生活の中の科学

改　訂　版

上越教育大学

目　次

第1章　総　　論

第１節

自然認識の様式としての科学

担当教員
自然・生活教育学系　小林　辰至

【要約】

科学の主な目的は，自然の事物・現象がどのようなメカニズムで起こるのかを明らかにすることである。したがって，科学は解けることがらしか問題として取りあげることができないという特性がある。つまり，存在理由を問う“なぜ(why)”という問いは，形而上学的な問題であり，科学では扱えないのである。

科学の第１歩は「こうすればこうなる」という見通し，つまり仮説を立てて実際にやって確かめることであり，このような思考と行動は私たちが本性としてもっている能力である。

ガリレオ・ガリレイは近代科学の基礎を築いた。その思考様式は，観察や実験で確かめられる仮説を立てて検証するというものである。

1　人間の本性としての科学する態度

科学的な見方・考え方というと，何やら難しそうな印象を受けるのではないだろうか。Scienceという語は，「知ること」を意味するラテン語に由来する。私たちを取り巻く自然は，不思議なことで満ちあふれており，太古の昔から私たちの知りたいという好奇心を刺激してきた。つまり，自然界の不思議なことや分からないことを知りたいと思うのは人間の本性であり，科学することは科学者の特権ではないのである。

このことを乳幼児の行動から考えてみる。乳児は手に取ることができる物は手当たり次第に口に入れ，物の性質を確かめようとする。少し大きくなると音の出るおもちゃのガラガラを動かし，発生する音を楽しんだりもする。やがて，立ち歩きが出来るようになったり自由に歩けるようになると，障子を破ったり物を壊したりする。手を障子にかけると紙が破れたり，物を投げると壊れたり音がすることを楽しんでいるように見える。乳幼児のこのような行動は，身の回りのことを知ろうとする好奇心にもとづく素朴な行動である。自分から働きかけて，対象物が変化することを確かめたり，手を振ることでガラガラの音が鳴ることを理解したりする行為は，「このようにすれば，このような結果が得られる」という科学的な探究のプロセスとよく似ている。

科学は自然の事物・現象を探究の対象としている。この自然の事物・現象は変化するものである。科学する行為の第一歩は，変化する自然の事物・現象に影響を及ぼしている要因に気づくことである。ガラガラの例で考えると，変化しているのは音の大小である。音の大小に影響を及ぼしているのは，ガラガラを持った手の振り方の強さである。つまり，乳幼児は科学的な探究のプロセスに発展する行動様式を人間の本性として備えているのである。

私たちも科学的な探究の過程と同様の行動を日常的に行っている。例えば，明かりの点かない懐中電灯の原因を確かめるときのことを考えてみよう。懐中電灯を久しぶりに使おうと思ってスイッチを入れたところ点かなかったとする。これは懐中電灯の状態の「観察」である。「あれ，点かない。どうしてかな？」と思うと，これは「問題提起」である。次に，この問題を解決するために「これが原因ではないかな？こうすれば電気が点くのではないかな。」と考えるだろう。これは，設定した問題の仮の答えであり，科学では仮説とよばれるものである。仮の答え，つまり仮説は，「乾電池が切れた」とか「電球が切れた」が考えられる。これらの仮説から「乾電池を新しいものに交換すると電気が点く」とか「電球を交換すると電気が点く」などの予測ができる。そして，実際に新しい乾電池に交換して確かめたとするとこれは予測の検証ということになる。もし，その操作で電気が点かなければ，仮説は支持されなかったことになる。電球を取り替えて電気が点けば仮説が支持されたということになる。このように，私たちは日常生活の中で仮説・検証のプロセス，つまり科学的な探究のプロセスを無意識のうちに実行しているのである。このように考えると，科学的に探究する態度というものは，決して難しいものではなく人間の本性として万人に与えられた能力と言えるのである。

2　科学の第１歩は「こうすればこうなる」という見通し

科学的な探究には仮説を立てて検証するというタイプがある。簡単に言えば「こうすればこうなる」という仮の答えを考えて，実際に確かめるというやり方である。

野草を用いた遊びの中には仮説を立てて検証する科学に通じる活動がたくさんある。例えば，カラスノエンドウの果実(鞘)やタンポポの花茎で作る笛がある。口にくわえ息を吹き込むと音がする。いずれも強く吹くと大きな音がする。また，カラスノエンドウであれば，へたを短く切り取れば長さの長い笛ができ，さやの中程で千切れば短い笛ができる。長い笛の音は低く，短い笛の音は高い。タンポポの花茎も同様である。長ければ音は低く短ければ高い音が出る。音の大きさや高さに影響を及ぼす笛の長さは，独立変数である。そして，笛の音の大小や高低は従属変数である。小学校１～２年生に変数の意味が理解できるはずもない。しかし，笛を短くすると音が高くて，長くすると音が低くなるという因果関係は理解できる。先生の方から「どうすればピーッと高い音が出るのかな？」などと語りかけてやれば，「こうすれば，こうなる。」という返事が返ってくるに違いない。これはまさに，科学的な探究における仮説と言えるものである。クズの葉を曲げた指のくぼみに入れた後，もう一方の手でたたいて音を出す遊びも同様である。葉を平らな状態で乗せてたたいても音は出ない。子供は試行錯誤しながら，くぼみに葉を押し込み壺状にしたとき，良い音が出ることを「こうすれば，ポンと良い音が出る」という仮説を立てて検証していると言える。

私たちは，仮説にもとづく科学の第１歩とも言える「こうすればこうなる」という見通しをもった行動を普通に行っているのである。

3　科学は解けることがらしか扱えない

科学は自然界で生起する事物や現象における事実とそれらの間に存在する法則性について探究する学問である。つまり，科学は事物・現象とそれに関わるさまざまな要素を抽出するとともに，どの要素が本質的な役割を果たしているのか否かについて，両者の関係を観察や実験で検証し，因果性や法則性を明らかにするものである。

科学の主な目的は，自然の事物・現象がどのようなメカニズムで起こるのかを明らかにすることである。したがって，科学における問いは，「いかに」“how”であり，“なぜ（why）”起こるのかを問うものではない。もちろん，“なぜ（why）”についても知りたいのであるが，ピーター・メダウォーが科学は“解けることがら（Soluble）を解く技術（art）”と述べているように，存在理由を問う“なぜ（why）”という問いは，形而上学的な問題として，科学では扱わないのである。

ふつう私たちは自然の事物・現象は，すべて原因と結果の関係で起ると考えている。科学の研究も一般的にはそのような捉え方で進められる。ある事象の結果に対しては，ある一定の原因が対応する。たとえば，いまA，B，Cという事象のあとで，それぞれａ，ｂ，ｃという事象が起ることが分かったとすると，Aがaの原因であり，ａはAの結果であると考えることができる。原因と結果のそのような関係には，因果性が認められる。

ニュートン力学は，この世界に厳格な因果性が成り立っているという考え方を普及させた。他方，自然界における因果性の存在は認められないとする哲学的立場もある。また量子力学は，量子的世界では因果関係は確率的にしか成り立たないことを示し，因果性をめぐる哲学的議論に重大な問題を提起した。しかし，これは因果性の否定ではない。

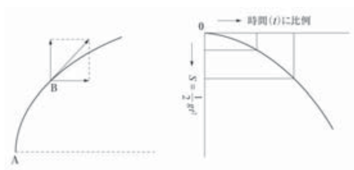
4　仮説を立てて観察や実験で検証する

科学の方法の基本原則は仮説をたて，それを観察や実験で検証する手順で進めることである。仮説はそれまでの経験と知識をもとにたてられる。

ガリレオは落体について，「速度が時間に比例する」という仮説をたてた。しかし，ガリレオの仮説$v=gt$（v：速度，t：時間，g：常数）では，vが瞬間的に変化するため，当時の測定技術では実験で確かめることができなかった。仮説が実験で確かめられないときには，実験が行えるように仮説を修正する必要がでてくる。そこで，ガリレオは仮説$v=gt$を$s=1/2gt^2$（sは落下距離）の式で表される仮説に変換した。この仮説であれば，落下しはじめる位置から一定の距離を先に測っておいて，そこまで落下してくる時間を測ることで，実験で確かめることができる。しかし，物体を自由落下させる方法では，当時の技術では，とてもその時間を測ることはできない。それで彼は，なめらかな斜面をつくり，それに溝を掘り，鉛でつくった球をころがり落とす現象で，落下の現象に代えることを考えた。

このように，科学研究は事象の間にどのような関係が成り立つかを推定して仮説あるいは理論をつくり，それを実験または観察で確かめ，その結果によって仮説を修正したり新たに立てたりして進められるのである。

科学的に自然の現象を探究する際，まずその要素に分けて調べ，次にそれらを組み合わせて，もとの現象が復元されるなら，その現象は解明されたことになる。ガリレオは弾道の運動の場合，それを水平方向と垂直方向の運動に分け，水平方向の運動は空気の抵抗がなければ変化しないと仮定し，垂直方向の運動の法則をしらべて水平方向の運動とあらためて組み合せれば弾道が明らかになると考えた。



ガリレオ・ガリレイより前の時代における自然の解釈や説明は，宗教と密接に結びついており，客観性・実証性・再現性のないものであった。そのような時代にガリレオ・ガリレイは，仮説を立てて観察や実験で検証する手法を確立し，科学の基礎を築いたのである。

おわりに

科学には自然に関する知識の体系という側面と自然を認識する思考様式の側面がある。本論では自然を認識する思考様式の側面から述べた。科学の第１歩は「こうすればこうなる」という見通しをもつことであり，人間はこのような能力を生まれながらにしてもっている。科学において「こうすればこうなる」の「こうすれば」は観察や実験である。観察や実験で確かめられない問いは，形而上学上の問題であり科学では扱うことができない。これが科学の限界でもある。

児童生徒は観察や実験で確かめられない存在理由を問う「なぜ」という疑問をもつものである。教師の役割は，その素朴な疑問を観察や実験で確かめられる仮説に導き，探究の知的楽しさを実感させることである。児童生徒に科学的な問題解決の能力を育成できる教師になれるよう，本論で述べたことを手がかりにして，科学とはどのようなものかについて，さらに追究していただきたい。

文献

１）小林興監訳（2007），「キャンベル生物学」，pp.18-20，丸善株式会社

２）八杉龍一（2004），「科学とは何か」，pp.43-45，東京教学社

３）桜井邦朋（1995），「自然科学とは何か」，pp.23-37，森北出版

第2節

文学のなかの科学

―宮沢賢治「グスコーブドリの伝記」―

担当教員

人文・社会教育学系　小埜　裕二

講義概要：宮沢賢治は昭和７年，「グスコーブドリの伝記」という中編童話を発表した。そのなかで賢治は東北地方の冷害や旱魃を救うために，潮汐発電所をつくり，火山を爆発させる場面をえがいている。潮汐発電所は，その30年後にフランスで実用化された。火山を爆発させることで空気中に二酸化炭素をふやし冷害を防ごうという発想は，今日，話題となっている地球温暖化現象を逆手にとったものである。文学のなかの科学に注目し，文学のなかの科学が夢を語るものなのか懐疑を語るものなのかについて考え，科学知識の有用性について考える。

1　「星めぐりの歌」

科学者がものを見る眼と文学者がものを見る眼はどう違うのだろう。普遍性をもとめる科学と個別性をもとめる文学，客観性を追究する科学と主観性を追究する文学，真理をもとめる科学と創造をもとめる文学，といった言い方がひとまずできる。次の詩は，まど・みちお「水は　うたいます」（初出『まど・みちお詩集６　宇宙のうた』昭和50年）である。川の流れに，科学者は何を見るだろうか。この詩は，文学者がものを見る目の特徴をよく表している。と同時に，この詩の背景にも科学的な知識が存在することがわかるだろう。

水は　うたいます

水は　うたいます
川を　はしりながら

海になる日の　びょうびょうを
海だった日の　びょうびょうを

雲になる日の　ゆうゆうを
雲だった日の　ゆうゆうを

雨になる日の　ざんざかを
雨だった日の　ざんざかを

虹になる日の　やっほーを
虹だった日の　やっほーを

雪や氷になる日の　こんこんこんこんを
雪や氷だった日の　こんこんこんこんを

水は　うたいます
川を　はしりながら

川であるいまの　どんどこを
水である自分の　えいえんを

さて本講義では，宮沢賢治を例にあげ，文学のなかの科学について考えてみたい。賢治が作詞作曲した歌で，初期に書かれた「双子の星」や晩年に書かれた「銀河鉄道の夜」に登場する「星めぐりの歌」は，賢治における文学と科学（天文学）の自然なつながりを表している。この歌の内容は，何を表しているか分かるだろうか。

星めぐりの歌

あかいめだまの　さそり
ひろげた鷲の　　つばさ
あをいめだまの　小いぬ、
ひかりのへびの　とぐろ。
オリオンは高く　うたひ
つゆとしもとを　おとす、
アンドロメダの　くもは
さかなのくちの　かたち。
大ぐまのあしを　きたに
五つのばした　　ところ。
小熊のひたいの　うへは
そらのめぐりの　めあて。

宮沢賢治（1896年（明治29年）８月27日－1933年（昭和８年）９月21日）は，詩人・童話作家である。彼の文学の背景に，宗教と科学が色濃く存在することは周知のとおりである。宗教と科学による世界認識があることで，賢治の文学世界は独自のものとなった。

賢治はどのように宗教と科学知識を身につけたのか，年譜で確認しておきたい[1]。

明治29年８月27日，岩手県稗貫郡里川口村（現・花巻市）に質・古着商の宮沢政次郎とイチの長男として生まれる。（賢治が生まれる約２ヶ月前に「三陸地震津波」が発生。）浄土真宗の濃密な仏教信仰の中で育つ。清六，トシ，シゲ，クニの弟妹がいる。
明治36年，花巻川口尋常高等小学校に入学。鉱物採集に熱中。父と有志が始めた仏教講話に参加。
明治42年，旧制盛岡中学（現盛岡第一高等学校）に入学。鉱物採集に熱中。哲学書を愛読。
大正３年，盛岡中学卒業。島地大等訳『漢和対照妙法蓮華経』を読み，感銘を受ける。
大正４年，盛岡高等農林学校（現岩手大学農学部）に首席で入学。関豊太郎教授の指導の下で地質調査研究をする。
大正７年３月，「腐植質中ノ無機成分ノ植物ニ対スル価値」を提出し，卒業。４月，研究生となる。肋膜炎を患う。
大正９年，研究生を卒業。関教授からの助教授推薦の話を辞退。10月国柱会に入信。
大正10年１月，家族に無断で上京。童話創作，盛ん。国柱会の街頭布教にも参加。夏，トシ発病のため岩手に帰る。11月，稗貫農学校（のちに花巻農学校）教師となる。翌年11月にトシ病死。
大正13年４月，『春と修羅』出版。12月，『注文の多い料理店』出版。
大正14年12月，花巻の北上川で発見したバタグルミ化石の学術調査に協力。
大正15年３月，農学校を退職。羅須地人協会を設立し，農民芸術を説く。以降，農業指導に奔走。
昭和２年３月，羅須地人協会の活動を停止。
昭和３年夏，農業指導の過労から病臥，急性肺炎を発症。以後約2年間はほぼ実家での療養生活。
昭和６年，回復の兆しを見せ，東山町（現在の一関市）の東北砕石工場技師となり石灰肥料の宣伝販売を担当。９月，病に倒れ，再び療養生活に入る。
昭和８年９月21日，急性肺炎で死去。享年37。死の前日まで農民から肥料相談を受けていた。（この年３月３日に「三陸沖地震」発生。）

2　文学としての「グスコーブドリの伝記」

「グスコーブドリの伝記」は，「児童文学」（昭和７年３月）に発表された宮沢賢治の中編童話である。本作は，大正11年頃までに書かれたと推定される「ペンネンネンネンネン・ネネムの伝記」を大幅に改作してできあがった。あらすじは次のとおりである。

一，森
グスコーブドリは，イーハトーブの大きな森に生まれた。父は名高い木こりだった。ネリという妹がいた。二人は毎日森で遊んだ。ある年，天候がわるくて作物がとれなかった。翌年も同じことで，春になると父も母もひどい病気のようだった。ある日，父は森へ入っていった。次の日，母も粉を残して森へ入っていった。ブドリとネリは泣いてあとを追おうとしたが，叱るように母は二人をひきとめた。やがて，ある男がネリを連れ去った。ブドリは泣いてどなって森のはずれまで追いかけたが，疲れて倒れてしまう。
二，てぐす工場
ブドリが目をひらくと，男が声をかけた。男は栗の木に網をかけてテグスを飼うのだと言う。家にもどると戸口には「イーハトーブてぐす工場」の看板がかかり，煙突がついていた。やがて，虫が繭をつくると，男は繭を集めさせた。それ

から荷馬車に糸をのせ，男は食べ物をブドリに残して行ってしまった。次の年も同じ仕事をしたが，噴火がはじまり灰が降ったので，男は引き揚げてしまう。残されたブドリも森をでた。
三，沼ばたけ
森の外は，美しい桃色と緑と灰色のカードのようだった。桃色は花，緑は草，灰色は泥の沼だった。赤ひげの男が今年は一年で三年分とって見せると言って，ブドリを手伝わせ，桃色や緑色のカードを泥沼に変え，そこにオリザの苗を植えた。しかしやがてオリザに病気がでて，主人はオリザを刈ってしまう。翌春，主人はブドリに，沼ばたけが三分の一減って仕事が楽になった分で勉強しろと言った。ブドリは片っ端から本をよみ，夏にはオリザの病気を治す手柄をたてる。だがまた寒さと干ばつがやってきて，主人の沼ばたけもすっかり減ったので，主人はブドリにお金と服をあたえ，いい運をみつけるよう言った。ブドリは，六年間はたらいた沼ばたけと主人に分かれて歩きだした。
四，クーボー博士
汽車にのってイーハトーブ市についたブドリは，クーボー博士のもとへいき，働きながら勉強し，あんなつらい思いをしないで沼ばたけを作ったり，火山の灰やひでりや寒さだのを除く工夫をしたいと思った。ブドリは博士の授業を見たあとで，ノートをみてもらう。博士の質問にもうまく答えることのできたブドリは，面白い仕事を紹介される。博士は玩具のような小さな飛行船にのって，むこうの建物へ飛んで行った。
五，イーハトーブ火山局
ブドリは博士の名刺をもって，イーハトーブ火山局へ行った。建物の壁にはイーハトーブの地図がかかっていた。棚には，タイプライターのようなものが並んでいた。火山局の老技師ペンネンナームのもとで働くようになったブドリは，二年もするとイーハトーブ中の三百幾つかの活火山や休火山のはたらきを理解するようになった。ある日，サンムトリという火山の活動が活発になったので，二人はその地に向かう。
六，サンムトリ火山
二人は海にむかったサンムトリ火山の一番よわいところに工作隊を向かわせ，そこを爆破し，火山活動をとめようとする。そこへクーボー博士がやってきた。博士は，来年はどうしても潮汐発電所を全部つくってしまわなければと言う。そうすれば沼ばたけの肥料も降らせることができるし，干ばつだってこわくなくなる。やがて工作隊が到着し，工事がはじまり，あとは電流さえ流れれば溶岩が流れ出るまでになった。電線が届き，サンムトリの中腹から真っ黒なけむりがたち，黄金色の溶岩がきらきら流れだした。
七，雲の海
それからの四年間で，潮汐発電所はイーハトーブの海岸にそって二百も配置された。ブドリは技師心得になり，一年の大部分は火山から火山へとまわって歩き，危うい火山の工作をした。次の年の春，イーハトーブ火山局では，夏に雨といっしょに窒素肥料を降らせる案内をだした。干ばつのときも，少しは雨も降らせることができる。その年の六月，ブドリはイーハトーブ火山の頂上の小屋にいた。下はいちめん灰色の雲の海だった。火山のいただきが，あちこち島のように黒くでていた。飛行船が真っ白な煙をはいたあと，ブドリはぼたんを押した。やがて雨にまじって硝酸アンモニアがふりだした。
八，秋
その年の農作物は，十年間になかったほど，よくできた。火山局には感謝状や激励の手紙が届いた。ところがある日、小さな村に立ちよったブドリは，そこの百姓たちから殴られる。降らせたこやしのせいで，オリザが倒れたのだという。入院したブドリは，新聞で，あのときの出来事は肥料のいれかたを間違えた農業技師が，オリザの倒れたのを火山局のせいにしたためだと知り，一人で笑う。その日，ネリがやってきた。新聞で居場所がわかったのだという。ネリは男に連れ去られたあと，ある牧場に捨てられ，今ではその牧場の息子と結婚していると言った。
九，カルボナード島
それからの五年は，ブドリには楽しいものだった。赤髭の主人の家にお礼に行った。ネリにかわいい男の子が生まれた。てぐす飼いのもとにいた人が訪ねてきて，ブドリの父が亡くなっていた場所を教えてくれた。ブドリはそこに墓をたてた。ところがブドリが二十七の年，あの恐ろしい寒い気候がまた来そうな模様だった。みんなはこの前の凶作を思い出して生きた気もしなかった。森にも野原にも，あの年のブドリの家族のようになる人がたくさんでるのだ。ブドリは幾晩も考え，クーボー博士を訪ねた。気層のなかに炭酸ガスがふえると温かくなるから，カルボナード火山を爆発させたいと言った。しかしその仕事をする最後のものは，逃げられない。ブドリはそれをやらせて下さいと言う。「私のようなものは，これからたくさんできます。私よりももっとなんでもできる人が，私よりももっと立派にもっと美しく，仕事をしたり笑ったりしていくのですから」ブドリは，島へわたった。翌日，イーハトーブの人たちは，青空が緑いろに濁るのを見る。秋にはほぼ普通の作柄になった。このお話のはじまりのようになるはずの，たくさんのブドリのお父さんやお母さんは，たくさんのブドリやネリといっしょに，その冬を温かい食べ物と，明るい薪で楽しく過ごすことができた。

以下，「グスコーブドリの伝記」の解説を行う。

①　本作は，結末から意味をたどり直すのがよい。種々のエピソードの意味が，結末に収斂されるからだ。物語の表現も，結末に「このお話のはじまりのようになるはずの，たくさんのブドリのお父さんやお母さんは，たくさんのブドリやネリといっしょに，その冬を温かい食べ物と，明るい薪で楽し

く過ごすことができた。」とあることから，物語の冒頭部へ読者の意識をむかわせ，繰り返されるはずの飢饉の悲劇がブドリの犠牲によってくい止められたことが強調される。物語は，繰り返される因縁の輪のようなものとして自然をとらえ，その輪廻をブドリの自己犠牲の行為によって断ち切り，解脱へむかわせる。本作は，賢治が宗教によって目指したものを科学の側からとらえなおしたものと捉えることができる。

②　ブドリの成長の推移と凶作の関係についてまとめると次の表のようになる。

ブドリの年齢	自然の推移とブドリの行動	備考
10歳まで	森の中で，家族とともに楽しく暮らす。	学校へ。
10歳	天候がわるくて作物がとれなかった。	
11歳	飢饉に。	
12歳春	父母の病気，出奔。ネリとの別れ。	無力なブドリ。本を読む。
13歳	てぐす工場２年目。火山の噴火。森をでて，沼ばたけへ。	森と家を奪われる。
14歳	オリザの病気を治す手柄。	本を読む。
19歳までの６年間	寒さと干ばつの繰り返し。ブドリ，沼ばたけを去る。クーボー博士のもとへ。	
21歳までの２年間	活火山や休火山のはたらきを理解。サンムトリ火山の活動をとめる。	
22歳	雨といっしょに窒素肥料を降らせる。大豊作。ネリとの再会。	
27歳までの５年間	楽しい暮らし。	
27歳	飢饉（冷夏）の危険を回避。	

③　ブドリにとって10歳までの暮らしが，森の自然に抱かれ，家族の愛情のなかで暮らしたもっとも幸福な時代であった。しかし，その幸福を奪ったのは，天候不順がもたらした飢饉であった。子供に食べ物を残すために，自己犠牲をはらって森にはいった父母の行為は，他の多くの家族がブドリの家族と同じ命運をたどらないためにブドリがとった自己犠牲の行為へと引き継がれる。（父の言葉「森へ行って遊んでくるぞ」の文学性について考えてみよう。）

④　ブドリは家族を失い，ネリを失い，そして森や家の所有権すら他の人間の手によって奪われてしまう。父母が森へ行くのをとめることも，ネリが連れ去られるのをとめることも，理不尽に森や家が奪われるのをとめることもできない無力な子供としてブドリは登場する。そうであったがゆえに，成長したブドリはその負を取り返そうとしかたのようである。

⑤　ブドリの10代は，さらに火山の噴火による降灰被害でテグス工場が閉じられるのを見，干ばつと寒さの繰り返しで赤髭の主人の沼畑が縮小していくさまをみる。悪いものの営みも，善いものの営みも，自然の営みがあっさりと飲み込んでしまう。それを目の当たりに見ながら，無力なブドリは働くひまに本を読むことで力をつけていく。最初の手柄となったのは，赤髭の沼畑のオリザの病気を治したことであった。しかしその後も，悪天候は続く。

⑥　ブドリが赤髭の主人のもとを去り，クーボー博士のもとへ向かっているときに考えたのは，オリザの病気を治す方法以前に，自然の不順をコントロールする方法を学ぶことであった。寒さと旱魃と火山。火山局につとめたブドリは，火山の制御に成功する。その象徴がサンムトリ火山の工作であった。旱魃については，雨に肥料をくわえ，雨をふらせることのできる技術を身につけることで乗り越えた。しかし寒さはどうにもならない。ブドリがたどりついた結論は，火山島を爆発させ，そこからでる二酸化炭素で地球を温たくするというものであった。

⑦　この物語では，自分を育てあげてくれたものに対する感謝と自己犠牲の精神が描かれている。物語の最後で，ブドリは自分達家族のような悲劇が起こらないよう，自分が犠牲となって世界を救う。そこに一番のメッセージがある。この物語でブドリはさまざまな苦労をし，経験をするが，それらが

後で役にたってくる。これは「経験」というものの有用性を示すものであろう。そして最後にはそこで得た知識，技術を利用して自分を育ててくれたものたち，世界のために犠牲になる。この物語を通して，逆境にまけず，身をたててゆく少年の生きざまから，人生の前に立ちはだかる種々の困難，せつなさ，運命のいたずら，自然の脅威，それらを乗り越える努力や経験，学びの大切さ，人のために働くこと，協働することの大切さ，を子供たちに理解させることができる。

3「グスコーブドリの伝記」のなかの科学

「グスコーブドリの伝記」のなかで，「潮汐発電所」「人工雨」「地球温暖化」について語った箇所をそれぞれ引用する。

⑴　潮汐発電所

ちょうどその時，山はにわかにおこったように鳴り出し，ブドリは目の前が青くなったように思いました。山はぐらぐら続けてゆれました。見るとクーボー大博士も老技師もしゃがんで岩へしがみついていましたし，飛行船も大きな波に乗った船のようにゆっくりゆれておりました。

地震はやっとやみ，クーボー大博士は起きあがってすたすたと小屋へはいって行きました。中ではお茶がひっくり返って，アルコールが青くぽかぽか燃えていました。クーボー大博士は器械をすっかり調べて，それから老技師といろいろ話しました。そしてしまいに言いました。

「もうどうしても，来年は潮汐発電所を全部作ってしまわなければならない。それができれば今度のような場合にもその日のうちに仕事ができるし，ブドリ君が言っている沼ばたけの肥料も降らせられるんだ。」

「旱魃だってちっともこわくなくなるからな。」ペンネン技師も言いました。ブドリは胸がわくわくしました。山まで踊りあがっているように思いました。

（中略）

それから四年の間に，クーボー大博士の計画どおり，潮汐発電所は，イーハトーヴの海岸に沿って，二百も配置されました[2]。

⑵　人工雨

次の年の春，イーハトーヴの火山局では，次のようなポスターを村や町へ張りました。

「窒素肥料を降らせます。

ことしの夏，雨といっしょに，硝酸アムモニヤをみなさんの沼ばたけや蔬菜ばたけに降らせますから，肥料を使うかたは，その分を入れて計算してください。分量は百メートル四方につき百二十キログラムです。

雨もすこしは降らせます。

旱魃の際には，とにかく作物の枯れないぐらいの雨は降らせることができますから，いままで水が来なくなって作付しなかった沼ばたけも，ことしは心配せずに植え付けてください。」

その年の六月，ブドリはイーハトーヴのまん中にあたるイーハトーヴ火山の頂上の小屋におりました。下はいちめん灰いろをした雲の海でした。そのあちこちからイーハトーヴじゅうの火山のいただきが，ちょうど島のように黒く出ておりました。その雲のすぐ上を一隻の飛行船が，船尾からまっ白な煙を噴ふいて，一つの峯から一つの峯へちょうど橋をかけるように飛びまわっていました。　（中略）

受話器が鳴りました。

「硝酸アムモニヤはもう雨の中へでてきている。量もこれぐらいならちょうどいい。移動のぐあいもいいらしい。あと四時間やれば，もうこの地方は今月中はたくさんだろう。つづけてやってくれたまえ。」

ブドリはもううれしくってはね上がりたいくらいでした。

⑶　地球温暖化

そしてちょうどブドリが二十七の年でした。どうもあの恐ろしい寒い気候がまた来るような模様でした。測候所では，太陽の調子や北のほうの海の氷の様子から，その年の二月にみんなへそれを予報しました。それが一足ずつだんだんほんとうになって，こぶしの花が咲かなかったり，五月に十日もみぞれが降ったりしますと，みんなはもうこの

前の凶作を思い出して，生きたそらもありませんでした。クーボー大博士も，たびたび気象や農業の技師たちと相談したり，意見を新聞へ出したりしましたが，やっぱりこの激しい寒さだけはどうともできないようすでした。
　ところが六月もはじめになって，まだ黄いろなオリザの苗や，芽を出さない木を見ますと，ブドリはもういても立ってもいられませんでした。このままで過ぎるなら，森にも野原にも，ちょうどあの年のブドリの家族のようになる人がたくさんできるのです。ブドリはまるで物も食べずに幾晩も幾晩も考えました。ある晩ブドリは，クーボー大博士のうちをたずねました。
「先生，気層のなかに炭酸ガスがふえて来れば暖かくなるのですか。」
「それはなるだろう。地球ができてからいままでの気温は，たいてい空気中の炭酸ガスの量できまっていたと言われるくらいだからね。」
「カルボナード火山島が，いま爆発したら，この気候を変えるくらいの炭酸ガスを噴くでしょうか。」
「それは僕も計算した。あれがいま爆発すれば，ガスはすぐ大循環の上層の風にまじって地球ぜんたいを包むだろう。そして下層の空気や地表からの熱の放散を防ぎ，地球全体を平均で五度ぐらい暖かくするだろうと思う。」
「先生，あれを今すぐ噴かせられないでしょうか。」
「それはできるだろう。けれども，その仕事に行ったもののうち，最後の一人はどうしても逃げられないのでね。」
「先生，私にそれをやらしてください。どうか先生からペンネン先生へお許しの出るようおことばをください。」

4　科学と宗教

　「グスコーブドリの伝記」において科学知識は，童話の内容と密接なかかわりがある。科学知識は，猛威をふるう自然の前で無力な人々の明るい未来を形づくるもの，人間が自然の脅威を克服する大事な術として登場する。
　賢治における宗教も，すべての生きものがになう〈修羅〉のかなしみを克服するものであった。賢治の〈法華文学〉は，経典『法華経』の世界を乗り越えようとしたり，改変しようとするものではなく，その宗教世界を文学世界にわかりやすく翻案するものであった。
　芥川龍之介は，〈キリシタンもの〉と呼ばれる彼の短編小説群のなかで，キリスト教を素材にして，刹那の感動を創造した。遠藤周作は，自身がクリスチャンでありながら，人間の弱さを徹底的に擁護し，キリスト教から異端扱いをされた。近代文学において，多くは芥川や遠藤のように，宗教を利用したり，宗教を疑問視したりするなかで，人間の本質をあぶりだそうとした。賢治のように，『法華経』の精神をそのまま文学に持ちこむことを自己の使命とした作家は例外的である。
　科学もそうであろう。本作のなかで科学は，人々を救う有用な技術として登場するが，多くの作家はむしろ科学を，人間のさかしらを象徴するものとして捉える。近代においては，確かにさいしょは人間が自然を克服しようとする有効な技術として，科学はあった。だが科学万能主義が，人間を疎外したり，かえって人間を滅ぼす危険を有するものであることが理解されるようになっていった。そこで文学は，科学が〈想定外〉という言葉で処理してきた世界を想像しようとする。文学は，科学的な知識の向こう側を読もうとする。だが賢治にあっては，宗教も科学も，人々に幸せをもたらすものとして，なかば祈りをこめて用いられた。よわく，かなしい人間のありようを少しでもよい方向に変えていこうとする意志を支えるものとして宗教と科学があった。
　人は助け合い，学びあって生きていく。そこに人間の成長がある。しかし一方の自然は成長することがない。単調に，気まぐれに，大きな力を自然は人間に及ぼしてくる。それを人間が科学技術でコントロールするには限界がある。科学は客観性を重んじることからハード面（理論，事象）を重視することが多い。しかし科学を扱うソフト面（こころ）に注目する必要がないだろうか。科学の本質を理解するには，ハード面とソフト面を両方，理解する必要がある。
　賢治が科学技術のもつ危険を知らなかったわけはない。そのうえで賢治が読み手，とりわけ青少年

の読者に知らせたかったことは，人々の幸せをねがう科学の本質をハード面とソフト面からしっかり伝えることであった。科学の限界を乗り越えていくのも，人間の力である。いかに科学技術が進歩しようとそれは万能ではない。最後は人間が，どう決断するかが重要になってくる。ブドリの自己犠牲は，科学では証明・説明できない人間の心の深さやゆたかさを表すばかりでなく，科学の本質を，科学の出発点にたちかえって考えたときに，ソフト面が要請するものであったことを理解させる。本作では，他人を思いやる人間の気持ちが，自然の脅威と対比されていたのである。
　今日，科学万能主義を信奉する人は少ない。だが科学を知らないでは，科学の有効利用も，科学の恐ろしさについて警鐘を鳴らすこともできない時代にわれわれは生きている。
　ところで，賢治の科学的知識は，自然・事物を見るものの見方にも反映される。「グスコーブドリの伝記」においても科学的なものの見方は，作品のリアリティを支えている。科学的見方は，論理的思考力を背景にして，時間の移り変わりや状態の変化を整然・克明に捉えることを可能にする。それが文学作品のリアリティにもつながってくる。そしてその科学的リテラシーは，観察を捉えるだけでなく，観察しないものでもみてきたように現象の推移を想像することができる。生きた科学的知識とはそのようなものだろう。賢治童話の文章ににごりやあいまいさがない理由の一つには，科学的リテラシーが文章を支えている点が挙げられる。

注

1　山内修編著『年表作家読本宮沢賢治』（河出書房新社，1989年９月）その他を参照。
2　宮沢賢治『童話集　風の又三郎』（岩波文庫，1951年４月）を使用。以下，「グスコーブドリの伝記」のテクストはこれを用いた。
3　宮沢賢治『宮沢賢治全集1』（ちくま文庫，1986年２月）

第2章　各　論

第１節

古代・中世の和歌から富士山の噴煙の有無を探る

担当教員
人文・社会教育学系　松田　愼也

【要約】
　気候変動など過去の自然現象を知る手段としては，通常の自然科学的方法の他に，歴史時代に関しては日記や歴史書その他の文献資料から情報を読み出して活用することも重要になってくる。今回の東日本大震災では，平安時代前期の貞観大津波に関する記録が改めて脚光を浴びた。また，近年の地球温暖化の議論と関係したことでいえば，年々の桜の開花日や諏訪湖の全面結氷に伴う御神渡りの出現日の記録などから，平安時代は全般に今日より温暖であり，中世が近世にかけては寒冷であったとする研究がある。資料の多くは利用できることが一目瞭然であるものだが，中には発想を転換しなければ資料になると到底見えない類のものもある。本講では，後者の事例として，富士山の歴史時代における火山活動の推移を，恋の歌まで含めた和歌の世界を資料として明らかにした都司嘉宣博士の研究を紹介していく。

1　富士山の火山活動に関する文献資料としての和歌

　2011年３月11日の東日本大震災直後の15日，富士山直下を震源とする比較的大きな地震が起こり，震災が引き金となって富士山の活動が再開するのだろうかと人々を不安におとしいれた。
　周知のように，富士山の活動として知られている最後のものは宝永の大噴火（1707年）である。この時は直前に宝永東海地震があり，東海から四国沿岸に大津波が押し寄せて甚大な被害をもたらした。今回とは震源域が違うが，この地震が噴火の引き金になったと考えられている。その後の300年間の富士山は静穏な状態にあるが，それでも江戸時代の末頃までは山頂での噴気活動がしばしば観察されていたし，20世紀前半までは山頂の一角にゆで卵が出来るほどの地熱活動が見られた。
　では，宝永の大噴火以前の富士山はどうだったのだろうか。絶えず噴煙を上げ噴火をくり返していたのかというと，そうではなかったようだ。宝永の前に確実に噴火したと認められるのは1511年であり，そのもう一つ前はというと1083年まで遡ってしまうのである。それ以前は比較的頻繁に噴火しており，11世紀には都合３回，10世紀は２回，９世紀に３回，８世紀後半に２回の記録がある。このうち，800年と864年は大噴火であった。特に，864年の噴火の５年後には，今回の震災との関連で注目を集めている貞観大津波を引き起こした巨大地震が発生している。この場合は，噴火が引き金となって大地震が誘発されたということであろうか。
　このように古代から中世にかけての富士山の火山活動は，噴火に関しては歴史資料等からかなりの程度のことがわかるのであるが，それ以外の時期の富士山の活動状況については，紀行文等おける限られた数の観察記録から噴煙の有無を推測するのがせいぜいのところであり，従来，多くは記録の空白期間となっていた。
　ところが今から約20年前，この記録の空白を埋める興味深い研究成果が発表された。それが以下に紹介する東京大学地震研究所准教授の都司能宣博士の研究である。都司博士は，江戸時代後期に盲目の国学者塙保己一が編纂したことで著名な叢書『群書類従』（それまでに我が国で著されたさまざまな分野の文献を網羅的に集めたもの）を利用して，中世以前の富士山の様子が窺える資料を探索したのであるが，その過程で着目したのが和歌であった。

普通に考えれば，それぞれの時代の富士山の様子を書きとどめている資料があるとすれば，それは先にも述べた紀行文ということになろう。だが，その数には限りがあり，もはや調べ尽くされているといってよい。それに比べて，和歌は古代より日本人に親しまれてきた詩形であり，時代ごとに数多くの和歌が詠まれ，しかもそれらが歌集などの形で残されている。その中には富士山を詠んだものも数多く存在するはずである。ならば，これを活用しない手はないというわけである。

しかし，『万葉集』の時代ならともかく，平安時代以降の和歌は貴族の社交道具となり，さまざまな約束事に縛られて，内容的には形骸化してしまっていたのではないだろうか。だから，たとえ富士山がそこで詠まれているとしてもそれは型通りのものと見るべきで，そこからその当時の富士山の具体的な姿などわかるはずがないというのが常識的な見方であろう。しかし，都司博士は卓抜な着想により，その常識を見事に覆した。では，博士の着想はどのようなものだったのだろうか。

2　都司博士の研究手法－古代における富士山の活動の解明

どの時代の和歌にも叙景歌として富士山を詠んだものは存在していた。それらは，当然，その当時の富士山の様子を窺うための資料たりうる。だが，都司博士の研究の面白いところは，それをさらに踏み越えたところにある。博士は，叙景歌に詠まれた実際の富士山だけでなく，恋の歌に象徴的に詠み込まれた富士山まで研究の対象に組み込んだのである。

博士によれば，『万葉集』の時代からすでに，胸に燃えさかる恋の炎を富士の噴煙になぞらえる用例が見られるという。たとえば，巻11には次のような和歌がある（以下における原文の表記と現代語訳は，いずれも都司博士の著書からの引用である）。

- 吾妹子に逢ふ縁を無み駿河なる　不尽の高嶺の燃えつつかあらむ（恋人に逢うすべがないので，駿河の国の富士山のように私は心を燃やしつづけるだろう）
- 妹が名も吾が名も立たば惜しみこそ　布士の高嶺の燃えつつ渡れ（恋人の名も私の名も評判が立ったら悔しいので，富士の高嶺のように心を燃やしつづけよう）

また『古今和歌集』においても同様に，心に秘めた恋を富士の噴煙にたとえた長歌や短歌のあることを例示し，この時代の人々にとっては富士が噴煙をあげていることが常識であったからこそ，このような歌が詠まれたのであろうと推測するのである。

もちろん，これだけでは噴煙のあった証拠というには弱すぎるという反論もあるだろう。そこでこの推論を補強するために，博士は紀貫之の書いた『古今和歌集』の序文に着目する。そこには次のように書かれている。

- 筑波山にかけて君を願ひ，よろこび身に過ぎ，たのしび心にあまり，富士の煙によそへて人を恋ひ，松虫の音に友をしのび……今は富士の山も煙たたずなり，長柄の橋もつくるなりと聞く人は，歌にのみぞ心を慰めける（この和歌集に集められた和歌のなかには，筑波山の神や富士山の煙，あるいは松虫の鳴き声にこと寄せて恋や友情の心を詠んだものがある。……しかし，この和歌集がほぼ完成してこの序文を書いている今は，もはや時が移って，富士山の噴煙も立たなくなり，浪速（大阪の古名）の長柄の橋も新しくつくり替えられてしまって，昔の和歌が詠まれたころの風情はなくなってしまった。これらのことはただ和歌の世界のなかだけのことになってしまい，和歌のみによって昔のようすを偲び心を慰めることができるのだ）

ここで注目したいのは「今は富士の山も煙たたずなり…聞く人は，歌にのみぞ心を慰めける」という言い方である。もはや富士の煙は立たなくなったので，この歌集に収められた和歌でのみ偲ぶしかない時代になった，言い換えれば，噴煙が上がらなくなった今は，恋の炎の象徴としてもう富士山は使えなくなったというのである。ここから推測されることは，当時の歌人たちは貴族として都に住んでおり実際の富士山など見ていないのだから，型通りただ漫然と富士の煙を詠んでいたなどとはいえない。富士の噴煙の有無に関する情報は絶えず都へもたらされており，歌人たちはその情報に敏感に反応して和歌を詠んでいた。都司博士はこのように解釈する。そしてこれを根拠に，『万葉集』の時代より『古今和歌集』の作品が作られた時代までの富士山は基本的に噴煙を上げていたと考えるのが妥当だと結論づける。

ところで，『古今和歌集』序文の書かれた905年に一度止まった噴煙は，その後20年以内にまた立ち上るようになった。都司博士はその証拠と考えられる10世紀から11世紀初めの和歌をいくつか集めている。また和歌ではないが，1022年のことと推測される『更級日記』の記述では，噴煙どころか夜には火映現象の見られたことが書かれており，富士山の活動がかなり活発だったことが伺われる。

ところが，富士の噴煙を詠んだ歌は，1053年に詠まれた橘為仲の

- かきくらし晴るるまのなき五月雨の　ふじの煙はなをや立つらむ（いまはあたり一面くらくなって（かきくらし）晴れるときのない梅雨の季節で，（富士の山頂はいつも見えないが）富士の噴煙はいまもきっと立ち上っているのだろう）

という和歌を最後に，百年以上にわたって確認できなくなるという。都司博士によれば，この研究のために目を通した和歌は一万五千首以上あり，当然のことながら，この問題の百年間に詠まれた和歌の数は相当の数に昇る。それにもかかわらず，富士山を詠んだ和歌そのものが非常に少なく，しかもそれらには噴煙らしきものが詠まれていない。これは富士山を和歌に詠みにくい事情が生じていた，つまりは噴煙が止まってしまっていたからではないかと述べる。このことは，次の時代と比較により一層蓋然性が高まる。

3　中世の和歌と富士山

富士山の噴煙を詠んだ和歌が再び現れるのは，鎌倉時代に入ろうとする1186年の西行の作品であり，以後，鎌倉前期には数多く和歌が作られるようになる。その西行の和歌とは，

- 風になびく富士の煙の空に消えて　ゆくへも知らぬわが思いかな（富士の煙が風にたなびいてやがて空に消えていくように，どこへ赴いていくとも定めがたい私の心であることよ）

である（現代語訳は都司博士のものがないので筆者の訳である）。また，1232年に詠まれた九條道家の和歌は次のようである（上の和歌と同様の理由からこの現代語訳も筆者）。

- わがこひのもえてそらにもまがひなば　ふじのけぶりといづれたかけん（燃えるような私の恋心が空にもしも立ち上ったならば，富士の煙とどちらがより高くなることであろうか）

これらはいずれも燃える恋心の象徴として富士の煙を詠んだものだが，この時期には実際に富士が煙をあげているのを見て詠まれた和歌も作られており，噴煙があったことはほぼ間違いないと考えられる。

しかし，1260年代後半になると再び噴煙は途絶えてしまった。今回はそのことをはっきり詠んだ飛鳥井雅有の次の和歌が残されている。

- 富士の根の煙はたえて年ふるに　きえせぬ物は雪にぞありける（富士の高峰の煙は出なくなって幾年か過ぎてしまったが，いつまでも消えないものは，ただ雪であることよ）

その後も南北朝期に至るまでほとんど噴煙の上がっていなかったことは，阿仏尼の紀行文『十六夜日記』や二条の回想『問はず語り』のような文学作品でも確認されるという。

この状態が1360年頃まで約百年間続いたのち噴煙が復活する。そう推測されるのは1371年に詠まれた権大納言公長の次の和歌である。

- 富士の根の絶えぬ煙にくらべばや　我下もえにくゆる思ひを（富士山の絶えることのない噴煙とさあ競争してみよう。私の秘かに思い焦がれている恋心と）

また，1419年に詠まれた後小松天皇の和歌では次のように詠まれている。

- 田子の浦やおきつの波は遮莫　ふじの煙ぞたたぬ日もなき（田子ノ浦の沖の波は静まることはあっても，富士山の煙はたたない日はないのだなあ）（「遮莫」は「さもあらばあれ」と読む）

このようにして60年あまり噴煙は立ち上っていたのであるが，1432年頃よりまた断絶した，このことは，この年現地を訪れた飛鳥井雅世の紀行文『富士紀行』や彼に同行した人々の残した和歌などのなかに，富士山のことは書かれていても，噴煙のことにはいっさい触れられていないことから推測される。その後も1473年に富士を見て詠んだ和歌10首のある釈正広の紀行文『正広日記』にも噴煙のことはいっさい述べられていないという。

その後，1480年頃からは微かに煙が昇るようになり，1498年の明応東海地震以後，1530年頃まではかなりの噴煙が見られた。地震の翌年に富士山見物に出かけた飛鳥井雅康は，京都へ戻った後，他人から富士の様子を訪ねられて，次の和歌を詠んだ。

- おもひたつふじの煙もたち花の　なびく煙にまつやしるらん（思い立って出かけた富士であったが，噴煙も立ちなびいておりました。京都で待っていたあなたたちも，たなびく煙を（京都で）見て，（富士が噴煙をあげていることを）きっとご存じだったのでしょう）

都司博士はこの和歌から，当時は「遠く京都にまでたなびくほど」の噴煙が立ち上っていたのであろうと推測している。この噴煙も1530年頃には途絶え，その後はまた江戸時代に入るまでその状態が続いていたらしい。

このようにして，都司博士は，富士山を詠んだ和歌の数の推移，とりわけその中で噴煙が詠まれているかどうかを指標に，他の文献とも対象しつつ，富士山の活動のにおいて空白となっていた期間を埋める作業をしたのである。

（参考文献）

つじよしのぶ『富士山の噴火　万葉集から現代まで』築地書館，1992年。

第2節
生活の見つめなおしと生活の課題

担当教員
自然・生活教育学系　**佐藤ゆかり**

講義概要：毎日の生活のなかで，あなたがあたり前だと思っていることは本当にあたり前のことなのだろうか。毎日の生活のなかで，あなたが普通だと思っていることは，本当に普通のことなのだろうか。

本講義では，地域における生活の事象を例にして，生活の見つめなおしを試みたい。

地域による生活の違いの背景を探る。そのことを通して，その地域における生活のなかの課題を知り，生活の課題への気づきとその課題を克服するための知恵と科学について考える。

1　生活を見つめるということ

⑴　写真を見てみよう

A～Cの３枚の写真を見てみよう。

あなたは今，どのようなことを考えただろうか。あなたが今考えたことは，あなた以外の人が考えたことと同じことかもしれないし，全く違うことかもしれない。同じ写真を見ても，
明日のあなたは違うことを考えるかもしれない。

さて，今のあなたが考えたことを書き出してみよう。

A[1)]

B[2)]

C[3)]

たとえば，Aを見て，「３階建ての家」，「１階は車庫」，「屋根にはしごがついている」と思った人もいるだろう。「階段をあがってた２階に玄関がある」と思うかもしれない。

Bはどうだろう。「壁に穴のようなものがあいている」，「窓がどこにあるのかわからない」と考えるかもしれない。そして，Cを見て，「写真の奥の家の屋根は急傾斜なのに手前の家は屋根が平ら」，「窓は小さめ」と思うかもしれない。あるいは，「電線はどこにあるのだろうか」と考えるかもしれない。

あなたが写真を見て，今考えたことは，今までの生活のなかで得た知識や経験に基づいている。写真を見て，あなたとまったく同じことを考えた人はきっといないだろう。

2　生活のなかの課題

⑴　なぜ，このような住まいになったのか

1⑴のＡ～Ｃの住まいはいったいどこの地域のものか，予想してみよう。

地域ということばは多様な文脈で使用され，その中で指し示す範囲も異なることがあるため，ここではこの３つの住まいが，まずはどこの都道府県のものなのかを考えてみよう。

では，Ａ～Ｃの順に見ていこう。

Ａは新潟である。それも上越市の住まいである。この地域は，冬の積雪量が多いことで有名であり，昔から，雪に悩まされてきた。雪とどのように向き合うかが，この地域の冬の生活における重要な課題であった。降雪量の多い時には，雪が２階建ての１階部分をふさいでしまい，家のなかに陽をとり込むことや外に出ることもままならなかったという。その課題の克服が３階建の住まいが考えられた理由のひとつである。屋根についているはしごは，降り積もった雪の重さで家がつぶされてしまわないように，除雪のために用いられる。

Ｂは沖縄である。この地域は，台風があり，日本では１年を通じて暖かい気候とされており，台風がある。台風から住まいを守るために，鉄筋コンクリートでできている。夏の暑さをしのぐために通風がよいようなつくりになっている。窓がどこにあるかわからないようなつくりになっているのは，部屋のなかに差し込む日射量を夏は少なく，冬は多くするためである。軒の出が深く，窓が一見わからない位置にあることで，太陽高度が高い夏は住まいの中に入り込む日射量を少なくし，太陽高度が低い冬はできるだけ多く住まいの中に多く陽の光をとり込めるようになっている。

Ｃは北海道である。この地域の冬の寒さは厳しい。それをどのように克服するかがこの地域の生活の課題であった。窓の小ささは，寒さをしのぐための工夫である。勾配が急な屋根は雪の落下を助けるものである。写真手前側の勾配のない屋根にはとけた雪が流れる仕組みがついている。とけた雪は住まいの中の配水管を通っていく。その時の湿気を少しでも軽減するために，屋根裏に換気口がついている。それは，屋根近くの壁に複数並んだ小さな四角の部分である。

このように，見た目の異なるＡ～Ｃの３つの住まいは，それぞれの地域でくらす人が生活の課題と向き合い，それを克服するためにかたちづくられてきているといえる。

⑵　生活のなかの課題は何だろうか

生活をよりよいものにするために，生活の課題に気づき，向き合い，克服していくことは重要である。さて，次の２つの写真の生活の課題は何だろうか。その課題を克服するためにどのような工夫がされているのか，考えてみよう。

生活のなかの課題に気づくには，生活を見つめなおすことが必要である。あなたの生活の課題は何だろうか。それを克服するためにはどのようにしたらよいだろうか。

（所蔵：上越市　市村氏）

引用・参考文献：1）～3），住まい・環境教育学会編，住まい・環境教育のためのスライド教材（改訂第一版第一刷）（撮影：宇野浩三），2008

村田泰彦編著，「生活課題と教育」，1984，光生館

第3節

現実的な問題を解決するための考えとしてのグラフ理論

担当教員
自然・生活教育学系　高橋　　等

講義概要：四色問題などの現実的な問題を解決するためのグラフ理論を紹介し，グラフ理論における問題を幾つか提示する。取り上げた問題は，ケーニヒスベルグの橋の問題，８つの円の問題，最短路問題，郵便配達員問題，巡回セールスマン問題，オイラーの公式の問題，およびオイラーの多面体公式の問題である。問題の多くには解決のためのヒントを付し，オイラーの公式の問題とオイラーの多面体公式の問題とには証明の概略を記している。これらの問題の解決を通し，数学は抽象的な一面のみでなく，現実的な一面ももっていることを実感することを期待している。

1　四色問題の解決

1976年に124年間にわたって多くの数学者が取り組んでいた四色問題を，米国イリノイ大学の二名，ケネス・アッペル（Kenneth Appel）とヴォルフガング・ハーケン（Wolfgang Haken）が解決した。アッペルとハーケンによる証明はコンピュータを使用したものであり，人間の叡智の神髄とされる数学の証明を人工的な機械による計算に任せたことに対して当時は異論が相次いだ。今日では証明にコンピュータを用いたならば，そのプログラムをさらに検証する手続きも証明の一部と見なされてきており，四色問題も一応の解決に至ったとされる。ただし，四色問題は今もってコンピュータなしでは証明されていない。四色問題とは次のような問題である：

平面上に描かれているどんな地図も，共通の境界をもつ二つの区域をそれを区別するために同じ色で塗ってはならない，という要求のもとで，地図を色分けするために必要な色の種類の最大数は４であるらしい。

図１　米国の地図

図２　数学的に考える場合の地図

この問題の答えが四色で十分であることをアッペルとハーケンは証明したのだけれども，経験的には実は地図職人達によって知られていた事実でもあった。

四色問題を最初に数学の世界に提起したのは英国のフランシス・ガスリー（Francis Guthrie）である。フランシスは退屈しのぎに英国の田舎の地図に色を塗っていたときにこの問題にたどり着いたのである。後に物理学者となる弟のフレデリック・ガスリー（Frederick Guthrie）にフランシスがこの問題を相談し，それをフレデリックが数学者オーガスタス・ド・モルガン（Augustus de Morgan）

に伝えたことによりこの問題が広く数学界に知られるようになったのである。四色問題における現実的な場面としてしばしば取り上げられる米国の地図（図１）と数学の問題として考える場合の簡略化された地図（図２）を幾つか載せておこう。

2　ケーニヒスベルクの橋の問題

多くの数学者の挑戦をはね除けていた四色問題であったけれども，それを数学の一分野であるトポロジーの問題に置き換えたことにより，問題の解決に近づいた。トポロジーとは位相幾何学とも言われ，概説すれば，或る図形を他の図形へ変換（写像）したときに不変な図形の性質を調べる分野である。トポロジーにおける初期の問題としてレオナルド・オイラー（Leonhard Euler）が解決したケーニヒスベルクの橋の問題が有名である。ケーニヒスベルクとは18世紀の初頭のプロイセン王国の首都である。ケーニヒスベルクには図３のようにプレーゲル川が流れており，七つの橋が架かっていた。その七つ総ての橋を一回だけ渡るような散歩の道筋が存在するかどうかというのがケーニヒスベルクの橋の問題である。

オイラーはそのような散歩の道筋が存在しないことを証明したのだけれども，その解決はトポロジーと近接な領域であるグラフ理論の考えを用いたものであった。オイラーは図４のような今日ではグラフと呼ばれる図を考案し，解決に至ったのである。図４では陸地が点で，橋が線で表されている。図３に表した現実的な地図で考える問題が図４の各点を通って一筆書きができればよいという問題に姿を変えたのである。

図３　ケーニヒスベルクの橋

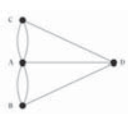


図４　オイラー・グラフ

3　グラフ理論で解決する幾つかの問題

ケーニヒスベルクの橋の問題は現在ではオイラー・グラフの問題と呼ばれグラフ理論における一問題となった。グラフ理論は現実的な問題を解決するための考え方であり，体系化が遅れたために暫くは数学としての完成度が高くはない分野であった。他方で，グラフ理論では前提となる定義や定理が少なく，アルゴリズムによる考えで解決できる問題が多いことから，誰でも趣味的に楽しむことができる場合が多い分野である。学校数学ではグラフ理論を算数・数学教科書に掲載することは少ないが，課題学習的に授業で取り上げる場合も多い。ここでは定義や定理の確認なしでも解決できる幾つかの問題を取り上げよう。

⑴　８つの円の問題

図５の８つの円の中に，Ａ，Ｂ，Ｃ，Ｄ，Ｅ，Ｆ，Ｇ，Ｈのアルファベットを一つずつ入れなさい。ただし，アルファベットの順番で隣にくる文字は，隣同士にならないようにしなさい。

図５　８つの円の問題

あらゆる場合について試してみるとすると，8!＝40320通りを試さなければならない。どの様に考えたらいいだろうか。次の二つがヒントとなる。

ア　円に入れるのに最も易しい文字は隣の文字が一つしかないＡとＨである。

イ　文字を入れるのに最も難しい円は６つの円と隣接する真ん中の２つの円である。

⑵　最短路問題

図６に示したような地図があったとする。アルファベットＡからＬは地点を表し，それらは道路で結ばれているとする。道路の長さが図６の道路上の数値で表されているとき，Ａ点からＬ点まで行く最短路の長さはいくらだろうか。

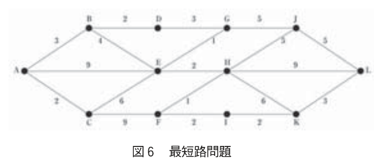


図６　最短路問題

最短経路問題の道路の長さを表す数値は重みと呼ばれ，このようなグラフは重みつきグラフと呼ばれる。現実的な場面では道路の長さに限らず，かかる時間や費用などが重みとなる。図６で道路の長さとした数値は時間でも費用でもよい。

Ａ地点からＬ地点への最短路をどの様にして求めればよいだろうか。現実的なままに考えようとするのであれば，実際に重みに相当する長さで各地点を糸で結び，Ａ地点とＬ地点とをもって糸を張ればよい。一直線になった経路が最短路となる。それでは，より数学的に解決するにはどの様にしたらよいだろうか。ヒントを示そう。グラフ上をＡ地点からＬ地点に向けて移動しながら，例えばＫ地点に到達したとき，その直前のＩＫ＝２またはＨＫ＝６のうちの何れか小さい方を選ぶというものである。少々，漠然としたヒントではあるが，これをＡ地点から実行すると解決することができるだろう。

⑶　郵便配達員問題

図７に示したようなＡからＦまでの地点と地点間の経路の重みがあるとする。郵便配達員ができるだけ短い距離を移動して出発点に戻る経路はどの様な経路になるだろうか。

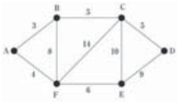


図７　郵便配達員問題

ヒントを示そう。先ずＥ地点からＢ地点に行く最短路を見つけ，Ｂ地点からＥ地点に至る最短の一筆書きを探そう。

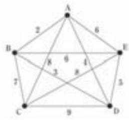


図８　巡回セールスマン問題

⑷　巡回セールスマン問題

この問題は巡回セールスマンが決められた幾つかの地点を廻って最短路で出発点に戻ることを想定した問題である。図８にアルファベットで表した地点と経路の重みを示す。Ａ地点からＡ地点に最短路で戻る経路はどの様な経路になるだろうか。

図９　オイラーの公式で表す図形

⑸　オイラーの多面体公式の問題

１）　オイラーの公式の問題

オイラーは，平面上の図形において頂点の個数をＶ，辺の個数をＥ，面の個数をＦとしたとき，常にＶ－Ｅ＋Ｆ＝１が成り立つことを発見した。この公式はオイラーの公式と呼ばれている。この公式で表す図形をグラフで表すことが可能である（図９）。

オイラーの公式の証明の概略を記しておこう。図10のようなグラフが与えられたとする。そのグラフから外側の辺を一本取り除くと辺の個数Ｅと面の個数Ｆが一つずつ減ることになる。ＥとＦとの変化は一つずつ減るということで同じであるから，この変化は式の全体には影響を与えない。図11の様に面を作らない辺があるときは，その先端の頂点と辺を取り去るので，頂点の個数Ｖと辺の個数Eが一つずつ減ることになる。このときは，ＶとＥとの変化は一つずつ減るということで同じであるから，

この変化も式の全体には影響を与えない。この様にして任意のグラフについて次々に外側の辺と面を作らない辺を取り去っていけば，式の全体には影響を与えないのだから，常にＶ－Ｅ＋Ｆ＝１が成り立つ。

図10　オイラーの公式の証明過程１

図11　オイラーの公式の証明過程２

２）　オイラーの多面体公式の問題

オイラーの公式の拡張版として，オイラーの多面体公式がある。凸多面体の頂点の個数をＶ，辺の個数をＥ，面の個数をＦと表したとき，常にＶ－Ｅ＋Ｆ＝２が成り立つというのがオイラーの多面体公式である。図12に示した立方体の場合ではＶ－Ｅ＋Ｆ＝８－12＋６＝２となっている。オイラーの多面体公式もグラフ理論において証明することができる。どの様な証明になるだろうか。他方で，オイラーの多面体公式を球面上の図形として凸多面体を見なすことにより，トポロジーとして証明することが可能で，その証明が普及してもいる。トポロジーとしての証明とグラフ理論としての証明は本質的には変わらない。

図12　立方体

図13　木と呼ばれるグラフ

図14　閉じた経路をもつグラフ

最初にグラフ理論における証明の概略を記そう。ここでは数学的帰納法による証明を取り上げる。凸多面体を平面上のばらばらでないグラフであるとする。その頂点の個数をＶ，辺の個数をＥ，面の個数をＦと表す。最初にＥ＝０であるとしたとき，グラフにおいてＶ＝１でＦ＝１となり，Ｖ－Ｅ＋Ｆ＝１－０＋１＝２となるから，Ｖ－Ｅ＋Ｆ＝２が成り立つ。次に，Ｅ－１本の辺をもつグラフについてオイラーの多面体公式が成り立つと仮定しよう。もし，グラフが図13に示した様な木と呼ばれるものである場合，Ｅ＝Ｖ－１，Ｆ＝１であるから，Ｖ－Ｅ＋Ｆ＝Ｖ－（Ｖ－１）＋１＝２となり，オイラーの多面体公式が成り立つ。ここで，木とは図13に示した様な閉じた経路をもたないグラフのことである。よって，木では必ず頂点の数より１だけ少ない本数の辺の数をもつ。もし，グラフが木でないとした場合，この閉じた経路から辺を一つ取り除いた場合を考える。このとき，辺を一本取り除いたのだから，Ｅ－１本の辺の数に対して，頂点の数はそのままのV個，面の数が一つ減ってＦ－１個ということになる。今，Ｅ－１本の辺をもつグラフについてオイラーの多面体公式が成り立つと仮定しているのだから，Ｖ－（Ｅ－１）＋Ｆ－１＝２が成り立つ。これを計算するとＶ－Ｅ＋Ｆ＝２となり，

Ｅが総ての本数のときにオイラーの多面体公式が成り立つことになる。

グラフにおいて頂点の数Ｖ＝１，辺の数Ｅ＝０のときや，木のときに面の数Ｆ＝１となることに違和感を覚えるかも知れない。グラフ理論では，これらのときに無限に広がる平面である無限面を一つもつと見なすのでＦ＝１としているけれども，このグラフが球面上に描かれることを想像しよう。球の上で有限な面を一つもつことがわかるだろう。

次にトポロジーとしての証明の概略を記そう。先ず，図15の様に凸多面体を球面上に描かれた図と見なす。この球面は伸縮可能なゴムでできていると見なそう。球面上に描かれた凸多面体から面を一つ選んで取り去ることにする。それから，図16の様に取り去った面があった箇所が口になるようにして，この球が平面になるように押し広げていく。そうすると頂点の個数Ｖと辺の個数Eは変わらないままで，面の個数Ｆが一つ減ったことになる。よってＶ－Ｅ＋Ｆも１減ったことになる。ところで，オイラーの公式Ｖ－Ｅ＋Ｆ＝１は既に⑸の１）で証明しているのだから，Ｖ－Ｅ＋Ｆが１だけ減ったことを逆に考えると，凸多面体では平面化した場合よりもＶ－Ｅ＋Ｆ が１だけ多くなければならないことになる。従って，凸多面体ではＶ－E＋F＝２でなければならない。

図15　球状に描いた凸多面体

図16　球状に描いた凸多面体から面を一つ除いた図形

４　終わりに

四色問題という現実的な問題がグラフ理論という数学的な考えから解決し得ることを論ずることから出発し，グラフ理論に基づき解決し得る幾つかの問題を示してきた。数学では高度に抽象化された世界を扱っているものの，分野によっては至極，現実的な問題を扱うこともできる。グラフ理論はその意味で，将来的に学校数学のためにいよいよ教材化されていくことになる。グラフ理論を学習することを通して，数学により一層，親しみと暖かさを感じることができるだろう。

文献

Devlin,K.　山下純一訳．(1995)．数学：パターンの科学．東京：日経サイエンス社．
Devlin,K.　一松信監修．(1999)．数学：新しい黄金時代．東京：森北出版．
Wilson,R.J.　西関隆夫他訳．(2001)．グラフ理論入門．東京：近代科学社．

第４節

「測れない長さ」を数学でみる

担当教員
自然・生活教育学系　岩崎　　浩

講義概要：「測れない長さ」をみることは，われわれの直観では到達することができない。それは，われわれの純粋に論理的な思考によってのみ到達しうる。「測れない長さ」をみることとは，数学的には，非通約性の認識に他ならない。プラトンが述べているように，われわれ人類は，純粋な思惟によってのみ到達しうる世界があることをこの非通約性の発見によって教えられた。(cf. Steiner 1981)「われわれはここに，数と図形それ自体の不思議さ，それを認識しようとする人間精神の素晴らしさ，そして何よりも，それを実現する数学的手法の力と美しさを垣間見ることができる。」（岩崎 2003，44頁）このことを体験することこそが本講義・演習の目的である。

１　講義・演習の内容について

ここでは，生活の中の身近な題材として，Ａ４用紙を用意し，Ａ４用紙のたてと横が非通約の関係になっていることをユークリッドの互除法によってみることにする。そのために，

⑴　まず，長さを測るとはどういうことか。特に，長さを測るには共通のものさしが必要であること。また，測れる長さとは分数で表される量であることを理解する。
⑵　次に，測るには，共通のものさしを求める方法として，ユークリッドの互除法を理解する。
⑶　また，ユークリッドの互除法の結果を代数的に表現する方法として連分数を導入する。
⑷　ユークリッドの互除法を用いて，Ａ４用紙のたてと横の間の共通のものさしを見いだすことを試みる。
⑸　Ａ４用紙のたての長さを１としたとき，横の長さを連分数で表現し，その近似値を計算する。

以下，⑶～⑸を中心に述べることとする。

２　ユークリッドの互除法と連分数

42と30にユークリッドの互除法を適用して，最大公約数を求め，その結果を利用して，$\frac{42}{30}$の連分数を作る方法考えよう。ここで，$\frac{42}{30}$の連分数表現とは，次のような複合分数のことである。

$$\frac{42}{30}=1+\cfrac{1}{2+\cfrac{1}{2}} \tag{1}$$

30と42にユークリッドの互除法を適用すると，

$$42=30\times1+12 \tag{2}$$
$$30=12\times2+6 \tag{3}$$
$$12=\ 5\times2 \tag{4}$$

となり，最大公約数12が求まる。このときできる一連の等式と上の連分数表現とを比較すると，ユークリッドの互除法の過程で出てくる一連の等式の中のある位置の数が連分数に順に出てきていることが観察されるであろう。

$\frac{42}{30}$の連分数は，上のユークリッドの互除法の一連の等式に出てくる数１，２，２だけで決まっているのであろうか。$\frac{42}{30}$を例として，連分数を作る過程とユークリッドの互除法との関連を具体的にみていくことにしよう。

ユークリッドの互除法の過程で出てきた最初の等式42＝30×１＋12は，42を30で測ると30が１回とれて12だけ余ることを示しているから，この式を利用して，$\frac{42}{30}$は，次のように式変形できる。（両辺を30で割ったと考えてもよい）

$$\frac{42}{30}=1+\frac{12}{30} \tag{5}$$

ユークリッドの互除法では，次に，余り12を新しい「ものさし」として，一歩前の「ものさし」30を測る。⑸式のままでは，30を12で測るということを表現できないので，$\frac{12}{30}=\cfrac{1}{\frac{30}{12}}$

という関係をつかって次のように変形する。

$$\frac{42}{30}=1+\frac{12}{30}=1+\cfrac{1}{\frac{30}{12}} \tag{6}$$

30を12で測ると，12が２回とれて６余るので，$\frac{30}{12}=2+\frac{6}{12}$と表せる。これを⑹式に代入して，等式の変形を続けると，

$$\frac{42}{30}=1+\frac{12}{30}=1+\cfrac{1}{\frac{30}{12}}=1+\cfrac{1}{2+\frac{6}{12}} \tag{7}$$

$\frac{6}{12}=\cfrac{1}{\frac{12}{6}}$という関係をつかって⑺式を続けて変形すると，

$$\frac{42}{30}=1+\frac{12}{30}=1+\cfrac{1}{\frac{30}{12}}=1+\cfrac{1}{2+\frac{6}{12}}=1+\cfrac{1}{2+\cfrac{1}{\frac{12}{6}}} \tag{8}$$

12を６で測ると，６が２回とれて余りは０になるので，$\frac{12}{6}=2+\frac{0}{6}=2$と表せる。これを⑹式に代入すれば，連分数の完成である。

$$\frac{42}{30}=1+\frac{12}{30}=1+\cfrac{1}{\frac{30}{12}}=1+\cfrac{1}{2+\frac{6}{12}}=1+\cfrac{1}{2+\cfrac{1}{\frac{12}{6}}}=1+\cfrac{1}{2+\frac{1}{2}} \tag{9}$$

⑼式を眺めれば，任意の分数を連分数に表現する方法がわかるであろう。

ユークリッドの互除法を利用して，$\frac{42}{30}$の連分数を作る方法を反省してみると，先ほど提出された疑問：ユークリッドの互除法の一連の等式に出てくる数１，２，２が，なぜ連分数に表れてくるか――も明らかになったであろう。

この結果をもう少し一般化して述べれば次のようになる。すなわち，ユークリッドの互除法の過程で，短い方の量を「ものさし」として長い方の量を測り，その次からは，余りを新しい「ものさし」にして，一歩手前の「ものさし」を測っていく。このときに**それぞれで何回ずつとれるかということだけで連分数が決定されている**，ということである。

本当にそうなっているかどうか――いくつかの例で試してみよ。

3　ユークリッドの互除法でA４用紙を調べよう

それでは，私たちの身近にある適当な用紙，A４のコピー用紙を題材として，この用紙の縦と横に共通の物さしが存在するかどうかを調べることにしよう。まずは，手元のA４のコピー用紙を折りながら探究してみよう。 A４の用紙を用意し，それを横向きに置く。この用紙は，図１のように，たての長さ（短い方の長さ）を一辺とする正方形の対角線がちょうど横の長さになっている。

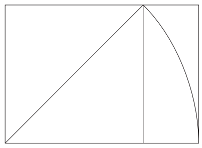


図１：A４用紙の構造

共通の物さしが存在するかどうかは，それが非常に小さいか，または限りなく小さくしていかなければならないような場合，物理的な方法で観察し，調べることはできない。しかし，A４用紙の縦と横にユークリッドの互除法を適用したときに，どのようなことが起こるかは観察することが可能である。つまり，ユークリッドの互除法という数学の顕微鏡を使えば，思考の目を通してみることができるのである。

【演習】A４のコピー用紙の縦と横にユークリッドの互除法を適用し，どのようなことが起こるか調べてみよう。その結果から，共通の物差しが見つかるかどうか予想してみよう。

まずは，A４用紙を実際に折る操作によって，A４用紙のたてと横にユークリッドの互除法を適用してみよう。次に，その結果を記述しておこう。仮に，たてを１，横をxとして，その結果を連分数で表現することもできる。各自試みてみよ。

A４のコピー用紙を丁寧に折りながら，そのたてと横にユークリッドの互除法を実行していくと，紙を折って調べることが物理的に困難な状態になるであろう。もしも物理的に続けていくことができたならどうなるであろうか。ユークリッドの互除法が終了し，求めることができるであろうか。あるいは，終了しないのであろうか。もし仮に，終了しないとすれば，A４用紙の縦と横には共通のものさしが存在しないということになるであろう。

4　ユークリッドの互除法のシステマティックな適用

図１から分かるように，A４用紙のたての長さを一辺とする正方形をA４用紙から切り取ると，切り取った正方形の一辺と対角線は，ちょうどA４用紙を横に置いたときのたてと横の関係になっている。

ここでは，前節の問題に決着をつけるために，幾何学的関係を利用しながら，もう少しシステマティックにユークリッドの互除法を実行する方法を考えよう。図２は，正方形の対角線とその一辺にユークリッドの互除法を適用した様子を図示して表現したものである。

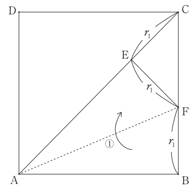


図２：互除法の操作１回目

まず，正方形ABCDの対角線AC（＝x）をその一辺AB（＝１）を「ものさし」として測る。図に示されているように，正方形ABCDを折り紙にみたてて，辺ABが対角線ACにぴったりと重なるように折る操作をする。言い換えると，対角線AC上に，ABに等しくなるようにAEをとる。そうすると，**１回**とれてCE（＝r_1）だけ余る。この事実を代数的に式で表現すると次のようになる。

$$x=1\times1+r_1 \tag{10}$$

ユークリッドの互除法を続けるとすると，今度は，この余りCE（＝r_1）を新しい「ものさし」にして，一歩前の「ものさし」であるAB（＝１）を測ることになる。

4.1　図の中にみえる面白い幾何学的関係

ここでは，その前に，図の中の幾何学的関係に注目することにしよう。というのも，ここには面白い幾何学的関係があり，この関係がシステマティックにユークリッドの互除法を適用する鍵となる。

先ほど紙を折る操作をしたが，その結果としてある図形が見えるであろう。三角形EFCは，**直観的**に直角二等辺三角形であると推測される。これを**論理的**に分析し確かめてみることにする。

そのために，先ほどのおる操作を振り返る。まず，正方形ABCDを一枚の折り紙に見立て，正方形の一辺ABが対角線ACに重なるように折った。これはユークリッドの互除法の最初の過程でABを「ものさし」としてACを測る操作であった。

∠AEFは，∠Bを折り返してできた角なので，∠AEF＝90°である。∠FEC＝180°−∠AEF＝180°−90°＝90°。また，∠ECFは，正方形ABCDを対角線ACで折った時にできる角であるから，45°である。三角形の内角の和は180°なので，△EFCの残りの角∠EFCも45°となる。（∠EFC＝180°−90°−45°＝45°.）△EFCの両底角が等しいので，△EFCは二等辺三角形である。したがって，CE＝EFである。また，EF＝BFであることは，この折るという操作の必然的結果であり，直観的にも明らかである。

これらの結果をまとめると次のようになる：

$$\mathrm{CE}=\mathrm{EF}=\mathrm{FB} \tag{11}$$

4.2　ある規則性の出現

さて，ユークリッドの互除法を続けよう。AB＝BCなので，ABを測る代わりにBCを測ってもよい。もう既にBFとして１回とれていることに注意しよう。図３のように，先ほどと同じ折る操作（右図の②の操作）を試みる。

そうすると，もう１回取れることがわかる。結局，**２回**とれて，少し余る。この余りをr_2と表し，この結果を式で表現すると次のようになる。

$$1=r_1\times2+r_2 \tag{12}$$

今度はr_1をr_2で測る。これは直角二等辺三角形の「等しい一辺（以下，等辺と記す）」を「斜辺から等辺を取り除いた余り」で測ることとみることができる。おそらく，ユークリッドの互除法を折る操作として繰り返すうちに，この事実（規則性）に気づくであろう。この観点からみれば，１をr_1で測る操作も，直角二等辺三角形BACにおいて，「等辺（＝1）」を「斜辺から等辺

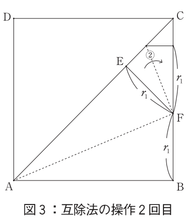


図３：互除法の操作２回目

を取り除いた余り（＝r_1）」で測る操作になっていることが分かる。

4.3　規則性はどのように現れるか

今度は，上で述べた規則性がどのように現れるかに注意しながら，もう少しユークリッドの互除法を続けてみよう。

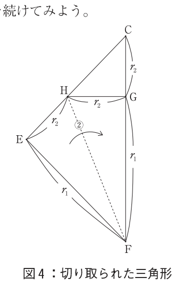


図４：切り取られた三角形

さて，r_1をr_2で測る操作であるが，操作しやすいように，前頁の図（正方形ABCD）から必要な部分（直角二等辺三角形BAC）を切り取って考えることにする。図４は，このようにして切り取った図を少し拡大して表現したものである。

余りGC（＝r_2）で，一歩前の「ものさし」FG（＝r_1）を測るかわりに，CE（＝r_1）を測る。既に，EHとして１回取れていることに注意する。前と同じように，折る操作でr_2を辺EC上に続けて取ると（図５の③の操作)。結局２回とれて少し余る。この余りをr_3と表す。

この過程を式で表現すると次のようになる。

$$r_1=r_2\times2+r_3 \tag{13}$$

やはり，r_1をr_2で測る操作は，直角二等辺三角形EFCにおいて，「等辺（＝r_1）」を「斜辺から等辺を取り除いた余り（＝r_2）」で測る操作になっている。この操作（図５の③の操作）の過程で再び直角二等辺三角形（IJC）ができていることに注意したい。

4.4　何がみえてきたか――数学的帰結

結局，正方形の一辺と対角線（直角二等辺三角形の等辺と斜辺とみれる）にユークリッドの互除法を適用すると，初回こそ「斜辺」を「等辺」で測る操作となるが，この後は「等辺」を「斜辺から等辺を取り除いた余り」で測る操作の繰り返しとなる。この操作が永遠に繰り返されることは，先に考察し明らかにしてきた幾何学的関係に基づいているのであるが，この永遠に続くという事実は，**繰り返されるパターンとして体験的に理解できる**であろう。

ここで折る操作として繰り返されるパターンとは，(i)直角二等辺三角形の等辺を斜辺にぴったりと重なるように折る。(ii)結果として新たに小さな直角二等辺三角形ができる。(iii)この新たにできた直角二等辺三角形に対して(i)の操作をする，ということである。

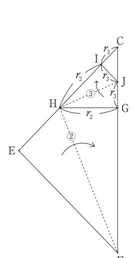


図５：繰り返されるパターン

したがって，次いでr_2をr_3で測っても，この操作が繰り返されるので，必ず２回とれて余り（r_4）がでる。一般に，r_{n-1}をr_nで測ると，必ず２回とれて余り（r_{n+1}）がでる。すなわち，

$$r_{n-1}=r_n\times2+r_{n+1} \tag{14}$$

ここに，正方形の一辺とその対角線にユークリッドの互除法を適用した場合，その手続きは同じパターンで永遠に繰り返され，終ることがないということが示された。この事実は，正方形の一辺とその対角線の両方を同時に測りきることのできる長さは存在しないということを意味している。これが

正方形の一辺(1)と対角線($\sqrt{2}$)との非通約性に他ならない。したがって，A４用紙のたてと横は，どんなに小さな長さをもってしても，その整数倍として表現することはできないということ，つまり，「測れない」ということである。これが上の考察から導かれた数学的帰結である。

5　対角線の長さを連分数で表す――近似値を求めよう！

それでは最後に，正方形の一辺の長さを１としたときの対角線の長さ x を連分数で表現してみよう。連分数は，その表現が美しいと同時に，直角二等辺三角形を折る操作である幾何学的な意味でのユークリッドの互除法の無限過程の代数的表現として，$\sqrt{2}$ の無理性の理解を助けるであろう。また，この代数的表現は，$\sqrt{2}$ の近似値を求めることを可能とし，このことが $\sqrt{2}$ の数としての存在をより具体的に捉える上でも有効に働くであろう。

第５節での結果を用いれば，正方形の対角線（$=x$）と一辺（＝１）との間にユークリッドの互除法を適用した過程，それを表す一連の等式⑽，⑿，⒀，・・・⒁から，次の式が得られる。

$$x = 1 + \cfrac{1}{2 + \cfrac{1}{2 + \cfrac{1}{2 + \cfrac{1}{2 + \ddots 2 + \cfrac{r_{n+1}}{r_n}}}}} \qquad (15)$$

この⒂式から，x，すなわち $\sqrt{2}$ の近似分数の系列が得られる：

$$\frac{7}{5},\ \frac{17}{12},\ \frac{41}{29},\ \frac{99}{70},\ \frac{239}{169},\ \frac{577}{408},\ \frac{1393}{985},\ \frac{3363}{2378},\ \frac{8119}{5741},\ \frac{19601}{13860},\ \cdots$$

この系列の最後に挙げた分数 $\frac{19601}{13860}$ を小数で表すと＝1.4142135・・・となる。

引用・参考文献

１）Steiner, H.-G.（1981）. Philosophische Thematisierungen von Fragen aus der und über die *Mathematik. Mathematische Semesterberichte, 1*，S.52-73.

２）岩崎　浩.（1998）. 具体的教材（題材）の陶冶価値を検討することの意味. 一般教科教育学序説（第一部第４章）. 大学教育出版. 54-75 頁.

３）岩崎　浩.（2003）. $\sqrt{2}$ の無理性の理解を図るDo Math－問題の発展的展開と紙を折る操作活動によるアプローチー. 今こそ　Do Math!（第Ⅰ部理論編第４章）. 上越教育研究会Σ会. 35-44頁.（本稿は，基本的に，この文献で紹介されている教材展開に基づいている。）

第5節

2足歩行模型から力学を学ぶ

担当教員
自然・生活教育学系　黎　子椰

講義概要：２足歩行模型はモーターなどのアクチュエータをもたない受動歩行機械の一種であり，厚紙，竹ひご，洗濯バサミなどを利用して短時間で製作できるおもちゃである。２足歩行模型の製作・調整・歩行実験を通して,ものづくりの楽しさを味わいながら，重心位置や慣性モーメントなどの力学の知識を体験的に学び，観察・実験の基本的な技能を身に付ける。

1　２足歩行模型の歩行原理

２足歩行模型は図１に示すように，両足，腕，おもりより構成されている。模型を斜面に置いて，片側の腕を押し下げて離すと，模型は斜面をトコトコと可愛らしく歩きながら下がる。この模型はモーターなどのアクチュエータを持たずになぜ歩くのか。この疑問に答えるために，ここでは，模型の動きを３つの運動に分けて考えてみよう。すなわち，模型を正面から見たときの動き，側面からみた足単体の動き，さらに側面から見た模型全体の動きを順に追って考える。

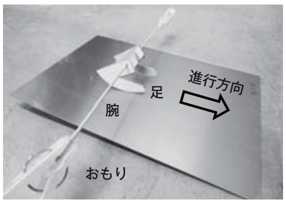


図１　２足歩行模型

歩いている２足歩行模型を正面から見た時のモデルを図２に示す。左右の足が交互にあがるようなロッキング振動すなわち全体の左右運動が生じる。模型を歩かせるためには，この左右の運動を持続させる必要がある。そのためには，模型の前後方向（進行方向），すなわち図２の紙面に垂直な軸まわりの慣性モーメントを適切な値に調整する必要がある。この慣性モーメントの大きさは，腕，足，おもりの形状，質量などによって決まり，詳細な説明や調整方法などを３節で述べる。

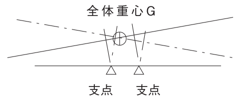


図２　全体の左右運動（正面図）

２足歩行模型は，歩く時に左右のロッキング振動に加えて２本の足が交互に踏み出るような機構になっている。図３のように支点Oまわりに足が自由に回転できるようになっており，また，足の重心G’が底面の円弧の中央と支点Oを結んだ線より少し後方になっていいる。この２つのことにより足が持ち上がったときに，重力の働きで

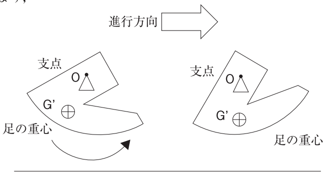


図３　足の前後運動（側面図）

足が回転し，足が前に振り出されることになる。この時の足は剛体振り子とみなすことができる。

次に側面から模型全体の動きを見てみよう。図２のロッキング振動により左右の足が交互に持ち上がり，交互に支持脚となる。支持脚と反対側の足は持ち上がると，図３のように前に振り出される。振り出された足が接地するときには，接地点は図４の左のように模型全体の重心Gより後ろになる。その結果，接地点は支点となり，重心Gに働く重力によって模型全体が前方に転がろうとする。このままでは転倒するが，転倒する前に支持脚が入れ替わる。この一連の運動が繰り返されて模型が前に進むことになる。

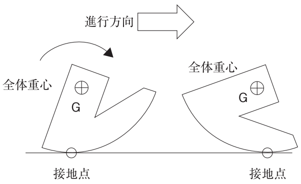


図４　全体の前後運動（側面図）

安定した歩行を実現するためには，振り出された足が接地するときには，接地点は模型全体の重心より後ろになる必要がある。そのために，斜面の角度に応じて適切に足の重心位置を調整する必要が生じる。その具体的な調整方法は３節で説明する。

2　２足歩行模型の製作

２足歩行模型に使用する材料と道具は次の通りである。型紙（図５），厚紙，竹ひご（径３㎜×300㎜），洗濯バサミ（２個），はさみ，のり，きり（径３㎜），クリップ，斜面用板（250㎜×300㎜）

製作手順は以下に示す。

⑴ 型紙をのりで厚紙に貼り付ける
⑵ はさみで型紙の実線どおりに切り抜く
⑶ きりで黒丸の位置に穴をあける
⑷ 点線箇所を山折りにする
⑸ 軸受け部を組み立て，のり付けする
⑹ 穴に竹ひごをとおす
⑺ 竹ひごの両端に洗濯バサミを取り付ける
⑻ 全体の形を整える
⑼ 試走させ，調整を行う

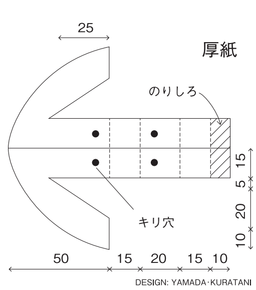


図５　２足歩行模型の型紙

製作において，特別に困難な作業はないが，細かい注意点は以下のように挙げられる。

- 切断においては，型紙の実線通りに１㎜以下程度の精度で切り抜く必要がある。
- 穴あけにはきりを用いる。きりの径が竹ひごの直径より小さい場合は，足がスムーズに回転するように，サンドペーパーで竹ひごの直径を調整する作業が必要となる。

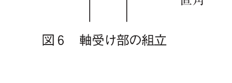


図６　軸受け部の組立

- 竹ひごを通す軸受け部は，特に組み立て精度が要求され，図６に示すように両足が軸受け部に対して垂直になるように軸受け部を組み立てる必要がある。そこで，破線の折り曲げには定規を添えて

折り曲げる，糊の付いた軸受け部は乾くまで洗濯バサミで固定するなどの工夫が必要である。

3　２足歩行模型の調整・歩行実験

２足歩行模型の動くエネルギー源は位置エネルギーである。模型を歩かせるときには，後ろから模型を押すのではなく，片方の腕の端を下に押し下げ離すことで歩行が始まる。製作した模型は，調整すれば，約５°の斜面を軽快に歩行しながらまっすぐに下がるようになる。１節で述べたように模型全体の慣性モーメントや足単体の慣性モーメントが模型の運動に及ぼす影響が大きいので，効率よく模型を調整するために，慣性モーメントの概念を理解する必要がある。慣性モーメントとは，簡単に言うと，物の回り難しさを示すものである。慣性モーメントが大きいほど，回転運動の状態を変えにくい。慣性モーメントの値は回転体各部の質量と回転軸からの各距離の２乗との積を全部出し合わせたものである。２足歩行模型の場合，模型全体の慣性モーメントや足単体の慣性モーメントを正確に求めるには，複雑な計算が必要であるが，腕が長いほど，重りの質量が大きいほど，重心が回転中心から離れるほど慣性モーメントが大きいといえる。

模型の歩行が困難な場合の代表的な対策を表１に示す。すぐに止まってしまう場合は，振動を持続させるためのエネルギーが不足していることになるので，斜面の角度を急にして位置エネルギーを大きくする必要がある。また，腕の長さを長くし，慣性モーメントを大きくすることも有効な対策となる。しかし，慣性モーメントを大きくしすぎると左右振動の周期が大きくなり，足が大きく踏み出てしまう原因になる。

表１　歩行が困難な場合の対策

現　象	調整方法
足が動かない	竹ひごを通す穴を広げる
すぐに止まってしまう	斜面の角度を増やす 竹ひごの長さを長くする
まっすぐ歩かず，すぐに左右どちらかにまわってします	腕の中央付近になるように身体の位置をずらす 左右の足の動きを同じようにする （片方の足が動きにくい場合）
足が大きく踏み出てしまう	足の間隔を広くする 竹ひごの長さを短くする 斜面の角度を小さくする 足の重心位置を変える

まっすぐ歩かず，すぐに左右どちらかにまわってしまう原因の多くは，腕の中央に身体（２本の足を合わせた胴体を身体と呼ぶ）が位置しない場合である。これは左右のロッキング振動の左側と右側の振動周期に差が生じるので，足の振り幅（歩幅）が左右で異なるためである。そこで，身体が腕の中央付近になるように位置をずらすことが対策となる。

足が大きく踏み出てしまう場合の対策として，斜面の角度が極端に大きい場合を除いては，角度を小さくすることは望ましくない。ここで，足の間隔を広くしたり，腕の長さを短くする（慣性モーメントを小さくする）ことで，振動周期を短くする対策が有効となる。

また，もう一つの対策として，足の重心位置を変更することが挙げられる。図７は足が斜面より浮

いたときの状態を示すものである。左が重心位置変更前で，右が足の先端付近にクリップをはさむことで足の重心位置を円弧の中央付近に近づける場合である。足の重心位置を円弧の中央付近に近づけることは剛体振り子において初期変位を小さくする働きと，慣性モーメントを小さくする働きになる。これは結果として歩幅を小さくし，足の振り幅が大きすぎることによる転倒を防ぐことにつながる。

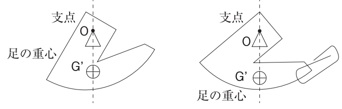


図7　足の重心位置の変更

上述のように試走・調整を繰り返して行うと，腕の長さやおもりの質量などのパラメータが機械運動に及ぼす影響を実感することができる。パラメータを変更し模型の様々な動きを確かめることによって，重心位置や慣性モーメントの働きがよく分かる。こうした試行錯誤の結果，模型は安定に歩行できるようになる。完成した模型を用いて，さらにゆっくり歩く模型や速く歩く模型などのユニックな２足歩行模型への改良を進めることができる。

また，２足歩行模型の製作・調整の過程からわかるように，厚紙を扱う中にも切断，穴あけ，折り曲げ，組み立てにおいて，正確な作業が要求され，ものづくりの基本的な知識・技能が大切である。

引用文献

山田哲也，鞍谷文保：「小・中学校におけるものづくり教材としての２足歩行模型に関する研究」，日本産業技術教育学会誌，第48巻３号pp. 207-213，2006

第6節
コンピュータによる計測・制御技術を学ぶ

担当教員
自然・生活教育学系　東原　貴志・大森　康正

講義概要：私たちは，エアコンや自動ドア，信号機など，センサで周辺の状況を計測し，コンピュータで操作を判断し命令を出す計測・制御技術が利用されている機器を利用して生活しています。本講義では，カム装置の動きの原理を学び，日常使用される機器に応用されていることを理解するとともに，カム装置を使用したおもちゃの動作を制御する電気回路とプログラムの作成方法を学び，日常生活で利用されているコンピュータによる計測・制御技術について理解することを目的とする。

〈カム装置とは〉

回転運動を直線往復運動や揺動運動に変えるときに使用されるものがカム装置である。原動節（カム）の外周の形状をさまざまに変化させることにより，従動節にいろいろな速さの複雑な運動を伝えることができることが特徴である。

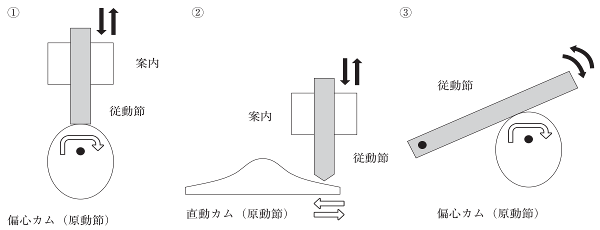


図１　いろいろなカム装置

左の図では，原動節の回転運動を従動節の直線往復運動に変換している。中の図では，原動節の直線往復運動を従動節の直線往復運動に変換している。右の図では，原動節の回転運動を従動節の揺動運動に変換している。円板を中心からずらして回転されるカム装置を偏心カムといい，その形状を変化させることにより，目的に応じた動きを従動節に伝えることができる。

〈従動節の工夫〉

カムの動きが速くなると，従動節が離れてしまうことがある。そのため，従動節をばねなどで原動節と離さないようにする，案内で挟み込み逸脱しないようにする，などの工夫が必要である。

〈カム線図〉

カムを設計するには，カムの回転に応じた従節の位置を決めれば良い。図は，カムの１回転に対する従節の関係位置を示したものである。

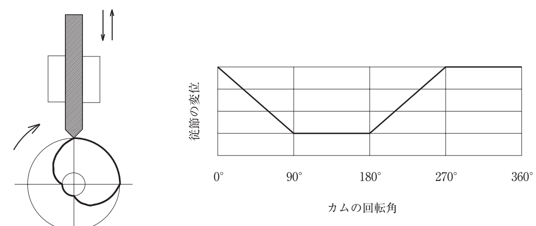


図２　カム線図

〈からくりおもちゃの製作〉

材料：シナ合板（厚さ４㎜），

道具：ボール盤，電動糸のこ盤，研磨紙

製作手順
①偏心カムを２枚けがきする
②ボール盤でそれぞれ10㎜の穴をあける
③電動糸のこ盤で切り出す
④研磨紙でみがく
⑤製作した偏心カムを本体にとりつける

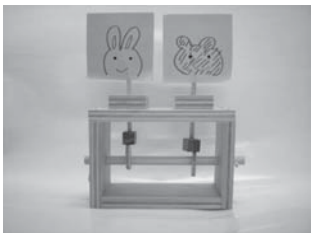
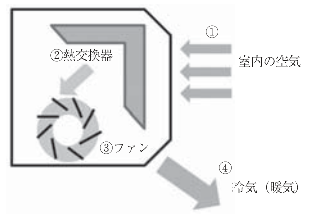


図３　からくりおもちゃ

〈コンピュータによる計測・制御とは〉

計測とは，JIS Z 8103によると「特定の目的をもって，事物を量的にとらえるための方法・手段を考究し，実施し，その結果を用い所期の目的を達成させること」であり，制御とは，JIS Z 8116によると「ある目的に適合するように，制御対象に所要の操作を加えること」であると定義されている。コンピュータによる計測・制御とは，センサが周辺の状況を計測し，その結果を基にコンピュータが判断と命令を出し，アクチュエータ（機械的な仕事を行う装置）の仕事（動作）を制御することを指す。

プログラムを使用することにより，コンピュータによる計測・制御技術によって，人間の判断や操作と比べてはるかに早く，正確に機械を動作させることができる。そのため，エアコンや自動ドア，信号機などの様々な機器にコンピュータによる計測・制御技術が利用されている。



①吸い込み口：室内の空気をエアコンに取り込む
②熱交換器：取り込んだ空気の温度を変化させる
③ファン：空気を吸い込み，吹き出すという空気の流れをつくる
④吹き出し口，ルーバー（風向きを変えるハネ）：温度を変化させた空気を出す

状況を計測 ⇨ 信号変換・伝達 ⇨ 判断・命令 ⇨ 信号変換・伝達 ⇨ 動作
センサ　インターフェイス　コンピュータ　インターフェイス　アクチュエータ

・温度センサ　　・ファンを回すモータ
・赤外線センサ　　・風向きを変えるモータ

図４　エアコンの計測・制御のしくみ

〈からくりおもちゃの動きの制御〉

からくりおもちゃに取り付けたモータの動きをコンピュータで制御することを考える。センサの値を読み取り、モータの起動・停止で動きを制御するプログラムを作成する。

作業手順

①Arduino基板とブレッドボードに，下記の回路図のようにモータ，モータドライバ，センサ，抵抗を接続する
②モータをからくりおもちゃの回転軸に取り付ける
③Arduino基板とタブレットPCをUSBケーブルで接続する
④Hachi Tileでプログラムを読み込み，コンパイルする
⑤ArduinoComでコンパイルしたプログラムをArduino基板上のマイクロコントローラに書き込むと，センサの値に応じてモータの動きが制御される

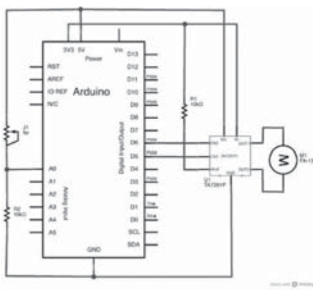


図５　回路図

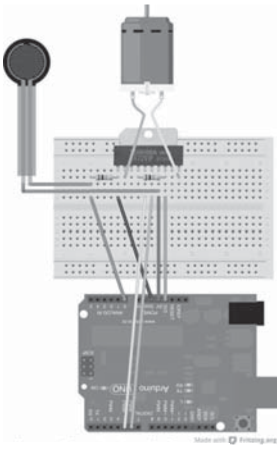


図６　ブレッドボード

〈モータを制御するプログラム例〉

```
//使用するピン
int m_in1 = 5;                  //モータドライバ in1用ポート番号
int m_in2 = 6;                  //モータドライバ in2用ポート番号
int ain = 0;                    //センサ読み込み用アナログポート番号

//変数
int ain_val;                    //センサからの値
int threshold_value = 350;      //閾値

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(m_in1, OUTPUT);
  pinMode(m_in2, OUTPUT);
}

void loop()
{
  ain_val = analogRead(ain);    //センサからの値(0--1023)
  Serial.println(ain_val);

  if (ain_val>= threshold_value ) {
    digitalWrite(m_in1, HIGH);      //正転
    digitalWrite(m_in2, LOW);       //
  }
  else {
    digitalWrite(m_in1, HIGH);      //ブレーキ
    digitalWrite(m_in2, HIGH);      //
  }
  delay(1000);
}
```


〈モータを制御するプログラムのフローチャート〉

フローチャートとは流れ図とも呼ばれる。各プロセスを楕円，長方形，菱形などの形の箱で表し，それらの箱の間を実線または矢印でつないでアルゴリズムやプロセスの流れを表す。楕円はプロセスの開始を，長方形は処理を，菱形は条件判断を示す。

順次処理とは，物事を順番に処理することで，条件繰り返しとは，物事を繰り返し処理すること，条件分岐とは，条件によって命令を変える処理を行うことである。図７に，センサが圧力を感知することにより，モータを動作させるプログラムのフローチャートを示す。

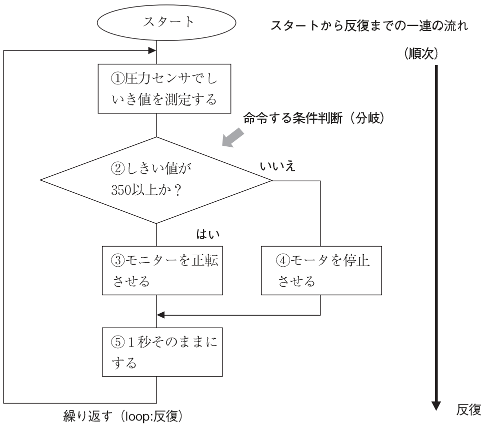


図７　モータの制御のしくみ

〈参考文献〉
技術・家庭（下）　開隆堂（1988）
技術・家庭技術分野　開隆堂（2012）
機械設計２改訂版　実教出版（1988）

第7節
植物器官の変身術

担当教員
自然・生活教育学系　谷　友和

講義概要：植物体は根・茎・葉・花の４つの器官からなるが，それらの形態は変化に富む。例えば，イモ類は茎や根が肥大したものであり，果実は花の一部が肥大したものである。本章では，身近な食材である野菜や果物の観察を通じて，(1)植物器官の特徴と形態変化を体系的に理解すること，(2)器官の機能と生化学的特性を体験的に理解することを学習目標とする。

Ⅰ．ジャガイモとサツマイモで学ぶ茎と根の変身術

作業１：双子葉植物の絵を描き，茎と主根を膨らませて書くとどうなるか？

⑴　材料の植物

1）ジャガイモ

ジャガイモ（*Solanum tuberosum*）はナス科の植物。別名，馬鈴薯。夏に紫色の花を咲かせる。デンプンやビタミンＣに富む地下の**塊茎**を食用とする。南米アンデス山脈の冷温な高地が原産地といわれる。日本では，春に種イモを植え，秋に収穫する。本来は多年草の生活史をもつ。芽や緑化したイモには有毒成分のソラニンが含まれる。

2）サツマイモ

サツマイモ（*Ipomoea batatas*）は，ヒルガオ科の植物。別名，甘藷。夏にアサガオに似た花を咲かせる。食用部分の**塊根**はデンプンやビタミンＣ，食物繊維に富む。南米の熱帯地方が原産地。春に種イモを植え，晩夏から秋にかけて収穫する。本来は多年草の生活史をもつ。

⑵　イモの役割

イモには，夏に光合成によって得られた栄養分が貯えられており，冬に地上部が枯れた後に栄養の貯蔵器官として機能する。翌春，その貯蔵養分を用いて新芽が成長を始める。地下に栄養を貯えることで，動物の食害を防いでいると考えられる。

一つのイモからは複数の芽が育つので，イモは子孫を増やすための繁殖器官でもある。イモの形成時には遺伝子の交雑が起きないので，親と同一の遺伝子を持つ子孫（クローン）が作られる。

課題：イモによる繁殖と種子による繁殖の利点と欠点を考えてみよう。

作業２：ジャガイモとサツマイモを観察して，茎の特徴と根の特徴を見つけよう。

⑶　葉序

植物の葉は茎に対して一定の規則で配列しており，その配列のしかたを**葉序**とよぶ。ジャガイモ塊茎の芽はイモの周りに螺旋（らせん）を描くように並んでおり，ある１つの芽を０番目とした時に，５番目の芽はイモをちょうど２周して720度回転した位置につく（図１）。このような配置を2/5葉序

とよぶ。2/5葉序では，芽と芽の角度はイモの中心（基部）に対して144度となる。芽が葉序を持つことはジャガイモのイモが茎であることの証拠である。

⑷　側根

双子葉植物の根は主根と側根からなる。サツマイモのイモは**主根**であり，その証拠にイモには側根の跡が残っている（図２）。主根から側根が出る位置は，植物の種類によってほぼ決まっており，通常，サツマイモでは５本の縦の列となって側根が並ぶ。


図１：ジャガイモの葉序。イモの基部を中心に144度の開度で芽がつく（芽は矢印の下方）。0番目と５番目の芽がイモを２周して重なる。


図２：サツマイモの側根の列を白点線で示す。側根の跡は５列ある。

⑸　貯蔵デンプン

イモに含まれるデンプンは，元々，葉で光合成によって作られたものである。昼間，葉の葉緑体に貯えられたデンプンは，夜になるとショ糖に加工されて全身へ輸送される。ショ糖は，イモの内部で再びデンプンとなり，結晶化してアミロプラストという色素体内に貯蔵される。この結晶をデンプン粒とよぶ。デンプン粒は，臍（さい，またはへそ）を中心とした同心円状の層構造をなす。１個のアミロプラスト内に，１個のデンプン粒しか形成されないものを単粒とよび，複数のデンプン粒が形成されるものを複粒とよぶ。ジャガイモの貯蔵デンプンは**単粒**であり（図３），サツマイモの貯蔵デンプンは**複粒**である（図４）。

実験１：ジャガイモとサツマイモの貯蔵デンプンを観察しよう。

用意するもの：ジャガイモ，サツマイモ，包丁，洗浄瓶，シャーレ，カミソリ，顕微鏡，スライドグラス，カバーグラス，ピンセット，ティッシュペーパー

手順

１）包丁でイモを５－７㎜の角切り（ブロック状）にし，水を入れたシャーレに入れる。
２）親指と人さし指でブロックをつまみ，カミソリの刃を手前に引いて薄切片を作る。
３）切り取った切片は，カミソリの刃ごとシャーレの水に浸して洗い落とす。
４）切片の余分なデンプンを洗い流したのち，ピンセットで拾い，スライドグラスに乗せる。
５）切片が乾燥しないように，水を一滴たらし，カバーグラスをかけて検鏡する。

６）デンプン粒が良く詰まっている細胞を選び，観察する。
→１個の細胞中に，何個くらいのデンプン粒が貯蔵されているか数えてみよう。

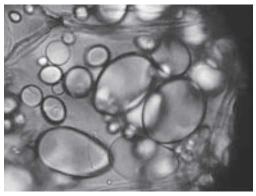


図３：ジャガイモのデンプン粒（400倍）。

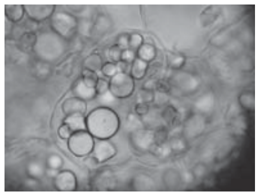


図４：サツマイモのデンプン粒（400倍）。

Ⅱ．リンゴとミカン（柑橘類）で学ぶ花から果実への変身術

⑴　材料の植物

１）リンゴ

リンゴはバラ科の落葉高木。中央アジア～西アジアの山岳寒冷地が原産。日本では明治時代に栽培種が導入され，現在の登録品種は200種弱。暑さに弱く，北日本での栽培に適する。花期は５月，果実は秋に収穫する。果実には，食物繊維やビタミンＣ，ミネラル，カリウムが豊富。

代表的な品種：つがる，千秋，紅玉，ジョナゴールド，陸奥，シナノゴールド，王林，ふじ など。

２）柑橘類

柑橘類はミカン科ミカン属の総称であり，爽やかな香りと甘酸っぱい果実が特徴。世界の温帯～熱帯にかけて栽培され，多くの種類が存在する。日本の代表格であるウンシュウミカンは，鹿児島県が原産地。ウンシュウミカンは５月に白い花を咲かせ，秋～初冬にかけて果実を収穫する。

柑橘類の例： バレンシアオレンジ，ネーブル，グレープフルーツ，レモン，ユズ，ライムなど。

⑵　花から果実へ

被子植物のめしべの基部には**子房**があり，子房は受精後に果実へと変化する（図５）。このとき，子房の外壁部（子房壁）は**果皮**を形成する。果皮は２層または３層に分化することがあり，３層の場合，外果皮・中果皮・内果皮となる。果皮が多肉質のものは果肉とよばれる。内果皮が硬化する場合，核とよばれる。果皮の内部に位置する種子は，**胚珠**が変化したものである。

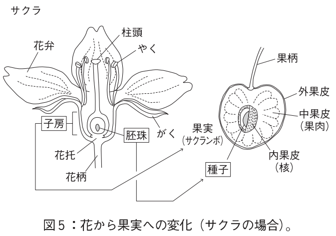


図５：花から果実への変化（サクラの場合）。

作業１：リンゴとミカンの果実を観察して花から果実への変化を考えてみよう。

⑶　リンゴとミカンの果実

１）リンゴ

リンゴの子房は花弁とおしべの付着点より下に位置し，**花托**に包まれている（図６上）。このような構造を子房下位とよぶ。リンゴでは，花托の組織が肥大し，それを食用としている。果皮以外（がく筒や花托）を食用とする果実を**偽果**（↔真果）とよび，他にナシやイチゴが該当する。

２）ミカン

ミカンの子房は，多数の**心皮**と呼ばれる単位で構成され，心皮と同数の**子房室**を持つ（図６下）。この子房室が将来，果実の房となる。果実は３層の果皮を有し，油腺をもつ外果皮，海綿状の中果皮，膜質の内果皮からなる。内果皮の内側に果汁に富んだ**毛**をもつ。

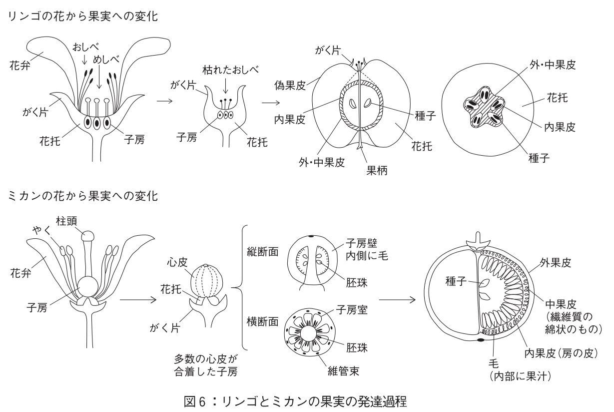


図６：リンゴとミカンの果実の発達過程

⑷　二次代謝産物

生物が生きていく上で必須の代謝物質を一次代謝産物とよび，必須ではないが，生存や繁殖に有利となる代謝物を**二次代謝産物**とよぶ。一次代謝産物には糖・タンパク質・脂質・核酸などが含まれ，二次代謝産物には，植物毒であるアルカロイドや芳香成分のテルペノイド，色素や渋味・苦味の成分であるポリフェノール類などが含まれる。

⑸　リンゴ褐変の原因

リンゴの果実には，二次代謝産物の**ポリフェノール**が含まれる。ポリフェノールは，特定の化学構造をもつ物質の総称である（例：図７(b)）。果実の切り口が酸素に触れると，**ポリフェノールオキシダーゼ**（PPO）という酸化酵素が働いて，ポリフェノールが酸化される（図７(a)；キノン体を形成）。酸化されたポリフェノールは互いに重合して褐色となる。同時に，切り口の細胞表面を硬くし，空気や光を遮断して細胞の損傷を防いだり，病原菌の侵入を防ぐ役割をもつ。

(a)

ポリフェノールオキシダーゼ

$$\text{クロロゲン酸} + 1/2\ O_2 \longrightarrow \text{クロロゲン酸キノン} + H_2O$$

(b)

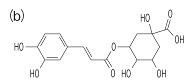


図７：リンゴに含まれるポリフェノールの一種，クロロゲン酸の酸化反応(a) とクロロゲン酸の化学構造(b)。

⑹　ポリフェノールオキシダーゼ（PPO）の性質

ポリフェノールオキシダーゼは**塩化物イオン**（Cl^-）や**ビタミンＣ**によって酵素活性が阻害される。ビタミンＣは，酸化されたポリフェノールから酸素を奪って（還元という）ポリフェノールを元の状態に戻す働きももつ。市販のリンゴジュースには，褐変を防ぐためにビタミンＣが添加してある。また，リンゴ果汁を加熱すると，熱によってPPOの酵素活性が失活する。

⑺　柑橘類の芳香成分，リモネンの性質

柑橘類の外果皮には，二次代謝産物のテルペノイドの一種，**リモネン**（オレンジオイル）が含まれる。リモネンは，発砲スチロール（ポリスチレン；記号PS）を溶かす性質がある（図８）。リモネンは，粘膜や皮膚への刺激性を有するが，毒性が低いため工作用接着剤などに使われる。

実験１：リンゴの果実に含まれるポリフェノールの性質を調べてみよう。

用意するもの：リンゴ，レモン，包丁，ミキサー，ビーカー（大・中・小），洗浄瓶，試験管，試験管立て，薬さじ，食塩，キッチンペーパー，水切りバット

手順（１班当たり）

１）レモン半個分の果汁を絞り，ビーカーに入れておく。
２）リンゴ1/4個を，芯を外して皮を残したまま，ミキサーに入れる。（１回に２班分入れる。）
３）ミキサーに水を100㎖入れ，一気に破砕する。（１回に２班分，200㎖入れる。）
４）破砕した果汁液を即座に４本の試験管に均等に注ぐ。（試験管の底から1/3～1/2程度）
５）１本の試験管には，薬さじの小さじ３杯（山盛）の食塩を入れてよく振る。もう１本の試験管には，レモン果汁の半分を注ぎ，よく振る。この作業は素早く行う。
６）10分ほど置いたのち，果汁液の色の変化を観察する。
７）何も加えていない試験管のうち１本に，残りのレモン果汁を注いで色の変化を調べる。

実験２：柑橘類の果皮に含まれるリモネンの性質を調べてみよう。

用意するもの：レモン，ナイフ，発泡スチロール

手順

1）カッターナイフや包丁を用いてレモンの果皮の表面を薄く削り取る。

2）削り取った果皮を折り曲げて力を加え，出てきた液をポリスチレン製発泡スチロール（記号PS）に塗る。

図８：レモンの皮に含まれるリモネンで溶けた発砲スチロール。

課題：果実にポリフェノールやリモネンなどの二次代謝産物が含まれることの，自然界での意味を考えてみよう。また，果実が甘いのはどうしてだろうか？

第８節

“落ちる”を科学する

担当教員
自然・生活教育学系　長谷川敦司

講義概要：物体の落下を例として，落下するときの速度，位置の変化などを定性的に捉え，なぜそのような動きをするかを論理的に考える過程を身に付ける。自然科学における数式の意味，重要性を学ぶ。事象の説明に数式を使うことにより，汎用的な説明が可能となること，一般性を持たせることが可能であることを実感する。

〈序論〉

人々の生活の中では，物が落ちるということは普通に起きている出来事である。昔，ニュートンはリンゴが落ちるのをみて，万有引力を思いついたとか，ガリレオがピサの斜塔から大きさの違う鉄球を落す実験をしたなどの落下に関する逸話が多く残っているほど，物が落下するということに注目していた人たちが多かった。

では，生卵を机の上に落とした場合を考えてみよう。机からほんの少し（２，３㎜程度）持ち上げて静かに離してみる。そうすると卵は割れない可能性が高い。しかし，机から１ｍ持ち上げて離すとどうなるだろうか。これはよほどのテクニックがあるか，机が特殊な素材でできていない限り割れてしまうだろう。この差はどこからくるのだろうか？こんな日常に起きている現象のなぜを説明していくのも自然科学である。

自然現象の“なぜ”を考えていく際には，起きている事象を論理的に考えることにより解明されることが多い。原因と結果を整理し，何が原因となる要素は何か，どこからその要因は出てくるのかを考える。すべての要因を総合的に考え合わせて，原因を推測し，どうしてこのような結果になるかを説明するための仮説を立てる。次に仮説の検証に移る。この段階では，実験を行うことに加え，数値的（定量的）に解析を行うことも重要となる。定量的な解析と実験結果を比較することにより，初めに作った仮説が正しいかどうかを検証することになる。この過程を段階を追って経験していくのが，本講義の目的である。

〈論理的思考の展開〉

自然科学は，疑問に思うことから始まる。卵の落下の場合は，「落とす位置によって卵が割れたり，割れなかったりするのはなぜだろう」ということが初めの出発点（疑問点）になる。では疑問が湧いてきたら，次にどうするだろうか。今はインターネットが発達して，知識はネット上に散らばっている。疑問に思ったことをネットで調べたら，答えが見つかるということにもなりかねない。ところがネット上ではいくつも答え“らしきもの”があるが，どれが正しいのかは自分で判断しないといけない。正しい答えを見つけたり，問題が複雑で，答えがネット上にはないような問題点を解決していくには自分で考える方法を身に付ける必要がある。

自分で考える一つの方法を以下に紹介する。まず，初めに原因と結果を明確にする。卵の落下では，原因は卵が落下するということであり，結果は割れたり，割れなかったりすることである。また，割れる条件は，高いところから落とし，割れない条件は低いところから落とすということであった。次

に原因となっている点について，関連しそうな“要素”を考えてみることである。原因そのものをずっと考えていても答えに辿りつきそうもない場合は，原因に関連していることや，条件などを考えて，いくつかの要素に分けていく。卵の問題について考えてみよう。この場合は，卵は垂直方向に動いている，卵には重さがある，机からの高さが違うなどの要素が考えられる。ここまで分解して，次のプロセスに移っていく。

次は分解した要素をそれぞれ，卵が割れるということに関して深く調べたり，考えたりする個別の検討ということになる。分解した要素の一つに卵は垂直方向に移動しているというものがあった。これを例にして考えてみよう。移動するということは，どういうことか。それは，初めにあった位置（場所）から別の位置に空間的に移るということである。ここで物体が移動するときの特徴を考えてみよう。今の例の場合は垂直方向の移動であるが，このほかにも地面と平行に移動したり，斜めに移動したりすることができる。このときの，移動の違いを考えてみよう。地面に対して水平に動く物体をイメージしてみると，たとえば，冬季オリンピックで注目されたカーリングが良い例である。カーリングのストーン（滑らせる石状のもの）は，初め速度を与えられると徐々に速度を落として，最後は止まってしまう。これは氷の上といえども摩擦という，動きを邪魔する効果があるため，どんどん速度が遅くなってしまう。では，この摩擦がなかったらどうだろうか。今度は，宇宙ステーションで野口飛行士が行った実験を思い出してみよう。結果としては，宇宙空間で物を投げると邪魔するものがないため，ずっと同じ速度で移動を続ける。速度は遅くもならず，速くもならない。何かに衝突するまで，そのままの速度で移動を続けている。

ここで，地球上での垂直方向の移動に戻ってみる。この場合は，どうなるだろうか。短い距離の落下ではわかりづらいかもしれないが，少し高いところから物体を落としてみるとわかるかもしれない。少し理詰めで考えてみよう。物体は，初め速度が０（止まっている状態）から始まる。手を離すと物体は動き出す。この時点で速度は０から有限の値（０ではない速度）になってくる。少し時間が経ったときにはどうなるだろうか。０が有限になったのだから，さらにその値が大きくなることが予想される。さらに時間が経つとどうなるだろうか。もっともっと速度が大きくなるのではないだろうか。実際に計測してみると，やはり速度は下に行くほど速くなっていることがわかった。（図１）

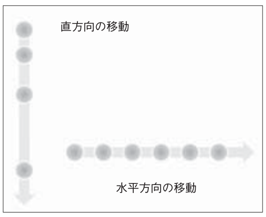


図１：水平方向と垂直方向の移動の概念図

このように，地球上で垂直方向は速度を増していくのに対して，水平方向の運動は速度が変化しないか，もしくは減速するということになる。ここで，卵の落下に戻ってみると，低いところから落ちた場合は速度の変化が小さく，高いところから落ちた場合は，大きな速度を持っていることになる。この違いが一つ目の条件である。

同様の思考過程で，落下するときの卵の重さはどのように関係してくるのか，地上に落ちたときの衝撃とはどんなことなのかを個別に考えたり，調べたりする。ここでは紙面の関係上，ほかの要素については記述しない。結果だけを述べると，高いところから落とされた卵は重力により加速され，地上に到達するときには，大きな速度を持つ。このとき，卵の持っている運動量（質量と速度を掛けた量）が大きくなる。運動量が大きなものが物体（ここでは地面）にぶつかるとそのときの衝撃は大きくなる。これに対して，低いところから落とした卵は速度が小さいため，運動量も小さく衝撃は小さ

いということになる。このため，高いところから落とした卵は割れて，低いところから落とした卵は割れない。より詳しく知りたい人や興味を持った人は，物理学（力学）を勉強してみるとよい。

ここでは，ほぼ答えを記述したが，実際には，この段階で仮説ができあがる。この仮説を検証するためには，いろいろな条件を変えながら，実験を行う必要がある。卵の実験では，落下しているときの速度の場所依存性を測定したり，速度の違うものを物体にぶつけてみて，その衝撃の違いを測定してみたりすることによって検証が可能となる。

このように実験的な結果を検証するだけではなく，数値による検証を行うことも重要である。数値による検証は，実験結果の正しさをサポートするものである。では，数値による検証とはどのように行うかを次にみていこう。

〈数値による理解〉

ここまでの議論では，定性的な説明しか行えていない。たとえば，１ｍ上から落下したときと，２㎜上からの落下では，どのくらいの差が出てくるのか。10㎝上から落下させたときはどうかなどについての議論は行えない。このようなことを考えるときには，数式が登場してくる。物理法則（落下もその一つ）を数式で表し，実験条件をその数式に代入することにより，求めたい量を計算することができる。

数式の役割として，言葉での説明を補うことや言葉では説明しづらい部分を説明できるということがある。人に何かを伝えるときは，表現を考えないといけない。多くの人が理解できる，わかりやすい表現というのは難しい。また，言葉による説明を文章として残しておいても伝わりにくいこともある。そこで，共通の言語として，数式を使って現象を説明しておくという方法を物理学では使う。数式は，定義さえ決めておけば，いつの時代でもどんな人にでも共通に伝わっていく道具である。数式の結果は一つになり，他の解はない。説明する人が替わっても伝えることのできる道具として数式は有効である。また，一つの数式を求めることにより，数多くの現象の説明が可能となることもある。ここからは、数式の有効性についてみていく。

物理には基本となる方程式とそこから派生して導かれる式の２つがある。基本となる方程式の一つが運動方程式と呼ばれるものである。これは力と質量と加速度の関係を表したものであり，

$$\vec{F} = m\vec{a}\ \text{（力＝質量×加速度）} \qquad (1)$$

である。これは物体に働いている力（Ｆ）はその物体の質量（m）と加速度（ａ）の積で表されるということである。Ｆとａの上についている矢印はベクトル量であることを表す。ベクトルとは，大きさの他に方向も表すものである。ここでは，力の働く方向に加速度も発生することを表している。

先ほどの卵の空間的な移動とこの式の関係をみてみよう。水平方向に動くときには，速度が一定であったが，加速度は速度の変化量であるため０となる。したがって，水平に移動しているときには，力はかかっていない。では，垂直方向の移動はどうであろうか。速度が０から始まっているにも関わらず，手を放してすぐに速度を持つ。この時点で速度が変化しているので，加速度は０ではなく有限の値を持つ。したがって，垂直方向では力が加わっていることになり，これが重力と呼ばれるものである。この場合の加速度は重力加速度と呼ばれ，記号 g を用いて表される。このように，運動方程式は，運動を考えるときの基本となる方程式である。

では，次にこの方程式から導かれる式についてみてみる。卵が高さＨというところから落とされて，

時間がｔだけ経ったときの速度Ｖとそのときの高さＹはどうなるかを表した式を示す。具体的な導き方は，微分，積分という数学的手法が必要となるので，ここでは省略する。興味のある人は，２年生の物理学や３年生の力学の授業を受講するように。

$$V = gt \qquad (2)$$

$$Y = -\frac{1}{2}gt^2 + H \qquad (3)$$

ここで，速度は大きさのみを表していて，方向は下向きになる。高さＹは地上を０とした時の地上からの高さになる。重力加速度 g は時間とともに変化する量ではなく，地球上ではおよそ9.8(m/s^2)という値を持つ。この(2)，(3)式は，運動方程式(1)から導くことができる。注目してもらいたいのは，この式の中に物体の質量が入っていないということである。初めの運動方程式（(1)式）には物体の質量が入っていたのに，速度と落下位置の式には質量は入っていない。ということは，物体が落下するときに，質量は関係ないということであり，ガリレオも物体の落下に実験を行って証明したと言われている。この理由については，講義で説明する。物体の落下に質量が関係ないということは，卵の場合だけではなく，地球上のあらゆる物体が落下するときに同じように動くということになる。このように，数式を使うと個別の事象ではなく，同じ状況にあるすべての事象についての説明が行えるという利点がある。

この式に数値を代入すると実際の速度が計算できる。たとえば，例に挙げた卵の場合，高さ１ｍから落としたが，空気の抵抗などのない理想的な場合に１秒後には

$$V = 9.8 \times 1 = 9.8 \ (m/s)$$
$$Y = -9.8 \times 1 \times 1 + 1 = -8.8 (m)$$

という値になる。速度は秒速9.8ｍに達し，高さはマイナスになるため，とっくに地上に到着してしまっているという結果である。当然，速度はこの値までは到達しない。では，地上に到着するのに，どのくらいの時間がかかるのだろうか。

$$0 = -9.8t^2 + 1$$
$$t^2 = \frac{1}{9.8}$$
$$t = \sqrt{\frac{1}{9.8}} \cong 0.32(s)$$

ということになり，およそ0.32秒で地上に到達するということになる。実際には，空気抵抗などもあるので，もう少し遅くなるかもしれないが，ほぼこれに近い数値で地上に落下する。同様に地上に到達したときの速度を求めてみると

$$V = 9.8 \times 0.32 \cong 3.14 (m/s)$$

となり，およそ毎秒3.14mの速度となる。時速にすると11.3kmになる。

卵の例に戻ってみると，１ｍからの落下についての速度を計算したので，２mmの場合を同様に計算し

てみると

$$0 = -9.8t^2 + 0.002$$
$$t \cong 0.014(s)$$
$$V = 9.8 \times 0.014 \cong 0.14 (m/s)$$

となり，１ｍから落としたときの速度は，２mmから落としたときの約22倍にもなっていることがわかる。(2)と(3)式を使うと落下の途中のあらゆる時間の速度と位置が予測できることになる。

このように，数式を使うことにより，“卵”という特定の物体についてだけではなく，地球上で落下するあらゆる物体の動きがわかる。さらにいうと，重力加速度の値を変えることにより，月面での動きなども予測することができる。月面では，空気もないため，より理想的な動きになることが予想される。

最後に数式に使う文字について考えてみる。文字には二種類あり，一つは時間の変化や空間の変化などに伴って変化する量（変数）を表す文字がある。これは一定の値を持つことがなく，与えられた条件によって決まる量であるから，一般性を持たせて文字にしている。この例が式(2)，(3)の中のｔ，Ｖ，Ｙなどである。ある時間ｔでの，速度，高さを表しているのが，ＶとＹであるので，ｔの値を決めることにより，ＶとＹが決まるということになる。このようにｔを決めるとＶとＹが決まるような関係のとき，ｔを独立変数，ＶやＹを従属変数という。

もう一つは，重力加速度 g や(1)式の運動方程式のａなどであり，他の変数に依存しない独立したものである。これらは時間には依存しないが，他の条件によって変わってくる可能性がある。g はおよそ9.8(m/s^2)としてあるのは，この値は地球上のどこで測定するかによって変化する量であるからである。一般的に，赤道に近いところと北極や南極のように極に近いところでは，赤道に近いところの方が値は小さくなる。これは地球が自転しているため，外向きに働く遠心力が発生しているためである。赤道に近い場所では，遠心力が大きくなるため，重力加速度は小さくなる。ちなみに日本の国土内でも重力加速度は違いが出て，北海道の稚内では約9.81(m/s^2)であるのに対して，沖縄県の西表島では9.79(m/s^2)と計測されている。（平成22年理科年表より）また，加速度ａについては，このままでは使えない。物理学では，加速度ａを微分形式という形で取り扱い，方程式を解くことによって，位置や速度を決めるために使う。簡単のため，高校までは定数としてａ(acceleration）としてある。

このように数式に使う文字に直接数字を入れないことにより，一般性を持たせ，いろいろな条件で使えるようにして，多様な現象の説明ができるようにしている。

ここまでみてきたように，論理的に考え，仮説を立て，実験と数値計算による検証を行った結果，仮説の通りの結果になれば，その仮説は正解である確率が高い。もし，結果が仮説と異なっていれば，再度，各項目の検討に間違いはなかったか，見落としという項目はないかなどに戻って再検討して，仮説を立てなおして検証するというプロセスを行い，最終的な解明にたどり着く。

本講義では，物が落下するということを，定性的，定量的に考えていく。定性的には，ガリレオが作ったとされている斜面の実験装置のレプリカ（図２）を使って測定や講義を行う。垂直に物体が落下するのは，非常に速い時間で終わってしまうため，種々の計測には適していない。そのため，斜面

を転がる球の動きを測定することによって，落下という現象を解析しようと考案されたのが，図のような装置であった。これを使って，斜面を転がる球の動きについて実験と講義を行う。

また，定量的な測定のために，現代風に光センサーという測定素子を使った形にアレンジした斜面の実験装置（図３）を使って講義を進めていく。本講義では，数式も使って説明を行う予定であるが，数式の導出過程には言及せず，得られる式を使って現象を説明していく。

図２：ガリレオの斜面実験レプリカ模型

図３：斜面運動実験装置

第9節

減衰する光と力

担当教員
自然・生活教育学系　長谷川敦司

講義概要：光源から発する光は観測する位置によって強度が変化する。遠くなればなるほど急速に光の強度は減衰していく。同様に２つの物体の間に働く力の強さも距離に依存して変化する。このどちらも同じ距離の２乗に反比例して減衰するという特徴をもつ。しかしながら，光の強度の減衰の理由と力の減衰では理由が異なる。本講義では，第８節と同様に自然現象を関数という観点から考えてみる。

〈序論〉

真っ暗な森の中に小さく光る点があったとしよう。その点まではかなり遠いようである。その点に向かって歩いていくと光はどんどん強くなっていく。さらに近づくと，ランタンのような物がぶら下がっていることがわかった。この光のすぐ傍に行くと持っていた地図を見たり，本を読んだりもできるくらいの明るさになる。ところが，遠くにいるときには，点として認識できても地図を見ることはできない。地図をみるためには，非常に近くまで行かないといけないことは経験上理解できると思う。では，なぜ，こんなことになるのだろうか。これと同じようなことは宇宙でも起こっている。太陽系の惑星は，太陽に近いほど暑く，遠くなるほど寒くなる傾向がある。これは太陽から届く光の強さに関係している。遠い惑星ほど光が弱く，近い惑星ほど光が強いことも影響している。もっとも，これ以外の原因もあるが，大きな原因の一つとして光の強さがあるということである。

これと同じようなことが２つの物体に働く力についてもいえる。一つの例として，磁石を同じ極同士，もしくは違う極で向い合せると，遠くではあまり力を感じないが，近づけると急に力が強くなったように感じる。これも光と同じで，急に変化が起きる。

では，この変化はどのような法則に従っているのであろうか。このテーマを実験しながら深めていくのが本講義の目的である。

〈光の減衰〉

光は光源と呼ばれる光を発する物がないと発生しない。光源には，いろいろな種類のものがある。たとえば，小学校などで使っている豆電球も光源の一つである。懐中電灯もレーザーポインターに使われているレーザーなども光源である。ところが，この豆電球と懐中電灯やレーザーとは大きな違いがある。光の減衰の仕方が，この両者では違う。実は豆電球は太陽と同じで，一点から四方八方に放射状に光を発しているのに対して，懐中電灯やレーザーは一定方向に光を出すことができるからである。懐中電灯の中には，豆電球が入っていて，それをパラボラという形をした反射鏡で光を一定方向に出しているため，放射状に広がらない。レーザーは元々，一定方向に光が出るように作られている。今回は豆電球の光の広がり方についてみていく。

図１に実験する装置を示す。図の黒いボックスの中には水銀灯という強い光を発生させる電球が入っている。光は小さな穴を通って出てくるが，この光の強度を数値で測定する物として，右側の銀の箱がある。電球からの距離を長くしていくと光の強度は減少していくが，距離と光の強度の関係について測定してみる。どんな関数になっているかは，授業の中で体験してもらう。

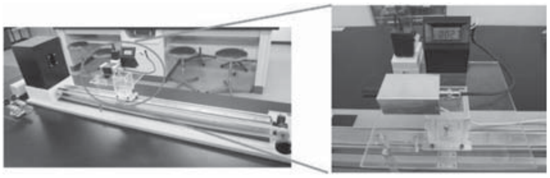


図1：光の減衰を測定する装置

次に銀色の箱の部分（図１の右のもの）をスクリーンに交換して，黒いボックスの前に多数の穴の開いた板を置いてみる。（図２）そうすると穴の形がスクリーンに映る。この穴の大きさは，スクリーンと黒いボックスの距離を離していくとどうなるだろうか。これも実際に授業で実験してみる。

実はこの穴の大きさの変化と光の強度が減衰していくことには深い関連があるが，その理由は授業を通して理解してもらう。

図２：光の減衰する法則を説明するための実験を行う装置

〈力の減衰〉

次に同じ装置を使って，２つの物体の間に働く力の大きさについて実験してみる。力にはいろいろな物があるが，今回は磁石に働く力の大きさを測ってみる。片方に大きな磁石を固定して，もう片方に小さな磁石とそこに働く力の大きさを測定する装置が固定されているものを使う。（図３）この結果はどうなるであろう。実験してみるとわかるが，光の強度の変化と同じ振る舞いをすることがわかる。

図３：２つの物体に働く力の減衰を測定する装置

このように光の減衰と力の減衰は同じような振る舞いをする。しかしながら，光の減衰については理由が説明できるが，力の減衰については現在の物理学では理由が説明できない。同じような減衰で，同じような法則に従っているのに，その理由が異なるのが面白い。自然科学には，理由を説明できる現象と理由を説明するための基本となる法則の両方があるということである。まだまだ，解明されていない自然現象も多い。

第１０節

地震災害に備える

担当教員
人文・社会教育学系　**山縣耕太郎**

【要約】

変動帯に位置する日本列島で生活する私たちは，地震や火山噴火などの災害と折り合って暮らしていかなければならない。そのために，まず必要なのは，災害や，災害を引き起こす現象について，よく知るということである。地震災害は，主に地震動（揺れ）によって引き起こされる。しかし，それぞれの地震災害によって，災害の様相は異なる。これは，地震災害の表出過程に，地域の自然的および人文・社会的条件が作用しているからである。災害を知るということは，地域を知るということにつながる。本講義では，とくに地震災害について，その特徴と，地震災害について知っておくべきことについて説明し，防災教育の重要性についても考える。

１．はじめに

2011年３月11日14時46分，日本海溝に沿ったプレート境界断層が，宮古沖から銚子沖までの約500㎞の長さにわたって活動し，Mw9.0という日本の観測史上最大規模の地震を発生させた。この地震では，死者15,879人，行方不明者2,700人という甚大な被害を生じている（警察庁広報資料，平成25年１月９日現在)。死者行方不明者の分布は，沿岸部の市町村に集中していて，被害の大部分は津波によるものであることがわかる（図１)。震災の直接的な被害額は，約17兆円と推定されており，これは日本の国家予算の20％に匹敵する（田中，2012)。今回の震災の特徴は，非常に大規模な地震によって巨大な津波が発生して甚大な被害をもたらしたことと，地震の影響範囲が東北日本から関東を含むきわめて広域に広がり，その結果，多様な災害の様相を呈することになったことである。さらに，福島第一原子力発電所の事故が同時に発生し，被害を複雑化し深刻にした。

震災の際，「想定外」という言葉が良く使われた。例えば，岩手県宮古市田老地区にあった全国最大規模の防潮堤は，1933年にこの地区を襲った昭和三陸津波の後に建設され，海寄りと内寄りの２重構造を持ち，高さ約10ｍ，総延長2.4㎞という大規模なものであった。しかし，今回の津波は，この２重の防潮堤を乗り越えて，海寄りの堤防を大きく破壊した。この堤防は，明治，昭和など，これまでにこの地域が経験した大津波を想定してつくられたものであった。しかし，今回の津波は「想定外」の大津波であったため，防潮堤では防ぐことができなかったとされている。（朝日新聞2011.3.20)

２．災害を想定する

はたして，想定外とは何だろうか？東日本大震災の場合には，日本海溝において，プレート境界が，500㎞を超える範囲で最大50ｍずれ動き，垂直方向に最大５ｍの変位を生じた。これほどの規模の地震が，日本海溝で生じるという可能性については，これまで想定されていなかった。しかし，仙台平野や石巻平野における地質調査によって，2011年津波に匹敵する規模で内陸まで津波が侵入した事件が，約1000年前（貞観11年）に生じていたことが，最近，明らかになりつつあった。ところが，その研究成果は，防災対策に生かされるまでにはいたっていなかった。

図１　岩手県，宮城県，福島県における各市町村の死者行方不明者数

（消防庁災害対策本部発表資料，平成23年8月25日をもとに作成）

このように，想定外とされたものの中には，現時点における科学の限界から想定することができなかったものから，事実は明らかになっていたが，想定に組み入れるまでにはいたっていなかった事柄があるようである。

災害による被害を想定するということでは，将来起こりうる災害の影響範囲を地図化したものが，ハザードマップであり，災害対策に役立てられている。しかし，東日本大震災における津波の浸水域は，特に仙台や石巻などの平野部において，ハザードマップの予想浸水域を大幅に超えたものとなった（図２)。このため，ハザードマップの存在意義が問われる事態にまでなってしまった。では，ハザードマップのどこに問題があったのであろうか？

ハザードマップを含めて，将来起こりうる災害を予測する場合に基礎となるのは，過去の災害事例である。過去の災害事例に関する情報をもとに，科学的な検討が行われ，将来の災害について想定がつくられる。しかし，多くの場合，過去の災害に関する情報は，その多くが失われていて不完全である。また，人類は，自然現象を完全に理解しているわけではない。だからこそ，失われた情報を補う科学の役割が重要となる。しかし，科学にも限界がある。こうした想定には，常に不確実性が伴うことを認識しておく必要がある。ハザードマップも，その不確実性を認識したうえで災害対策や避難の際の目安に使用すれば，有用性は極めて高い。

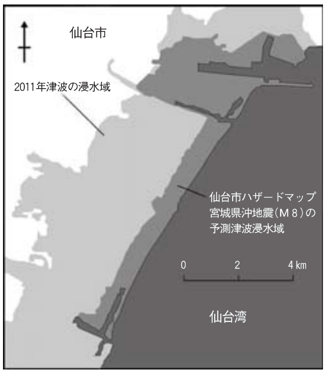


図２　仙台市における2011年津波の浸水域と，仙台市のハザードマップによる予想浸水域
（中央防災会議，2011）

３．災害と地域条件

大規模な災害は，それぞれが独自の様相を呈する。最近起こった主な地震災害の中でも，都市で発生し，火災によって多くの死傷者を出した1995年の阪神・淡路大震災，中山間地で発生し，斜面災害が多発した2004年中越地震災害，そして非常に広域で多様な被害を発生させ，特に津波による被害が大きかった東日本大震災と，それぞれ特徴は異なる。こうした災害の特徴は，それぞれの地域の地域特性と強く結びついていると考えられる。それぞれの地域に存在する地震現象を含む自然的特性と，人文・社会的特性が，相互に作用して，それぞれの地震災害を形作ったといえるであろう。

例えば，中越地震災害に関わる，中越地域の自然的特性としては，中越地震の強い揺れと長期間継続した余震活動，それによって引き起こされた甚大な斜面災害や建物被害，さらには斜面災害に影響を及ぼした不安定な地形，軟弱な地質，先行する降雨，そして多雪という気候環境などが挙げられる。こうした中越地域の自然的な特性は，地震発生以前から人々の生活と強く結びついてきた。特に急峻で不安定な丘陵地形と，多雪という気候環境は，中越地域の重要な自然的特徴であり，人々の生活に大きな影響を与えてきた。

中越地震の被災地域の大部分は，丘陵地で占められている。丘陵地では，平坦地が少ないため，斜面に棚田をつくって稲作がおこなわれてきた。錦鯉の生産で有名な山古志村や小千谷市では，斜面に多数の養鯉池がつくられている。こうした棚田や養鯉池は，地域の重要な生産基盤となっているが，今回の地震で大きな被害を受けた。また丘陵地では，多くの集落や農地が，地滑りのつくった緩斜面の上に立地しているため，丘陵の中に小規模な集落が点在して分布している。このため，地震時には，61の集落が孤立してしまった。分散した集落や農地への被害を，今後どのように復旧していくかは，大きな問題である。

被災地周辺は，新潟県の中でも積雪量の多い地域である。市町村別の積雪データ（図３）を見てみると，最大積雪深については，長岡市では１ｍ前後だが，南部では２ｍ以上，山古志村では３ｍを超える。積雪日数についても，全域で80日以上を示し，山古志村では128日と，一年の約３分の１の期間，雪に覆われている。このため，どうしても復旧作業が遅れてしまう。2004〜2005年の冬は，19年ぶりの豪雪になった。豪雪のため，地震時には半壊程度であった建物が倒壊してしまう被害が生じている。また，中越地域の多くの市町村で除雪費が底をつき，国からの援助をうけるという事態になった。

こうした，中山間地，豪雪地帯という不利な地域において生じている社会現象が，人口減少と高齢化である。最近40年間において，この地域で人口が増えているのは長岡市だけで，ほかはみな減少している（図４）。特に中山間地の減少率はおおきく，山古志村では，最近40年間で人口が半分以下になった。

高齢化についても事態は深刻で，被災地の中山間地は，新潟県や全国の平均値より大幅に高い老年人口比率を示している。特に山古志村は34.6％という高い値になっている。こうした状況の中でおこった中越地震では，死者46名のうち高齢者の占める割合が54％になってしまった。また，人口が減少し，高齢化がすすんだ地域では，復興過程にも様々な問題が生じると予想される。今後，震災後に人口減少，高齢化がますます加速する危惧もある。

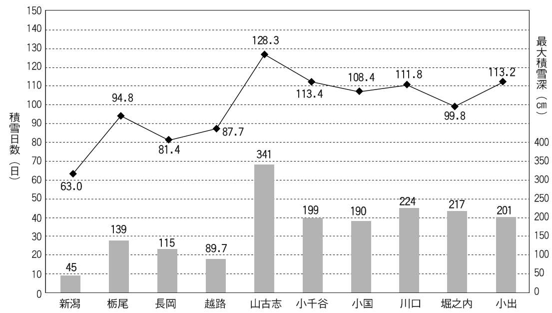


図３　中越地域の積雪環境１（山縣，2004）
新潟県降雪及び気温観測30年報（新潟県，1999）より作成。

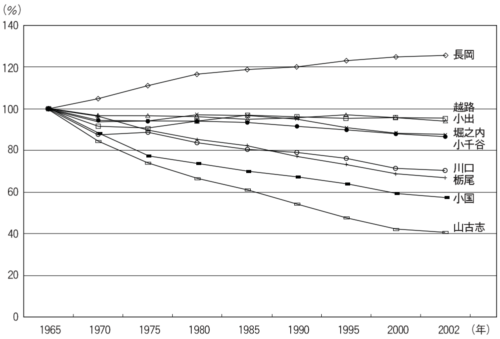


図４　被災地域における最近40年間の人口変化（1965年を100としたときの値）
第114回新潟県統計年鑑（新潟県，2002年）より作成。

豪雪地帯の中山間地の重要な人文・社会的特性として，コミュニティーの結びつきが強いということがあげられるであろう。豪雪地の中山間地は，都市から離れ，集落が分散し，かつ人口減少や高齢化が進んでいる。こうした地域では，農村のコミュニティーによって，冠婚葬祭や農作業，そして雪対策において助け合いがおこなわれ，密接な関係がつくられていると考えられる。実際に，コミュニティーメンバーの状況がお互いによく把握されていたため，地震時の避難がスムーズにおこなわれたり，避難後の精神的ストレスが，コミュニティー内の助け合いで緩和されたりということがあったようである。また，いったん別のところへ避難した人達が，そこでの生活に耐えられず，隣近所の人がいる仮設住宅に改めて入居を希望したという例も多いという。

図５は，これまでに示した中越地震被災地域における自然的特性および，人文・社会的特性と中越地震の関係をまとめたものである。このように，地域に存在する様々な要素が地震と結びつき，中越地震災害という複雑なシステムを構成していると見ることができる。こうした関係をよく理解するためには，自然と人文・社会の両方を俯瞰して見ることの出来る地理的な視点が重要であろう。また，こうした関係の理解は，今後の中越地域における復旧・復興過程においても有効であろうし，他の地域において災害対策を立てる上でも参考になるのではないだろうか。

４．おわりに

三陸海岸地域には，莫大な費用を投じて建設された大規模な防潮堤が存在していた。こうした堤防が低地の学校を守るはずであった。しかし，多くの場所で，防潮堤は町を守ることができなかった。無残に破壊された防潮堤を見ると，人為的な構造物によって災害を防ぐことの限界を感じる。今後，警報システムや避難訓練，ハザードマップなど，ソフト面での防災対策に，より力が注がれるべきであろう。防災教育も極めて重要である。

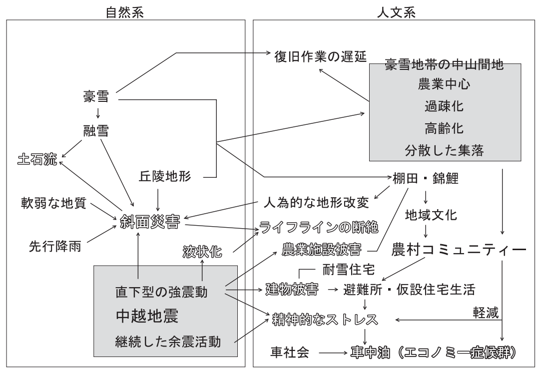


図５　中越地域における自然および人文・社会特性と中越地震との関係（山縣，2004）

地震の際，岩手県釜石市の釜石東中学校や，宮城県気仙沼市の向洋高校では，生徒たちが，独自の判断で避難を決め，周辺の小中学生を連れながら高台に避難して難を免れた。こうした事例を見ても，マニュアル通りに行動するだけではなく，予想以上の災害が起こった際には，それを察知して，自ら判断して行動する力が必要とされていることがわかる。そのためにも，災害のメカニズムや地域性をふまえた防災教育が必要であろう。

中央防災会議：「東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会報告　参考図表集」83，2011，中央防災会議
田中秀幸：「東日本大震災の経済的側面　−経済構造変化と財政難の日本を背景に」，佐竹健治・堀宗朗編「東日本大震災の科学」，155-188，2012，東京大学出版会
新潟県総合政策部統計課：「新潟県統計年鑑第114回」，537，2003，新潟県
山縣耕太郎：「新潟県中越地震と地域特性」，地理，50-6，36-47，2005，古今書院

第11節

ヒトは2足歩行となってスーパーカーに進化した！

担当教員
芸術・体育教育学系　池川　茂樹

【要約】
ヒトは２足歩行というユニークな特徴を持ったことにより，他の４足動物に比べて血圧維持の点で不利となった。それを補うために，ヒトは血圧調節機構を高度に発達させてきた。この血圧調節機構の発達は，ヒトの運動パフォーマンスを高めるという結果をもたらした。本章では，他の動物に比べて，ヒトの運動パフォーマンスがいかに優れているかについて紹介する。

１．はじめに

ヒトは500万年前にサルから進化したと言われている。この時，ヒトは２足歩行という，他の動物には見られないユニークな能力を獲得した。この２足歩行のお陰で，ヒトは，脳を大きく発達させることが可能となり，他の動物を凌ぐ知能を身につけた。また，手を自由に使うことができるようになり，多種多様な道具の作成・使用が可能となった。

しかし，２足歩行がヒトに与える影響は，必ずしも良いものばかりであるとは言い難い。２足歩行が不利となる点の１つに，血圧の維持が挙げられる。４足歩行の動物の場合，血液の約70％が心臓よりも上に存在するため，血液は容易に心臓に戻される（図１右側）。その結果，全身の血管に血液を安定供給することができ，血圧は維持されやすい。一方，２足歩行であるヒトでは，血液の約70％が心臓より下に貯留されてしまう（図１左側）。液体である血液は，自力で下から上に遡ることができないため，血液を心臓に戻すことが難しく，血圧の維持は困難となる。例えば，「立ちくらみ」という現象があるが，これは，急に立ち上がることで，一時的に血圧を維持できなくなった場合に起こる，起立性低血圧という症状である。そこで，ヒトは２足歩行になってから，血圧調節機構を高度に発達させてきた。

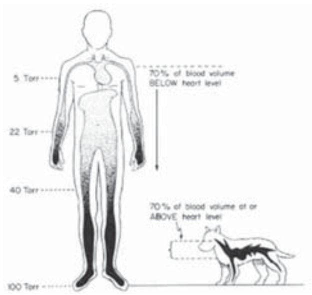


図１．ヒトとイヌの血流分布の比較

４足歩行であるイヌの場合，血液の約70％が心臓より上に位置している。一方，２足歩行であるヒトの場合には，血液の約70％が心臓より下側に貯留してしまう。このため，ヒトは血圧維持の点で，他の動物よりも不利となっている。（文献[1]より）

２．ヒトの血圧調節機構

ヒトには様々な血圧調節機構が存在するが，最も重要な役割を担っているのが血圧反射である。血圧の変動は圧受容器で常にモニターされており，この情報を用いて，血圧は調節されている。圧受容器には，10mmHg前後の血圧変化を感知する高圧系の圧受容器と，２mmHg程度の小さな血圧変化を感知する低圧系の圧受容器の２種類が存在する。

①　高圧系圧受容器の役割

高圧系圧受容器は，心臓から血液が拍出される先である，大動脈や頚動脈に存在している。図２は高圧系圧受容器の血圧調節機構を示したものである。高圧系圧受容器は，伸展の度合いにより，動脈圧をモニターしており，この情報を延髄の心臓血管中枢に伝える。心臓血管中枢ではこの情報に基づいて，交感神経・副交感神経を介して心臓に働きかけ，心拍数を制御する。また，交感神経を介して末梢血管に働きかけ，末梢血管の太さを調節する。このような仕組みにより，高圧系圧受容器は血圧の調節を行っている（フィードバック調節）。

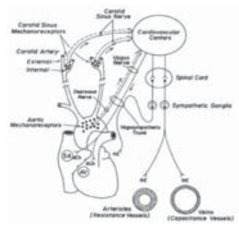


図２．高圧系圧受容器による血圧調節

NE，ノルエピネフリン；Ach，アセチルコリン；SA，洞房結節；AV，房室結節．血圧の変化は頚動脈および大動脈の高圧系圧受容器で常にモニターされ，その情報は延髄の循環中枢に伝えられる．そして，循環中枢では，この情報に基づいて，交感神経，副交感神経を介して心臓に働き，また交感神経を介して，末梢血管に働き，フィードバック的に血圧を維持している．（文献[2]より）

②　低圧系圧受容器の役割[文献3]

低圧系圧受容器は，心臓に戻ってきた血液を受け入れる場所である，心房に存在している。この圧受容器は，血圧そのものをモニターしていると言うよりも，むしろ心臓に戻ってくる血液の量をモニターしていると言える。図３は，低圧系圧受容器の血圧調節機構を示したものである。低圧系圧受容器は，伸展の度合いにより心臓に戻ってくる血液量をモニターする。心臓に戻ってきた血液量とは，すなわち，次の鼓動で心臓から拍出される血液の量とも言い換えられる。つまり，この情報を受け取った心臓血管中枢は，この情報に基づいて，末梢血管を適切な太さに調節することができる。このような仕組みにより，低圧系圧受容器は血圧の調節を行っている（フィードフォワード調節）。この血圧反射に関しては，ヒトにおいてのみ確認されており，他の動物には存在しないと考えられている。

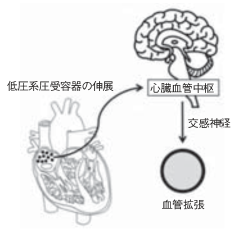


図３．低圧系圧受容器による血圧調節

静脈から心臓へ戻ってくる血液量の変化は，心房に分布する低圧系圧受容器で常にモニターされ，その情報は延髄の循環中枢に伝えられる。そして，循環中枢では，この情報に基づいて，末梢血管の太さを調節して，フィードフォワード的に血圧を維持している。

３．優れた血圧調節機構は，ヒトをスーパーカーに進化させた！

上記のようにヒトは，優れた血圧調節機構を発達させてきた。しかし，これは，血圧調節のみならず，運動パフォーマンスを高めることにも繋がった。

①　ヒトが獲得した能力：「高性能エンジン」

ヒトを含めた全ての動物は，運動時，心拍数を増加させることで血圧を上昇させる。これは，著しくエネルギー消費が増加する活動筋に対して血流量を増加させ，酸素や栄養分を供給するためである。

表１．様々な動物の安静時心拍数および運動時の最大心拍数の比較

動物名	心拍数（拍／分）安静時	－	最高値	参考文献
ヒト（一般人）	55	－	195	文献[4]
ヒト（アスリート）	30	－	190	文献[4]
マウス	563	－	796	文献[5]
ビーグル犬	135	－	283	文献[6]
サラブレッド	45	－	208	文献[7]

表１は，様々な動物の安静時の心拍数および，運動時の最大心拍数を比較したものである。４足動物の場合，最大心拍数は安静時心拍数の約1.5倍（マウス），約２倍（ビーグル犬）にまで上昇することがわかる。一方，ヒト（一般人）の場合，最大心拍数は安静時心拍数の約３倍，アスリートになると，安静時の約６倍にまで上昇する。これは，非常に走る能力が高いサラブレッドの能力と同等，またはそれ以上に匹敵する。その結果，ヒトは運動時，筋の血流量を安静時の20－40倍にまで増加させることができる（図４）。このようにヒトは，運動時に心拍数を増加させて，活動筋の血流量を増加させる能力に優れている。つまり，ヒトは，他の動物に比べて，「高性能のエンジン」を搭載していると言える。

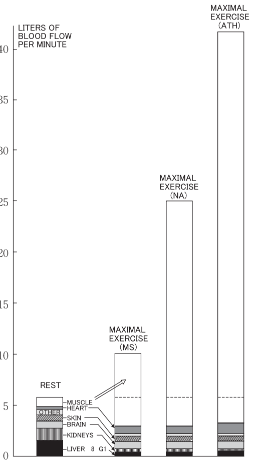


図４．安静時と運動時の心拍出量と血流の分布

MS，僧帽弁狭窄患者群；NA，通常の非運動鍛錬者群；ATH，高い運動鍛錬者群．全ての群で運動時に筋血流量が著しく上昇するが，その上昇度は最大心拍出量の程度に依存する。一方，運動時の筋肉以外の血流量は心臓を除き，３群でほぼ等しい。（文献[3]より）

②　ヒトが獲得した能力：「優れたラジエーター機能」

ヒトを含む全ての動物では，運動時，活動筋から大量の熱が産生され，体温が上昇する。酷使した自動車やバイクの温度が上昇して，オーバーヒートするように，動物でも過度に体温が上昇すると，熱中症を引き起こし，運動の継続が困難となる。そこで動物は，様々な方法を用いて，体内に蓄積した熱を体外に放散している。その１つに，血流を利用して熱を放散する方法がある。

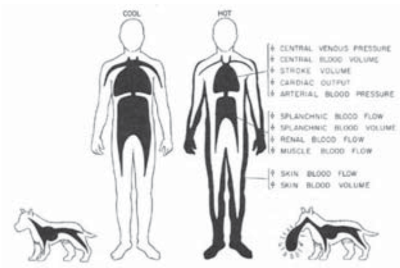


図５．ヒトとイヌの血流を利用した体温調節戦略の違い

イヌの場合，舌の血流を増加させることで，舌から熱を放散させる。一方，ヒトの場合，皮膚血管を拡張させることで皮膚表面の血流を増加させ，全身から熱散を行う。（文献[8]より）

図５は，ヒトおよびイヌの，血流を利用した熱放散戦略について示したものである。イヌの場合，体温が上昇すると，舌に血流を集中させることで，舌から熱放散を行う。一方，ヒトの場合，皮膚血管を拡張させることで皮膚表面に血流を集中させ，全身から熱を放散することができる。例えば，中枢の温度が39℃まで上昇した場合，ヒトの皮膚血流量は，全身を流れる血流量の60％以上にまで達する（図６）。これほど大量の血液を熱放散のために利用しても血圧が維持されるのは，ヒトの血圧調節機構が非常に優れているためである。つまり，ヒトは発達した血圧調節機構のお陰で，「優れたラジエーター機能」を手に入れたと言える。

この「優れたラジエーター機能」のお陰で，ヒトは，他の動物が活動できない程の暑熱環境下においても，体温が一定に保たれ，活動することができるのである（図７）。

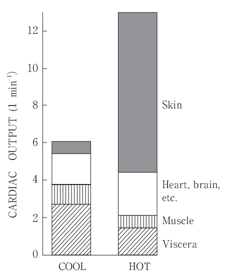


図６．寒冷時および暑熱時のヒトの心拍出量と血流の分布

寒冷時に比べて暑熱時には，ヒトは心拍出量を増加させる。それにより増加した血流の多くは，皮膚血流（黒塗り部分）に割かれる。例えば中枢温が39℃（右）の場合，皮膚血流は全血流量の60％を超える。（文献[8]より）

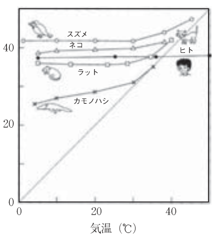


図7．様々な恒温動物の体温調節能

多くの恒温動物は，寒冷時の体温調節に優れるが，暑熱環境における体温の維持を苦手とする。一方，ヒトは，暑熱環境下においても，高い体温調節能を発揮する。（文献[9]より）

4．まとめ

ヒトは2足歩行というユニークな特徴を持ったことにより，高度な血圧調節機構を持つに至った。この血圧調節機構の発達は，ヒトに，活動筋に充分な血液を送ることができる「高性能エンジン」や，過度の体温上昇を防ぐ「優れたラジエーター機能」を付与することとなり，ヒトを「スーパーカー」に進化させた。

我々は，「スーパーカー」のように優れた運動パフォーマンスを発揮できる身体を持って生まれてきたのだから，みなさんも是非，積極的に運動する機会を作ってみてはどうだろうか。

文献

1．Rowell LB. Ajustments to upright posture and blood loss. In: Human Circulation Regulation During Physical Stress. Oxford University Press, New York, 1986.
2．Shepherd JT & Vanhoutte PM. Neurohumoral regulation. In: The Human Cardiovascular System: Facts and Concepts. Raven Press, New York, 1979.
3．上條義一郎，池川茂樹，能勢博．運動トレーニングによる暑熱馴化メカニズム：能動性皮膚血管拡張神経の役割．体力科学 61(3)，279-288，2012．
4．Rowell LB. Circulatory ajustments to dynamic exercise. In: Human Circulation Regulation During Physical Stress. Oxford University Press, New York, NY, 1986.
5．Desai KH, Schauble E, Luo W, Kranias E, Bernstein D. Phospholamban deficiency does not compromise exercise capacity. Am J Physiol 276(4 Pt 2), H1172-1177, 1999.
6．Haidet GC. Dynamic exercise in senescent beagles: oxgen consumption and hemodynamic responses. Am J Physiol 257 (5 Pt 2), H1428-1437, 1989.
7．Hackett RP, Ducharme NG, Gleed RD, Mitchell L, Soderholm LV, Erickson BK, Erb HN. Do Thoroughbred and Standardbred hourses have similar increases in pulmonary vascular pressures during exertion? Can J Vet Res 67(4), 291-296, 2003.
8．Rowell LB. Thermal stress. In: Human Circulation Regulation During Physical Stress. Oxford University Press, New York, 1986.
9．彼末一之．体温の調節－「熱き」血潮も沸騰しない．In：生理学はじめの一歩．メディカ出版，1999.

第12節

身の回りの酵素

担当教員
自然・生活教育学系　光永伸一郎

【要約】
酵素（enzyme）とは，生体内でつくられる触媒（catalyst）である。触媒とは，それ自身変化することなく化学反応の速度を調節する物質のことである。また，酵素が作用する物質のことを基質（substrate）という。酵素（触媒）なしでは，生体内の化学反応（生化学反応）はまったくといっていいほど進行しない。

ここでは，中学校及び高等学校の理科で学習した酵素についての知識を，実験・観察を通してより学術的なものにするとともに，日頃の暮らしと酵素の関わり合いについての理解を深める。

1　ご飯を食べるとどうなるのか？

日本人の主食であるご飯（米飯）の主成分は炭水化物（糖質，carbohydrate）であり，そのほとんどを占めるのがデンプン（starch）である。ご飯を食べると，デンプンは唾液腺（salivary gland）と膵臓（pancreas）から分泌されるアミラーゼ（amylase）という酵素によって消化され，グルコース（ブドウ糖，glucose）になる（図1）。ヒト・アミラーゼの場合，その基質はデンプン（糊化デンプン）ということになる（中村ら1986）。

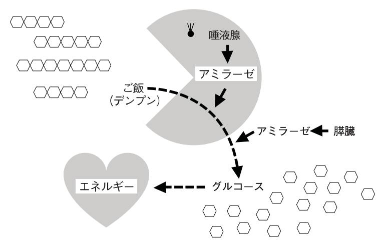


図1　ヒト・アミラーゼによるご飯（デンプン）の消化

グルコースは腸管から小腸上皮細胞を経て血液中に吸収され血糖（blood sugar，blood glucose）となり，エネルギー，すなわちATP（adenosine triphosphate）を必要としている各細胞組織へと送り届けられる。細胞内に取り込まれたグルコースは解糖系（glycolytic pathway），クエン酸回路（citric acid cycle），及び電子伝達系（electron transport system）を経て水と二酸化炭素に代謝されるが，この過程においてATPが産生される（奥と柴田2012）。

とりわけ脳細胞においては，（脂肪やタンパク質ではなく）グルコースが唯一のエネルギー源であることから，その栄養学的意義，特に炭水化物中心の朝食を摂ることの重要性についても自ずと理解することができよう（香川2007）。

唾液中のアミラーゼ活性は市販の酵素分析装置（ニプロ社，唾液アミラーゼモニター）で容易に測定することができる（図2）。また，単にグルコース濃度を知りたいのであれば糖分計（ニューロン社，新デジタル糖分計SS-36）や尿糖検査用試験紙（テルモ社，新ウリエースGa）が便利だが（図2），アミラーゼの働きによりデンプンがグルコースへと消化される様子を観察したいのであれば，後述のヨウ素－デンプン反応が有効である。

図2　尿糖検査用試験紙（上左），酵素分析装置（上右），及び糖分計（下）

2　発芽したイネの中では何が起こっているのか？

アミラーゼは1833年に麦芽（malt）から（物質として）取り出された最初の酵素である（中村ら1986）。麦芽とは文字通り発芽したオオムギのことであるが，ここにはアミラーゼが偏在している。オオムギと同じ穀類である米の場合も発芽種子には大量のアミラーゼが含まれているが，その理由はオオムギや米もヒトと同様にデンプンをグルコースに分解し，発芽生長のエネルギー源としているからに他ならない（図3）。他にも多くの動・植物がデンプンをエネルギー源として利用しており，結果としてアミラーゼもほとんどの生物に存在することになる。

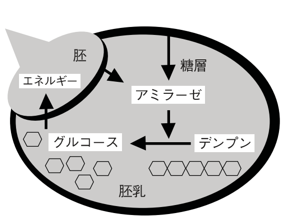


図3　イネ・発芽種子におけるアミラーゼの役割

米はヒトが食べるという点においてはご飯（米飯）であるが，生物学的視点からするとイネ（*Oryza sativa*）という植物の種子である。イネが光合成（photosynthesis）により種子内にデンプンを蓄積するのは発芽のためであり，決してヒトに食料を提供するのが目的ではない。また，ご飯に相当する胚乳（endosperm）はすでに死んだ組織であり，イネにとっては単なるデンプン貯蔵庫にすぎない。発芽の際には，胚（embryo）と糠層（aleurone cells）からアミラーゼが分泌され，胚乳内のデンプンが消化される（図3）。グルコースが細胞に取り込まれた後のATP産生経路については，ヒトもイネも共通である。

発芽種子のアミラーゼがデンプンを分解する様子を視覚的に観察するには，ヨウ素－デンプン反応（iodo-starch reaction）が便利である。これはデンプンがヨウ素と複合体をつくり，特有の青色（吸収極大波長650nm）を呈することを利用した反応である。呈色はグルコースが40個以上結合しているときに顕著であり，デンプンの分解が進むと青色は消失する（中村ら1986）。たとえば，シャーレにデンプン入りの寒天培地を作成し，そこに半分に切断した発芽種子を接地させる（図4）。種子のアミラーゼは培地に浸透しデンプンを分解する。これにヨウ素溶液を加えるとデンプンを含む部分は青く染まるが分解された部分は染色されないため，種子を置いた部分を中心に明瞭なスポットを検出することができる（図4）。

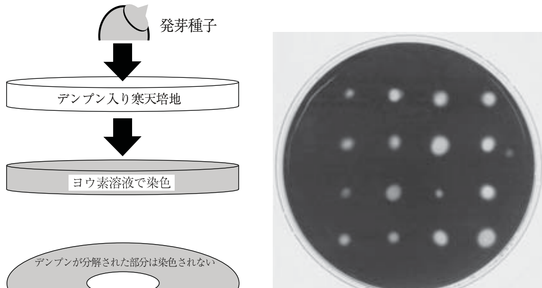


図4　ヨウ素－デンプン反応を用いたイネ・発芽種子のアミラーゼ活性の検出

酵素の特性を示すいくつかの指標が知られているが，そのひとつに至適pH（optimum pH）がある。これは酵素が触媒能力を最大限に発揮するためのpH条件のことであり，それぞれの酵素に固有のものである。イネ・アミラーゼの至適pHは5付近であるため，種子内のpHも発芽に伴い弱酸性に推移していく。その様子は，適当なpH指示薬（pH indicator）を用いて種子を染色することにより，容易に観察することができる。たとえば，指示薬・ブロモクレゾールパープル（BCP: bromocresol purple）はpHが5.2より低い場合は黄色を呈するため，発芽種子も黄色に染まる（図5）。なお，ヒト・アミラーゼの至適pHは中性付近である。

図5　BCPにより黄色に染色されたイネ・発芽種子

3　お米はどうしたら甘酒に変わるのか？

アミラーゼは食品産業において広く利用されている酵素でもある。先述の麦芽・アミラーゼは，ビールや麦芽水飴を製造する際のデンプン分解（糖化）に利用されている。また，各種アミラーゼを用いて低分子化されたデンプン（いわゆる，デキストリン）は，その保湿性，増粘効果，乳化安定性効果といった特性から，さまざまな加工食品に添加されている（中村ら1986）。ただし，古来，日本人が最も恩恵を被ってきたのは，間違いなく麹菌（*Aspergillus oryzae*）のアミラーゼである。なかでも，日本酒の醸造過程における蒸米の糖化には，デンプン分解能力の高い麹菌・アミラーゼが必要不可欠である。

近年の塩麹ブームも影響もあり麹の認知度は高く，スーパーマーケット等で容易に購入することも可能である。市販の麹（米麹）と電気炊飯器を用いて甘酒を作ることにより，日本酒の醸造過程と同様の糖化を観察することができる（図６）。粥状に炊いた米を50℃程度に冷ました後，適量の米麹を加える。炊飯器で半日ほど保温することにより甘酒が出来上がるが，この間，糖化が進みグルコース濃度は上昇する。医療用の点滴の主成分がグルコースであることから，甘酒は「飲む点滴」ともいわれている。それに加えて，甘酒には麹自体のビタミンやミネラルも含まれるため，江戸時代には夏場の疲労回復のために飲まれていたとのことである（坂本2012）。

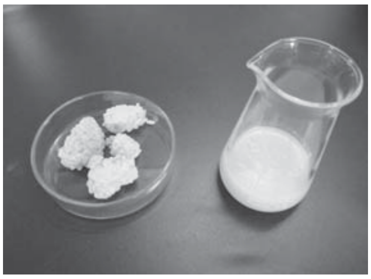


図６　米麹（左）と甘酒（右）

参考文献

奥恒行・柴田克己（編）（2012）“健康・栄養科学シリーズ　基礎栄養学”，南江堂，東京.

香川靖雄（2007）“科学が証明する　新・朝食のすすめ”，女子栄養大学出版部，東京.

坂本卓（2012）“おもしろサイエンス　発酵食品の科学”，日刊工業新聞社，東京.

中村道徳（監修）・大西正健・坂野好幸・谷口肇（編）（1986）“アミラーゼ”，学会出版センター，東京.

第13節

コンピュータ搭載の車を製作し，自分の思い通りに動かしてみよう！

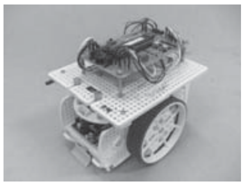
担当教員

自然・生活教育学系　川崎　直哉

講義概要：おもしろい動きや，すすませたい動きなどをパソコンで作成（プログラミング）し，その情報を車のコンピュータに転送して，思い通りに車を動かしてみましょう！　このような車は自律型ロボットの一種で，リモコンなど人の操作ではなく，ロボット自身が判断して走行するため自律型と呼ばれます。そのために必要な作業，それは①コンピュータをのせた車をつくること。②車の動きを考えてパソコンでプログラムをつくること。の２つです。自律型ロボットを製作し，ものづくりの楽しさを体験しよう。

1　自律走行型ロボット本体の製作

最初に，デザインは自由，自分で好きな形を考えてオリジナルカー本体を製作する。



自律走行型ロボットの例

車体ベースはスチレンボードをカット，車体ベースにギアボックスを取り付け，タイヤをセット（タイヤの代わりにコンパクトディスクも可）。後ほど，コンピュータ搭載のマザーボードを取り付ける。カラーリングも自由。完成形は上の右側写真のようになる。

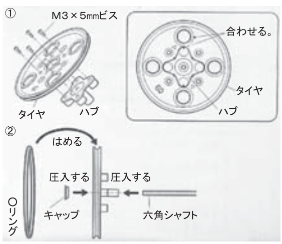
★　製作に必要な材料

・スチレンボード（275×400×７㎜厚）	・・・１枚
・ギアボックス（左右セット・モータ付）	・・・１セット
・タイヤ（２個入り・後輪用）	・・・１セット
・ＣＤ（後輪）	・・・２枚
・滑り止めチューブ（赤,青,黒から好きな色を選択）	・・・２本
・ボールキャスター（前輪用）	・・・１個
・電池ボックス（最初は厚紙で代用）	・・・１個
・プリント基板（最初は厚紙で代用）	・・・１枚
・ビス，ナット，ワッシャー	・・・適宜

★製作に必要な道具

定規，カッター，ラジオペンチ，ドライバー（プラス，千枚通し），両面テープ，木工用ボンド，ホットボンド，はんだ，はんだごて，ポスターカラー　ほか

※ホットボンドとはんだごては熱くなるので，やけどに注意。



組み立て方法

⑴　タイヤの製作

・自在タイヤ（ϕ60）の場合

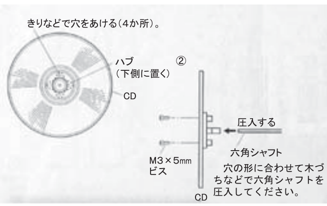
小さいタイヤにしたい場合は，自在タイヤ（ϕ60）を右図のように２個組み立てる。

自在タイヤ

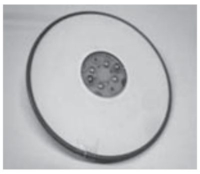
小さいタイヤの場合の例

・ＣＤタイヤの場合

ＣＤを右図のようにネジ留めする。その後，滑り止めチューブを切り込みではさむようにＣＤにまいて，セロテープでとめる。ＣＤタイヤも２個組み立てる。



組み立て方法



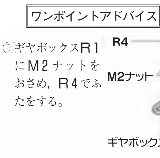
滑り止めチューブ付きＣＤタイヤ

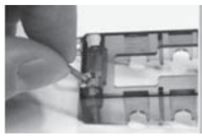
ＣＤタイヤの場合の例

⑵　ギアボックスの組み立て

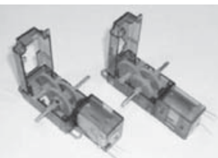
・タイヤの組み立てが終わったら，ギアボックスにモーターを組み込みギアボックスを完成させる。説明書を見ながら『中速』で組み立てる。

ワンポイントアドバイス

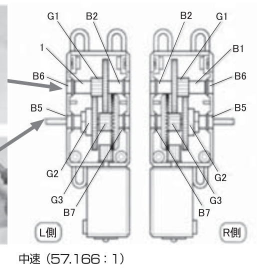




Ｍ２ナットは小さいのでボルトにつけて入れて逆時計回でボルトだけ抜く　イモネジは六角レンチで



ロボットカーの右に「Ｌ側」，左に「Ｒ側」を取り付ける



中速（57.166：1）

使用ギヤ：G1×2，G2×2，G3×2

軸受：B1×2，B2×2，G5×2，B6×2，B7×2

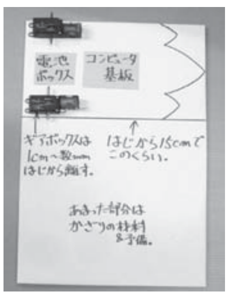
⑶　スチレンボードで車体の製作

・好きな形に切り取って個性的な車をつくろう！

加工のしかた

表面は紙であるので，鉛筆と定規などを使って車体の形を描く。ギアボックス，コンピュータ基板の大きさの厚紙，電池ボックスの大きさの厚紙を並べて，部品がおさまることを確認する。まっすぐ走らせるには左右のタイヤが平行で，正面を向いていることが大事。

右図のようにスチレンボードにギアボックスと厚紙をおいて，形をイメージする（※例としてペンで書いている）。実際には，表にはギアボックス，プリント基板，電池ボックス，裏にはボールキャスターを取り付ける。



配置は工夫して

(4) ギアボックスとボールキャスターの取り付け

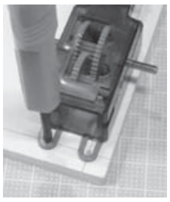
スチレンボードの表面にギアボックスを，裏面にボールキャスターを取り付ける。

・車体の穴開け

車体の左右と後側に線を引いておくと穴あけの目安になる。ドライバーセットに入っている千枚通しを垂直にねじ込み，貫通させるとちょうどいい大きさの穴があく。穴あけ作業は，まず，穴をあける位置を決め，その部分に鉛筆で印をつけた後，千枚通しを使って穴をあける。

千枚通し

スチレンボードはやわらかいので，簡単に穴はあくが，穴を大きくあけすぎるとしっかり固定できないので，小さめにあける。



千枚通しで穴開け

・タイヤの取り付け

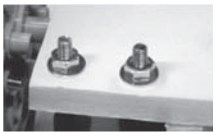
前に製作したタイヤをシャフトに押し込んで取り付ける。

・ギヤボックスのネジ留め

「Ｌ側」のギアボックスを右側に，「Ｒ側」のギアボックスを左側に取り付ける。長さ15ミリのＭ３ビスを表側から通し，裏側でワッシャーとナットで締める。締め付けすぎでスチレンボードがつぶされないように気をつける。スチレンボードはやわらかいので，力いっぱいドライバーでしめつけるとその部分がへこんでしまうので，力かげんに注意してビスを回す。

・ボールキャスターの取り付け

ボールキャスターを両面テープで取り付ける。高さを調整するため，適当にスチレンボードの小片を挿入する。



ワッシャとナットで締め付ける

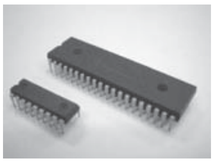
ボールキャスター

2 マザーボードの取り付け

★ マイクロコンピュータ（マイコン）とは？

マイコンとはマイクロ（とても小さい）コンピュータの略称であると同時に，「マイ（私の）」という意味ももたせた小型コンピュータのマイクロチップのことを言う。

コンピュータを使うと，単に自動化するだけではなく，やらせたいことを記憶させ，また，この記憶させる内容も簡単に変更することができる。さらにセンサとの組み合せにより，状況の変化に対応して，希望する動作を自動的に行わせることも可能である。

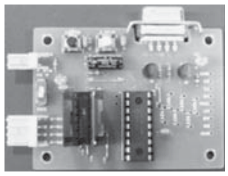


マイクロコントローラの例

現在では，いろいろなところにマイコンが組み込まれており，例えば自動車では50〜100個くらいのマイコンが組み込まれている。家庭では，電気炊飯器，そうじ機，扇風機，携帯電話，テレビ，エアコン，それらをコントロールするリモコンなど，身の回りにある電化製品のほとんどに組み込まれている。

★ マイコンとマザーボード

コンピュータというと「パソコン」のイメージがあるが，マイコンは，ちょっと見ただけでは普通のＩＣ（集積回路）とかわらない。しかしこの小さいチップの中には，高速で演算処理をおこなうＣＰＵ（セントラル・プロセッシング・ユニット）のほかに，プログラムを保存するメモリ，データを保存するメモリも備えている。さらに，センサからのデータの入力や，モータを回す信号の出力も可能である。



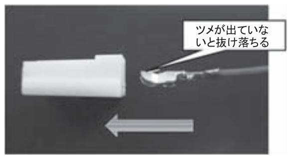
自作マザーボードの例

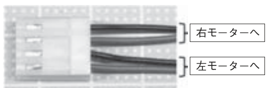
マイコンを搭載し，それ以外にも必要なＩＣや電子部品を取り付けた（ハンダ付けした）基板を，マザーボードと呼んでいる。今回はマイコンを搭載した自作のマザーボードを使用するが，マザーボードには，マイコンのほかに，モータを回すためのモータドライバー，プログラムをパソコンから書き込むための通信に必要なトランジスタなどが配置されている。

(1) モータとリード線のハンダ付け，コネクタの製作

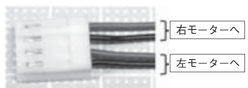
モータにコネクタ金具付きのリード線をハンダ付けし，その後，コネクタ金具をコネクタソケットに差し込んで，モータコネクタを完成する。タイヤなどが邪魔になって作業しづらいことがあるので，モータをつけたまま行うか，モータを外して行うか，やりやすい方法で作業すること。あわせて電池ボックスコネクタもハンダ付けする。

右側モータ　　左側モータ





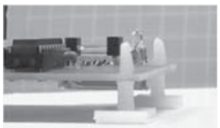
ギアボックスが『中速』



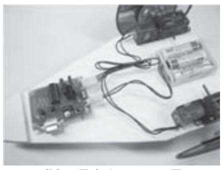
ギアボックスが『高速』・『低速』

(2) マザーボードのロボット本体への取り付け

マザーボードは，プラスチックサポーターを使って取り付ける。失敗したらはがして，両面テープを貼ってからつけ直す。電池ボックスも両面テープで貼り付ける。リード線が届く範囲で，タイヤなど動くところに当たらないように配置する。たるんでいる部分をテープなどでまとめるのもよい。



サポーターで基板を取り付ける



基板と電池ボックスを配置

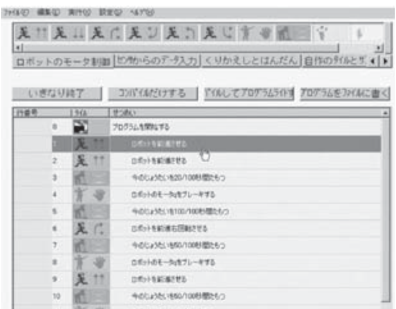
3 ロボットにプログラムを書き込む

これまで各自で作ったマイクロコンピュータ搭載のオリジナル・ロボットにパソコンからプログラムをダウンロードして車を動かしてみます。

(1) パソコンによるプログラムの作成

まず，パソコンにプログラミングのためのオリジナルのソフトウェア（Acles225）をインストールする。

ソフトウェアを立ち上げ，各自で考えた動作を実現するようなプログラミングを行う。プログラミング時は右図のような画面となる。



ソフトウェアによるプログラミング

(2) プログラムの転送

作成したプログラムをコンパイルしてマザーボード上のマイコンにダウンロードする。マザーボード上のスイッチをセットし，ソフトウェアの『コンパイルしてプログラムライトする』をクリックする。詳細は，講義中に説明する。

(3) プログラムの実行

マザーボード上のプログラム実行スイッチを押して，ダウンロードしたプログラムを実行する。また，リセットスイッチを押すことにより，再度，プログラムを最初から実行する。詳細は，講義中に説明する。

生活の中の科学

2012年３月　印刷
2012年３月　発行
2013年３月　改訂版

編集発行／上越教育大学
〒943-8512
新潟県上越市山屋敷町１番地