈良女子大学 理系女性教育開発共同機構

CORE of STEM

Collaborative Organization for Research in women's Education of  
Science, Technology, Engineering, and Mathematics

〒630-8506 奈良市北魚屋東町

コラボレーションセンター Z207

TEL.&FAX 0742-20-3266

ladyscience@cc.nara-wu.ac.jp

---