物理はお友達 II

熱・波基礎編

改訂版

お茶の水女子大学
理系女性教育開発共同機構

はじめに

物理は難しくて・・・と思っているあなたへ ♪
　物理は難しくて・・・だから理系はあきらめよう・・・理科は面白いし好きだけど・・・と思っている高校生は少なくないと言われています。また、学校時代、物理は好きじゃなかった・・・苦手だった・・・でも大人になって物理に触れてみて、こんな物理だったら好きになれたのに！と思っている大人も少なからずいます。「物理って面白い！」「難しくない！」と思っていただけるように、本書を編集しました。
　物理が大好きで、もっと勉強したいと思っているあなたへ ♪
　本書は物理の真髄が伝わるように、書かれています。納得がいくことと思います。

　著者は、物理はお友達Ⅰ力学基礎編に引き続き、37 年間お茶の水女子大学附属高等学校で物理を教えてきた、村井利行先生です。どうやったら高校生－特に女子高生－に物理の面白さが伝わるか、工夫を重ねてきた経験を本書にまとめました。

　本書は、物理の苦手な高校生に「物理って面白い！」と思っていただけるように、物理が好きな高校生に「納得！」を深めていただけるように、編集しました。

　物理は、それ自身興味深いサイエンスであるとともに、あらゆるサイエンス・テクノロジーの基本です。本書をベースに、多くの方が様々な分野で活躍されることを願っています。

　既刊の力学基礎編は、既に使っていただいた高等学校や大学で、好評です。本書も多くの皆様に活用していただければ幸いです。

編集グループ

この冊子の使い方

1. 物理の副教材として活用してください。
2. 例題には必ず取り組んでください。
3. 「問題」は解く時間がない場合でも、目は通しておいてください。
4. 教材の性質上、基本的・標準的な問題は収録していないことが多いです。学習に際しては、学校で使っている教科書・問題集の該当する分野の問題を解いておいてください。
5. 本文中にある「Ｉの問題８５を参照」等の記載は，「物理はお友達Ｉ 力学基礎編」 の参照を意味しています。

★

　本文右側にいくつかある「★」の補足は，本書を指導者の立場で読んでいく視点としたものです。本文中にも詳細に記述されているところのページを指し示したり、本文ではあえて避けている物理量や物理用語・現象に関して言及しています。これらの内容を指導するときに本文中の説明が大いに利用できますので、ぜひ熟読してほしい部分でもあります。

教具について

次の実験器具等があると学習効果が上がります。

・ビー玉エンジン
・「金属の比熱測定」の実験器具
・ウェーブマシン
・共鳴音叉
・ギター（クラッシック or アコースティック）

目　　次

自然は波でいっぱい

『物理はお友達Ⅱ 熱・波 基礎編』をお届けします。
　本編でも，『物理はお友達Ⅰ 力学基礎編』と同じように，イメージとリアリティー(生活感)を大切にしながら話を進めてきます。くり返しになりますが，じっくり・ゆっくり・あきらめず・粘り強く学習していきましょう。「継続は力なり」を信じて！

熱もやっぱりエネルギー，でも･･･

　熱素(カロリック)と呼ばれる質量のない“物質”をイメージしていた時代があったのです――ほんの200 年ほど前。物体にしみ込んだ熱素の量が温度を決めているという発想です。熱素という物質がほんとにあるとは，今ではほとんどの人が考えないでしょうが，「熱の移動」「熱の発生」というように，「熱」という便利なイメージは，やはり普段の生活の中でよく使われています。直感的で分かり易いものなら，“使用上の注意”を理解した上で普段通り使ってよいと思っています。

　現在では，熱もエネルギーの仲間であって，熱も含めてエネルギーが保存されていることが分かっています。本編では「熱がエネルギーって，どういうこと？」という問題意識をもって，いろいろ考えていこうと思っています。「熱って結局，何なの？」「熱と温度の関係は？」「熱のエネルギーは，今まで勉強してきた運動エネルギー・位置エネルギーとどういう関係があるの？」
　熱は，自然界のほとんどあらゆる現象と関わりをもっています。それに，熱のエネルギーは他のエネルギーとはかなり異なった性質をもっています。そんな話題に，じっくりと取り組んでいきましょう。
　「熱の話なんて地味～」って思ってませんか？！いえいえどうして，「熱って面白い！」んですよ！

1 . 熱運動と温度

　今から200年ほど前，物質の根源を“粒子(つぶつぶ)”と見なすアイディアに，ニュートンの運動の法則(皆が勉強してきた運動の法則)を適用する「分子運動理論」をごく一部の人が研究し始めた。この理論の要になった着想が「熱運動」。空気も水も石もみんな“つぶつぶ”でできていて，その“つぶつぶ”はみんな“暴れてる”って考えようというのだ。もちろん誰もそんな姿や振る舞いを見た人はいなかったのですが(暴れている様子は現在でも直接は誰も見ていない！)。でも，100年くらい前になってやっと，「うん，そのように考えるべきだね」ってことになったのです。

①（温度って？ 温度の物理学的なイメージ）

温度は，もとはと言えば「熱い・冷たい」という感覚的なものを数量化した量である。最も分かり易い数量化は，温度変化に伴うアルコール・水銀の膨張・収縮の度合いから温度の値を決める方法だろう。また，温度の基準点としては，１気圧での水の氷点・沸点を使い，それぞれ 0℃，100℃とする方法が親しまれている。

温度の測定手段としては，現在では赤外線・電気抵抗等を用いた方法が日常生活の中で広く使われている。

数量化や測定方法の細かな話題はともかく，そもそも「温度とは何か，温度のイメージは？」というと，慣れれば一番親しみやすく, かつ一番役に立つ「原子･分子･電子･･･の熱運動の激しさ(図1.1)」ということになるだろう。

★
ここまで読んでみると，いかに「熱」という言葉が日常的に曖昧に使用されているかということがわかると思います．熱力学の授業を展開するときは「熱」という単語を単独で使用することはほぼありませんし，言葉に注意することが大切です．

②（熱運動と温度，熱エネルギー）

物体はすべて原子・分子で構成されているが，原子・分子はつねに無秩序な運動をしている(図1.1)。この運動を**熱運動**という。

気体の分子はランダム(デタラメ)に飛び回り，通常は頻繁に衝突をくり返している。**固体**を構成している原子は平衡点(力がつり合っている位置)を中心にランダムに（隣り合う原子との相関なく）振動している。**液体**は，気体と固体の中間的状態と考えておこう。

「物体の温度が上がった」ということは，物体を構成する原子１粒１粒に運動エネルギーが与えられ，熱運動が激しくなったということなのだ。熱運動の運動エネルギーの大小が物体の温度を決めているとイメージしてよく，さらに温度とは熱運動の運動エネルギーの平均値に対応する量と考えてよい。また，原子や分子が熱運動としてもつエネルギーを**熱エネルギー**と呼ぶことが多い。

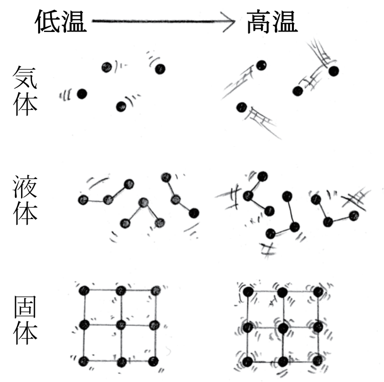


図1.1　温度が高いほど原子･分子の熱運動が激しい。

熱エネルギー＝原子・分子等が熱運動としてもつエネルギー

・・・(1.1)

③（熱運動のエネルギー）

気体分子に運動方程式などを適用することにより，分子の熱運動の運動エネルギーを与える公式を導くことができる。ここでは導出の過程は省略し結果だけを示そう(導出は科目「物理」で行う)。熱運動と温度の関係を考えるときには，きっと頼りになる。

図1.2のように，気体の絶対温度が T [K]のとき，**分子１個の熱運動の運動エネルギー平均値**は次式で与えられる。m[kg]は分子の質量，v [m/s]は熱運動の平均的な速さである。

熱運動の運動エネルギー<u>平均値</u>　$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{3}{2}kT$ [J]　・・・(1.2)

$k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/Kであり，**ボルツマン定数**と呼ばれている。(1.2)式は固体や液体でもだいたい成り立っていると考えてよい。

図1.2　温度 T [K]の気体。分子１粒の運動エネルギーは？

例題１　窒素分子は何m/sで ほっぺた にぶつかっている？

27℃における窒素分子N_2 の熱運動の速さは何m/sか。また，同じ温度でヘリウム原子Heの速さは何m/sか。((1.2)式を使う)

例題１(解)　窒素分子１個の質量 $m \fallingdotseq (28 \times 10^{-3})$kg÷（$6 \times 10^{23}$)個 $= 4.7 \times 10^{-26}$ kg，$T = 300$K，$k = 1.38 \times 10^{-23}$J/K を(1.2)式に代入し $v = \sqrt{3kT/m}$ ＝<u>510 m/s</u>・・・教室を縦に毎秒25往復くらい！

ヘリウム原子1個の質量は窒素分子の 4÷28＝1／7，(1.2)式より，熱運動の速さは，同じ温度では質量の平方根に**反**比例するから，$v_{He} = 514 \times \sqrt{7} =$ <u>1.4×10^3 m/s</u>　←窒素分子よりだいぶ速い！

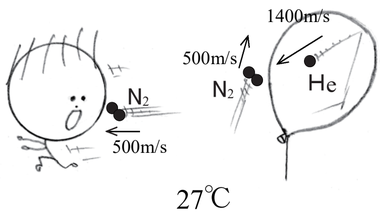


図1.3　27℃でのN_2とHe の熱運動

④（エネルギーの「乱と整」：熱運動，究極の乱雑さ！)

例題２　想像を絶する膨大な数！！

水18 g(水分子 1 mol)を図1.4のように，地球の表面全体に塗りつけたとしたなら，水分子はどんな割合で分布するか。何個／km^2？ 何個／m^2？・・・何個／mm^2？ 地球の半径を6400 kmとして計算せよ。でも，まず最初に直感的に予想をしてみよう！

この例題の解答はp.4にあり。まず自分で計算をしてください！

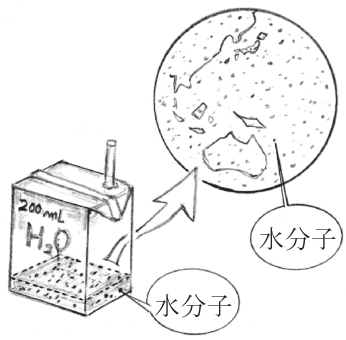


図1.4　水18g(1mol)を地球の表面に“塗りつける”と・・・

原子の熱運動はランダムな運動であり，運動の向きも個々ばらばら。そのため，例えばボールを構成している原子の熱運動は，ボールの運動にはまったく影響を及ぼさない。今まで学習してきた「ボールの放物運動」や「ジェットコースターの運動」では，物体内の熱運動をまったく考慮しなかったのはそのためだ。同様に「ボールの運動エネルギー」と言った場合には，熱運動の運動エネルギーを含めはしなかった*1。

さて，「ボールがもつ熱エネルギー(熱運動の運動エネルギー

の和)」と「ボールの運動エネルギー」とを比較すると，同じ「エネルギー」であってもそれらの“性格(!?)”には想像を絶する(しかし想像してみてほしい！)大きな違いのあることが分かる。

熱エネルギーは，「想像を絶する膨大な数：例題２」の原子が個々ばらばらに演じるチョー無秩序で乱雑な形のエネルギーである。

一方，たとえばボールの運動エネルギーは，逆に「想像を絶する膨大な数」の原子が全部揃って演じる極めて整った形のエネルギーなのである。

熱エネルギーは究極の乱雑さをもつエネルギーの形態(乱雑の極み！)なので，その点で他のあらゆるエネルギーとも性質が異なっていて，熱エネルギーならではの独特な振る舞いをする。

＊1 ちなみに，例題１からも推測できる通り，投げ出されたボールの場合，熱運動の運動エネルギーの和(熱エネルギー)はボールの運動エネルギーよりもはるかに大きな値をもつ。

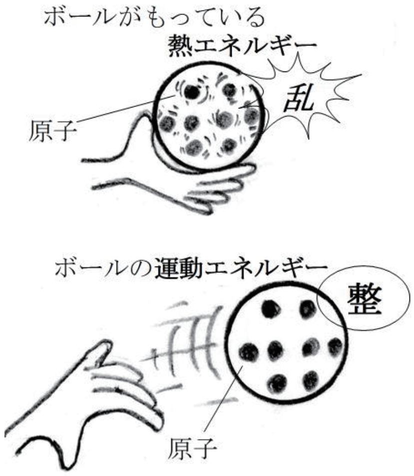


図1.5　熱エネルギーは乱れた形のエネルギーだが、ボールの運動エネルギーは整った形のエネルギーである。

例題２(解)

水18 gは1 molで，水分子を約6×10^{23}個含む。

$(6.0\times10^{23})\div\{4\pi(6400)^2\}\fallingdotseq1.2\times10^{15}$個／$\mathrm{km}^2$＝<u>1200個／$\mathrm{mm}^2$</u> ←キョ，キョ，驚～異的！　ノートに1mm×1mmの□を書き，そこに1200個の点を書いてください(笑)･･･20個くらいで真っ黒ですね！！　それが地球の表面全体に分布している，と想像してみてください。この数，何と表現したらいい？！

⑤（ブラウン運動：*熱運動を見る！？*）

熱運動そのものを見ることは，現時点では技術的に無理である。しかし，煙の粒子のような微粒子が，まわりの分子の不均一な衝突(圧力の微小な変動：**ゆらぎ**という)によりフラフラ動く様子は，顕微鏡を使って直接見ることができる。一般に，巨視的物体（原子に比べると巨大なもの）が，分子，原子の熱運動の不規則性の影響を受けてフラフラ動く現象を**ブラウン運動**と呼んでいる。ブラウン運動は熱運動そのものとは言えないが，熱運動と似た動きをしている運動と言えるだろう。

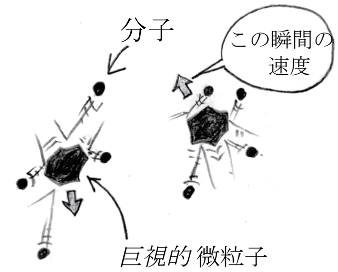


図1.6　分子の衝突の向きや数などが均一でないため，煙の粒子などがフラフラ動く（ブラウン運動）。

＜コラム１＞ ブラウン運動と原子・分子, アボガドロ定数の算出

歴史的には，ブラウン運動は原子の存在を示す決定的な証拠になったのである。20 世紀初頭の時点でも，物質が原子(粒)でできていることの直接的な証拠は存在せず，また理論的な難

点もあり，その意味で「原子」は仮説の状況であった。化学反応の説明においても，必ずしも元素が粒でできている必要性はなかったのだった。しかし，その頃，原子の熱運動という考えを用いて微粒子のブラウン運動を詳しく考察した人がいた。アインシュタインである(1905)。実験家ペランは，ブラウン運動の精密な観察を行い(図1.7)，その様子がアインシュタインの理論通りであることをつきとめ，原子の実在性を直接的に示す証拠とした。また同時に，この観察結果と理論を比較することにより，アボガドロ定数のより正確な値を求めることができた(6.17×10^{23}という値）。なお，アボガドロ定数に相当する量の測定･算出に初めて成功したのはロシュミット(1865)(アボガドロではない！)で，熱運動の考えのもとに，気体・液体の密度のデータなどから 0.2×10^{23} という値を導き出していた。

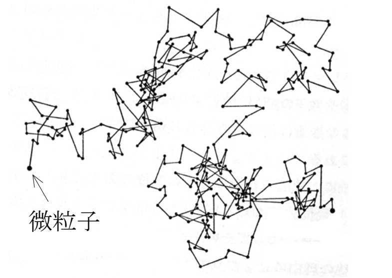


図1.7　水に浮いている微粒子１個の位置を30秒ごとに追跡した図
J.ペラン『原子』岩波文庫より

⑥（熱運動が生じるわけ）

原子が熱運動用の“推進力”を持っているわけではないし，温度という“場の雰囲気”のようなものが原子・分子を“揺さぶっている”のでもない。じゃ，なんで熱運動なんてやっちゃうの？＊[1]

やや単純すぎる例で「雰囲気だけ」でも説明してみよう。

図1.8ａのように15個の原子が“箱”の中で整然と並んで静止しているとしよう。ただし，一箇所だけ並びが不規則。いま図ａのように，３つの原子だけに同じ速度与えたとしよう。図ｂでは，原子の並び方の不規則性のために，３つの原子の運動は，早くも少し不揃いになっている。つまり，少し乱れが生じた。その後，15個の原子はみな動き出して次々とそこら中で衝突が生じ，乱れは全体に広がっていくだろう。

さて，その後また図ａと同様に「複数の原子が揃って運動し，他の原子が整然と並んでいる」というようなことが起こるだろうか？

図1.8のたった15個の原子だったら，あり得るかもしれない。でも，現実の原子の数は膨大。そんなことが起きるには，宇宙の年齢以上の時間が必要かもしれない。結局，図ｃのようにすべての原子がランダム(無秩序)に動き回る，という状況が飛び抜けて高い確率で実現する･･･そんな気がしませんか？！そう，それが熱運動。

整った状態は，そう長くは続かず，遅かれ速かれ無秩序へと向かう，という感じ――教室だって似たようなもの！？

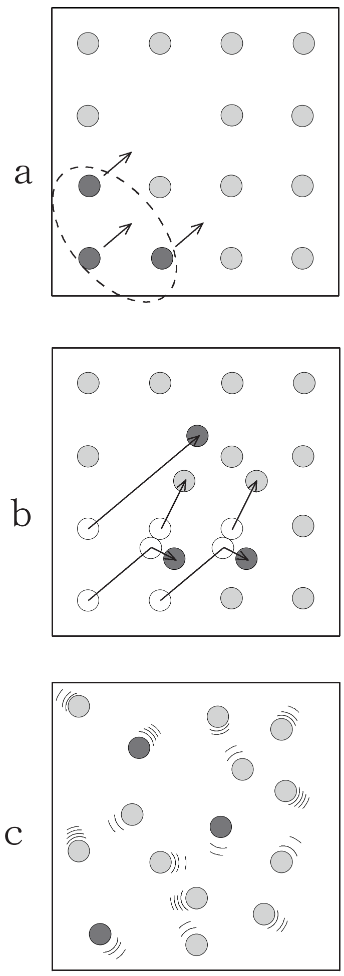
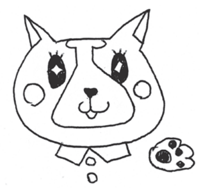


図1.8 熱運動が生じる原因。膨大な数の原子とわずかな不規則性。

＊1　実はこの問に対して，20世紀以降に解明された物理学や数学を使わずにきちんと答えるのは驚くほど難しいのです。19世紀の終わり頃，熱運動のアイディアを積極的に押し進めていた人達も手こずっていたようです。

＜補足１＞ 実際の熱運動の様子

　例題１で計算したように，27℃で窒素分子は約500 m/sの速さで熱運動をしています。でも，分子の大きさも考えて詳しく計算すると，大気中で窒素分子は約(1/5000) mm進むごとに他の分子と衝突している。つまり，大気中では，１個の分子が1秒間に約25億回も衝突をくり返してる！そういう意味では，図1.3に描いた情景は正しくないですね。むしろ図1.7のブラウン運動と似た様子なんでしょう(もっとずっと細いけど)。



⑦(熱膨張と温度の目盛)

　温度の変化に即時反応する現象として，最も身近なものは物体の膨張・収縮だろう。**熱膨張**と呼ばれている[*1]。特に気体の熱膨張は，容易に確認できる現象で，歴史的にも最初の温度計は気体温度計だった。ガリレイの考案である。その後，大気圧の変動に影響されにくいという理由で液体が用いられ，種々の条件をクリアしてアルコールと水銀が用いられるようになった。一方，固体の熱膨張は気体・液体に比べると微小だが(図1.9)，例えばバイメタルという部品(膨張率[*2]の異なる二種類の金属を貼り合わせたもの)が感温スイッチとして広く用いられている。

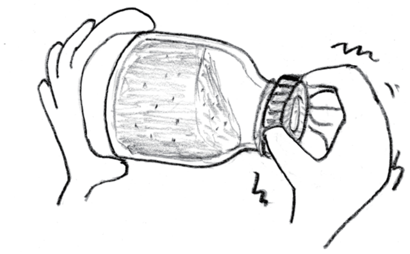


図1.9　冷蔵庫から出したジャム。蓋が開かない！→蓋に湯を掛ける。固体の熱膨張は気体・液体に比べて微小だが，こんなとき役に立つ！

　なお，温度の基準値としては，p.2：①(温度って？)でも述べたように，１気圧での水の氷点を0℃，沸点を100℃とする定義が“生活感”としても明快で，かつ十分に正確と言える(正式にはもっと厳密な定義が採用されている)。

　さて，温度変化と熱膨張の関係は，詳しく見ると物質によって微妙な違いがあり，あまり単純ではない。歴史的にも，その点が温度の目盛を定めるときのネックになっていた。そこで絶対温度の登場である。

　絶対温度は，p.3：(1.2)式で示されている通り，熱運動と直接結びついた温度目盛りだが，歴史的には(熱運動が広く認知されていない頃)，温度変化に伴う気体の圧力変化を表すのに便利な温度目盛りとして登場した：希薄な気体は，体積一定の場合に図1.10のように圧力が変化する。そして各気体のグラフを延長すると，－273℃のところですべて交わり，しかも圧力は 0 になるのである！「これは何かある」ということで－273℃を絶対的な温度の基準値0 K(ケルビン)と定義する絶対温度の発想が生まれたのである。

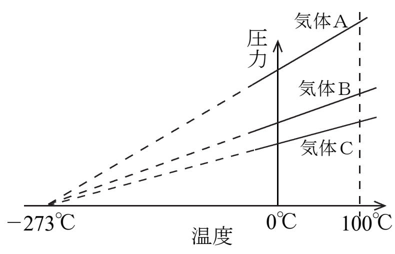


図1.10 体積を一定にした希薄な気体の温度と圧力の関係。各グラフを延長(外挿)すると温度−273℃，圧力 0で交わる。

　絶対温度の1目盛り(1単位)は，日常使われている**セ氏温度**の１目盛りと同じにしてあり，温度 t [℃]とそれに対応する絶対温度 T [K](ケルビン)との関係は次式の通りである。

絶対温度　$T \fallingdotseq 273+t$　[K]

*3　・・・(1.3)

＊1　あとで問題８を考えてください。

＊2　温度上昇1度あたりの物体の長さ・体積の増加率(増加の割合)をそれぞれ**線膨張率・体積膨張率**という。

＊3　詳しくは　$T = 273.15+t$　・・・(1.4)

★
ちなみに，一定の圧力のもとで，0℃のときの固体の長さを L_0 とすると，t [℃] のときの長さ L は，物質に固有の値である線膨張率 α[1/K] も用いて表すとおよそ　$L = L_0\ (1+\alpha t)$ となります．同様に，0℃のときの固体の体積を V_0 とすると，t [℃] のときの体積 V は，物質に固有の値である体膨張率 β[1/K] も用いて表すとおよそ　$V = V_0\ (1+\alpha t)$ となり，α と β の関係は $\beta \fallingdotseq 3\alpha$ の関係があります．

１[考察，実技，調べる] p.3：(1.2)式に基づいて T＝0 K(絶対零度)の世界を想像せよ。熱運動はどうなっているか。「絶対零度」をパントマイムで演技せよ！また，[ジョン・ケージ] 検索 でピアノ曲「4分33秒」について調べよ。

２[考察](熱運動ダンス)　「ダンスコンクールの日程が近づいているのに，クラスのダンスのテーマが決まらない」のだったら，「熱運動ダンス」はいかが？誰も何も指示を出さず，メンバーが勝手に踊れば無秩序な(皆が互いに無相関な動きをする)ダンスになる！！
　でも，それって実現するかなぁ・・・

３[実技] p.6：＜補足１＞を参考にし，大気中における気体分子の衝突の様子を手で演技してみよう。

４[考察] 友達が「氷を触ってると，手の温度が逃げちゃう」と言ったとしよう。ちょっと訂正してあげてください。

５[考察] 雪の降る朝，手袋を忘れて手を擦る・・・(図1.11 a)。摩擦によって接触面の温度が上がる理由を，図1.11 b (接触面に並ぶ原子)を参考にして簡単に説明せよ。

６[考察] 気体・液体の圧力の原因を簡単に説明せよ。また，「大気圧は大気の重さ（下向きの力）」と説明することがよくあるが，その大気圧が上向き，横向きにもはたらく理由を簡単に説明せよ。

７[考察] 化学反応は通常，温度が高いほど速く進む。その理由を推察せよ。

８[考察](熱膨張) 気体の熱膨張の原因を，熱運動の観点から説明せよ(問題６関連)。一方，金属などの固体の膨張は，熱運動の観点だけでは理解できないのである。この点を議論せよ(**難**)。

９[考察(やや難)](音速と熱運動)気体中を伝わる音の速さ（音速）は，その気体を構成する分子の熱運動の速さと同程度（音速が熱運動の 0.6～0.8 倍程度）である。この理由を考えよ。

１０ (恐竜絶滅) 巨大隕石の落下（ユカタン半島）による気候の急

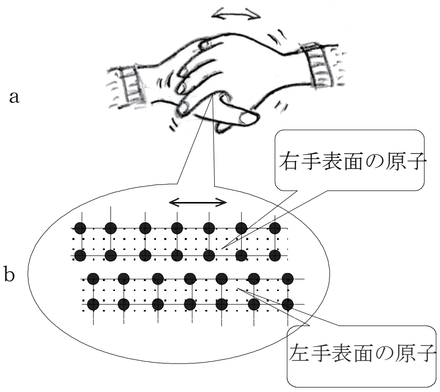


図1.11

変が恐竜類の絶滅をまねいたとする有力な学説（アルバレズ父子他）がある。密度 4.0 g/cm^3，半径 10 kmの小惑星が15 km/sの速さで落下したなら，何Jのエネルギーが放出されるか(主に熱となる)。この巨大隕石の落下によって放出されるエネルギーは，地球が1年間に太陽から受けるエネルギー 5.6×10^{24} Jの何%か。

⑧（熱の単位cal について）

熱の本質は熱運動であり，熱エネルギーとは，結局は熱運動の運動エネルギーのことである。したがって，熱(熱量)･熱エネルギーはジュール J 単位で表すのが自然であり，理論的計算には明らかに「ジュール J」が適している。

一方，古くから熱(量)を表す単位としてはカロリー cal が親しまれてきた(図1.12)。実用面では，例えば水を扱う場合は，むしろこの単位が便利である。「水1 gの温度を1度（1 Kと書く）上げるのに必要な熱が1 cal」である。これを「水の比熱は1 cal/(g･K) である」と表現する。

ジュール J とカロリー cal の間の換算は次の通りである。

$$1\ \mathrm{cal} \fallingdotseq 4.2\ \mathrm{J}, \quad 1\ \mathrm{J} \fallingdotseq 0.24\ \mathrm{cal} \qquad \cdots(1.5)$$

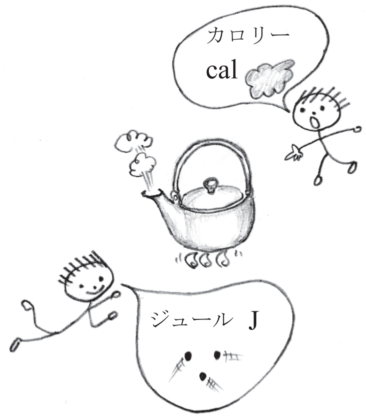


図1.12　熱の単位 cal は水を扱う場合には便利なのだが，熱運動をイメージするなら J が適切だろう。

例題３ だいふくを何個食べれば富士山に登れる？？

だいふく 1 個(70 g)の“エネルギー”は 160 kcal だそうだ(図1.13，だいふくを燃焼させたときに発生する熱として測定される)。このエネルギー(熱)は何Jか。また，このエネルギーは50 kgの人の何mの高さの位置エネルギーに相当するか。

例題３(解) 160 kcal≒$160\times10^3\times4.2$ J＝6.72×10^5 J，このエネルギーを重力の位置エネルギーに等しいとおいて(図1.14)

$mgh=50\times9.8\times h=6.72\times10^5$ J　より　$h=1370$ m≒$\underline{1400\ \mathrm{m}}$！

だいふくが３個あれば富士山に･･･！？。残念ながら，だいふく1個で1400 m登れるというわけではない。生命維持にだけでも約1W/kgのエネルギーを要するし，食べたものが身体の中で出すエネルギーのうち，仕事(＝力×変位･･･登る，走る，持ち上げる，動かす)として出力されるのはその1/10程度とのことだ。

図1.13 食べた「だいふく」から160 kcalのエネルギーが身体に与えるられる。

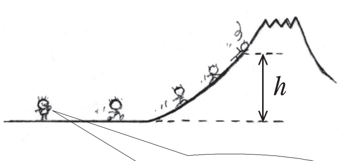


図1.14「だいふく」を食べて山に登ろう！

２．熱と温度変化

熱運動のイメージは忘れずにいてほしいけれど，単純素朴な「熱」のイメージも悪くない。「水を熱してお湯にする」とか，熱が加わって物体の温度が上がるといった現象を扱う場合はそれで十分なので，気楽に「熱」を使って構わない。 それで，ちょっと話が込み入ってきたら，「熱運動」を“引き出し”から出してこよう。「熱運動」のありがたみ(？)を，そんなときにきっと感じると思う。

①（熱と温度変化：熱容量）

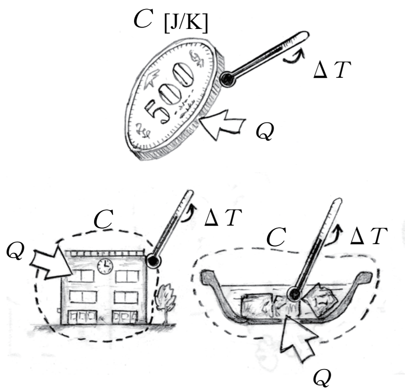


図2.1 熱容量という量は，500円玉，校舎，なべ･水･豆腐 の全体に注目している。

図2.1のように，物体全体について，その温度を 1度(1 K)上げるのに必要な熱[J]の値をその物体の**熱容量**という。「物体全体の温まりにくさ」を表しているとも言える。

熱容量は記号C(大文字)で表す習慣があり，単位は [J/K]である。 図2.1のように，熱容量C [J/K]の物体に熱Q[J]が加わり，温度がΔT[K]変化したなら次式が成り立つ。

熱と温度変化	$Q = C\Delta T$ [J]

･･･(2.1)

②（比熱と熱容量）

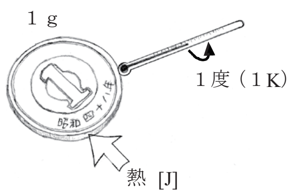


図2.2 例えば，アルミニウム１ｇの温度を１度（１K）上げるのに必要な熱(熱量，熱エネルギー)をアルミニウムの比熱という。単位は J/(g･K) である。

$\boxed{\text{比熱}}$ 通常，物体に熱を加えれば温度が上がる。図2.2のように，均質な物質でできた物体について，その温度を1度(1 K)上げるのに必要な，1 gあたり＊1の熱(熱量，熱エネルギー)の値を**比熱**といい，通常，記号c (小文字)で表す。水の比熱は

水の比熱 $c \fallingdotseq 4.2$ J/(g･K)＝1.0 cal/(g･K) ･･･(2.2)

である。種々の物質の比熱をp.11：表１に記した。

＊1 「1 gあたり」以外に「1 kgあたり」「1 molあたり」もよく用いられる。

比熱と熱容量はイメージが似ているが，熱容量は図2.1のように「500円玉全体」「校舎全体」「なべ＋水＋豆腐」というような物体全体(系全体)に対して用いることのできる量であり，使い慣れると便利な量である。比熱は「物質1gあたりの熱容量」と言うことができる（比熱容量ともいう）。

比熱 c[J/(g･K)]，質量 m[g]の物体の熱容量 C[J/K]は次式で表され，図2.3下のような物体の集合の場合，全体の熱容量はそれぞれの物体の熱容量の和である。

熱容量と比熱　$C = m\,c$ [J/K],　$C = \underbrace{m_1 c_1}_{なべ} + \underbrace{m_2 c_2}_{水} + \underbrace{m_3 c_3}_{豆腐}$

･･･(2.3)

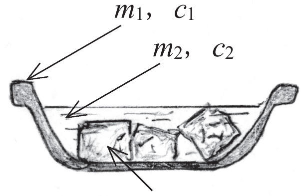


図2.3　物体を構成している物質の質量 mと比熱 c。これらの量を用いて，物体の熱容量が計算できる。

＜補足２＞ 熱容量と比熱の違いが分からない *!!*

熱容量と比熱は“似た者”だけれど，それに輪を掛けて記号が Cと c で，どちらも「シー」なのが，分かりにくくなる原因かもしれない。確かに「$C = m\,c$」ってちょっと変な数式という感じもする。手で書くとき，Cと cの区別は難しいですね。　「うん，うん，そうそう」と感じるようだったら，とりあえず熱容量を記号 Hで表してみてはどうかな：熱容量 H [J/K]。そうすると，(2.1)式，(2.3)式はそれぞれ

$$Q = H\Delta T \quad [\mathrm{J}] \quad , \qquad H = m\,c \quad [\mathrm{J/K}]$$

例題４「鉄は熱いうちに打て」ではなく，銅を打つと熱くなる！
(1) 銅片1.0 kgの熱容量は何J/Kか。銅の比熱はp.11：表１ 参照
(2) (1)の銅片を袋に入れ，図2.4のように50 mの高さから落下させた。銅片がもっていた力学的なエネルギーが，すべて熱として銅片に加わったとすると，銅片の温度は何K上昇するか。の値を用いよ。　問題１４も考えよう！

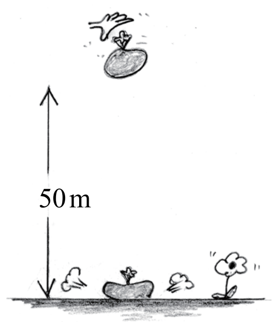


図2.4 銅 1kgを50mの高さから落下させる。

例題４(解) (1) 銅の比熱は $c = 0.385$ J/(g･K)，したがって(2.3)式より，銅1.0 kgの熱容量は $C = mc = 1.0\times10^3$g$\times 0.385$ J/g･K＝
<u>385 J/K。</u>
(2) p.12：図2.5参照　銅片のはじめの位置エネルギー $U = mgh$が，すべて熱エネルギー Q[J]になり，“自分自身を温めた”と考え

$mgh = Q = C\Delta T$　したがって 1.0 kg×9.8m/s^2×50m＝
385 J/K×ΔT,　これから $\Delta T = 1.27 \fallingdotseq \underline{1.3\ \mathrm{K}}$

表１　種々の物質の比熱（気体は定圧過程＊2での値）

	J/(g･K)	cal/(g･K)	J/(mol･K) ← モル比熱(モル熱容量)	
ﾍﾘｳﾑ（－180℃）	5.232	1.249	20.9	単原子気体
ｱﾙｺﾞﾝ（15℃）	0.523	0.125	20.9	
酸素（16℃）	0.922	0.220	29.5	２原子分子気体
窒素（16℃）	1.03	0.247	30.0	
水蒸気（100℃）	2.05	0.489	40.0	多原子分子気体
ｱﾝﾓﾆｱ（14℃）	2.15	0.514	36.6	
鉄（25℃）	0.451	0.108	25.0	金属結合固体
銅（25℃）	0.385	0.092	24.5	
水（20℃）＊3	4.19	0.999	75.3	液体 (氷は約 2 J/(g･K))
ｴﾁﾙｱﾙｺｰﾙ（25℃）	2.41	0.575	111	

『理科年表』2018年などより作成

＊2　圧力が変化しないようにしながら熱を加えた場合のこと，“びんずめ”にしていると圧力は変化するが，その場合は比熱の値が小さくなる。p.23：例題９参照

＊3　詳しく言うと，比熱自体も温度によって少し変化する。「(20℃)」は20℃での値を意味している。

＜補足３＞ モル比熱(モル熱容量)と熱運動のエネルギー

1 molあたりの熱容量[J/mol･K］は**モル比熱(モル熱容量)**と呼ばれ，理論的な考察で威力を発揮する。モル比熱は，物質を構成する分子の個数を同じ(1 mol)にした場合の熱容量である。

表１でも分かるように，分子の構造が似ている物質はモル比熱の値も似ている。ただし，液体は構造・運動形態が複雑なため，気体や固体ほどの規則性はない。2原子分子気体は，図2.6のように分子が回転をするため，その運動エネルギーの分だけ，単原子気体よりモル比熱の値が大きい。

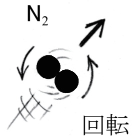


図2.6　２原子分子の熱運動

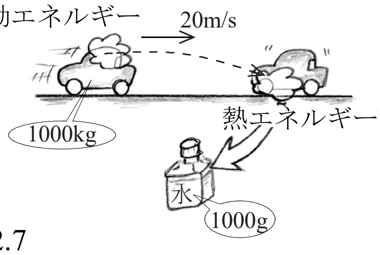


図2.7

１１ 20 m/s(72 km/h)で走っていた1000 kgの車(軽自動車)がブレーキをかけ，摩擦力で静止した。初めの運動エネルギーがすべて熱エネルギーになったとし，それを1000 gの水にすべて加えることができたなら，温度は何度(何K)上昇するか(図2.7)。

１２(滝つぼの温度) 川の水が 100 mの高さから落下する滝を考えよう。水が初めにもっていた位置エネルギーがすべて熱エネルギーになったとすると，この水の温度は何度上昇するか。ただし，水の落ち始めの運動エネルギーは無視し，発生した熱は外部には逃げないとする。(同種の測定は，ジュールが実際に行っている。新婚旅行中にとのこと！)

１３ 教室に40人の人がいるだけで，１時間で教室の空気をおよそ何度(何K)上昇させる“能力”があるだろうか？人間の１日の摂取エネルギーを2000 kcalとし，その１時間分がすべて熱エネルギーとして教室の空気に与えられるとする。空気の比熱を1 J/(g･K)，教室の空気を2×10^5 gとして概算(単純計算)せよ。

１４[考察]p.10：例題４の実験を教室で行いたい！とは言っても，天井や屋根に穴をあけることはできない。では次善の策として，何かよい方法を考案せよ。

１５[考察]比熱の表を見ると，ヘリウムとアルゴンのモル比熱(モル熱容量)の値が等しい。この理由をp.3：(1.2)式を使って簡単に述べよ。p.11：＜補足３＞も参照

例題４(解)

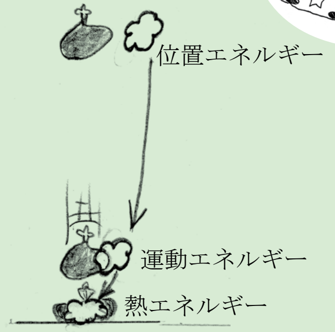


図2.5 エネルギーの移り変わり

③（三態変化と熱：融解熱・蒸発熱）

水(H_2O)には，氷・水・水蒸気の３つの状態があるが，一般に物質の固体・液体・気体の状態を物質の**三態**という。また，水(H_2O)は，通常は温度により，氷(固体，固相)↔水(液体，液相)↔水蒸気(気体，気相)のよう変化するが，このような変化を一般に**三態変化**[*1]という(図2.8)。p.11：表１の「水」と「水蒸気」を比べると，同じ物質(H_2O)であっても比熱が大きく異なってる。これは，分子レベルでの構造が大きく異なるためである。

三態変化に際しては「熱の出入りがあるのに温度は変化しない」という現象が起きる。0℃の氷を融かして水にするとき，熱を加えるにもかかわらず，融け出た水の温度は0℃のままなのである。これは，分子･原子の結合を考えると理解できる。

固体が最も結合の強い状態(縮こまった状態)で，結合に関する位置エネルギーが一番低い状態である――ばねに例えると自然の長さの状態。したがって，固体(氷)→液体(水)，液体(水)→気体(水蒸気)の変化では，分子の結合を解くためにエネルギーを加える必要がある(図2.9)。逆に，気体→液体，液体→固体の変化では，余分なエネルギーを奪う(冷やす)必要がある。これらのエネルギーは主として熱として出入りし，**潜熱**と呼ばれている(温度を変化させない熱という意味だろう)。固体－液体の変化に伴う潜熱を**融解熱**，液体－気体では**蒸発熱(気化熱)**という。

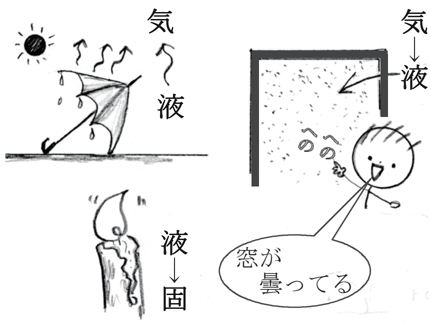


図2.8　物質の三態変化の例

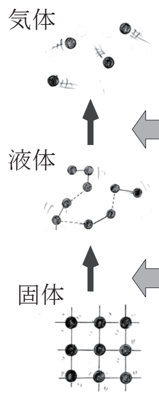


図2.9　固体→液体，液体→気体 の変化では，結合を解くためにエネルギー(熱)が必要。

＊1　三態変化に限らず，一般に物質の状態が大きく変化する現象を**相転移**という。黒鉛(グラファイト，固相)からダイヤモンド(固相)になるのは三態の変化ではないが相転移の例である。

例題５ 気体にするのは大変なんだ〜

−20℃の氷18gをすべて100℃の水蒸気にするまでに加える熱は何Jか。水，氷の比熱をそれぞれ4.2J/(g･K)，2.1 J/(g･K)とし，1 atmでの水H_2Oの**融解熱**を330 J/g，**蒸発熱**(100℃)を2300 J/gとして計算せよ(まずは1gあたりで計算するとよい)。大気圧は1 atmで，水の温度上昇の際の蒸発は無視せよ。

例題５(解)　とりあえず1 gあたりで計算すると：

[氷を温める] −20℃の氷1 gを0℃の氷にするまでに

q_1＝2.1 J/(g･K)×{0−(−20)}K＝42 J/gを加える。

[氷→**水**] 0℃の氷1 gが0℃の水になるとき

q_2＝3.3×10^2J/gを加える。

[水→**湯**] 0℃の水1gを100℃の湯にするまでに

q_3＝4.2 J/(g･K)×100 K＝4.2×10^2J/gを加える。

[水(湯)→**水蒸気**] 100℃の水(湯)1 gを100℃の水蒸気にするときに

q_4＝2.3×10^3J/gの熱を加える。

以上より，求める熱は

$$Q=(q_1+q_2+q_3+q_4)\times 18\ \mathrm{g}$$
$$=(42+3.3\times10^2+4.2\times10^2+2.3\times10^3)\times18=5.56\times10^4\fallingdotseq 5.6\times10^4\ \mathrm{J}$$

温度変化の概要は図2.10のようになっている。

q_1〜q_4の値を比べてみよう。q_4(湯→水蒸気)の値が飛び抜けて大きいことが分かる。固体・液体が気体と比べて如何に強く結合した状態(縮こまった状態)であるかが伺えるデータである。

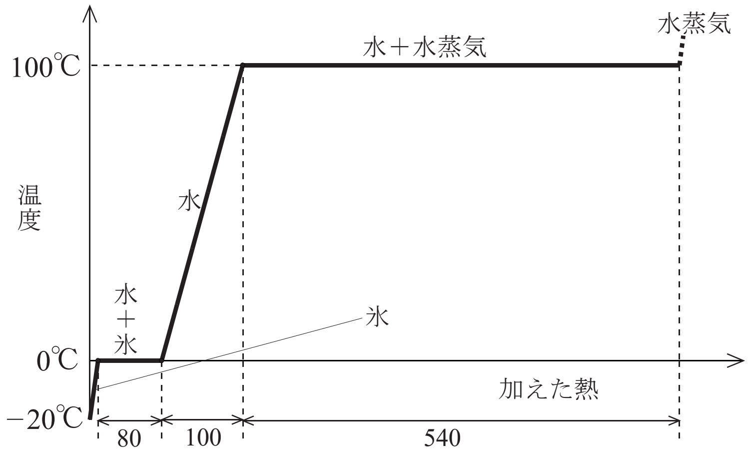


図2.10「氷→水→水蒸気」の変化における，加えた熱と温度変化の関係。水0℃→100℃に要する熱を 100 としている。蒸発に要する熱が非常に多いことに注目。

＜補足４＞　**「え〜，水は100℃になる前でも蒸発するでしょう?！」**

例題５を解いて疑問に思った人もいるでしょう。「100℃以下だって蒸発するよねッ！それって，無視できることなの？」

確かに無視できる現象とは言えないですね。洗濯物を干すのに100℃にはしないものね。

水は100℃以下でも蒸発するし，水の蒸発熱は温度が低いほど大きい(10%程度の違い)。しかし，ヤカンで湯を沸かすような例では，実質的には沸点100℃に達してからの蒸発の量が大半を占めるので「100℃以下における蒸発に必要な熱は例題５

(解)の q_4 の中に入れた」と考えても構わないのである。こんな実情があって「水の温度上昇の際の蒸発は無視」としたのだった。

なお，例題５(解)において，q_3，q_4の計算方法が厳密に成り立つのは図2.11の状況である：0℃の水だけをピストン付きのシリンダーに閉じ込め，圧力一定(1atm)に保ちつつ熱し，すべてを100℃の水蒸気にする。このような道具立てだと，100℃に達して初めて蒸発が始まる。

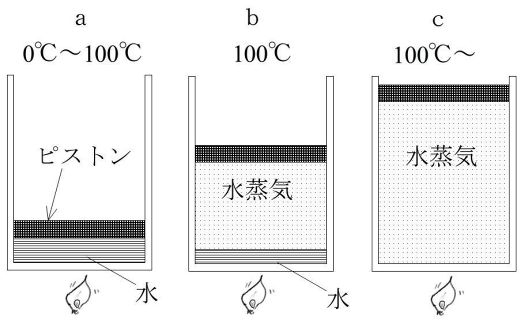
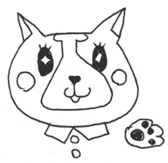


図2.11　0℃の水のみをピストンの下に閉じ込め，圧力を一定(1 atm)にして熱していく。a では蒸発を生じず，b で水が水蒸気に変化していく。

１６　Aさんは傾斜角30°の雪面をスキーで滑り降りている。等速で直滑降(最大傾斜の向き)であるとして，雪面に沿って10 m滑り降りるごとに何gの雪が解けているか概算せよ。Aさんとスキーは合わせて60 kg，雪は0℃で融けて0℃の水になるとせよ。水(H_2O)の融解熱は330J/g，重力加速度をg＝9.8 m/s^{2}として計算せよ。

１７　運動をしたときにかく汗は，体温の上昇を抑えている。50 kgの人の36.5℃→37.5℃の体温上昇を，発汗のみによって抑えるためには，何gの汗をかく必要があるだろうか。人間の“比熱”を水と同程度の4 J/(g･K)，水の蒸発熱を2000 J/g，汗は水であって，すべて蒸発するとして概算せよ。



＜補足５＞　熱運動と融解熱･蒸発熱

少量のアルコールを皮膚に塗り付けるとス～っとする。通常この現象は「液体のアルコールが蒸気(気体)になるとき，蒸発熱（気化熱）を奪うからだ」と説明する。それはそれで良いのだが，これを熱運動のレベルで考えてみよう。

液体の蒸発とは，液体を構成する分子が気体分子として飛び出して行くことだ。飛び出して行く分子は，表面付近の“元気のよい分子”の一部だが，それは運動エネルギーを多くもつ分子のはずだから，そんな分子を失った液体は，熱運動のエネルギーの平均値が低下する(図2.12)。それは液体の温度が下がったことを意味する(p.3：(1.2)式)。それでス～っとする。

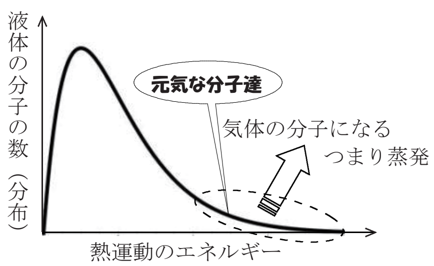


図2.12　例えば20℃の液体の中にも，熱運動の速い分子、遅い分子がある。その分布を表したグラフ。“元気な分子”の一部が気体分子へと飛び立つ。

ちなみに“元気のよい分子”をもらった空気側は，温度が上がるのかというと，そうはならない。液体→気体の過程で，分子は結合を振り切って飛び出して行くわけで，その際に蒸発熱に対応するエネルギーを失い，結局は“平凡な分子”になってしまうのだ。

3．熱エネルギーの移動と熱平衡

「水や銅に熱が加わるとどのくらい温度が変化するか」ということを学んできました。キーワードは熱容量・比熱でしたね。それから，氷が水になるときとかは，ちょっと変則的だった。水が蒸発するときはさらに変則的だった。

さてここでは，熱エネルギーが場所を変えて移動する具体的な仕方(手段)に注目し，さらにその結果がどうなるかを考えていきましょう。私達の旅行でも移動手段には“歩き”があったり“飛行機”があったりするけれど，熱エネルギーの旅にも似たようなことがある。それに“旅の目的(？)”もちゃんとあるのです。

①（熱エネルギーの旅と不可逆性）

熱エネルギーの移動の仕方をまとめておこう。“熱い肉まんを手に持って歩く”のも熱エネルギーの移動に違いないが，ここでは熱現象そのものの性質としての「移動」に注目しよう。熱エネルギーの主要な移動パターンとして次の３つを挙げることができる。どれも身近な現象である。

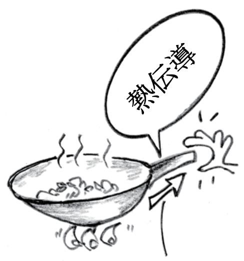


図3.1　熱伝導の例：原子間の相互作用で熱運動のエネルギーが移動していく。

熱伝導　温度の異なる物体を接触させると，高温の物体から低温の物体へ熱エネルギーが移動する(図3.1)。これを**熱伝導**という。熱伝導は，原子どうしの相互作用によって，熱運動のエネルギーが隣り合った原子間を直接に移動していく現象である：「乱雑さ」が直接乱雑に伝わっていくのである。ふつうに「熱の移動」と言えば，熱伝導を意味している[*1]。

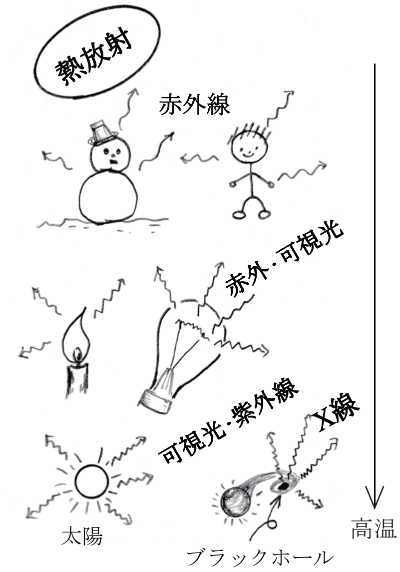


図3.2 熱放射の例：熱運動によって電磁波が放射される。放射される電磁波の種類は，温度によって変化していく。

熱放射　あらゆる物体が，それを構成する原子・分子の熱運動に伴って**電磁波**を出している。これを**熱放射**という(図3.2)。これも，熱エネルギーが他の物体に移動する一つのパターンである。

熱放射は物体の温度によって様子が異なる。500℃程度以下では**赤外線**が放出され，500℃程度を超えるとさらに**可視光**も放出される（炭火，炎，電球のフィラメントなど）。もっと高温になると，赤外線･可視光とともに紫外線やX線も放出される（恒星などの高温ガス）。

赤外線，可視光，紫外線，X線･･･は振動数(波長)の異なる電磁波であり，温度が上がるにしたがって，振動数の高い(波長の短い)電磁波が熱放射として放出されるようになる。また，それとともに，放射されるエネルギーの総量も急激に多くなる。

なお，赤外線は身体などを温めるので，熱線とも呼ばれるが，熱放射(電磁波)のエネルギー自体は熱エネルギーとは言わない。原子・分子の熱運動ではないし，決して乱雑な形のエネルギーで

はないからだ。

対 流　大気や部屋の空気は，温度差による密度の違いが原因となって，条件によっては循環するような動きを起こす。この現象は**対流**と呼ばれている(図3.3)。対流は通常，熱伝導や熱放射に比べ大量の熱エネルギーの移動をもたらすので，多くの場面で熱エネルギーの移動の主役となっている。鍋の湯が全体的に温まるのは，主として対流による。教室の暖房も同様である――ちなみに，対流によって温かい空気が冷たい空気と混ざり合い(接触)，熱伝導によって冷たい空気が温まるのである。

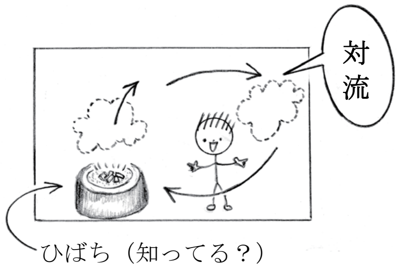


図3.3　対流の例：温まって膨張した気体(や液体)が上昇し，熱エネルギーを大量に運んでいく。

熱伝導・熱放射・対流によるエネルギーの移動では，温度差をなくす向きにエネルギーが移動していて，温度差をつくり出すような“逆進行”の現象は生じない。これらの例に限らず一般に，熱が絡む現象はどれをとっても“逆進行(ビデオ逆再生)”が生じず，「逆が生じない」ので**不可逆現象**(不可逆過程)と呼ばれている――後述の「５.熱力学第２法則」で詳しく扱う。

＊1　物理学の専門用語としての「熱」は，「熱伝導での熱エネルギーの移動」を意味している――「仕事」という用語が，少なくとも運動の分野では「力によるエネルギーの移動」を意味していることと似ている。

例題６[考察]　セーターはなぜ暖かいの？

固体に比べ気体は熱を伝えにくい。この理由を説明せよ。実際，セーターや種々の断熱材(発泡スチロールなど)は，この性質を利用している。

例題６(解)　固体を構成する原子は，隣接する原子とつねに強く力を及ぼし合っているので (p.2：図1.1)，例えば物体表面の原子の熱運動が激しくなると（温度上昇），隣接したすぐ奥の原子にそのエネルギーが速やかに伝わっていく。一方，気体の場合は，エネルギー伝達は原子どうしの衝突によってのみ行われる。原子どうしは頻繁に衝突をくり返してはいるが(p.6：＜補足１＞)，固体に比べるとエネルギーの伝わり方は非常に遅い。セーターや発泡スチロールは空気を多く閉じこめていて，熱が伝わりにくい。

★
「熱伝導」と「比熱（熱容量）」が混同しやすいですが，これらは基本的に無関係です．熱伝導率は単位からわかるように W(＝J/s) があるため，単位時間当たりの物理量となります．一方で比熱（熱容量）は基本的に時間とは無関係の物理量です．この事柄を理解した上で p.18 の例題 7 を考えると，すっきりすると思います．

②（熱平衡）

さて，熱エネルギーの旅の“目的地”は･･･。それは熱エネルギーの移動が，基本的には「高温から低温へ」というように，向きが決まっている点にはっきり現れている――言い換えると，①でも述べた「温度差をなくす向き」。で，少し大袈裟(？)に言うと“最終目的地”は，「みんな同じ温度の状態」。一度そうなると，元の状態(高温と低温に分かれた状態)には，決して自然には戻らないのだ。

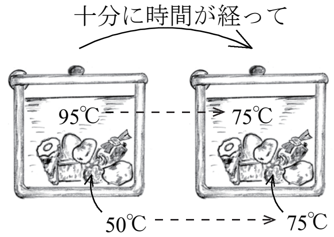


図3.4 熱平衡の例：保温なべの内部でたれと具材の温度が異なっていても，温度差に応じて熱エネルギーの移動が生じ，遅かれ早かれ熱平衡に達する。

理想的な魔法ビン・保温鍋を考えよう。理想的とは，外部との熱のやり取りがないという仮定である。そうすると，はじめは内部に温度の違う部分があっても，熱伝導・熱放射･対流によって温度差をなくす向きに熱エネルギーの移動が生じ，十分に時間がたてば温度は一様になるだろう(図3.4)。温度が一様になれば，熱エネルギーの移動はなくなる。この状態を**熱平衡**の状態という。

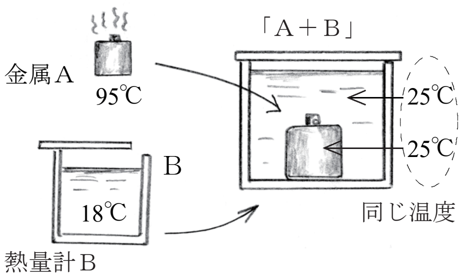


図3.5　95℃の金属Ａと18℃の熱量計Ｂ(容器＋水)が接触していると，しばらくして，全体が同じ温度になる(熱平衡)。
これを利用して，金属Ａの比熱を測定することができる。

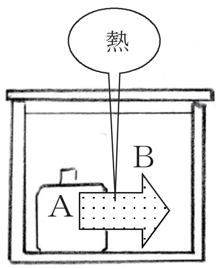


図3.6　ＡからＢへ熱が移動

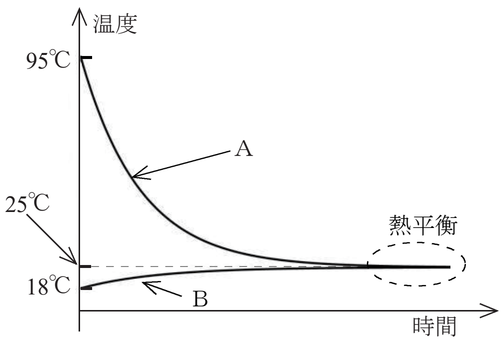


図3.7　金属Ａから熱量計Ｂへ熱が流れ，両者の温度が近づいていく。十分に時間が経つと，全体が熱平衡に達し，同じ温度になる。

図3.5のように，高温の物体Ａと低温の物体Ｂを接触させたなら，ＡからＢへと熱が移動し(図3.6 熱伝導)，外部との熱のやり取りがない状況で十分に時間が経つと，熱平衡に達する(図3.7)。この場合，エネルギー保存の法則により次式が成り立つ。

$$\text{物体Ａから出た熱} = \text{物体Ｂに入った熱} \qquad \cdots \ (3.1)$$

図3.5～図3.7は，金属の比熱を測定する実験を描いている。熱量計Ｂの熱容量が分かっていれば「物体Ｂに入った熱」が計算でき，金属の質量が分かっていれば，比熱 c を未知数として「金属Ａから出た熱」が表現でき，(3.1)式を使って比熱 c が求まるのである(問題２３)。

例題７[考察]　身体温度計(！)での測定：体感温度

休日の物理室の中は，例えば20℃のほぼ熱平衡の状態と見なしてよいが，机の上に置いてあるマフラー，水，鉄塊の「体感温度」はそれぞれ異なる(図3.8)。この理由を説明せよ。

図3.8

例題７(解) p.20：図3.9を参照。（物体の温度が手の温度よりも低いとして）手で物体に触れると，①手から物体に熱が移動し，②物体の表面付近の温度が上がる。そのため，③物体内部への熱の移動(熱伝導)が生じる。

鉄塊のように熱伝導がよい(熱伝導率が高いという)と，熱は鉄塊内部に素速く移動し，手で触れた部分の温度はあまり上がらない。したがって，手から鉄塊へ熱が移動し続け，手が冷える。

マフラーのように熱伝導がわるいと，手で触れている部分の温度は，すぐに手の程度まで上がってしまう。したがって，手から熱があまり出ていかず，手は冷えない。　キーワードは熱伝導！

p.16：例題６も参照のこと。

例題８　自然界はだいたい熱平衡になってるのかなぁ？？

地球は外界(宇宙)と熱平衡の状態になってるの？人間の身体は外界(大気)と熱平衡の状態になってるの？

例題８(解)　地球も身体もいつもほぼ同じ温度を保ってはいるが，周囲と熱平衡にあるわけではない。地球の場合，太陽から主として光のエネルギー（太陽表面の6000 Kの温度に伴う熱放射）を受け，同じ量のエネルギーを主として赤外線（これは地球表面の300 K程度の温度に伴う熱放射）で放出している。「エネルギーが，高温の太陽から地球を経由して低温の宇宙空間に移動している」という図式になっていて，地球のエネルギー収支（入る量－出る量）はほぼゼロだが，熱平衡ではない(**非平衡の定常状態**という：図3.10)。熱平衡なら全部同じ温度。

身体も地球の場合と同様，いや，もっと積極的に外界の温度の変化にめげず，体温を一定に保っている：熱平衡どころではない！

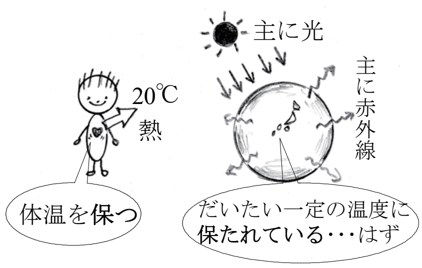


図3.10　人も地球も，ほぼ一定の温度を保っているが，熱平衡ではない。エネルギーが流れている。

＜コラム２＞　熱力学第０法則

熱平衡に関して「え、それが法則?！」って感じの法則がある。第１，第２の後で「やっぱり，初めに言っとかなくてはね」と認識されたので，正式に第０法則と名付けられている。それは･･･

「物体Ａと物体Ｃが熱平衡になっていて，物体Ｂと物体Ｃが熱平衡になっているなら，物体Ａと物体Ｂを接触させても熱平衡になっている」

これが法則？と思っちゃいますね！だって「ＡとＣが同じ温度で，ＢとＣが同じ温度なら，ＡとＢも同じ温度」ってことだもの･･･でも第0法則は「温度とはそういうもの」ということを言っていて，現在では，この法則に基づいて温度が理論的に定義されているのです。

＜コラム３＞　ここでちょっと宇宙の話を

水と湯を混ぜると，しばらくして熱平衡に達し，ぬるま湯になる。もし，このぬるま湯を外部との接触がない状態に置くと，永遠に「同じぬるま湯状態」であり続け，巨視的には何の変化も生じなくなる。熱平衡はその意味で巨視的状態の終着点である。

さて，宇宙全体は確かに“外部”との接触がない。となると，宇宙は最終的には熱平衡に達し(全体に一様な温度)，何の変化も起きなくなるの？･･･それが，宇宙の最後？？

19世紀後半，上述のことが話題(宇宙の熱死と呼んだ)になっていたとのことだ。そして，さらに「今，宇宙は熱平衡(一様な温度)でないから，宇宙は永遠の過去から存在しているのではない」という論考もあったそうだ。

現在では理論と観測結果から宇宙の年齢は138億年と考えられている(確かに∞歳ではない！)。ちなみに宇宙空間は加速膨張中だというし(その原因は謎でいっぱい：ダークエネルギー)，我々を作っているような普通の物質は少数派で，まさに謎の物質がいっぱいあるようなのだ(ダークマター)。

で，宇宙は∞の未来には熱平衡になるの？これがね，そう単純ではないようだ。電子とかがふらふらしているだけの熱死のような殺風景な宇宙を予想する理論家も確かにいるけれど，「宇宙はくり返す」と言う人もいる。いずれにしても，上述のように基本的に分からないことが多いので，ズバリこれという予想はまだまだ出そうにないのが現状なのだ。ま，だから面白いとも言えるね！

１８　「星空(＝よく晴れた日)の夜は冷える」この理由を説明せよ。

１９[調べる]身近な熱放射の例をいくつかあげよ。蛍光灯やLEDの光は熱放射によるものか？

２０[実技・考察]赤外線放射温度計は，物体から出てくる赤外線を捉えて物体の温度を測定している(図3.11)。では，赤外線放射温度計を氷に向けてみよう！まずは0℃程度が表示されることを確認せよ。氷からだって赤外線が出ていることをイメージしよう。また，赤外線放射温度計を空に向けてみよう。さらに，半田ごてのような熱い物体に向け，途中に透明なガラス板を入れたり出したりする。

　さて，それぞれの結果について議論してみよう。

２１[調べる] 魔法瓶(水筒)はどのような方法で「熱の出入り」を防ぐ工夫をしているか。熱伝導・熱放射・対流を無くせばよいわけだが。

２２[実技・考察]「ラジオメーター(図3.12)」について次の問に答えよ。

(1) 光を当てると回転する。この理由を説明せよ。

(2) ある程度光を当てた後に暗い場所に置くと，光を当てた時とは逆の向きに回転し出す。この理由を説明せよ。

２３　図3.13(図3.5と同じ内容)のように，質量100 g の銅製容器に70gの水が入れた熱量計Ｂの全体の温度が18℃であった。この水の中に95℃に熱した80 g の金属Ａを入れ，十分に撹拌しながら水の温度の変化を見ていたところ，しばらくして熱平衡に達し，水温は25 ℃であった。水の比熱を4.2 J/(g･K)，銅の比熱を0.40 J/(g･K)とし，外部との熱のやり取りはないとして金属Ａの比熱を求めよ

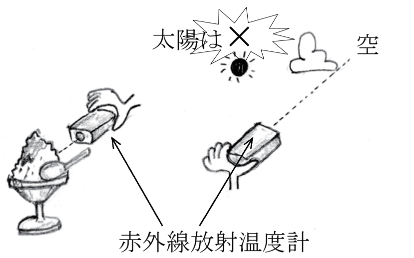


図3.11

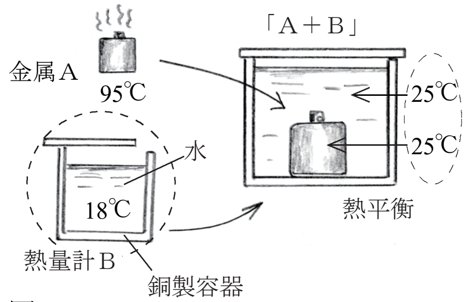


図3.13

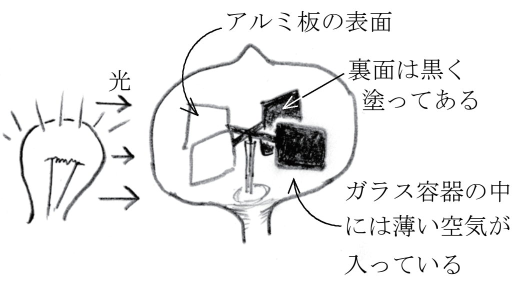


図3.12 ラジオメーター：光を当てると内部の羽根車が回り出す(上から見て反時計回り)

例題７(解)

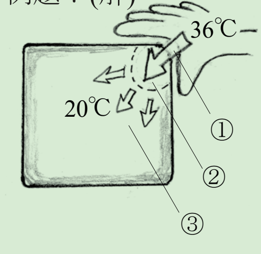


図3.9　①手から鉄に熱が移動
②手で触れた部分の温度が上昇
③鉄は熱伝導がよいので，熱が素速く拡散

4． 熱力学第１法則

ここまでの話題においても，p.10：例題４の“銅の50m落下”などで，熱エネルギーの「エネルギー」を意識する必要性があった。摩擦熱もその例だが，熱を“物質”と捉えていた時代の人々は，例えば木片を摩擦すると「そのときだけ木片が変質し，比熱が下がって温度が上がる」という説明をしていたそうだ。

さてさて，ここからは「エネルギー」が大活躍。まさにキーワードになる。もちろん「熱」も活躍するが，「熱」はエネルギーの伝わり方の一例(熱伝導)という位置付けになる。

車のガソリンエンジンでも発電所のタービンでも，結局は熱による気体の膨張を利用して動力（仕事）を取り出している。一方，気体を素速く圧縮すると温度が上がる･･･「仕事」という形で気体にエネルギーを与え，熱運動を激しくさせているのだ（仕事＝力×変位 だったよね！）。これはエンジンやエアコンなどの中でも，重要なはたらきをしている。というわけで

『物理はお友達Ⅰ』１３．③(力によるエネルギーの移動：仕事)，
および　⑤(力の向きと仕事)

を復習しておいてくださ〜い！

熱の現象に力が関係してくる･･･だからこの分野は熱力学と呼ばれている。

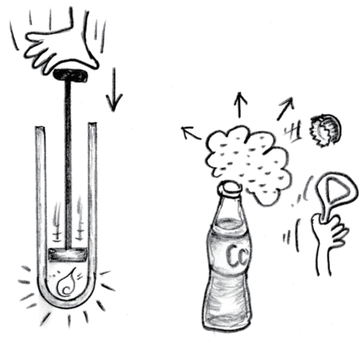
①（断熱過程）

お風呂に入れば湯で身体が暖まる。高温の物体(湯)から低温の物体(身体)に熱が移動したのだ。物体に熱を加えれば，物体を構成する原子の熱運動のエネルギーが増加する。これを**内部エネルギー**の増加というが，それは通常，温度の上昇を意味する。

ところが気体の場合，図4.1のように圧縮・膨張により，温度の上げ下げ(内部エネルギーの変化)が比較的容易にできるのである。“熱のお世話(熱を加えたり奪ったり)”にならなくても温度が大きく変化するのである。特に，熱の出入りがない状況での圧縮・膨張をそれぞれ**断熱圧縮･断熱膨張**(総称して**断熱過程**)と言い，効果的に温度を変化させることができる。

断熱過程を実現させるには「急激」に圧縮・膨張させればよいのである。そのような場合，熱の出入りが無視できるからである（熱の移動には時間が掛かるが，圧縮・膨張によるエネルギーの移動は素速いのである）。

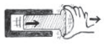
「熱することなく熱くできるし，冷やさなくても冷たくできる」のである *!!*



a 断熱圧縮　b 断熱膨張

図4.1 a：空気を急激に圧縮することで，容器内の綿に火が点く。b：気体が急激に膨張し，霧が発生する(炭酸飲料水)。
どちらも，熱の移動を伴わずに温度が変化している点に注目！

②（気体にする仕事，気体がする仕事とエネルギーの移動）

図4.2のように，**気体を圧縮**すると  き，ピストンから気体に働く力 F は正の仕事をする。つまり，ピストンから気体にエネルギーが移動する。一方，図4.3のように**気体が膨張**すると  き，気体からピストンに働く力 F_{gas} が正の仕事をする。つまり，気体からピストンにエネルギーが移動する。このように，圧縮･膨張に伴って仕事という形でエネルギーが移動する。

気体に働く力 F がする仕事を「気体にする仕事」と呼び，記号 W [J]で表そう(図4.2)。また，気体がピストンを押す力 F_{gas}(気体の圧力による力)がする仕事を「気体がする仕事」と呼び，記号 W_{gas}[J] で表そう(図4.3)。

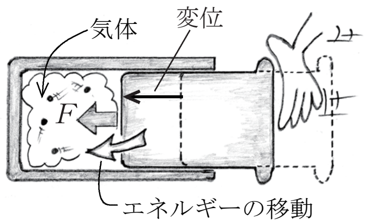


図4.2 圧縮：ピストンは気体に**力 F** を加えて動く(変位する)。つまり，力 F は仕事をする。
仕事＝力×変位
力 F がする仕事を「気体**に**する仕事」と呼び，記号 W で表そう。仕事は力によるエネルギーの移動を意味し，圧縮の場合，$W>0$ (正の仕事)である。

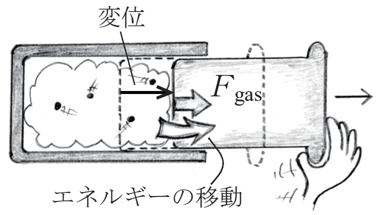


図4.3 膨張：気体がピストンを力 F_{gas} で押し，ピストンが動く(変位する)。つまり，力 F_{gas} は仕事する。
力 F_{gas} がする仕事を「気体**が**する仕事」と呼び，記号 W_{gas} で表そう。
膨張の場合，$W_{gas}>0$ である。

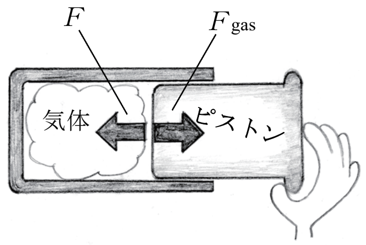


図4.4　力 F と力 F_{gas} は作用反作用のペアであり，同時に現れてくる。また，ピストンが動くとき，F と F_{gas} の作用点の変位は等しいから
$W=-W_{gas}$
である。この式は「エネルギーが仕事によってピストン・気体間を移動している」ことを語っている。を意味していることを理解しよう。

W と W_{gas} の違いは，作用反作用のペアの力(F or F_{gas})のどちらに注目するかの違いである(図4.4)。したがって，圧縮･膨張の際には W と W_{gas} は同時に生じていて，次のような単純な関係にある。

W と W_{gas} の関係　　$W=-W_{gas}$

$$W=-W_{gas} \qquad \cdots(4.1)$$

圧縮の場合「ピストンが気体にエネルギーを与えている：$W>0$」が，言い方を換えれば，そのとき同時に，「気体がピストンからエネルギーをもらっている：$W_{gas}<0$」わけである。
（Ｉの問題85を参照）

③（熱力学第１法則）

熱の移動だけでなく圧縮･膨張(仕事)によっても気体へのエネルギーの出入りがある(図4.5)，ということが ②で分かった。

図4.6のように，物体に出入りする熱を Q [J]（入る熱の符号を正としよう），気体にした仕事を W [J]，気体がした仕事を W_{gas}[J]とする。Q，W，W_{gas} による気体の内部エネルギーの変化を ΔU[J]とすると次式が成り立つ。内部エネルギー U[J]とは，ここでは熱運動のエネルギーの和と考えておいてよい。

図4.5 気体に出入りするエネルギーは，熱としてだけでなく，圧縮・膨張(仕事)によるものもある。

$$\boxed{\text{内部エネルギーの変化}\quad \Delta U = Q + W = Q - W_{gas}} \quad \cdots(4.2)$$

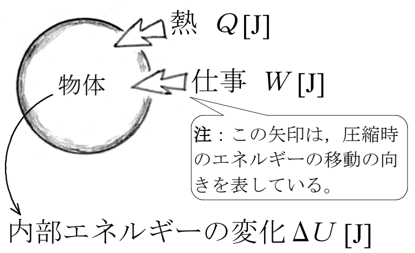


図4.6 物体に熱が加えられ，同時に仕事がなされる場合のエネルギーの流れ(この図は $Q>0$，$W>0$ の例)

これを**熱力学第１法則**という。(4.2)式は熱を含めたエネルギー保存の法則である。内部エネルギーの増減は通常，熱運動のエネルギーの増減であり，温度の昇降を意味する＊1。

＊1　p.12：③(三態変化と熱)のように，三態変化を伴う過程では，内部エネルギーの増減は単純には温度昇降(熱運動のエネルギーの増減)と結びつかない。

例題９　空気の瓶詰めと袋詰め

気体を熱する場合，次の(ａ)，(ｂ)(図4.7参照)で温まり方に違いがあるか(温度上昇に違いはあるか)。また，教室の暖房はどちらに似ているか。ただし，(ａ)と(ｂ)で気体の量(n[mol])は同じで，与える熱も同じとする。また，「与える熱」とは逃げた熱も含めた「正味として与えた熱」の意味である。

(ａ) 体積を一定にする　　(ｂ) 圧力を一定(体積可変)にする

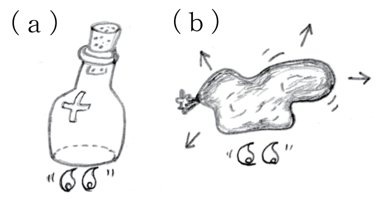


図4.7　同じ量の気体を，同じ量の熱で温める。
（ａ）体積一定　（ｂ）圧力一定で，温まり方に違いはあるか？

例題９(解) (p.24：図4.8参照)どちらの場合も熱 Q を加えれば温度が上がり(熱運動が活発化)圧力が高くなるが，体積一定(**定積過程**という)の場合，仕事が $W_{gas}=0$ なので，内部エネルギーの変化は $\Delta U_{定積} = Q - W_{gas} = Q$ であり，与えた熱がすべて内部エネルギーの変化になる。

一方，圧力一定(**定圧過程**という)の場合，熱 Q を加えると気体の体積が増加し，気体がする仕事は $W_{gas}>0$ となって，内部エネルギーの一部が仕事という形で外部に出ていく。内部エネルギーの変化は $\Delta U_{定圧} = Q - W_{gas} < Q$ であり，$\Delta U_{定圧} < \Delta U_{定積}$ である。したが

★
物質量を一定，上昇温度を基準（たとえば１℃）にし，その温度にするための熱エネルギー量をそれぞれの過程で考えることができ，それらを「(a) 定積モル比熱（＝ C_V）」「(b) 定圧モル比熱（＝ C_p）」といいます．このモル比熱は，分子構造の違いで値が異なるが，同じ分子構造だとほぼ同じ値になります（p.11 の表１参照）．また，説明にあるように $C_V < C_p$（もっと詳しく言うと $C_p = R + C_V$）となることが知られています．

って，(ａ)の定積過程のほうが温度上昇が大である。 この事実は，同じ空気でも，条件(定積，定圧)によって比熱が異なるという重要なメッセージを伝えてくれている(約5：７の比)。

教室の窓やドアに完璧な目張りをすれば(ａ)タイプになり暖まりやすいが，通常は(ｂ)タイプである。空気が膨張して隙間から漏れている。ちなみに(ａ)タイプにすると，扉を開けた途端に断熱膨張！

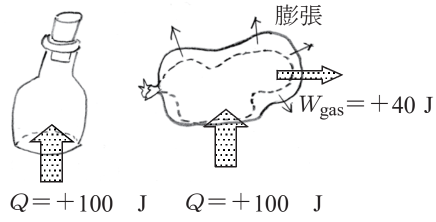


図4.8　一般に，定圧過程の場合は膨張・圧縮が伴い，「仕事」の形でエネルギーの出入りがある。

例題１０[考察]　エアコンでなぜ冷える？氷も入ってないのに

図4.9はエアコン冷房の基本概念を表している。パイプの中を矢印の向きに移動(循環)する気体(**作業物質**という)に対してＡでは断熱圧縮，Ｂでは断熱膨張を行う。

このようにして冷房ができる理由を説明せよ。 また，この“装置”を使ってエアコン暖房にするにはどうすればよいか。

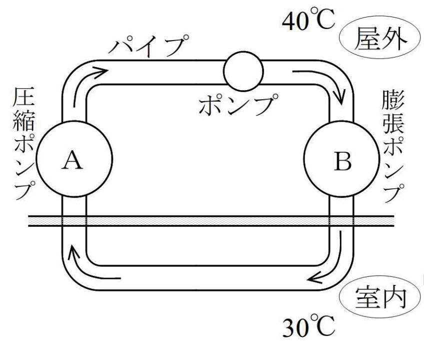


図4.9 エアコンの基本概念

例題１０(解)　例えば図4.10のように，50℃の作業物質の温度を，膨張ポンプＢ(断熱膨張)を経て10℃に下げれば，室内のパイプに室温より低い作業物質が流れて熱を吸収する。次に，圧縮ポンプＡ(断熱圧縮)を経て作業物質の温度を屋外の気温より高い60℃にすれば，屋外では放熱する。

こうして，30℃の室内から40℃の屋外に熱エネルギーを運び出すことができる。熱エネルギーを温度の高い側に“持ち上げる”という感じなので，このような装置を**ヒートポンプ**ともいう。

暖房：作業物質を逆向きに循環させればよい。

なお，実際のエアコンでは，作業物質(フロンなど)の液化・気化(気化熱の利用)が本質的に重要なはたらきをしている。また，多くの電力を消費するのは圧縮ポンプ(コンプレッサー)なのである。

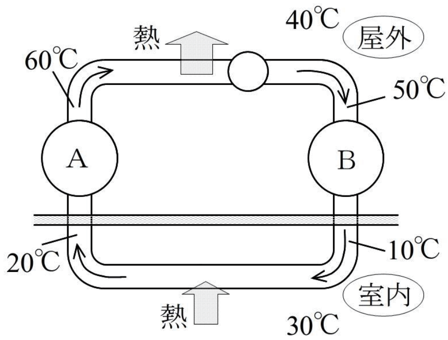


図4.10 室内からは熱を奪い，屋外では熱を放出。熱を30℃の室内から40℃の屋外に移動させている。

＜補足６＞　よく出る質問「圧縮ポンプはいらないのでは？」：例題１０への補足

いい質問ですね～。確かに，ここまでの学習内容だけだと“図4.9の圧縮ポンプはいりません”となるのです！

大前提として，図4.9のように，作業物質が循環している装置を考えます。いま，作業物質の温度が例えば図4.11のように変化しているとしましょう。

作業物質へのエネルギーの出入りを考えると，室内および屋外で「熱」という形でエネルギーを受け取り(これを合計 Q [J]とする)，Ｂでは断熱膨張により「仕事」という形でエネルギーを出している(これを W_{gas}[J]とする)。

さて，作業物質はパイプを一周すれば元の温度に戻るか

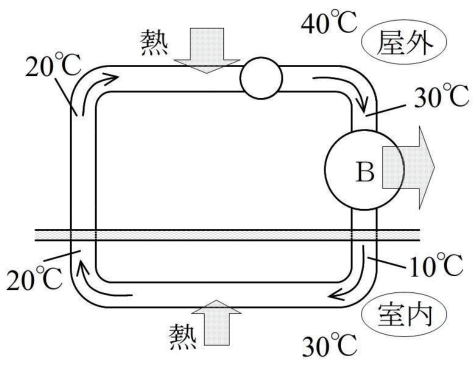


図4.11 膨張ポンプＢで作業物質が冷たくはなるが，熱を 室内→屋外 に運び出すことはできていない。

ら，作業物質全体の内部エネルギーの変化は$\Delta U=0$ J。したがって，熱力学第１法則から$\Delta U=Q-W_{gas}=0$ となり$W_{gas}=Q$。つまり「受け取った熱を全て仕事にしている」ということになる。しかし，実はこれが“自然法則違反！(熱力学第２法則*2違反)”となっているのだ。で，このようなエアコンを作ろうとして，いろいろ工夫を凝らしても，何らかの不具合が必ず生じてしまい，絶対に実現しないと断言できるのです。

＊2　p.30：②(2)　熱を100%仕事に転換する装置は存在しない。

④（圧縮･膨張と仕事）

圧力は，単位面積あたりにはたらく力として定義されている(図4.12)。例えば，圧力p[N/m^2](＝[Pa])の気体から面積S[m^2]のピストンには　$F=pS$[N]の力がはたらく。

室内の空気が温められて膨張するときのように，圧力p[Pa]([N/m^2])が実質的には一定に保たれている過程では，気体がする仕事W_{gas}は簡単に計算できる。体積の変化をΔV [m^3]とすると

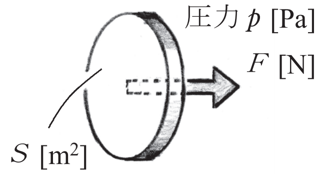


図4.12　圧力p [Pa]は，単位面積あたりに働く力として定義されている。
p [Pa]＝F[N]／S[m^2]

$$\boxed{\text{気体がする仕事}\quad W_{gas}=(\text{圧力})\times(\text{体積変化})=p\cdot\Delta V\quad[\text{J}]}\quad\cdots(4.3)$$

であり(導出は問題３２)，膨張の場合はW_{gas}が正，p.22：(4.1)式よりWは負，圧縮の場合はWが正，W_{gas}は負である。これらの仕事に伴うエネルギーの移動を再度イメージしておこう！(p.22：図4.2と図4.3 参照)

＜補足７＞　“仕事で熱を加える”とは言わないでね！

図4.13のような断熱圧縮において“気体を急激に圧縮して熱を加えると･･･”と言わないでください。“え～？だって熱くなるんでしょ？”と言われそうですが，加えているのは整った形のエネルギー(仕事)なのです。仕事によって空気に整った形のエネルギーを与えたんだけど，それによって気体分子が“自分達で勝手に”熱運動という乱雑な運動を激しくしたのです(p.5：図1.8参照)。ボールを投げるときに「手がボールを押している」のと同じで，図4.13では，ピストンは空気を押して動いているだけ。気体の熱エネルギーは増えるけれどね。

同様に，膨張するときも“仕事で熱が逃げる”とは言わないでね！その場合，“逃げている”のは「整った形のエネルギー(袋が膨らんでいくとか)」であって，熱エネルギー(超乱雑エネルギー)ではない。袋の中の空気の熱エネルギーは減ってるけれどね。

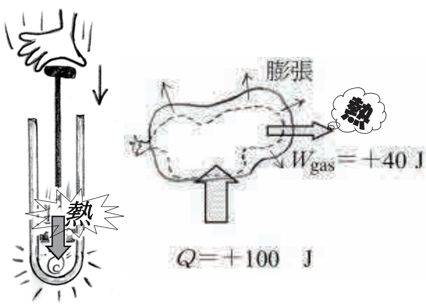


図4.13　これ，*禁句～！！*
・圧縮で熱を与える(温度を与える)
・膨張で熱が逃げる(温度が逃げる)

＜補足８＞　理想気体の状態方程式，圧力の新たなイメージ

薄い気体や高温の気体では，分子間に働く力(分子間力)が無視できる。このような気体の振る舞いは単純であり，**理想気体**と呼ばれている。理想気体の圧力 p[Pa]([N/m^2])は，温度 T[K]，体積 V[m^3]，物質量(モル数) n[mol]と次式のように結びついていて，理想気体の**状態方程式**という(図4.14)。

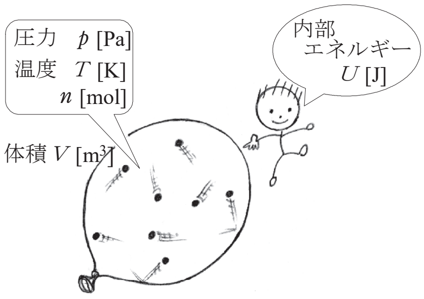


図4.14　p，V，n，T，Uなどは**状態変数**と呼ばれている。

$$p \propto \frac{nT}{V}\ ，したがって\quad p = R\cdot\frac{nT}{V}\quad あるいは\quad pV = nRT \qquad \cdots(4.4)$$

比例定数 R は**気体定数**といい，$R = 8.31$ J/(mol･K)である。p，V，n，T および内部エネルギー U などは**状態変数**ともいい，気体の状態を表現する変数である。

内部エネルギーについて

理想気体の内部エネルギーは，気体分子の熱運動のエネルギーの和であり，内部エネルギー U[J]は絶対温度 T[K]と物質量(モル数) n[mol]に比例する(p.3：(1.2)の式参照)。また，理想気体の状態方程式(4.4)式を利用すると，理想気体の内部エネルギー U は圧力 p と体積 V の積に比例することが分かる。

$$\text{理想気体の内部エネルギー}\quad U \propto nT \quad \cdots(4.5),\quad U \propto pV \quad \cdots(4.6)$$

$$さらに\quad p \propto \frac{U}{V}\ [\mathrm{J/m^3}] \qquad \cdots(4.7)$$

圧力のイメージとしては「力」を思い浮かべるのが普通だが，(4.7)式は，圧力がもつもう一つの「顔」と言ってよいだろう：圧力は内部エネルギーの密度に比例する(問題２９参照)。

２４[考察]熱を与えずに物体の温度を上げる方法をいくつかあげよ(言い換えると「高温物体との接触」以外の方法で内部エネルギーを増加させる方法)。

２５　“圧気発火(←これは商品名！)”(図4.15)などで，ゆっくりと圧縮したのでは発火しない。この理由を述べよ。

２６　断熱過程において熱力学第１法則p.23：(4.2)式はどのような表現になるか。

２７[考察]風が強く吹いている晴天の日に，島や山の上の雲が吹き飛ばされずに乗ったままでいることがある(図4.16)。この理由を述べよ。

図4.15

図4.16

２８[**実技**](**輪ゴム冷暖房？！**) 輪ゴムを素速くギュッと長く伸ばし，すぐに唇の下などに接触させて温度を感じてみよう(図4.17)。逆に，長く伸ばした輪ゴムをサッと縮め，同じように温度を感じてみよう。どちらも，唇の下に軽く当てたまま行うのも効果的。これは断熱過程に違いない。さて，温度変化の理由は？(細かく説明するのは**難**)　p.33：＜コラム６＞参照

図4.17

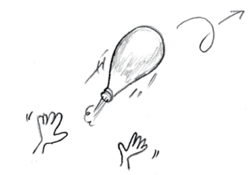


図4.18

２９　“風船ロケット”(図4.18)のエネルギー源は何？

３０(**発展問題**：とても勉強になる！) 図4.19のように，大きなビニール袋に10℃，2.0×10^{-2} m^{3}の空気を入れ太陽光を当てておいたら，中の空気の体積が2.3×10^{-2} m^{3}になった。大気圧を1.0×10^5 N/m^2（＝Pa)とし，袋の中の圧力はつねに大気圧に等しいと見なす。袋の中の空気について次の各問に答えよ。

(1) 温度は何℃になったか。(4.4)式を用いよ。

(2) 空気がした仕事 W_{gas}[J]を求めよ。

(3) 空気の場合，圧力p[N/m^2]，体積 V[m^3]での内部エネルギーは $U \fallingdotseq (5/2)pV$[J]で与えられる。内部エネルギーの変化は何Jか。また，空気に加えられた熱は何Jか。

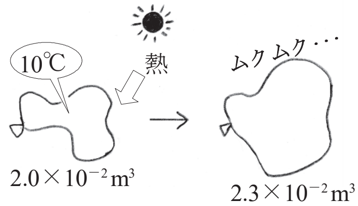


図4.19

３１　図4.20のコックを開けると，気体は真空容器へと拡がる。熱の出入りが無視できるなら，これは断熱膨張に違いないのだが，理想気体(分子間に働く力が無視できる)の場合は温度が変化しない。この理由を述べよ。(ゲイリュサックとジュールが行った実験)

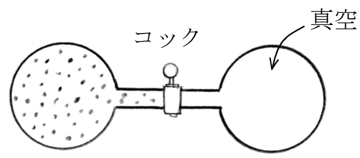


図4.20

★
これは「断熱自由膨張」というもの

３２　図4.21のように，ピストンの付いた断面積 S[m^2]のシリンダー内の気体が，ゆっくり熱せられるなどして圧力p[N/m^2]＝一定ののままで膨張し，図のようにピストンが x_1[m]から x_2[m]に変位した。この過程を用いてp.23：(4.3)式を導出せよ。なお，ピストンが摩擦なくゆっくり動くなら，p＝一定 が実現する。

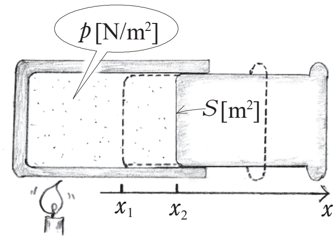


図4.21

３３[**考察・実技**](**ビー玉エンジン**：とても勉強になる！) ビー玉エンジン(図4.22)の作動原理を簡単に説明せよ。内部の空気について，W_{gas}およびW の符号に留意せよ。可能なら，自分たちで組め立てて動かしてみよう。（ビー玉エンジンは，**スターリングエンジン**と呼ばれるものの一例)

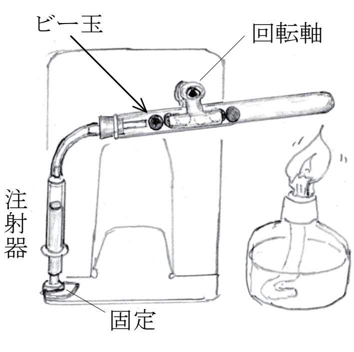


図4.22　ビー玉エンジン

３４[**考察**(**超難**だが考えてみよう)] 宇宙は138億年前，超高温・超高密度の状態からの“大爆発（ビッグバンと呼ばれている）”で始まり，今も膨張を続けている。宇宙の温度が今のように下ったのは，断熱膨張のためだろうか？一方で，宇宙全体が仕事をする相手の物体(外部の物体)は存在しない！その意味で，この問題は問題３１と似ている。(正しく答えるのは**超難**。悩むことに意義のある問題！)

５. 熱力学第２法則

熱の話も終わりに近づいてきた。“終わりよければすべてよし”ではないけれど，これからの話を，「面白い！」と感じてくれたら，たしかに“すべてよし”なのです！だって，熱の最大の特徴がはっきりと現れてくる場面だし，すべての自然現象の根っ子をしっかりと支えている事柄のだから。

熱力学第１法則はもちろん大切だけれど，内容的にはエネルギー保存の法則。前に学んだ力学的エネルギー保存の法則を熱現象にも拡張したものとも言える。

だが，熱力学第２法則は，エネルギー保存の法則とはまったく独立に，厳然として成り立っている自然法則なのだ。身近な(あ、身体の中でも！)いろんな現象からはじまって，宇宙のこと，あるいは「時間はなぜ未来へと進む」なんていう，身近だけど“雲をつかむような話題”の取っ掛かりにもなっているのだ。

①（熱機関と熱効率）

熱を用いて周期的に*[1]動力(仕事)をつくり出す装置を**熱機関**という。蒸気機関，ガソリンエンジン，ジェットエンジン，蒸気タービン(火力発電や原子力発電)･･･と，その例はいろいろあるが，作動原理の基本は，熱運動による気体の膨張を利用して物を動かす，つまり仕事をすることである(図5.1)。しかし，熱エネルギーという乱雑な形態のエネルギーを，仕事による整った形のエネルギーへ100％転換することは原理的に不可能で，熱機関は熱を使って動力を生み出しつつ同時に必ず熱を捨てている。見方を換えれば，どんなエンジンでも必ず熱くなり，周期的に動かすためには冷却が必要になる。

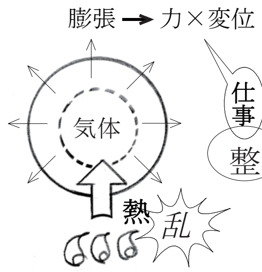


図5.1　熱機関の基本的なはたらき：乱から整を創る。ただし，これを周期的にくり返すものを熱機関という。

以下の議論では，p.27：問題３３のビー玉エンジンを思い浮かべて考えると良い：試験管内の空気が以下で言う**作業物質**である。

熱機関におけるエネルギーの流れは，概ね図5.2のような図式で表される。低温熱源(低温環境)*[2]は，熱を捨てる(冷却する)ために必要となる。熱機関は高温熱源と低温熱源の間で作動するわけで，熱機関が作動するためには**温度差**が不可欠ということになる。

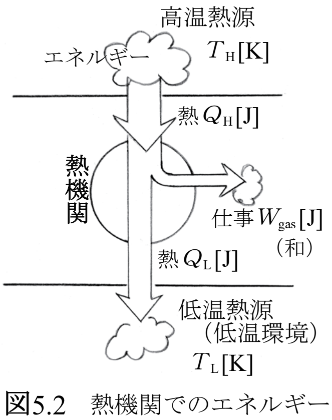


図5.2　熱機関でのエネルギーの流れ。仕事W_{gas}は，ここでは１周期での「正の仕事(膨張)＋負の仕事(収縮)」を意味している。

熱機関が熱を仕事に転換している割合を**熱効率**という。熱機関が**高温熱源**から得た熱をQ_H[J]，熱機関の作業物質が外部にした仕事の和(正味*[3])をW_{gas}[J]，捨てた熱をQ_L[J]として，熱効率は次式で定義されている(ただし，ここでは，Q_Lは絶対値とする)。

$$
\boxed{\text{熱効率}\ \underset{\text{イータ}}{\eta} = \frac{W_{gas}}{Q_H} = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}} \qquad \cdots(5.1)
$$

図5.1式の左から2番目の「＝」は，熱機関が周期的に動いていることから言えることで，その場合，　作業物質の内部エネルギー U は小刻みには変化するが平均としては変化せず，次式が成り立つ(Q_L は絶対値)。

熱機関の内部エネルギーの変化（平均として）　$\Delta U = Q_H - Q_L - W_{gas} = 0$　・・・(5.2)

さらに，熱力学第２法則(の本格バージョン)を用いると，熱効率の原理的な上限 η_{max} が導かれる。 η_{max} は高温熱源の温度 T_H[K]と低温熱源の温度 T_L[K]だけ決まり，次式の通りである。

熱効率の上限　$\eta_{max} = 1 - \dfrac{T_L}{T_H}$　・・・(5.3)

＊1 例えば「爆発」のような“一発勝負”は熱機関ではない。

＊2　**熱源**という用語の意味は「温度が一定で，他の物体に熱を与えたり，他の物体から熱を吸収する物体」であり，必ずしも温度が高いものを意味しない。実際的には，熱容量が十分に大きい物体を意味する。

＊3　ビー玉エンジンを思い浮かべて! 熱機関は周期的に作動することを前提にしているので，熱機関の中の作業物質は，膨張時に正の仕事をしてエネルギーを出力するが，必ず収縮の過程もあり，そのときは負の仕事して外部からエネルギーを受け取っている。正味の仕事とは，膨張時の仕事(正)と収縮時の仕事(負)の和という意味である。

例題１１　テストの点数なら100点まで頑張れるが

$T_H = 1500$ K(約1200℃)， $T_L = 500$K(約230℃) の場合について，熱効率の上限値 η_{max} を求めよ((5.3)式を使う)。

例題１１(解)　$\eta_{max} = (1500 - 500) / 1500 = 0.67$（67%）。ガソリンエンジン(熱効率 $\eta \fallingdotseq 30\%$)における燃料燃焼時・排気時のおよその温度をデータとして用いた。

＜補足９＞　η_{max} は“自然の定め”

(5.3)式の通り， η_{max} の値は T_H， T_L だけで決まり，エンジンの種類・構造・燃料その他には無関係であることに注目しょ

う！　純粋に「熱から仕事へ」あるいは「乱から整へ」の変換に関わる自然法則としての“定め”なのである。

もし皆さんが将来，エンジニアになってエンジンの性能改善に関わったとして，「エンジンの効率を上げよ！何も120%にしろなどとバカげたことは言わない。それは“エネルギー保存則違反”だ。せめて95%以上にせよ！１年間でできなかったら，全員クビだ！」と言われたら，必ず(5.3)式を計算してみてください。計算結果が η_{max}＜95%だったら，さっさと自分から別の会社に移りましょう。

表２　熱効率の値　『データの図典』丸善，『燃焼の科学』共立出版などより

ガソリンエンジン	30 ％	ディーゼルエンジン	40 ％
蒸気機関(機関車)	10 ％	火力発電（蒸気タービン）	40 ％

いろいろな熱機関の実際の熱効率は，技術的な問題が絡んで，意外と低い値になっている。

②（“初代”熱力学第２法則）

熱エネルギーがもつ「アボガドロ定数的な乱雑性！(p.3：例題２参照)」により，その振る舞いは他のエネルギーとはまったく違った法則にしたがう。それは現象の進む向きに関する法則で**熱力学第２法則**という。前にも述べた不可逆性(p.15：３.①)を表現した法則である。

この法則には一見別物のような種々の言いまわし(表現方法)が存在する。初期の，そしてかなりくだけた表現としては，次の(1)，(2)が広く知られている(それぞれ図5.3，図5.4参照)：

(1) **熱は自然には低温の物体から高温の物体に移動しない。**･･･(5.4)

熱伝導は不可逆だということ。ただし，熱の“逆進行”自体は不可能ではない。エアコンがまさにそれをやっている(p.24：例題１０)。ただし，エアコンはそれを実現するためにエネルギーを使っている(自然ではない！電気代がかかるし！)。「自然には」とは，もっと正確に言うと「他に何も変化を残さずに」である。

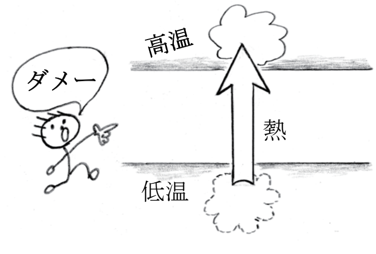


図5.3　“ルール違反”その(1)

(2) **熱を100％仕事に転換する装置(** η ＝1 **)は存在しない。**･･･(5.5)

例えば，エンジンは必ず熱を捨てるということで，言い換えると，熱くならないエンジンは存在しないということ。

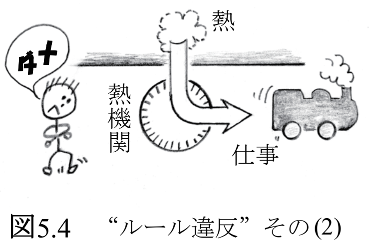


図5.4　“ルール違反”その(2)

例題１２[考察]　これを発見したら世の中が変わる･･･

熱を低温物体から高温物体へ「自然に熱伝導」させる物質(図5.5)がもし発見されたなら，それを使って燃料の補給なしに動き続けるエンジンを作ることができる（**第２種永久機関**という）。どのような仕掛けにすればよいか。簡単に例示せよ。

図5.5　“発見された物質”で上着を作ると，厳寒の中でも･･･

例題１２(解)　例えば p.32：図5.6のように，その物質を利用して，20℃の空気からタンクの水にどんどん熱エネルギーを移動させて湯を沸かし，蒸気機関を動かす。動力(仕事)として得たエネルギーは，いずれは摩擦熱など熱エネルギーとなって環境に戻り，また使える。この装置は永久に燃料なしで動き続ける！･･･でもこれは，エネルギー保存の法則には従っているが，熱力学第２法則違反！

③（不可逆性と熱力学第２法則）

図5.7のように，ある現象Ａを時間反転(ビデオの逆向き再生)したような現象Ｂが現実には起こり得ないなら，現象Ａは**不可逆**であるという。ここで，現象Ｂもエネルギー保存の法則には反していないという点に注目しよう！つまり現象Ｂも熱力学第１法則には従っているのだ。しかし現象Ｂのようなことは絶対に生じないと断言できるだろう。そうであるなら，それも自然の法則であり，それが熱力学第２法則の本質なのである。熱伝導，拡散，摩擦熱･･･は不可逆な現象の代表的な例だが，巨視的な現象は多かれ少なかれ熱の発生や，何らかの拡散(小さくまとまっていたものがバラバラに広がる)を伴い，厳密に見るならすべて不可逆である。

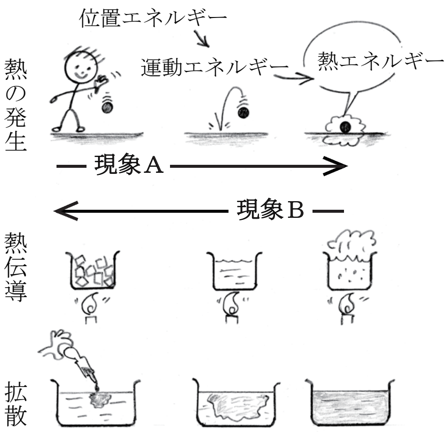


図5.7　現象Ａの「時間反転」が現象Ｂ。現象Ｂは「あり得ない」と断言できるだろう。このような場合，現象Ａを**不可逆現象(不可逆過程)**という。

熱力学第２法則は，初めは前述②のように，熱の振る舞いに関する法則として登場した。その後，「なんで不可逆性が生じるの？」という疑問に対し，原子レベルの視点から答える形で見直しがなされ，現在では熱に限定されない「ありとあらゆる現象」に関わる法則であることが分かっている。物質の諸性質，化学反応さらには宇宙の進化についての議論においても，熱力学第２法則（の現代バージョン）は必須アイテムとして活躍している。さらに言うと「なぜ時間は未来へと一方通行で進むの？」という議論(「時間の矢」という)においてもほぼ主役として活躍している(p.32：＜コラム５＞参照)。

＜補足１０＞　エントロピー

熱力学第２法則の現代バージョンは，**エントロピー**と呼ばれる量で表現されている。エントロピーは，原子レベル(ミクロのレベル)では，乱雑さや構造･秩序の無さを表す量といえる。

熱力学第２法則現代バージョンは「すべての現象において，エントロピーは一定または**増大**する」と言っている。この法則は，エネルギー保存の法則とともに，きわめて応用性に富んだ法則で，ほとんど全ての自然現象に関わっている。

現代社会の「エネルギー問題」も，物理・化学の視点で見ると，実は「エントロピー問題」なのである。エネルギーの総量は減らないが，その質の劣化(エントロピー増大，主として熱エネルギーの増加)が問題なのである。

例題１２(解)

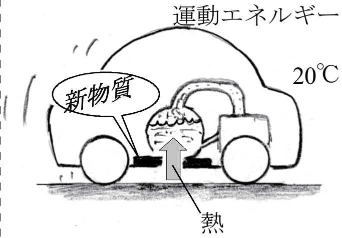


図5.6　20℃の空気から熱湯へ熱エネルギーが移動している。

＜コラム４＞“秩序”の生成に伴う“乱雑”の発生

固体↔液体↔気体の三態変化は，原子レベル(ミクロレベル)において「構造の秩序・組織化が大きく変化する現象」と捉えることができる。水蒸気が水に，水が氷になる場合，構造性が増す(秩序が増す)。つまり，構造についてのエントロピーが低くなっている(減少している)のである。

＜補足１０＞参照

しかし，水→氷の変化に伴って生じる融解熱(冷やす)は，「乱雑さ」の発生，即ちエントロピーの発生なのだ(ここが少々難かも)。「秩序(氷)をつくるのに伴って同時に乱雑さ(融解熱)が発生する」ということだ(図5.8)。さらにそのような場合には，一般に「エントロピーの増加(乱雑さの増加)」は「エントロピーの減少(秩序の生成)」を上回ることが分かっている。

三態変化に限らず，身の回りのあらゆる現象の進行に伴って，総体としては確実にエントロピーは増えているのである。

考えてみると，私達が生きていることも例外ではない。食物などをもとにして，新しい細胞などの「組織」をつくってエントロピーを下げているが，同時につねに放熱などをして環境のエントロピーを増やしているのである。

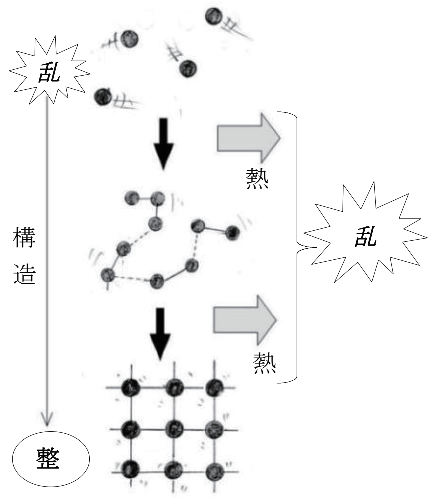
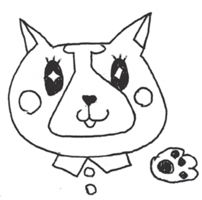


図5.8　気体→液体→固体 の三態変化で構造のエントロピー(乱雑さ)は減っているが，同時に熱という形でエントロピーが増えている。実は，全体としてのエントロピーは増加しているのである。

＜コラム５＞　ある日の朝，時間が･･･



ある日の朝，「きょうは目が覚めたときから，何だか変な感じだなぁ」と思っていたのだが･･･食卓では，こぼれた水がコップに戻り，床に置いてあったボールが“ひょいっ”っと手の上にのった。それどころか，お湯を沸かそうとしてヤカンに水

を入れてコンロの火の上に置いておいたら･･･氷ができた！
･･･てなことになったら，混乱の極み！不可逆過程の逆進行であって「あり得ない！！」と断言できるわけだ。

でも，もしこんなことが本当に起きたら，そのときどう感じるだろうかって想像してみてください。感じ方の一つとして“あれ～，じ，じ，時間が逆に進んでる”っていうのもあるでしょう。

これは面白い問題を提起している。「ひょっとして，そもそも不可逆現象が時間の方向性(時間の矢ともいう：過去→現在→未来の方向性)を創り出しているのかもしれない」

＜コラム６＞　輪ゴムの中で（p.27：問題２８関連）**(やや難)**

問題２８[実技](輪ゴム冷暖房？！)をやってみましたか？伸ばした輪ゴムを急に縮めると，なぜ温度が下がる？「縮むとき輪ゴムが仕事という形でエネルギーを外に出す」･･･それは間違っていないけれど，伸ばしたばねを急に縮めても温度は下がらない。違いは何？　違いは，ゴムの分子レベルでの構造にあり。その構造を，可能な限り単純に描くと図5.9のようになる。

ゴムＡＢが伸びた(長い)状態でも，分子は個別に熱運動(振動)をしているが，縮めると①，②の２つの配置が可能になり，①②間を移り動く熱運動が生じる。この熱運動にエネルギーが割かれ，断熱過程の場合には熱運動の運動エネルギー平均値が減少する。したがって，温度が下がるのである。

興味をもったら，問題３９にも取り組んでみてください。

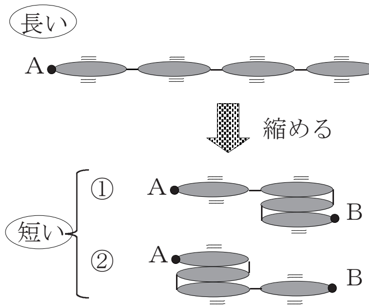


図5.9　ゴムの分子構造(トイ・モデル)。伸ばしてあったゴムＡＢを縮めると，①，②の２つの状態を取り得るようになり，その２つの状態間を行き来する熱運動が生じる(運動の自由度が上がる)。この熱運動にエネルギーが割かれるので，断熱過程の場合，熱運動のエネルギー平均値が下がり，温度が下がる。

★
2007年京都大学の入試問題にて「ひも状の物体の熱力学」として出題されたことがあります。

３５　熱効率 η_{max} の値を大きくするにはどうすればよいか。
p.29：(5.3)式のみから判断して答えよ。

３６[考察(やや難)]図5.10のように，冷蔵庫の扉を開けておけば部屋の温度は下がる？上がる？変わらない？

冷蔵庫やエアコンは，図式的には“逆熱機関(p.28：図5.2でのエネルギーの移動を逆にする)”と考えてよい：仕事でエネルギーを加え，熱を低温側から高温側に移動させている。

３７[考察(やや難)]　エアコンを暖房用に用いた場合，電熱器に比べて消費電力に対する熱発生量の割合が多いことを示せ。問題３６と同様，エアコンを“逆熱機関”として扱え。

３８[考察]“水のみ鳥(図5.11)は永久機関だヨ～！”と宣伝するには，どう言えばよい？また，水のみ鳥も熱機関であることを説明せよ。

図5.10

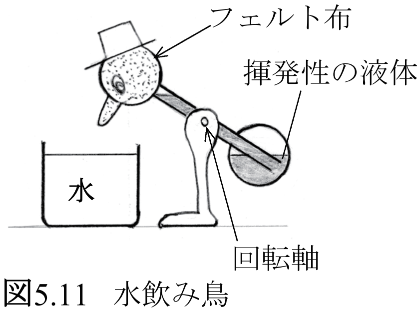


図5.11　水飲み鳥

３９[考察(やや難)](絶対温度0 Kに迫る方法)　電子は「ミクロの磁石」とも言えるが，通常，個々のミクロの磁石は互いに無相関に熱運動をしていて，その向きが個々でたらめの向きを向いている。

物質に強い磁場をかけミクロの磁石の向きを整列させた状態にして温度をある程度下げる。次に，熱の出入りがない状況で磁場を消す(断熱消磁という)。そうすると物体の温度がさらに下がるのである。断熱消磁で温度が下がる理由を説明せよ。

＜コラム７＞　不可逆性 vs.ミクロの可逆性

お湯に水を入れてしばらく置くとぬるま湯になる。もし，理想的な保温鍋の中だったら，ずっと同じ温度のぬるま湯のままだろう(熱平衡の状態)。もう何にも変化が生じない。

しかし，熱平衡に達した後も膨大な数の水の分子“H_2O達”は，互いに相変わらずエネルギーのやり取りをしていて，原子のレベルでは目まぐるしく状況が変化している。私達が見る熱平衡という巨視的出来事など，“H_2O達”は関知するところではないのだ！

熱平衡の状態とは･･･原子のレベルでは目まぐるしく状態が変化しているにもかかわらず，巨視的レベルでは変化のない状態に落ち着いてしまっている･･･そんな状態なのである。

でも，何かの拍子に，再びお湯と水に分かれるような(高温の部分と低温の部分に分かれるような)，熱平衡の状態から離れていく現象は起きないの？！

実は興味深い事実があるのです。原子レベル以下での基本物理法則には，特殊な例外をのぞいて，不可逆性は含まれてない(**可逆**という)。つまり，もし原子レベル以下の世界で“暮らしている”なら，どんな現象の“逆再生”でも，“法則違反”ではないのである！ぬるま湯がお湯と水に分かれる状況もＯＫなのだ！

不可逆性は，膨大な数（6×10^{23}個的！p.3：例題２）の原子が全体として演じる(?)巨視的法則性なのだ。原子の動きには不可逆性がないのだから，巨視的な不可逆現象(p.31：図5.7の現象Ａ)を「逆進行」させた現象(図5.7の現象Ｂ)も，「絶対に起こらない」とは断言できない･･･。

確かにそうなのだ。しかし，それが起きる確率が**極極**極極めて低〜いから，例えば宇宙の寿命の間には起こらない････と解釈するのが，現時点では最も標準的な解釈になっている。

自然は波でいっぱい

水波，音波，光波，電波，地震波などなど，波(波動)という現象は自然界のいたるところに，様々な形で現れている。また，音響･通信など，技術的な分野でも波は重要なテーマ，ないしツールなのだ。

ところで，音波と電波は確かに別のモノだが，その振る舞いには，驚くほどの共通点がある。水波なども同様で，すべての波に共通する法則・性質があるのだ。ここでは，そういった波の共通点を調べ，さらに「物体の振動を波として捉える」ということを，弦楽器や管楽器の例を用いながら調べていく。

1．単振動

波を理解するのに，ダンスや応援の“ウェーブ”が意外と役に立つ。波を伝えるものを媒質というけれど，“ウェーブ”の場合，媒質は人間自身。だから“ウェーブ”を思い浮かべれば，「媒質の気持ち」がよく分かり，波がよく分かるようになるのだろう，多分ね。

その“ウェーブ”では，媒質はほぼ単振動と呼ばれる振動をしているが、自然界の本当の波でも，なんと，媒質が単振動をする波が最も基本的で重要なのだ。

というわけで，波の振る舞いを調べるときには単振動の知識があると大いに助かる。まずは単振動について必要最小限の知識をまとめておこう。

①（単振動と等速円運動）

ばね振り子や単振り子の運動は，単振動と呼ばれる振動の身近な実例だが，そもそも単振動とはどんな振動なのか？

図1.1のようにして，単振り子やばね振子と等速円運動を比較しよう。等速円運動の角速度（単位時間あたりの回転角）を適当に調節するなら，振動方向に関して両者の運動は一致する。このように，等速円運動といっしょに動く(同期する)振動を**単振動**という。単振動について考察するときは，振動そのものより「**いっしょに動く等速円運動**」に注目するとよい。

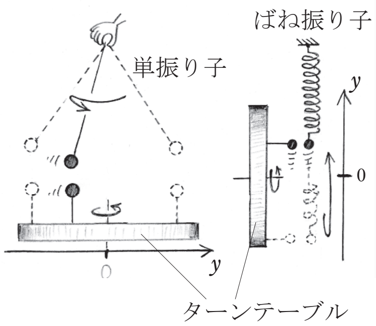


図1.1　等速円運動と単振動の関係（その１）

②（振動の位相・位相差）

図1.2のように y 軸上で原点を中心として $y=\pm A$ の間で単振動をする物体を考えよう。A は振動の中心から最大変位の点までの距離であり，**振幅**という。また，「単振動といっしょに動く等速円運動」の，図1.2に示した回転角 θ を単振動の**位相角**または単に**位相**という[*1]。位相（角）は時間がたつとともに増加していくが，通常は0～360°（0～2π [rad]）の値で表現する。

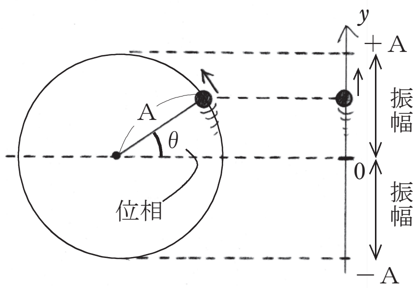


図1.2　等速円運動と単振動の関係（その２）

同位相 単振動をする２つの物体の位相(角)が等しいとき，両者の関係を**同位相**という(振幅は違っていてもよい)。

逆位相 図1.3のように，単振動をする物体 a， b の位相が等しくない場合， a， b 間に**位相差(位相のずれ)**があると言う。さらに，この図の場合「b は a より**位相が遅れ**ている」あるいは「a は bより**位相が進んでいる**」という。位相差が180° (π [rad]) の場合を**逆位相**という。

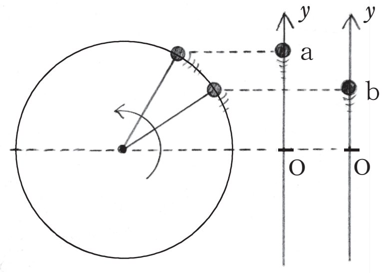


図1.3 位相差がある２つの単振動 a , b

同位相･逆位相あるいは図1.3の a， b のように振動がずれている場合，「位相差」という量は，2つの単振動の「ずれ具合」をたった１つの数値で正確に表してくれる便利な量なのである。

＊1 位相の定義にはある程度の任意性がある。この冊子では，図1.2のように，単振動の左側に「等速円運動」を置き，等速円運動は反時計回りに回すことにする。

例題１[実技] 手をごく自然に振ったとき，手の運動がほぼ単振動になっていることを簡単に「実証(！)」せよ。

例題１(解) p.39：図1.4のように，片手を振動させ，同時にもう一方の手を等速円運動させる。特に意識しなくても，両手の動きは上下方向で一致するだろう。つまり，手の振動は単振動である！

１[実技] 左右の手を同位相および逆位相で単振動させよ(同一周期)。次に(さあ、これが難しい！)，位相差90° で単振動させるには，どうしたらよいだろうか？！友達２人に位相差90° の等速円運動をやってもらうのも良いかも。

２ 単振動をしている物体の速さが最大になるのは位相が何度のときか。また，そのときの速さと「いっしょに動く等速円運動」の速さとの関係はどうなっているか。

３ 物体A，Bが互いに逆位相で同じ振幅の単振動をしている。物体A，Bの変位および速度はそれぞれどんな関係になっているか。

４ ２つの単振動の周期が同じ場合，位相差は変化するか？周期が違う場合はどうか。ダンスや応援でウェーブを演じているとき，隣り合うメンバー間の位相差は変化しているか。

2．単振動と正弦波

p.35：図1.2 の絵を見て，数学の授業を思い出した人もいるでしょう。三角関数の sin x，cos x です(三角比ではなく)。え？まだ習っていない？･･･大丈夫，大丈夫。むしろ，ここで学ぶ「単振動と正弦波の関係」は，三角関数を勉強するときの心強い味方になってくれるはずです。

①（媒質の動きと波，正弦波）

波を伝えている物質をその波の**媒質**という。波が伝わっているとき，媒質は波とともに移動するわけではない。通常，媒質は限られた範囲内で**振動**しているだけである。

波の移動とは「山」や「谷」の移動のことだが，それは媒質の位相の移動とも言える。このことは“くしだんご”を投影するとよく分かる(図2.1)。図2.2のように，その影は**正弦波**を形づくり(sin xの形)，“くしだんご”を回転させると，その正弦波が平行移動していく。“くしだんご”を等速で回したとき，影●はどれも同じ振幅・同じ周期で単振動をしていて，しかも隣り合った●と●の位相差がどこでも同じである。これは正弦波の基本的性質の一つであり，媒質がこのように振る舞うことによって全体として「sin$x$」の形がつくられ，しかもそれが移動していく。

正弦波以外の波形に対しては，上記の“くしだんご”的な見方は残念ながら簡単には使えない。ただし，今後は主に正弦波を扱っていくことにする。水波，地震波，人の声の音波など身近な種々の波は複雑な波形をしている場合も多く，むしろ正弦波の例は少ないのだが，物理学的にも数学的にも，波を扱う上で正弦波は最も基本的で扱いやすく，しかも応用性に富んでいる。音波では音叉から出る音波が正弦波である。

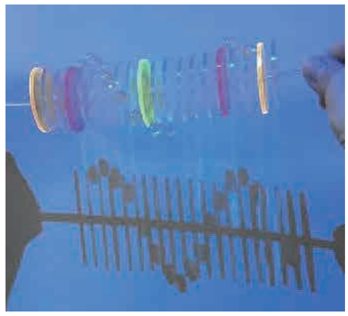


図2.1　“くしだんご”(上)とその影(下)。円板を棒に等間隔で差し，球は30° 間隔で接着してある。

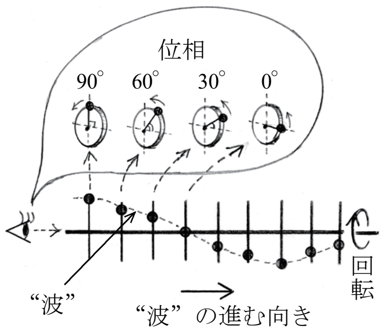


図2.2 “くしだんご”を回転させると，影●が形づくる正弦波形が進んでいく。

＜補足１＞　波は自然に発生する：波の伝播のメカニズム

図2.3で，媒質ａに変位を与えると隣の媒質ｂに力がはたらき，ｂが変位する。同様に，ｂの変位が媒質ｃの変位を引き起こす。このようにして媒質の振動が「自動的」に伝わっていく現象が「波」である。このとき，ｂはａの動きを追う。ａ，ｂの周期は等しいが，ｂのほうがａより位相が常に遅れている。「ｂとｃ」「ｃとｄ」･･･の関係も同様で，隣り合った媒質が一定の位相差を保って同じ周期･同じ振幅で振動し，①で説明したように，全体として「波」を形づくる。

物体に振動を与えたなら，ごく自然に波が発生する･･･発生してしまう，という感じである！

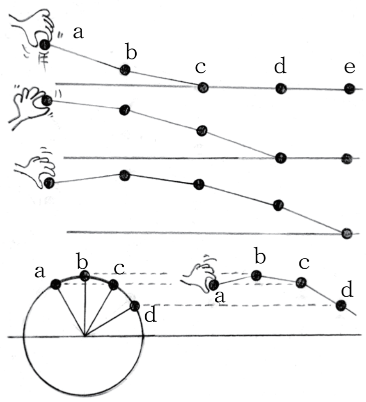


図2.3　ａを単振動させると，それをまねしてｂが単振動，さらにｃが･･･。自然に正弦波が伝わっていく。

特に，**波源** a が単振動をすれば，すべての媒質が隣り合った媒質と一定の位相差を保って単振動をする。その結果，波の形は $\sin x$ の形(**正弦波**)で，それが平行移動していく。

以上，物質を伝わる波について考察したが，電波・光波など非物質的な波の場合にも，似たようなメカニズムがあり波が伝わっていく。

例題２[考察・実技？] ダンスや応援で「ウェーブ」(図2.4)を作る際に，リーダーが最小限指示すべきことは何か（物理用語を使用する！）。「ウェーブ」はおそらく正弦波。

また，ウェーブ演技の途中で，波全体の進行方向を突如逆にするには，どんな指示をしておけば良いか。

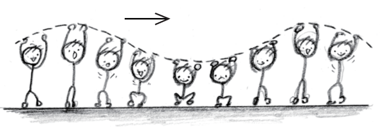


図2.4 ウェーブ：多分，正弦波形！

例題２(解)　「隣りの人の動きに対して一定（例えば30°）の位相差を保ち，同じ振幅で単振動をしてね！（ちょっと遅れて隣の人の動きを真似するということ）」

逆進行：まず，振り付けとして，個々のメンバーがそれぞれ「いっしょに動く等速円運動」を腕で演じるとよい(p.39：図1.4)。逆進行が始まる瞬間に(曲の途中の決められた箇所で)，その等速円運動を逆回転させ，それに合わせて「単振動」を続けるように指示を出そう。逆進行とは，言い換えれば「時間反転」だから。

＜コラム１＞　フーリエ級数：正弦波は波の元素

一般的には，波は正弦波とは言えないが「どんな波形の波でも，いろいろな寸法（波長，振幅）の正弦波を合成することによって作ることができる」「どんな波形も“正弦波成分”の和として表せる」という事実があり，このような和の表現をフーリエ級数とかフーリエ積分という。したがって，波を調べる上で，正弦波は，最も基本的な役割を担っている。そこで

“正弦波は波の元素”

と言ってもいいだろう。例えば，図2.5のような四角の波(**矩形波**)であっても，次式のように表すことができるのである！

$$\text{矩形波} = \sin x + \frac{1}{3}\sin 3x + \frac{1}{5}\sin 5x + \frac{1}{7}\sin 7x + \cdots \qquad \cdots(2.1)$$

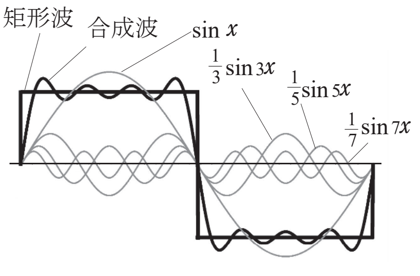


図2.5　(2.1)式にしたがって，波形を重ね合わせていった結果。矩形波は「角」があるので難しいのだが，合成されていく雰囲気は感じ取れるだろう。

プリズムは入射した光を「正弦波成分」ごとに分解するはたらきをしている。これを**分光**といい，正弦波成分(フーリエ成分とも言う)の混ざり方を**スペクトル**という。光の正弦波はプリズムに通しても分光されないので**単色光**と呼ばれている。大まかに言えば，虹を構成しているいろいろな色の光はそれぞれ

が単色光(正弦波)である。

5 [考察・調べる]次の波の媒質は何か。

海の波，地震の波，音波，電波，光波，*脳波*，*寒波*

例題１(解)

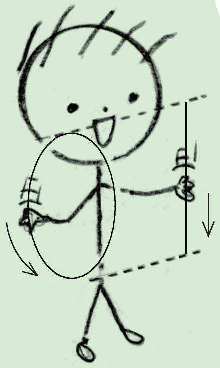


図1.4　左手を自然に振り，それに合わせて右手を等速円運動させると両者の動きを上下方向で一致させることができる！

だから，左手は単振動。

３. 波の基本式

　水波でも音波でも，どんな波にでも共通して使える公式があるのです。公式自体は，これから見るように，とても簡単。でも，あまりにも頻繁に使うから，やはり「公式」にしておくと便利です。これを思考の経済学ともいいます。

　実は正式な名称もついてませんので，可哀想だから「波の基本式」と呼んであげましょう。

①（波長，振幅）

　図3.1のように，隣合った同位相点間の距離･･･要するに波の「山から山」や「谷から谷」の長さを**波長**いう。波長はギリシャ文字「λ(ラムダ)」で表すことが多い。波の**振幅**とは，媒質の振動の振幅である。

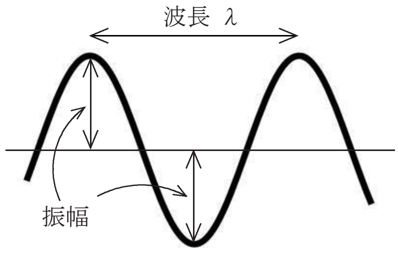


図3.1　波長と振幅

②（周期，周波数，振動数）

$\boxed{\text{周期}}$　１波長λの通過時間を波の**周期**といい，文字「T」で表すことが多い。

$\boxed{\text{周波数・振動数}}$　単位時間あたりに通過する波長の数を，**周波数**または**振動数**といい，文字「f」で表すことが多い。単位時間としては「１秒」を用いることが多く，その場合，周波数(振動数)の単位を特別に「Hz(ヘルツ)」と記す。

６　図3.2は x軸正の向き進む正弦波を表している。

(1) 波長λ，振幅Aを答えよ。

(2) 図の時点で，媒質　a，　b　は，それぞれどの向きに動いているか。また，ａｂ間の位相差は何度か。

(3)[少し難] この図の時刻をt＝0として，媒質ａの変位と時間のグラフ(y−tグラフ)の概略を描け。

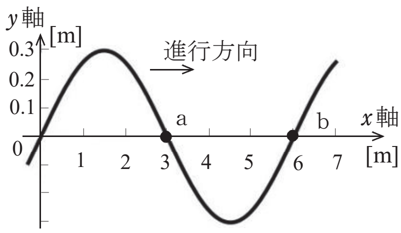


図3.2

③（波の基本式）

例題３　いきなり例題，しかも小学校の復習？

(1) 豆まきの時，T＝0.20 s 間に1個の割合で豆を口に入れた！！
　1 秒間に口に入る豆の数 f [個/s]を求めよ。

(2) １車両の長さが λ（ラムダ）＝25 mの列車が目の前を通過した。１車両が通過する時間を T＝0.50sとして，この列車の速さv[m/s]を求めよ。

(1)
(2)

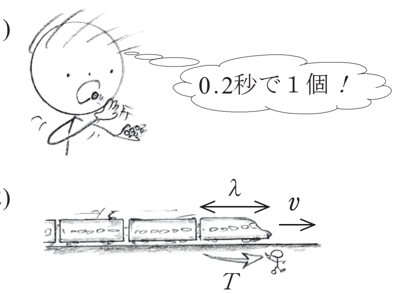


図3.3

例題３(解) (1) 1s間に 1 s／(0.20 s)＝5個「 $f=1/T$ 」　・・・(3.1)

(2) $v=25$ m／0.50 s＝50 m/s　「 $v=\lambda/T$ 」　・・・(3.2)

例題３で，Tを波の周期，fを周波数(振動数)，vを波の速さとすれば，波の基本式の２つ(3.1)，(3.2)が導かれる。両式からTを消去すれば３つ目の式「 $v=f\lambda$ 」が導かれる。例題３(2)と同じ状況で「1 s間に $f=2$ 車両 通過」と考えてもよい。

というわけで，波長 λ ，周期 T ，周波数（振動数） f，速さ v の間には次の関係がある。これらを**波の基本式**と呼ぶことにしよう。

$$\boxed{\text{波の基本式}\quad f=\frac{1}{T}\ ,\quad v=\frac{\lambda}{T}\ ,\quad v=f\lambda}\quad \cdots(3.3)$$

★
p.47の＜補足7＞とも関連しますが，この「$v=(1/T)\lambda=f\lambda$」はvがfまたはλによって変化するということを示しているわけではありません．波の速さvは媒質の種類や状態によって変化するもので，大気中の音速であればp.44（4.1）式，弦を伝わる波の速さであればp.57(7.3)式で定まります．「$v=(1/T)\lambda=f\lambda$」のvは【定数】として扱うことをしっかりと理解しておく必要があります．一見簡単な式に見えますが，だからこそ注意しないと誤解を招くことになります．

例題４[実技] 音波の波長はどのくらい？

ハ音  の振動数は約262 Hzである。空気中の音速を340 m/sとして ハ音の音波の空気中での波長を求めよ。

絶対音感のある人にこの音程で「あ～」と声を出してもらおう。そして両手を拡げ，だいたいの波長を示してみよう。

例題４(解)　「$v=f\lambda$」→ $\lambda=v/f=340$m/s／262Hz＝1.3 m

7 (1) TBSラジオの電波の周波数（振動数）は 954 kHz，ワイヤレスマイクは800 MHz程度，電子レンジは2.45 GHz(これは決まっている)，BS放送は12GHz程度である。それぞれの波長を求めよ。電波の伝わる速さは3.00×10^8 m/s（光速）である。

1 k(キロ)＝10^3，1 M(メガ)＝10^6，1 G(ギガ)＝10^9

(2) 外洋における津波の波長λ，周期 T の典型的な値はそれぞれ $\lambda=150$ km， $T=12$分（振幅は 30 cm程度）である(深さ4000 m程度の場合)。この場合の津波の速さを求めよ。また，2万kmの距離(地球の反対側)をどれだけの時間で伝わるか。

8 地震についての知識(速さ)・経験(周期)をもとにして，地震波の波長を概算せよ。

④（波の基本式と観測者）

注意：④が，今の段階では難し過ぎると感じるなら，とりあえず飛ばし，９.ドップラー効果を学習する際に戻ってくるとよい。「全然難しくない」なら，ここを学習したらすぐに９.ドップラー効果に取り組むのも効果的である。

ふつう「波の速さ」とは，媒質に対する「山」や「谷」の移動の速さを意味する。周期，周波数（振動数）も，特に断らなければ媒質に対して静止している観測者(座標系)が観測する値を意味する。それらは，波の「速さ・周期・周波数（振動数）」の本来の値と言ってよい。

しかし，向かってくる車のクラクション音が高く聞こえるように，観測者が受け取る周波数や周期は，本来の値とは異なる(音波なら音の高さが異なる)場合があり，**ドップラー効果**と呼ばれている。また，「山」や「谷」が進む速さも，基準にするもの(座標系)を変えれば当然，違った値になる*[1]。

ただし，基準を変えても，なんと「波の基本式の形は不変」と言えるのだ！どういうことか？とてもすっきりした単純な事柄です。

図3.4を参考にしながら次の例題５に取り組み，このことを理解してください。

＊1　Ｉの１０．速度の合成と相対速度 を参照せよ。

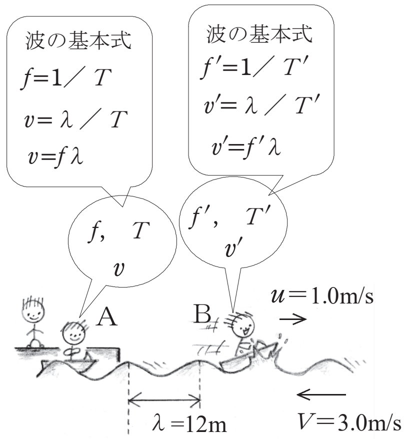


図3.4
Ａさんの観測値｛f,　T,　v,　λ｝
Ｂさんの観測値｛f', T', v',　λ｝
波の基本式は，Ａさんでも，Ｂさんでもそれぞれ同じ形で成り立っている！

例題５　波の基本式は，みんなの共通言語

速さ V＝3.0 m/s，波長 λ＝12 mの海の波について次の各問に答えよ（図3.4参照）。

(1) 船着き場で静止しているボート上の観測者Ａさんが観測する波の周期 T [s]と振動数 f [Hz]を求めよ。

(2) ボートが波に向かってu＝1.0 m/sで進んだ。ボート上の観測者Ｂさんに対する波の速さ(相対速度) v' [m/s]を求めよ。

(3) (2)でＢさんが観測する(ボートが受ける)波の周期 T' [s]と振動数 f' [Hz]を求めよ。

例題５(解)(1) 観測者Ａに対する波の速さは v＝ V＝3.0 m/s

公式「v＝λ／T」より周期 T＝λ/v＝λ／V＝12／3.0＝4.0 s

振動数は公式より f＝1／T＝1/4.0＝0.25 Hz。

(2) 波がＢ(ボート)に近づく速さだから v'＝V＋u＝3.0＋1.0＝4.0m/s

あるいは，波が進む向きを正の向きとして v'＝(＋3.0)－(－1.0)＝＋4.0 m/s

(3)　公式「$v'=\lambda／T'$」が成り立つので $T'=\lambda／v'=12／4.0=3.0$ s，公式より $f'=1／T'=1／3.0=0.33$ Hz

例題５は，後述(p.64)のドップラー効果という現象の一例である。例題５のように，どのような観測者(座標系)でも，それぞれの立場で観測する波の振動数(周波数)・周期・速さ に対して，波の基本式が成り立っている。逆に言えば，波の基本式を使うときには「f，T，v の値は，３つとも同じ立場(座標系)における値を用いよ」ということでもある。波長，振幅はどのような座標系から観測しても同じ値である。簡潔にまとめると

・**波の基本式は**基準によらず同じ形で成り立つ ・**波の基本式に代入する値は**，同一の基準(座標系)での値

・・・(3.4)

4．音波

音波について，ごく基本的なことだけをまとめておきましょう。多くの場面で，音波も水波や“ウェーブ”と同じとイメージしていて良いのですが，何しろ見えない空気の振動なので･･･そこは注意してください。

①（弾性波と音波）

物体に与えた歪み(変形)は多くの場合「波」として物体の中を伝わっていく(p.37：＜補足１＞)。これを**弾性波**という。弾性波は固体・液体・気体のどれにでも生じる。弾性波は広い意味で**音波**と呼ばれることも多いが，人間が音として感じ取れる音波の振動数は限られていて，およそ20～20,000 Hzであり，**可聴音**という。可聴音より高い周波数の音波を**超音波**という。音波は，図4.1のように空気の圧縮・膨張(密と疎)として伝わっていく。

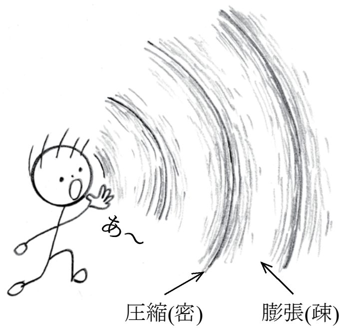


図4.1 空気を伝わる音波は，圧縮・膨張を繰り返している。もし，目で見えたら，こんなかもね･･･

＜補足２＞　弾性波

多くの物体は，力を加えてある程度の「歪み（変形）」を与えても，力をなくせば元の形に戻る。この性質を**弾性**といい，もとにもどる歪みを弾性歪みという。弾性歪みには，**体積弾性**(図4.2)と**ずれ弾性**(図4.3)とがあるが，物体に振動や衝撃が与えられると，これらの歪みがどちらも波として伝わっていく。これを**弾性波**という。弾性波は固体，液体，気体のどれにも生じるが，気体，液体（総称して流体という）には，ずれ弾性がないので，流体中を伝わる弾性波（音波）は体積弾性波のみである。これは圧縮・膨張を繰り返す波である。固体中では体積弾性波とずれ弾性波のどちらも存在し（地震波のＰ波，Ｓ波がその例である），伝わる速度は体積弾性波のほうが速い。

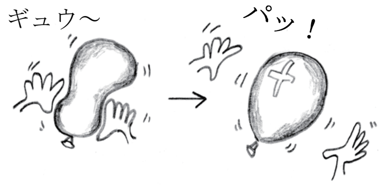


図4.2　体積弾性の例：ギュウ～とつぶしても，パッともとに戻る。

図4.3　ずれ弾性の例：グニュ～と歪めても，パッともとに戻る。

②（縦波と横波）

ウェーブマシンや弦を伝わる波では，媒質は波の進行方向に対して垂直に振動している。このような波を**横波**という。

一方，空気中を伝わる音波の場合，空気の「圧縮・膨張」に伴う振動が伝わっていて(体積弾性波)，媒質(空気)が波の進行方向と同じ方向に振動している。このような波を**縦波**という。縦波は，媒質の密度が変動するので**疎密波**ともいう。

縦波をグラフ化する方法はいくつかあり，音波の場合「圧力のグラフ」や「媒質の変位のグラフ」などが使われる。図4.4のように，これらのグラフは「山や谷の位置がずれる」など，同じではないので注意を要する（p.70：「たて波のグラフ」を

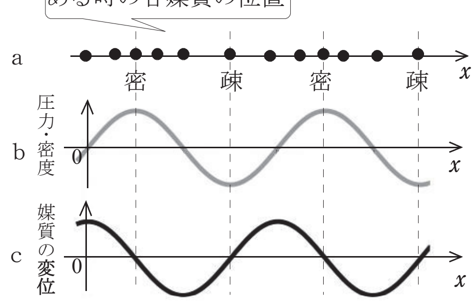


図4.4　a 縦波がきたときの各媒質の位置
b その時の，圧力･密度のグラフ
c その時の，各媒質の変位のグラフ

参照のこと）。

③（感覚と物理量の対応）

私達が聞く音の性質(属性)のうち，主だったものは次の３つであり，音の３要素とも呼ばれている(図4.5)。音の３要素に対応する物理量についてまとめておこう。

図4.5　高さ・大きさ・音色
音の三要素ともいう。

音の高さ　音の高低を決めている主要な物理量は**振動数(周波数)**であり，振動数が高いほど音は高く聞こえ，振動数が２倍になると，１オクターブ高く聞こえる。

音の大きさ　音の大きさを決めている主要な物理量は，**振幅**と考えておいてよいが，振動数の影響もかなり大きい。また，同時に存在する他の音からも強く影響を受ける。

音色　音色は，音の高さ･大きさに比べると，物理量との対応は，はるかに複雑であり，多くの因子が絡み合っている。しかし，その中で最も基本的なものは，音波による振動の**波形**である(図4.6)。音叉から出る音波の波形は正弦波形であり**純音**ともいう。

波形の違いを詳しく扱う場合，波形に含まれる正弦波の成分の違いで表現することが多い。これを音響スペクトルともいう(p.38：＜コラム１＞フーリエ級数を参照)

なお，波形の変化のしかたや，音の「立ち上がり方」と「消え方」も音色を決める大きな要素になっている。

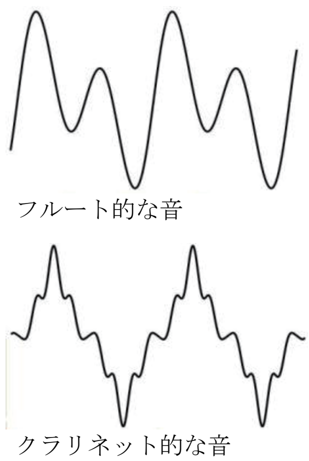


図4.6　音波の波形の例。
同じ楽器でも音域その他で波形はかなり異なる。

例題６[実技]　音波の波形とこわいろ

音叉は単振動をするように設計されている。音叉からの音波をマイクで受けてオシロスコープ[*1]あるいはＰＣで波形を観察しよう。

(1)　どのような波形が描かれるか。

(2)　声で音叉の音の真似(こわいろ)をし，同様の観察を行うとどんな波形が現れるか(図4.7)。

＊1　オシロスコープは基本的には電圧計であり，輝点の縦方向の振動は電圧の振動を表している。上記の実験では，音波による圧力の変動を電気信号(電圧の変動)に変換して観察している。PCでも同様である。

例題６(解)(1) 正弦波形　(2) うまくいけば，やはり正弦波形

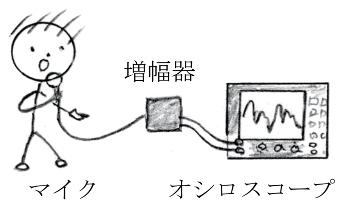


図4.7　音波の波形を観察する。
オシロスコープは，マイクにおける空気の圧力変動の様子をグラフ(波形)として表示している。

＜コラム２＞　音 階

ツァルリーノの音階（純正音階ともいう）は，音階上の音の振動数が互いに簡単な整数比になっていて，このことにより濁りのない和音を作ることができる。その意味で，この音階は欧米･南米等の音楽においては最も基本的な音階と見なされている。しかし，この音階では例えばドとソの比の値は 3/2＝1.5 だが（下表)，レとラ（ニ調のドとソ）の比の値は5/3÷9/8＝1.48 であり，ハ調からニ調に移ると，もはやツァルリーノの音階ではなくなってしまっている。つまり，転調を含む音楽には適さないのだ。

平均律音階では，半音の比を一律に $\sqrt[12]{2}=1.05946\cdots$ とすることにより，ツァルリーノ音階の上述の欠陥を取り除いた（ただし，和音は少し濁る）。ピアノ等には平均律音階が採用されている。

振動数比↘	ド	レ	ミ	ファ	ソ	ラ	シ	ド
ツァルリーノ	**1**	**9/8**(1.13)	**5/4**(1.25)	**4/3**(1.33)	**3/2**(1.5)	**5/3**(1.67)	**15/8**(1.88)	**2**
平均律	1	1.12	1.26	1.335	1.498	1.68	1.888	2

④（音波の伝わる速さ：音速）

音速は媒質の種類，特に気体・液体・固体の違いによって大きく異なり「気体 ＜ 液体 ＜ 固体」の順に速くなる。分子間の結合が強いほど振動が速く伝わるのである。気体中を伝わる音波の場合，振動は分子の衝突によって伝わっているので，音速は分子の熱運動の速さと同程度である。したがって，気体中の音速は，温度上昇に伴って速くなる。

媒質	音速[m/s]
空気(0℃)	331.5
ﾍﾘｳﾑ(0℃)	970
水(20℃)	1483
鉄(0℃)	5950 縦波
〃	3240 横波

大気中の音速は，温度 t [℃]において次式で計算されることが知られている。

$$\boxed{\text{大気中の音速}\qquad V \fallingdotseq 331.5 + 0.6\,t\ [\mathrm{m/s}]} \qquad \cdot\cdot(4.1)$$

気体・液体中の音速は，振動数･波長には無関係である。これを「音波は気体・液体中で**分散**を生じない」という。

例題７「ありがたい」と思いましょう！

もし空気中の音速が振動数によって大きく違っていたら(分散が生じるなら)，例えばどのような不都合が生じるだろうか。

例題７(解)　例えば，広いコンサート会場の後ろのほうの席に座っていて，オーケストラの全合奏で「ジャン」と始まる曲の場合･･･

＜補足３＞　分散

図4.8 a のように，水の波は波長が長いほど速く伝わる。このように，波長･振動数(周波数)によって波の伝わる速さが違ってくる現象を**分散**という。

上述のように，空気を伝わる音波は分散を生じないし，弦やロープを伝わる波も分散を生じない。しかし，水波や物質中の光波は分散を生じる。

光波の分散は，実は身近な現象である。水滴やプリズムなどによる“虹の七色現象”は分散によって生じているのだ(図4.8 b)。波長・振動数つまり「色」によって水やガラス中での光の速さが異なり，それが原因となって屈折の度合いが色により異なっているのだ。分散という用語の語源は「七色に分散する」なのだろう。

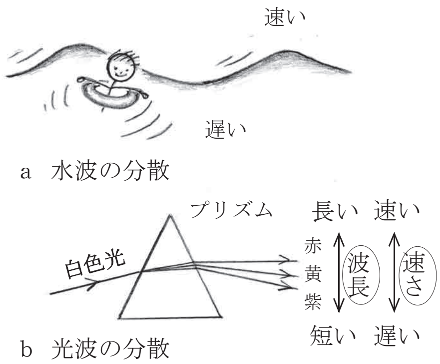


図4.8　波長･振動数によって波の速さが異なるという現象を分散という。
a　水波は，波長が長いと速い。
b　光波も，波長が長いと速い。また，光波は速さが遅いと屈折が大である。

＜補足４＞　よくある誤解

「$v=f\lambda$ なのだから波長が長いほど波は速いに決まっている」というのは**誤解**！例えば空気中を伝わる音波の速さは波長には関係しない。でも $v=f\lambda$ は成り立っていて $v=f\lambda$ ＝一定。つまり波長と振動数が反比例の関係にある。

$v=f\lambda$ は分散のあるなしに関わらず，どんな場合にでも成り立つ恒等式だが，分散はそれとは別に媒質(物質)がもつ固有の性質(ある振動数付近で振動しやすいとか)が原因となって波の速さが波長･振動数によって違ってくるという現象である。

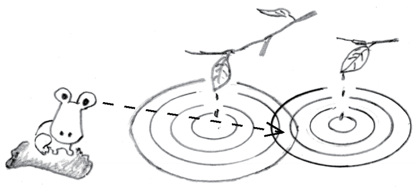
＜コラム３＞　ニュートンと音速

ニュートンは，自身が導き出した運動方程式を空気に当てはめて音速を理論的に計算している。ただし，空気の圧縮･膨張を等温過程として扱っていたため，計算結果は実際の音速の値より小さくなっていた(約0.8倍)。音波に伴う空気の圧縮･膨張は断熱過程なのだ。･･･でも，ニュートンが活躍していた時代って，本冊子前半で勉強したような熱力学が出来上がるおよそ200年前。そんな時代に，音速の理論計算をやってのけるなんて，やっぱり，ものスゴイ！

９　ヘリウム中の音速が空気中の音速より速い理由を述べよ（p.46の表参照，およそ3倍の違い）。ヒント：熱運動

１０ [**調べる**] 超音波の特徴，発生源，応用例を述べよ。

５．重ね合わせの原理と波の干渉



波の振る舞いはある意味で単純といえるのだが，単純すぎて，かえって波の意外な性質となっている。それがここで扱う「重ね合わせの原理」。ここでは，２つの波が重なったときの状況を取り上げるけれど，音だったら？光だったら？と考えるととても刺激的ですよ！。

①（重ね合わせの原理）

波の衝突のように，波が重ね合わさる状況を考える，振幅があまり大きくない限り，水波でも音波でも何の波でも非常に単純な振る舞いをする。

図5.1のように，二つの波 W_1，W_2 が衝突しても，互いに何の影響も及ぼさずにすれ違っていく(図5.1 c)。波は互いに独立に伝わっていくのである。波W_1，W_2 がまさに衝突している時は？ というと，この時でさえ「独立に伝わっている」と考えてよいのである！（図5.1 b ）。ただし，合成された(観測される)波の変位は，W_1，W_2の変位（符号を含む）の和に等しい。

以上を波の**重ね合わせの原理**という。まとめると

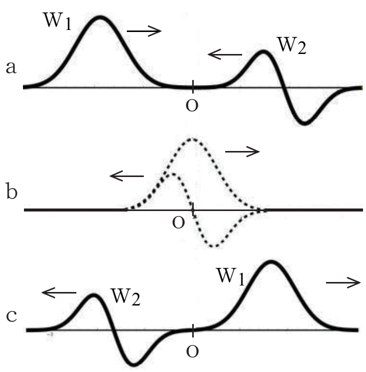


図5.1 波W_1，W_2が“衝突”しても，互いに「何もなかったかのように」通り過ぎる。重なっているときも，まさに「重なっている」と考えればよい——各波の変位の和が観測される合成波の変位となる。

波の重ね合わせの原理

[1] 波は互いに独立に伝わる。
[2] 波が重なっているとき，合成波の変位は各波の変位の和

・・・(5.1)

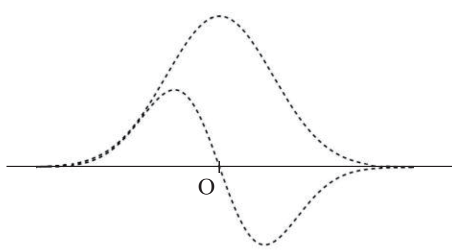
上でも述べたが，この原理は無条件に成り立っているわけではない。ただし多くの場合，この原理が高い精度で成り立っている[*1]ので，以下の議論では「重ね合わせの原理が成り立っている」として話を進める。

＊1 この原理が成り立つ理由はやや難しいので省略する。

例題８ 右図は図5.1 b を拡大して再録したものである。この図において，合成波の概形を描け。

この波形の場合，正確に描くのは非常に難しい。大胆に推測せよ。

例題８(解)　解答例はp.54 にあります。



（再録）**図5.1 b**

例題９　図5.2ａでは山と山が正面衝突，図5.2ｂでは山と谷が正面衝突する。それぞれどのような現象が生じるか。ただし，山・谷は，同じ振幅･波長の正弦波の一部分とする。　また，点Oは左右の波の中点とする。

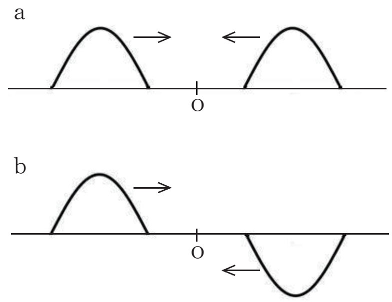


図5.2

例題９(解)　ａ：２つの波がぴったり重なる瞬間，山の高さが２倍になる。（谷と谷なら２倍の深さの谷になる）
ｂ：２つの波の位置がぴったり重なる瞬間，媒質全体が平らになるはず。しかし，それよりはるかに重要なことは，中央Ｏの媒質だけはずっと静止したままであることだ(p.51：図5.3)。波の振る舞いの中でも最も重要な現象の一つといえる。音波や光波だったら？と考えてみるとよい。

１１音波，電波，光波に，重ね合わせの原理でいう独立性がなかったなら(衝突して変形したり，反射したり)，例えば日常経験とは異なるどのような状況が生じうるか。

１２[考察]糸電話で両方から同時に話をすると，双方から伝わる振動はどうなるだろうか。

１３[考察] ノイズキャンセリングヘッドホーン(外部の騒音を消してしまう)の仕組みを考えてみよう。**ヒント**：マイク内蔵

＜コラム４＞　重ね合わせ，音の聞き分け

オーケストラの演奏を聴くときのように，多くの音を同時に聞く場合，鼓膜はそれぞれの音波の振動が重ね合わさってできた「**ひとつの複雑な振動**」をする。レコード(←知ってる？！)の溝のギザギザは，これを忠実に記録したものだ。ところで，私達は，そのように**一度混ざってしまった振動**から即座にその“中味”を例えばフルート，クラリネット･･･というように聞き分けることができる。これは驚くべき能力なのだ！

複雑な振動･波形に対して，それに含まれる単振動･正弦波の成分を理論的に見つけ出すことは，大学理工系で学ぶ数学(p.38：＜コラム１＞ フーリエ級数)を必要とするが，プリズムはそれをまさに瞬時にやってのけている：白色光を“七色”(正弦波成分)に分解。耳では，蝸牛管が共振現象を使ってそれをやっている。そこまでは，学問的にも既に十分理解されているわけだ。しかし，その「データ」をもとに脳において上述の「聞き分け」が瞬時に行われているわけで，これは大変なことなのであ〜る！

マイクに向かってしゃべると，それが文字になる･･･これを**音声認識**というが，現在，かなりの段階まで実用化されている。音声認識は上記の「大変なこと」の入口と言えるだろう。今後，AIの技術が発展し，早晩上記の「大変なこと」をやってのけるだろうが，さぁ果たして「どうして聞き分けられるの？」という問に答えてくれるかどうか？

②（波の正面衝突と定常波の発生：波の干渉）

周期的に続く正弦波が正面衝突したらどうなる？図5.4のように，波源S_1，S_2から波長(λ)が等しい正弦波W_1，W_2を同位相で出して衝突させた場合，S_1S_2の中点P_0では，波W_1，W_2が同位相で重なり大きな振動が生じる(図5.5，図5.6)。このとき，P_0において「２つの波が**干渉**して**強め合っている**」という。図5.6のように，P_0以外でも強め合っている箇所が等間隔で現れる。

一方，波 W_1，W_2が**逆位相**で重なる場所(山＋谷)もあり，波W_1，W_2の振幅が等しい場合には，その箇所の媒質はまったく振動しない。このとき「２つの波が**干渉**して**打ち消し合っている**(弱め合っている)」という。このような箇所も等間隔で現れる。

結局，波長の等しい波が「**正面衝突**」すると，上述の干渉現象によって「移動しない波」が発生するのである。これを**定常波**といい，強め合っている箇所を定常波の**腹**，打ち消し合っている箇所を定常波の**節**（通常，振幅 0 の箇所）という。

ウェーブマシンの一端を振り続けると，波は他端で反射し，反射波と入射波が重なる。反射において波長は変化しないので，上述の「波長の等しい波の正面衝突」になり定常波が発生する。

水波・音波など，どんな波の定常波にでも言える定常波の一般的な性質として，次の２点を確認し，活用できるようにしておこう！

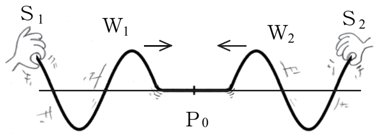


図5.4　波W_1，W_2を左右から同位相で出した。

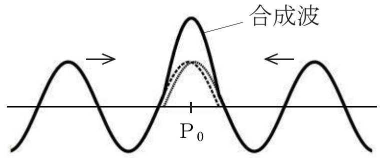


図5.5　最初に出た山と山がP_0で重なる。

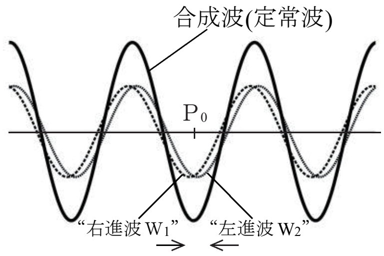


図5.6　W_1とW_2が合成され定常波ができている。P_0では谷と谷が重なっている。

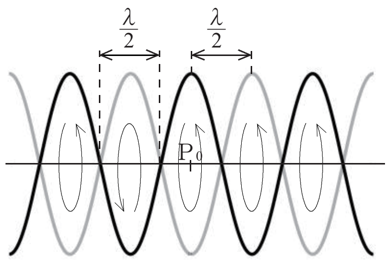


図5.7　定常波のスケッチ
(実際に観察される形状)

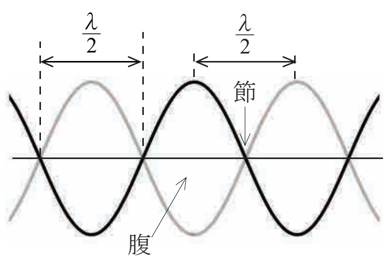


図5.8　図5.7と同様の図。定常波では腹，節という用語が使われる。腹では，２つの「見えない波」が強め合っている。節では，打ち消し合っている。

定常波の一般的な性質(水波･音波･その他なんでも)

[1] 定常波の腹･節は等間隔に現れ，“腹一つ”(節の間隔)の長さは半波長に等しい。

[2] 定常波の振動の周期・振動数は，定常波を作っている見えない波(図5.6の右進波･左進波)の周期･振動数に等しい。

･･･(5.2)

１４　ウェーブマシンの一端を振動させ，波長12 cm，振幅4.0 cmの正弦波をつくったところ，反射波と干渉して定常波ができた。波の速さを15 cm/sとして，節の間隔，腹の振幅，振動の周期を求めよ。

１５(誤解を招きやすい図) 図5.6は，見えない波である“右進波”と“左進波”が，「山＋山，谷＋谷」で重なってる状況を表している(これは誤解しない図)。図5.6に倣って，“右進波”と“左進波”

が「山＋谷，谷＋山」で重なっている状況の図を描け。描いた図において，定常波の腹，節はどこになるか考えよ。

③（波の反射と反射時の波形)

反射波の振る舞いについては，次のような**自由端・固定端**という単純化(モデル化)がよく用いられる。文字通り，反射する場所(反射端)で媒質が自由に動けるか，固定されているかの違いである。

1. 自由端：入射波は単純に折り返されて反射波になる(図5.9)。

2. 固定端：折り返される際に，変位の符号が逆になる(図5.10)。
(位相が180°変化する。**位相反転**ともいう。)

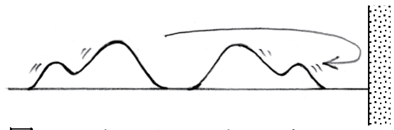


図5.9　自由端での波の反射。
波は単に折り返すのみ。

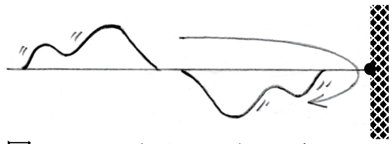


図5.10　固定端での波の反射。
波は，折り返すと同時に変位の符号を逆転させる(位相反転ともいう)

反射端付近では，入射波と反射波が重ね合わさるが，重ね合わせの原理にしたがって両者の合成波が観測される波として現れる。なお，波の反射を考察する際には，まともに「入射波が折り返される」とするかわりに「入射波の**鏡像**が反射波として出てくる」と考える便法がよく用いられる(図5.11)。固定端の場合には**逆鏡像**が出てくると考える(図5.12)。

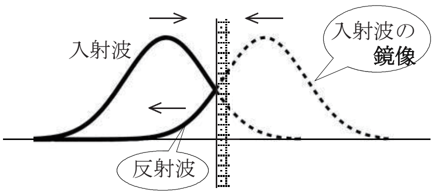
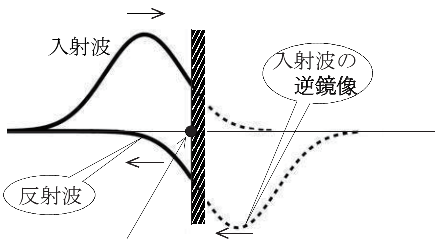


図5.11　自由端での反射：反射波は，“入射波の鏡像が出てくる！”と考えればよい。



注：合成波の変位はつねに0になる

図5.12　**固定端**での反射：反射波は，“入射波の**逆鏡像**が出てくる！”と考えればよい。

１６　図5.13のように波長$\lambda=4.0$cmの正弦波が，$x=7.0$ cmにある反射端に入射し，反射波と重ね合わさって定常波をつくる状況を考えよう。反射端が　(1)自由端 (2)固定端　のそれぞれの場合について，定常波の節ができる位置(x座標)を，反射端に近いものから　２つ答えよ。ただし，$x=7.0$ cm(反射端)は除く。

ヒント：作図をしなくても，定常波の性質から答えられる。

１７(素晴らしい質問：考察・議論)　p.49：例題９ b と同様の実験をウェーブマシンで行ったとき，「そうだったら，中央の媒質を指で押さえていてもいいんですか?」という素晴らしい質問を受けたことがある！さて，どうですか？　中央Oを押さえていて，山だけを入射させたら･･･等々考えてください。

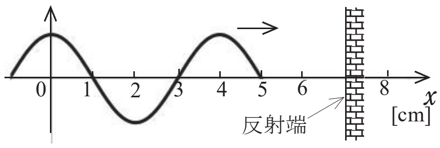


図5.13

例題９(解)

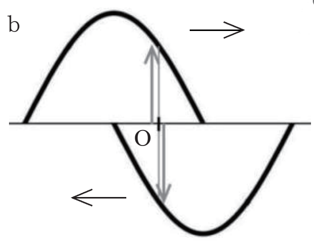
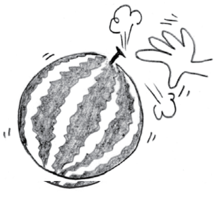


図5.3 点Oでは，２つの波の変位の和がつねにゼロになっている。したがって，点Oの媒質はずっと静止したままである。

６．固有振動と共振，共鳴



おいしいスイカ かどうかは，叩いたときに出る音を聴けば分るそうだ。スイカの内部の状態によって，叩いたときのスイカの振動数が異なるからだ。「スイカの振動数」･･･このようなものを固有振動という。

もちろんスイカに限らず，コップ，建物，飛行機の翼，･･･いえいえ地球や太陽だって，もうありとあらゆる物体が固有振動をもっている。

固有振動に関連して，共鳴・共振という身近で重要な現象にも注目しよう。「Ａさんに意見に共鳴！」というのと、確かにそっくりですよ。

①（固有振動）

音叉を叩けばいつも同じ音程の音が出る。叩かなければ鳴らないが，叩いた後は“自分で”しばらく鳴っている。ギターの弦も同様である。一般に，外から力が働かなくても，物体はある決まった振動状態を自ら維持することができる。このような振動を**固有振動**という。身の回りの物をちょっと叩いて，「音程の取れる音」が響いたなら，それはその物体の固有振動から出ている音である。

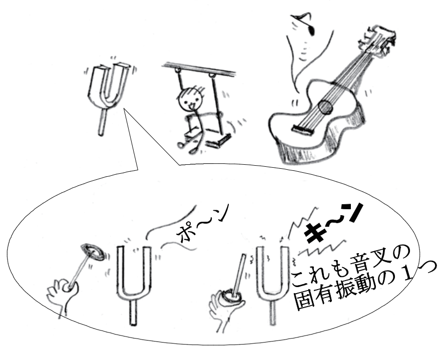


図6.1 あらゆる物体が“自分なり”の振動をする。これを固有振動という。
通常，１つの物体が何種類もの固有振動をもつ。

ぶらんこの振れは，ぶらんこの固有振動と考えてよいが，日常的な意味では，ぶらんこの固有振動は１種類だけと言えるだろう――鎖の長さで決まっている*[1]。しかし，多くの場合，物体は何種類もの固有振動をもっている。例えばギターのある弦からは，指で弦を押さえずに弦全体を振動させて110Hz，220Hz，330Hz，･･･の音を出すことができ，効果的な奏法として活用されている(p.57：問題２５参照)。

固有振動のでき方については，「７.固有振動の具体例」で詳しく扱うが，次の例題１０をやってみて「あ、そういうことか」と実感してしてもらいましょう。

＊1 ぶらんこや振り子の運動では，弦のように波を考える必要はなく，そのような場合は固有振動の代わりに基準振動という用語がよく使われている。

例題１０[実技]“ダブル里芋振り子”：固有振動は１つじゃない

図6.2のように，だいたい同じ大きさの里芋*[2]２個を，粘着テープなどを使ってゴム(輪ゴムを切る)でつなぎ，手で持って振動を与えよう（ちゃんとした実験は･･･等しい質量のおもり２個を同じばね定数のばね2本でつなぐ）。“ダブル里芋振り子”が少なくとも２種類の振動状態を自ら維持することを確認しよう。

＊2 小さめの里芋と同程度の質量のものなら何でも可。

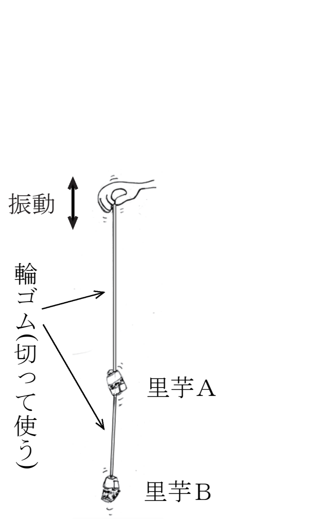


図6.2　“ダブル里芋振り子”
「ＡＢ全体をゆっくり動かす」のと「Ａをこまかく動かす」の感じ。

例題１０(解)　ＡＢ全体がほぼいっしょに動く振動と，Ａが特に激しく動く振動(Ａ，Ｂ間での伸縮)が確認できただろう。

②（共振，共鳴）

図6.3のように，物体に外部から何らかの形で振動数 f の振動を与えたとき，それが物体がもつ固有振動のどれかに一致したなら，物体はその振動数 f で強く振動し出す。この現象を**共振(共鳴)**という。実際には，両者の振動数がある程度近ければ共振(共鳴)が生じる。例題１０も，“ダブル里芋振り子”の共振現象を観察していたのだ。

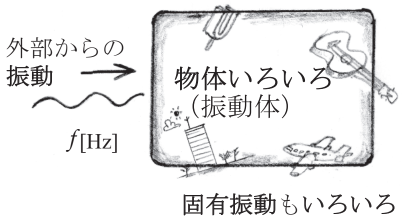


図6.3　振動数 f が，物体の固有振動の振動数と一致すると共振(共鳴)が生じる。

例題１１[実技，考察] 振り子よ，振り子，踊りなさい！
図6.4のような「連成ふり子」を組み立てよ。図のように「横糸」の端をたたいて，短い振り子だけ，あるいは長い振り子だけを振動させるにはどうしたらよいか。
これと同様の現象による地震被害の例をあげよ。

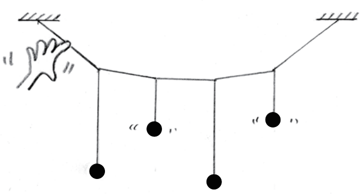


図6.4 連成振り子

例題１１(解) 短い振り子を共振させるには，短い振り子の周期と同じ周期でたたく。長い振り子も同様。地震の振動数(周波数)に共振したビルや橋が大きく揺れ，壊れてしまうこともある。

共振が生じる理由は，大まかに言えば“ぶらんこの原理”である(図6.5)：固有振動と同じ周期(振動数)で断続的に力を加えれば，振幅はどんどん大きくなる。

ウェーブマシンに固有振動を生じさせることもできる。ウェーブマシンの端を手で振動させ，周期をうまく調節するとp.50：図5.8のような定常波が現れ，手を離しても定常波が維持される。これはウェーブマシンの固有振動の１つなのである。手で与えた振動にその固有振動が共振したのである。

図6.5　ぶらんこの振れる周期に合わせて押せば，振れは大きくなる。これも共振現象の例。

１８　[実技](音感チェック)　共鳴音叉を鳴らし，その音程を記憶する。しばらく経ってから，共鳴音叉の共鳴箱に向かって，記憶した音程で大きな声を出してみよう。さて共鳴するや否や。音叉を友達に持ってもらうと厳密な検査になるね！

１９[実技・考察] ギターを弾いていると，弾いていない弦からも音が出ていることがある。これを確認し，この現象が生じる理由を考えよ。また，ギター(クラシック，アコースティック)の“穴”に向かって大きな声を出して，共鳴が生じるか確かめよう。

７． 固有振動の具体例

さて実は，スイカの固有振動を理論的に正確に知るのは難しい。多くの場合，物体の固有振動を計算するのは簡単なことではないのだ。“ダブル里芋振り子”だって例外じゃないよ。

しかし，弦の固有振動はとても単純で，しかも弦の固有振動を理解すれば，どんな物体の固有振動だってだいたいの感じは理解可能なのだ。

弦の固有振動をよ～く理解し，その知識を使い，さらに気柱(管楽器の内部の空気の柱)の固有振動も調べていこう。楽器の基本原理でもある。

①（弦の固有振動）

p.53の最後でも触れたが，ウェーブマシンの固有振動はウェーブマシンに生じる定常波なのである。さらに図7.1の実験を行ってみるとまさに一目瞭然で，バイブレイターの振動数 f [Hz]を0 Hzから徐々に高くしていったとき，f がある特定の値 f_1, f_2, f_3 ･･･になると，弦には定常波が現れるのである。外部からの振動に対して弦が共振するのである。f_1，f_2，f_3 ･･･はそれぞれ弦の固有振動の振動数である。

弦の固有振動もウェーブマシン同様、弦に生じる定常波として理解できる。

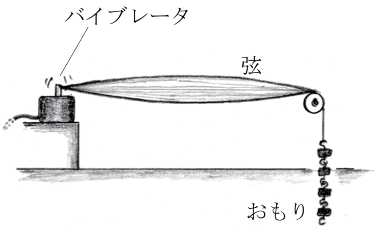


図7.1 バイブレータにたこ糸(弦)を付け，滑車に掛けておもりを吊す。振動数を調節すると，たこ糸(弦)に“腹1つ”の定常波をつくることができる。これはたこ糸(弦)の固有振動の１つである。

②（弦の振動数)

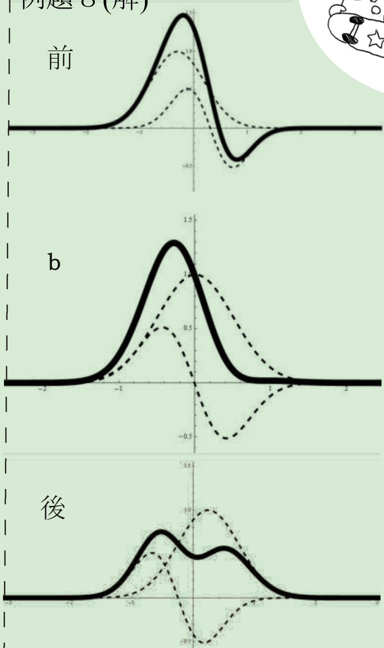
ギターなどの弦の途中を指で押さえて弦を短くすると，弦を伝わる波の往復時間が短くなって弦の振動数が高くなり，弦から出る音が高くなる。また，弦は，軽いほど，また強く張るほど高い音を出す。これは，そのようにすると，弦を伝わる波の速さが速くなって波の往復時間が短くなり，振動数が高くなる。（余裕があればp.57：問題２７参照)。

さらに詳しく弦の固有振動を調べるには，次の例題１２のように，「固有振動は弦に生じる定常波」という事実を活用する。

弦の固有振動は，弦に生じる定常波として理解される

･･･(7.1)

例題８(解)



ｂが正解。参考のために前後の波形も描いた。

例題１２　弦の固有振動を基本からマスター！

長さ L[m]の弦の**基本振動**の振動数(最低振動数)を f_1[Hz]とし，その弦に生じるいろいろな固有振動の振動数を f_1 で表そう。次の[1]〜[3]にもとづいて，図7.2を完成させよ。

[1] 弦の固有振動は弦に生じる定常波であり，両端は節になっている。

[2] 定常波であるからp.50：(5.2)が成り立っている。

[3] 弦を伝わる波の速さ v は波長 λ には無関係なので(分散なし)，$v=f\lambda$ ＝一定であり振動数 f は波長 λ に反比例する。

（分散なし p.47：＜補足３＞参照）

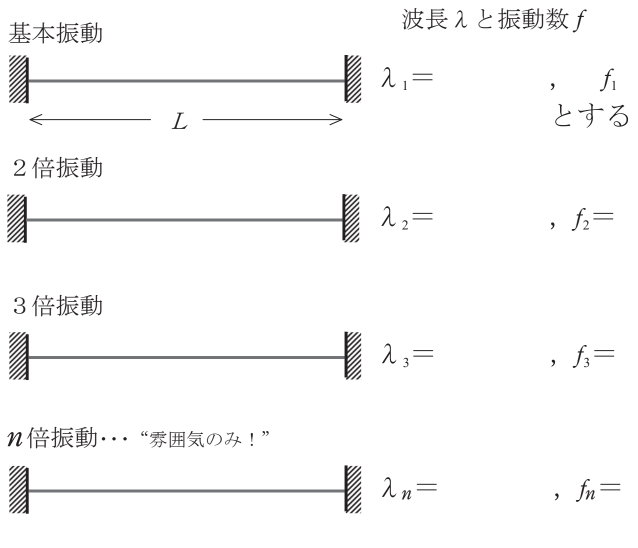


図7.2 弦の固有振動

例題１２(解)　$\lambda_1=2L$，$\lambda_2=L$，$f_2=2f_1$，$\lambda_3=(2/3)L$，$f_3=3f_1$，$\lambda_n=(2L)/n$，$f_n=nf_1$

例題１２より，弦に生じる固有振動には「基本振動の振動数 f_1 の整数倍(自然数倍)」という単純な法則性のあることが分かった。**基本振動**に対して振動数が2倍，3倍･･･の固有振動を，それぞれ**2倍振動**，**3倍振動**，･･･という。

なお，基本振動から出る音を**基本音**，2倍以上の倍振動から出る音を**倍音**という。弦の個々の固有振動(f_1，f_2，f_3，･･･)はそれぞれ単振動なので，1つの固有振動のみから出る音(基本音，倍音)は「音叉の音」なのである。

＜補足５＞　普通に弦を弾いた場合：音程と音色

普通に弦を弾いた場合，基本振動 f_1(基本音)といっしょに多くの倍振動 f_2，f_3 ･･･(倍音)が生じている。ただし，弦から出る音の音程は基本音 f_1 で決まり，倍音の混ざり方が音色を決めている。基本振動 f_1 を含まない振動をつくることも可能だが，その場合は，振動に含まれる中で一番低次の固有振動が音程を決めている(p.57：問題２５参照)。

倍振動の混ざり方は，たとえば弦を弾く場所によって変わってくる。したがって，弾く場所によって音色が異なる（p.56：問題２４参照）。なお，各倍音は正弦波(単振動)の音波なので，上記のことは正弦波の混ざり方が音の波形(音色)を決定していることを示している（p.38：＜コラム１＞参照）。

例題１３　ギターで物理

(1) ギターの第5弦(図7.3)は，基本振動の振動数が $f_1=110$ Hz である。この弦を弾いたときに出てくる音には，どんな振動数の倍音(単振動)が含まれているか。

(2) 弦の長さを $L=65$cmとして，弦を伝わる波の速さv [m/s]を求めよ。

(3) n倍振動の振動数 f_n [Hz]を L，v，nで表せ。

図7.3 ギターは，弦の実験には最適な楽器。ただし，弦を伝わる波の速さは･･･目にも留まらぬ速さ。

例題１３(解) (1) $f_2=2f_1=2\times110=$<u>220 Hz</u>，$f_3=3f_1=$<u>330 Hz</u>，$f_4=4f_1=$<u>440 Hz</u>，･･･

(2) 基本振動を作っている“見えない波”に注目すると

その振動数は $f_1=110$ Hz，波長は $\lambda_1=2L=2\times65\text{cm}=1.3\text{m}$

　したがって「$v=f\lambda$」より $v=f_1\lambda_1=110\text{Hz}\times1.3\text{m}=143\fallingdotseq$ <u>140 m/s</u>

(3) $v=f_1\lambda_1$より $f_1=\dfrac{v}{\lambda_1}=\dfrac{v}{2L}$　，　$f_n=nf_1=\underline{\dfrac{n}{2L}v}$　　　･･･(7.2)

２０[実技] (毎年，大うけの実験) ばねロープのような，重ためのロープの一端を友達に持ってもらい，他端を小さく振動させて基本振動をつくろう。その周期を「タ～ン，タ～ン」というふうに憶え，次にその周期の$\frac{1}{2}$，$\frac{1}{3}$，･･･(振動数は2倍，3倍，･･･)でロープを振動させてみよう(図7.4)。きっと，p.55：例題１２のようになる! 基本，2倍，3倍，･･･は図7.4のようにしてリズム(周期)を捉えるとよい。

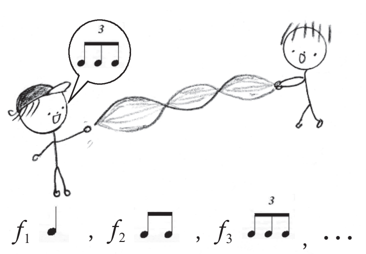


図7.4

２１　弦の基本音 f_1が  なら f_2，f_3 ･･･はどんな音程の音か。p.46：＜コラム２＞の表を参照せよ。

２２　ギターのある弦を弾いたとき  の音が出たとする。その弦上のある場所を押さえて弦を短くすることにより，  (振動数2倍)および  (振動数1.5倍)の音を出したい。弦の長さをそれぞれはじめの何倍(分数)にすればよいか。

２３[実技](弦の共鳴) 図7.5：ギターの第1弦(ミ)を弾き，その直後に第1弦を指で押さえて振動を止める。第1弦からは音が出てないはずだが，ギターからはまだ同じ音(ミ)が出ている。このとき，主として第5弦と第6弦が共鳴していることを確かめよ。さらに，第5弦、第6弦の何倍振動が共鳴したのかを，理論的に予想し，実際にそれを確かめよ。**ヒント**：節の位置に触れても振動は止まらない。

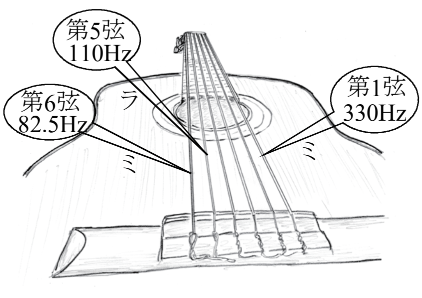


図7.5 ギターの第1弦を弾いてミの音を出し，その直後に第1弦を押さえて振動を止めても，ギターからは同じミの音が出ている。

２４[実技](ギターシンセサイザー)　次の(1)～(3)のように，弦を弾く場所を変え，出てくる音の音色を比較せよ。

(1)「穴」のところ　(2)弦の中央　(3)弦の端(ブリッジ)付近」

(3)の位置はできたら「お琴風」に弾いてみよ。(2)の位置では，右

手親指の腹で軽くスタッカート気味に弾いてみよう。聞きようによっては(!)，クラリネットの低音の感じになる。p.55：＜補足５＞参照

２５[実技]　図7.6の①のように，弦の中央に軽くふれたままで，その弦を弾き，2倍音(基本音の1オクターブ上)を響かそう。同様に，弦全長の$\frac{1}{3}$(7 ﾌﾚｯﾄ)，$\frac{1}{4}$(5 ﾌﾚｯﾄ)，･･･の位置を①のように触れて弾いてみよう。1/7の位置(7倍音)はちょっと奇妙！

２６[実技] 図7.7のように，例えば2倍振動に合わせて弦の端を小さく回転させ，“膨らんだ腹”をつくろう。

２７　弦の基本振動の周期 $T_1=1/f_1$は，波が弦を１往復するのに要する時間に等しいこと示せ。このことから，例えば弦の端付近を弾いたとき(図7.8)，基本振動と同じ振動数の振動が生じることを説明せよ。**注**：この場合の振動は基本振動（腹一つ）そのものではないが音程は基本振動と同じである　p.55：＜補足５＞参照

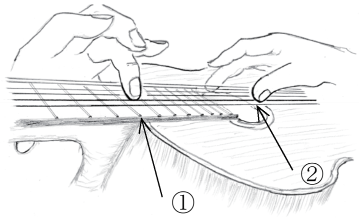


図7.6　①左手の指で弦の中央(12ﾌﾚｯﾄ)に軽く触れる　②右手の指で弦を弾く。

図7.7

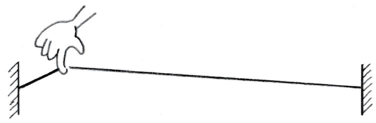


図7.8

＜補足６＞　弦を伝わる波の速さ，そして*“弦の状態方程式”*!!

弦を伝わる波の速さ v [m/s] は，弦の**張力** S[N] と**線密度**（単位長さあたりの質量） ρ [kg/m](ロー) によって決まり，次式が知られている。

$$v=\sqrt{\frac{S}{\rho}}\ \text{[m/s]} \qquad \cdots(7.3)$$

さらに図7.9のように，振動数 f [Hz]でn倍振動(“腹n個”)が生じているなら，p.56：(7.2)式より

$$\text{“弦の状態方程式”}\qquad f=\frac{n}{2L}\sqrt{\frac{S}{\rho}} \qquad \cdots(7.4)$$

(7.4)式を仮に“弦の状態方程式”と呼んでおこう！弦の振動の性質をすべて含んでいる式で，とても便利です！

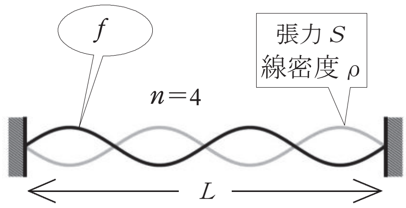


図7.9　弦の長さL，振動数f，腹の数n，張力S，線密度ρは，弦の固有振動の状態を表す変数といえる。

③（気柱を伝わる音波と気柱の固有振動）

管楽器の管の中のような「空気の柱」を**気柱**という。弦楽器の弦の場合と同様に，気柱も固有振動をもっている。これは気柱と呼ぶ「空気のばね」の固有振動(＝定常波)であり，音波そのものの定常波である。

最も単純な気柱のモデルは，図7.10ａ，ｂのような**閉管**と**開管**で，閉管は片方が閉じた円筒形の気柱(試験管のイメージ！)，開管は両端が開いた円筒形の気柱である(ガラス管のイメージ)。ちなみ

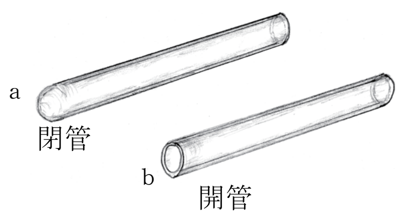


図7.10　ａ閉管：試験管的
ｂ開管：ガラス管的

に，後述の固有振動の性質から考えると，クラリネットは閉管的でフルート(図7.11)は開管的と言えるのである。確かに楽器内部の気柱の形もそれぞれ“そんな感じ”になっていますね*1。

気柱の固有振動も弦の場合からの類推で理解できるのだが，大きな違いは，気柱には開口端が存在することだろう。「弦は両端が固定されているから波がそこで反射するけど，気柱では“口”が開いてるから音が抜けていく！“*筒抜け！*”」という疑問もあるだろう。だが実は音波は開口端でも，ある程度は反射するのである。

図7.12の模式図のように，音波は気柱の両端で反射を起こしていて，弦の場合と同様に定常波が生じる。音叉から入射する音波 i と開口端Ａで反射した音波 r が強め合うようになっているなら，気柱を伝わる音波の振幅は大きくなり，定常波が育つ！。

以下，開口端ではウェーブマシンの自由端と同様の反射が生じるという類推(仮定)で話を進めていこう。

＊1 サキソフォンやオーボエは，気柱の一端がほぼ閉じているという点ではクラリネットと似ているが，倍音はむしろ開管的なのである。これは気柱が円錐形であるためだそうだ。

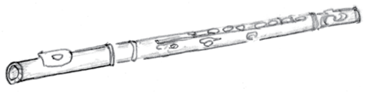


図7.11 フルートは開管的に振る舞う

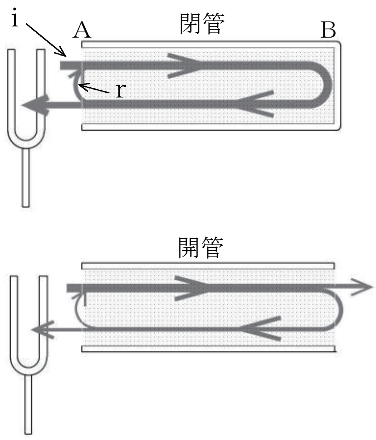


図7.12 気柱を伝わる音波の模式図。音叉から入射する音波 i と開口端Ａで反射した音波 r が強め合うなら，気柱を伝わる音波の振幅は大きくなる。

④（気柱の固有振動）

気柱を伝わる音波の進行方向は，図7.12のように，主に気柱の長さの方向だが，空気を伝わる音波は縦波*1なので，音波による空気の振動方向も長さ方向である(まさに「空気のばね」の振動)。したがって，閉端部は空気が動きにくく，空気の変位に注目するなら定常波の節となり，開口部付近は空気が振動しやすく定常波の腹ができると推測できる。以下では，音波の振動を主に「変位のグラフ」で捉えていくことにする。

＊1 p.44：②(縦波と横波)，特に図4.4を参照のこと。

例題１４　気柱の固有振動の基本をマスター！

長さ L[m]の開管・閉管の基本振動をそれぞれ f_1[Hz]，f_1' [Hz]として，閉管・開管に生じる固有振動の振動数をそれぞれ f_1，f_1' で表そう。空気中の音速を V[m/s]とする。

次の[1]〜[3]にもとづいて，図7.13を完成させよ。

[1] 気柱の固有振動は気柱に生じる定常波である。閉端部では媒質の振動(↔方向)はないから変位のグラフの節，開口部では振動しやすいから変位のグラフの腹になると仮定しよう。ただし作図は，ウェーブマシンに生じる定常波のイメージを頼り

にして「変位のグラフ」を描こう。

[2] 定常波であるからp.50：(5.2)が成り立っている。

[3] 空気中の音速 V[m/s]は，波長 λ には無関係(分散*2なし)なので，$V=f\lambda$ ＝一定であり，振動数 f は波長 λ に反比例する。

＊2　p.46：④(音波の伝わる速さ：音速)，p.47：＜補足３＞

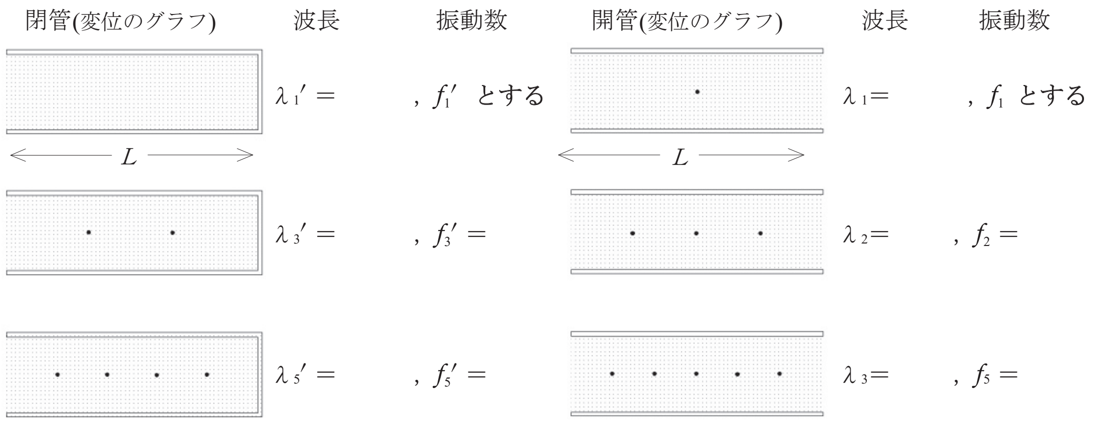


図7.13　気柱の固有振動

例題１４(解) 閉管：$\lambda_1' = 4L$，$\lambda_3' = (4/3)L$，$f_3' = 3f_1'$，$\lambda_5' = (4/5)L$，$f_5' = 5f_1'$

開管：$\lambda_1 = 2L$，$\lambda_2 = L$，$f_2 = 2f_1$，$\lambda_3 = (2/3)L$，$f_3 = 3f_1$

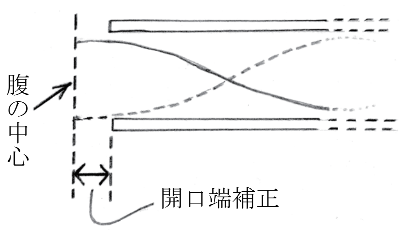


図7.14　開口部の腹は，実際には開口端から少し外にはみ出している。

実際には図7.14のように，開口部の腹(変位の最大振幅のところ)は管口から少し外側にできる。これを**開口端補正(管口補正)**という。

開口部での音波の反射の原因は，「気柱vs.大気」という境界の存在(空気の振動という点では性質を異にする)だが，開口端ぴったりのところは，まだその境界に達していないということである。

＜補足７＞　やや難しい補足：変位か圧力･密度か

気柱に生じる定常波(固有振動)を，圧力(密度)の変動に注目して扱うと，腹と節の位置が「変位のグラフ」の場合とは逆になる。開口部では空気がよく動くのだが圧力はほぼ大気圧に等しく変動が少ないので圧力のグラフでは「節」になる。閉端部では逆に，圧力の変動が激しく「腹」になるのだ(p.44：②(縦波と横波)参照　)。

なお，変位のグラフでは，開口部・閉端部での反射はそれぞれ自由端的・固定端的だが(座標軸の正の向きは反射の前後で変えない)，圧力・密度のグラフでは，開口部・閉端部での反射はそれぞれ固定端的・自由端的である。もちろんこれは表現

の違いであって，物理現象としては同じ対象を扱っている。

次の各問では開口端補正(管口補正)は無視して計算せよ。

２８　長さ L [m]の開管と閉管について，基本振動数 f_1，$f_1{}'$ [Hz]をそれぞれ求めよ。ただし，管内の音速を V [m/s]とせよ。

２９[考察] フルートとクラリネットの全長は同じ程度と言えるが，最低音はオクターブ(振動数2：1)近く違う。この理由を推察せよ。

３０　同じ長さの開管と閉管の基本振動数 f_1，$f_1{}'$ [Hz]の比を求めよ。音程差はどれだけか。

３１　開管，閉管それぞれについて，固有振動の特徴を述べよ。

３２　基本音が 260 Hz（だいたい  ）の開管の長さを求めよ。音速を340 m/s とせよ。なお，フルートの最低音はこの音であり，フルートの全長は約 65 cm である。

３３　管の長さを $\frac{1}{2}$ にすると，基本音の音程はどう変るか。

３４[考察](残響の違い) ギターなどの弦を弾くとしばらくの間は音が出ている。一方，管楽器の場合，吹くのを止めると速やかに音が消えてしまう。この違いの原因を説明せよ。

３５　ある管(気柱)の基本振動数が，0 ℃ の空気中で400 Hzだった。0 ℃のヘリウム中では，この管の基本振動数は何Hzになるか。ただし，空気中とヘリウム中の音速は，0 ℃ において，それぞれ約330 m/s，970 m/sである。[考察(やや難)]ヘリウムを吸い込んで声を出すとかん高い声になる理由を推察せよ。

３６　気柱（空気）の温度が 20 ℃から 35 ℃に上昇すると，基本振動は何％変化するか（空気中の音速の変化に注目：p.46：(4.1)式)。管楽器は演奏前に温める。この理由を考えよ。

３７[考察]高層ビルの屋上に大きな水槽を置くことにより，地震や風によるビルの揺れを弱くさせることができる。この理由を考えよ。高層ビルはモデルとしては閉管の気柱に似ている。

３８[実技，考察(やや難)] ティーカップの縁をスプーンか箸で軽く叩き，出てくる音の音程を調べる。図7.15のように，取っ手を含む十字線上を叩く場合と，その中間を叩く場合とでは音程が異なる。どちらの音程が低いか？この現象が生じる理由を推察せよ。

３９[考察 難] 音叉などを用意しなくても，管口にうまく息を吹きつけると管（気柱）が鳴る。この理由を考えよ。この場合，音源はないので，p.58：図7.12とは様子が違う(共鳴が生じるメカニズムが少し違う)。なお，吹き方によって，基本音，2 倍音(開管の場合)，3倍音，‥‥を出すことができる。

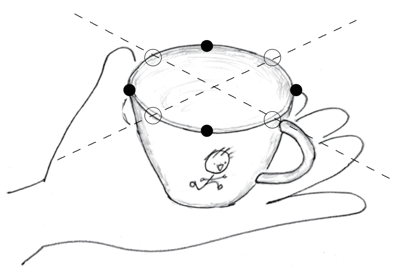


図7.15 ティーカップを手の平に載せ，スプーンや箸などで軽く叩く。取っ手を含む十字線上の○印の所を叩いたときと，その中間の●印のを叩いたときとの音程を比べる。

＜補足８＞　固有振動と定常波

図7.16のように，ウェーブマシンの一端Ａを振動し続けると，他端Ｂからの反射波と重ね合わさって定常波が生じる。しかし，実際にやってみると，安定した定常波をつくるためには周期・波長の調節が必要で，周期・波長をうまく調節すると，振動を与えるのを止めてもウェーブマシンは同じ定常波(＝振動状態)を自ら維持する。これがまさにウェーブマシンの固有振動だったのだ。

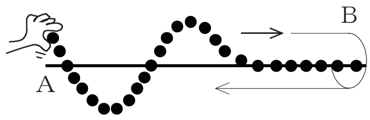


図7.16　ウェーブマシンに正弦波を送り込む。正弦波はＢで反射し，Ａに戻ってくるが，Ａからの入射波と重ね合わさり定常波ができると考えられる。

一般に，固有振動は物体に生じる定常波として理解されるが，それは「物体に閉じ込められた見えない波」が合成されてできた定常波なのだ。「見えない波」とは，p.50：図5.6の“右進波”W_1，“左進波”W_2である。p.54：「７.固有振動の具体例」では，この事実をフルに活用したのであった。

固有振動のメカニズム(やや難)

さて，ＢからＡに戻ってきた波は，Ａで再び反射する。このとき，「Ａで再び反射した波」が「Ａから入射させた新入りの波」と同位相になるようなタイミングになっていれば，これらの波は強め合い，ウェーブマシンを伝わる波の振幅が大きくなる。そうすると定常波の腹も大きくなる。つまり，定常波が育つのである――腹・節・腹が，はっきりと現れる。この状況は気柱のほうがイメージしやすいかもしれない。p.58：図7.12である。気柱(空気)は目に見えないので，腹・節はイメージしづらいが，「Ａでの反射波ｒが，新入りの入射波ｉと同位相」というところは，むしろイメージしやすいのではないだろうか。

定常波が育つには前述の「うまいタイミング」が必要で，ウェーブマシンに与える波の周期・波長が，ある特定の値のときにそれが実現する。定常波が十分に育ったなら，Ａを振動させるのを止めても(それ以上，波を入れるのを止めても)定常波は維持され，ウェーブマシンは一定の振動をし続ける。実はこのとき図7.17のように，ウェーブマシンの中に閉じ込められているW_1とW_2は，一つながりの波となっているのである＊3。これが固有振動の仕組みであり，振動数 f_1，f_2，f_3 ･･･は，このような条件を満たすW_1，W_2の振動数ということである。

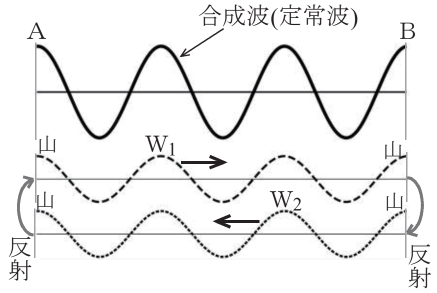


図7.17　“右進波”W_1と“左進波”W_2が合成されて定常波がつくられる。W_1とW_2が，両端Ａ，Ｂでつながっている場合(位相に飛びがない場合)，安定した定常波が維持される。これが固有振動である。

図は，両端が自由端の場合を描いている。固定端の反射では，W_1とW_2が半波長だけずれる(位相がπ／2 radだけ飛ぶ)。

＊3　「位相に飛びがない波」ともいう。要するに，山・谷・山・･･･と周期的につながっている波(ただし，固定端の場合は反射に伴い位相反転が生じるので要注意)。この着想を用いて，弦・開管・閉管の固有振動の波長・振動数を一般的に表現(n倍振動)してみるとよい勉強になる。

８.(続)波の重ね合わせ：波の干渉

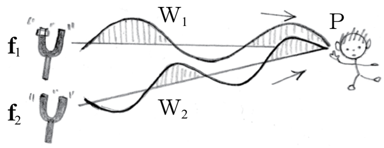


図8.1　振動数が少し異なる２つの音叉から出た音波W_1，W_2がＰ点で重なり，うなりを生じる。

①（うなり）

波長の等しい２つの波が“正面衝突”すると，定常波が生じるのだった――２つの波が強め合う場所(腹)と打ち消し合う場所(節)が生じる。今度は，波長の異なる波(したがって周波数の異なる波)が重ね合わさるケースを扱おう。

図8.1のように，波長(あるいは周波数)の異なる２つの波W_1, W_2が重ね合わさるなら，ある場所Ｐでは，両者が同位相で重ね合わさる状況と，逆位相で重ね合わさる状況とが周期的に現れる。これは，図8.2(ａ)のように波W_1，W_2が並進していると考えると分かりやすいだろう。波W_1，W_2の合成波は図8.2(ｂ)のような波形となり，振幅が周期的に変動している。このような波形の音波がＰ点に入ってくることになるので，Ｐ点では音の大きさが“ウォンウォン”と周期的に変動する。この現象を**うなり**という。同様の現象は音波以外のどんな波でも生じうる。

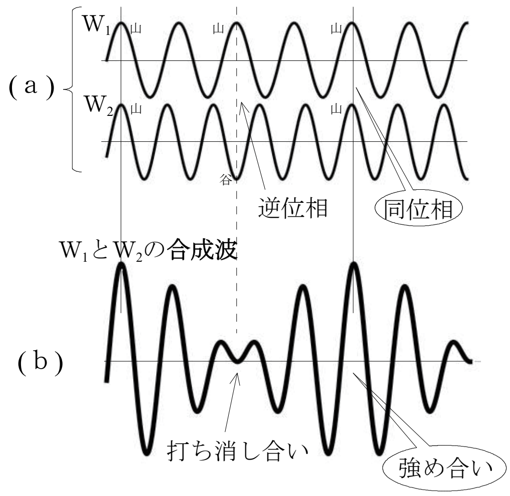


図8.2　図8.1の波W_1，W_2が(ａ)のように並進していると考えよう。同位相・逆位相の箇所がそれぞれ周期的に現れてくることが分かる。
(ｂ)は波W_1，W_2の合成波の波形であり，波の干渉の結果，振幅が周期的に変動する。

②（うなりの回数）

２つの波の周波数（振動数）をそれぞれ f_1[Hz]，f_2[Hz] とすると，１秒間あたりのうなりの回数(うなりの周波数) $f_{うなり}$ [Hz] は次式で求められる。(図8.3)

うなりの回数　$f_{うなり} = \lvert f_1 - f_2 \rvert$　　[Hz]

・・・(8.1)

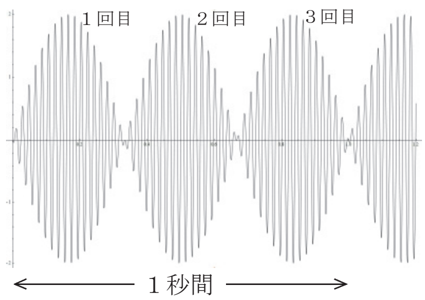


図8.3　$f_1 = 53\,\mathrm{Hz}$ とで $f_2 = 50\,\mathrm{Hz}$ でのうなり(このグラフの横軸は時間)

周波数が等しければ($f_1 = f_2$)うなりは生じない。そこで，弦楽器の調弦や，複数の楽器のチューニング(音程合わせ)では「うなりを消す」という方法で音の高さを合わせることができる。

４０　半音違いの音から生じるうなりの回数は，高音域と低音域とで，どちらが多いか。p.46：＜コラム２＞参照

４１[実技] 同じ振動数の２つの共鳴音叉をいっしょに大きく鳴らそう。もちろん，うなりなど生じない・・・はず。でも、あえて実際にやってみよう！きっと，大発見(?)があると思う(笑)

４２[考察](やや難) (8.1)式を導出せよ。
厳密に導くためのヒント：図8.1のＰ点で，W_1とW_2による振動が同位相(位相差0°)だった時刻から次に同位相(位相差360°)になるまでの時間がうなりの周期 $T_{うなり}$[s]である(p.36：図1.3で，ａとｂの周期が異なる場合を考える)。また，$f_{うなり}=1／T_{うなり}$である。

＜コラム５＞　協和音

音の場合，$f_{うなり}$ が 10 Hz 程度を越えると「うなり」というよりむしろ「音のにごり」として聞こえる。ただし，２つの振動数 f_1，f_2 の比が 2：3 （ドとソ）のような簡単な整数比の場合には，図8.4のように，整った形の波形が合成され，うなり や にごり は全く聞こえない(平均律音階の場合は少しにごる。p.46：＜コラム２＞参照)。これが**協和音**である。

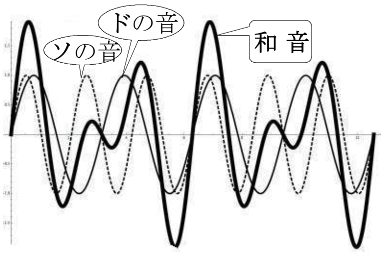


図8.4 「ドの音」と「ソの音」は振動数に差はあるが，比が２：３という簡単な整数比。このような場合，うなりは生じない。

＜コラム６＞　結合音

聴覚のシステムは，二つの音（振動数 f_1，f_2 ）の信号が入力されると，“勝手に”第3，第4･･･の信号（振動数 $|f_1-f_2|$，f_1+f_2，$|2f_1-f_2|$ 等々の信号）を作り出してしまうことがある。これは多くの場合，弱い信号ではあるが，音波としては存在しない信号が「音」として聞こえることになる。このような音を**結合音**という。

振動数 $|f_1-f_2|$ の結合音は**差音**と呼ばれている。差音はうなり(beat)が元になって生じることもあるが，一方で，脳での情報処理に伴って「聞こえてくる」という面もあるとのことである。実は，差音は「知らず知らず」のうちに楽音（音楽的な音）の低音を補強している場合があるとのことだ。*1

ホイッスルの音をよく聴くと，結合音の存在が容易に確認できる。はじめに音を一つずつ出し，次にいっしょに出す(普通に吹く)とよい。

＊1　チャールズ・テイラー著『音の不思議をさぐる』音楽之友社 より

９．ドップラー効果

救急車が通過するとき，“ピーポー音”の音程が変化する。あれはドップラー効果と呼ばれている現象の一例です。動きながら出している音は，止まっている人には本来の音とは違った高さの音に聞こえるのですが，決して錯覚ではないですよ！音波に限らず，あらゆる波がドップラー効果を起こします。光もドップラー効果を起こします。太陽表面の振動の様子を光のドップラー効果を用いて調べる研究は，いま，最先端の話題。

注意　p.42：④(波の基本式と観測者）の学習を飛ばしている場合は，ここで一度，戻って取り組んでおくとよい。

①（波源が動く場合）

媒質に対する波の速さは媒質の性質で決まるので，「波源」の動き(速さ)には無関係である。波は媒質に対して一定の速さで伝わる。

したがって，図9.1のように指（波源）を水平方向に移動させながら水面をつついていくと，それぞれの「波紋」は，つついた場所を中心に円形に広がっていく。その結果，波源（指）の進行方向の前方では波長が短くなり，後方では長くなる。音波の場合，音源の移動方向の前方にいる観測者は，本来の音より高い音を聞き，後方では低い音を聞くことになる。

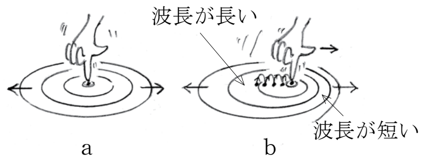


図9.1 水の波は，水に対して一定の速さで進む。だからｂのように指を動かせば，指の進む向きでは波長は縮まる。

例題１５　波源が動く場合の公式

図9.2のように，Ｓさんが声を出しながら，静止しているＡさんに向かって走っている場合を考えよう。Ｓさんが出している音波の振動数をf_0[Hz]，音速を V [m/s]，Ｓさんの速さをu[m/s]とする。

(1) 時刻 0 s にＳさんから出た音波の「山」を“山Ｐ”と名付けよう。時刻0～t [s]までの間に，Ｓさんおよび山Ｐが移動した距離を求め，図9.2にも記入せよ。

(2) t [s]の間にＳさんの口から出た音波の波長数を求めよ

(3) Ｓさんから前方に出る音波の波長$\lambda_{前}$を求めよ。

(4) 音源の前方で静止している観測者Ａさんが受ける音波の振動数を $f_{前}$[Hz]とし，Ａさんを基準として「$v=f\lambda$」の式を立てよ。必要なら$\lambda_{前}$を用いてよい。

(5) Ａさんが観測する振動数 $f_{前}$を f_0，V，uで表せ。

注:“山Ｐ”のＰはprimaryのＰであり, 著者は2007年から使用している

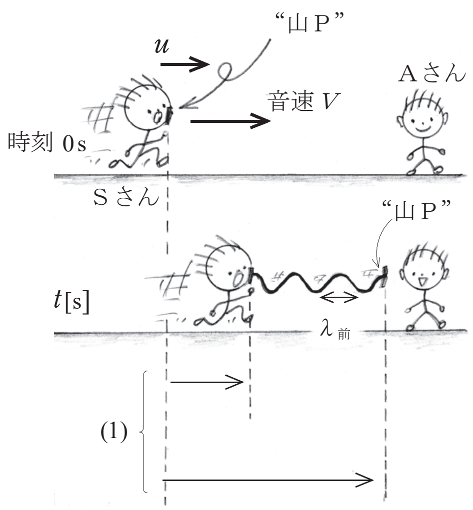


図9.2　Ｓさん(音源)は声を出しながら，速さ u でＡさん(観測者)に近づく。Ｓさんの口から最初に出た音波の山“山Ｐ”は t[s]後，Ａさんに届くが，その間にＳさんは音波を出しながら移動した。

例題１５(解)(1)山Pは Vt[m]移動，Ｓさんは $u\ t$ [m]移動。(2) $f_0\ t$
(3) $\lambda_{前} = (Vt - u\ t) / f_0\ t = (V - u) / f_0$
(4) $V = f_{前}\lambda_{前}$　(5)　次の通り

動く波源の前方で観測される振動数　$f_{前} = \dfrac{V}{\lambda_{前}} = \dfrac{V}{V-u} f_0$　･･･(9.1)

４３　例題１５と同様にして，動く波源の後方で静止している観測者が受ける振動数(周波数) $f_{後}$を計算する公式を導け。

４４　車が $f_0 = 200$ Hz のクラクションを鳴らしながら20 m/sでAさんの前を通過した。音速を340 m/s とする。

(1) 通過前にＡさんが聞くクラクション音の振動数は何Hzか。

(2) (1)の振動数は通過後に聞く振動数の何倍か。この値は f_0 の値には無関係であることを確認せよ。

４５　歩道に立って通過する車のクラクション音を聞いた場合，振動数はどのように変化するか。概略を答えよ。

４６ 例題１５の状況において，ＳさんおよびＡさんそれぞれを基準として「$v = f\lambda$」の式を立てよ。その2つの式から(9.1)式を導け。

４７ (人の走る速さとドップラー効果) 図9.2で，Ｓさんが $f_0 =$ 400Hzの声を出しながら，$u = 10$ m/sでＡさんに近づいているなら，Ａさんが聞くＳさんの声は何Hzになるか。音速を340 m/s とする。音程の変化がどの程度かも調べよう。p.46：<コラム２>参照

②（観測者が動く場合）

図9.3 a のように，波に向かって進む場合，Ａさんが受ける波の周期 T' は本来の周期 T_0 より短くなる。逆に，波と同じ向きに進む場合（波を追い越さないとして），T' は T_0 より長くなる。図9.3 b のように，音波の場合，観測者が音源に近づくときは，もとの音より高い音を聞き，遠ざかるときには低い音を聞く。

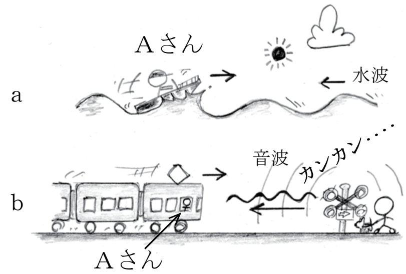


図9.3　観測者が動いている例

例題１６　観測者が動く場合の公式

図9.4において，音速を V [m/s]，Ｓさんが出す音波の振動数を f_0 [Hz]，波長を λ [m]とする。また，観測者Ａさんは u [m/s]でＳさん(波源)に近づいているとする。

(1) 時刻0 s でＡさんが受けた山を“山Ｐ”と名付けよう。時刻0〜t [s]の間にＡさんおよび山Ｐが移動した距離を求めよ（図9.4中の２つの矢印↔を参照せよ）。

(2) Ａさんが受ける振動数を $f_{近}$[Hz]として，時刻0〜t [s]の間にＡさんを通過した波長数を $f_{近}$ と t で表せ。

(3) 音波の波長 λ [m]を $f_{近}$，V，u で表せ。

(4) Ｓさん基準(音源基準)で「$v=f\lambda$」の式を立てよ。

(5) Ａさんが観測する振動数 $f_{近}$ を f_0，V，u で表せ。

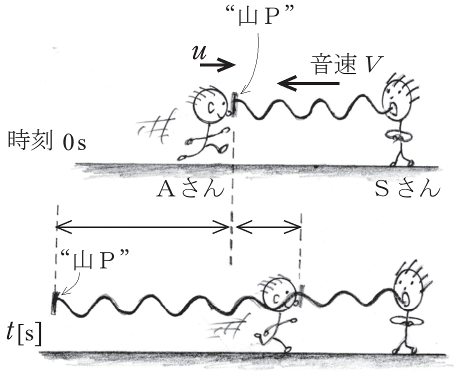


図9.4　Ａさん(観測者)は，声を出しているＳさん(音源)に向かって速さ u で進んでいる。Ａさんは，立っているときよりも多くの音波を受けることになるので，本来よりも高い音を聞く。

例題１６(解)(1) 山Pは Vt[m]移動，Ａさんは ut [m]移動。
(2) $f_{近}t$　(3) $f_{近}t\times\lambda=Vt+ut$，したがって $\lambda=(V+u)/f_{近}$
(4) $V=f_0\lambda$　(5) (3)(4)で求めた式から λ を消去すると

波源に近づく観測者がうける振動数	$f_{近}=\dfrac{V+u}{V}f_0$

$\cdots(9.2)$

p.64：①では「波源が動く場合」を扱い，②では「観測者が動く場合」を扱った。もちろん，両方とも動く場合でもドップラー効果が生じる。一般に，波源Ｓと観測者Ａの距離が変化するとき，観測者が受け取る振動数 f [Hz]は，波源の振動数 f_0[Hz]と等しくない($f\neq f_0$)のである。

４８　例題１６と同様にして，波源から u[m/s]で遠ざかる観測者がうける振動数 $f_{遠}$[Hz]を計算する公式を導け。

４９　図9.5の状況で，車Ａが100 Hzの音を出すと，車Ｂに乗っている人はその音を何Hzで聞くか。音速を340 m/sとせよ。

ヒント：Ａ，Ｂの間に「マイク＋スピーカー」を置き，Ａからの音をマイクで受け，それをそのままスピーカーから出すと考えてみよ。

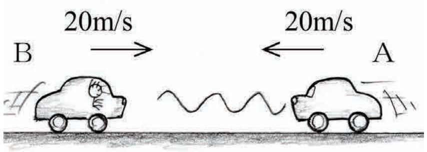


図9.5

５０　「スピード・ガン」は，電波のドップラー効果を利用してピッチャーが投げたボールの速さを測定している。図9.6のように，送信アンテナから周波数 f_0 [Hz]の電波を出して，u [m/s]で向かってくるボールにぶつけ反射させるとして，受信アンテナがうける電波の周波数を求めよ。光速をc [m/s]とし，音波と同じ原理でドップラー効果が生じていると見なして計算せよ(実際は少し違う)。なお，反射によって周波数は変化しない。

５１　ある物理学者が赤信号を無視して捕まったとき，「信号に向かっていたので，青く見えたんダョ」と弁解したというジョークがある。青色光は赤色光の約 1.5 倍の振動数である。この人は光速の何倍のスピードを出していたことになるか。光波が音波と同じ原理でドップラー効果を生じると見なして考えよ(実際は少し違う)。

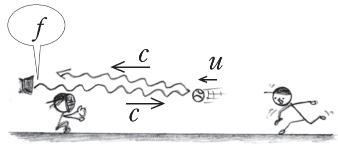


図9.6

＜補足９＞　あっさり味が好みの方へ！　公式を導く別の方法

音源(波源)の振動数 f_0 と観測者が観測する振動数 f の関係は，次の原理からも導くことができる。

「波の基本式は波源と観測者のどちらを基準にしても成り立つ」･･･(9.3)

これはp.43：(3.4)にまとめた事柄である。

図9.7のように，救急車Ｓ(音源)の速さを v，Ａさん(観測者)の速さを u，音速(空気に対する音波の速さ)を V，注目している音波の波長を λ とする(図9.8)。

観測者Ａに対する音波の相対速度[*1]は $V+u$ (図9.8)，波源Ｓに対する音波の相対速度は $V-v$ (図9.9)である。したがって公式「$v=f\lambda$」は

観測者Ａを基準：$V+u=f\lambda$　･･･(9.4)

波源Ｓを基準　：$V-v=f_0\lambda$　･･･(9.5)

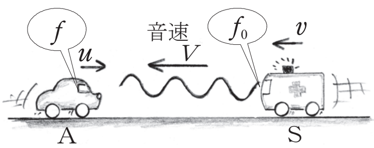


図9.7　救急車Ｓが速さ v で動きながら振動数 f_0 の音波を出し，車Ａは救急車Ｓに向かって速さ u で動き，Ｓからの音波を振動数 f で受けている。

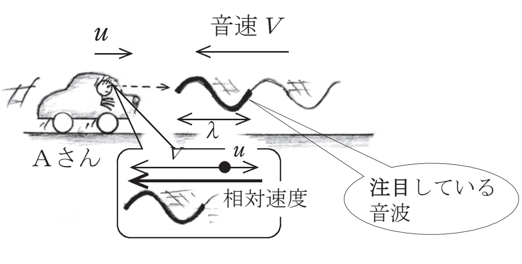


図9.8　Ａさんに向かってくる音波に注目すると，その音波のＡさんに対する相対速度は $V+u$ になる。

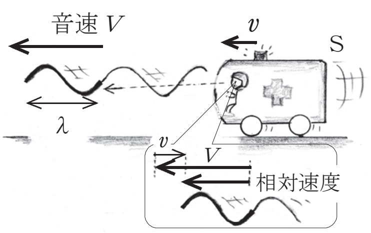


図9.9　Ｓから遠ざかる音波に注目すると，その音波のＳに対する相対速度は $V-v$ になる。

(9.4)，(9.5)式からλを消去して

∴ドップラー効果の基本公式　$f=\dfrac{V+u}{V-v}\cdot f_0$　　　・・・(9.6)

あるいは，(9.6)式から

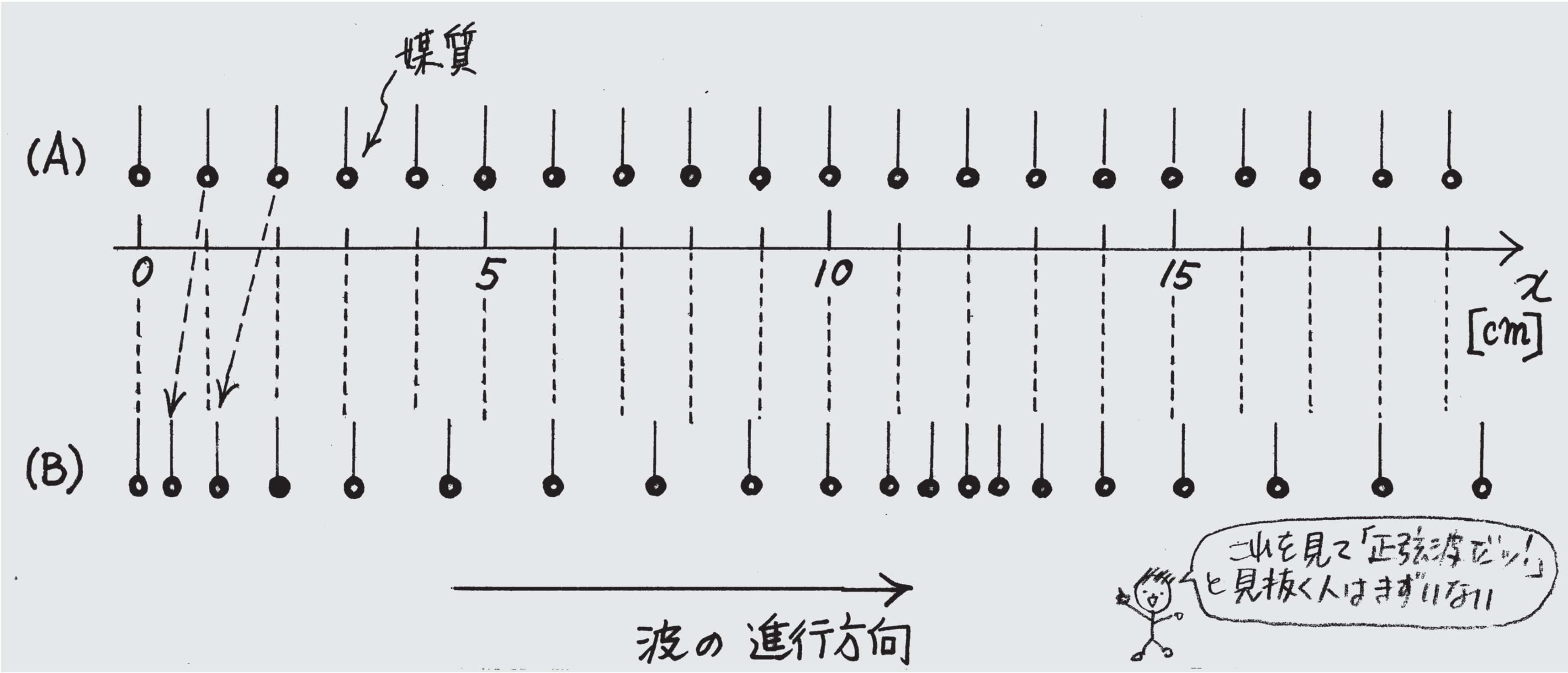
$$\boxed{\dfrac{f}{V+u}=\dfrac{f_0}{V-v}\quad\left(=\dfrac{\text{振動数}}{\text{音波の相対速度}}\right)}\quad\cdots(9.7)$$

(9.7)式は「Ａさんから見ても，救急車Ｓから見ても，波長の値は変わらない」ということを表している。

　Ｓ，Ａの運動の向きを変えると公式がどう変わるかを考えておこう！

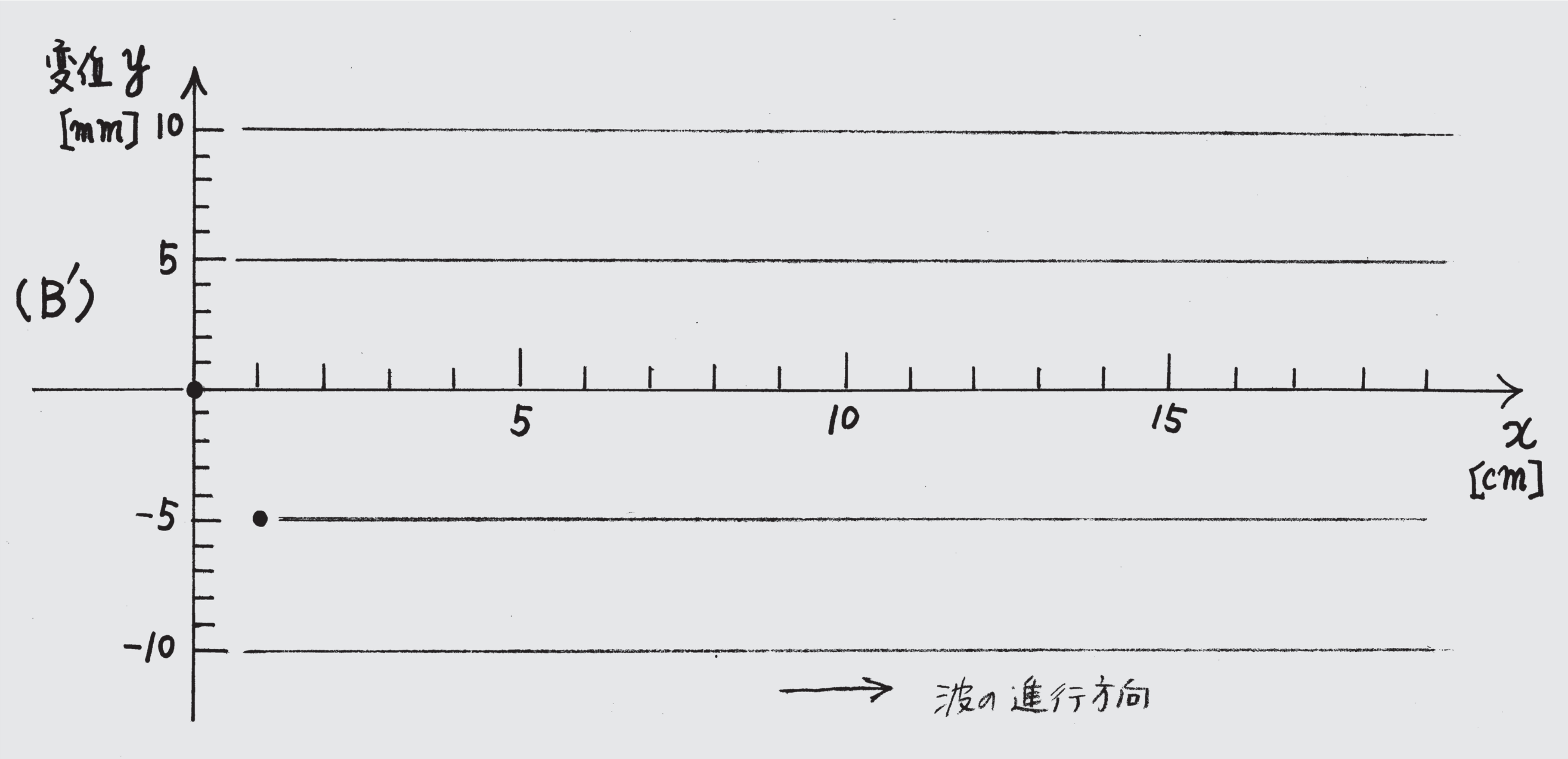
＊1　相対速度については「Ｉの10.速度と相対速度」を参照せよ。

たて波のグラフ（変位のグラフ）

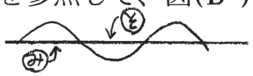


図(A)は波がないときの媒質の状態を表していて、図(B)はたて波が通過しているときのある瞬間の媒質の状態を表している。

図(A)において、$x = 1.0$ ｃｍ にあった媒質は図(B)では左（負の向き）に ５mm 変位している。そこで、下の図(B′)に「 $x = 1.0$ ｃｍ の媒質は −５mm 変位」と ● 印を記入する。他のすべての媒質についても同様に、それぞれの変位を 図(B′)に記入し、図(B′)に たて波(B)の変位のグラフを描く。 ● 印は滑らかな曲線で結ぶ。



問１　このたて波の振幅A、波長λをそれぞれ求めよ。

問２　図(B)を参照して、図(B′)のどの部分が「疎」あるいは「密」になっているか、適当な記号で記入せよ
（例：）

問３　図(A)で、$x = 6.0$ cm のところの媒質は、図(B)において、正・負どちらの向きに運動しているか。図(B′)を使って判断せよ。

「熱もエネルギー，でも・・・」問題略解（抜粋）

２　音楽を流せば，互いに無相関な踊りにはなり得ないし，個々の人が他の人からの影響を受けずに踊り続けるのは難しいかも。熱運動はアボガドロ定数的な数の分子が互いに無相関で運動！

４　＊＊＊温度は状態を表していて

温度は，感覚的には例えば「熱い・冷たい」という状態を表している。状態の変化は

７　温度が高いほど原子の熱運動が激しく，反応する原子どうしの衝突頻度が増す。勢いよく衝突するようになることも原因の一つ。

８　風船内の空気の熱運動が激しくなると圧力が増し，外からの圧力に抗して膨張する。後半は省略。

１０　1.89×10^{24} J，34％

１１　12 K

１２　1 kg＝1.0×10^{3}gの水について考えるとよい。<u>0.23 K</u>上昇。

１３　2000 kcal＝2×10^{6}cal＝8.4×10^{6}J，$Q=8.4\times10^{6}$J×40(人)÷24(時間)＝1.4×10^{7}J

「$Q=C\Delta T$」より　$1.4\times10^{7}\text{J}=mc=2\times10^{5}\text{g}\times1\ \text{J/(g·K)}\times\Delta T$　$\Delta T=\underline{70\ \text{K}}$　←ちょっとビックリ

１４　1 mの落下を50回続けて行う。これでもまずまず良い値が出る。もちろん問題点もありますね。

１６　位置エネルギーの減少量が融解熱になっている。m[g]×330J/g＝60×9.8×5m　より$m=8.9\fallingdotseq\underline{9\ \text{g}}$

１７　m[g]×2000J/g＝50×10^{3}g×4 J/(g·K)×(37.5－36.5)K　$m=\underline{100\ \text{g}}$

１８　雲は赤外線をよく吸収する。雲がないと，地面からの熱放射（赤外線）が宇宙空間に速やかに出ていくので，気温が下がる。**放射冷却**という。

１９　身体からの赤外線，電球や太陽からの光が熱放射の例。蛍光灯やLEDの光は熱放射ではない。

２２　ヒント：温度の高い面が比較的強い力(圧力)を受ける。白い面に比べて黒い面は，光をよく吸収するが，赤外線をよく放射する。(1)黒い面の温度が上がる。(2)黒い面の温度が急に下がる。

２３　80g×c [J/(g·K)](95－25)K＝{100g×0.40J/(g·K)＋70g×4.2J/(g·K)}(25－18)K，$c=0.418\fallingdotseq0.42$ J/(g·K)

２４　断熱圧縮，電子レンジのマイクロ波照射，化学反応(そもそも「燃やす」のは化学反応。使い捨てカイロも同じ)，摩擦熱，衝突(落下)，抵抗に電流を流す　など

２５　仕事により空気にエネルギーが与えられるが，ゆっくりだと，温度の低い外部へ熱が出ていく。

２６「断熱」は$Q=0$[J] で表現される。したがって，$\Delta U=Q+W=W=-W_{\text{gas}}$

２７　空気が山の斜面に沿って急に上昇する際，圧力低下(高度が上がるほど気圧が下がる)に伴って(ほぼ)断熱膨張が生じて温度が下がり，雲(霧)が発生する。空気が山頂を越えて降下するときには逆に断熱圧縮により温度が上がり雲(霧)が消える。つまり，山を乗り越える間だけ空気中に霧が発生しているのであって，同じ雲がずっとのっかているのではない。富士山にかかる笠雲も同様の現象。

２９　風船内の空気の内部エネルギーとゴムの弾性力のエネルギー

３０(1) $pV=nRT$ でp，nが一定だから，V/T＝一定。よって$2.0\times10^{-2}/(10+273\ \text{K})=2.3\times10^{-2}/(t+273)$　$\therefore t=\underline{52℃}$

(2) 圧力p＝一定だから，$W_{\text{gas}}=p\Delta V=1.0\times10^{5}\ \text{N/m}^2\times(2.3-2.0)\times10^{-2}\ \text{m}^3=\underline{+300\ \text{J}}$,

(3) 内部エネルギーの増加は$\Delta U=(5/2)p\Delta V=(5/2)W_{\text{gas}}=(5/2)\times300=\underline{750\ \text{J}}$，求める熱量を$Q$ [J]とすると，熱力学第１法則から，$\Delta U=Q-W_{\text{gas}}=Q-300=750$，$Q=\underline{1.05\times10^{3}\ \text{J}}$

３１　膨張はするが，仕事をする“相手”がいない。仕事＝0でエネルギーは失わない。

３３　試験管内の空気が温まって膨張すると，試験管の左側が上がりビー玉が右側にいく。試験管内の空気は炎から遠ざかって冷えていき，ビー玉は温まる。試験管内の空気が冷えて収縮すると試験管の左側が下がり，ビー玉は空気を暖めながら左側に寄り、初めの状態に戻る。これを周期的にくり返す。

３５　T_{L}を低くする。T_{H}を高くする。

３６　逆熱機関の作業物質に対して正の仕事をして($W>0$)，熱を低温側から高温側へ移動させている。p.29：(5.2)式と異なり$Q_{\text{L}}-Q_{\text{H}}+W=0$で，$Q_{\text{H}}=Q_{\text{L}}+W>Q_{\text{L}}$だから，部屋は暖まる！(注：$Q_{\text{H}}$は絶対値)

「自然は波でいっぱい」問題略解（抜粋）

２　単振動している物体が振動の中心を通過するとき，速さが最大で位相は 0° or 180°。その速さは，いっしょに動く等速円運動の速さと同じ。　３　変位，速度ともに互いに逆向き（逆符号）。

４　周期が同じなら，「等速円運動」の角速度(角度の速度)も同じで，位相差は変化しない。周期が違うと位相差は変化し，同位相の状態や逆位相の状態を周期的に繰り返す(この場合，同位相・逆位相の状態は瞬間的な出来事)。ウェーブ：メンバーはみな，同じ周期で「振動」していて位相差は不変。

５　電波・光波は媒質がない(だから真空中を伝わる)。あえて言うと電場・磁場が媒質と考えてもよいが，それらは物質ではない。脳波・寒波は物理的な波ではないが，なぜ「波」というのかを推測しよう。

６(1) $\lambda=6.0$ m，$A=0.30$ m　(2) a は上昇，b は降下。位相差は180°。(3)省略（$y=\sin t$ のグラフ）

７(1)　ラジオ　$\lambda=v/f=(3.0\times10^8)\div(954\times10^3)=310$ m，ワイヤレスマイク　$\lambda=38$ cm，電子レンジ　$\lambda=12$ cm，BS放送　$\lambda=2.5$ cm

(2) $v=\lambda/T=(150\times10^3)/(12\times60\text{s})=208\fallingdotseq210$m/s，$t=(2\times10^7\text{m})\div208$ m/s$=9.62\times10^4$s$=26.7\fallingdotseq27$時間

８　速さを$v=4$ km/s（Ｓ波），周期を約 0.5 秒として，$v=\lambda/T\to\lambda=v\cdot T=4$ km/s$\times0.5$ s$=2$ km

９　p.3：例題１参照。音速は熱運動の速さにほぼ比例して速くなる。

１４　節の間隔＝もとの波の半波長＝12cm÷2＝<u>6.0 cm</u>。腹の振幅＝もとの波の振幅×2＝4.0×2＝<u>8.0 cm</u>。定常波の周期＝もとの波の周期＝12 cm÷15 cm/s＝<u>0.80 s</u>　($v=\lambda/T\to T=\lambda/v$)

１６　節の間隔は半波長＝4.0÷2＝2.0cm (1)　自由端：$x=7$cmが腹だから，節は$x=6$cm，4cm

(2)　固定端：$x=7$cmが節だから節の座標は$x=5$cm，3cm

１７　もし，中央Ｏの媒質が完全に静止しているなら，押さえてても良いはず。２つの波はそこをすり抜けていくことになる。でも，中央Ｏで山と谷が反射すると考えても，同じ結論に達する。

２１　f_2 は1オクターブ上のドの音。f_3 はさらにその上のソの音。

２２ 弦を伝わる波の速さをvとして，$f_1=v/\lambda_1=v/(2L)\to L\propto1/f_1$。$f_1$を2 倍にするには$L$を半分にする。$f_1$を 3/2 倍にするには，$L$を2/3 倍にする。

２８　$f_1=V/\lambda_1=V/(2L)$，$f_1'=V/\lambda_1'=V/(4L)$

２９　クラリネットが閉管的，フルートが開管的と考えると，およその説明がつく。

３０　問題２８より，$f_1=2f_1'$ 開管のほうが音程が 1 オクターブ高い。

３１　**開管**：基本振動の整数倍(弦と同じタイプ)　**閉管**：基本振動の奇数倍

３２　$v=f\lambda$より、$\lambda=v/f=340/260=1.3$ m。開管だから$\lambda_1=2L$で$l=\lambda_1/2=1.3/2=0.65$ m。

３３　開管、閉管ともに基本振動の波長が1/2になるので、振動数は 2倍になり、1 オクターブ上。

３４　p.58：図7.12のように，気柱内の音波はつねにどんどん外に出て行っている。

３６　2.6%増（6%違うと半音違い）。管内の温度を体温程度に上げておく。

３７ 1階はほぼ固定端（気柱の閉端に対応）。共振時、屋上は腹になるが、水槽の水は慣性のために屋上の動きより遅れ、屋上の動きに対してほぼ逆位相になる。水が屋上の動きを抑える役目をする。

３８　縁にそって「腹４つ」の定常波ができていて，腹の部分に取っ手があると振動しにくくなる。

４０　音程の半音の違いは振動数では約 6%の違いである。したがって、高音域のほうが半音違いの音の振動数の差が大きく、うなりも多い。

４４　(1)$f_{前}=\{340/(340-20)\}\times200=212.5$ Hz　(2)$f_{後}=\{340/(340+20)\}\times200$、$f_{前}/f_{後}=1.125$ 倍

４５　車が十分遠方にある場合、車の進行方向の線上に観測者がいるとして$f_{前}$や$f_{後}$の公式を適用してもほとんど誤差はないが、車が目の前を通過する前後では、観測される周波数は$f_{前}$から$f_{後}$へと連続的に降下する。**参考**：車が近くを通る時、音源と観測者を結ぶ直線の方向での音源の速さ(**視線速度**という)をu[m/s]としてドップラー効果の公式を用いればよい。　４７　412Hz，半音の半分程度

４９　<u>112.5 Hz</u>　５０　$\{(c+u)/(c-u)\}\times f$　５１　光速をcとして　$0.5c$

索引 「熱」

索引 「波」

物理はお友達Ⅱ　改訂版　編集グループ
村井　利行　　元お茶の水女子大学附属高等学校
朝倉　　彬　　お茶の水女子大学附属高等学校
雨宮　敏子　　お茶の水女子大学理系女性教育開発共同機構
加々美勝久　　お茶の水女子大学理系女性教育開発共同機構

（所属は 2020 年 3 月 31 日現在）

物理はお友達　Ⅱ　熱・波基礎編
改訂版

発行日：　2020 年 3 月 31 日

発行者：　お茶の水女子大学
理系女性教育開発共同機構
〒 112-8610 東京都文京区大塚 2 丁目 1 番 1 号
電話　03（5978）5825
FAX　03（5978）2650
ocha-cos-office@cc.ocha.ac.jp

印刷所：　株式会社甲文堂　東京都文京区大塚 1-4-15-105
電話　03-3947-0844