優しい物理学

物理学を習ったことのない人のための物理学

北 野 保 行

学校法人仁多学園

優しい物理学　物理学を習ったことのない人のための物理学　北野　保行　学校法人仁多学園

ISBN978-4-9910860-0-7
C1242 ¥900E
定価（本体 900円＋税）
9784991086007
1921242009004

学校法人仁多学園

優しい物理学

物理学を習ったことのない人のための物理学

発　　行　2019 年 4 月 10 日

著　　者　北野　保行（きたの　やすゆき）

発 行 者　勝田　康則

発 行 所　学校法人仁多学園

〒699-1511　島根県仁多郡奥出雲町三成 1625-1

電話：0854-54-0001　　FAX：0854-54-0002

http://www.shima-reha.com

印刷製本　名古屋大学消費生活協同組合　印刷・情報サービス部

© Yasuyuki Kitano　2019　Printed in Japan

ISBN978-4-9910860-0-7

優しい物理学

物理学を習ったことのない人のための物理学

北野 保行

e-mail：kitano26@cc.it-hiroshima.ac.jp

目　　次

まえがき

皆さん　ようこそ優しい物理学へ！
きらわれ者の物理学の世界を、よくのぞきに来てくれました。

皆さんは誰でも、心のどこかに物理学への興味を、ひそかに持ち合わせています。子供の頃、**てこの原理**を知った時、**豆電球**を光らせた時、その感動は忘れられないでしょう。あの生き生きとした眼を、私はよく知っています。

いつの間に物理はきらわれ者になったのでしょう。それは長い間私の疑問でした。答えは簡単でした。ふさわしい教科書がないからです。そこで、きらわれ者にならない教科書をつくる決心をしました。出来上がったのがこの本です。

天体の動きから身の回りのできごとまで、疑問や不思議、腑に落ちないことがたくさんあります。それらに答えを用意しました。楽しみながら柔らかく、優しく解き明かそう、と言うのがこの本の出発点です。

なぜそうなるの？
それはどうなっているの？

と言う皆さんの疑問が出発点です。
例を挙げてみましょう。

血圧ってなんですか
あの数値はどこからくるのですか
単位はなんですか
数値に単位がないと意味不明です
大根一本 100 ではない 100 円です
重さとはなんですか
地球が引く力ですよ
単位はなんですか　ニュートン N です

え、ニュートンは偉い人の名前でしょう
そうですよ、世界中が約束して
力の単位として使っているのです
ニュートンも驚くでしょうね

空気にも重さがある、当然です

質量ってなんですか？
重さじゃないですよ
宇宙船の中でも「０」にはならない
物質の量を示すものです

釣り合うとはどういうことですか
いくつも力が加わっているのに
止まっていることです

釣り合わない力が加わると
動き始めます
回り始める時もあります
一旦動き始めると
簡単には止まりません
天体を観てください

止める時にも力が必要です
ブレーキです
車が曲がる時もそうです
曲がる時は横からの力が必要です

力を出すと疲れるのはなぜですか
エネルギーを使うからです
エネルギーは計算できるのですか
はい
力の大きさと動かした距離の積です
単位はなんですか
ジュールです
カロリーです
換算ができますか

体は何できているのですか

原子や分子からできています
一個の大きさは何 m ですか
一個の質量は何 kg ですか
ずいぶん小さい値ですよ

質量がなくかることはあるのですか
あります
アインシュタインが予言しました
その予言は実現できたけど
放射能ができてしまいました
多くの研究者が原爆症で亡くなりました
その時は奇病と言われました
眼に見えなかったからです
放射能が山ほどできてしまいました
放射能ってなにですか
放射線ってなにですか
放射線は医療に役立つのですか
超音波は医療に役立つのですか
切開しないで痛くもなく
血液の流れ、骨、臓器を診る方法がある
ほんとうにできるのですか

単位アインシュタインはないのですか
ないけど人工元素の名前になりました
ありがた迷惑かもしれません

雲が空に浮いているのはなぜですか
下から吹き上げられています
高い空の温度は何度でしょう
風はどのように吹くのでしょう

熱するとやかんの水は沸騰し続けます
その水蒸気の行く先はどこでしょう
熱エネルギーを蓄えて空高く登り
上空でエネルギーを吐き出します
台風のエネルギーはこれです
台風の左巻はなぜですか
地球が自転しているからです

地球は水の惑星です
水に守られて生物を育んできました
水蒸気とオゾンにも守られてきました

我々の周りには水があふれています
水はなんでもよく溶かします
その理由は水分子の形です
くの字型に曲がっています

なぜ曲がっているのでしょう
まだよく分かっていません
氷は何故水に浮くのでしょう
軽くなるからです
なぜ軽くなるのですか？
これも水分子の**くの字型**が原因です

光とはなんでしょう
1 秒間に 30 万 km 走ります
七色の色を含んでいます
可視光と言います
その本質はなにでしょう

電波は我々の周りにあふれています
電磁波と言います
可視光は電磁波の一部です、
人の眼には可視光以外は見えません

ラジオテレビ携帯リモコンも
電磁波を使っています
電磁波は我々の生活に欠かせません
場合によっては害にもなります
X(エックス)線
γ(ガンマ)線

太陽は地球上のすべての源です
地球は太陽からエネルギーを貰います
どれだけのエネルギーを貰うのですか
どんなエネルギーを貰っているのですか
生物はそれをどう利用しているのですか
生物は利用しながら進化しました
進化に千万年の時間がかかりました

太陽の年齢は 45 億年です
45 億年間で獲得したのは進化です
太陽の寿命はまだあと 45 億年あるらしい

我々人類はホモサピエンスと呼ばれます
生まれてこの方せいぜい 24 万年です
氷河期が去った後のほんの一瞬です
高い知能を持った生物です

人類の英知がさまざまな謎を解きました
自然の法則を発見しました
さまざまな学問の発達がありました
さまざまな道具を発明しました
そして快適な生活を獲得した

これは素晴らしいことです
たいせつにしなければなりません

人類は、今後、どうなるでしょう
どれぐらい生息できるでしょう
人類は自分の首を絞めてないでしょうか
自分だけではない
地球上のすべての首を！

このように、不思議の例を挙げて行くと、きりがありません。いろんな疑問に丁寧にゆっくり優しく答えて行くのが、この教科書の目的です。

皆さんも「なぜ？」と尋ねてみてください。質問するだけで自分が変わったように見えてきます。

もし、その質問の答えが、この本の中に見つからなければ、私に連絡してください。表紙にメイルアドレスがあります。そこへ送ってください。どんどん付け足します。念のため、アドレスは

kitano26@cc.it-hiroshima.ac.jp

実験は楽しいので、できるだけたくさんやりましょう。力学熱光音電気磁気、物理学の時間が倍になればよいのですがね。

最後に、国家試験の物理関係の問題の解説とコメントを作りました。試験の前に、ちょっと目を通してください。問題に慣れること大切です。それから試験に臨んでください。

なぜ、物理がきらわれ者だったのかと皆さんがちょっとでも感じるようになれば、この本の目的は達成されたことになります。

2017 年 4 月 16 日

第Ⅰ章　自然の法則と SI 国際単位系

第Ⅰ章のまえがき

第Ⅰ章では**自然の法則**とはなにかを学びつつ、**SI 国際単位系**について説明します。物理学を学ぶための基礎となるものです。使う単位が異なると話がかみ合いません。

長さの単位を例に取ると、アメリカではインチ、ヤード、マイルを使いますが、日本やヨーロッパでは、メートルやキロメートルを使います。アメリカ人とは話がなかなかかみ合いません。

もちろんアメリカの物理学や工学の教科書では **SI 国際単位系**が採用されています。そこでは多くのページが**単位の換算**に費やされています。

物理学や化学その他すべての科学を学ぶために、**単位**を統一しておく必要があります。すべての科学が同じ土俵に乗ることが理想です。

単位の話を解りやすくするために、まず、よく知られた**ニュートン**の**万有引力の法則**について説明します。この法則は物理学の根幹をなす法則で、**自然の法則**です。物体は見えない糸で引っ張り合いをしているのです。その時の**力**の大きさは、物体の**質量**と物体間の**距離**に関係します。

力はわれわれの筋肉で実感できる、分かり易い物理量です。**SI 国際単位系**では、**力の単位**に［**ニュートン**］を使います。記号で[N] と記します。**ニュートン**の偉業をたたえて、その名前を**力の単位**として使わせてもらいます。

力を基礎にして、日常われわれが使うさまざまな物理量が導かれます。圧力やエネルギーがそれに当たります。これらを例に取って単位の成り立ちや重要性について話をします。

医療関係従事者を養成するための学校、看護やリハビリテーション専門学校で使われている物理学の教科書は**古い**と印象を持ちます。理学療法士、作業療法士、看護士の養成に使われている物理学の教科書です。

なにが**古い**か。あらゆることが古いのですが、まず、**単位**が古い。特に**力の単位**と**電磁気学の単位**は 50 年以上昔のもので、今は使われないものが見られます。

1960 年、世界の科学者が知恵を集めて作った**SI 国際単位系**は、便利で分かりやすい、しかも、使いやすい単位系です。日本の高等学校では 30 年以上前から採用されています。

医療関係従事者を養成する専門学校では、この **SI 国際単位系**を無視した教科書が散見されます。

この講義ノートでは**SI 国際単位系**に従います。

Ⅰ－１．黄道１２星座

自然の法則に支配される宇宙は、何億年たってもその普遍的な姿を見せてくれます。

まず星の話から始めましょう。暗い夜空を見上げると星がすきまなく、ちりばめられています。古代の人々はこの星を見て想像たくましく図形を描きました。身近な物を描き、走る動物の勇姿を思い、乙女の姿を夢見ました。

星座です。星座は全部で８８組あります。古代ギリシャの天文学者**ヒッパルコス**（**BC190-120 頃**）は、そのうち４６の星座を描き、今もそのまま使われています。

数ある星座の中で、昼間**太陽の通る道**（**黄道**）に、夜になると現れる１２個の星座があります。それらは毎日すこしずつ位置を変え、1 年で元の位置に戻ります。この星座が**黄道１２星座**です。

黄道１２星座の名前を順に挙げてみましょう。そして、この星の下に生れたと占われる誕生月を示します。同時に、現在その星座のよく見える時期・時刻を補足しておきます。

黄道１２星座の名称	誕生月	現在真南に見える時期・時刻
おひつじ座（牡羊）	3･4 月	11 月午前 0 時
おうし座（牡牛）	4･5 月	12 月午前 0 時
ふたご座（双子）	5･6 月	1 月午前 0 時
かに座（ 蟹 ）	6･7 月	2 月午前 0 時
しし座（獅子）	7･8 月	3 月午前 0 時
おとめ座（乙女）	8･9 月	4 月午前 0 時
てんびん座（天秤）	9･10 月	5 月午前 0 時
さそり座（ 蠍 ）	10･11 月	6 月午前 0 時
いて座（射手）	11･12 月	7 月午前 0 時
やぎ座（山羊）	12･1 月	8 月午前 0 時
みずがめ座（水瓶）	1･2 月	9 月午前 0 時
うお座（ 魚 ）	2･3 月	10 月午前 0 時

黄道１２星座と太陽と地球の位置関係はどうなっているのでしょう。**図Ⅰ－１**をみてください。

中心に太陽があり、その周りを地球がまわっています。地球は 1 年に 1 回**公転**します。その道を**黄道**と呼びます。**黄道**とはもともと地球から見て、太陽の通る道のことでしたが、実際は太陽を中心として、地球がその周りを**公転**しているのですから、地球の**公転軌道**のこととしてよいでしょう。

地球は 1 日に 1 回自転しています。自転の軸は**公転軌道面**（**黄道面**）の垂直軸に対

して 23.5 度だけ傾いています。**図Ⅰ－１**に、傾いた地球の**自転軸**を描きました。**夏至の図**です。太陽が北半球を真上から照らしています。地軸の上の方向が北です。

太陽と地球は宇宙に描いた大きな丸い球面で取り囲まれていると考えてください。**図 Ⅰ－１**の周りに描いた大きな円弧はその球面の一部と思ってください。この球面を**天球**と呼んでいます。

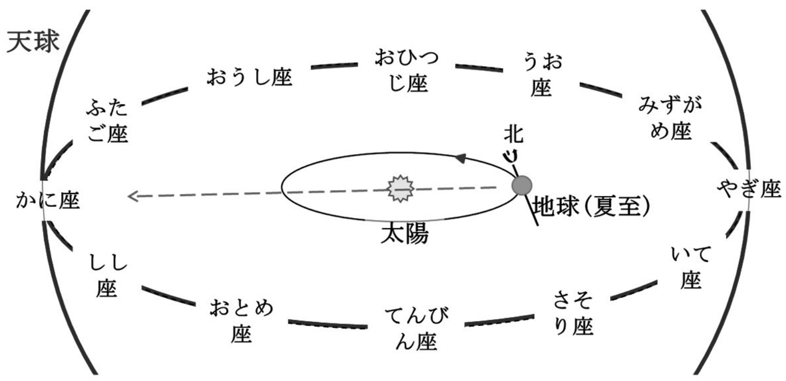
この**天球**に８８個の星座がばらまかれていると考えます。天球にばらまかれた８８個の星座は、ずっと遠くにあります。

これらの星座の中で、地球の公転軌道の外側で軌道面の近くにある１２個の星座が**黄道１２星座**です。

図Ⅰ－１は､これらの星座のおよその位置を模式的に描きました。

はじめに挙げた表によると、誕生日が夏至の頃 6･7 月の人は、**かに座の星の下に生まれた、**と占われます。この時期、**かに座**は太陽の向こう側にあり、夜になっても見ることはできません。

太陽が、かに座を**訪問**していると言われています。



図Ⅰ－１　黄道１２星座・太陽・地球と地軸の傾き

北の方角には**北極星**が輝いています。こぐま座の尾の先端の星です。**地球の自転軸**がこの方向を向いているので、北半球ではいつも北の方向にこの星が見えるのです。

地球の自転軸は地球の**公転軌道面**に対して、23.5 度傾いています。地球は傾いて自転しながら太陽の周りを公転しています。

ところが、この自転軸の方向がほんの少しずつ変化しているのです。傾きを 23.5 度に保ちながら､**図Ⅰ－２**の上部の点線にそって、自転軸の方向が変わります。

自転軸の方向が変わると、北の方向が変わりますから、北極星はいつかどこかへ行ってしまいます。地球の自転軸は北極星の方向をいつまでも向いているのではありません。

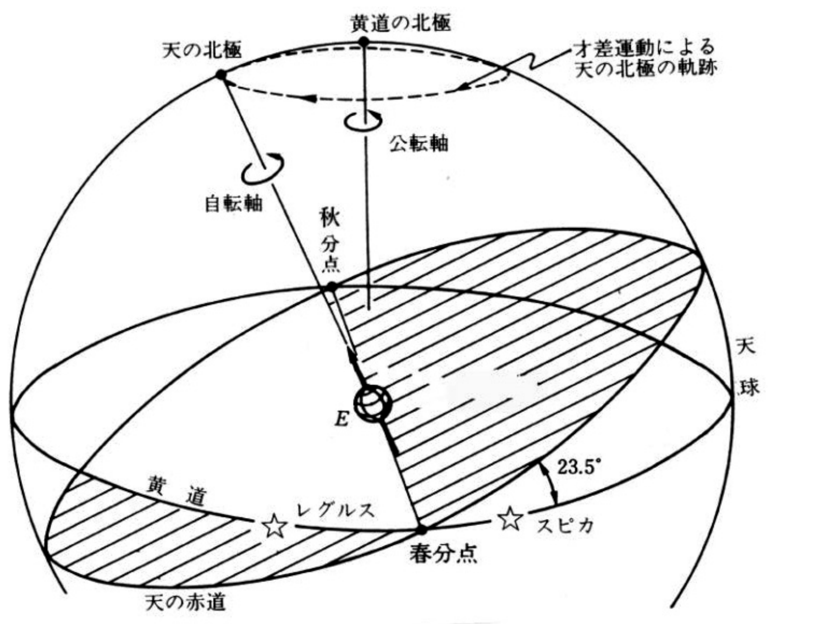
このことにはじめて気がついたのは、今から 2000 年以上前のことです。前出の**ヒッパルコス**です。

図Ⅰ－２をもう一度見てください。ヒッパルコスはこの図の**春分点**が移動していることに気がついたのです。

春分点（秋分点）とは、**図Ⅰ－２**の、地球の赤道面を宇宙に広げた面、天の赤道面と地球の軌道面すなわち黄道面との交差線の方向です。

春分点の近くに観測される**恒星**が移動していることに気がついたのです。おとめ座の星スピカが、約 160 年前のチモカリスの観測結果と較べて２度東に移動していることを発見したのです。

同時にしし座の星レグルス、さそり座のβ星の位置も測定されていて､同じように移動しています。



図Ⅰ－２．地球を中心とした天球の図
春分点　黄道面（公転面）天の赤道面　自転軸　歳差運動による地軸変化
（藤原邦夫著 物理学序論としての力学 東京大学出版会 1984 年 9 月 28 日）

これら三つの星のお互いの位置関係は変わりません。以降現代までの、これらの測定値を**表Ｉ－１**にまとめます。**観測者名、観測年代、観測と観測の間の間隔年数**も付け加えておきました。

表Ｉ－１にはありませんが、16 世紀の終わりデンマークの天文学者**ティコ・ブラーエ**（1546-1601）が同様な測定を行い、**春分点**が移動していることを再確認しました。

古代ギリシャにおける測定値と比較して、地球の地軸が、その方向を変えており、25800 年を**周期**として元に戻るだろうと、結論しました。

この現象の起こる理由の解明は、**ニュートン** (1642-1727) によって行われました。ティコ・ブラーエの約 100 年後です。ニュートンは、**地球は完全な球**ではなく、**赤道半径**が**極半径**よりも長い、からに違いないとしました。

ニュートンは自身が創造した**運動の法則**に基づいて計算したのです。ニュートンの約 100 年後に、探検家が地球の形を実際に測定し、その事実を確かめました。現在の地球のサイズを示します(**国立天文台編 理科年表**)。

赤道半径＝6378137 m
極半径　＝6356752 m
平均半径＝6367 km　　　(I－1)

この数値から分かるように、**赤道半径**が**極半径**にくらべて約 21 km 長いのです。

地球の赤道に沿う一周の長さ、いわば地球の胴回りが太くなっています。この地球の形を**地球のメタボ**と呼びましょう。

不思議な天体の行動が**地球のメタボ**による紛れもない物理現象であることが、ニュートンによって解き明かされました。発見以来およそ 2000 年後のことです。

地球は**地球メタボ**のために、地軸の方向が移動します。赤道面の傾きの方向が徐々に変化して行くのです。自転軸が**図Ｉ－２**の上部の点線に沿って移動します。つまり、図の春分点の方向が、左へ左へ回ります。

このように回転の軸が変化する運動を物理学では**歳差運動**と呼びます。コマをまわしたときの**すりこぎ運動**と同じです。**すり鉢**と**すりこぎ**で**ごまをする**時の棒の動き方に似ています。

地球の**すりこぎ運動**がどうなっているかは計算が必要です。しかし、その原因は、地球の赤道部分が太いことと、地軸が 23.5 度傾いていることによります。太った部分が斜めになっており、その部分が受ける万有引力がバランスを崩しているからです。

万有引力は太陽からだけでなく月からも受けています。月の軌道面と地球の軌道面(黄道面)とのずれは約５度です。太陽の巡り方は１年に１回ですが、月は１年に１２回地球を周ります。

月は地球に近いこともあり、地球のすりこぎ運動への影響は、太陽のそれより数倍大きい計算値になります(**山本義隆著 重力と力学的世界 現代教学社**, **M.ミランコビッチ著 気候変動の天文学理論と氷河時代粕谷健二 山本淳之大村誠 福山薫 安成哲三訳 原著出版** 1941)。このことはニュートンによって最初に計算されました。

地球の公転周期は１年ですが、地球の自転軸の**すりこぎ運動**の周期は途方もなく長く、およそ 26000 年なのです。

この長い周期が長い地球の歴史の中で、地球の環境に影響を与えていることが分かってきつつあります(**M.ミランコビッチ著 気候変動の天文学理論と氷河時代**)。

表Ｉ－１．春分点から見た恒星の位置観測の歴史
（山本義隆著 重力と力学的世界 現代教学社 1981 **年** 10 **月** 20 **日）**

観測者	観測年	間隔年	スピカ（乙女座） 赤経（度）	赤緯（度）	β（さそり座） 赤経（度）	赤緯（度）	レグルス(しし座) 赤経（度）	赤緯（度）
チモカリス	BC293		172.5	1.4	212.0	1.3		21.3
		166						
ヒッパルコス	BC127		174.3	0.6			119.8	20.7
		225						
メネラウス	AD98		176.3		215.9			
		40						
プトレマイオス	AD138		176.5	0.5	216.3		122.5	19.8
		1391						
アル・バッタニ	AD1529				227.8		134.0	
		371						
現代	AD1900		200.0	-10.6	240.0	-19.5	150.8	12.5

地球の**すりこぎ運動**によって、**黄道１２星座**の見え方がどのように変わるかを考えてみましょう。

地軸が傾いていることによって、地球の季節 **春夏秋冬** が生じます。太陽が北半球を真上から照らす時は、北半球では夏 6 月です。南半球を真上から照らす時は北半球では冬 12 月です。地球の**すりこぎ運動**によって徐々に真上から照らす地球の位置が変わって行くはずです。

そのため、わずかずつではありますが、地球の軌道の中で、**夏至の位置**が変化してゆきます。同時に黄道１２星座との関係も徐々に変化します。

今から約 13000 年後のことを想像してみましょう。地球のすりこぎ運動の周期の半分が経過した時のことです。地球が、**図Ｉ－１**の位置にあるとき、**地軸の傾き**がちょうど**逆**になっているはずです。左上から右下へ傾いていた現在の自転軸が、右上から左下への傾きに変わっているはずです。

この位置では北半球は冬です。太陽は南半球を真上から照らしているからです。冬至としましょう。地球は 12・1 月のはずです。13000 年後でも、星座の位置はそのままとします。太陽に対する地球の傾きが逆になります。

ここで誕生日が 6･7 月の人について考えてみましょう。13000 年後には、**図Ｉ－１**の地球は冬 12･1 月です。半年後の夏の誕生日の頃には地球は**かに座**の方に回っています。ですから**かに座**は夏至の夜空に輝いてみえます。

現在では、前にも述べたように、6･7 月生まれの人は、**かに座の下に生まれた**と占われ、その星座は 6･7 月には見えないはずでした。13000 年後には全く事情が変わるのです。

現在は誕生月には見えない星座ですが、13000 年後には誕生月の夜空によく見える星座となります。さらに 13000 年が経過すると、また現在のように元に戻るでしょう。

初めに示した、**星座の名称、誕生月、現**

在真南に見える時期・時刻　に示された見える時期は、現在はずれていないのでしょうか。誕生月が 6･7 月の**かに座**は、ちょうど半年後、つまり、12･1 月に見える位置にあるはずです。ところが表によると、現在**かに座**は、2 月に見えているのですから、すでに、約２ヶ月分のくい違いがあります。

地球の歳差運動の周期を 26000 年として、２ヶ月分の狂いは、1 年は 12 ヶ月ですから、

$$\mathrm{D} = 26000 \times \frac{2}{12} = 4333 \text{ 年}$$

となり、**星占い**が始まってからすでに 4300 年以上経過していることになります。

黄道１２星座の**星占い**は紀元前 2･3 千年に始まったと言われています(**沼澤茂美　脇屋奈々代著新版星座神話ガイドブック誠文堂新光社** 2005 年 4 月 23 日)。それはちょうど、4・5 千年昔のことで、上の計算予想と合致しています。

I－２．万有引力の法則

最も有名な**自然の法則**は、ニュートンの発見した**万有引力の法則**です。**２つの物体は引き合う、**これが**万有引力の法則**です。

この発見は、リンゴが落ちるのを見て分かるほど簡単なものではありません。**ニュートン**がその発見者として今なおその地位を保っているのは、引力の大きさを式で表したこと、そして、その式が今なお正しいことです。

なぜ、二つの物体は引き合うのか。物理学はこの質問に答えようとはしません。ニュートンがやったように、こんな力（すぐ後の式(I－2)）で引き合っています、と答えるのが物理学なのです。

物理学は「なぜ」を問い、「こうなっているのです」と答える学問です。

その答が数学的であることが理想的です。特別な場合にだけ当てはまるのではいけません。どんな時にでも当てはまらなければなりません。例外は許されません。

また、情緒的、感情的、文学的表現も許されません。客観的であるべきであり、誰が**測定**しても、**計算**しても、同じ結論にならねばなりません。

ニュートンは万有引力について、どのようになっているかを、みごとに式で答えました。その式を見てみましょう。文字や数値を使って式を書くことにします。

二つの物体間に働く**万有引力**をFとすると、Fは、二つの物体の**質量** m と M に比例し、物体間の**距離** r の自乗に反比例します。このことを式にすると、次のようになります。

$$F = G\frac{mM}{r^2} \qquad (\mathrm{I}-2)$$

ここで、比例定数 G は、**万有引力定数**と呼ばれます。その値は

$$G = 6.673 \times 10^{-11}\ \mathrm{m^3 s^{-2} kg^{-1}} \quad (\mathrm{I}-3)$$

式 (I－2) の力の単位は [**ニュートン** N] です。ここで**質量**の単位は[キログラム, kg]、**長さ**の単位は[メートル, m]、**時間**の単位は[秒, s]と決めてあります。力の単位 [N] を決めるにはこれらが必要なのです。

これらの単位は 1960 年の国際会議で決められたもので、**SI 国際単位系**と呼ばれています。日本もこの単位系を使用する国際条約に加盟し批准しています。

ここで、小文字の m が違った意味で二度出てきました。質量の m と長さの単位 [m] です。よくないことです。よく見るとこの２つの m は僅かに異なっています。

質量の m はイタリック体で印刷され、単位の m は普通の字体で印刷されています。単位の時には [ ] に囲まれていることが多いようです。

物理学の教科書では、物理量を文字で表す時にはイタリック体を使い、単位に使う時は普通の字体を使うことにしています。こうして区別しているのです。

高等学校の教科書をはじめ、どの物理学の教科書もそうしています。これで容赦してもらえるとは思えませんが、ここではこの方法を踏襲します。

ただし、手書きの時はなかなか区別が困難です。だから単位には [ ] を付けたくなってしまうのですが、やたら [ ] をつけると煩わしくなります。

今後、物理量はイタリック体で記述します。単位には普通の字体を使い必要に応じて[ ]で囲みます。

I－３．重力(重さ)と質量

重力(重さ)と**質量**の区別をはっきりさせておきましょう。**重力**は日常的な言葉ではありませんが、**重さ**と同じ意味で使うことにします。

あなたは自分の**重力(重さ)**を感じていますか？もし自分の重力(重さ)を感じていない人があれば、逆立ちをしてみてください。1 分もすれば腕が痛くなります。重力(重さ)のせいです。

がんばって手は力を出しているのです。足が痛くないのは、単に足が手より強いからです。逆立ちをした時だけ重くなったとは考えられません。**重力**は**力**そのものです。

重力と**質量**の違いを簡単に言えば次の通りです。**重力**とは、地球上で地球が物体を引く**力**のことで、それを支えるためには同じ大きさの**力**を出す必要があります。

他方、物体の**質量**とは、その物体を構成する**物質の量**としてさしつかえありません。厳密には、**第 III 章 原子と原子核**の９を参照してください。

宇宙船の中の宇宙飛行士は、ふわふわ浮いていて**重力**はありません。**重力**はゼロですが、飛行士自身が消えてなくなったわけではありません。物質としての宇宙飛行士は存在し、その量は変わらないでしょう。その変わらない量が**質量**です。

しばらく宇宙船に滞在した飛行士達は、地上に戻ると**重力**が回復したにちがいありません。椅子に座っておしりが痛いと言われたとか。足だけでなくおしりも**重力**を支える役目をしていたのです。

Ｉ－４．質量の単位と力の単位

質量とは Ｉ－３で述べたように**物質の量**であるとしてよいでしょう。混合物でも単一物質でも何でもよいのです。

質量つまり**物質の量**の単位が kg です。物質の量の基準 となる 1 kg の分量は、最初は水 1 リットルにしましたが、後に、曖昧さが問題となり、今は**国際キログラム原器**の量で決められています。フランスパリの国際度量衡局に保管されています。

この原器の複製が世界中に配られています。日本にも 1889 年に、第 6 番複製品が配布され、つくばの産業技術総合研究所に一定温度で保管されています。

質量が物質の量であり、kg がその**単位**だとすると、**力**や**重力**の**単位**はどうしたらよいでしょう。今まで重さの単位だと信じてきた kg は質量の単位だったのです。

重力や力の単位は [ニュートン, N] を使います。60 年も昔、私が高等学校の生徒だった頃、**力の単位**は [kg 重] とか [kgw] と習いました。質量と同じ数値を使って、kg に**重**とか w を付けて、力の単位として使っていました。

今では力の単位を [N] と習います。若い人には [kg 重] とか [kgw] は通じません。高等学校で教えなくなりました。

地球上で物体の**重力**は、[kg] で量った**質量**の値に 9.8 をかけるとよいのです。単位が N となります。ここで、使い慣れない単語**重力**は、**重さ**と読み替えると分かり易くなるでしょう。以降もそのようにして理解を助けてください。

ここに出てきた値 9.8 は地球上での**重力加速度**と呼ばれ、小文字の g を使って代用されるのが一般的です。

まとめると、**質量** m [kg] の物体の**重力**は mg [N] です。ここで g は $9.8\ \mathrm{ms^{-2}}$ です。

式に書くと、質量 m [kg] の人の重力は

$$\text{重力} = mg = 9.8m\ [\mathrm{N}] \qquad (\text{I}-4)$$
$$= 70 \times 9.8 = 686\ \mathrm{N}$$

太ってしまって体重が 70 kg を超えた、と言わずに、**太ってしまって質量が 70 kg を超えた**、と言のが正確な表現です。

体重計に乗る時には**質量計**に乗ったと思いましょう。質量の値が目盛られているからです。具体的に言うと、**質量計**には、質量×9.8 [N]の力がかかっています。質量 70 kg の人では 686 N の力がかかっています。この値 686 N を 9.8 で割った値 70 kg が目盛られているからです。

Ｉ－５．力から派生する物理量の単位　Ｉ　圧力

力の単位ニュートン N が気に入らなくても、力から派生する物理量は、すべて N を基礎にしています。たとえば**圧力**です。**圧力**は**面積当たり**の**力**です。

これは**血圧**に通じます。

面積 1 平方メーター $\mathrm{m^2}$ 当たりの力を、単位 N で表すと、圧力の単位は**パスカル Pa** です。すでになじみのある単位になりました。台風がくると、[**ヘクトパスカル**, hPa] が

テレビから流れます。SI **国際単位系**の普及に大いに役立っています。

ヘクトの h は ×100 の意味です。キロの k が ×1000 の意味と同じです。

我々が生活する大気の圧力は **1 気圧** atom です。1 **気圧**は**水銀柱**を 760 mm だけ押し上げる圧力です。760 mmHg または 760 Torr と書き**トル**と読みます。それは 101300 Pa = 1013 hPa です。Torr **トル**は、**水銀柱**を使って初めて真空を作った**トリチェリー**の頭文字です。その業績を讃えています。

水銀柱の高さで表す圧力は**水銀の密度**と**重力加速度** g を使って、次のように Pa に換算できます。圧力 [Pa] は 1 $\mathrm{m^2}$ に加わる水銀の重力を、単位 N で表すと求まります。

気圧が 1 気圧では、水銀柱 760 mm ですから、面積 1 $\mathrm{m^2}$ の面上に高さ 760 mm(= 0.76 m)の直方体の水銀が乗っているとします。その水銀の重力を単位 N で計算すればよいわけです。

水銀の体積を $V_{\mathrm{Hg}}\ [\mathrm{m^3}]$
水銀の質量を M_{Hg} [kg]
水銀の重力を W_{Hg} [N] とし
水銀の密度 $13.6 \cdot 10^3\ \mathrm{kgm^{-3}}$
重力加速度 $g = 9.8\ \mathrm{ms^{-2}}$ を使って

質量＝体積×密度より、**水銀の質量** M_{Hg} は

$$M_{\mathrm{Hg}} = V_{\mathrm{Hg}} \cdot 13.6 \cdot 10^3\ [\mathrm{kg}]$$

水銀の重力＝水銀の質量×重力加速度

$$W_{\mathrm{Hg}} = M_{\mathrm{Hg}} \cdot 9.8$$
$$= V_{\mathrm{Hg}} \cdot 13.6 \cdot 10^3 \cdot 9.8$$
$$= 1 \cdot 1 \cdot 0.76 \cdot 13.6 \cdot 10^3 \cdot 9.8$$
$$= 101300\ \mathrm{N}$$

従って、1 気圧 atom を単位 Pa で表すと

1 atom = 力[N]／面積[m²]
= 101300 N／1 m²
= 101300 Pa = 1013 hPa

この圧力は 760 Torr です。まとめると、

760 Torr = 1013 hPa = 1 atom　(Ｉ－5)

血圧は物理量としては**圧力**です。医療現場およびその関連分野では、単位 Pa はまだ使われていません。もっぱら**水銀柱の高さ** mmHg = Torr トルが使われています。血圧は何 mm の水銀を持ち上げる圧力か、その数値で表しています。

しかし、最近の医療現場では、**水銀柱血圧計**が影を潜め、**自動測定器**が主流になりました。水銀が猛毒だからです。単位 mmHg トルの意味が分からなくなるでしょう。そろそろ Pa を使い始める時ではないでしょうか。

しかし、単位を変更して、医者や看護士が患者の容態を間違えたら大変です。

血圧が 150 Torr は、パスカルではどんな数値になるのでしょう。計算しておきましょう。

$$150\ \mathrm{Torr} = 150 \cdot \frac{1013}{760} = 150 \cdot 1.333$$

$$= 200\ \mathrm{hPa} = 20\ \mathrm{kPa}$$

血圧が 150 Torr は 200 hPa です。 単位 hPa を使うと紛らわしい数値になります。血圧の単位として kPa を採用するのはどうでしょう。これまでの血圧 150 Torr は、20.0 kPa となります。紛らわしさを避けることができます。

Ⅰ－６．力 から派生する物理量の単位　II　エネルギー

エネルギーはよく使われる物理量です。**仕事**とも呼ばれます。**仕事**すなわち**エネルギー**は**力**と**長さ**の**かけ算**で決まります。

力を出して重い石を押して動かすことを考えて下さい。重ければ重いほど、大きな力を出さねばなりません。動かす距離が長ければ長いほど疲れます。

力の大きさと**移動距離**の**積**が、物理学で言う**仕事**です。それは**エネルギー**と同等のものです。

力を [N] で、長さを [m] で表して、かけ算するとよいのです。その結果は**エネルギー**で、**単位**は [Nm] です。これをまとめて [J] と記述し、**ジュール**と呼びます。

エネルギーには、力と距離で直接記述できるものだけでなく、電気のエネルギー、熱のエネルギー、光のエネルギー、その他、音や原子力など、いろいろな形のエネルギーがあります。どの形のエネルギーも全て同じ形に帰着でき、単位 J で表すことができます。

ある時間の間に出した全エネルギーを、それを出すのに要した時間 [秒] でわり算すると、1 秒当たりのエネルギーになります。これを**仕事率**と呼びます。単位は $[\mathrm{Js}^{-1}]$ で、日常よく使う [**ワット** W]　です。この $[\mathrm{W}]=[\mathrm{Js}^{-1}]$ も、力の単位 [N] から派生した、非常に重要な単位です。

単位**ワット** W は電気分野では、**電力**と呼ばれ、**電流** [アンペア A] と**電圧** [ボルト V] の積で決まります。もちろん $[\mathrm{Js}^{-1}]$ に等しくなります。

ここで、力学と電磁気学がつながります。**電磁気学**のいろいろな**実用単位**、**電圧** [**ボルト** V]、**電流** [**アンペア** A]、**電気量** [**クーロン** C] などが、SI **国際単位系**の単位に採用されています。SI 国際単位系の分かりやすい理由です。

昔、電磁気学の単位に悩んだ人が数多くいました。学生時代の私もその一人でした。その悩みは 1960 年に採用された SI 国際単位系で完全に解消されました。

日常使われているエネルギーの単位に [**キロカロリー** kcal] があります。この単位は、**熱**がまだエネルギーであることが分からない時代に使われていた単位です。水 1 kg の温度を 1℃だけ上げるために、**何ものか** が、1 kcal だけ必要であるとしていました。

この **何ものか** を当時、**熱素**あるいは**カロリック** と呼んでいました。

当時随一の化学者**ラヴォアジェ**（1743-1794）の作った**元素表**には、酸素や水素と並んで、この**カロリック**が元素の一つとして挙げられています。質量は 0 kg となっています。

1843 年**ジュール**(1818-1889）が、カロリックと力学エネルギーの関係を実験で試し、カロリックがエネルギーと同等のものであることを明らかにしました。電気エネルギーとの関係も、1844 年ジュールが実験で明らかにしました。

ジュールは、これまでのカロリック 1 kcal が 4.15 kJ（当時の実験値）に相当することを発表しました。この値は**熱の仕事等量**と呼ばれてきました。このジュールの功績を讃えて、エネルギーの単位を、[J] とし、ジュールと呼びます。

エネルギーの単位としての kcal は SI 国際単位系の中にはありません。しかし、よく使われてきた単位であり、今も使用は認められてはいます。しかし、徐々に [**ジュール** J] に統一されつつあります。

大気中で、水 1 kg の温度を 1℃(絶対温度 1K)だけ上げるのに必要なエネルギーの測定値を**表Ⅰ－２**に示します。

この表から、1 kcal は水の温度で異なり、4.1779 kJ から 4.2174 kJ の値になることが分かります。**表Ⅰ－２**の値をかりに平均してみると、4.186 kJ となります。精密には圧力によっても変化します。結局、**熱の仕事等量**の値ははっきり決まりません。

このような事情がありますから、単位 kcal を使って精度の高い議論はできません。ここでは必要に応じて、1 kcal = 4.186 kJ を使って換算することにします。

表Ⅰ－２　キロカロリー [kcal] とキロジュール [kJ] の換算

温度	**0 ℃**	**10 ℃**	**20 ℃**	**30 ℃**	**40 ℃**	**50 ℃**	**60 ℃**	**70 ℃**	**80 ℃**	**90 ℃**
0 ℃+	4.2174	4.1919	4.1816	4.1782	4.1783	4.1804	4.1841	4.1893	4.1961	4.2048
1 ℃+	4.2138	4.1904	4.1810	4.1781	4.1784	4.1807	4.1846	4.1899	4.1969	4.2058
2 ℃+	4.2104	4.1890	4.1805	4.1780	4.1786	4.1811	4.1850	4.1905	4.1977	4.2068
3 ℃+	4.2074	4.1877	4.1801	4.1780	4.1788	4.1814	4.1855	4.1912	4.1985	4.2078
4 ℃+	4.2045	4.1866	4.1797	4.1779	4.1789	4.1817	4.1860	4.1918	4.1994	4.2089
5 ℃+	4.2019	4.1855	4.1793	4.1779	4.1792	4.1821	4.1865	4.1925	4.2002	4.2100
6 ℃+	4.1996	4.1846	4.1790	4.1780	4.1794	4.1825	4.1871	4.1932	4.2011	4.2111
7 ℃+	4.1974	4.1837	4.1787	4.1780	4.1796	4.1829	4.1876	4.1939	4.2020	4.2122
8 ℃+	4.1954	4.1829	4.1785	4.1781	4.1799	4.1833	4.1882	4.1946	4.2029	4.2133
9 ℃+	4.1936	4.1822	4.1783	4.1782	4.1801	4.1837	4.1887	4.1954	4.2039	4.2145

水 1 kg の温度を 1℃(K)上げるのに必要なエネルギーが 1 kcal です
その測定値を単位 [kJ] で表すと上の表値になります。温度によって変わります
（国立天文台編 理科年表 2009 年版 丸善株式会社 2008 年 11 月 30 日）

Ⅰ－７．気体の状態方程式と気体定数 R

理想気体の状態方程式はどのような単位でしょうか。**ピーヴィーイコールエヌアールティー**と、まる覚えしてください。この式の中の**アール** R について考えましょう。式を書きましょう。

$$PV=nRT \qquad (\mathrm{I}-6)$$

ここで、P は**理想気体**の**圧力**、V はその**体積**、n は**モル数**（同一物質の量）[mol]（1mol は $6\cdot10^{23}$ 個の原子や分子のこと）、R は**気体定数**と呼ばれる定数、T は**理想気体**の**絶対温度** [K] です。

この式に使われている文字の単位について考えましょう。モル数と絶対温度（0℃ = 273 K）の単位は、mol と K に決めます。

圧力の単位には、式(Ⅰ－5) から分かるように、気圧 atom、トル mmHg、パスカル Pa の 3 種類があります。

体積の単位には、リットル ℓ と m^3 の 2 種類を考えましょう。どの単位を使うかで、気体定数 R の値が異なります。

いわゆる**標準状態**、つまり、**圧力** 1 atom、**温度** 273 K（0℃）の時、1 mol の理想気体の**体積**は、22.4 ℓ であることが分かっています。これらの値を式 (I − 6) に代入すると、

$$1 \cdot 22.4 = 1 \cdot R \cdot 273$$

となり、気体定数 R の値は、

$$R = 22.4 / 273$$
$$= 0.082\ [\ell \cdot \text{atom} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$$

この定数の単位は、リットルキアツパーモルパーケー$[\ell \cdot \text{atom} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$ です。SI 国際単位系には遠い存在です。

SI 国際単位系では、圧力[Pa]、体積[m^3]です。**標準状態**におけるそれぞれの値を式 (I − 6) に代入すると、1 モルの**理想気体**の状態方程式は次式となります。

$$101300 \cdot 0.0224 = 1 \cdot R \cdot 273$$

よって、**気体定数** R は次式になります。

$$R = \frac{101300\ \text{Pa} \times 0.0224\ \text{m}^3}{1\ \text{mol} \times 273\ \text{K}}$$

$$= 8.31 \left[\frac{\text{Pa} \cdot \text{m}^3}{\text{mol} \cdot \text{K}}\right] = 8.31 \left[\frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}\right]$$

[ ]中の単位を計算すると、

$$\text{分子} = \text{Pa} \cdot \text{m}^3 = \text{N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{m}^3 = \text{N} \cdot \text{m} = \text{J}$$

このように、分子の単位がエネルギーであることが分かります。

ここから気体定数 R の意味が分かります。1 mol の理想気体の温度が 1 K 増す毎に増加する気体の**エネルギー**に直接関係する値です。

このように、単位を統一しておくと物理量の意味がはっきりしてきます。これは、**第 IV 章 A 大気**の **A５ 気体の一般的性質**で詳しく学びます。

I－８．重力加速度 $g = 9.8\ \text{ms}^{-2}$ の計算準備

質量 m [kg]の私は、地球上で $9.8m$ [N] の重力を受けていることを式 (I−4)で学びました。地球上のすべての物体の重力は、その質量に 9.8 を掛けることによって単位 N で求まります。この 9.8 のことを**重力加速度**と呼びます。

さて、この数値 9.8 はどこから来た数値でしょうか。導きだしてみましょう。

重力の原因は万有引力です。**I－２の万有引力の法則 式**(I－2) を使って具体的に計算が可能です。万有引力の法則の二つの物体として、私と地球を考えましょう。気持ちのよいものです。

物理学の法則はどんな物体にも平等に当てはまります。

式(I－2)をもう一度書きましょう。

$$F = G\frac{mM}{r^2} \qquad (\text{I} - 2)$$

式(I－2)の中に使われている文字に意味

をあたえましょう。私の質量を m [kg]、地球の質量をM[kg]とし、M の値はデータブックによります（**国立天文台編 理科年表**）。

$$M = 5.974 \times 10^{24}\ \text{kg}$$

次に、二物体間の距離 r は何 m でしょう。つまり、私と地球はどれだけ離れているかを知る必要があります。私と地球との距離はいくらでしょうか。

すぐ足の下の土は地球です。あちらの山も向こうの海も地球です。それだけではありません。北極も南極も、アメリカも、裏側のブラジルも全部地球です。こんな場合どうすればよいか。途方に暮れてしまいます。

こんなことに答えてくれるのは数学です。数学が教えてくれるのです。

数学的に証明されていることがあります。**万有引力の大きさ**の計算では、それが**完全な球形**なら、その**重心**に**全ての質量**が**集中している**としてもよい のです。実際の地球はこの条件に当てはまります。地球を完全な球としてよいのです。

ですから、地球の質量は、地球の中心に全部集中しているとしてよいのです。つまり、**私と地球との距離**は**地球の半径**としてよいと言うことです。

地球の半径を r として赤道半径と極半径の平均値を使いましょう。

$$r = \frac{6378137 + 6356752}{2}$$

$$= 6367\ \text{km} \qquad (\text{I} - 1)$$

この値が私と地球との距離です。地球が、**完全な球形からのずれがわずかである**、として万有引力を計算しても本質を見誤ることはありません。

少しばかりのずれは、I－１で話した**地球メタボ**であり、地球の自転軸の変化につながっています。何ごともおろそかにすることはできないことも事実です。

I－９．重力加速度 $g = 9.8\ \text{m/s}^2$ の計算

万有引力の式 (I−2) に、I－８で求めた値を代入して、私と地球の間に働く万有引力の大きさを計算しましょう。ここで、使う式と数値を整理して再録します。

万有引力の大きさ

$$F = G\frac{mM}{r^2} \qquad (\text{I}-2)$$ に

万有引力定数

$$G = 6.673 \times 10^{-11}\ \text{m}^3\text{s}^{-2}\text{kg}^{-1} \quad (\text{I}-3)$$

地球の質量

$$M = 5.974 \times 10^{24}\ \text{kg}$$

地球の半径

$$r = 6367\ \text{km} = 6.367 \cdot 10^6\ \text{m} \quad (\text{I}-1)$$

を代入しましょう。

$$F = \frac{6.673 \times 5.974 \times 10^{13}}{6.367 \times 6.367 \times 10^{12}} m$$

$$= 9.8m\ [\text{N}] \qquad (\text{I} - 4)$$

私の質量だけ m [kg] のまま残しておきました。地球上の何を当てはめてもよいので

すから。

質量に 9.8 を乗じて単位が N の力になりました。式(I－4)です。この力のことを地球の**重力**と呼ぶことは前に述べました。

たいていの教科書では、この数値 9.8 を文字 g で代用しています。

重力加速度 g の値は、ほとんどの場合 9.8 と２桁で記述されています。

上で行なった計算では、地球の質量や半径など４桁も使いました。にもかかわらず、最後の結果は２桁だけにしてしまいました。それには理由があるのです。

この値の実測値が地球の緯度とともに変わるからです。変わる理由は主に２つあります。一つは**地球のメタボ**です。

地表から中心までの距離が緯度とともに変わるのです。赤道に近づくとともに距離が長くなります。他の一つは、地球の自転のためです。自転による遠心力が緯度によって変わるためです。赤道に近づくほど外向きの遠心力が大きくなります。

どちらも赤道付近で g の測定値が小さくなります。逆に北極や南極に近づくほど g の値は大きくなります。**表Ｉ－３**は、日本各地の g の実測値です。北から順に示しました。この表から 9.8 としてよいことが分かってもらえるでしょう。

表Ｉ－３. 日本各地の重力加速度 g の値(4)

地 名	g の値
稚内	9.8064
青森	9.8031
東京（羽田）	9.7976
名古屋	9.7973
京都	9.7971
広島	9.7966
高知	9.7963
鹿児島	9.7947
西表島	9.7901

Ｉ－１０． 長さの単位［メートル m］の起源

SI 国際単位系における 長さの単位は[メートル m]です。位置や距離も同じ単位です。SI 単位系の根幹をなす単位です。このメートルはどのようにして決めたのでしょう。

歴史的には 1 メートルの長さは、われわれの住む地球の大きさを基にして決められました。赤道から北極までの距離を 1 万 km としました。

およそその 9 分の 1 に当たる 1100 余 km の距離を、地中海の町バルセロナからドーバー海峡の町ダンケルクまで、フランス国内を縦断して、精密に測って決めました。西暦 1793 年に測り終え、フランス革命の嵐が吹き荒れる中、国民議会で承認されました（高田誠二著 単位の進化 原始単位から原子単位へ 講談社学術文庫 2007 年 8 月 10 日)。

当時、**この長さが 1 メートルである**、として、いわゆる**メートル原器**を作製し、フランスパリに保存されていました。しかし今では、その原器の必要性がなくなりました。**相対性理論**の発見によって、厳密に言うと、長さそのものが、見る人によって変わり、いつでも誰にでも同じではないことが分かったからです。

現在の 1 メートルの長さの基準は、光が進む距離で決められています。これまでの 1 メートルの長さとできるだけ違わないように決めてあります。この定義を知りたい人は新しい**単位の辞典**で調べてください。

Ｉ－１１．時間の単位［秒 s］の起源

SI 国際単位系での時間の単位は［秒］で、記号を [s] で表します。s は second の頭文字で、野球のセカンドベースと同じように、二番目という意味です。1 時間の最初の 1/60 は 1 分で、二番目の 1/60 が 1 秒 s です。

時間の基準は地球の自転による 1 日を基にして考えられました。太陽が真南に来る**南中なんちゅう**から次の**南中**までを 1 日とします。この 1 日を 24 時間に分割し、1 時間を 60 分に、さらに 1 分を二度目の 1/60 に分割して、その一つを 1 秒 s としました。

地球は太陽の周りを回っていますが、同じ位置まで戻るには 1 年かかります。

実際の 1 年の長さを日数で数えると、測定値が 365.2422 日になっています。地球が公転して元の位置に戻ったときに、自転の周期と一致せず、ほぼ 1/4 日長くなっています。

このずれを補正するため、4 年に一回 366 日の年を挟むことにしました。よく知られた**閏年うるうどし**です。西暦の数字が 4 の倍数の年を閏年にするとされています。

そうすると、4 年間で平均した 1 年の日数は、次の式で計算されます。

4 年間で平均した 1 年の日数

$$= \frac{365 \times 3 + 366 \times 1}{4}$$

$$= 365.25 \text{ 日}$$

この値は実際の公転の一周 365.2422 日より少し長くなってしまいます。そのために少しだけ短くする必要があります。そのため、100 年に一度閏年をスキップします。西暦が 100 で割り切れる年をそれに当てます。

この場合、100 年間で平均した 1 年の日数は次のようになります。

100 年間で平均した 1 年の日数

$$= \frac{365 \times (75+1) + 366 \times (25-1)}{100}$$

$$= 365.24 \text{ 日}$$

この値は実際の公転の周期と較べると、今度は少し短くなっています。そのため、400 年に 1 度閏年を復活させます。西暦が 400 で割り切れる年をそれに当てます。

そうすれば 400 年間で平均した 1 年の日数は次式です。

400 年間で平均した 1 年の日数

$$= \frac{365 \cdot (76 \cdot 4 - 1) + 366 \cdot (25 \cdot 4 + 1)}{400}$$

$$= 365.2425 \text{ 日}$$

このように**閏年**を設けて、われわれの使う時間を地球の動き方に合わせます。

閏年を決めるこのルールは、グレゴリオ暦を基準にして、西暦1582年に定められた約束であり、現在も採用されています。例外の例外まで決めてあります。

直近の例外の例外は西暦 2000 年にありました。西暦の数が、4 で割り切れ、100で割り切れ、しかも 400 で割り切れます。例外の例外の年だったのです。

西暦2000年の正月に、いわゆる**2000年問題**というのがありました。すでに使っていた電子計算機が、この閏年の処理を正常にこなせなかったことに関連していたようです。

電子計算機に命令を下すのは人間です。計算機が勝手に間違いをしでかすはずはありません。

現在では 秒 s の単位の基準は上記とはすっかり異なり、Cs 原子が放射する光を使って決められています。この場合も**相対性理論**の発見により、光が重要な役割を担っています。もちろんここでも、上に述べた昔の 1 秒とできるだけ違わないように決められています。

I－１２．質量の測り方

質量はどのようにして測るのでしょうか。物質の量を知る方法です。測定方法が２つあります。

一つは、地球上で重力(重さ)を測るのです。体重計、いや、質量計に乗って針が 70 kg を指したとしましょう。この場合、その物質の質量は 70 kg です。これはいつもやっていることです。**なんだ、同じことではないか** と思わないでください。

重力が 70 kg ではなくて、**質量**が 70 kg なのです。重力は式(I－4)から分かるように、70×9.8＝686 N です。この値を 9.8 で割った値が**質量**です。この方法で測られた質量を **重力質量** と呼んでいます。

二つ目は、物体に力を作用させて動かして、その**動きにくさ**や**動き易さ**から測る方法です。ここでは力の大きさ、速度、速度の変化を測定します。質量が増えるとそれだけ動かしつらくなります。同じ速度まで持ってゆくのに必要な、力と時間を測らねばなりません。このやり方で測った質量のことを **慣性質量** と呼びます。

この２つの方法で測った質量は同じ値になります。**実験事実**です。この２つの質量が同じであるという実験事実を基礎にして自然を見直した理論がアインシュタインの一般相対性理論です。

さて日常生活に戻ってみましょう。大根を買うとき、われわれはどのようにするでしょう。大根１本が 100 円とします。できるだけ大きい太い大根、つまり、物質の量、質量の大きい大根を買って帰りたいのが人情です。

買い物をするあなたはどうするでしょう。まず、重いかどうか手のひらの上にのせて重さを測ります。つぎに、そのまま手を上下に揺らせてみるでしょう。動かして動きにくさを測っているのです。

前者は**重力質量を測り**、後者は**慣性質量を測っている**と、思えるよく見かける光景です。こうしてより物質の量の多い大根を買うのです。やってみて下さい。

I－１３．単位についてのまとめ

単位についてまとめておきます。ここまで、**長さメートル** [m]、**質量(物質の量)キログラム** [kg]、**時間 秒** [s] の３つについて話しました。他の多くの単位はこの３つの**組み合わせ**で、できあがっています。

組み合わせとは、**かけ算**と**わり算**のことです。足し算や引き算で組み合わせても単位にはなりません。この３つの他に、**電流**の単位、**アンペア** 記号 [A] をつけ加えさえすれば、電気磁気に関するすべての単位を創り出すことができます。

例えば、電圧、電気量、電場(界)、磁場(界)、電力などは、すべて４つを組み合わせて作ることができます。このようにして、組み合わせてできる単位のことを、**組み立て単位**と言います。

SI 国際単位系ではこの４つの他に、次の３つを**基本単位**としています。**単一物質の量**を表す単位 **モル** [mol] と、**温度**のパラメーターである**絶対温度**の単位 **ケー** [K] および**光度**を示す**カンデラ** [cd] です。最後の２つはエネルギーに関連した単位です。

以上の７つを**SI 国際単位系**の**基本単位**とします。他のすべての物理量の単位は、この７つの組み合わせで表わすことができます。

今ではこのSI国際単位系に関する国際条約にほとんどの国が加盟し批准しています。

批准していながら一般に普及していない国はアメリカです。ゴルフやアメフトで長さの単位にヤードが使われています。道具や機械のサイズはインチやフィートです。

アメリカの野球ではピッチャーの投げるボールの速さは、時速何マイルで表しています。道路標識制限速度も時速マイル数です。ヨーロッパでは 1980 年ごろに時速 km/h で表示されるようになりました。

アメフトの盛んな米国のことですから、1 ヤードを少し長くして１ m とし、フィールドを広くしたらどうでしょう。栄養事情も良くなったことですし、体も大きくなったから大丈夫でしょう。

そうすればアメリカも、**SI 国際単位系**の普及に大いに寄与することになります。実験室にインチねじとミリねじの２種類を準備しなければならないのも大変な負担でした。実験装置を分解した時、紛失したねじの代わりを捜すのに苦労をしたものです。

物理学を学ぶときに**よく使う単位**を

表 I－４－a
表 I－４－b
表 I－４－c

にまとめました。

特に、**固有の呼び名**を持つ**単位**は（**括弧**）で示しました。固有の名前も覚えて利用すると便利です。よく使われているものばかりです。

表Ｉ－４－a. SI 国際単位系の７つの SI 基本単位

物理量	単位の記号	読み方
位置、距離、長さ	m	メートル
質量	kg	キログラム
時間	s	秒
電流	A	アンペア
絶対温度	K	ケー
光のエネルギー	cd	カンデラ
同一物質の量	mol	モル

（１モル
12g の $^{12}_{6}C$ に含まれる原子数（アボガドロ数 $6\cdot10^{23}$）
と同数の原子、分子、イオンの量）

表Ｉ－４－b. SI 国際単位系の SI 補助単位

平面角	rad	ラジアン
立体角	sr	ステラジアン

表Ｉ－４－c. SI 国際単位系の SI 組み立て単位、(　)内は特別な名称

物理量	組み立て単位	（特別な名称）
速さ 速度	$m/s=ms^{-1}$	
加速度	$m/s^2=ms^{-2}$	
面積	m^2	
体積	m^3	
密度	$kg/m^3=kgm^{-3}$	
角速度	$rad/s=rad\cdot s^{-1}$	
力	$N = kgm/s^2 = kgms^{-2}$	（ニュートン）
力のモーメント	Nm	
圧力 応力	$Pa = N/m^2=Nm^{-2}$	（パスカル）
仕事 エネルギー 熱	J = Nm	（ジュール）
仕事率 電力	$W = J/s=J\ s^{-1}$	（ワット）
周波数	$Hz = s^{-1}$	（ヘルツ）
電圧 電位	$V = WA^{-1}$	（ボルト）

つづき

物理量	組み立て単位	（特別な名称）
電気量 電荷	C = sA	（クーロン）
静電容量	$F = CV^{-1}$	（ファラド）
電場(電界)の強さ	$V/m = Vm^{-1}$	
磁場(磁界)の強さ	$A/m = Am^{-1}$	
磁束密度	$T = Vs/m^2 = Vsm^{-2}$	（テスラ）
電気抵抗	$\Omega = V/A = VA^{-1}$	（オーム）
熱流	$W/m^2 = Wm^{-2}$	
光の放射照度	$W/m^2 = Wm^{-2}$	
熱容量	$J/K = JK^{-1}$	
キログラム熱容量	$kJ/(kgK) = kJkg^{-1}K^{-1}$	
モル熱容量	$J/(molK) = Jmol^{-1}K^{-1}$	
熱伝導率	$W/(mK) = Wm^{-1}K^{-1}$	
放射能の量	$Bq = 1/s = s^{-1}$	（ベクレル）
放射線の吸収線量	$Gy=J/kg=Jkg^{-1}$	（グレイ）
放射線の等価線量	$Sv = Jkg^{-1}$	（シーベルト）
実効線量	$Sv = J/kg = Jkg^{-1}$	（シーベルト）

第 II 章　ニュートンの運動の法則

第 II 章のまえがき

第 II 章での主題は､**動く物体の力学**です。しかしその前に、止まっている物体について検討します。これは小学校で習う初めての理科**てこの原理**です。釣り合いの物理学です。

ニュートンは物体がどのように動くかを考えました。そしてここでも**力**が全ての原因であることを突き止めました。動き始めたり、動き方が変わったり、止まったりするのは、その物体に**力**が働くからです。

ニュートンは一時的に加わる**力**だけでなく、**万有引力**のように、絶え間なく加わり続ける**力**と物体の**動き方**を関係づけることに成功しました。それが**運動の法則**です。この法則のキーワードは、動く物体の**位置**、**速度**、**加速度**と**力**です。

これらに関連して**仮想的な力**について話します。仮想的とは言え、この力は実際に受ける力です。バスが動き始めたり止まったりする時に乗客が受ける力です。この力は**慣性力**と呼ばれています。

バスが曲がるときに受ける**遠心力**も**慣性力**の一つです。

この他、**コリオリの力**と呼ばれる慣性力があります。回転するものの上で移動する時に受ける力です。地球上ではこの力によってさまざまな現象が起ります。地球が回転しているからです。

ニュートンは、**運動の法則**を３つに分けて記述しました。**第１法則**は、**力が加わらない時**のことで、ニュートンの生まれた年に亡くなった**ガリレオ**の発見した**慣性の法則**と同じ内容です。

第２法則が､**運動の法則**の主要部分です。力が加わった場合、動き方がどのように変わるかを記述したものです。詳しく説明します。

運動の法則の**第３番目の法則**は、別名**作用反作用の法則**と呼ばれる法則です。

力は、加える側と加えられる側があることを明言したものです。立場を逆にした時、どうなっているかを記述した法則です。

大きさが同じで方向が逆さまであると言う、何か**あたり前**のような法則です。

あたり前でよいのです。あたり前のことを連ねてゆくのが物理学なのですから。あたり前だからといって、分かっているとは思わずに読んでください。

第 II 章では､**第 I 章**で放置した**力**の**単位**［**ニュートン** N］についてはっきりさせます。単位は [kg･m･s^{-2}]です。

II－1．止まっている物体の物理学　ー 釣り合いの力学 ー

止まっている物体には力が加わっていません。いくつかの力が加わっている場合でも、その物体が動かない時には、加わった力の合計がゼロです。なにも力が加わっていない時と区別がつきません。

机の上に載っている本を考えましょう。本は止まっています。この本には二つの力が加わっています。一つは、地球の**万有引力**で鉛直下向きです。この力は地球が本を引く力で、**重力**と呼びます。

本に加わる二つ目の力は、机が本を支える力です。方向は鉛直上向きで、**抗力**と呼びます。

この二つの力、**重力**と**抗力**は大きさが等しく、方向が逆であり、本に働く力の**合計はゼロ**になります。本は動きません。（この記述を、後に II －１９で学ぶ、**作用反作用の法則**と混同しないでください）

力を表すために矢印を使います。**矢印の長さ**が**力の大きさ**を表し、**矢印の方向**が**力の方向**を表します。これを力の**ベクトル**と呼びます。

この矢印を使うと力の足し算が簡単になります。

二つの力の和を求めるには次のようにします。一つの力の矢印の先端に、もう一つの力の矢印を付け加えます。そして、初めの矢印の出発点から、二つ目の矢印の先端まで、新たに矢印を描きます。新たにできた矢印が合計の力の矢印です。**合力**と呼びます。

力 ***A*** と力 ***B*** を足し合わせた和が合力 ***C*** である、つまり、$\boldsymbol{A}+\boldsymbol{B}=\boldsymbol{C}$ を、**図 II－１**に示しました。

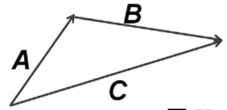


図 II－１. 合力 *C*

この方法で、机の上に乗った本に加わる二つの力を矢印で描いてみましょう。**図 II －２** のようになります。

図 II－２. 机の上の本に加わる二つの力

本に加わる**重力**は、鉛直下向きで、点 S から点 G に向かう矢印です。一方、二つ目の、机が本を支える力は、出発点を G とし、その先端の点 T までの矢印です。点 T は最初のベクトルの出発点 S と同じ位置になります。したがって、合計のベクトルはゼロになります。

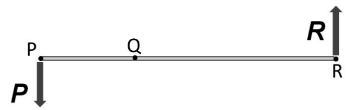
力が三つ以上の場合にも、力のベクトルの和は、**図 II－１** と同様に次々と加えて、**合力**を求めることができます。

ここでも最初のベクトルの出発点から最後のベクトルの先端までが合力のベクトルです。もし、出発点に戻る場合、力の合計がゼロとなります。

さて、**図 II －３** のように、物体(棒)に逆さま方向の二つの力が加わった場合を考えましょう。左端の点 P に力 ***P*** が下向きに、右端の点 R に力 ***R*** が上向きに加わるとします。この時、明らかに棒は**左回り**(**反時計回り**)に回転します。

たとえ、二つの力の大きさが等しくても、

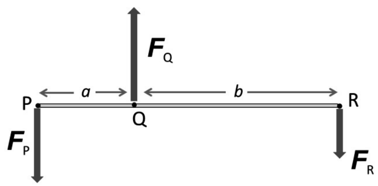
図Ⅱ－３ のように、力の作用する場所が違えば、棒は回転してしまいます。



図Ⅱ－３．棒の両端の逆方向の力

棒全体が動かず、しかも回転もしない、完全に止まった状態になるのはどんな時かを考えてみましょう。このような状態を**釣り合いの状態**と呼びます。

棒が釣り合うには**図Ⅱ－４** のように、もう一つ力が働かなければなりません。



図Ⅱ－４．棒が釣り合う時は三つ以上の力が加わる

図Ⅱ－４ のように三つの力が棒に加わる時を考えます。つまり、点 P に下向きの力 $\boldsymbol{F}_P$ が、点 Q に上向きの力 $\boldsymbol{F}_Q$ が、点 R に下向きの力 $\boldsymbol{F}_R$ が加わるとします。棒は**がんじょう**にできており、これらの力によって曲らないものとします。

この棒が釣り合って止まっている時には、次の**２つの条件**が、**同時**に成り立たなければなりません。

条件１：棒に加わる力の合力がゼロであること

下向きの力の合計：$\boldsymbol{F}_P + \boldsymbol{F}_R$
上向きの力の合計：$\boldsymbol{F}_Q$
これらが等しいこと、つまり、

$$\boldsymbol{F}_P + \boldsymbol{F}_R = \boldsymbol{F}_Q \qquad (\text{II}-1)$$

条件２：回転しないこと

ここで、**条件２**の回転について詳しく調べて式にしましょう。どのような条件があれば回転しないかを調べます。

棒の１点を固定しましょう。**図Ⅱ－４** の点 P、点 Q、点 R のどれか 1 つを固定点とします。そうすると、棒に加わる力は、棒を回転させる能力を持ちます。(固定点に加わる力は回転の能力を持ちません)

物体(ここでは棒)を回転させる能力のことを、**力のモーメント**(英語で**トルク**)と呼びます。その大きさを式で表すと次式です。

力のモーメント(トルク)
＝腕の長さ×力の大きさ　　(Ⅱ－2)

ここで、**腕の長さ**とは、**固定点**から力のベクトルを延長した線（**作用線**という）に下した**垂線**の長さのことです。**力のモーメント**は、**右回転**か**左回転**かを区別しなければなりません。ここでは、時計まわりを右回転、反時計まわりを左回転と呼ぶことにします。

棒の長さ PQ を a とし、
棒の長さ QR を b とすると、
棒全体の長さ PR は $a+b$ となります。

一つの力に着目します。その力のモーメントは固定点の位置で異なります。回転の方向も変わります。力のモーメントの式と回転方向を、表Ⅱ－１ に示します。

表Ⅱ－１ では、
点 Q を固定点にする場合を ① に、
点 R を固定点にする場合を ② に、
点 P を固定点にする場合を ③ に、

それぞれ２行目に、力のモーメントの式を示しました。式の後の **右、左** は回転方向

を表します。

どんな時でも、固定点に加わる力は、回転に寄与せず、力のモーメントはゼロです。

表Ⅱ－1．棒の固定点と力のモーメント

	点 P	点 Q	点 R
①		固定点	
	$a\times\boldsymbol{F}_P$ 左	$0\times\boldsymbol{F}_Q$	$b\times\boldsymbol{F}_R$ 右
②			固定点
	$(a+b)\times\boldsymbol{F}_P$ 左	$b\times\boldsymbol{F}_Q$ 右	$0\times\boldsymbol{F}_R$
③	固定点		
	$0\times\boldsymbol{F}_P$	$a\times\boldsymbol{F}_Q$ 左	$(a+b)\times\boldsymbol{F}_R$ 右

回転しない条件は、それぞれの場合で、右回りの力のモーメントと左回りの力のモーメントが等しいことです。

式にすると、
①の場合は　$a\times\boldsymbol{F}_P = b\times\boldsymbol{F}_R$　　(Ⅱ－3)
②の場合は　$(a+b)\times\boldsymbol{F}_P = b\times\boldsymbol{F}_Q$　　(Ⅱ－4)
③の場合は　$a\times\boldsymbol{F}_Q = (a+b)\times\boldsymbol{F}_R$　　(Ⅱ－5)
となります。

棒全体が釣り合って動かない条件は、

①の場合は、式（Ⅱ－1）と 式(Ⅱ－3)が、
②の場合は、式（Ⅱ－1）と 式(Ⅱ－4)が、
③の場合は、式（Ⅱ－1）と 式(Ⅱ－5)が、

それぞれ同時に成り立つことです。

具体的な数値を使って表をもう一度作ってみましょう。

棒の長さを $a = 0.2$ m、$b = 0.5$ m とし、
点 P に質量 10 kg のおもりが、
点 R に質量 4 kg のおもりが、
かかるとします。その時、

点 P に加わる力：$\boldsymbol{F}_P = 10\cdot 9.8$ N
点 R に加わる力：$\boldsymbol{F}_R = 4\cdot 9.8$ N

です。ここで、記号 ・ は × の意味です。

式（Ⅱ－1）より、点 Q に加わる力 $\boldsymbol{F}_Q$ は、

$$\boldsymbol{F}_Q = \boldsymbol{F}_P + \boldsymbol{F}_R = (10 + 4)\cdot 9.8 \text{ N} = 14\cdot 9.8 \text{ N}$$

で、方向は上向きです。ここで質量 m [kg] のおもりの重力は mg [N] の力であることを思い出してください。(**Ⅰ－４の式**(Ⅰ－4))

上記の数値を使って表をつくると、

表Ⅱ－２．棒の固定点と力のモーメントの計算値

	点 P	点 Q	点 R
①		固定点	
	0.2・10・9.8 左	0・14・9.8	0.5・4・9.8 右
	19.6 Nm 左	0	19.6 Nm 右
②			固定点
	(0.2+0.5)・10・9.8 左	0.5・14・9.8 右	0・4・9.8
	68.6 Nm 左	68.6 Nm 右	0
③	固定点		
	0・10・9.8	0.2・14・9.8 左	(0.2+0.5)・4・9.8 右
	0	27.44 Nm 左	27.44 Nm 右

どの場合にも、それぞれ左回転の力のモーメントと右回転の力のモーメントが等しくなっていることが分かります。

この計算で、9.8 の代わりに g を使うと簡単になります。両辺に g があるから、計算しなくてもよいからです。

練習問題を講義でやりましょう。

II－2．仕事 と 仮想仕事の原理

物理学において、**仕事** と言う言葉は特殊な意味があります。日常われわれの使う仕事とは全く異なります。ですからその意味を覚えてしまうしか方法はありません。

力を出して移動したとき、力と移動距離の積のことを **仕事** と言います。ただし、移動距離はその力の方向の成分だけを意味します。

ですから、荷物を背中に**しょって**、平地を歩く場合、物理学で言う**仕事**はゼロです。理由は、背中に荷物を担ぐ時に出す力は上向きで、平地を歩く時の移動の方向とは直角だからです。

このように定義した**仕事**は、エネルギーと同じものなのです。よく知られたように、エネルギーにはいろいろな形があります。

力学的エネルギー、位置エネルギー、運動エネルギー、ばねエネルギー、電気や磁気のエネルギー、熱エネルギー、光のエネルギー、原子核エネルギー、摩擦のエネルギー・・などすべて、上に述べた**仕事**の定義に帰着することが分かっています。

仕事の単位は、定義から明らかなように、力の単位[N ニュートン]と長さの単位[m メートル]の積で、[Nm]となります。この単位を、[J ジュール]としたことは前にも述べました。（I－6）

仮想仕事の原理 とは、小学校で習った**てこの原理**のことと思ってください。

図II－4をもう一度見てください。点Qを固定点として､点Pには力 $\boldsymbol{F}_\mathrm{P}$ が下向きに、点Rには力 $\boldsymbol{F}_\mathrm{R}$ がやはり下方に加わって、棒は釣り合っています。

今、点Pを距離 d だけ下向きに、仮想的に移動させたとします。その時、点Rは距離 e だけ上方に仮想的に移動します。この時 d と e の距離には幾何学的関係があり、片方が分かると他方が求まります。

次に**仮想仕事** を計算してみます。

点Pで仮想的に**した仕事**は $d{\cdot}F_\mathrm{P}$ であり、点Rで仮想的に**された仕事**は $e{\cdot}F_\mathrm{R}$ です。

仮想的にした仕事と
仮想的にされた仕事が 等しい

$$d\cdot F_\mathrm{p}=e\cdot F_\mathrm{R} \qquad (\mathrm{II}-6)$$

これが **仮想仕事の原理** です。このことから**てこの原理**を導きだすことができます。

移動距離と力の積が一定です

移動距離を長くすると、小さな力で大きな仕事ができるのです。

てこ、天秤棒、くぎ抜き、はさみ、コロ、斜面、ねじくぎ、ねじまわし、くさび、包丁、錐(きり)、滑車、輪軸 などです。

電気や石油による動力が利用される前には、いろいろと工夫をした道具がありました。

仮想仕事の原理の**仮想**という言葉は、

本来、動くはずのない釣り合う力で
仮に、動かすことを考えようとする

ところから来ています。

いろいろな場合に、**仮想仕事の原理**を当てはめてみてください。

II－ ３．物体の動き方と力の関係 I
止まっている物体に力を加えると動き始める

ニュートンは**万有引力の法則**の発見者として有名です。ニュートンは同時に、物体の動き方についての法則をみつけました。ニュートンの**運動の法則**です。

この法則を日常の平易な言葉で言うと、**物体に力を加えると速さ(速度)が変わります**、と言う法則です。私たちはこのことを日頃から当然のように感じています。**速さ**と**速度**に意味の違いはありません。ここでは**速度**を使うことにします。

この法則を感覚的に疑似体験しながら話を進めてゆきましょう。力を出して物体を移動させる時のことですから、筋肉に訴えることが可能です。自分で力を出していると思いながら読んでください。そうすると意味がはっきりしてきます。ある物体に力を加えると、その物体の動き方が変わります。どのように変わるでしょうか。

まず、止まっている物体に力を加えてみます。鞄を持ち上げてみてください。鞄は上にあがってきます。鞄が上向きに力を受けたからです。机の上で鉛筆を転がしてください。鉛筆は動き始めます。鉛筆に手で横向きに力を加えました。鉛筆は手から横向きの力を受けたからです。ボールを投げる、蹴る、走り始める、荷車を押す、などです。静止している物体が移動し始めるのは、移動する方向に力を受けるからです。

動き始める方向は加えた力の方向と一致します。あたり前ではないか、という声が聞こえますが、あたり前でよいのです。あたり前のことを記述するのが物理学の目的なのです。

ボールを持ち上げてそっと手をはなしてみましょう。ボールは下向きに落ちて行きます。これはボールに下向きの力が加わっているからです。この力が万有引力です。

ボールに限らず、地球上では何もかも下向きに力が加わっています。支えがなくなったら地面まで落ちてしまいます。机のような支えがあると、机はその物体を上向きの力で支えていますから、万有引力と差し引きしてちょうど力が0になります。

この時結局は、力が働かないのと同じ状態になります。ですから、机の上で物体は動かずに止まっているのです。止まっている物体には、その物体にどんなに力が加わっていようと、加わる力の合計は0になっているのです。

II－4．物体の動き方と力の関係 II
移動方向に平行・反平行の力が加わる場合

次に、動いている物体に力を加えてみましょう。すでに右向きに移動している物体に、同じ右向きの力を加えると、動き方はもっと早くなります。

ブランコに乗って動いている子供の背中を押すときと同じです。

落ち始めたボールは、どんどん速度が大きくなります。これはボールに、絶えず下向きの万有引力が加わっているからです。その力で、下向きの速度がますます増大しているのです。ジェットコースターで、下り坂にさしかかった時がその状態です。

加える力の向きを逆にしたらどうなるでしょう。物体の動きは遅くなります。さらに、逆向きの力をかけ続けると速度はさらに弱まり、ついには止まってしまいます。車にブレーキをかけて止まる時のことです。タイヤと道路の間に働く**摩擦力**が、走る車に逆向きの力を加えます。

車を止めるには、ブレーキペダルを踏んで車輪の回転を遅くします。車体の速度がその回転に見合った速度になるためには、タイヤと道路の間に摩擦があって滑りがないことが必要です。

タイヤと道路の間の**摩擦力**が進行方向と逆の方向に加わるので車は止まるのです。摩擦力のおかげで滑らないで車体の速度が車輪の回転に見合った速度になるのです。

もし摩擦がなかったら車輪の回転が遅くなっても、例え回転が止まっても、タイヤは滑ってしまい車体の速度はブレーキをかける前と変わりません。多くの運転手が、濡れた道路や雪道で滑った苦いしかも怖い経験を持っているでしょう。

もちろんこのことは動き始めにも言えます。ぬかるみにはまり込んで脱出する際、いくら車輪を早く回転させても摩擦がないと車体は動き出しません。車が走り出すのは、タイヤと道路の間の摩擦力が車体を後押しするからです。

動いている方向と逆向きに力がかかり続けると、その物体の動きはだんだん遅くなって、ついには止まってしまいます。それでもなお逆向きに力が加わり続けると、始め動いていた方向とは逆の向きに動き始めます。つるまき**バネの振動**がこの例です。

つるまきバネに**錘おもり**をつるすとバネは少し伸びます。放置すると、伸びた平衡点で止まります。錘を手で持ち上げてバネを縮めたのち、そっと手をはなすと錘は、平衡点の近くで上下に**振動**を始めます。

バネが縮んだ状態では錘はバネに押されて伸びてゆきますが、バネがさらに伸びて平衡点を過ぎると、バネは縮みたいので、錘は、**戻れ、戻れ**と力を受けます。その力のために錘は徐々に速度を落とします。

ついに止まってしまいますが、止まった時にもなお、ひき戻される方向に力が加わっています。そのため、錘は止まった瞬間からすぐに方向を変えて戻って行きます。

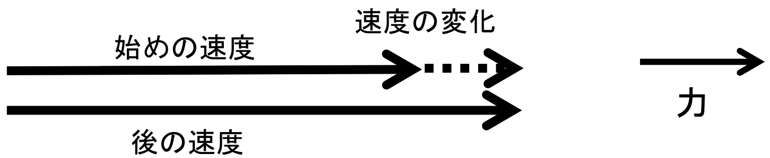


図 II－５右：力の矢印
図 II－５左：始めの速度と**後の速度**を示す**実線矢印**
および**速度の変化**を示す**点線矢印**
動いている方向に**力**が加わり
後の速度が**始めの速度**より増大した場合
始めの速度＋速度の変化＝後の速度

次に、**力の方向**と**速度の変化**を図に描いて調べてみましょう。**図 II－５、図 II－６、図 II －７**と場合に分けて考えます。**力の方向**を１本の**矢印**で示し、それぞれの図の右側に描きました。

速度も同様に**矢印**で描きます。**矢印の方向**を**速度の方向**とし、**矢印の長さ**を**速度**に比例させることにします。

図 II－５と**図 II－６**は、**始めの速度**と**後の速度**が同じ方向の場合を示した図です。

図 II−５では、力が始めの速度と同じ方向に作用して、**後の速度**が**始めの速度**より大きくなった場合、つまり**加速（正の加速）**の場合です。

図 II －６ではその逆の時です。力が始めの速度と逆の方向に加わって、**後の速度**が、**始めの速度**より遅くなった場合、つまり**減速（負の加速）**の場合です。

始めの速度と後の速度の二つの矢印は、同じところから、同じ直線上に重ねて描くべきですが、分かりやすくするために後の速度を少し下方にずらして描きました。

これらの図には**速度の変化**を示す矢印も描きました。点線を使った矢印で描きました。点線矢印は、**始めの速度**の先端から**後の速度**の先端まで引いた矢印です。

この**速度の変化**を示す**点線矢印**も、本来同じ直線上に描かねばなりません。分かりやすくするために、**図 II−５**では**始めの速度**の矢印と同じ直線上に描き、**図 II−６**では**後の速度**の矢印と同じ直線上に描きました。

ここで、**点線矢印**と**力の矢印**を調べてみましょう。

図 II−５では、**点線矢印**と**力の矢印**は、ともに右向きで同じ方向です。
図 II−６では、**点線矢印**と**力の矢印**は、ともに左向きで同じ方向です。

いずれの場合でも、

速度の変化の矢印と**加えた力の矢印**は**方向が一致**しています。

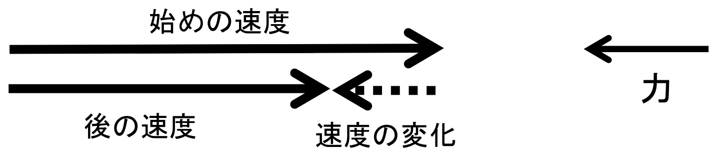


図 II－６右：力の矢印
図 II－６左：始めの速度と**後の速度**を示す**実線矢印**
および**速度の変化**を示す**点線矢印**
動いている方向と逆方向に**力**が加わり
後の速度が**始めの速度**より減少した場合
始めの速度＋速度の変化＝後の速度

II－5．物体の動き方と力の関係　III
移動方向に直角方向の力が加わる場合

動く物体への力の加わり方にはもう一つのものがあります。動く物体に**横から直角**に力が加わる場合です。横から力が加わった場合には、物体の**動く方向が変わります**。

サッカーでころがるボールを横取りする時です。ボールの動く方向が変わります。バレーボールでアタックするときも同じです。上から落ちてくるボールに横から力を加えます。**動く方向が変わるのは横から力が加わった**からです。

ひもに繋がれた**錘おもり**を振り回わして、錘が円弧を描いているとします。円弧を描いているのですから、**錘の動く方向は時々刻々変っています。**

さて、円弧を描いて動いている錘にどんな力が加わっているでしょう。錘は紐を通して中心に繋がっています。錘に加わる力はこの紐を通してかかる以外他にはあり得ません。紐の方向はいつも**錘の動く方向に垂直**です。

円を描いて運動する物体には、いつも横から力が加わっています。一般に、曲がる時には横から力が加わるのです。

アイスダンスデュエットで、男性を中心にしてまわる女性の手は男性の手で引かれています。女性になってみてください。中心の男性から引かれる力以外に、どんな力も加わっていません。男性に引かれる力で女性は男性のまわりを回るのです。

女性は円周に沿って動くのですから、動く方向はどんどん変わります。女性に加わる力は常に動く方向に直角です。力は女性の作る円の中心に向かいます。この力を**向心力**と呼びます。

よく遠心力が加わっていると言いますが、これは間違いです。遠心力は回転体内部でのことで、慣性力と呼ばれる力です。詳しくはII－１６で説明します。

階段を使って１階から２階へ登るとき、階段の途中でぐるりと方向を転換する場合があります。方向を転換する時、手すりを体の方向に引っぱってまわると、簡単に方向転換できます。ここでも腕を通して体に横から力を加えています。体はその向心力で**進む方向を変えている**のです。

マラソンの練習を運動場のトラックで行うと疲れるが、外の道路で行うと同じ距離を走ってもさほど疲れません。これは曲がり続けるトラックでは、体に横向きの力を余分に加え続けなければならないからです。**方向を変える**ために、足で横向きに蹴らなければならないからです。

同じ方向にトラックを回るとすれば、一方の足にだけ負担がかかりやすくなります。両足に負担を分け合う走り方もおそらくあるでしょう。

スピードスケート選手の滑り方を見るとよく分かります。カーブで右足も左足も同じ方向に出して、横向きに力を加えています。スピードが上がれば上がるほど、大きな横からの力が必要です。

進む方向に対して横からの力が加わる場合を、**図II－７**に描きました。図の**右側**に**力の方向**を、図の**左側**に**速度**と**速度の変化**を描きました。

紐に繋がれた錘の動きを思い浮かべてください。**始めの速度**を右向きの矢印とします。錘は円周を進むのですから、その**直後の速度**は、矢印の方向を右下斜め方向に変えておけばよいでしょう。

矢印の長さは変えないで方向だけを変えておきます。方向だけが変わった時でも、

物理学では**速度が変化した**と言います。**速度の変化**を分かり易くするため、２つの矢印の出発点を一致させてあります。

次に、**速度の変化**は、**図II－５左**や**図II－６左** の時と同じように、**始めの速度**の先端から**後の速度**の先端までの矢印で示すことができます。**速度の変化**の矢印を**点線矢印**で描きました。

ここでは、**始めの速度**の方向に対して、**図II－７左**のように、上から直角方向に力を加えた場合を考えました。ここでも**速度の変化**を表す**点線矢印**は、**加えた力の方向と一致している**ことに注意してください。

読者の中には、**力の方向**と**速度の変化の方向**は**一致していない**と思った人がいるでしょう。確かに**図II－７右**の**力の方向**が上から真下の方向なのに対して、**図II－７左**では、**速度の変化の方向**は、**始めの速度**に垂直ではありません。少しだけ斜めを向いています。

でも、厳密さを少し我慢してください。後に少し厳密にお話する時が来るでしょう。厳密に記述するには数学的準備が必要となります。

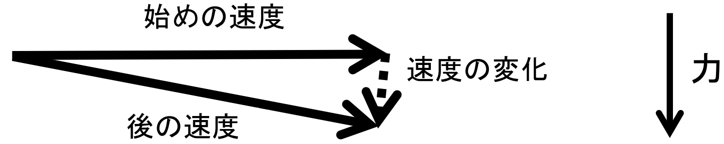
次に、斜め前から風が吹いてきた場合を考えます。歩き方が遅くなると同時に、横によろめいて曲がってしまいます。斜めからの風によって**斜めに力**を受けます。

このような場合には、この**斜めの力**を**２つ**に分けて考えるとよいのです。**進む方向**に**逆方向の力**と**真横方向の力**の２つに分けるのです。進む方向に逆方向の力は、歩みの**速度を低下**させる効果があります。また、横向きの力は**歩む方向を変える**効果があります。

移動している物体にどの方向から力が加わっても、上に述べたように直交する２つの方向に分けて、それぞれ別々に速度がどのように変わるかを考えればよいのです。

そして最後に、それぞれの効果を加え合わせるとよいのです。

以上、**図II－５**、**図II－６**、**図II－７** で示した共通の結論は、**力を加えると速度が変化し、その速度の変化の方向が力の方向と一致する**ことです。これがニュートンの運動の法則の根幹です。



図II－７右：力の矢印
図II－７左：始めの速度と**後の速度**を示す**実線矢印**
および**速度の変化**を示す**点線矢印**
動いている方向と直角方向に**力**が加わり
後の速度の方向が**始めの速度**の方向から変化した場合
始めの速度＋速度の変化＝後の速度

II－６．物体の動き方と質量の関係

ニュートンの運動の法則にはもう一つ重要な要素があります。それは物体の**質量**についてです。同じ力を加えたときでも、質量の異なる物体ではその**速度の変化**の仕方は違います。動き方の変化は質量が大きいほど緩慢になり、質量が小さい物体ほど敏感です。

空中に浮くちりは、吹くだけでどこかへ飛んで行ってしまいます。一方、エンストした車を１人で動かすことはできません。力をあわせてそろりそろりと動かしている光景を見ることがあります。

質量が大きい場合には大きな力が必要です。**加速するとき・減速するとき・速度の方向を変えようとするとき**、いずれの場合にも、質量が大きくなればなるほどそれだけ大きな力が必要になります。

II－７．ニュートン の 運動の法則

ニュートンは、**速度の変化に質量を掛けた積が力に等しい** ことをつきとめました。式で表すと、

力＝質量・速度の変化　　(II – 7)

この式の比例定数は 1 と決めてあります。

物体に力を加えると物体の速度が変化します。速度の変化が大きい時には大きな力が必要です。それだけではなく物体の質量が大きい時には、質量に比例して大きな力が必要です。

またこの式は、方向についても等しいことを意味します。つまり、**加える力の方向**は**速度の変化の方向**と同じ方向であることを示しています。

これはニュートンの**運動の法則の第２法則**として知られています。これは**自然の法則**のひとつです。**自然の法則**とは、自然現象を支配する最も根底にある法則です。全ての現象は**自然の法則**に支配されており、あてはまらない物事はありません。

ニュートンの運動の法則は、全てにあてはまる法則です。賢明な読者は**なぜこの法則は成り立つのか？**と、質問したくなるでしょう。その質問に対して実は誰も答えようとはしません。単に、**事実がそうなっているのです**と、答えるだけなのです。

その代わり、実際にそうなっているかどうかは、厳密に調べる必要があります。**事実がそうなっている**のですと、自信を持って答えることができるのは、実際に**厳密に調べた結果**なのです。

ニュートンは、**質量** m と**速度** v の**積が運動の本質**であると考え、この積を**運動量**と呼びました。そして**力**を加えるとこの**運動量**が変化するとしました。式(II – 7)も、このニュートンの考えを正確に表現した式です。

II－８．ベクトル

ニュートンの運動の法則は、私たちも実感できて納得のいくものです。この式は前にも述べたように、**自然の法則**です。事実がそうなっているのです。この事実を発見し、そのことを式 (II – 7) のように書いたのが**ニュートン**なのです。

この**自然の法則**を表現するために、**位置**、**速度**、速度の変化である**加速度**、**力**、**質量**などの日常よく使う言葉が使われます。

物理学で使う場合には、少し異なった意味を付加したり、厳密さを求めたりします。例えば **速度** や **加速度** はその大きさだけでなく、その方向も一緒に意味します。

力 についても同じことで、大きさだけでなくその方向も表わします。このような量をベクトルと呼んでいます。

速度 や **力** と言う言葉に、大きさだけでなく方向も合わせ持たせるためには、表現の方法を工夫しなければなりません。

速度の大きさだけを表わすには、１つの数値だけで充分でした。時速 60 km/h とか、風速 6 m/s など数値が１つで充分でした。しかし、これだけではどちら方向に走ったか、西風か東風かは全く分かりません。

それを分かるようにするにはどうすればよいでしょう。最も簡単な方法は、３つの数値を一組にして表わすことです。３つの数値を一組にすると、速度の大きさと方向を一度に表わすことができるのです。

３つの数値は例えば、東西･南北･上下それぞれの方向の、速度や力とすればよいのです。

このようにして表現する物理量を**ベクトル**と呼んでいます。**運動の法則**を表わす 式 (II – 7) は、左辺も右辺も**ベクトル**です。

式(II – 7) は、ベクトルとして等しいのですから、**左辺**と**右辺の大きさ**が等しいだけでなく、**左辺の方向**と**右辺の方向**が、**同じ**であることを表わしています。

位置、**速度**、**力**、これから説明する**速度の変化**(**加速度**)などは、すべて**ベクトル**です。

II－９．位置、速度

ニュートンの**運動の法則**を感覚的に捉えて頂けたと思います。しかし、物理学では感覚だけではいけません。誰もが納得する式にしなければなりません。式 (II – 7)ではまだ不満足です。

式 (II – 7) の左辺に現れる**速度の変化**を式にする必要があります。そのために**速度の定義**から始めます。**速度**とは何でしょう。

ここでは説明を簡単にするために、東西に延びる直線上を移動する場合だけを考えます。そうすると**速度**は日常使う意味と変わりません。直線上にかぎられているからです。

速度とは 1 **秒当たり位置がどれだけ変化するか** を表わす量です。**位置の変化**を、その変化にかかった時間で割り算すれば、1 秒当たりの位置の変化、つまり速度になります。

位置の変化とは、**後の位置**から**始めの位置**を差し引くと計算できます。

従って、**速度**は次の式で表わすことができます。

$$速度 = \frac{位置の変化}{変化にかかった時間}$$

$$= \frac{後の位置 - 始めの位置}{変化にかかった時間} \qquad (\mathrm{II}-8)$$

速度の単位はSI国際**単位系**でどうなるでしょう。そのために**速度**の**次元**を考えましょう。**位置**の**次元**は**長さ**で、単位は**メートル** m ですから、**位置の変化**も同じ**次元**と**単位**です。

移動にかかった時間の**次元**は**時間**で、**単位**は**秒** s です。

従って、速度の次元は $\left[\frac{長さ}{時間}\right]$ です。従って、速度の単位をSI国際単位で記述すると $\left[\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} = \mathrm{ms}^{-1}\right]$ となります。'**メートル毎秒**'と読むことになっています。

速度は日常的には**時速**で表わしますが、物理学ではいつも**秒速**で表わす約束になっています。

II－１０．加速度

次に、式 (II – 7) の左辺に現れる**速度の変化**について考えましょう。これは**加速度**と呼ばれる物理量です。速度が変化する場合のその変わり方を表わす量です。

車が走り始めるときに、加速のよい車とか、加速の悪い車などと使います。比喩的にも使われます。

速度がどんどん大きくなるさまを表わします。坂道をころがり落ちる時のように速度が変わってゆくさまを表す物理量です。

日常的には加速度の大きさは人によって感じ方が違います。物理学で使うためには使う人によって異なるのは許されません。

誰が計算しても同じ値にならねばなりません。そのために式で**定義**します。前節の**速度**の定義と同様に、次の式で定義します。

$$加速度 = \frac{速度の変化}{変化にかかった時間}$$

$$= \frac{後の速度 - 始めの速度}{変化にかかった時間} \qquad (\mathrm{II}-9)$$

どれだけの時間(単位は秒)を使って、どれだけ速度が変わったかを表わしています。簡単な例を使って、この式に慣れてみましょう。

信号待ちを終えた車がまっすぐ走り始めたとします。走り始めた車の速度を 2 秒ごとに測定し、結果を**表 II－５**に示しました。**第１列**は出発時から計り始めた時刻で、単位は［s 秒］です。**第２列**に速度の測定値を示しました。 SI 国際単位系に従って、単位は $[\mathrm{ms}^{-1}$ **メートル毎秒**$]$ です。

加速度の定義式 (II – 9)を使って加速度を計算してみましょう。

始めの 2 秒間に速度が 0 ms^{-1} から 1 ms^{-1} まで変わりました。速度の差 1 ms^{-1} を 2 s で割って、大きさは 0.5 となります。加速度は、速度を時間で割ったものですから、その次元は $\left[\frac{\frac{長さ}{時間}}{時間} = \frac{長さ}{時間^2}\right]$ です。従ってその単位は $\left[\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2} = \mathrm{ms}^{-2}\right]$ です。これが**加速度の単位**です。日本語で**メートル毎秒毎秒**と読むことになっています。

次の 2 秒間に速度が、1 ms^{-1} から 3 ms^{-1} に変わりました。その速度の差は 2 ms^{-1} であり、これをかかった時間 2 s で割って、大きさは 1 ms^{-2} となります。これは、時刻が 2 秒から 4 秒までの 2 秒間の加速度です。

次の 2 秒間、 4 秒から 6 秒までに速度が 3 ms^{-1} から 6 ms^{-1} に変わりました。その差 3 ms^{-1} を 2 s で割って、大きさは 1.5 ms^{-2} となります。この 2 秒間の加速度です。

同様に順次計算して得た加速度を、**表 II－５の第３列**に示しました。

その後、自動車が徐々にスピードを緩めて止まります。表にはありませんが、止まるときには加速度はどうなるでしょう。この時は、式 (II – 9) の**後の速度**が**始めの速度**より小さくなります。従って差は負の値になります。

このような場合、物理学では**加速度が負である**として取り扱います。加速度と名前はついていますが、減速時も加速度という言葉を使います。ただし、値を負とします。減速度とは言いません。

==============================

表 II－５．発車するときの加速度の計算

時刻 [s,秒]	**車の速度** $[\mathrm{ms}^{-1}]$	**車の加速度** $[\mathrm{ms}^{-2}]$
0	0	
1		0.5
2	1	
3		1.0
4	3	
5		1.5
6	6	
7		1.0
8	8	
9		0.5
10	9	
11		0.5
12	10	
13		0.0
14	10	

============================

II－１１．曲がる時の加速度

走っている物体に横から力が加わって、走る方向が変わるときの加速度について考えましょう。加速度の定義式は前の式(II – 9)と同じです。

$$加速度 = \frac{速度の変化}{変化にかかった時間}$$

$$= \frac{後の速度 - 始めの速度}{変化にかかった時間} \qquad (\mathrm{II}-9)$$

この式の分子は、**図 II －７**の点線矢印の長さです。

この点線矢印の長さは、速度の大きさ（図の実線矢印の長さ）とその２本の矢印の間の角度を使って表わすことができます。**速度の大きさ**を u **ユー**とし、２本の矢印の間の**角度**を φ **ファイ**とすると、その積が**点線矢印**つまり**速度の変化の大きさ**になりま

す。その**速度の変化の大きさ**を Δu **デルタユー**と書くと、次式が成り立ちます。

$$\Delta u = \varphi \cdot u \qquad (\mathrm{II}-10)$$

この式は**角度** φ の**単位**を**ラジアン** rad にした時に成り立ちます。通常使われている角度は、一周を 360 度に分けました。その角度の表し方では成り立ちません。

角度の単位**ラジアン** rad は、一周の角度を、360 の代わりに 2π にしたものです。全円周は 2π と半径の積ですから、**角度**と**半径**の積は、その**角度**に対応する**円弧の長さ**になるはずです。1 rad とは円周上に乗せた**半径の長さ**を見込む**角度**です。

一周 360° が 2π rad ですから、日常使っている 180° は π rad で 90° は π/2 rad です。角度の単位**ラジアン** rad は、I−１３で示した SI 補助単位です。

角度と円弧の長さを関係づける便利な式が次のようになりました。

円弧の長さ ＝ 半径·角度　(II − 11)

この式を**図 II −７**に当てはめたものが、式 (II − 10) です。もう一度書いておきます。

速度の変化 Δu＝ **速度** u·**角度** φ　(II − 10)

次に、**速度** u で**曲率半径** R の円周上を走る車を考えましょう。**図 II−８**を見てください。角度 φ [rad]だけ回って、位置 A から B まで走るのに、時間 Δt [s] だけかかったとします。

時間 Δt の間に走る距離は、速度が u だから $\Delta t \cdot u$ となり、**図 II−８**の円弧 A B です。円弧 A B は式 (II − 11) を使うと $R \cdot \varphi$ に等しくなるので、次式が成り立ちます。

$$\Delta t \cdot u = \text{円弧 AB} = R \cdot \varphi$$

この式から、変化にかかった時間 Δt を求めると次式になります。

$$\Delta t = \frac{R \cdot \varphi}{u} \qquad (\mathrm{II}-12)$$

一方、**加速度**の大きさを a **エイ**とおくと、加速度の定義式 (II − 9) より

$$a = \frac{\text{速度の変化}}{\text{変化にかかった時間}} = \frac{\Delta u}{\Delta t}$$

となります。この式の分母に式 (II − 12) を、分子に式 (II − 10)を代入すると、

$$a = \frac{\Delta u}{\Delta t} = \frac{\varphi \cdot u}{\frac{R \cdot \varphi}{u}} = \frac{u^2}{R} \qquad (\mathrm{II}-13)$$

つまり、

$$\text{曲がる時の加速度} = \frac{\text{速度}^2}{\text{曲率半径}} \quad (\mathrm{II}-14)$$

と、なります。覚えてください。
式(II − 14)の単位は、

$$\left[\frac{\text{速度}^2}{\text{曲率半径}} = \frac{\left(\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}\right)^2}{\mathrm{m}} = \frac{m}{s^2} = \mathrm{ms^{-2}}\right]$$

であり、[**メートル毎秒毎秒**]であることが分かります。

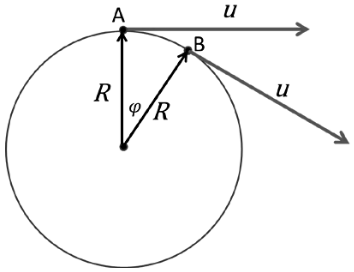


図 II−８　半径Rの円周を走る車の位置と速度の変わり方
図 II−７は速度 uだけを取り出したものである

物理学では、**角度の単位**として rad を使わなければなりません。

曲がるとは、どこか１点を中心として**曲率半径** Rで回転することですから、回転の速さを**回転の角速度** ω を使って表すことも出来ます。**角速度** ω は 1 秒間の回転角度で、単位は[$\mathrm{rad \cdot s^{-1}}$]です。

式(II − 11) を使うと**曲率半径** R、**速度**u、**角速度** ω の間に $u = R \cdot \omega$ が成り立ちます。

角速度の練習をしましょう。地球は 1 日 24 時間で一回転します。一回転は 2π rad ですから、地球の角速度 ω_{E} は

$$\begin{aligned}\omega_{\mathrm{E}} &= 2\pi\,\mathrm{rad}/(24 \cdot 60 \cdot 60)\,\mathrm{s} \\ &= 7.27 \cdot 10^{-5}\,\mathrm{rad \cdot s^{-1}}\end{aligned}$$

従って、赤道上の一点が移動する速度 u_{E} は $u_{\mathrm{E}} = R \cdot \omega_{\mathrm{E}}$ となります。R = 6378137 m (赤道半径)として、赤道での速度 u_{E} は

$$\begin{aligned}u_{\mathrm{E}} &= 6378137\,\mathrm{m} \cdot 7.27 \cdot 10^{-5}\mathrm{rads^{-1}} \\ &= 464\,\mathrm{ms^{-1}}\end{aligned}$$

曲がる時の加速度を、回転の角速度 ω を使って記述できます。式 (II − 13) に速度と角速度の関係 $u = R \cdot \omega$ を使って u を消去すると、次式になります。

曲がる時の加速度 a
＝ **曲率半径**·(**角速度**)^2
＝ $R \cdot \omega^2$　(II − 15)

ここで、式(II − 13)や式(II − 15)を使って、曲がる時の加速度を具体的に計算してみましょう。

車で高速道路を走ってみます。時速 120 $\mathrm{km \cdot h^{-1}}$ で、半径 300 m のカーブを走る時、どれだけの加速度でしょうか。車が横から受ける加速度です。乗っている人は逆に横から**遠心力**と呼ばれる**慣性力**を受けます。

時速 120 $\mathrm{km \cdot h^{-1}}$ を秒速に換算すると

120000 m / 3600 s = 33.3 $\mathrm{ms^{-1}}$ であり

加速度=$(33.3)^2$/300=3.7$\mathrm{ms^{-2}}$

となります。この値 3.7 $\mathrm{ms^{-2}}$ は、大きな加速度です。事故のもとです。いつも加速度を暗算しながら走って下さい。

暗算するのは簡単ではありません。走りながら**曲率半径**は分かりますか？分かります。高速道路では脇に表示があります。

時速から秒速を計算できますか？　いいえ、できません。次の表を覚えましょう。

時速 [$\mathrm{kmh^{-1}}$]	秒速 [$\mathrm{ms^{-1}}$]
36	10
72	20
108	30
144	40

これ以上に早く走ってはいけません。

秒速を自乗して、曲率半径で割ると加速度が求まります。およその値を暗算しましょう。暗算中に事故を起こさないで下さい。

計算結果が、2.5 $\mathrm{ms^{-2}}$ 以上では危険だと覚えてください。さて、危険かどうかをどのように判断するのでしょうか。

車内で受ける遠心力を、逆立ちをした時の腕の受ける力と較べるのが最もわかりやすいでしょう。車内では遠心力を、車の側面を片腕で押して支えるでしょうから。

曲がる車の中で横向きに受ける遠心力
＝ 自分の質量 × 車の加速度　(II − 16)
と
逆立ちをした時の片腕の力
$= \frac{\text{自分の質量} \times \text{重力加速度}\ g}{2}$
＝ 自分の質量 × 4.9　(II − 17)

を較べてみます。

逆立ちでは、腕２本を使って体重を支えますから２で割ります。

式(II－17)の 4.9 と式(II－16)の車の加速度を較べてください。そして、逆立ちをしている時の苦しさを思い出して下さい。逆立ちでは 4.9 です。式(II－16)の値は 3.7 で、これは大きな加速度です。こんな大きな加速度を車の中で、受けては大変です。4.9 の約半分の 2.5 ms^{-2} が限度です。事故を起さないために。

次の例題で、曲がる時の加速度を計算してください。

問題１ 地球の自転による加速度を
赤道上 および 北緯 45 度で求めよ

問題２ ブランコに乗る子供の受ける加速度

問題３ 車いすを押して廊下を曲がる時の加速度

II－１２．運動の法則 と 微分積分学

図 II－５、図 II－６、図 II－７ から分かるようにどんな場合にも、**加速度**と**力の方向**は同じ方向です。ニュートンの運動の法則、式 (II－7) は、大きさだけでなく方向も含めて成り立つ式です。

速度の変化を**加速度**に書き換えて、運動の法則をもう一度ここに示します。

力 = 質量 × 加速度 (II－18)

この式で右辺の**加速度**と左辺の**力**は**ベクトル**です。等号で結ばれているのですから、左辺と右辺は等しいのです。数値が等しいだけでなく**方向も等しいのです。**つまり、加速度と力は**同じ方向を向いている**と、言うことも、この式の中には含まれています。

運動の法則は、ニュートンの発見した二個目の**自然の法則**です。一個目は**万有引力の法則**です。ニュートンは力学の重要な二つの**自然の法則**の発見者です。

実は、これまでの話にはまだ大きな落とし穴があります。これまでの計算や説明では、**速度**や**加速度**は、かかった時間の間の**平均値**です。これまでの話は全て、**平均の速度**と**平均の加速度**だったのです。

運動の法則は平均値に成り立つ法則ではなく、瞬間の加速度とその瞬間に働く力との間に成り立つ法則です

自然の法則を正確に、しかし、まわりくどく記述すると次の通りです。

物体の質量と瞬間の加速度の積が、その瞬間に加わる力に等しい

瞬間の速度や瞬間の加速度はどのように計算するのでしょう。仮に、かかった時間をもっと短くして細かく計算してゆけば、瞬間に近くなってゆくはずです。確かに、詳しいことは分かってきます。

しかし、それには限度がありません。式(II－8) や式(II－9)を使う限り、どんな短い時間にせよ**平均値**であることにかわりがありません。

自然の法則は平均値ではなく、瞬間の速度や瞬間の加速度でないといけないのです。そのことをニュートンが見抜いたのです。**考え方の革命**です。ニュートンが起こした革命です。

図 II-７で、**速度の変化**を示す点線矢印が少し斜めになりましたが、それは瞬間を記述したものではなく、平均だったからです。瞬間を記述すると、**瞬間の速度の変化**は**瞬間の速度**に**垂直**になります。

この**瞬間の速度**を表現する**数学的方法**も**ニュートン**が考案したのです。ニュートンは瞬間の物理量の数学的な表現方法を発明したのです。後に微分積分学と呼ばれる新しい数学分野を創造したのです。ニュートンは瞬間の速度や瞬間の加速度という新しい**概念の発見**と、その**計算方法の発明** を同時に行ないました(**朝永振一郎著 物理学とはなんだろうか 1979 年 5 月 21 日 岩波書店**)

瞬間の速度は、式(II－8)を使って、この式の分母を限りなく 0 に近づけた**極限値**を求めることによって計算できます。

同様に**瞬間の加速度**は、式(II－9)を使って、この式の分母を限りなく 0 に近づけた**極限**を求めます。この手法を数学では**微分**すると言います。

瞬間の速度や瞬間の加速度の単位は平均の速度や平均の加速度と同じであり、それぞれ [ms^{-1}] および [ms^{-2}] となります。

微分について、イギリスのニュートンだけではなく、同じ頃ドイツで、ライプニッツも同じ考えに到達していました。そういう時代になっていたのでしょう。西暦 1700 年頃のことです。

現在では微分の表記法として、ニュートンの流儀はほとんど使われません。ライプニッツの表記方法を使うのが主流になっています。

II－１３．ニュートンの三大偉業

ここで、ニュートンの業績についてまとめておきましょう。

第一偉業は、**第 I 章**に話した**万有引力の法則**の発見です。２つの物体は引き合う。引き合う力の大きさは、２つの物体の質量に比例して、２物体間の距離の２乗に反比例する。ニュートンはこの**自然の法則**の発見者です。

第二偉業は、**第 II 章**で話した**運動の法則**の発見です。力が加わったときにその物体がどのように動くかを言い表したものです。**物体の質量と瞬間の加速度との積がその瞬間にかかっている力に等しい**ことを発見したのです。

第三偉業は、**II－１２**で述べた、**瞬間の物理量**の概念の発見とその**数学的表現方法**の発明です。現在では**微分積分学**と呼ばれる数学における最大の分野です。

ニュートン以降 300 年、まだまだ発展進歩し続けている分野です。高等学校や大学で学ぶ数学の大部分は**微分積分学**が占めています。

ニュートンはこれらの発見や発明を駆使して、さまざまな**自然現象**を解き明かしました。中でもこの新しい概念を世に知らしめたのは**ハレー**(1656-1742)でした。

ハレーはニュートンの教えに従って、1682 年に出現した彗星の軌道の計算を始めました。

そして、その軌道が、**コペルニクス**(1473 - 1543) の時代、1531 年に観測された彗星や 1607 年に**ケプラー**(1571 - 1630) の見た彗星の軌道と同じ軌道を描いていることに気がついたのです。

そしてハレーは 76 年後、1758 年にその同じ彗星が再度回帰することを**予言**しました。そしてついに 1758 年の暮れから翌年にかけて彗星は戻ってきました。

その時、ニュートンはもとよりハレーもこの世の人ではありません。この彗星は今では**ハレー彗星**と呼ばれています。

こうして、ニュートンの考え方や手法が確固としたものとして受け入れられてゆきました。

II－１４．自然の記述

ニュートンの新しい概念 **瞬間の物理量**およびそれを表現するための**数学的手法、微分積分学**は、物理学に革命的変革をもたらしました。

物理現象あるいは自然現象を記述することは、その変化を記述することであります。**変化を記述する**ためには**瞬間を記述する**手段が必要不可欠です。**微分積分学**なくして、それらを記述する方法はありません。

天体や宇宙の諸現象だけではありません。我々の身の回りの現象、**電気や磁気に関する現象　熱にかかわる現象　物質のもろもろの性質** の記述には欠かすことができない手段なのです。

物質の性質は、物質中の原子分子電子の振舞いが決めています。**微分積分学** なくして森羅万象の**自然の記述**は不可能です。

II－１５．力の単位

ここで**力の単位**がはっきりしてきました。式(II－18)から、力は質量と加速度との積ですから、SI 国際単位系の SI 基本単位で表現してみましょう。

$$[\text{力}] = [\text{質量} \times \text{加速度}]$$
$$= \left[\text{質量} \times \frac{\text{長さ}}{\text{時間}^2}\right] = \left[\frac{\text{質量}\cdot\text{長さ}}{\text{時間}^2}\right]$$

よって、力の単位は $\left[\frac{\mathrm{kg\cdot m}}{\mathrm{s^2}} = \mathrm{kg\cdot m\cdot s^{-2}}\right]$ となります。

これをまとめて[N] としたのです。**キログラムメートル毎秒毎秒**と、毎回呼ぶのは煩わしく、また分かりづらいので、つづめて、**ニュートン** 記号で [N] としました。

力の単位 $= [\mathrm{kg\cdot m\cdot s^{-2}}] = [\mathrm{N}]$　(II－19)

Ｉ－２で述べたように、**重力(重さ)**は**力**ですから単位は [N] です。**質量** m [kg] の物体の地球上での**重力**は、9.8 m [N] です。

月の表面に行けば、同じ物体の**重力**は異なります。月での**重力**を求めるには、9.8 をかけるのではなく、1.62 をかけて求めます。月の質量や大きさが地球のそれらと違うからです。

宇宙船の中では、テレビでよく見かけるように**重力**はなくなっています。宇宙船の中では**重力**はその質量に 0 をかけるとよいのです。**質量**はどの場合にも m [kg] です。

II－１６．慣性力　I
加速度運動する乗り物の中で、止まっている物体が受ける力

ニュートンの発見した二つの法則は、**力**に関する法則です。ここでは**力**について話を追加します。

読者の皆さんは日頃どんな力を受けていますか。どんな時に力を感じますか。逆立ちをした時や鉄棒にぶら下がったときに**重力**を感じます。これは地球があなたを引っぱる**万有引力**が原因です。地球上では誰でもいつでも受けている力です。

電車や自動車に乗っているとき、**予期せぬ力**を受けることがあります。誰かに直接引かれる力ではありません。誰も何もしないのに力を受けてしまいます。

車が止まる時には前向きに、出発時には後ろ向きに、曲がる時には曲がる方向と逆方向真横に力を受けます。これらの力を**慣性力**と呼んでいます。

この**慣性力**を受ける時はいつでも、なにか乗り物に乗っているときに限られます。

しかもその乗り物が、動き始める時、止まる時、曲がる時に限られます。

車が止まっている時にはもちろん力を受けません。車が一定の速度でまっすぐ走っているときにも、このような力を受けません。

力を受ける時はいつでも、乗り物の**速度が変化**している時、言い換えると、乗り物が**加速度運動**している時です。

加速度運動している車に乗っている人は、車の中で、車が受ける加速度と同じ大きさの**逆向きの加速度**を受けます。

逆向きの加速度を受けるのですから、乗っている人は、その**加速度**と自分の**質量**の**積**で決まる**力**を逆向きに受けます。

受ける力の大きさが、**加速度**と**質量**の**積**で決まる理由は、ニュートンの運動の法則によります。この力のことを**慣性力**と呼びます。

車が加速するときは、**図 II －５**で説明したように、車は前向きに力を受けて、前向きの加速度を持っています。

乗っている人は同じ大きさの逆向きの加速度を受けて、自分の質量を乗じた力を後ろ向きに受けるのです。電車でもバスでも、出発時に後方に倒れそうになります。

車が止まるときには前のめりになりますが、それは、車には**図 II－６** に示したように、後ろ向きの力が加わり、車に後ろ向きの加速度がかかっているからです。

乗っている人には、その逆方向の、つまり前向きの加速度がかかります。乗っている人には、その**加速度**と自分の**質量**の**積**で決まる力が、前向きに加わります。

では曲がるときはどうなっているのでしょう。車が曲がる時には、**図 II －７**で説明したように、車にはいつも進む方向と垂直方向に力が加わっています。その力によって車は**横向き**の**加速度**を持って、**方向を変え**ています。

曲がる時の加速度の大きさは、式(II－13)または式(II－15)で計算できます。

このように車が曲がる時にもやはり、中に乗っている人は、**車にかかる加速度と逆向きの加速度**を受けます。そして**加速度**と自分の**質量**の**積**で決まる**慣性力**を受けます。

車が曲がる時に、乗っている人が受ける慣性力を、別名**遠心力**と言います。

電車やバスに乗った時に、その速度の変化に際して車内で受ける力が**慣性力**です。バスの速度の変化に応じて、乗っている人は、前方、後方、横方向に力を受けます。

車内の全ての人や物体は同じ加速度を受けますが、力の大きさは違います。自分の質量に比例するからです。

太った人はそれだけ大きな力を受けることになります。つり革をしっかり握らないとすぐに転んでしまいます。

逆に質量の小さな人は、受ける力が小さくてすみます。子供や女性は、案外倒れにくいのは、質量が小さいからです。転んでもさほど大きなけがはしません。

例えば、飛行機事故で大きな速度の変化による**慣性力**を受けても、子供や身軽な女性が助かることがまれにあります。

これは同じ加速度でも、自分の質量が小さいことによって、加速度と質量の積で決まる受ける力が小さくダメージが少ないことによるのです。

交通事故の急ブレーキで、むち打ち症になる人が多くあります。人の体は頭の質量が比較的大きくできています。

急ブレーキによる大きな**加速度**と**質量の積**で決まる慣性力が、体の各部所に加わります。質量の大きい頭部は大きな慣性力を受けます。頭部は水平方向に支えがないことも手伝って、加わった力を首が支えきれなくなります。

特に子供は頭部の質量が相対的に大きくできています。チャイルドシートでしっかり首を固定することが重要です。

車いすや担架を押す場合にも注意が必要です。**速度の変化(加速度)**を極力小さくすることが大切です。

乗っている人は、押す人が与える加速度と逆の方向に加速度を受け、乗っている人自身の質量との積で決まる慣性力を受けているのです。

II－１７．慣性力 II　回転体の中で移動する物体が受けるコリオリの力

回転する乗り物の中で、移動すると予期せぬ力を受けます。遊園地で、回転するメリーゴーランドの中で、子供が母親を目指して一歩踏み出して、とたんに転ぶ光景を見ることがあります。これは予期せぬ力が走り出した子供に加わるからです。

この力も、**慣性力**です。特にこの力のことを**コリオリの力**と呼んでいます。ここでは、我々の身近に見られる**コリオリの力**についてお話することにします。

回転体の上で動く時に横から受ける力です。

メリーゴーランドの外で見ている母親に近づこうと走り寄る子供に、横向きの**コリオリの力**が加わります。その力のせいで子供は転倒してしまいます。

バレリーナが回転する時や、フィギャースケートやアイスダンスで１人回転するときに、まず、腕を両側に思い切り広げて回転を始め、次に、手を素早くすぼめて早く回転します。**慣性モーメント**の変化によって回転が早まるだけでなく、すぼめる時に

動く手が、受ける**コリオリの力**で、体にさらなる回転力を与えます。

子供の好きな**ブランコ**遊びもコリオリの力で漕いでいます。ブランコは頂上の支点を中心に回転して、行ったり来たりしています。行きの**回転中に立ち上がる**と**コリオリの力**が前向きに加わります。

この力の方向が、ブランコのふれを大きくします。もちろん帰りの回転中にも立ち上がると、今度は後ろ向きにコリオリの力を受けます。

立ち上がるばかりはできませんから、ちょうどブランコが一番上に振れて止まったところでしゃがむとよいのです。３歳の孫に教えて、首尾よくブランコ漕ぎが出来るようになりました。

コリオリの力は回転体の上で移動するときに横から受ける力です。大きさは**回転の速度**と**移動の速度**に比例します。早ければ早いほど大きなコリオリの力を受けます。

上に挙げた例では、回転体はそれぞれ、メリーゴーランド、バレリーナの体、ブランコであり、その回転体の上または中で移動するものはそれぞれ、子供、腕、体の重心です。

地球は丸くて回転しています。その地球上で我々は動きまわっています。ですから、我々は常にコリオリの力を受けています。北半球では電車や車は、それがどちら方向に走っていても、右へ右へとコリオリの力を受けています。

鉄道では右側のレールの消耗が、車では右タイヤの消耗が激しいと言われています。南半球では逆になります。我々の立つ方向が逆さまだから逆さに思えるのです。

地球上では空気が動いています。風です。空気は**高気圧**側から**低気圧**側に向かって**気圧の差**で移動し始めます。

移動し始めた空気はコリオリの力で横を向いてしまいます。そのため風は**等圧線**に沿って流れます。日本の冬の気圧配置は**西高東低**と言われています。

西に高気圧が東に低気圧が陣取ります。西の高気圧から東の低気圧に向かって風が吹き始めます。

しかし、そのまま西風が吹くのではなくて、コリオリの力で右に曲がって**北風**になります。つまり、**等圧線**に沿って風が吹きます。冬の天気図を見て確認してください。

日本列島には毎年台風がやってきます。台風の左巻きの渦うずも同じようにコリオリの力が働いているからです。低気圧のまわりには等圧線に沿った左巻きの渦ができます。竜巻も同じことです。

高気圧の周りでは逆に右巻きになります。広がって行くからでしょう。強い風にはなりません。

ロシアには北極海に流れ込む大きな川が何本かあります。水の流れは北向きです。地球上では、極に近づくほどコリオリの力の効果は大きくなります。

川を流れる水はコリオリの力で常に右へ右へ力を受けており、東側の岸を削ります。そのため長年の間に、川が東へ東へ移動したと言われています。地質学の研究で明らかになっているそうです。

Ⅱ－１８．ニュートンの運動の第１法則　－ ガリレオの慣性の法則 －

ガリレオ(1564-1642)の**慣性の法則**は、**ニュートン**の**運動の法則**の１部分です。

ニュートンは、**運動の法則**を三つの部分に分けて記述しました。**運動の第１法則**、**運動の第２法則**、**運動の第３法則**です。

ニュートンの**運動の第１法則**は**ガリレオ**の**慣性の法則**と同じ内容です。物体に力が加わらない時は、その物体はこれまでの運動をそのまま続ける。

具体的に言うと、力が加わらなければ、静止している物体はいつまでも静止した状態を続けます。また、動いている物体は、その時の運動をそのまま続けます。その速度で直線上をいつまでも動き続けます。これが、**ガリレオの慣性の法則**であり、**ニュートンの運動の第１法則**です。

ガリレオはどのようにしてこの法則を導きだしたのでしょうか。力が加わらない状態をどのようにしてつくり出したのでしょう。

どんな運動でも実際は何らかの力が加わっています。地面を滑ったり、ころがったりする物体には重力の他に、摩擦力が働きます。空気中を飛ぶ物体には重力のほかに、空気の抵抗力が働きます。

ガリレオは力の働かない状態を、振り子の実験をしながら頭で考えだしました。これは、**思考実験**と呼ばれる手法です。理論的考察を行うときによく使う手法です。

ガリレオは振り子の錘の動き方を観察しました。教会の高い天井から吊り下げられたシャンデリアを見ていたのかもしれません。振り子の周期が振幅に依らないことを確かめました。**振り子の等時性**です。

また、振り子はその長さを長くするとどうなるかを考えました。周期も長くなります。錘の動く距離も長くなります。中心付近では、ほぼ一定の速度で進みます。

そこでガリレオは、振り子の長さをもっと長くしたらどうなるかを想像しました。空気の抵抗も無視して考えました。

無限に長い振り子に取り付けられた錘の動きこそ、力の加わっていない時の物体の動きであると考えたのです。きまった速度で錘は進むばかりです。ガリレオの**慣性の法則**はこのようにして生まれたのです。

すでに述べた**運動の第２法則**を力のない状態に適用すると、**第１法則**を導き出すことができることに注意しておきます。

Ⅱ－１９．ニュートンの運動の第３法則　－ 作用反作用の法則 －

ニュートンの運動の法則の中の**第３法則**は、別名**作用反作用の法則**と呼ばれています。

ある物体Ａが他の物体Ｂに力を加えると、その時同時に、物体Ｂは物体Ａに力を加えます。この二つの力は、

大きさは同じで方向は反対です

と言う法則です。片方を**作用**、もう一方を**反作用**と呼びます。いくつか例を挙げてみましょう。

あなたが机を上から押すと、その時必ず、

机はあなたを押し返しています。**この二つの力の大きさは等しく、方向が逆である**という法則です。いつでもどこでも作用と反作用は大きさが等しく、方向が逆さまです。

地球は質量 m [kg] のあなたを万有引力で引っ張っています。その力の大きさは、9.8 m [N]です。この力を重力と呼びます。

この重力の反作用はなにでしょう。**主客を逆に**すればよいのです。

つまり、あなたが地球を引く力のことです。これが重力に対する**反作用の力**です。あなたも地球を引っ張っているのです。この二つの力は大きさが等しく方向が逆さまです。**引っ張る主**と**引っ張られる客**の主客を反対にした時の関係です。つり合いの時の記述と混同しないでください。

地球は月をやはり万有引力で引っ張っています。月も地球を引っ張っています。その力の大きさは等しく方向が逆さまです。

太陽は地球を万有引力で引っ張っています。地球は太陽を同じ大きさの逆向きの力で引っ張っています。

地球は太陽の周りを**楕円軌道**を描いて回っています。万有引力は、太陽と地球の間の距離の二乗に反比例します。ですから、この力の大きさや方向は時々刻々変化しています。

それでも各瞬間を考えるなら、いつも同じ力で引き合っています。作用反作用の法則は、

力を加える側と力を受ける側を入れ替えて、各々の力を較べると、あらゆる瞬間に於いて、それら大きさは等しく、方向は逆さまです

と言う法則です。そうでないなら変な話です。幸い実際に調べて見ると確かにこの法則通りになっています。

Ａ 組と Ｂ 組が綱引きをしているとします。作用反作用の法則から **Ａ組がＢ組を引く力は、Ｂ組がＡ組を引く力と等しく方向が逆さま** です。

この関係は **両組の実力が伯仲して、がんばり合っている時でも、片方が疲れてしまって、どんどん引きずられている時でもやはり成り立っています** と、ニュートンは言っているのです。

どんな状態にあっても、**ある瞬間を考えると、Ａ組がＢ組に加える力は、Ｂ組がＡ組に加える力に等しく方向が逆さま** なのです。

次の瞬間に力の大きさは変わっているでしょう。それでも **その瞬間のＡ組がＢ組に加える力は、Ｂ組がＡ組に加える力に等しく方向が逆さま** です。

これでは**綱引きに勝負がつかない**と思えてなりません。しかし、綱引きの勝ち負けは、別のことを考えねばなりません。各組に加わる力のすべてを、それぞれ別々に考えねばなりません。

Ａ組に加わる第一の力は、Ｂ組がＡ組を引っ張る力です。Ａ 組に加わる第二の力があります。それはＡ組の引き手達の足と地面の間の摩擦力です。この第二の力と第一の力を較べて、第一の力の方が大きいときＡ組が負けるのです。

Ａ組が勝つかＢ組が勝つかは、両組の引き手達の足の摩擦力の大きさによって決まります。**Ｂ組の地面を氷にしておけばＡ組は必ず勝利します。**

例えＢ組が氷の上の時でも、**作用反作用の法則**は成り立っているのです。

Ａ組が動くかどうかはＡ組に加わる力の問題です。Ａ組がＢ組に与える力には関係ありません。

ニュートンは太陽と地球の間に見えない糸で引き合う万有引力を考えました。同じ大きさの力をお互いに及ぼし合うと考えたのです。太陽が地球に及ぼす力と地球が太陽に及ぼす力は大きさが等しくて方向が逆であると考えました。

そのお互いに及ぼし合う力は（距離が変わるので）時々刻々変化しているけれども、**ある瞬間を考えると、及ぼし合う力は等しくて方向が逆さま**であり、次の瞬間も、同じことが言えるのです。

これは**自然の法則**の一つと言ってよいでしょう。事実がそうなっているからです。

II－２０．日本の若者の理科離れをなくすために

自然現象を記述するための数学としてニュートンは**微分積分学**を創造しました。この**微分積分学**を高等学校の物理学教育課程で使わないことは、致命的な問題です。

日本の文部科学省が**微分積分学**を高校の物理教育に使ってはいけないと決めているからです。**数学で微分積分は教えているにもかかわらず、物理学は微分積分を使わずにやれ**というのです。その理由を知りません。不可解としか言いようがありません。

これでは物理学は公式を丸暗記するだけになります。あてもの的クイズをするゲームのようなものになっています(**砂川重信著 精講物理 学生社)**。高校物理を日本で興味のない発展性の乏しい科目にしてしまったのは、文部科学省のこの指導方針にあるのではないでしょうか。

高等学校では、ニュートンの**運動に関する三つの法則**を最重要項目として教えています。しかし、そこでは**第２法則**はもちろん、**第３法則**も、瞬間のこととしては教えていません。そのため大変な誤解をしたままで大学に入学します。少なくともそのような大学生が多いのが現状です。

このような状況を打開したいものです。

第 III 章　原子と原子核

第 III 章のまえがき

第 III 章では原子と原子核の話題を取り上げました。

2011 年 3 月 11 日の東日本大地震により、**東京電力福島第一原子力発電所**の**原子炉**で取り返しのつかない**大事故**がおこりました。放射能の影響で多くの人が自分の住まいを離れ、避難しました。今なお、帰れない人がたくさんいます。

2011 年度からは急遽、**原子核崩壊**や**放射能**にまつわる多くの話題を講義することとし、講義ノートを完成させました。

事故を起こした**原子炉**から、**放射能**を含む汚染水が多量に漏れています。その対策が充分になされていません。放射能漏れを防ぎきれなくなっています。

原子力は莫大なエネルギーが取り出せます。その代償は放射能です。人間の想像をはるかに越えています。それは 1945 年、原子爆弾が広島と長崎に落とされた時に、すでに経験しました。

地震の日、出雲湯村の温泉に行きました。**東北の大地震のため湯が濁って入れません**と、入浴を断られました。その時初めて大地震を知りました。津波の画像がテレビに流れていました。

1000 km 以上も離れた島根県出雲の山奥まで地下は繋がっていることに驚きました。**第 III 章**では、**原子力エネルギー**についての物理学を書き留めます。それは、

原子力エネルギーとはなにか
原子力エネルギーはどこからくるか
原子力エネルギーの大きさどれほどか
原子炉の中では何が起こっているか
原爆とどう違うのか
放射性物質とは何か
放射性廃棄物とは何か
それはいつまで続くのか
今後どうなるのか

これらを知ることが目的です。これらを知るためには準備が必要です。

第 III 章は**原子の構造**から始めます。

III－1．原子の構造

スイヘーリーベ ボクノフネ（H, He, Li, Be, B, C, N, O, F, Ne）、ソーダーマガール シップスクラーク（Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, Ar, K）と、棒暗記をしたことがあるでしょう。**元素周期表**の最初の部分です。

宇宙にある全ての物質は、**つぶつぶ**で、できており、その**つぶつぶ**を調べてみると、92 種類の**元素**に分類できます。この**つぶつぶ**のことを**原子**と呼びます。

物質の根元はなにか？

ギリシャ時代からの課題でした。紆余曲折を経て徐々に分かるようになってきました。特に 17 世紀以降の物理学や化学の研究の成果です。とうとう、物質は、**つぶつぶ**の原子でできていることが実証されました。

多くの科学者が確信するようになったのは、ほぼ、100 年前のことです。

1828 年**ブラウン**が、水に浮かぶ花粉から出た細粒子（以後花粉と言う）が、顕微鏡の中でいつまでも止まらずに動き続けることを発見しました。**ブラウン運動**と呼ばれています。

この運動について**アインシュタイン**は、**水がつぶつぶ（水分子）でできており、しかもそれが、動き回っているからだ**と、考えました。

花粉の周りの水分子が四方八方から花粉にぶつかり、花粉をデタラメに動かしているのです。**アインシュタイン**は完全なデタラメの中にある**規則性**を見つけ、花粉がどのように動くかを計算したのです。このアインシュタインによる**ブラウン運動**の理論計算は、1905 年のことです。

その３年後ペランが精密に実験し、アインシュタインの言う通りであることを突き止めました。これが万物粒子からできていることの直接的な実証となりました。この粒子を原子と呼びます。

さて、その**原子の大きさ**はどれぐらいでしょう。**質量**はどれぐらいでしょう。

原子 1 個のおよその大きさは 10^{-10} m です。10^{-10} とは分数で、100 億分の 1 です。分母に 0 を 10 個並べるかわりに 10^{-10} と書くのが約束です。

原子 1 個のおよその質量は 10^{-25} kg です。おおざっぱに言うと、1 kg の 1 兆分の 1 の 1 兆分の 1 以下です。ここで 1 兆は 10^{12} です。

大きさや**質量**は、想像を絶する小ささです。1 億は 10^8 ですから、現在の世界総人口(2011 年：70 億人)の数だけ原子を一列に並べても 1 m になりません。我々の体を作る原子の数は、おおざっぱにみると、1 兆の 1 兆倍、そのまた 100 倍以上の数です。

原子の形は太陽系の形に似ています。中心に**質量**と**プラス電気**が集中しています。その部分を**原子核**と呼びます。原子核の周りを 同じ大きさの**マイナス電気**を持った**電子**が取り巻いて**原子**をつくっています。

電子は、原子の化学的な性質を決めます。

原子核の持つプラス電気と電子の持つマイナス電気は、電気の量は同じですが符号が反対です。これらがお互いに引き合いながら釣り合って原子をつくっています。その結果、原子は電気的にはプラスでもマイナスでもなく、**中性**になっています。

原子の中心部分の**原子核**、これが今回の話題の中心です。

頁 62 の**図表 III－1** に 92 種類の元素を質量の小さい順に並べました。**元素周期表**（英語 Table of Elements）と呼びます。ここで、93 番以降は人工の元素です。日本化学会原子量専門委員会の「原子量表（2015）について」から引用しました。

一番質量の小さい元素は水素で、次に質量の小さい元素はヘリウムで、３番目の元素はリチウムです。さらに原子核の質量が増えると、４番目がベリリウム、５番目がボロン(硼素)、６番がカーボン(炭素)、７番が窒素、８番が酸素、９番がフッ素、１０番がネオン、と続きます。スイヘーリーベボクノフネ　です。

全ての元素を質量の順に横に並べると、化学的性質の似たものが周期的に出てきます。それらを縦に並べて表にしたものが、**図表 III－１元素周期表**です。順に並べるアイディアを思いついたのはロシアの化学者**メンデレーフ**です。1869 年のことです。

質量の小さい順に付けた番号を、**原子番号**と呼んでいます。本当は**元素の順番**です。ですから、元素番号と呼ぶのが正しいのですが、原子番号と呼ぶのが習慣となっています。英語は Number of Elements です。

ここでは、**原子(元素)番号**と、呼ぶことにします。**頁 62** の**図表 III－１**の**元素周期表**には、原子(元素)番号、元素記号、日本語元素名、を記しました。

III－２．原子核の構造

原子核は III－１で述べた通り、原子の中心にあり、そこに質量とプラス電気が集中しています。このことは 1911 年英国で発見されました。ニュージーランドからの特待留学生**ラザフォード**の実験です。

ラザフォードによると、原子核の大きさは、原子の大きさの 10 万分の１程度で、直径は約 10^{-15} m です。中心の原子核を半径 1 mm の米粒に例えると、100 m 離れて電子が取り巻いていることになります。これが原子の描像です。

当時の日本を代表する物理学者　**長岡半太郎**は、これより８年も前に土星型の原子構造を考えていました。

こんな形を持つ原子で我々は創られているのです。 なぜこんな形なのか誰も知りません。そうなっていることが実証されているだけです。

ラザフォードはみごとに原子がどのような形をしているかを実験で示しました。とにかく、原子はこんな形なのです。

原子核は何からできているのでしょう。

主なものは**陽子**と**中性子**です。これらはやはり**つぶつぶ**の粒子です。まとめて**核子**と呼びます。それぞれの質量は電子１個の質量のおよそ 1840 倍です。

原子の質量は**核子の数**でほとんど決まります。そのため、核子の数を**質量数**と呼びます。

原子核のプラス電気は陽子が担っています。前に述べた通り、マイナス電気は周りの電子が担います。陽子１個が持つ電気の量は、電子１個が持つ電気の量と同じですが、符号が違います。原子１個の中には、プラス電気を担う陽子と、マイナス電気を担う電子が同じ数あります。

質量の小さい方から順に番号をつけ、**原子(元素)番号**としました。その番号は陽子の数と一致します。

原子(元素)番号＝陽子の数＝電子の数

中性子は、その質量は陽子の質量とほぼ同じですが、電気を持ちません。そのため中性子の発見は遅れました。1932 年のことでした。中性子が発見されて以来、原子核の中身がよく分かるようになりました。

同じ元素の原子核でも、中性子の数が違ったものがあることが分かりました。

陽子の数は、元素が決まれば決まります。しかし、中性子の数は決まっていません。陽子の数が同じで、中性子の数が異なる原子を**同位体**と呼びます。**同位元素**とか**アイソトープ**とも言います。これらは同じ元素です。

同位体を考慮して原子を呼ぶとき、質量数を使って区別します。元素名の次に質量数を続けて記述します。例えば水素の場合、**水素** 1、**水素** 2 などとします。記号では次式です。

$${}^{1}_{1}\mathrm{H} \quad \text{および} \quad {}^{2}_{1}\mathrm{H}$$

ここで、H は水素の**元素記号**、記号の前下の数値は、**原子(元素)番号**です。記号の前上の数値は、**質量数**です。従って、前上の数値と前下の数値の差が**中性子**の数です。

水素 1, 記号で ${}^{1}_{1}\mathrm{H}$ は、原子核の中に陽子が１個あるだけです。中性子はありません。質量数が１の最も普通の水素です。**プロチウム**と呼ばれる水素です。

水素 2, 記号で ${}^{2}_{1}\mathrm{H}$ は、原子核の中に陽子と中性子が１個ずつあり、質量数が２です。

これは**重水素(デュートリウム)**と呼ばれる水素で、D と記されることが多くあります。

水素にはもう一つ、**水素** 3, 記号で ${}^{3}_{1}\mathrm{H}$ があります。**トリチウム**と呼ばれる水素です。原子核が、陽子１個と中性子２個でできている質量数が３の水素です。これは後に述べる**不安定原子核**です。

トリチウムは、科学者達が原子核の研究、さらに核分裂、核融合の実用化や原子爆弾、水素爆弾の開発のために作りだした**放射性同位体**です。

この３種類の水素は化学的には区別がつきません。同じ化学反応をするからです。原子核の周りを取り巻く電子の数がどれも同じ１個だからです。

水素に限らず同位体は全て同じ化学反応をします。トリチウムは水素ですから水になって生体に入り、体の中で放射線を出し続ける危険な水素です。

体内に入った放射性物質から出る放射線による被曝を、**内部被曝**と呼びます。生体にとって最も危険な被曝状態です。

一般に原子核を表すための記号をまとめておきます。

元素名 質量数

または、

$${}^{\text{質量数}}_{\text{原子(元素)番号}}\text{元素記号}$$

酸素の**安定同位体**を例にとって、原子核の表記方法をまとめておきます。

① **酸素** 16、記号で、${}^{16}_{8}\mathrm{O}$
（質量数 16：陽子 8 個、中性子 8 個）
② **酸素** 17、記号で、${}^{17}_{8}\mathrm{O}$
（質量数 17：陽子 8 個、中性子 9 個）
③ **酸素** 18、記号で、${}^{18}_{8}\mathrm{O}$
（質量数 18：陽子 8 個、中性子 10 個）

III－３．安定な原子核を持つ安定同位元素

III －２で述べたように、原子核中の陽子の数が決まると、元素が決まります。陽子の数が同じなら中性子の数が違っても同じ元素の原子です。

天然にある元素の種類は､頁 62 の**図表 III－１**に示したように 92 種類ですが、同位元素を考慮すると原子の種類はおよそ 300 種類になります。これらを頁 63 から 70 までの**図表 III－２(その１～８)**に、一覧しました。８頁に亘ります。

この**図表 III－２**の**第１列**は**元素記号**、**第２列**は**原子(元素)番号**で、**陽子**の数です。**第３列**は**質量数**で、原子核内の陽子と中性子の数の和、つまり、**核子**の数です。

第３列と**第２列**の数の差は**中性子の数**です。安定同位元素では中性子の数は陽子の数と同じか、それより少し大きい数になっています。原子(元素)番号が大きい元素では、その差が大きくなります。

全ての元素の安定原子核を見ると、安定同位体が１種類だけの元素（Be, F, Na, Al, P など）から、多くの安定同位体を持つ元素（Sn, Xe など）まで千差万別です。たいていの元素は数種類の安定同位体を持っています。19 世紀の終わり頃までは、地球上のあらゆる物質はこの 300 種類の原子でできていました。

この 300 種類は安定な原子で、何十億年の間、地球上に存在し続けてきた原子です。これらは放射線を出しません。他の原子に変化することもありません。

僅かに例外があります。**図表 III－２**の**第２列**の番号の横に＊印を付けました。後に述べる**半減期**が非常に長い原子で、**天然放射性同位体**と呼ばれています。

III－４．原子の質量

頁 63 から 70 までの**図表 III－２**の**第４列**の数値は、各原子の質量の精密な実測値で単位は u です。**第３列**の質量数に近い値になっていることに気付きます。この表の値は、日本化学会原子量小委員会の「原子量表（2015）について」から引用しました。

これは陽子と中性子の質量がほとんど同じ値、約１ u で、これらの数が原子の質量を決めているからです。ここに示した単位 [u] は、**原子質量単位**と呼ばれる単位です。

この単位は、炭素 12 ${}^{12}_{6}$C の質量を 12 とした時の、原子の相対質量です。**炭素 12** の原子１個の質量を､基準値 12 u としました。

頁 63 の表 III －２(その１)中の**炭素 12** ${}^{12}_{6}$C の欄を見て下さい。値を小数ではなく整数で記述しました。これは測定値ではなく、基準としたことを意味します。

頁 63 から 70 までの、図表 III－２の第５列には、**第４列**の質量の実測値を**第３列**の質量数(核子数)で割った値を示しました。

これはそれぞれの原子の質量の実測値を核子 1 個当たりの質量に換算した値です。これらの値の詳しい考察は後に行います。

図表III－１　元素周期表　（原子量は 図表III-２ に示しました）

周期＼族	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H 水素																	2 He ヘリウム
2	3 Li リチウム	4 Be ベリリウム											5 B ホウ素	6 C 炭素	7 N 窒素	8 O 酸素	9 F フッ素	10 Ne ネオン
3	11 Na ナトリウム	12 Mg マグネシウム											13 Al アルミニウム	14 Si ケイ素	15 P リン	16 S 硫黄	17 Cl 塩素	18 Ar アルゴン
4	19 K カリウム	20 Ca カルシウム	21 Sc スカンジウム	22 Ti チタン	23 V バナジウム	24 Cr クロム	25 Mn マンガン	26 Fe 鉄	27 Co コバルト	28 Ni ニッケル	29 Cu 銅	30 Zn 亜鉛	31 Ga ガリウム	32 Ge ゲルマニウム	33 As ヒ素	34 Se セレン	35 Br 臭素	36 Kr クリプトン
5	37 Rb ルビジウム	38 Sr ストロンチウム	39 Y イットリウム	40 Zr ジルコニウム	41 Nb ニオブ	42 Mo モリブデン	43 Tc* テクネチウム	44 Ru ルテニウム	45 Rh ロジウム	46 Pd パラジウム	47 Ag 銀	48 Cd カドミウム	49 In インジウム	50 Sn スズ	51 Sb アンチモン	52 Te テルル	53 I ヨウ素	54 Xe キセノン
6	55 Cs セシウム	56 Ba バリウム	57～71 ランタノイド	72 Hf ハフニウム	73 Ta タンタル	74 W タングステン	75 Re レニウム	76 Os オスミウム	77 Ir イリジウム	78 Pt 白金	79 Au 金	80 Hg 水銀	81 Tl タリウム	82 Pb 鉛	83 Bi* ビスマス	84 Po* ポロニウム	85 At* アスタチン	86 Rn* ラドン
7	87 Fr* フランシウム	88 Ra* ラジウム	89～103 アクチノイド	104 Rf* ラザホージウム	105 Db* ドブニウム	106 Sg* シーボーギウム	107 Bh* ボーリウム	108 Hs* ハッシウム	109 Mt* マイトネリウム	110 Ds* ダームスタチウム	111 Rg* レントゲニウム	112 Cn* コペルニシウム	113 Uut* ウンウントリウム	114 Fl* フレロビウム	115 Uup* ウンウンペンチウム	116 Lv* リバモリウム	117 Uus*	118 Uuo*

原子番号	元素記号[注1]
元素名	

ランタノイド	57 La ランタン	58 Ce セリウム	59 Pr プラセオジム	60 Nd ネオジム	61 Pm* プロメチウム	62 Sm サマリウム	63 Eu ユウロピウム	64 Gd ガドリニウム	65 Tb テルビウム	66 Dy ジスプロシウム	67 Ho ホルミウム	68 Er エルビウム	69 Tm ツリウム	70 Yb イッテルビウム	71 Lu ルテチウム
アクチノイド	89 Ac* アクチニウム	90 Th* トリウム	91 Pa* プロトアクチニウム	92 U* ウラン	93 Np* ネプツニウム	94 Pu* プルトニウム	95 Am* アメリシウム	96 Cm* キュリウム	97 Bk* バークリウム	98 Cf* カリホルニウム	99 Es* アインスタイニウム	100 Fm* フェルミウム	101 Md* メンデレビウム	102 No* ノーベリウム	103 Lr* ローレンシウム

注１：元素記号の右肩の*はその元素には安定同位体が存在しないことを示す。

備考：原子番号104番以降の超アクチノイドの周期表の位置は暫定的である。

©2015 日本化学会　原子量専門委員会

図表 III－２　安定同位体の一覧表（その１）

1	2	3	4	5	6	7	8
元素記号	原子(元素)番号	質量数	質量の実測値	第４列を第３列で割った商	地球表面存在度	第４列と第６列の積	原子量
	陽子数	核子数	単位[u]		[%]		第７列の和[u]
H	1	1	1.00783	1.00783	99.9885	1.0077	
	1	2	2.01410	1.00705	0.0115	0.0002	1.008
He	2	3	3.01603	1.00534	0.000134	0.000	
	2	4	4.00260	1.00065	99.999866	4.003	4.003
Li	3	6	6.01512	1.00252	7.59	0.457	
	3	7	7.01600	1.00229	92.41	6.484	6.941
Be	4	9	9.01218	1.00135	100	9.012	9.012
B	5	10	10.01294	1.00129	19.9	1.993	
	5	11	11.00931	1.00085	80.1	8.819	10.81
C	6	12	12	1	98.93	11.872	
	6	13	13.00335	1.00026	1.07	0.139	12.01
N	7	14	14.00307	1.00022	99.636	13.952	
	7	15	15.00011	1.00001	0.364	0.055	14.01
O	8	16	15.99491	0.99968	99.757	15.956	
	8	17	16.99913	0.99995	0.038	0.007	
	8	18	17.99916	0.99995	0.205	0.037	16.00
F	9	19	18.99840	0.99992	100	18.998	19.00
Ne	10	20	19.99244	0.99962	90.48	18.089	
	10	21	20.99385	0.99971	0.27	0.057	
	10	22	21.99139	0.99961	9.25	2.034	20.18
Na	11	23	22.98977	0.99956	100	22.990	22.99
Mg	12	24	23.98504	0.99938	78.99	18.946	
	12	25	24.98584	0.99943	10.00	2.499	
	12	26	25.98259	0.99933	11.01	2.861	24.31
Al	13	27	26.98154	0.99932	100	26.982	26.98
Si	14	28	27.97693	0.99918	92.223	25.801	
	14	29	28.97649	0.99919	4.685	1.358	
	14	30	29.97377	0.99913	3.092	0.927	28.09
P	15	31	30.97376	0.99915	100	30.974	30.97
S	16	32	31.97207	0.99913	94.99	30.370	
	16	33	32.97146	0.99914	0.75	0.247	
	16	34	33.96787	0.99905	4.25	1.444	
	16	36	35.96708	0.99909	0.01	0.004	32.07
Cl	17	35	34.96885	0.99911	75.76	26.492	
	17	37	36.96590	0.99908	24.24	8.961	35.45
Ar	18	36	35.96755	0.99910	0.3336	0.120	
	18	38	37.96273	0.99902	0.0629	0.024	
	18	40	39.96238	0.99906	99.6035	39.804	39.95

図表 III－２　安定同位体の一覧表（その２）

1	2	3	4	5	6	7	8
元素記号	原子(元素)番号	質量数	質量の実測値	第４列を第３列で割った商	地球表面存在度	第４列と第６列の積	原子量
	陽子数	核子数	単位[u]		[%]		第７列の和[u]
K	19	39	38.96371	0.99907	93.2581	36.337	
	19*	40	39.96400	0.99910	0.0117	0.005	
	19	41	40.96183	0.99907	6.7302	2.757	39.10
Ca	20	40	39.96259	0.99906	96.941	38.740	
	20	42	41.95862	0.99901	0.647	0.272	
	20	43	42.95877	0.99904	0.135	0.058	
	20	44	43.95548	0.99899	2.086	0.917	
	20	46	45.95369	0.99899	0.004	0.002	
	20	48	47.95252	0.99901	0.187	0.090	40.08
Sc	21	45	44.95591	0.99902	100	44.956	44.96
Ti	22	46	45.95263	0.99897	8.25	3.791	
	22	47	46.95176	0.99897	7.44	3.493	
	22	48	47.94794	0.99892	73.72	35.35	
	22	49	48.94787	0.99894	5.41	2.648	
	22	50	49.94479	0.99890	5.18	2.587	47.87
V	23*	50	49.94716	0.99894	0.25	0.125	
	23	51	50.94396	0.99890	99.75	50.817	50.94
Cr	24	50	49.94604	0.99892	4.345	2.170	
	24	52	51.94051	0.99886	83.789	43.520	
	24	53	52.94065	0.99888	9.501	5.030	
	24	54	53.93888	0.99887	2.365	1.276	52.00
Mn	25	55	54.93804	0.99887	100	54.938	54.94
Fe	26	54	53.93961	0.99888	5.845	3.153	
	26	56	55.93494	0.99884	91.754	51.323	
	26	57	56.93539	0.99887	2.119	1.206	
	26	58	57.93327	0.99885	0.282	0.163	55.85
Co	27	59	58.93319	0.99887	100	58.933	58.93
Ni	28	58	57.93534	0.99889	68.0770	39.441	
	28	60	59.93079	0.99885	26.2230	15.716	
	28	61	60.93106	0.99887	1.1399	0.695	
	28	62	61.92835	0.99884	3.6346	2.251	
	28	64	63.92797	0.99887	0.9255	0.592	58.69
Cu	29	63	62.92960	0.99888	69.15	43.528	
	29	65	64.92779	0.99889	30.85	20.030	63.55
Zn	30	64	63.92914	0.99889	49.17	31.434	
	30	66	65.92603	0.99888	27.73	18.281	
	30	67	66.92713	0.99891	4.04	2.704	
	30	68	67.92484	0.99889	18.45	12.532	
	30	70	69.92532	0.99893	0.61	0.427	65.38

図表 III－２　安定同位体の一覧表（その３）

1	2	3	4	5	6	7	8
元素記号	原子（元素）番号 / 陽子数	質量数 / 核子数	質量の実測値 単位[u]	第４列を第３列で割った商	地球表面存在度 [%]	第４列と第６列の積	原子量 第７列の和[u]
Ga	31	69	68.92557	0.99892	60.108	41.430	
	31	71	70.92470	0.99894	39.892	28.293	69.72
Ge	32	70	69.92425	0.99892	20.57	14.383	
	32	72	71.92208	0.99892	27.45	19.743	
	32	73	72.92346	0.99895	7.75	5.652	
	32	74	73.92118	0.99893	36.50	26.981	
	32	76	75.92140	0.99897	7.73	5.869	72.63
As	33	75	74.92159	0.99895	100	74.922	74.92
Se	34	74	73.92248	0.99895	0.89	0.658	
	34	76	75.91921	0.99894	9.37	7.114	
	34	77	76.91991	0.99896	7.63	5.869	
	34	78	77.91731	0.99894	23.77	18.521	
	34	80	79.91652	0.99896	49.61	39.647	
	34*	82	81.91670	0.99898	8.73	7.151	78.97
Br	35	79	78.91834	0.99897	50.69	40.004	
	35	81	80.91629	0.99897	49.31	39.900	79.90
Kr	36	78	77.92036	0.99898	0.355	0.277	
	36	80	79.91638	0.99895	2.286	1.827	
	36	82	81.91348	0.99894	11.593	9.496	
	36	83	82.91413	0.99897	11.500	9.535	
	36	84	83.91150	0.99895	56.987	47.819	
	36	86	85.91061	0.99896	17.279	14.845	83.80
Rb	37	85	84.91179	0.99896	72.17	61.281	
	37*	87	86.90918	0.99896	27.83	24.187	85.47
Sr	38	84	83.91342	0.99897	0.56	0.470	
	38	86	85.90926	0.99894	9.86	8.471	
	38	87	86.90888	0.99895	7.00	6.084	
	38	88	87.90561	0.99893	82.58	72.593	87.62
Y	39	89	88.90584	0.99894	100	88.906	88.91
Zr	40	90	89.90470	0.99894	51.45	46.256	
	40	91	90.90564	0.99896	11.22	10.200	
	40	92	91.90503	0.99897	17.15	15.762	
	40	94	93.90631	0.99900	17.38	16.321	
	40	96	95.90827	0.99904	2.80	2.685	91.22
Nb	41	93	92.90637	0.99899	100	92.906	92.91

図表 III－２　安定同位体の一覧表（その４）

1	2	3	4	5	6	7	8
元素記号	原子（元素）番号 / 陽子数	質量数 / 核子数	質量の実測値 単位[u]	第４列を第３列で割った商	地球表面存在度 [%]	第４列と第６列の積	原子量 第７列の和[u]
Mo	42	92	91.90681	0.99899	14.53	13.354	
	42	94	93.90508	0.99899	9.15	8.592	
	42	95	94.90584	0.99901	15.84	15.033	
	42	96	95.90468	0.99901	16.67	15.987	
	42	97	96.90602	0.99903	9.60	9.303	
	42	98	97.90540	0.99903	24.39	23.879	
	42	100	99.90747	0.99907	9.82	9.811	95.95
Ru	44	96	95.90759	0.99904	5.54	5.313	
	44	98	97.90529	0.99903	1.87	1.831	
	44	99	98.90593	0.99905	12.76	12.620	
	44	100	99.90421	0.99904	12.60	12.588	
	44	101	100.90558	0.99907	17.06	17.215	
	44	102	101.90434	0.99906	31.55	32.151	
	44	104	103.90543	0.99909	18.62	19.347	101.1
Rh	45	103	102.90550	0.99908	100	102.906	102.9
Pd	46	102	101.90560	0.99907	1.02	1.039	
	46	104	103.90403	0.99908	11.14	11.575	
	46	105	104.90508	0.99910	22.33	23.425	
	46	106	105.90348	0.99909	27.33	28.943	
	46	108	107.90389	0.99911	26.46	28.551	
	46	110	109.90517	0.99914	11.72	12.881	106.4
Ag	47	107	106.90509	0.99911	51.839	55.419	
	47	109	108.90476	0.99913	48.161	52.450	107.9
Cd	48	106	105.90646	0.99912	1.25	1.324	
	48	108	107.90418	0.99911	0.89	0.960	
	48	110	109.90301	0.99912	12.49	13.727	
	48	111	110.90418	0.99914	12.80	14.196	
	48	112	111.90276	0.99913	24.13	27.002	
	48*	113	112.90441	0.99915	12.22	13.797	
	48	114	113.90337	0.99915	28.73	32.724	
	48	116	115.90476	0.99918	7.49	8.681	112.4
In	49	113	112.90406	0.99915	4.29	4.844	
	49*	115	114.90388	0.99916	95.71	109.975	114.8

図表 III－2　安定同位体の一覧表（その５）

1	2	3	4	5	6	7	8
元素記号	原子(元素)番号	質量数	質量の実測値	第４列を第３列で割った商	地球表面存在度	第４列と第６列の積	原子量
	陽子数	核子数	単位[u]		[%]		第７列の和[u]
Sn	50	112	111.90482	0.99915	0.97	1.085	
	50	114	113.90278	0.99915	0.66	0.752	
	50	115	114.90334	0.99916	0.34	0.391	
	50	116	115.90174	0.99915	14.54	16.852	
	50	117	116.90295	0.99917	7.68	8.978	
	50	118	117.90161	0.99917	24.22	28.556	
	50	119	118.90331	0.99919	8.59	10.214	
	50	120	119.90220	0.99918	32.58	39.064	
	50	122	121.90344	0.99921	4.63	5.644	
	50	124	123.90528	0.99924	5.79	7.174	118.7
Sb	51	121	120.90381	0.99921	57.21	69.189	
	51	123	122.90421	0.99922	42.79	52.591	121.8
Te	52	120	119.90405	0.99920	0.09	0.108	
	52	122	121.90304	0.99921	2.55	3.109	
	52*	123	122.90427	0.99922	0.89	1.094	
	52	124	123.90282	0.99922	4.74	5.873	
	52	125	124.90443	0.99924	7.07	8.831	
	52	126	125.90331	0.99923	18.84	23.720	
	52	128	127.90446	0.99925	31.74	40.597	
	52	130	129.90622	0.99928	34.08	44.272	127.6
I	53	127	126.90447	0.99925	100	126.904	126.9
Xe	54	124	123.90589	0.99924	0.0952	0.118	
	54	126	125.90430	0.99924	0.0890	0.112	
	54	128	127.90353	0.99925	1.9102	2.443	
	54	129	128.90478	0.99926	26.4006	34.032	
	54	130	129.90351	0.99926	4.0710	5.288	
	54	131	130.90508	0.99928	21.2324	27.794	
	54	132	131.90416	0.99927	26.9086	35.494	
	54	134	133.90539	0.99929	10.4357	13.974	
	54	136	135.90721	0.99932	8.8573	12.038	131.3
Cs	55	133	132.90545	0.99929	100	132.905	132.9
Ba	56	130	129.90632	0.99928	0.106	0.138	
	56	132	131.90506	0.99928	0.101	0.133	
	56	134	133.90451	0.99929	2.417	3.236	
	56	135	134.90569	0.99930	6.592	8.893	
	56	136	135.90458	0.99930	7.854	10.674	
	56	137	136.90583	0.99931	11.232	15.377	
	56	138	137.90525	0.99931	71.698	98.875	137.3

図表 III－2　安定同位体の一覧表（その６）

1	2	3	4	5	6	7	8
元素記号	原子(元素)番号	質量数	質量の実測値	第４列を第３列で割った商	地球表面存在度	第４列と第６列の積	原子量
	陽子数	核子数	単位[u]		[%]		第７列の和[u]
La	57*	138	137.90711	0.99933	0.08881	0.123	
	57	139	138.90636	0.99933	99.91119	138.783	138.9
Ce	58	136	135.90713	0.99932	0.185	0.251	
	58	138	137.90599	0.99932	0.251	0.346	
	58	140	139.90544	0.99932	88.450	123.746	
	58	142	141.90925	0.99936	11.114	15.772	140.1
Pr	59	141	140.90766	0.99935	100	140.91	140.9
Nd	60	142	141.90773	0.99935	27.152	38.531	
	60	143	142.90982	0.99937	12.174	17.398	
	60*	144	143.91009	0.99938	23.798	34.248	
	60	145	144.91258	0.99940	8.293	12.018	
	60	146	145.91312	0.99940	17.189	25.081	
	60	148	147.91690	0.99944	5.756	8.514	
	60	150	149.92090	0.99947	5.638	8.453	144.2
Sm	62	144	143.91201	0.99939	3.07	4.418	
	62*	147	146.91490	0.99942	14.99	22.023	
	62*	148	147.91483	0.99942	11.24	16.626	
	62	149	148.91719	0.99944	13.82	20.580	
	62	150	149.91728	0.99945	7.38	11.064	
	62	152	151.91974	0.99947	26.75	40.639	
	62	154	153.92222	0.99949	22.75	35.017	150.4
Eu	63	151	150.91986	0.99947	47.81	72.15	
	63	153	152.92124	0.99949	52.19	79.81	152.0
Gd	64*	152	151.91980	0.99948	0.20	0.306	
	64	154	153.92087	0.99949	2.18	3.356	
	64	155	154.92263	0.99950	14.80	22.929	
	64	156	155.92213	0.99950	20.47	31.917	
	64	157	156.92397	0.99952	15.65	24.559	
	64	158	157.92411	0.99952	24.84	39.228	
	64	160	159.92706	0.99954	21.86	34.960	157.3
Tb	65	159	158.92535	0.99953	100	158.925	158.9
Dy	66	156	155.92428	0.99951	0.056	0.087	
	66	158	157.92442	0.99952	0.095	0.150	
	66	160	159.92520	0.99953	2.329	3.725	
	66	161	160.92693	0.99955	18.889	30.397	
	66	162	161.92680	0.99955	25.475	41.251	
	66	163	162.92874	0.99956	24.896	40.563	
	66	164	163.92918	0.99957	28.260	46.326	162.5
Ho	67	165	164.93033	0.99958	100	164.930	164.9

図表 III－２　安定同位体の一覧表（その７）

1	2	3	4	5	6	7	8
元素記号	原子（元素）番号	質量数	質量の実測値	第４列を第３列で割った商	地球表面存在度	第４列と第６列の積	原子量
	陽子数	核子数	単位[u]		[%]		第７列の和[u]
Er	68	162	161.92879	0.99956	0.139	0.225	
	68	164	163.92921	0.99957	1.601	2.625	
	68	166	165.93030	0.99958	33.503	55.592	
	68	167	166.93205	0.99959	22.869	38.176	
	68	168	167.93238	0.99960	26.978	45.305	
	68	170	169.93547	0.99962	14.910	25.337	167.3
Tm	69	169	168.93422	0.99961	100	168.9342	168.9
Yb	70	168	167.93389	0.99961	0.123	0.218	
	70	170	169.93477	0.99962	2.982	5.166	
	70	171	170.93633	0.99963	14.090	24.410	
	70	172	171.93639	0.99963	21.680	37.534	
	70	173	172.93822	0.99964	16.103	27.895	
	70	174	173.93887	0.99965	32.026	55.365	
	70	176	175.94258	0.99967	12.996	22.450	173.1
Lu	71	175	174.94078	0.99966	97.401	170.394	
	71	176	175.94269	0.99967	2.599	4.573	175.0
Hf	72*	174	173.94005	0.99966	0.16	0.278	
	72	176	175.94141	0.99967	5.26	9.255	
	72	177	176.94323	0.99968	18.60	32.911	
	72	178	177.94371	0.99968	27.28	48.543	
	72	179	178.94582	0.99970	13.62	24.372	
	72	180	179.94656	0.99970	35.08	63.125	178.5
Ta	73*	180	179.94746	0.99971	0.01201	0.022	
	73	181	180.94800	0.99971	99.98799	180.926	180.9
W	74	180	179.94671	0.99970	0.12	0.216	
	74	182	181.94820	0.99961	26.50	48.216	
	74	183	182.95022	0.99973	14.31	26.180	
	74	184	183.95093	0.99973	30.64	56.363	
	74	186	185.95436	0.99975	28.43	52.867	183.8
Re	75	185	184.95295	0.99975	37.40	69.172	
	75*	187	186.95575	0.99976	62.60	117.034	186.2
Os	76	184	182.95249	0.99974	0.02	0.037	
	76	186	183.95384	0.99975	1.59	2.957	
	76*	187	185.95575	0.99976	1.96	3.664	
	76	188	186.95584	0.99977	13.24	24.885	
	76	189	188.95814	0.99978	16.15	30.517	
	76	190	189.95844	0.99978	26.26	49.883	
	76	192	191.96148	0.99980	40.78	78.282	190.2

図表 III－２　安定同位体の一覧表（その８）

1	2	3	4	5	6	7	8
元素記号	原子（元素）番号	質量数	質量の実測値	第４列を第３列で割った商	地球表面存在度	第４列と第６列の積	原子量
	陽子数	核子数	単位[u]		[%]		第７列の和[u]
Ir	77	191	190.96059	0.99979	37.3	71.228	
	77	193	192.96292	0.99981	62.7	120.988	192.2
Pt	78*	190	189.95993	0.99979	0.012	0.023	
	78	192	191.96104	0.99980	0.782	1.501	
	78	194	193.96268	0.99981	32.860	63.736	
	78	195	194.96479	0.99982	33.780	65.859	
	78	196	195.96495	0.99982	25.210	49.403	
	78	198	197.96789	0.99984	7.356	14.563	195.1
Au	79	197	196.96657	0.99983	100	196.967	197.0
Hg	80	196	195.96583	0.99983	0.15	0.294	
	80	198	197.96677	0.99983	9.97	19.737	
	80	199	198.96828	0.99984	16.87	33.566	
	80	200	199.96833	0.99984	23.10	46.193	
	80	201	200.97030	0.99985	13.18	26.488	
	80	202	201.97064	0.99985	29.86	60.308	
	80	204	203.97349	0.99987	6.87	14.013	200.6
Tl	81	203	202.97234	0.99986	29.52	59.926	
	81	205	204.97443	0.99988	70.48	144.458	204.4
Pb	82	204	203.97304	0.99987	1.4	2.856	
	82	206	205.97447	0.99988	24.1	49.640	
	82	207	206.97590	0.99988	22.1	45.735	
	82	208	207.97665	0.99989	52.4	108.980	207.2
Bi	83	209	208.98040	0.99991	100	208.980	209.0
Th	90*	232	232.03806	1.00016	100	232.038	232.0
U	92*	234	234.04095	1.00017	0.0054	0.013	
	92*	235	235.04393	1.00019	0.7204	1.693	
	92*	238	238.05079	1.00021	99.2742	236.323	238.0

III－５．原子量

頁 62 の**図表 III－１**の元素周期表に示した**原子量**は、化学計算でよく使われる非常に重要な数値です。これはどのようにして得られた数値でしょう。

これまで述べてきた安定同位体は、地球の全域に分布しています。

地球の表面と内部では元素分布や同位体の存在度が異なっていますが、地球表面での**存在度**が原子ごとに測定されたり推定されたりしています。

現在もっとも信頼できる地球表面における存在度を、**図表** III－２の**第６列**に示しました。元素ごとに 100 %になります。

原子量はこの存在度に関係します。

原子量とは、ある元素の原子を**アボガドロ数**（6.02×10^{23} **個**）だけ集めて質量をはかり、その値を比で表したものです。

原子量は質量の比ですから基準が必要です。基準は科学の進歩とともに、正確さを求めて変ってきました。

今では、前述のように 1 個の**炭素** 12 $^{12}_{6}\mathrm{C}$ の質量を 12 u とします。 原子質量単位 u と質量の単位 kg の換算は次の通りです。

$$1\ \mathrm{u} = 1.6605\times10^{-27}\ \mathrm{kg}\quad(\mathrm{III}-1)$$

この値はアボガドロ数個の炭素 12 ($^{12}_{6}\mathrm{C}$) が、ちょうど$12\ \mathrm{g}(=12\cdot10^{-3}\ \mathrm{kg})$になるように決めたことによります。

ある元素の原子をアボガドロ数だけ集めると、そこには全ての安定同位体が、その地球表面の存在度に比例して含まれるはずです。

従って、**安定同位体の質量**[u]と**それぞれの存在度の積**を求め、それらの**和を計算する**と、その元素の相対的な平均質量が、u を単位として求まります。

この値が**原子量**です。

この積と和を、**図表** III－２の**第７列**と**第８列**に示しました。**第８列**の各元素欄の最下段の数値がその元素の**原子量**です。

この原子量の数値だけの質量 [g]、例えば、頁 64 の Fe 欄の最下段の数値 55.8 g (0.0558 kg)が、この元素 Fe の 1 mol です。そしてそこにはアボガドロ数 (6.02×10^{23}) 個の Fe 原子が存在します。

頁 66 の銀元素 Ag の原子量を計算してみましょう。この頁の**図表** III－２（**その４**）を見てください。Ag の安定同位体は、Ag 107 と Ag 109 の 2 種類です。数値は四捨五入して計算しましょう。

前者の質量は、106.905 u、存在度は、51.839 %です。後者の質量は、108.905 u で存在度は、48.161 %です。

従って Ag の原子量 M_{Ag} は次の式で求まります。

$$\begin{aligned} M_{\mathrm{Ag}} &= 106.905\times0.51839 \\ &\qquad + 108.905\times0.48161 \\ &= 55.419+52.450 = 107.868 \\ &= 107.9\ \mathrm{u} \end{aligned}$$

式$(\mathrm{III}-1)$を使うと、銀原子 1 個の平均質量を求めることができます。

$$107.9\cdot1.6605\cdot10^{-27} = 1.791\cdot10^{-25}\ \mathrm{kg}$$

一方、銀原子 1 mol は、$107.9\cdot10^{-3}\ \mathrm{kg}$ であり、そこにはアボガドロ数 $6.02\cdot10^{23}$個の銀原子が存在するので、銀原子 1 個の平均質量は、

$$\frac{107.9\times10^{-3}}{6.02\times10^{23}} = 1.79\times10^{-25}\ \mathrm{kg}$$

となります。

式 (III－1) の u と kg の換算の数値は、アボガドロ数の逆数であります。

III－６．質量欠損

原子の質量は、陽子と中性子の質量でほぼ決まることは既に述べました。陽子と中性子の質量が、約 1 u ですから、原子の質量は、核子の数とほぼ等しくなるはずです。

このことは**図表** III－２の**第３列**と**第４列**の数値がほぼ同じ数値であることから分かります。

これらの数値をニオジム Nd142 $^{142}_{60}\mathrm{Nd}$ を例にとって厳密に調べてみましょう。頁 68 の**図表** III－２(**その６**)のニオジム Nd の欄を見てください。

陽子と中性子の数から、Nd142 の質量の計算をしましょう。陽子の質量とその個数の積は、**陽子の質量**（頁 96 の**図表** III－９ **第５列**の数値）を使って。

$$1.0072765\ \mathrm{u}\times60 = 60.43659\ \mathrm{u}$$

中性子の質量とその個数の積は、**中性子の質量**（上記の表の数値）を使って、

$$1.0086649\ \mathrm{u}\times(142-60) = 82.7105218\ \mathrm{u}$$

これらの和は 143.1471 u　です。

一方、Nd142 の質量の**実測値**は、頁 68 の**図表** III －２にある通り 141.9077 u で、差 $\Delta M = 1.2394$ u だけ小さくなります。この差のことを**質量欠損**と呼びます。

III－７．質量 と 質量原器

これまでの記述に**質量**がたびたび出てきました。**質量**とは何でしょうか。この節からしばらく、質量 についてお話します。

質量と**重力**(**重さ**)の違いについては、第 I 章－３で述べた通りです。質量は物質の量であり、**重力**(**重さ**)は、地球が物体を引く力であり、それを支えるには力を出して、**重力**を実感します。

そのように、**質量**(Mass)と**重力**(Weight)は、全く異なった概念です。

宇宙飛行士を見てください。テレビで見る宇宙飛行士は、宇宙船の中でふわふわ浮いています。

支える力は不要ですから飛行士の重力はゼロです。宇宙船の中ではなにもかも、重さはありません。しかし、宇宙飛行士自身が消えてなくなったはありません。質量は変化しません。

このことからわかるように重力は測る場所によって変化します。質量と重力の違いがよく分からないのは、我々がいつも地球上にいるからです。

月へ行ってみましょう。**月へ行くと重力が６分の１になる**と聞いたことがあるでしょう。月で測る重力と、地球で測る重力が 6 倍違うのです。

さて、地球上で軽い物体や重い物体の重力を測り、それらを全部持って月に行きましょう。

月でもう一度全部重力を測ります。その測定値はどれもこれも同じように 6 倍だけ小さくなります。

物体はその物体の**重力**を決める固有の値を持っています。

それは地球上でも、月面でも、宇宙船の中でも変わらない値です。この値のことを、**質量**と呼びます。さしあたり**物質の量**を表すとしました。

長さについて１ｍとは**どれだけの長さか**、をはっきり決めてあります（I－１０)。同じように**時間**についても、**１秒とはどんな時間間隔**かをはっきり決めてあります（I－１１)。誰でもどこででも手にすることのできるように決めてあります。

質量についても、**質量１kg はどれだけの量**であるかは決められていて、フランスパリの**国際度量衡局**で、決まった温度で保管されています。**国際キログラム原器**です。

日本にも第６号複製品が届けられており、つくば の産業技術総合研究所に一定温度で保管されています。この**日本キログラム原器**は、質量が 1.000000170 kg です。

現在、質量も質量原器を使わずに、誰もがどこでも手に入るものを基準にしようと検討されつつあります。

III－８．質量のはかり方

ここで、**質量とは何か** を考えるために、**質量**のはかり方を説明します。**質量**の測定方法は２通りあります。

第１のは**かり方**は、地球上で体重計に乗ることです。体重計はバネばかりでできていて、どれだけの力で地球に引っ張られているかをはかります。ニュートンの**万有引力の法則**に由来します。**重力**をはかるのです。**重力**は**質量**に比例します。**質量に比例定数**をかけると、**重力**になります（I－３）。

地球上ではその比例定数は決まっています。9.8 です。この値は物体と地球の間に働く万有引力の大きさで決まります。

地球上では質量を単位 kg ではかり、その値を 9.8 倍すると重力つまり力になります。この時、**力**の単位は N（ニュートン）です。

重力を決める比例定数は月面でも決まっていますが、違った数値 1.625 です。

月面での重力は、物体と月の間に働く万有引力の大きさで決まるからです。違った数値になるのは、月の質量や大きさが地球のそれらと違っているからです。

地球上で体重計に乗ると、目盛りが 60 kg とか 70 kg になります。この値はすでに、地球上での重力を比例定数 9.8 で割り算した値です。我々の**体重計**は、実は、**質量計**になるように目盛りが打ち替えられています。質量計と呼ぶべきものです。

このようにして決めた質量を **重力質量** と呼びます。

第２のはかり方は、物体に力を加えて動かします。その**動きにくさ**または**動きやすさ**をはかる方法です。

質量が大きいほど物体は動きにくくなります。質量が小さいほど物体は動きやすくなります。誰もが経験することです。

これはニュートンの**運動の法則**に由来します。同じ大きさの力を加え続けて、１秒後の速さをはかります。力の大きさを速さで除した商を求め質量とします。このように

動き方からはかった質量のことを **慣性質量** と呼びます。

この二つの質量は実測してみると同じ値になります。歴史的にはこの理由を考え続けました。しかし、その理由は見つかりませんでした。理由の追及を断念させたのがアインシュタインです。

理由を追及する代わりに、積極的にそれらが同じであることを利用しました。同じであることは **自然の法則** であるとして受け入れたのです。

重力質量 と **慣性質量** が **同じになることこそ当然で、これらは区別できないものである** と考え方を転換したのです。

この２つの質量は区別できないもの であり、**同一のものである** として自然を見直しました。そこから導かれた理論が、**一般相対性理論**です。1911 年のことです。

参考値：　**月の質量**　7.35×10^{22} kg
　　　　　月の半径　1737 km

III－９．質量に関する特殊相対性理論の結論

アインシュタインは 1905 年に、特殊相対性理論を発表しました。特殊相対性理論は、次の二点を基にして導かれた理論です。

① **実験事実**
どんな速さで移動する人に対しても、光の速度は同じ値 3×10^{8} m/s **である**

② **物理法則は、どんな時でも誰にとっても同じである**

その結果、従来の法則が書き改められました。また、予想されるさまざまな現象はこの理論の予言通り実証されました。さらに、現在までに。この理論に矛盾する現象は見つかっていません。

この**特殊相対性理論**の結論として、**質量**について次の式が導き出されました。

$$E = mc^2 = \frac{m_0c^2}{\sqrt{1-\left(\frac{u}{c}\right)^2}}$$

$$\cong m_0c^2 + \frac{1}{2}m_0u^2 \qquad (\mathrm{III}-2)$$

ここで、

E：物体の持つ**全エネルギー**
m：**物体の質量**
c：**光の速度**
m_0：物体が**静止しているときの質量**
u：動く**物体の速度**

式 $(\mathrm{III}-2)$ の持つ意味を説明します

その１：物体の全エネルギー E **は** mc^2 **と置き換えることができる**

c^2 だけ数値は異なるけれども、質量 m は全エネルギーと同等なものである

その２：物体が速度 u **で動く場合、物体の全エネルギーは、３番目の式に書き換えることができる**

m_0 は、**静止質量**と呼ばれ、止まっている時の質量で、その物体の持つ定数である

その３：物体の質量 m **は、速度の増加とともに増加する**

物体の速度 u が大きくなると、３**番目の式**の分母が小さくなり２番目の式の質量 m は、**静止質量** m_0 より大きくなる

次に、**記号** $\cong$ は、厳密に言えば等しくはないが、等しいとして差支えないことを意味します。

光の速度 c は 30 万 $\mathrm{kms^{-1}}$ です。我々の周囲では物体の速度 u は、それよりずっと小さい値であり、(u/c) は１よりずっと小さな値です。$(u/c)^2$ は、さらに小さい値になります。このことを使うと、全エネルギー E は、最後の式に書き直しても差支えありません。このことから次のことが分かります。

その４：静止質量 m_0 の物体が速度 u で動いている時、全エネルギー E が、次の２つの項の和になる

第１項　m_0c^2
第２項　$\frac{1}{2}m_0u^2$

第１項：**物体の存在のエネルギー**で
静止質量エネルギーと呼ぶ

第２項：**速さ**の持つ**エネルギー**で
運動エネルギーと呼ぶ

以上まとめると、特殊相対性理論によってはっきりしたことは次の３点です。

第１は、**物体の存在そのものがエネルギーである**

第２は、**質量とエネルギーは同等で、一体となって保存則がなり立つ**

第３は、**物体の速度が大きくなれば質量が大きくなる**

我々の日常生活では、全く感じませんが、このことから次のことが言えるのです。

物質は原子分子からできています。物体全体としては止まっていしても、物質を構成する原子分子は激しく運動しています。

物質の温度が上がると、その分子や原子の運動が激しくなります。原子や分子の速度が増加します。そして、原子分子の運動エネルギーが増加します。この運動エネルギーの増加は、**質量**の増加につながります。

つまり、温度が上昇すると**質量**が増加することを意味します。**質量原器**が、パリやつくばで、ある**一定温度**で保存されているのはこのためです。

相対性理論によって**質量**と**エネルギー**が、区別のないものになってしまいました。

エネルギーは、質量と光速の二乗の積と同じものなのです。光速の二乗は $(3\times10^8)^2=9\times10^{16}$　であり、とてつもなく大きな数値です。

原子力エネルギーの源は、このとてつもなく大きな数値が直接関係します。

III－１０．莫大な原子核エネルギーの源

物体の全エネルギーは、**前節その４**で述べたように、２つの項に分けることができます。

静止質量エネルギーと**運動エネルギー**です。この運動エネルギーは、ニュートン力学で速度の持つエネルギーと同じもので、高等学校の物理学で習うものです。

ここで、これら２つのエネルギーの大き

さを比べてみましょう。

まず、物体として地球を考えましょう。地球が太陽の周りを巡る速度 u は、ほぼ 30000 $\mathrm{ms^{-1}}$ (= 30 $\mathrm{kms^{-1}}$) です。この速度は我々の近くにある最高の速度です。

地球の**静止質量エネルギー**と**運動エネルギー**の比をとって較べてみましょう。地球の静止質量を m_0 とします。

$$\frac{第１項}{第２項}=\frac{地球の静止質量エネルギー}{地球の運動エネルギー}=\frac{m_0c^2}{\frac{1}{2}m_0u^2}$$

$$=2\left(\frac{c}{u}\right)^2=2\left(\frac{3\cdot10^8}{3\cdot10^4}\right)^2=2\cdot10^8$$

比の値が２億です。

地球のように速く走っていても、地球の静止質量エネルギー（地球の存在のエネルギー）は、地球の運動エネルギーの２億倍も大きいのです。

次に新幹線の秒速 u を 100 $\mathrm{ms^{-1}}$ として比較しましょう。時速 360 $\mathrm{kmh^{-1}}$ です。地上で我々が目にする最も早いものです。

ここでは新幹線の静止質量を m_0 として、

$$\frac{第１項}{第２項}=\frac{新幹線の静止質量のエネルギー}{新幹線の運動のエネルギー}=\frac{m_0c^2}{\frac{1}{2}m_0u^2}$$

$$=2\left(\frac{c}{u}\right)^2=2\left(\frac{3\cdot10^8}{10^2}\right)^2=1.8\cdot10^{13}$$

比の値が 18 兆です。

このように地球上の普通のものの静止質量エネルギーは、運動エネルギーの 10 兆倍以上の大きさを持っています。

これまで別のものと考えられてきた**質量**と**エネルギー**が、**特殊相対性理論**によって、区別のないものなってしまいました。**一般相対性理論**により、このことがよりはっきり裏打ちされました。

光はエネルギーの流れです。光は質量を持った物体のように重力の影響を受け、曲がります。このことは、日食のときの星の位置観測により実証されました。

また、**質量保存則**と**エネルギー保存則**が区別のないものになってしまいました。**質量**と**エネルギー**が一体として保存されます。これが新しい保存則です。

もし、**静止質量**が減少したらどうなるでしょう。この時、光や粒子が放出されます。静止質量が減少した分だけ、その時に放出される光のエネルギーや、放出される粒子の運動エネルギーになります。

ほんの僅かな**静止質量**の減少でも、放出されるエネルギーが莫大なものであることが上の計算から想像されます。

静止質量の減少は、III－６の**質量欠損**に関係しています。後に話す III－１３の**原子核反応**によって実現します。原子核反応の前と後で静止質量が Δm_0 だけ減少したとします。

この時放出されるエネルギーを E_d とするとその大きさは、特殊相対性理論の式から次の式になることが分かります。

$$E_\mathrm{d}=\Delta m_0c^2 \qquad (\text{III}－3)$$

ここで、c^2 は、9×10^{16} という大きな数値ですから、たとえ、消滅した質量 Δm_0 が極僅かな値でも、その代償として放出されるエネルギー E_d は莫大な値になります。

これが原子爆弾や水素爆弾のエネルギー源であり、原子力発電に使われる原子炉や核融合炉のエネルギー源です。一般に**原子力エネルギー**と呼ばれているものです。

特殊相対性理論 と **一般相対性理論** については、佐々木祥介氏のホームページを参考にさせていただきました。

ホームページのアドレスは、
https://sites.google.com/site/physicscomsasaki/

この中の解説のアドレスは、
https://sites.google.com/site/physicscomsasaki3/

III－１１．原子核の結合エネルギーと質量欠損

III－６で述べた**質量欠損**について詳しく検討してみましょう。

原子核の中では陽子と中性子が強く結合しています。プラスの電気を持った陽子をいくつも狭い原子核の中に閉じ込めるために、強い**結合力**が必要となります。**拘束力**とか**束縛力**とも呼ばれています。

中性子がいわば**のり**の役目をして、結合していると言えます。

陽子と中性子が一緒になって、エネルギーの深い穴に落ち込んでいると考えて差し支えありません。陽子と中性子は、この穴の中で大きな負のエネルギーを持っています。このようにして原子核を創っているのです。

この負のエネルギーは、**結合エネルギー**または**束縛エネルギー**と呼ばれ、**特殊相対性理論**で述べた、式(III－2)の**全エネルギー** E に対して、**負の値**として寄与します。

結合エネルギーは**負の値**で、その分だけ全エネルギー E は減少するのです。

このことによって原子の質量は、陽子や中性子が単独にいる時の質量から計算される質量より小さくなってしまうのです。これが III－６で述べた**質量欠損**です。

原子核のように結合エネルギーが非常に大きい場合には、質量の減少が、**質量欠損**として観測されます。

陽子や中性子の数は原子によって異なります。結合エネルギーも原子によって異なった値になります。

この質量の減少は、原子を構成する陽子、中性子、電子など個々の粒子の質量が減少したのではなく、これらが合体するときの**結合エネルギー**が、全エネルギーに対して**負に寄与**することに因ります。

化学結合の場合にも同じことが当てはまります。化学結合のエネルギーも全エネルギーに対して負の値として寄与します。

例えば、水素原子や酸素原子が別々にいる時より、水素分子や酸素分子は質量が小さいはずです。これら原子が化合して水分子になった時にも、やはり質量が小さくなるはずです。

それは水素原子と酸素原子の化学結合エネルギーの分だけ全エネルギーが減少し、質量が減少することになります。

しかし、化学結合のエネルギーは、質量の変化として実測できるほど大きくはありません。そのため、見つけることができませんでした。

III－１２．原子の質量欠損をグラフにする

原子核で観測された**質量欠損**は、**図表 III－２第５列**の数値に示されています。

この列には、各々の**原子質量**の測定値を**核子１個**当たりの**質量**に換算した値を示しています。この値と陽子・中性子１個の質量、約 1.008 u との差が、その原子の質量欠損となります。

図表 III－３は、**図表 III－２第５列**の数値をグラフにしたものです。横軸は原子(元素)番号で、縦軸は核子１個当たりに換算した各原子の質量の実測値です。茶色の実線で示したジグザグ曲線になります。

縦軸の値がおよそ 1.008 [u]の近傍に示した青色横実線は、陽子および中性子１個の質量です。この線とジグザグ曲線との差が、各原子の核子１個当たりの質量欠損です。

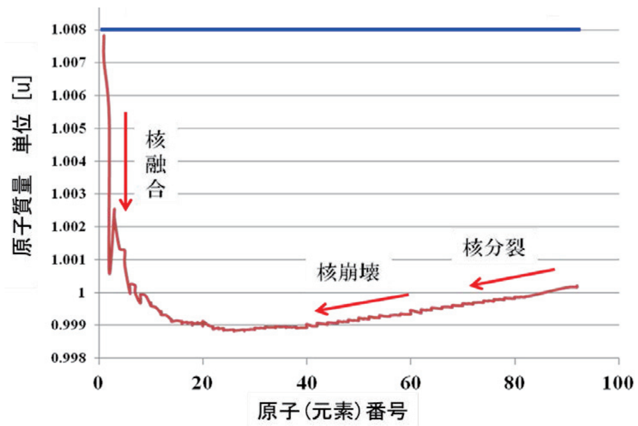
これは、核子１個分の質量欠損ですから、実際の質量欠損を知るためには、この差を核子数倍する必要があります。

原子(元素)番号の順に見ると、質量は 1.008 u から急激に減少し、最小値をとります。最小値を過ぎると、非常に緩慢に増加します。全体としてはかなり歪んだ U の字型です。

最小値を示す元素は、鉄 Fe、コバルト Co、ニッケル Ni の近辺です。頁 64 の**図表 III－２（その２）第５列**に値があります。僅かな変化です。確認してください。この近傍の原子が最も結合エネルギーが（負で）大きな値を持っているのです。

原子(元素)番号の小さい元素では、番号の増加とともに核子１個当たりに換算した各々の原子の質量が減少します。

逆に、原子(元素)番号が大きい元素では、番号の増加とともに、核子１個当たりに換算した各々の原子の質量が増加します。



図表 III－３．核子１個当たりの原子質量の実測値
青線との差が質量欠損である
（図表 III－２の第５列）

III－１３．元素が変化する反応・核反応

ここで、元素が変化する反応について考えましょう。化学反応では、元素の変化は起こりません。

もし、元素が変化する反応があれば、**図表 III－３**のグラフで示した**質量欠損**が原因で、反応の前後で、全体として**静止質量**の減少が起る可能性があります。

この時、減少した静止質量の分だけ、いろいろな形のエネルギーが放出されます。具体的にはγ線のエネルギーと粒子の運動エネルギーになります。この放出されるエネルギーは、III－１０で予想したとおり莫大な値になります。

実際、このような反応が見いだされ、研究が進みました。**原子力エネルギーの研究**です。

元素が変化する反応を、**原子核反応**と呼びます。それは **①核分裂、②核崩壊、③核融合** の３種類に分類されます。それらの特徴は次の通りです。

①核分裂　原子(元素)番号の大きい原子核が、番号の小さい２つの原子核に分裂する核反応

②核崩壊　不安定な原子核が、近隣の元素の原子核に変化する核反応

③核融合　原子(元素)番号の若い原子核が集まって、番号のより大きい原子核に変化する核反応

図表 III－３中に描いた矢印を見て下さい。この章で問題にする核反応の起り方を示しています。矢印の方向は反応の方向です。

核反応１回当たりの**静止質量**の減少は、①の核分裂や③の核融合では大きく、②の核崩壊では僅かです。しかし、②では崩壊がつぎつぎ連続的に起こり、結局、静止質量の減少は大きなものになります。

①核分裂と②核崩壊は**原子爆弾**や**原子力発電**に繋がります。

③核融合は太陽をはじめとする**星のエネルギー源**であり、**水素爆弾**に繋がります。

ニュートンは造幣局の局長時代に、鉄 Fe を金 Au に変える研究を本気で行ったと言われています。元素の変換です。結果は失敗でした。今でもそれはかないません。

III－１４．不安定原子核を持つ放射性同位体

ここまでは主に天然に存在する安定同位体について述べてきました。これらは太陽系の誕生以来 45 億年間安定に存在し続けた原子です。今後何十億年にわたってやはり安定に存在し続けることでしょう。**図表 III－２(その１～８)**に一覧した原子です。

この節以降は、19 世紀の終わりから現在までに、科学者や技術者が、研究だけでなく、原子爆弾の製造、水素爆弾の製造、原子力発電のための原子炉を建設し、造り出してしまった原子の話です。これらは**不安定な原子核を持つ原子**です。

それらは、英語では、**ラジオアイソトープ**(Radio Isotope) と呼ばれています。日本語では、不安定原子核、放射性原子核、不安定同位体、放射性同位体、放射性同位元素、などと呼ばれます。ここでは、**不安定な放射性原子核** または、**放射性同位体**と、呼ぶことにします。

一般に、**放射性物質**と言うと、これらを含む物質全般を指します。

不安定な放射性原子核は、「化学便覧」には、主なものだけ約 430 種類が記載されています。しかし、現在知られている数は約 3000 種類以上でしょう。

元素の種類がほぼ 90 種類ですから、それぞれ平均 20 種類以上の放射性同位体があることになります。

これらのほとんどは、20 世紀になって、武器開発及び原子力発電のために製造してしまったものばかりです。現在、世界中にある放射性物質の総量は何トンになるか不明です。

45 億年前、太陽系が誕生した頃の地球は、このような不安定な放射性原子核で充満していたと考えられています。

以下に説明するように、地球上では徐々に減り、少量の例外を除いて完全になくなっていました。45 億年の成せる業です。

放射性同位体の放つ放射線は、生物の存在に深く関わりを持っています。

地球の歴史の研究によると、単細胞植物の発生が約 20 億年前、多細胞植物の発生が約 15 億年前、無殻無脊椎動物が約 10 億年前、有殻無脊椎動物が約 5 億年前、脊椎動物の発生が約 4 億年前だそうです。生物が発生する頃には不安定原子核はなくなり、安定同位体ばかりになっていたでしょう。それ以降、放射性同位体が多量に造られることはありませんでした。宇宙でわずかに造られるだけでした。

現在なお地上に残っているものは、前にも述べた**図表 III－２の第２列**に ***** を付けた**天然放射性同位体**だけです。これらは、次の III－１５で述べる**半減期**が何億年という非常に長いものばかりです。

地球上には生物が現われ、進化し、とうとう進化しつくした人類の誕生を見たわけです。現在繁栄している人類の登場は、せいぜい 20 万年前のことです。

ところがその人類が、放射性同位体を再び、地球上につくってしまったのです。

頁 81 の**図表 III－４**は、現在地球上に存在する全ての核種（安定同位体、不安定同位体）を一覧したものです。Wikipedia から引用させていただきました。

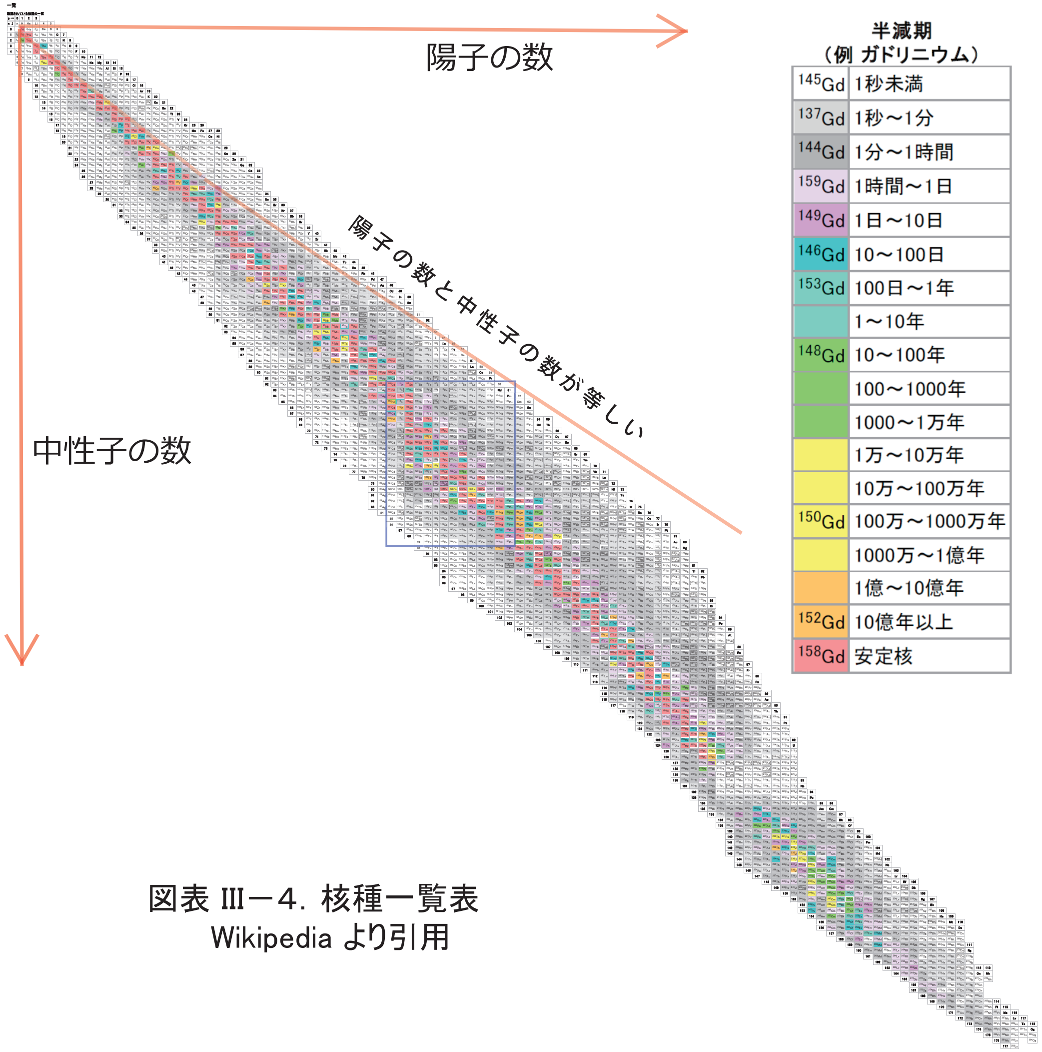
前に述べた、不安定な放射性原子核の総数 3000 は、この図から概算した値です。雲のように広がった範囲に同位体が分布します。原子核の持つ陽子の数と中性子の数は、各々横軸と縦軸が示しています。

斜めの赤線は陽子と中性子の数が等しい場合を示します（筆者追加)。ほとんどの安定原子核はこの線の下側にあり、陽子の数より中性子の数が多くなっています。原子(元素)番号の大きい原子核ではその差が大きくなります。

図表 III－４では小さくて分かりづらいので、四角で囲んだ部分を拡大したものを、頁 82 の**図表** III－５に示しました。

安定原子核は赤色で示されています。また、III－１８で述べる**放射性同位体**の**半減期**が色で区別されています。色と半減期の関係は、ガドリニウム Gd 元素を例に挙げて、**図表** III－４の右側に引用しました。

半減期の値などは、
http://wwwndc.jaea.go.jp/CN10/index.html
を参考にしてください。



半減期（例 ガドリニウム）	
^{145}Gd	1秒未満
^{137}Gd	1秒～1分
^{144}Gd	1分～1時間
^{159}Gd	1時間～1日
^{149}Gd	1日～10日
^{146}Gd	10～100日
^{153}Gd	100日～1年
	1～10年
^{148}Gd	10～100年
	100～1000年
	1000～1万年
	1万～10万年
	10万～100万年
^{150}Gd	100万～1000万年
	1000万～1億年
	1億～10億年
^{152}Gd	10億年以上
^{158}Gd	安定核

図表 III－4. 核種一覧表
Wikipedia より引用

^{110}Cd	^{111}In	^{112}Sn	^{113}Sb	^{114}Te	^{115}I	^{116}Xe	^{117}Cs	^{118}Ba	^{119}La	^{120}Ce	^{121}Pr	60	
^{111}Cd	^{112}In	^{113}Sn	^{114}Sb	^{115}Te	^{116}I	^{117}Xe	^{118}Cs	^{119}Ba	^{120}La	^{121}Ce	^{122}Pr	Nd	61
^{112}Cd	^{113}In	^{114}Sn	^{115}Sb	^{116}Te	^{117}I	^{118}Xe	^{119}Cs	^{120}Ba	^{121}La	^{122}Ce	^{123}Pr	^{124}Nd	Pm
^{113}Cd	^{114}In	^{115}Sn	^{116}Sb	^{117}Te	^{118}I	^{119}Xe	^{120}Cs	^{121}Ba	^{122}La	^{123}Ce	^{124}Pr	^{125}Nd	^{126}Pm
^{114}Cd	^{115}In	^{116}Sn	^{117}Sb	^{118}Te	^{119}I	^{120}Xe	^{121}Cs	^{122}Ba	^{123}La	^{124}Ce	^{125}Pr	^{126}Nd	^{127}Pm
^{115}Cd	^{116}In	^{117}Sn	^{118}Sb	^{119}Te	^{120}I	^{121}Xe	^{122}Cs	^{123}Ba	^{124}La	^{125}Ce	^{126}Pr	^{127}Nd	^{128}Pm
^{116}Cd	^{117}In	^{118}Sn	^{119}Sb	^{120}Te	^{121}I	^{122}Xe	^{123}Cs	^{124}Ba	^{125}La	^{126}Ce	^{127}Pr	^{128}Nd	^{129}Pm
^{117}Cd	^{118}In	^{119}Sn	^{120}Sb	^{121}Te	^{122}I	^{123}Xe	^{124}Cs	^{125}Ba	^{126}La	^{127}Ce	^{128}Pr	^{129}Nd	^{130}Pm
^{118}Cd	^{119}In	^{120}Sn	^{121}Sb	^{122}Te	^{123}I	^{124}Xe	^{125}Cs	^{126}Ba	^{127}La	^{128}Ce	^{129}Pr	^{130}Nd	^{131}Pm
^{119}Cd	^{120}In	^{121}Sn	^{122}Sb	^{123}Te	^{124}I	^{125}Xe	^{126}Cs	^{127}Ba	^{128}La	^{129}Ce	^{130}Pr	^{131}Nd	^{132}Pm
^{120}Cd	^{121}In	^{122}Sn	^{123}Sb	^{124}Te	^{125}I	^{126}Xe	^{127}Cs	^{128}Ba	^{129}La	^{130}Ce	^{131}Pr	^{132}Nd	^{133}Pm
^{121}Cd	^{122}In	^{123}Sn	^{124}Sb	^{125}Te	^{126}I	^{127}Xe	^{128}Cs	^{129}Ba	^{130}La	^{131}Ce	^{132}Pr	^{133}Nd	^{134}Pm
^{122}Cd	^{123}In	^{124}Sn	^{125}Sb	^{126}Te	^{127}I	^{128}Xe	^{129}Cs	^{130}Ba	^{131}La	^{132}Ce	^{133}Pr	^{134}Nd	^{135}Pm
^{123}Cd	^{124}In	^{125}Sn	^{126}Sb	^{127}Te	^{128}I	^{129}Xe	^{130}Cs	^{131}Ba	^{132}La	^{133}Ce	^{134}Pr	^{135}Nd	^{136}Pm
^{124}Cd	^{125}In	^{126}Sn	^{127}Sb	^{128}Te	^{129}I	^{130}Xe	^{131}Cs	^{132}Ba	^{133}La	^{134}Ce	^{135}Pr	^{136}Nd	^{137}Pm
^{125}Cd	^{126}In	^{127}Sn	^{128}Sb	^{129}Te	^{130}I	^{131}Xe	^{132}Cs	^{133}Ba	^{134}La	^{135}Ce	^{136}Pr	^{137}Nd	^{138}Pm
^{126}Cd	^{127}In	^{128}Sn	^{129}Sb	^{130}Te	^{131}I	^{132}Xe	^{133}Cs	^{134}Ba	^{135}La	^{136}Ce	^{137}Pr	^{138}Nd	^{139}Pm
^{127}Cd	^{128}In	^{129}Sn	^{130}Sb	^{131}Te	^{132}I	^{133}Xe	^{134}Cs	^{135}Ba	^{136}La	^{137}Ce	^{138}Pr	^{139}Nd	^{140}Pm
^{128}Cd	^{129}In	^{130}Sn	^{131}Sb	^{132}Te	^{133}I	^{134}Xe	^{135}Cs	^{136}Ba	^{137}La	^{138}Ce	^{139}Pr	^{140}Nd	^{141}Pm
^{129}Cd	^{130}In	^{131}Sn	^{132}Sb	^{133}Te	^{134}I	^{135}Xe	^{136}Cs	^{137}Ba	^{138}La	^{139}Ce	^{140}Pr	^{141}Nd	^{142}Pm
^{130}Cd	^{131}In	^{132}Sn	^{133}Sb	^{134}Te	^{135}I	^{136}Xe	^{137}Cs	^{138}Ba	^{139}La	^{140}Ce	^{141}Pr	^{142}Nd	^{143}Pm
^{131}Cd	^{132}In	^{133}Sn	^{134}Sb	^{135}Te	^{136}I	^{137}Xe	^{138}Cs	^{139}Ba	^{140}La	^{141}Ce	^{142}Pr	^{143}Nd	^{144}Pm
^{132}Cd	^{133}In	^{134}Sn	^{135}Sb	^{136}Te	^{137}I	^{138}Xe	^{139}Cs	^{140}Ba	^{141}La	^{142}Ce	^{143}Pr	^{144}Nd	^{145}Pm
85	^{134}In	^{135}Sn	^{136}Sb	^{137}Te	^{138}I	^{139}Xe	^{140}Cs	^{141}Ba	^{142}La	^{143}Ce	^{144}Pr	^{145}Nd	^{146}Pm
86	^{135}In	^{136}Sn	^{137}Sb	^{138}Te	^{139}I	^{140}Xe	^{141}Cs	^{142}Ba	^{143}La	^{144}Ce	^{145}Pr	^{146}Nd	^{147}Pm
	87	^{137}Sn	^{138}Sb	^{139}Te	^{140}I	^{141}Xe	^{142}Cs	^{143}Ba	^{144}La	^{145}Ce	^{146}Pr	^{147}Nd	^{148}Pm
		88	^{139}Sb	^{140}Te	^{141}I	^{142}Xe	^{143}Cs	^{144}Ba	^{145}La	^{146}Ce	^{147}Pr	^{148}Nd	^{149}Pm
			89	^{141}Te	^{142}I	^{143}Xe	^{144}Cs	^{145}Ba	^{146}La	^{147}Ce	^{148}Pr	^{149}Nd	^{150}Pm

図表 III－５．核種一覧表 ヨウ素セシウム近辺の拡大

Wikipedia より引用

III－１５．不安定原子核の崩壊

不安定な放射性原子核は別の不安定な放射性原子核に変化します。この変化のことを**原子核崩壊**と呼びます。崩壊の仕方は３種類です。① αアルファ崩壊、② βベータ崩壊、③ γガンマ崩壊と呼ばれています。

① **α崩壊**とは、陽子２個と中性子２個でできたα粒子を放出する崩壊です。このα粒子はヘリウムの原子核と同じものです。これを放り出すと元の不安定原子核は、陽子が２個減少し、原子(元素)番号が２つ若い元素に変わります。

このような元素変化の仕方をα崩壊と呼んでいます。中性子も２個減ります。この時放出されるα粒子はα線と呼ばれることもあります。

② **β崩壊**は、電子を放り出す崩壊です。電子はマイナス電気を持つ普通の電子の場合と、プラス電気を持つ陽電子の場合があります。

前者では原子核の中で、陽子が１個増加します。後者では逆に陽子が１個減少します。よって元素が隣の元素に変化します。この時放出される電子はβ線と呼ばれます。

③ **γ崩壊**は、光としてエネルギーを放出する崩壊です。**原子核**から放出される光はγ線と呼ばれます。**第 IV 章**で学ぶ電磁波です。X線は**原子**から放出される電磁波であり、γ線はそれより２桁も３桁も波長が短く、非常に高いエネルギーを持ちます。

上記３種類の崩壊が次々起って、原子核が別の原子核に変化して行きます。変化してできた原子核もたいてい不安定な放射性原子核で、さらに崩壊して行きます。

崩壊で放出される放射線のもたらす害については、III－２５で説明します。

後に述べる核分裂によって、不安定な放射性原子核が大量に製造されますが、それらは崩壊し、原子(元素)番号の小さい方向に変化して行きます。

III－１６．放射線と放射線吸収線量 D およびその単位グレイ［Gy＝J/kg］

放射線とは、① α線、② β線、③ γ線、④ X線、⑤ 中性子、⑥ 核分裂片などのことです。

① α線、② β 線、③ γ線は、**前節**で述べた崩壊によって不安定な原子核から放出されます。④ X線は、原子から放出される電磁波のことです。⑤ 中性子は、後に述べる**核分裂**に際して放出されます。⑥ 核分裂片は、やはり**核分裂**に際して飛び散るあらゆる不安定原子核のかけらです。これも放射線に加えておかねばなりません。この分裂片は、その英語 Fission Product の頭文字 FP と省略されてしまうことがあります。

放射線に曝（さら）された物質は、その原子や分子が破壊されます。それは、放射線が物質にエネルギーを与えるからです。これが放射線による被曝です。放射線が物質に吸収されたのです。

吸収されるエネルギーが大きいほど、放射線が物質に与える影響が大きくなります。放射線が物質に与える影響は、吸収されるエネルギーで計り、**放射線吸収線量** D［**グレイ** Gy］と呼び、定義は以下の通りです。

吸収されるエネルギーが、物質１kg あたり１J（ジュール）の時、放射線吸収線量 D が１グレイ Gy とする

単位グレイは、$[\mathrm{Gy} = \mathrm{Jkg}^{-1}]$であり、SI 国際単位系の１つです。

一般に ① α線や、② β線 は、透過力が小さいので、遠くまで届きません。③ γ線は、④ X線に較べて透過力が強く、注意して遮蔽（しゃへい）する必要があります。

⑤の中性子は、より一層透過力が大きく、普通にはほとんど遮蔽することができません。ですから、多くの中性子が放出される原子炉は、特に厳重に遮蔽されなければなりません。漏れたら大変なことになります。

⑥の核分裂時の分裂片は、放射性同位体でできており、新たな放射線の線源です。

⑥以外の放射線は、発生源を中心にして、**あらゆる方向**に広がります。その強度は線源からの**距離の２乗に反比例**して弱くなります。

⑥の**核分裂片**は放射性同位体の集まりで、空気中の塵に混じって、**風に吹かれて拡散**します。風の向きが重要になります。その一部は雨とともに地上に落ちてきます。原爆投下直後に降った**黒い雨**です。

拡散した ⑥の核分裂片は、至る所で、さらなる崩壊によって放射線を出し続けます。

体の内部に取り込まれた放射性物質による細胞の被曝は**内部被曝**と言います。

⑥の核分裂片は、人が直接空気中の塵を吸い込んだり、間接的に魚、肉、野菜、山菜、果物などの食物を摂取して、体内に取り込まれます。内部被曝の原因になります。

体内で原子核崩壊が起こり、①や②や③の放射線によって、至近距離で細胞が破壊されます。その影響は甚大です。絶対に避けるべきことです。

人体に与える影響は、上に述べた**放射線吸収線量** D が同じでも、放射線の種類によって異なります。例えば、放射線が③のγ線と⑤の中性子とでは影響が異なります。

また、影響の大きさは、放射線を受ける物質にもよります。物質としては水を基準にしています。

人体に与える影響については、**経験に基づいた指標**が作られており、**放射線等価線量** H および**放射線実効線量** E と呼ばれています。

その単位は**シーベルト**［Sv］が使われます。 このことについては、後に III－２５で説明しますが、まだまだ実例が乏しく科学的に確定していません。

III－１７．放射能とその単位ベクレル［Bq＝1/s］

放射能（Radioactivity）とは、**不安定な原子核**が**崩壊**を起こして**放射線**を放出する能力のことで、その大きさ又は強さは、１秒間に崩壊する原子核の数で計ります。

放射性同位体を含む物質は**放射能**を持っていると言います。

放射性同位体の１秒間の**崩壊数**は、そこにある放射性同位体の総数に比例します。比例定数は**崩壊確率**と呼ばれ、ここではギリシャ文字λラムダ を使います。**崩壊確率**λの値は放射性同位体によって異なります。

放射能の強さは、先に述べたように、1秒間に崩壊する原子核の数で計ります。それは、そこにある**放射性同位体の総数**とその**崩壊確率**λの積で決まります。この数値が**放射能の大きさ又は強さ**を表し、**単位**を**ベクレル**［$Bq= s^{-1}$］とします。

この単位は、SI 国際単位系で採用されている単位です。放射能の単位として、昔は、[キュリー Ci]を用いました。

１秒間に崩壊する放射性同位体の数は、放射性同位体の減少してゆく速さを表しているとも言えます。

放射性物質が放出する放射線による有害性または危険性は、放射線の強さで決まりますから、放射能で決まります。放射能の大きさが大きければ大きいほど、放射線は強く、有害性や危険性が高まります。

2011 年 3 月 11 日の原子炉の事故以来、**放射能**という言葉は、**放射性物質の存在**と表現する場合が増えました。放射能の量は放射性同位体が崩壊する数で表し、その数は、放射性同位体の数に比例しますから正しい表現です。

１kg の**魚**から 100 **ベクレルのセシウム Cs 137 の放射能**が**検出された** とはどのようなことか検討しましょう。

この場合、**魚肉**１kg **から放射性同位体セシウム Cs 137 が**、１**秒あたり** 100 **個の割合で崩壊して放射線を放出しています。**

データブックによると、**セシウム** Cs 137 の崩壊確率は、14 億分の１です。魚１kg の中に、14 億×100 = 1400 億個の**セシウム** Cs 137 があり、１秒間に 100 個の割合で、崩壊して減少しているということです。この割合で減少すると、半分になるのに 30 年必要です。

原子の数は膨大で、魚１kg の中には原子の個数でいうと、10^{25} 個以上もあります。ですから、その中の 1400 億個=$1.4×10^{11}$ 個が、放射性**セシウム** Cs 137 原子であるということです。全体の個数に比べると、１兆分の１以下であり、超微量分析を行うことによって初めて分かる量です。

放射性同位体の崩壊は、強いγ線を放出するので、たとえ超微量でも検出器を使って測定できます。しかもγ線の波長を分析すると、どの原子核の崩壊かが分かります。

たとえ話をしましょう。香港Ａ型インフルエンザにかかる感染確率が１週間で 10％だとしましょう。放射性原子核の１秒当たりの崩壊確率をインフルエンザの１週間当たりの感染確率に例えます。

いつでもどこでもこの確率でインフルエンザが発症するとします。

100 人のクラスでは 10 人の患者が出て、周りに病原菌をまき散らします。残り 90 人は、今は健康体で、病原菌をまきちらしません。しかしいずれはインフルエンザにかかるとします。

100 個の放射性同位体があり、このうち 10 個が崩壊し、周りに放射線をまき散らします。残りの 90 個は放射線を出しません。いずれ崩壊し、その時に放射線を出します。

このクラスは香港Ａ型で 10 ベクレルの放射能を持っていると言います。

隣町の１万人の集団を考えましょう。ここでも同じ 10％の確率で、1000 人の患者

が出ます。この時、この集団は香港Ａ型で 1000 ベクレルの放射能が検出されたと言います。

患者数が放射能に、感染確率が崩壊確率に、まき散らす病原菌を放射線にたとえられています。

患者数は、クラスの人数または町の総人口と感染確率の積になり、単位は[人]です。放射性同位体の総数 N と崩壊確率λの積が放射能で、その単位は[Bq]です。

インフルエンザ患者が１週間で治ったら、次の 10％がまたインフルエンザにかかります。100 人のクラスでは残った 90 人の 10％、9 人の患者がでて、病原菌をまき散らします。1 週間後には 9 ベクレルになりました。残った 81 人は今は健康体ですがいずれは感染することになります。

一方、１万人の集団の隣町では、１週間後には残り 9000 人の 10％　900 人の患者がでます。900 ベクレルになりました。

別に、香港Ｂ型では感染確率が１％ だとしましょう。100 人のクラスでは、香港Ｂ型では１ベクレルの放射能であります。隣町の１万人の集団では、香港Ｂ型で 100 ベクレルの放射能であります。

１週間後の患者はどうなるでしょう。

100 人のクラスでは、残り 99 人の１％で、今週もほとんど前の週と同じ１人の患者がでます。今週も先週と同じ１ベクレルで、ほとんど変化しません。

隣町では、残り 9900 人の１％、99 人がインフルエンザにかかります。今週も、先週の 100 人とほとんど変わらない 99 人の患者が出ます。先週とほぼ同じ 99 ベクレルの放射能が検出されます。

香港Ａ型では、どんどん感染し、早期に患者が出なくなります。一方、香港Ｂ型では患者の数はほとんど変わりません。

インフルエンザにかかる感染確率と、患者がいつまで続くかは関係があります。感染確率が大きい場合には、患者は早期に下火になります。感染確率が小さいといつまでも患者が出続けます。

同じことが放射性同位体の崩壊についても起こります。

放射性同位体の崩壊確率と、放射能がいつまで続くかは関係があります。崩壊確率が大きい場合には、放射能は早期に下火になります。崩壊確率が小さいと、いつまでも放射能が観測され、放射線が出続けます。

ここで、**崩壊確率λ**と**放射能の減り方**（**半減期**）の関係を見てみましょう。

III－１８．原子核崩壊の半減期

不安定な放射性原子核は崩壊によって減少します。崩壊はある決まった確率で起こります。この確率が**崩壊確率λ**です。

前節で述べた通り、崩壊数は、そこにある不安定な放射性原子核の数つまり放射性同位体の数に比例します。比例定数が**崩壊確率λ**です。自然界の変化の仕方です。

このことから分かることは、放射性同位体の数が半分になるのに必要な時間が、原子核によって決まっているということです。半分と言わずに ３分の１になる時間も決ま

っていますが、便宜上半分になる時間を使う約束になっています。

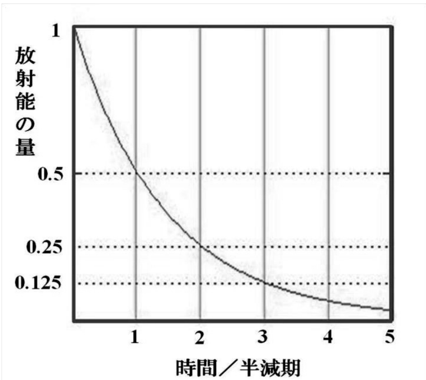
半分になるまでの時間のことを**半減期**と言います。比例定数である崩壊確率 λ は原子核によって異なるので、半減期は原子核によってまちまちです。

例えば、**ヨウ素** I 131 は 8.02 日($6.93×10^5$ s)で半分になります。**セシウム** Cs 137 は 30.07 年($9.49×10^8$ s)で半分になります。半減期は千差万別です。半減期が 1 分(60 s) に満たないものも多くあります。そのように短いものから 1 億年以上のものまで存在します。

広島に落とされた**原子爆弾**や原子力発電(原発)に使われる**ウラン** U 235 の半減期は 7.038 億年($2.22×10^{16}$ s)です。存在度の最も高い**ウラン** U 238 の半減期は、44.68 億年($1.41×10^{17}$ s)であり、太陽系の年齢に匹敵します。

ウラン U 238 から造りだされた**プルトニウム** Pu 239 の半減期は 2 万 4 千年 ($7.57×10^{11}$ s)です。長崎の原爆に使われました。

放射性同位体の減り方を式でみてみましょう。どの放射性同位体も一つの式で表すことができます。**図表** III－6 はそれをグラフにしたものです。半減期が異なっても、



図表 III－6．放射性物質の減り方

工夫すれば同じグラフに描くことができます。同じ法則に従うからです。

縦軸は放射性同位体の残量で、横軸は時間の経過を示しています。時間の経過とともに減少してゆくようすがわかります。はじめの量を 1 として、残量が比率で表わされています。

横軸の時間は、半減期を基準として目盛ってあります。横軸の 1 は半減期だけ時間が経過した時のことです。横軸の 2 は半減期の 2 倍の時間が経過した時のことです。

時刻 t における放射性同位体の残量を $N(t)$ とします。 T を半減期 [秒 s]、N_0 を $t=0$ の時の放射性同位体の数とすると次の式が成り立ちます。

$$\frac{N(t)}{N_0} = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}} \qquad (\mathrm{III}-4)$$

この式の時刻の変数 t に半減期 T を代入すると、右辺は$(1/2)^1 = 1/2$ となり、半減期の意味がよくわかります。**図表** III－6 は、式(III－4)を、縦軸を $N(t)/N_0$ に、横軸を t/T にしてグラフにしたものです。

放射性同位体の数の減る速さは、微分で $-\frac{dN(t)}{dt}$ と表せます。1 秒当たりの放射性同位体の数の変化を示す数値です。

一方、この節の最初に述べたように、崩壊数は、不安定同位体の数 $N(t)$ に比例します。比例定数が**崩壊確率** λ であるので、1 秒当たりの減少数は $\lambda N(t)$ となります。

これらを等しいと置くことができ、

$$-\frac{dN(t)}{dt} = \lambda N(t) \qquad (\mathrm{III}-5)$$

が成り立ちます。放射性同位体の減少速度は崩壊数であり、**放射能**の強さを表してい

ます。この式の数値に単位**ベクレル** [Bq = s^{-1}]を付けて**放射能**の強さとします。

順序だてて言いますと、式 (III－5) から式 (III－4) が導かれます。この時、崩壊の確率 λ と半減期 T の間には

$$\lambda \times T = 0.693 \qquad (\mathrm{III}-6)$$

の関係があります。数値 0.693 は無理数で $e^{0.693} = 2$ によります。 ただし、

e = 2.718281828.... は数学定数です。

放射能は時間とともに徐々に減少しますが、1000 分の 1 になるには、半減期の約 10 倍の時間が必要です。これは $2^{10}＝1024$ であることから分かります。

式 (III－6) より、半減期 T の短いものは崩壊確率 λ が大きく、どんどん崩壊することが分かります。たとえ放射性同位体の量が少なくても、短時間に崩壊しますから強い放射線を出します。

半減期 T の長い放射性同位体は、崩壊確率 λ が小さく、時間をかけて崩壊します。したがって、放出する放射線はそれだけ弱くなります。しかし、いつまでもいつまでも放射線が出続けます。

問題 次のような(1)から(4)の不安定な放射性同位体が、1 μg ($= 1 \cdot 10^{-9}$ kg) あるとします。この時の放射能は何ベクレルか計算せよ。ただし、原子量は各元素の値を使用せよ。

(1) 半減期が 8.02 日($6.93×10^5$ s)の
放射性ヨウ素 I 131

(2) 半減期が 30.07 年($9.49×10^8$ s)の
放射性セシウム Cs 137

(3) プルサーマル原子力発電用原子炉に使う予定の、半減期が 2 万 4110 年 ($7.57×10^{11}$ s) の**プルトニウム** Pu 239

(4) 半減期が 7.038 億年($2.22×10^{16}$ s)の
ウラン U 235

〔解き方のヒントと順序〕
① **半減期** T を調べ、単位を秒 s に換算する。
② 式 (III－6) より**崩壊確率** λ を求める。
③ 1 μg の**モル数**を計算する。
④ **アボガドロ数**を使って、不安定な放射性原子核の数 N を求める。
⑤ λ と N の積を求める。

III－１９．原子核反応：①核分裂　②核崩壊　③核融合

原子力エネルギーを取り出すためには、**原子核反応**により元素が変化し、質量の減少が起こることが不可欠です。**頁** 63～70 の**図表** III－2 **第５列**の数値、および、**頁** 78 の**図表** III－3 のグラフを見てください。

原子(元素)番号が 24、25、26、27、28 近辺の元素、Cr、Mn、Fe、Co、Ni の原子が最も質量が小さいことが分かります。この近辺の元素に向かって、グラフの坂道を下るように元素が変化すれば全体として静止質量の減少を伴います。

頁 78 の**図表** III－3 のグラフから分かるように、坂道を下る核反応は二通りあります。第 1 の反応は、坂道を右から左へ下る

核反応です。①の**核分裂** と III－１５で述べた ②の**核崩壊** がそれに当たります。第２の反応は、坂道を左から右へ下る核反応です。③の**核融合**がそれに当たります。

①の**核分裂**は、原子核１個が原子(元素)番号の小さい２個の原子核に分裂する反応です。この核反応によって質量の小さな原子が２個造られます。核分裂では一度に大きな静止質量の減少が起こります。

核分裂を起こす原子核の代表は、**ウラン** 235 と**プルトニウム** 239 です。後に見るように核分裂では、たくさんの種類の不安定な放射性原子核が作られます。したがって、核分裂の後に、②の**核崩壊**が続きます。原子核崩壊もまた原子(元素)番号が小さい方向に変化し、静止質量の減少を伴います。同時に莫大なエネルギーが放出されます。

原子核分裂や原子核崩壊によって、III－１６で述べた放射線を放出します。それらは、① α線、② β線、③ γ線、④ X線、⑤ 中性子および ⑥ 核分裂片などです。

放射されるものの持つエネルギーは、核分裂による**静止質量の減少**に伴うエネルギーに等しくなります。**原子力発電**では、このエネルギーを使って水を沸かします。

原子力発電では**核分裂**に伴う**静止質量の減少**だけでなく、その後に続く、**原子核崩壊**による**静止質量の減少**も使います。

従って、不安定原子核が存在し、原子核崩壊が進んでいる間は常に、放射線や新たな不安定原子核を放出し、水を温め続けます。それは不安定原子核が安定原子核になるまで続きます。

今も壊れた原子炉を水で冷やし続けています。それは原子炉の中に不安定な放射性原子核がたくさんあるからです。放射性同位体の崩壊によって、エネルギーを出し続けているのです。ですからいつまでも水で冷やし続けなければなりません。汚染水漏れが止まらないのは、いつも冷やし続けなければならないからです。

いつまで水で冷やし続けなければならないのでしょうか。たとえば半減期が、8.02 日(6.93×10^5 s)の**放射性ヨウ素** 131 では、80.2 日で、1/1024 になります。

半減期が 30.07 年(9.49×10^8 s)の**放射性セシウム** 137 では、それが約 1000 分の１に減少するには、その約 10 倍の年月、つまり、300 年かかります。

半減期２万 4110 年（7.57×10^{11} s）の、**プルトニウム** 239 が、1/1024 になるのは半減期のおよそ 10 倍 24 万年となります。我々ホモサピエンスが生まれてこの方、せいぜい 20 万年といわれています。その長さに匹敵します。

将来に責任を持つなどと軽々しく言えるものではありません。

もう一つの核反応は、③の**核融合**です。原子(元素)番号の小さい２個以上の原子核が合体して、原子(元素)番号の大きな１つの原子を造る核反応です。この合体を**核融合**と呼んでいます。

夜空に輝く恒星のエネルギーの源です。我々の太陽では、原子(元素)番号が１の水素 1 $^{1}_{1}$H の原子核４個が融合して、原子(元素)番号２のヘリウム 4 $^{4}_{2}$He の原子核１個を作る核反応が起っています。

III－２０．核分裂と不安定な放射性原子核の製造

前に述べたように、原子(元素)番号の大きな原子核が番号の小さい２つの原子核に分かれることを**核分裂**といいます。

核分裂の最初の発見は 1938 年のことです。**原子(元素)番号** 92 **番（頁** 70）の**天然ウラン**に**遅い中性子**を照射した実験です。この時生じた放射性物質の中に**原子(元素)番号** 56 **番（頁** 67）の放射性バリウムを見出しました。核分裂によって原子(元素)番号が半分に近い**バリウム**（$_{56}$Ba）が生成されました。

その後、**遅い中性子**による**放射性ウラン** 235 の核分裂について、詳しい実験が大量に行われ、次のことが分かりました。

① 質量の異なる大小２つの原子核に分裂する
② 分裂して生成される原子核は、元素でいうと原子(元素)番号 28 のニッケル Ni から 66 のディスプロシウム Dy まで（**頁** 64～68）の約 40 種類である
③ それらの質量数は 66 から 166 までの約 100 種類に亘る
④ 核分裂生成物 FP の収量は、質量数が、95 と 140 付近に収量のほぼ等しい二つの極大値を持ち、110～120 に極小値がある

これらを図で示すと、次の頁の**図表** III－７のような、山が２つある曲線になります。このグラフの横軸は生成原子核の質量数を表わしており、縦軸は、核分裂で生成される原子核の収量を百分比（パーセント）の対数で表示してあります。（収量のことを FP と言うこともある）

主な核分裂生成物 FP の収率と半減期を**次の頁**の**図表** III－８に示しました。分裂して２個の原子核になることから、**収率は合計**が 200 % になるように集計されているそうです。

図表 III－８によると、もっとも収量の多いものでも７%以下です。**図表** III－８に挙げたものの総和は 81.33%で FP 全体の半分にもなりません。非常に多種類の放射性原子核が製造されることが分かります。

核分裂生成物 FP のうち、甲状腺に取り込まれる**ヨウ素** I 131 が、かなりの量で生成されます。

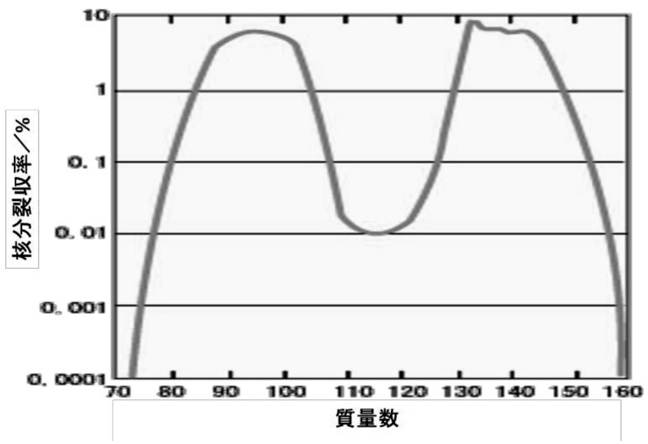
そのほか、生体に取り込まれやすい元素は、体内に多くある Na や K と同じ**１価金属元素**と Ca と同じ**２価の金属元素**が考えられます。化学的性質が似ているからです。

図表 III－８にある１価金属元素は、**セシウム** Cs 137 です。同様に表中にある２価金属元素は、**ストロンチウム** Sr 89 や Sr 90、および**バリウム** Ba 137 や Ba 140 などです。

遷移金属元素である鉄 Fe、コバルト Co、ニッケル Ni と同じ系列の遷移金属元素、ルテニウム Ru 103 や Ru 106 および、ロジウム Rh 103 や Rh 106 などは、人体に影響はないのでしょうか。

ウラン U 235 の核分裂で製造されるすべての原子核が、不安定な放射性原子核であり、III－１５に述べた**原子核崩壊**を起こします。これらはいくつもの不安定な放射性原子核を経由して、長い時間かかって安定原子核に向かいます。

核分裂にはもう一つの重要な性質があります。核分裂に際し中性子を放出することです。



図表 III－７．核分裂生成物 FP の分布（物理学辞典 培風館 1984 年）

図表 III－８．主要な核分裂生成物と半減期（物理学辞典 培風館 1984 年）

核分裂生成物	^{235}U 核分裂収率（%）	半減期	核分裂生成物	^{235}U 核分裂収率（%）	半減期
^{85}Kr	1.5	10.76 年	^{131}I	2.9	8.04 日
^{89}Sr	4.8	50.5 日	^{132}Te	4.3	78 時間
^{90}Sr	5.8	28.5 年	^{133}Xe	6.5	5.29 日
^{90}Y		64.1 時間	^{137}Cs	5.9	30.1 年
^{91}Y	5.8	58.5 日	^{137}Ba		2.55 分
^{95}Zr	6.3	64.0 日	^{140}Ba	6.4	12.79 日
^{95}Nb		35.15 日	^{140}La		40.2 時間
^{99}Mo	6.1	66.0 時間	^{141}Ce	5.7	32.51 日
^{103}Ru	2.9	39.35 日	^{143}Pr	6.2	13.57 日
^{103m}Rh		56.1 分	^{144}Ce	6.0	284.8 日
^{106}Ru	0.38	368 日	^{144}Pr		17.3 分
^{106}Rh		30 秒	^{147}Nd	2.6	10.98 日
^{127m}Te	0.25	109 日	^{147}Pm		2.62 年
^{129m}Te	1.0	33.6 日			

組合せの核種は放射平衡にあることを示す。

ウラン 235 の原子核１個の分裂によって放出される中性子の数は 0～8 個で、平均 2.47 個です。この中性子がさらにウラン原子核に衝突し新たな核分裂を誘起します。このことによって次つぎと核分裂が進行します。このことを**連鎖反応**と呼びます。

ウラン 235 の核分裂の特徴を以下にまとめておきます。

① 一挙に原子(元素)番号が減少するので、反応前後に大きな**静止質量**の差が生じる。それに応じて一挙に大きなエネルギーが放出される

② 多くの異なった種類の不安定放射性原子核を製造する。III－１４の**図表** III－４に示したように，現在確認されている不安定放射性原子核の核種は 2000 以上に及ぶ。

これらのほとんどは発電用原子炉の内部で製造されたもの。**原子力発電**によるものは、種類が多く、生成される量も多い。今後その量は増加する一方でる。放射性廃棄物と呼ばれている

③ 生成された不安定放射性原子核は崩壊によって、原子(元素)番号が徐々に減少し核反応に伴って放射線と熱を出し続ける

④ 核分裂によって平均 2.47 個の中性子を放出する。この中性子が新たな核分裂を引き起こし、連鎖反応を誘起する

以上に述べた遅い中性子との衝突で、核分裂を起す原子核は、上記の**ウラン** 235 の他に、**ウラン** 233 や **プルトニウム** 239 が知られています。

後者は、**天然放射性ウラン** 238 が中性子を吸収して、**ウラン** 239 に変化し、ベータ崩壊を２度経た後、**プルトニウム** 239 が生成されます。

この**プルトニウム** 239 は、III－１８で述べたように，半減期が２万 4110 年の猛毒の放射性元素です。これも**放射性ウラン** 235 と同様、遅い中性子との衝突で核分裂を引き起こします。

プルトニウム 239 の核分裂は、**ウラン** 235 の核分裂と同様、多くの実験が行われ、**ウラン** 235 の核分裂と同様な結果が得られています。放出される中性子の平均個数も 2.49 個であり、ほとんど同じです。

III－２１．連鎖反応　臨界　濃縮ウラン　原子爆弾　原子力発電　劣化ウラン

遅い中性子によって誘起される**ウラン** 235 の核分裂では、III－２０で述べたように分裂した２つの原子核の他に中性子が放出されます。放出された中性子は、周りにある**ウラン** 235 の原子核に衝突して**連鎖反応**を起こします。

連鎖反応が継続されるためにはいくつかの条件が満たされなければなりません。

まず第１の条件は、放出される中性子の数が２個以上であることです。核分裂のために中性子が１個必要だから差引１個以上の中性子があれば、次の核反応がおこります。**ウラン** 235 や**プルトニウム** 239 の場合にはこの条件を満たしています。

第２の条件は、中性子のエネルギーについてです。核分裂を起こすためにはちょうどよい、さほど大きくないエネルギーを持

つ中性子が必要です。ところが核分裂で放出される中性子のエネルギーは大き過ぎるのです。中性子の速度を減らし、エネルギーを丁度よいエネルギーまで低下させないと次の核分裂が起りません。

中性子のエネルギーを低下させるための最も効率のよい物質は水 H_2O です。水分子中の水素原子に 18 回衝突するだけでちょうどよい早さになります。重水素では 22 回、炭素（グラファイトを使う）では 114 回です。これらを**減速材**と呼びます。周りに水や炭素がなく、**ウラン** 235 に衝突する場合、数千回の衝突が必要となります。

ウラン 235 だけで連鎖反応を起こすことを考えてみましょう。数千回の衝突の後に次の核分裂が起こります。次の核分裂が起きるには、**ウラン** 235 だけでできた 50 kg **の塊**が必要であると、言われています。

ウランの密度 18.95 gcm^{-3}（18.95×10^3 kgm^{-3}）を使うと、直径が約 17 cm の塊です。この**ウラン** 235 だけの塊の中では、中性子が減速されて次の核分裂反応を起こします。そして**連鎖反応**が始まります。

この量を**ウラン** 235 の**臨界質量**または単に**臨界**と呼びます。この量より小さい場合には、次の核分裂を起こす前に中性子が外部に飛び出してしまいます。連鎖反応は起こりません。この量を超えると連鎖反応が自動的に起こります。

ウラン 235 の自然界における**存在度**は 0.7%ですから、単純に計算すると、連鎖反応を起こすには、全体で 7143kg が必要です。この中に**ウラン** 235 が 50 kg 含まれるということです。

もし、**ウラン** 235 の濃度を 0.7%より上げて、**濃縮ウラン**にするとウラン全体の重量が少なくてすみます。

発電用原子炉では**濃縮度**が 3%前後です。原子爆弾における**濃縮度**は 90%だそうです。

濃縮度が 3 %のウランで言うと 1667 kg、直径が約 55 cm の塊です。その中に 50 kg の**ウラン** 235 が含まれており、連鎖反応が始まります。

発電用原子炉では直径 55 cm の塊になったら**臨界**を超えて次の**核分裂**が起こります。周りを水（中性子の減速材）で冷やしていますから条件は異なると思いますが、通常はその臨界を超えないように設計されているはずです。

何らかの理由で、ウランの塊が大きくなると、臨界を超え連鎖反応が始まります。核分裂が止まらなくなります。

1999 年の JCO **臨界事故**の時の作業員が見た**閃光**や 2011 年の福島第一原子炉の**メルトダウン**がその兆候です。正確な知識を持つことが重要です。

濃縮度 90 %の原子爆弾では、ウランが 56 kg となります。その中に 50 kg の**ウラン** 235 が含まれており連鎖反応が始まります。

広島に落とされた原子爆弾が 90 % に濃縮された 56 kg のウランだとします。それを半分ずつに分けて広島市上空まで運び、落下傘で落下させながら時限爆弾で 1 つの塊にしました。

上空で 1 つの塊になったウランは**臨界**を超え、連鎖反応が始まり**ウラン型原子爆弾**が炸裂しました。**広島型原爆**です。

長崎に落とされた原子爆弾は**プルトニウム** 239 の核分裂による原子爆弾でした。臨界以上のプルトニウムを、隙間だらけにして長崎上空まで運び、落下傘で落下させながら時限爆弾で固めて 1 つの塊にしたそうです。

上空で 1 つの塊になったプルトニウムは臨界を超え、連鎖反応が始まり**プルトニウム型原子爆弾**が炸裂しました。**長崎型原爆**です。

ウラン 235 を濃縮すると、残りの天然ウランは**ウラン** 235 の濃度が下ります。これを**劣化ウラン**と呼びます。

ウランは**密度**が高く、鉄の 2.41 倍、鉛の 1.67 倍です。**質量**が大きいので破壊力に優れており、**劣化ウラン弾**として戦争に使われました。もっぱら地下壕の攻撃に使われます。

天然ウランは**ウラン** 238 と**ウラン** 235 の混合物ですから劣化ウランは放射性物質です。放射性物質を戦争で、撒き散らしています。

核分裂で放出される中性子のエネルギーとその量を制御し、行き過ぎないように、しかし、逆に止まってしまわないように、絶妙に**臨界状態を維持**させているのが発電用原子炉です。そこでは水やカーボンが中性子の減速材として利用されています。

水は中性子の減速剤であると同時に、原子炉全体を冷却する役目があります。この時に熱っせられた水を発電に利用します。これが**原子力発電**です。これだけでみると一石三鳥以上の素晴らしい装置です。

しかし、人類を始めとする地球上の生物にとって、素晴らしいものでしょうか。決してそうではありません。

原子力発電で放射性物質をどんどん製造しています。それは人類の生存に対する挑戦です。放射能は人類だけでなく、地球上の全ての生物にとって有害です。

突発事故が起っても、**臨界質量**を越える塊を絶対に作ってはいけないのです。暴走を始める危険性は全くないのでしょうか。

2011 年 3 月 11 日の地震や津波は、その危険性があることを見せつけました。今回の事故の後、放射能が垂れ流しにされています。放射能で地球を汚染し続けています。

地震王国日本で地震がもし原子力発電所の直下で起ればどうなるのでしょう。何の対策も打てないでしょう。放射能が強くて誰も近づけないからです。今回のような悠長なことはできないでしょう。取り返しのつかないことになります。

事故による地球環境の汚染は、世界的な規模になります。今回の事故でも、すでに地球規模の放射能汚染です。

核分裂や原子爆弾について、物理学辞典（培風館 1984 年）を参考にしました。

III－２２．核分裂によって放出されるエネルギーの計算

核分裂によって放出されるエネルギーの大きさを計算してみましょう。例としてウラン 235 の核分裂を取り上げましょう。

核反応の例としてよくあげられるのは次の反応です。

$${}^{235}_{92}U + n => {}^{92}_{36}Kr + {}^{141}_{56}Ba + 3n \quad (III-7)$$

$${}^{235}_{92}U + n => {}^{94}_{38}Sr + {}^{140}_{54}Xe + 2n$$

$${}^{235}_{92}U + n => {}^{97}_{37}Rb + {}^{137}_{55}Cs + 2n$$

放出されるエネルギーの計算には、左辺の質量の総和と右辺の質量の総和を求め、

その差を計算することが必要です。そのためには、これらの原子核の質量が必要です。

図表 III－９に、必要な原子核の質量（[u]および[kg]）を一覧しました。左辺の放射性ウラン 235 の質量は測定値があります。半減期が 7 億年と非常に長い原子核です。

この表に、陽子と中性子の静止質量の値を掲載しました。この値は、III－６の**質量欠損**の計算にも使いました。

一方、右辺の放射性原子核の質量はデータブックにはありません。その値を推測するために安定原子核の値を引用しました。その中で最大質量の原子核の値を用います。

ウラン 235 原子核 1 個が分裂する場合の質量の差を、核分裂の式 (III－7) について計算します。

$$\text{左辺の質量 [u]} = {}^{235}_{92}\mathrm{U} + \mathrm{n}$$
$$= 235.04392 + 1.0086649$$
$$= 236.05259\ \mathrm{u}$$

$$\text{右辺の質量 [u]} = {}^{92}_{36}\mathrm{Kr} + {}^{141}_{56}\mathrm{Ba} + 3\mathrm{n}$$
$$= 91.90607 + 140.90313$$
$$+1.0086649 \times 3$$
$$= 235.83528\ \mathrm{u}$$

$$\text{質量の差 } \Delta m_{\mathrm{U}} = \text{左辺} - \text{右辺}$$
$$= 236.05259 - 235.83528$$
$$= 0.21731\ \mathrm{u}$$
$$= 0.21731\ \mathrm{u} \times 1.660539 \times 10^{-27}\ \mathrm{kg/u}$$
$$= 0.36085 \times 10^{-27}\ \mathrm{kg}$$
$$\therefore$$
$$\Delta m_{\mathrm{U}} = 0.36085 \times 10^{-27}\ \mathrm{kg} \qquad (\text{III}-8)$$

$$= \frac{0.36085 \times 10^{-27}\ \mathrm{kg}}{1.78299 \times 10^{-36}\,\mathrm{kg}/_{\mathrm{eV}}}$$
$$= 202.4 \times 10^{6}\ \mathrm{eV}$$

文献によると、1 個の**ウラン** 235 の核分裂による放出エネルギーは、約 200 MeV となっており、上記の計算値と一致します。

全体の質量差の式 (III－8) の Δm_{U} を

式(III－3)　　$E_{\mathrm{d}} = \Delta mc^2$　の Δm に代入すると、放出されるエネルギーが単位 [J] で求まります。**ウラン** 235 原子 1 個の核分裂における放出エネルギー E_{d0U} は次式となり、単位は J です。

$$E_{\mathrm{d0U}} = \Delta m_{\mathrm{U}} \mathrm{c}^2$$

$$= 0.36 \times 10^{-27}\mathrm{kg} \times (3 \times 10^{8})^2\ \mathrm{m^2s^{-2}}$$

$$= 3.24 \times 10^{-11}\ \mathrm{kgm^2s^{-2}} (= \mathrm{J})$$

ウラン 235 の原子 18 g（18×10^{-3} kg, 水 1 mol の質量と同じ）が核分裂した場合を考えましょう。

ウラン 235 の原子量を 235 u、アボガドロ数 N_{A} を 6.02×10^{23} として、分裂した原子の総数 n_{U} が求まり、放出されるエネルギー E_{TU} が次のようになります。

$$E_{\mathrm{TU}} = n_{\mathrm{U}} E_{\mathrm{d0U}} = \frac{18}{235} N_{\mathrm{A}} E_{\mathrm{d0U}}$$
$$= \frac{18 \times 6.02 \times 10^{23} \times 3.24 \times 10^{-11}}{235}$$
$$= 1.3 \times 10^{12}\ \mathrm{J} \qquad (\text{III}-9)$$

一方、温度が 0℃の水 18 g（1 mol）が、100℃で沸騰して蒸気に変わるときに必要なエネルギー E_{W} は、水の熱容量と気化熱を考慮すると次のようになります。

$$E_{\mathrm{W}} = (100 + 540)\frac{\mathrm{kcal}}{\mathrm{kg}}$$

$$\times 4.2 \frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kcal}} \times 18 \cdot 10^{-3}\mathrm{kg}$$

$$= 4.84 \times 10^{4}\ \mathrm{J} \quad \cdot\ \cdot \quad (\text{III} - 10)$$

式 (III－9) と式 (III－10) の数値の大きさの違いは、27×10^{6} です。 質量 1 g のウラン 235 の核分裂によって約 27 トンの水を沸騰させることができる計算になります。

名　称	元素番号 p	質量数 $n+p$	元素記号	原子 1 個の質量 単位[u] m	核子 1 個当りの質量 単位[u] $m/(n+p)$		原子 1 個の質量 単位[kg] $\times 10^{27}$
中性子		1	n	1.008665	1.008665		1.6749
陽子		1	p	1.007277	1.007277		1.6726
電子			e	0.0005486			0.00091
水素	1	1	H	1.007825	1.007825		1.6735
	1	2	D	2.014100	1.007050		3.4449
ヘリウム	2	3	He	3.01603	1.00534		5.0082
	2	4	He	4.00260	1.00065		6.6465
クリプトン	36	78	Kr	77.92036	0.99898		129.390
	36	80	Kr	79.91638	0.99895		132.704
	36	82	Kr	81.91348	0.99894		136.021
	36	83	Kr	82.91413	0.99897		137.682
	36	84	Kr	83.91150	0.99895		139.338
	36	86	Kr	85.91061	0.99896		142.658
	36	92	Kr	91.90417	0.99896	平 均	152.611
				91.90607	0.99898	最 大	152.614
ルビジウム	37	85	Rb	84.91179	0.998962		140.999
	37	87	Rb	86.90919	0.998956		144.316
	37	97	Rb	96.89904	0.998959	平 均	160.9046
				96.89934	0.998962	最 大	160.9051
ストロンチウム	38	84	Sr	83.91342	0.998969		139.342
	38	86	Sr	85.90926	0.998945		142.656
	38	87	Sr	86.90888	0.998953		144.316
	38	88	Sr	87.90561	0.998927		145.971
	38	94	Sr	93.90116	0.998949	平 均	155.927
				93.90309	0.998969	最 大	155.930
キセノン	54	124	Xe	123.90590	0.999241		205.751
	54	126	Xe	125.90427	0.999240		209.069
	54	128	Xe	127.90353	0.999246		212.389
	54	129	Xe	128.90478	0.999262		214.051
	54	130	Xe	129.90351	0.999258		215.710
	54	131	Xe	130.90508	0.999275		217.373
	54	132	Xe	131.90415	0.999274		219.032
	54	134	Xe	133.90539	0.999294		222.355
	54	136	Xe	135.90722	0.999318		225.679
	54	140	Xe	139.89746	0.999268	平 均	232.305
				139.90452	0.999318	最 大	232.317
セシウム	55	133	Cs	132.90545	0.999289		220.695
	55	137	Cs	136.90260	0.999289		227.332
バリウム	56	130	Ba	129.90632	0.999279		215.715
	56	132	Ba	131.90506	0.999281		219.033
	56	134	Ba	133.90451	0.999287		222.354
	56	135	Ba	134.90569	0.999301		224.016
	56	136	Ba	135.90458	0.999298		225.675
	56	137	Ba	136.90583	0.999313		227.337
	56	138	Ba	137.90525	0.999313		228.997
	56	141	Ba	140.90076	0.999300	平 均	223.971
				140.90313	0.999313	最 大	223.975
ウラン	92	234	U	234.04095	1.000175		388.63
	92	235	U	235.04392	1.000187		390.30
	92	238	U	238.05078	1.000213		395.29

（前頁の図表 III－９のキャプション）

図表 III－９．核分裂、核融合によって減少する質量の計算に必要な原子核および原子、粒子の静止質量（[u], [kg]）の一覧

III－２３．核融合によって放出されるエネルギー　太陽エネルギーの源　水素爆弾

反応の前後で質量の差が生じるもう一つの核反応は**核融合**です。**図表 III－３**のグラフの左の坂道を降りる反応です。われわれの**太陽のエネルギー源**は核融合です。

太陽の中では４個の水素原子核が１個のヘリウム原子核をつくる核反応です。次の式で示されます。この反応の特徴は**放射性物質を作らない**ことです。

$$4\,{}^{1}_{1}\mathrm{H} = {}^{4}_{2}\mathrm{He} \qquad (\mathrm{III}-11)$$

非常に単純な核反応です。この時放出されるエネルギーを計算しましょう。計算に必要な水素とヘリウムの原子核の核子の質量を、**図表 III－９**に挙げておきました。

左辺の質量、右辺の質量、そしてその質量の差から、エネルギーを計算しましょう。

$$左辺の質量\ [\mathrm{u}] = 4 \times 1.007825$$
$$= 4.0313\ \mathrm{u}$$

$$右辺の質量\ [\mathrm{u}] = 4.0026\ \mathrm{u}$$

$$質量の差\ \Delta m_{\mathrm{He}} = 左辺 - 右辺$$
$$= 4.0313 - 4.0026 = 0.0287\ \mathrm{u}$$
$$= 0.0287\ \mathrm{u} \times 1.660539 \times 10^{-27}\ \frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{u}}$$
$$= 0.04765 \times 10^{-27}\ \mathrm{kg} \qquad (\mathrm{III}-12)$$
$$= \frac{0.04765\times10^{-27}\ \mathrm{kg}}{1.78299\times10^{-36}\ \mathrm{kg}/\mathrm{eV}}$$
$$= 26.7 \times 10^{6}\ \mathrm{eV}$$

ヘリウム原子１個をつくる核融合反応によって、26.7 MeV のエネルギーを放出します。

式(III－3) の $E_{\mathrm{d}} = \Delta mc^2$ の Δm に、核反応前後の質量差 Δm_{He} 式 (III－12)を代入すると、放出されるエネルギーが単位 [J] で求まります。
ヘリウム４の原子核１個を核融合でつくりだすときの放出エネルギー E_{d0He} は、次式となります。

$$E_{\mathrm{d0He}} = \Delta m_{\mathrm{He}} c^2$$
$$= 0.0476 \times 10^{-27}\mathrm{kg} \times (3 \times 10^{8})^2\ \mathrm{m}^2/\mathrm{s}^2$$
$$= 0.428 \times 10^{-11}\ \mathrm{kgm}^2/\mathrm{s}^2$$
$$= 0.428 \times 10^{-11}\ \mathrm{J}$$

ヘリウム原子 18g（18×10^{-3} kg, 水 1 mol の質量と同等）をつくりだす核融合を考えましょう。ヘリウムの原子量を 4 u、アボガドロ数 N_{A} を 6.02×10^{23} とすると、核融合で生じたヘリウム原子の総数 n_{He} が求まり、放出されるエネルギーE_{THe} が次のようになります。

$$E_{\mathrm{THe}} = n_{\mathrm{He}} E_{\mathrm{d0He}} = \frac{18}{4} N_{\mathrm{A}} E_{\mathrm{d0He}}$$
$$= \frac{18 \times 6.02 \times 10^{23} \times 0.428 \times 10^{-11}}{4}$$
$$= 11.6 \times 10^{12}\ \mathrm{J} \qquad (\mathrm{III}-13)$$

温度が 0℃の水 1 mol が沸騰して蒸気に変わるときに必要なエネルギーE_{W} は、水の

熱容量と気化熱を考慮すると、式(III－10)になります。

$$E_{\mathrm{W}} = (100 + 540)4.2 \times 18$$
$$= 4.84 \times 10^{4}\ \mathrm{J} \qquad (\mathrm{III}-10)$$

式（III－10）と式（III－13）の数値の大きさの違いは、2.4×10^{12}倍です。

太陽内部のこの反応は、

圧力が 1.4×10^{11} 気圧=1.42×10^{16} Pa
温度が 1.5×10^{7} K
密度が 1.2×10^{5} kg/m^3

の条件下で起こる核反応であり、地球上ではこの条件を作り出すことができないことが分っています。放射性物質を生成しないこの反応は、後世に負の遺産を残さない反応ですが、残念ながらこの研究をあきらめました。

それに代わって類似の核反応を模索し、地球上でもいくつかの核融合反応が可能であることがわかりました。それらを次に示します。

$${}^{2}_{1}\mathrm{H} + {}^{3}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{1}_{0}\mathrm{n}$$

D-T 反応と呼ばれ実用に向けて最も研究されている反応です。その他研究対象は

$${}^{2}_{1}\mathrm{H} + {}^{3}_{2}\mathrm{He} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{1}_{0}\mathrm{p}$$

$${}^{2}_{1}\mathrm{H} + {}^{2}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{3}_{1}\mathrm{H} + {}^{1}_{0}\mathrm{p}$$

${}^{2}_{1}\mathrm{H} + {}^{2}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{3}_{2}\mathrm{He} + {}^{1}_{0}\mathrm{n}$　などがあります。

ここで、${}^{1}_{0}\mathrm{n}$ は中性子、${}^{1}_{0}\mathrm{p}$ は陽子を表わします。${}^{2}_{1}\mathrm{H}$ は記号 D で表される重水素であり、自然界に存在する水素の安定同位体です。

${}^{3}_{1}\mathrm{H}$ は記号 T で表される**三重水素**、**トリチウム**であります。これは前にも述べたように、水素の不安定同位体であり放射線を放出する放射性物質です。

トリチウムは化学的には水素と同じ物質であり、大量な水を必要とする生体内部に入り、内部被曝の原因となります。生物にとって大変危険な不安定元素です。

上に示した核融合反応のなかで、D-T 核反応が実用化に向けて研究が進められています。この反応には**水素 3**（**トリチウム** ${}^{3}_{1}\mathrm{H}$）が必要です。

そのためリチウム Li の核分裂反応を補助反応として**水素 3** を製造しています。その核反応は核分裂で、${}^{6}_{3}\mathrm{Li} \rightarrow {}^{3}_{1}\mathrm{H} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$ です。

核融合を使った兵器は**水素爆弾**です。水素爆弾は、D と Li 6 を使って製造された兵器です。D-T 核融合反応と Li の核分裂反応を同時に起こし、T の生成と D-T 核融合を同時に行う、能率的な反応のように思えます。この時の起爆剤としては原子爆弾を使うそうです。詳しくは分かりません。

III－２４．天然に存在する放射性物質

地球上で**天然に存在する放射性物質**は、以下の３つのグループに分類されます。

① ^{235}U, ^{238}U, ^{232}Th, ^{237}Np などの長寿命の放射性元素を親とする崩壊系列に属すもの

② ^{40}K　系列に属さない長寿命の核種

③ 高層大気中で、宇宙線による核反応で作られるもの、および、その時放出される中性子によって二次的な核反応で作られる放射性核種で、^{3}H, ^{7}Be, ^{10}Be, ^{14}C, ^{22}Na, ^{32}P, ^{35}S, ^{36}Cl などがあります。

①は、これまで詳しく述べました。ここでは、②の ^{40}K および ③の ^{3}H、^{14}C について詳しく述べることにします。

これらのうち最も多く生体に取り込まれるものは、1 価のアルカリ金属であるカリウム 40 ($^{40}_{19}$K) です。次の練習問題を使って、人体に取り込まれるカリウム 40 ($^{40}_{19}$K) の量を計算してみましょう。

問題　地球上に天然に存在する放射性同位元素**カリウム** 40 ($^{40}_{19}$K)は、同位体存在度 1.18×10^{-4} 、半減期　$1.25\cdot10^{9}$ y である。質量 60 kg の成人体内には、およそ 120 g のカリウム元素があるとして、体内の放射能は何ベクレルか。ただし、K の原子量を 39.1 とせよ。

また、このとき放射する 1.46MeV の γ 線の波長は、波長が 0.1 nm の X 線と比べてどれぐらい異なるか。 1 eV は$1.62\cdot10^{-19}$ J であるとして計算せよ。

考え方の指針

体内の K の総原子数 S_{KT} は、そのモル数 M_{K} とアボガドロ数 $6.0\cdot10^{23}$を使って、

$$S_{\mathrm{KT}}=M_{\mathrm{K}}\cdot6.0\cdot10^{23}=\frac{120}{39.1}\cdot6.0\cdot10^{23}$$

$$=1.84\times10^{24}\text{個}$$

また、地球上における**放射性** K40 の存在度が 1.18×10^{-4} であることを使って、体内にある**放射性** K40 の総数 N_{K40} は、

$$\begin{aligned}N_{\mathrm{K40}}&=S_{\mathrm{KT}}\times1.18\times10^{-4}\\&=1.84\times10^{24}\times1.18\times10^{-4}\\&=2.17\times10^{20}\text{個}\end{aligned}$$

一方、**放射性** K40 ($^{40}_{19}$K) の半減期 T_{K40}は、

$$\begin{aligned}T_{\mathrm{K40}}&=1.25\cdot10^{9}\ \mathrm{y}\\&=1.25\cdot10^{9}\cdot365.25\cdot24\cdot60\cdot60\ \mathrm{s}\\&=3.94\cdot10^{16}\ \mathrm{s}\end{aligned}$$

従って、1 秒当たりの K40 の崩壊数 n_{K40} は、崩壊の確率 λ と半減期 T_{K40} の関係式 (III－6) を使って、

$$\begin{aligned}n_{\mathrm{K40}}&=\lambda N_{\mathrm{K40}}=\frac{0.693}{T_{\mathrm{K40}}}N_{\mathrm{K40}}\\&=\frac{0.693\cdot2.18\cdot10^{20}}{3.94\cdot10^{16}}\\&\cong3800\ \mathrm{Bq}\ \text{ベクレル}\end{aligned}$$

人は誰でもこの程度の放射能を常に体内に持っており被曝しています。1 kg あたり、およそ 63 Bq です。

次に γ 線の波長を Λ（ラムダ、ギリシャ大文字)、振動数を ν（ニュー）とすると、光速 c との関係は、 $\nu\Lambda=c$ である。

また、γ 線のエネルギー ε（イプシロン）と振動数 ν の関係は $h\nu=\varepsilon$ である。

これらの関係を使って、νを消去し、波長 Λ を求めると、

$$\Lambda=\frac{c}{\nu}=\frac{c}{\frac{\varepsilon}{\mathrm{h}}}=\frac{\mathrm{ch}}{\varepsilon}$$

ここで、h はプランク定数、$6.63\cdot10^{-34}$Js、c は真空中の光速、$3.0\cdot10^{8}\ \mathrm{ms^{-1}}$ である。

γ 線のエネルギー　$\varepsilon=1.46\ \mathrm{MeV}$ に、$1\ \mathrm{eV}=1.60\cdot10^{-19}\ \mathrm{J}$　を使うと、

$$\Lambda=\frac{3\cdot10^{8}\,{}^{\mathrm{m}}/_{\mathrm{s}}\,6.63\cdot10^{-34}\mathrm{Js}}{1.46\mathrm{MeV}}$$

$$=\frac{19.9\cdot10^{-26}}{1.46\cdot10^{6}\mathrm{eV}1.60\cdot\frac{10^{-19}\mathrm{J}}{\mathrm{eV}}}$$

$$=8.51\cdot10^{-13}\mathrm{m}=0.85\ \mathrm{pm}$$

この γ 線は、波長 0.1 nm の X 線と比較して波長は 100 分の 1 以上短く、エネルギーは 100 倍以上大きい電磁波です。ただし、nm は 10^{-9} m、pm は 10^{-12} m です。

水素の同位体である $^{3}_{1}$H **三重水素(トリチウム)**は、原子核の中に陽子を 1 個、中性子を 2 個持つ不安定な放射性水素です。水素ですからほとんどは水になります。

トリチウムは大気中で宇宙線によって作られます。生成されたトリチウムは半減期 $12.33\ \mathrm{y}=3.89\times10^{8}\ \mathrm{s}$ で減少します。生成量と減少量は、長い年月の間に平衡状態になります。その時の濃度は水素原子 10^{18} 個の中にトリチウム原子 1 個の割合です。

宇宙線によって生じた $^{3}_{1}$H は、先にのべたようにほとんどは水となります。水中のトリチウム濃度が大気中の平衡濃度に等しくなると、1 ℓ の水は 0.12 Bq の放射能を持ちます。

これは天然に存在してきた放射能の一つです。ところが現在トリチウムの濃度が上がっています。1958 年に始まった**水爆実験**で突然増加し、その後、度重なる**原爆実験**によるトリチウムの大気への放出、世界各国に建設された**発電用原子炉**からのトリチウムを含む**廃水の放出**のために増加の一途を辿っています。

現在では 1 ℓ の水中のトリチウムの濃度が一桁上昇し、1~3 Bq になっています。この 60 年の間に地球全体の海の水が $1\sim3\ \mathrm{Bq}\ell^{-1}$の濃度になるほどトリチウムが排出されたわけです。地球上の全水量を約 $1.4\times10^{21}\ell$ とすると、この間に放出したトリチウム放射能の総量は、$(2\sim5)\times10^{21}$ Bq です。これからどうなるのでしょう。

最近、日本政府は、今後 **20 万年**の間、**放射性廃棄物を管理する**と発表しました。20 **万年**とは**ホモサピエンス**の登場以来現在までの年月です。日本政府は存在するでしょうか。しかもその管理すると言う廃棄物の中にはトリチウムは含まれません。海に流すことが前提です。海水のトリチウム濃度はどこまで増加するのか心配です。

天然に存在する炭素の同位体、**炭素** 14 $^{14}_{6}$C は考古学的年代測定に使われます。

放射性炭素 14 は、窒素原子核と、宇宙線によって大気上層部で生成された中性子との衝突で、**二次的**に作られます。生成された $^{14}_{6}$C は、直ちに酸素と結合し二酸化炭素になり、大気中だけでなく海水に拡散します。

二酸化炭素中の $^{14}_{6}$C は光合成によって植物に取り込まれ、食物連鎖によって動物にも広く分布して行きます。光合成によって取り込まれる二酸化炭素は、大気中の炭素 14 の濃度を反映しています。

放射性炭素 14 は、**半減期**が $5730\ \mathrm{y}=1.8\times10^{11}\ \mathrm{s}$ であり、生物中でのこの減少は**光合成**に使われた時点から始まるとみなします。ですから、**生物活動停止**後は新たに取り込まれることはなく、炭素 14 は法則に従って減少します。

生物の遺骸から得られた炭素 14 の、炭素 12 に対する濃度の比、**同位体比**からその生物の生きていた年代の測定が可能となるのです。木材の示す年輪は、1 輪毎にその同位体比が変化しています。

地球上の地域による$^{14}_{6}\mathrm{C}$濃度の違いはありません。また、植物の種類による $^{14}_{6}\mathrm{C}$ 取り込み方の違いがないことも明らかになっています。

最近になって、宇宙線を原因とする炭素14 の生成量、従って、放射性二酸化炭素の生成量が、毎年不規則に変動していることが分かってきました。

また、核兵器実験の開始前は、大気中の二酸化炭素の炭素1 kg 中の $^{14}_{6}\mathrm{C}$ 濃度は 230 Bq でした。その後、核実験が頻繁に行われたため濃度が 450 Bq まで増加しました。しかし、現在では元の値に戻りつつあります。

福井県の若狭三方五湖(わかさみかたごこ)近辺は考古学遺跡の宝庫です。この湖の一つ、水月湖(すいげつこ)の湖底から、過去 7 万年におよぶ縞々(しましま)が見つかりました。この縞々は年縞(ねんこう)と名付けられた層状の土壌です。1 年毎に堆積した 7 万枚以上の層状の地下組織です。

縞の枚数を数えるとその層が何年前の縞かが分かります。各層の土壌中の生物遺骸の $^{14}_{6}\mathrm{C}$ から**同位体比**の測定が行われました。

この値を使って、世界中の$^{14}_{6}\mathrm{C}$測定値それ自身を較正することができ、2012 年には、水月湖のデータが考古学的年代決定の世界標準となりました。

従来の$^{14}_{6}\mathrm{C}$年代測定法では、1 万年前の測定では約±100 年の誤差がありましたが、この方法では、誤差は、1 万年前で ±29年、4 万年前で±98年、5 万年前で±169 年にまで縮まりました。(**中川毅著 時を刻む湖** 2015 年 9 月 9 日 **岩波科学ライブラリ**)

II－２５．人に与える放射線の影響　放射線等価線量 H と放射線実効線量 E および それらの単位シーベルト[Sv = J/kg]

生体(人体)が受ける放射線による障害とその防止の諸規則は、1990 年の**国際放射線防護委員会(ICRP)の勧告**に従っています。

放射線の影響は III－１６で説明した**放射線吸収線量** D から計算します。この D は放射線のエネルギーが物体内でどれだけ吸収されるかを示す量です。体内では体内物質の化学結合や DNA の切断・破壊、細胞の破壊、熱の発生などが考えられます。被曝面積や積算時間によって異なるでしょう。

総合的な観点から、放射線の人体への影響は、次の二点を考慮します。

第一は、放射線が、α 線、β 線、γ 線、X 線、中性子、各分裂片などのうち、**どの放射線による被曝か**

図表 III－１０．放射線加重係数（W_R）

放射線の種類		W_R
X 線やガンマ線などの光		1
β 線(電子)やミューオンなどの軽粒子		1
中性子 エネルギー	10 keV 以下	5
	10 - 100 keV	10
	100 - 2,000 keV	20
	2,000 - 20,000 keV	10
	20,000 keV 以上	5
陽子 エネルギー	20,000 keV 以上	5
α 線、核分裂片、重原子核		20

第二は、**どの組織や臓器が被曝したか**

両者とも、それぞれ係数が決められており、III－１６の**放射線吸収線量** D にかけ算して使います。

第一の係数は、**放射線加重係数** W_R であり、**図表 III－１０**に示しました。**放射線吸収線量** D $\left[グレイ\ \mathrm{Gy} = \mathrm{Jkg^{-1}}\right]$ に、放射線の種類ごとに定められた**係数** W_R をかけ算します。

これを**放射線等価線量**と呼び、H で表わします。

$$H[\mathrm{Sv}] = W_R D_R[\mathrm{Gy}]$$

図表 III－１１

臓器加重係数 （W_T）

組織・臓器	W_T
生殖腺	0.20
骨髄(赤色)	0.12
結腸	0.12
肺	0.12
胃	0.12
膀胱	0.05
乳房	0.05
肝臓	0.05
食道	0.05
甲状腺	0.05
皮膚	0.01
骨表面	0.01
その他	0.05

放射線等価線量 H の単位は、**シーベルト** $\mathrm{S_V} = \mathrm{Jkg^{-1}}$ で、組み立て単位は、**グレイ** $\mathrm{Gy} = \mathrm{Jkg^{-1}}$ と同じです。**放射線加重係数** W_R は、単位のない係数だからです。

第二の係数は、**組織加重係数** W_T であり、**図表 III－１１**に示しました。放射線の人体への影響は、被曝した臓器によって異なります。

先に述べた**放射線等価線量** H に組織や臓器の感受性を考慮した係数を加味しなければなりません。

図表 III－１１から分かるように、この係数の総和は１です。体全体で１になります。各々の臓器に対して被曝した**放射線等価線量** H を推測し、各々の臓器の係数をかけ算して和をとり、**被曝量**とします。

図表 III－１２．被曝放射線の大きさに対する人体の影響（単位 mSv, 1mSv=1000μSv）

実効線量 E[mSv]　　　　内訳

0.05　　原子力発電所の事業所境界での 1 年間の積算線量
0.1-0.3　　胸部 X 線撮影 1 回分の線量
1　　一般公衆が 1 年間にさらされてよい人工放射線の限度
2　　妊娠中の女性の放射線業務従事者が妊娠を知ったときから出産までにさらされてよい腹部表面の放射線の限度
2　　広島における爆心地から 12 km 地点での被爆量。原爆手帳が与えられる
2.4　　1 年間に自然環境から人が受ける放射線の世界平均
4　　胃の X 線撮影 1 回分の線量
5　　妊娠可能な女性の放射線業務従事者が法定の 3 ヶ月間にさらされてよい放射線の限度
7-20　　X 線 CT による撮像 1 回分の線量
50　　放射線業務従事者（妊娠可能な女子を除く）が 1 年間にさらされてよい放射線の限度
81　　広島における爆心地から 2 km 地点での被爆量。爆発後 2 週間以内に 2 km 以内に立ち入った人に原爆手帳が与えられる
100　　人間の健康に確率的に影響が出ると証明されている放射線の最低値
放射線業務従事者（妊娠可能な女子を除く）が、法定の 5 年間にさらされてよい放射線の限度。放射線業務従事者（妊娠可能な女子を除く）が 1 回の緊急作業でさらされてよい放射線の限度
250　　このランク以下は、一度にまとめて放射線をあびた場合である
白血球の減少。福島第一原子力発電所事故処理にあたる放射線業務者（妊娠可能な女子を除く）が 1 回の緊急作業でさらされてよい放射線の限度
妊娠可能な女子には緊急作業は認められていない
500　　リンパ球の減少
1000　　急性放射線障害。悪心(吐き気)、おうどなど。水晶体混濁
2000　　出血、脱毛など。5 %の人が死亡する
3000- 5000　　50 %の人が死亡する
7000-10,000　　99 %の人が死亡する
10.000 以上　　99 %の人が死亡する

癌発症率の表　　Number of cases per 100,000　persons exposed to a single dose of 0.1Gy.

男性　年齢	0	5	10	15	20	30	40	50	60	70	80
胃	76	65	55	46	40	28	27	25	20	14	7
結腸	336	285	241	204	173	125	122	113	94	65	30
肝臓	61	50	43	36	30	22	21	19	14	8	3
肺	314	261	216	180	149	105	104	101	89	65	34
前立腺	93	80	67	57	48	35	35	33	26	14	5
膀胱	209	177	150	127	108	79	79	76	66	47	23
その他	1123	672	503	394	312	198	172	140	98	57	23
甲状腺	115	76	50	33	21	9	3	1	0.3	0.1	0
全固形癌	2326	1667	1325	1076	881	602	564	507	407	270	126
白血病	237	149	120	105	96	84	84	84	82	73	48
全癌	2563	1816	1445	1182	977	686	648	591	489	343	174

女性　年齢	0	5	10	15	20	30	40	50	60	70	80
胃	101	85	72	61	52	36	35	32	27	19	11
結腸	220	187	158	134	114	82	79	73	62	45	23
肝臓	28	23	20	16	14	10	10	9	7	5	2
肺	733	608	504	417	346	242	240	230	201	147	77
乳	1172	914	712	553	429	253	141	70	31	12	4
子宮	50	42	36	30	26	18	16	13	9	5	2
卵巣	104	87	73	60	50	34	31	25	18	11	5
膀胱	212	180	152	129	109	79	78	74	64	47	24
その他	1339	719	523	409	323	207	181	148	109	68	30
甲状腺	634	419	275	178	113	41	14	4	1	0.3	0
全固形癌	4592	3265	2525	1988	1575	1002	824	678	529	358	177
白血病	185	112	86	76	71	63	62	62	57	51	37
全癌	4777	3377	2611	2064	1646	1065	886	740	586	409	214

癌死亡率の表　　Number of deaths per 100,000　persons exposed to a single dose of 0.1Gy.

男性　年齢	0	5	10	15	20	30	40	50	60	70	80
胃	41	34	30	25	21	16	15	13	11	8	4
結腸	163	139	117	99	84	61	60	57	49	36	21
肝臓	44	37	31	27	23	16	16	14	12	8	4
肺	318	264	219	182	151	107	107	104	93	71	42
前立腺	17	15	12	10	9	7	6	7	7	7	5
膀胱	45	38	32	27	23	17	17	17	17	15	10
その他	400	255	200	162	134	94	88	77	58	36	17
全固形癌	1028	781	641	533	444	317	310	289	246	181	102
白血病	71	71	71	70	67	64	67	71	73	69	51
全癌	1099	852	712	603	511	381	377	360	319	250	153

女性　年齢	0	5	10	15	20	30	40	50	60	70	80
胃	57	48	41	34	29	21	20	19	16	13	8
結腸	102	86	73	62	53	38	37	35	31	25	15
肝臓	24	20	17	14	12	9	8	8	7	5	3
肺	643	534	442	367	305	213	212	204	183	140	81
乳	274	214	167	130	101	61	35	19	9	5	2
子宮	11	10	8	7	6	4	4	3	3	2	1
卵巣	55	47	39	34	28	20	20	18	15	10	5
膀胱	59	51	43	36	31	23	23	22	22	19	13
その他	491	287	220	179	147	103	97	86	69	47	24
全固形癌	1717	1295	1051	862	711	491	455	415	354	265	152
白血病	53	52	53	52	51	51	52	54	55	52	38
全癌	1770	1347	1104	914	762	542	507	469	409	317	190

放射線の被曝に関して、強い放射線については結果がはっきりしています。問題は、弱い放射線による長時間経ってからの影響が問題です。

弱い放射線による長時間後の影響について、**「閾（しきい）値」**があるかないかが議論になっています。閾値とは、「ここまでは大丈夫であり、それ以上はいけない」といった境界のことです。境界があるかどうかを議論しています。無意味な議論かもしれません。

全米科学アカデミー「電界放射線の生物環境に関するベイル（Beir）委員会」の第7次報告書2006年では、多くのデータを分析し、**「閾値はない」**と、考えるのが妥当であるとの結論に達しています。

閾値がないとは、**「どんなに弱い放射線でも、あびるとそれだけリスクが増加する」**ということです。

同時に発表された、癌の発症のリスクと癌による死亡のリスクの年齢別の表を、前頁の**図表** III－１３に示しておきます。

この表の数値は、100 mGy（**ミリグレイ**）**の放射線を５年の間に一回あびた場合の癌発症と死亡のリスクの増加です。**

一回あびるとは、一度に 100 mGy の放射線をあびる場合もあるでしょうし、５年間徐々に放射線をあび続けて合計が 100 mGy になる場合もあるでしょう。

こういった場合のリスクの増加を、人口 100,000 人に対する人数の増加で表わしています。γ線やＸ線の場合には、前に述べた**放射線加重係数** W_R が 1 ですから、**放射線等価線量**は 1 kg 当たり 100 mSv（ミリシーベルト）と言うことです。

このリスクは全死亡率に対する癌の占める割合を１％ 増加させる数値です。女性と子供のリスクが成人男性と較べて高くなっています。日本の人口は１億(10^8)人ですから、全部の日本人が５年間で１kg 当たり、100 mSv の放射線をあびる状態になった場合を考えると、リスクは表の数値の 1000 倍となります。かなり大きな数値にみえます。

しかし、現在日本で、癌で亡くなる人の割合は、30％を超えています。上の記述は、「100 mSv の被曝がその値を１％押し上げる効果がある」と言う数値です。

（前頁の表のキャプション）

図表 III －１３．弱い放射線による癌発症、癌死亡リスク

第 IV 章　われわれを取り巻くもの

第 IV 章のまえがき

第 IV 章は、我々の身の回りにあるものを対象にして、A、B、C、D、E、F と、6 つの項目に分けて物理学の話を進めます。話題の中心になる項目は以下の通りです。

A **大気たいき**
B **水**
C **熱と温度**
D **波・音・光**
E **電気・磁気そして電磁波**
F **太陽の温度・地球の温度**

これだけ見ても、いかに我々は物理学に取り巻かれているかがお分かりいただけると思います。我々に無関係なものはなに一つありません。

この章で最終目標としたのは、**地球の温暖化**を理解することです。そのための必要な項目を落とさないように努めました。温暖化の問題はもう**待った**のないところまで来ていると恐れています。

60 年以上昔の話です。中学生の私は夏休みの自由研究として、気温の測定を行ないました。当時はまだエアコンはありません。狭いアパートに一家は暮らしていました。南北に大きな窓があり、風通しのよい家でした。北の窓からは六甲山の頂が見えました。山裾から 3 km 海岸線まで 5 km に位置しました。その時の話です。

気温を毎日、6 時、9 時、12 時、15 時、18 時に測定し、グラフに描きました。珍しく父親が協力してくれました。

夏休みの最後に長い巻物を提出しました。ちょうど 28 ℃に、赤い横線を引いて**この温度を超えると暑い**と結論めいたコメントをして提出しました。

最近の夏の気温は、すでに 5℃は確実に上昇していることが分かります。今後どのようになるか心配です。

温暖化は紛れもない物理現象です。物理現象は淡々と進む以外考えられません。それはちょうど坂道を転がり落ちるボールと同じです。予想される道筋通り進みます。

進行を止めるには、原因を取り除かねばなりません。化石燃料の使用が始まって以来、二酸化炭素の空気中の濃度が増加していることに気がつくまで、100 年程度の時間がかかりました。二酸化炭素の増加が意識されはじめてから、気温の上昇が顕著に現れるまでに、さらに 100 年以上の日時が経ちました。

例え、今二酸化炭素の排出を禁止したとしても、実際に温度の上昇が止まるまでに、最低でも 200 年の年月が必要になるでしょう。一日も早く決断することが必要です。

物理現象は、生物学的な現象と異なっています。生物は、環境変化に適合するために自らが変化します。後の世代では、周囲の状態に合うように自らが適応します。

物理現象は、そこに生存する生物のために方向が変わることはありません。氷河期には多くの生物が絶滅しました。放置したままで環境が、生物の都合に合わせてくれるはずはありません。

行き着く所まで行くのが物理現象の特徴です。そのよい例は金星の温暖化です。水金地火木の金星です。

金星は地球によく似た惑星と言われています。金星の大気は二酸化炭素が 96%です。二酸化炭素による温暖化のために、金星表面の温度は、462℃ $(273 + 462 = 735\ \mathrm{K})$ になっています。一方、裸の金星の温度は、$-$ 48℃ $(273 - 48 = 225\ \mathrm{K})$ と計算されています。

大気による温暖化がなければ、金星の表面温度は、$-$ 48 ℃です。金星は 500 K 以上の温暖化です。

以下にこの章の各項目の目次を記載します。

Ａ．大気

Ａ１．地球大気の垂直構造

地球の表面は**大気**に覆われています。大気は気体の混合物であります。その**温度**や**圧力**は地表からの高度とともに下がります。そのため大気は層状に分類されます。

分類された各層は圏と呼ばれており、各圏のおよその高度、気温、気圧、高度による気温変化のようすなどの特徴を、**表Ａ１**にまとめました。温度の変化のようすを次頁の**図Ａ１**で確かめてください。**表Ａ１**の中の気圧の単位が、途中で hPa から Pa に変化しています。注意してください。

図Ａ１に**地球大気**の**垂直構造**を図で示しました。**高度(海抜)**に伴う、大気の温度(**気温**)の変化、大気の圧力(**気圧**)の変化、大気の**成分**の変化、および、分類された**各層の名称**などを示します。

この**図Ａ１**の縦軸は**高度**を km で表し、対数で目盛りました。したがって、図の最下端は高度 1 km(1000 m)です。

図Ａ１左側に、**気温**と**気圧**の高度による変化をグラフで示しました。これらは地球全体で平均した値です。

気温は**絶対温度** [K] で表し、図の上端横軸に目盛りました。海抜 0 m での気温は 288 K です。**気圧**は hPa で示し、図の下端横軸に対数で目盛りました。海抜 1 km での気圧は 899 hPa で、海抜 0 m での気圧は 1013 hPa です。

図Ａ１中央に、**大気の成分**とその**容積比**を示します。容積比は最下端に%で目盛りました。大部分が窒素 N_2 気体と酸素 O_2 気体であり、そのおおよその容積比は、4：1 になっています。

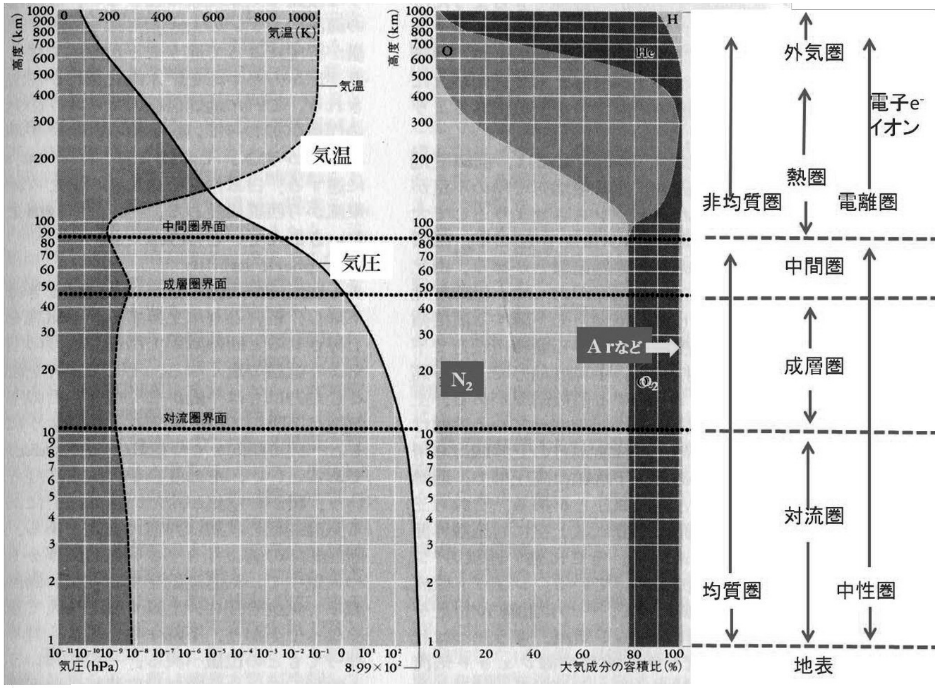
図Ａ１右側に各高度における層の名称が示されています。また、各層の境界は黒丸点線で示しました。

高度約 87 km までは**均質圏**と呼ばれ、**組成**は**一定**で、均質に混合した気体で構成されています。高度約 87 km 以上では組成が高度とともに変化し、**非均質圏**と呼ばれています。

表Ａ１．均質圏、非均質圏における各層の名称と
高度・気温・気圧 および 気温変化の概要

名　称		高度	気温	気圧	気温変化の概要
均質圏	**対流圏**	0 ~ 11 km	288(15℃) ~ 217 K	1013 ~ 223 hPa	**降下**
	成層圏	11 ~ 47 km	220 ~ 271 K	223 ~ 1 hPa	**一定値後上昇**
	中間圏	47 ~ 87 km	270 ~ 187 K	100 ~ 0.4 Pa	**急激な降下**
非均質圏	**熱圏**	87 ~ 300 km	187 ~ 976 K	0.4 ~ 0.00001 Pa	**急激な上昇**
	外気圏	300 km 以上	976 ~ 1000 K	0.00001 Pa 以下	**ほぼ一定**

均質圏では、大気を構成する気体は、**電気的中性**の分子や原子です。一方、**非均質圏**では原子や分子が、**＋イオン**、**－イオン**、**電子**に分かれた**電離状態**で存在します。したがって、ほぼ 87 km を境にして、下部を**中性圏**、上部を**電離圏**と分類されることもあります。



図Ａ１．大気の垂直構造（気象の事典　平凡社より）
左側：気温と気圧、中央：大気の成分、右側：大気の層分類の名称

Ａ２．均質圏と非均質圏

大気は質量(分子量・原子量)の異なった気体の混合物ですから、重力の影響を受けるはずです。分子量や原子量の大きな重い気体は、重力によって下方つまり、地上付近に集まるはずです。他方、分子量や原子量の小さな軽い気体は、上空に集まるはずです。油が水に浮くのと同じような現象が起こるはずです。

しかし、そのようになるのは、大気が長

時間静かに放置された時のことです。

実際の大気には、そのようなことはあり得ず、いろいろなことが原因で、絶えず動き回っています。高度約 87 km までの大気は、常に上下に混ぜ返されています。この上下の混ぜ返し運動の結果、ほぼ、87 km までの大気は、化学組成は一様です。

この一様性を示すために、大気の平均分子量を使うと便利です。大気の平均分子量は、各気体の分子量（原子量）とその容量比を使って計算することができます。

均質圏を構成する**気体の種類**と**その容量比**の詳しい値は以下の通りです。

1. 窒素ガス N_2 78.09 %（図Ａ１中央薄灰色）
2. 酸素ガス O_2 20.95 %（図Ａ１中央濃灰色）
3. アルゴンガス Ar 0.93 %
4. 二酸化炭素 CO_2 0.03 %（0.04%）
（　）内は 2015 年のデータ
5. 他の気体は全部合わせて 0.003%程度

これらの値から大気の平均分子量 M_A [$\mathrm{g \cdot mol^{-1}}$]を計算すると、

M_A = {分子量または原子量 ×容積比}の和

$$= 28.01 \cdot 0.7809 + 32.00 \cdot 0.2095 + 39.95 \cdot 0.0093 + 44.01 \cdot 0.0004$$

$$= 21.873 + 6.704 + 0.372 + 0.018$$

$$= 28.97\ \mathrm{g \cdot mol^{-1}}$$

ここで、その他の気体は除きました。

ほぼ高度 87 km 以上では、重力による分離が始まり、高度が増すほど分子量や原子量の小さい軽い気体の濃度が増加します。

高度 100 km くらいまでは、窒素分子と酸素分子が主成分ですが、徐々に減少し、約 170 km より上空では、単独の酸素原子が空気の主成分になります。また、およそ 1000 km 上空ではヘリウムが多くなり、さらに上空では水素原子が主成分になります。

このように、原子量（分子量）の小さい、したがって、質量の小さい原子や分子は上空に分布します。非均質圏と呼ばれます。

Ａ３．対流圏

対流圏はわれわれの生活の場です。高度がおよそ１万１千メートル、わずか 11 km までの領域です。気圧は、高度と共に減少し、1013 hPa から 1/4 以下の 223 hPa まで下がります。平均気温は、15℃(288 K)から−56℃(217 K)まで下がります。

雲　雨　雪　霰(あられ)　雹(ひょう)　雷　風　春一番　五月晴(さつきばれ)　五月雨(さみだれ)　梅雨(つゆ)　夕立　台風　秋晴れ　小春日和　竜巻　など、気象現象は、この対流圏の中だけで起こる現象です。

高気圧 低気圧　等圧線　寒冷前線　温暖前線　西高東低　フェーン現象　三寒四温　二百十日　など、気象にかかわる言葉も、この対流圏だけに通用する言葉です。

図Ａ１にあるように、大気の圧力(気圧)は高度とともに単調に低下します。気圧は、上空に積み重なった空気の重さ(重力)の合計ですから、高度が増すほど、その上にある空気の層が少なくなり、気圧が下がります。

逆に、高度が下がれば上空にある空気の層が厚くなり、重力が大きくなり、圧力が上がります。その結果、地表面での圧力は最高になります。

前に述べた通り、**図Ａ１**の高度は対数目盛のため、図の最下端は海抜 0 km ではなく高度 1 km であることに注意してください。

対流圏での**高度**と**平均気温**、**平均気圧**は以下の通りです。

高度	平均気温	平均気圧
0 km	15.0℃(288.2 K)	1013 hPa
1 km	8.5℃(281.7 K)	899 hPa
2 km	2.0℃(275.2 K)	795 hPa
3 km	- 4.5℃(268.7 K)	701 hPa
4 km	-11.0℃(262.2 K)	617 hPa
5 km	-17.5℃(255.7 K)	540 hPa
6 km	-24.0℃(249.2 K)	472 hPa
7 km	-30.5℃(242.7 K)	411 hPa
8 km	-37.0℃(236.2 K)	357 hPa
9 km	-43.5℃(229.7 K)	308 hPa
10 km	-49.9℃(223.3 K)	265 hPa
11 km	-56.4℃(216.8 K)	227 hPa

このように、高度が 10 km (1 万メートル)までは、高度 1 km 増加する毎に、平均気温は 6.5℃ずつ低下します。

地球上の全ての活動の源は**太陽**です。地球上で、地面の近くの大気は、太陽の熱や光で暖められ上昇し、含まれている**水蒸気**とともに、**気象現象**を起こします。

気温、気圧だけでなく、湿度もわれわれに直接影響を与えます。われわれの住む**対流圏**の特徴を挙げてみましょう。

a. 大気には**水蒸気**が含まれます。水蒸気の存在は、**前節Ａ１**では無視しました。理由は水蒸気の存在領域が、地球表面近傍に限られているからです。

この水蒸気の存在はわれわれ生物の生活環境を整えています。湿度だけでなく、温度の調整役も務めています。地球表面の実測された平均温度は、先に述べたように 15℃(288 K)です。

一方、地球表面の**本来あるべき温度**は、−18℃(255 K)です。実際は 33℃も高くなっています。それは地球表面が大気に覆われ、しかも水蒸気を含んでいるからです。

水蒸気が温室効果(Greenhouse Effect)を持つ気体なのです。水蒸気は地球表面の温暖化に寄与してきました。温暖化とは、大気や海洋の平均温度の長期的な温度上昇を意味します。

地球の本来あるべき温度とは、地球の大気を無視し、**太陽の温度**、**太陽からの距離**、**地球の大きさ**等から、物理法則だけを使って計算された地球の温度のことです。このことについては、**第Ⅳ章Ｆ太陽の温度・地球の温度**　で詳しく学びます。

b. 大気中の**二酸化炭素** CO_2 が増加しています。大気中の二酸化炭素の濃度は、18 世紀に始まった産業革命以降、増加の一途をたどっています。西暦 1700 年の炭酸ガス濃度は 280 ppm でした。(ppm は parts per million の略号で、10^6 すなわち 100 万の中の 280 の意味です。これは、% : parts per cent　や ppb : parts per billion と同じです。ここで cent は百 10^2、billion は 10 億 10^9 です)

過去 42 万年間、大気中の二酸化炭素濃度は、180～300 pp の間を、ほぼ 10 万年の周期で、増えたり減ったりしています。これは、南極大陸の氷床コアの精密解析からわかりました。その様子を**図Ａ２**に示しました。

この**図Ａ２**の横軸は時の経過を示し、右端が現在で、左へ行くほど昔に遡ります。横軸の一目盛は 1 万年、左端が 42 万年前です。縦軸は左側に、二酸化炭素の濃度を、右側には気温変化を目盛りました。

グラフの濃黒実線は気温変化を、灰色実線は、二酸化炭素濃度変化を示します。

西暦 1700 年以降の CO_2 濃度の測定値を以下にまとめます。

西暦 1700 年 280 ppm
1800 年 285 ppm
1900 年 295 ppm
1950 年 315 ppm
1990 年 357 ppm
1995 年 364 ppm
2000 年 373 ppm
2005 年 383 ppm
2010 年 394 ppm
2015 年 403 ppm

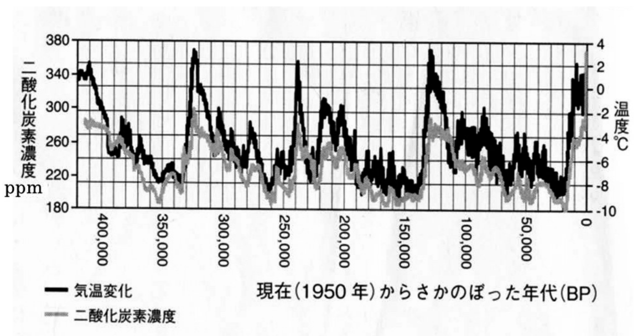
1990 年以降の数値は、気象庁が発表した岩手県大船渡市三陸町綾里における観測値です。

大気中の二酸化炭素 CO_2 の増加は、これまでに経験のない値になっています。われわれ文明国と呼ばれている国が主に、化石燃料（石炭、石油、天然ガス）を使用することによります。

過去の周期的な CO_2 濃度の増減の理由は分かっていません。

二酸化炭素は、水蒸気と同じく、温室効果を持つ気体であり、地球表面の温度を上昇させる効果があります。このため、地球表面の平均気温は上昇しています。このことについて、**第 IV 章 Ｆ太陽の温度・地球の温度**を参照してください。

長い地球の歴史において、氷河期による気温の降下は何度も経験してきましたが、気温の上昇の経験はないということです。



図Ａ2. 南極大陸ヴォストーク基地の氷床コアから判明した過去 42 万年間の変動、BP は Before Present の略。(B.Fagan 著 東郷えりか訳 古代文明と気候大変動 河出書房新社 2008 年 6 月 20 日)

温暖化この言葉はわれわれによい印象を与えてしまう言葉です。しかし、現在進行中の地球表面の**温暖化現象**は、地球上の生物にとって、決してよい影響を与えるものではありません。英語では Global Warming (地球規模の気温上昇) と言います。

Ａ４．成層圏

成層圏では、**対流圏**の温度の低下が終わり、温度が横這いから上昇に転じます。成層圏は大気の乱れがなく、安定しています。このことを利用して、その下端部分が、ジェット機の飛行に使われています。気圧が低いので空気抵抗が少なく、飛行機の燃料も少なくて済みます。1 万から 2 万メートル上空を飛行しますから、騒音は、飛行場の近辺だけに限られます。

成層圏の特徴を挙げてみます。

c. 成層圏下部の高度 20～30 km 近辺に、**オゾン層**と呼ばれる**オゾン** O_3 の濃度が濃くなる部分が形成されます。その濃度は 1 ～ 10 ppm です。

オゾン層では、酸素からオゾン O_3 が生成され、同時にオゾン O_3 が分解され、酸素に戻ります。この生成および分解は、太陽からの**紫外線**の働きによります。オゾン層の存在については、1881 年に Hartley が予想し、その後、Chapman が以下のような**化学反応**を提唱しました。

Chapman **機構** と呼ばれるオゾン層の生成と分解、その反応に伴う紫外線吸収の機構は以下の通りです。

O_2 + **紫外線** = O + O　**紫外線の吸収**
O_2 + O + **触媒** = O_3 + **触媒**
オゾンの生成
O_3 + **紫外線** = O + O_2　**紫外線の吸収**
O_3 + O + **触媒** = O_2 + O_2 + **触媒**
オゾンの分解

オゾンの生成および分解に寄与する触媒は、酸素(O_2)や窒素(N_2)と言われています。

この反応によるオゾン O_3 の生成と分解は、**平衡状態**になっています。その結果として形成される、オゾン O_3 の濃度と分布はほぼ変化なく地球を取り巻き続けてきました。このような状態を**定常状態**と呼んでいます。

この機構で予想されるオゾン O_3 の濃度と分布は、実測値とよく一致しています。

オゾン O_3 層の重要性について以下のように考えられています。オゾン O_3 の生成と分解の過程で吸収される**紫外線**は、波長が 200～320 nm の範囲です。このため、太陽から来る光のうちで、この領域の紫外線は、地球表面にほとんど届きませんでした。

この領域の紫外線は、生物の DNA を破壊する働きがあります。従って、オゾン層の存在は地球上の生物の生存に大きな役割を果たしてきました。地球の生物にとってかけがえのないものだったのです。

最近 50 年の観測では、そのオゾン層の濃度が減少しています。原因として考えられることは、人工的に製造された気体が、オゾンの分解反応の触媒として直接働き、Chapman **機構** を**阻害**していると考えられています。

Chapman **機構** を**阻害**している気体は次のようなものです。

・**ノックス** NO_x と呼ばれるエンジンの排気ガス（ジェット機、ガソリン車、ディーゼル車など）
・**窒素肥料**から蒸発する二酸化窒素 NO_2
・冷蔵庫、噴霧器（**いわゆるシュー**）、高電圧絶縁などに使用される $CFCl_3$、CF_2Cl_2 などの**フロン系の気体**

これらの気体が、オゾン O_3 分解の触媒となり、オゾン層を破壊し、最近では、波長が 200～320 nm の紫外線が、地球表面に届くようになってしまいました。

Ａ５．気体の一般的性質　－ボイルシャールの法則・理想気体の状態方程式－

対流圏の特徴は**気象現象**です。

大気中の空気は、太陽の熱や光で暖められて温度が上がります。温度が上がると軽くなって上昇します。上昇すると気圧が下がり、ますます体積が膨張します。

気体の体積、温度、圧力は、どのような関係になっているのでしょう。また、**熱エネルギー**はどのような働きをするでしょう。ここで、**気体の一般的な性質**について学びましょう。気体の性質を知っていると、気象現象について納得できることが多くあります。

気体の状態を特徴づける物理量は、**体積・温度・圧力**です。これらの間に、どんな関係にあるかを知ることが必要です。

歴史的には二つの法則が発見されました。それらは、次の **d, e** の二つです。

d. 温度が一定の場合、気体の体積と圧力は反比例の関係にあります。1660 年に発見された**ボイルの法則**です。

e. 圧力が一定の場合、温度が上がると体積は膨張します。膨張の大きさは、温度が 1℃上昇する毎に、0℃の体積の 1/273 だけ増加します。1787 年に発見された**シャールの法則**です。

この **d**、**e** の二つの法則を合体して、**ボイルシャールの法則**と言います。これは**気体の状態方程式**と呼ばれる最も一般的な法則です。気体の重要な性質です。**第 I 章９**で紹介した法則です。この法則を式で書くと、

$$PV = nRT \qquad \text{(A1)}$$

ここで P は**圧力**で単位は Pa、 V は**体積**で単位は m^3、n は**モル数（同一物質の量）**で単位は mol、 T は**絶対温度**で単位は K です。R は**気体定数**と呼ばれ、その値は、 $8.31\,\mathrm{J\cdot mol^{-1}\cdot K^{-1}}$ です。

同一物質の量を示す単位はモル[mol]を使います。1 mol とはどれだけの量か、実例を挙げておきます。

水素原子 1 mol とは、水素の原子量は 1.008 ですから水素 1.008 g のことです。原子の個数で言うと、アオガドロ数 6.02×10^{23} 個の水素原子のことです。原子量については、III－５（頁 70）を、また、それぞれの値は、**図表 III－２**（頁 63 - 70）を参照してください。

酸素分子 1 mol とは、酸素の分子量は 31.999 ですから、酸素 31.999 g のことです。分子の数でいうとやはりアオガドロ数 6×10^{23} 個の酸素分子のことです。

式(A1)の意味は、上記の **d**、**e** が全てですがもう一度吟味してみましょう。

d. **温度** T が一定の時、式(A1)の右辺は一定値になります。従って、

圧力 P **と体積** V **は反比例**　すなわち

$$PV = \text{一定値} \qquad \text{(A2)}\quad \text{です。}$$

次に、**e.** の記述をそのまま式にすると

$$\text{温度}t[℃]\text{の気体の体積} = 0℃\text{の気体の体積} \times\left(1+\frac{t[℃]}{273}\right)$$

となります。温度が、0℃の時の気体の体積を V_0、温度 t[℃] の時の体積を V_t とし、さらに、分数を通分すると、

$$V_t = V_0\left(\frac{273+t}{273}\right)$$

と、書き直すことができます。ここで、絶対温度 $T = 273 + t$ を用いると、$V_t = V_T$ に注意して、

$$V_T = \frac{V_0}{273}T \qquad \text{(A3)}$$

となります。**気体の体積** V_T は**絶対温度** T に比例します。

圧力一定の場合の V と T の比例関係を表しています。

式 (A2) と式 (A3) の定数を適当に考慮すると、式 (A1) が求まります。

式(A1)は、理想的な気体に対する式で、**理想気体**の**状態方程式**と呼ばれます。この式は、あらゆる気体に当てはまります。気体の種類によって僅かな違いがありますが、問題にする必要はありません。

理想気体とは、**気体分子がパチンコ玉のように、完全な衝突をする以外は、互いに影響を及ぼし合わない** とした気体のことです。気体の分子は、このようなものだと考えてよいことを意味しています。

この式から、気体の温度、圧力、体積の内どれか１つが一定の場合、残る２つの関係が分かります。また、温度、圧力、体積のうち２つの値が決まれば、残りの 1 つの値を知ることができます。

図Ａ３(頁 118)に理想気体の圧力、体積、温度の関係をグラフにしました。ほぼ平行に並んだ６本の**黒色曲線**で描きました。それぞれが、式(A1)の温度 T を決めて、圧力と体積の関係をグラフにしたものです。

温度は、-10～40℃(263～313 K)で、曲線の右端に記しました。気圧は、750～ 1300 hPaで、ほぼ、地球表面上で生物が生活する範囲です。

縦軸は圧力を hPa で、横軸は気体の体積を ℓ(リットル) で目盛りました。横軸の数値を 10^3 で割ると単位が m^3 になります。いわゆる**標準状態**（１気圧 1013 hPa、0℃ 273 K）で、１モルの気体の体積は 22.4 ℓ です。図の $T = 273$ K の黒曲線上に、点 S でこの点を示しました。

６本の**黒色曲線**は全体を描くと各々、**直角双曲線**です。グラフはその一部分だけを拡大したもので 緩やかに曲がっています。

Ａ６．断熱変化

ある一塊の気体の**圧力、体積、温度**の値が、式(A1)を満たしているとします。例えばこの一塊の気体の圧力が変化したとします。変化後の圧力、体積、温度の値も、もちろん、式(A1)を満たします。

しかしたいていの場合、**図 Ａ３**の一本の黒色曲線上にはありません。一本の曲線上に乗るのは、変化に際して熱が自由に出入りできて温度が変わらない時に限ります。

実際には、熱が周りに十分なかったり、圧力や体積の変化が速く、熱の出入りが間に合わなかったりして温度が変わります。

このような状況で起る変化を、**断熱変化**と言います。大気の場合ほとんどが**断熱変化**です。それは、空気自身の**熱の伝わり方**（**熱の伝導性**）が悪いことが大きな原因です。このような状態で体積が膨張したり、収縮したりすると、温度が変わってしまいます。

体積が膨張すると温度が予想以上に下ります。気体の**断熱膨張**と呼びます。逆に、体積が収縮すると予想以上に温度が上ります。**断熱圧縮**と呼びます。

我々の周囲では、空気が上空へ昇る時に、**断熱膨張**が起こります。地面で熱せられた大気が軽くなって上昇する時や、風が山にぶつかって坂を登る時などに起ります。**上昇気流**と呼びます。

上昇気流は、暖かい空気と冷たい空気がぶつかった時にも、その境界で起こります。どちらが強いかで、上昇気流の度合いが違います。暖かい空気が強い時には穏やかな上昇気流が起ります。冷たい空気が強い時には激しい上昇気流が起ります。

断熱圧縮は、空気が圧縮された時に起こります。自転車のチューブに空気を入れる時、入口付近が暖まります。**断熱圧縮**が起って、チューブに入る空気の温度が上がるからです。

完全に熱の出入がない場合、つまり、**断熱膨張**や**断熱圧縮**の場合には、圧力、体積、温度の関係は、次の式になります。

$$PV^{\gamma} = 一定値 \qquad (A4)$$

又は

$$TV^{\gamma-1} = 一定値 \qquad (A4')$$

式(A1)より PV は T に比例しますから、式(A4)と式(A4′)は同じ意味の式であることが分かります。ここで、ギリシャ文字 γ は定数で、ガンマと読みます。

断熱変化の仕方は、気体の種類によって違います。ギリシャ文字 γ は 1 より大きい数値で、気体分子１個を作る原子の数によって異なります。値は次の通りです。理想気体と実際の気体の γ 値です。

・1 原子分子：理想気体：　γ＝1.66
　　実測値　He ヘリウム　：　1.66
　　　　　　Ar アルゴン　：　1.67

・2 原子分子：理想気体：　γ＝1.40
　　実測値　H_2 水素　：　1.40
　　　　　　N_2 窒素　：　1.40
　　　　　　O_2 酸素　：　1.40

・多原子分子：理想気体：　γ＝1.33
　　実測値　H_2O 水蒸気　：　1.31
　　　　　　CO_2 二酸化炭素　：　1.29
　　　　　　NH_3 アンモニアガス　：　1.33
　　　　　　CH_4 メタンガス　：　1.30

断熱変化で何が起っているかを、詳しく考えてみましょう。もう一度、**図Ａ３**を見て下さい（頁 118）。青色、赤色、緑色の曲線は、断熱変化の式

$$PV^{\gamma} = 一定値 \qquad (A4)$$

をグラフにしたものです。体積 V の冪乗（べきじょう）の定数は、$\gamma = 1.4$ を使いました。大気の主な成分は、窒素と酸素で、ともに**２原子分子**です。

右辺の一定値は、断熱変化直前の気体の状態で決まります。断熱変化直前の状態を気圧 1013 hPa で、温度を、

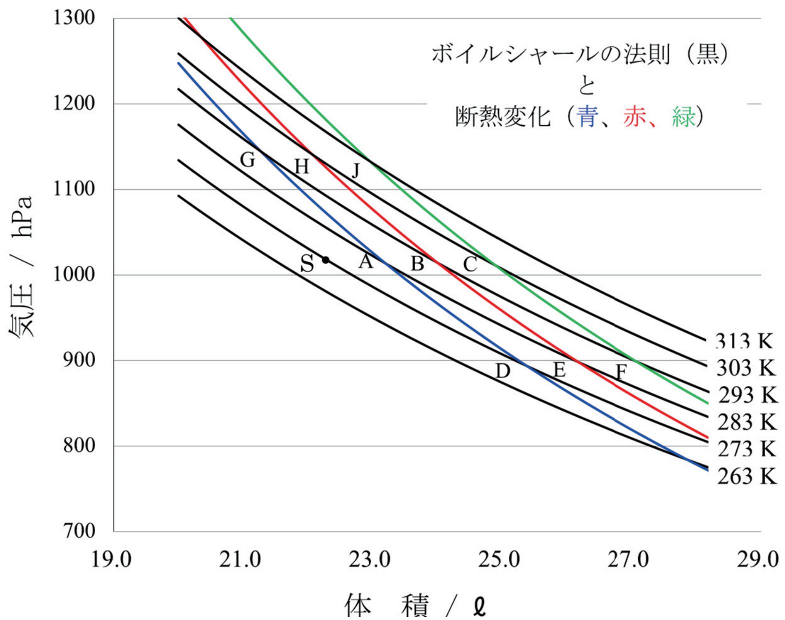
青線では 283 K、
赤線では 293 K、
緑線では 303 K

としました。各々**図Ａ３**の中に点Ａ、Ｂ、Ｃで示しました。この点を通るように式(A4)をグラフにしました。

気圧が下がって断熱膨張した場合では、

青の気体では A から D に向かいます。
赤の気体では B から E に向かいます。
緑の気体では C から F に向かいます。

気圧がほぼ 900 hPa まで降下したとしましょう。つまり、点 D、E、F が、断熱膨張の最終点だとします。上昇気流でいうと、高度が約 1000 m 高くなりました。それぞれの色のグラフは、温度が 10℃ 低い式(A1) の黒色曲線に交わります。つまり、温度が 10℃ だけ下がることが分かります。



図Ａ３．気体の圧力・体積・温度の関係

実際の温度の降下は、Ａ３で述べたように、高度が 1000 m 上がる毎に、10℃ではなく、6.5 ℃ です。これは空気中に含まれる水蒸気が、雲や雨になる時に放出する**潜熱**によります。この熱によって温度の下がり方が緩和されるのです。水の潜熱については、第 IV 章Ｂ７(頁 136)で詳しく学びます。

一方、気圧が上がる断熱圧縮では、

青の気体ではＡからＧに向かいます。
赤の気体ではＢからＨに向かいます。
緑の気体ではＣからＪに向かいます。

気圧がほぼ 1140 hPa になったとしましょう。つまり、点Ｇ、Ｈ、Ｊが、断熱圧縮の最終点だとすると、それぞれの色の曲線は、10 ℃ 温度の高い式(A1)の黒色曲線に交わります。つまり、温度が 10 ℃ だけ上昇するわけです。

Ａ７．熱による気体の変化とエネルギー保存則

気体に熱を加えると、どのようなことが起こるでしょう。気体の量を一定にして、気体に熱を加えてみましょう。

例えば、空気が抜けて凹（へこ）んだボールを暖めたらどうなるでしょう。気体の体積が膨張して、ボールの凹みはなくなるでしょう。その上、中の空気の温度も上がります。この場合、式（A1）に従います。

やかんの水を熱し続けると、温度は100℃以上にはならず、水はどんどん蒸発して水蒸気になってしまいます。液体から気体に状態が変化し、体積も増加しました。

与えた熱エネルギーがどのように使われたかをまとめると、

第１に、体積を増やしました
第２に、物体の温度を上げました。
第３に、物体の状態を変えました。

実際にこれがすべてであり、第２と第３では、熱エネルギーが物体の内部に蓄積されたと言います。前者は熱容量、後者は潜熱と呼ばれる熱エネルギーです。

外から与えられた熱エネルギーは、物体の体積を増やすか、物体の内部に蓄積されるかどちらかになります。その合計のエネルギーが、始めに与えられた熱エネルギーに等しくなります。

これが物質の状態と熱の関係を示す**エネルギー保存則**です。どんな時にもどんな物体にも当てはまります。式にしておきます。

外から加えられた熱エネルギー
＝物体の体積の増加に使うエネルギー
＋物体中に貯えたエネルギー　　(A5)

体積の増加は、外からおさえられる圧力に逆らって大きくなるのですから、エネルギーを必要とするのです。ですから、体積が増加する時は、**貯え**にまわす分を減らさねばなりません。最悪の場合には、**貯え**から持ち出さなければなりません。

逆に、外からおさえられて、体積が減少する場合には、物体は外からエネルギーをもらうことになり、**貯え**が増加します。

体積の変化に必要な仕事は、$P\Delta V$ と表すことができます。ここで P は圧力、ΔV は

体積の変化です。$P\Delta V$ がエネルギーであることは、単位を考えてみると分かります。

$$P[\mathrm{Nm}^{-2}]\Delta V[\mathrm{m}^3] = P\Delta V[\mathrm{Nm}^{-2}][\mathrm{m}^3] = P\Delta V[\mathrm{Nm}] = P\Delta V[\mathrm{J}]$$

ここで[　]の中が単位です。N は力の単位、m は長さの単位、その積は J ジュールで、エネルギーの単位です。

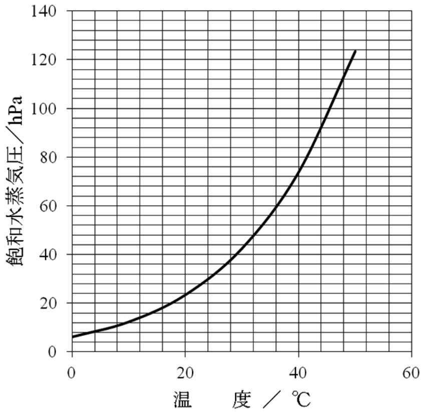
前節で述べた気体の**断熱膨張**の時に、温度が下がるのは、膨張して体積が増加する時に、貯えていたエネルギーを消費してしまうからです。外からエネルギーをもらえないことが理由です。自分の貯蓄を使い、温度が下がってしまいます。

気体の**断熱圧縮**の場合には、気体に圧力を加えて、気体の体積を押し縮めるのですから、その気体がエネルギーをもらうことと同じです。そのもらったエネルギーを気体が貯えにまわし、温度が上がると考えてよいでしょう。

Ａ８．空気中の水蒸気

空気中には水蒸気が含くまれています。お湯を沸かすと白い湯気（ゆげ）が出ます。その湯気は、いつのまにかどこかへ行ってしまいます。空気中に混ざり込んでしまうのです。どれだけ混ざるのでしょう。

混ざり込む量を圧力で表し、**分圧**と呼びます。**水蒸気の分圧**は、温度で決まるある値になるまで上がります。その値になるまで、水蒸気は空気に混ざり込みます。この値を**飽和水蒸気圧**と呼びます。



図Ａ４．飽和水蒸気圧の温度変化

飽和水蒸気圧は温度で変わります。温度が上がれば飽和水蒸気圧も上がります。飽和水蒸気圧の温度による変化を、**図Ａ４**と**表Ａ２**に示しました。

図Ａ４の縦軸には**飽和水蒸気圧**を hPa で目盛り、横軸には**温度**を℃で目盛りました。温度の上昇と共に増加することが分かります。空気中で、水蒸気だけでこの圧力になるまで水は蒸発します。曲線の形は下に凸です。温度が 1℃上がる時の飽和水蒸気圧の増加は、温度が高いほど大きくなります。

飽和水蒸気圧を**表Ａ２**の**第３列**に数値で示しました。大気の圧力は、水蒸気の圧力と水蒸気を含まない空気（**乾燥空気**と呼ぶ）の圧力の和です。

例えば、気温 303 K(30℃)では、**表Ａ２**より**飽和水蒸気圧** 42 hPa です。大気圧が 1013 hPa の時は、残り 971 hPa が**乾燥空気**です。この場合、**湿度** 100% であり、**飽和状態**と呼びます。

この温度で、湿度 50 %なら、水蒸気圧が 42 の半分の 21 hPa であり、1013 との差 992 hPa が乾燥空気となります。

表Ａ２の右側第４列、第５列、第６列には**空気の密度**を単位 kgm^{-3} で示してあります。**空気の密度**は、温度の上昇とともに減少します。膨張するからです。

水蒸気が含まれるとさらに密度が小さくなります。これは、水の分子量 18.015 が、窒素の分子量28.013 や酸素の分子量31.999 より小さいことによります。

湿度 100 %の最下端の数値は 100 ℃の水蒸気の密度です。

図Ａ４や**表Ａ２**が示す通り、飽和水蒸気圧は温度の上昇と共に増加します。温度が上がると、含み得る水蒸気の量が増加し、周囲の水がさらに蒸発します。逆に、温度が下がると、飽和水蒸気圧が低下し、余分な水蒸気が水滴に戻ります。これが雲、雨、雪のできる原因です。

気温が上がるとますます多くの水蒸気を含みます。空気中に含まれる水蒸気が多ければ多いほど、雨は激しく降ることになります。熱帯地方に見られるスコールと呼ばれる激しい雨です。

空気のない場合、つまり水と水蒸気だけのフラスコの中の世界で、温度が決まると水蒸気の圧力がきまり、**水の蒸気圧**と呼びます。空気のある場合の**飽和水蒸気圧**とほとんど違いはありません。

湿度とは、前述した通り、飽和水蒸気圧に対して実際に含まれている水蒸気圧を%で表したものです。

湿度の測り方は、**アルコール温度計**を２本用意し、片方の**アルコールだめ**をガーゼで常に湿らせておきます。**湿球**と呼びます。もう一方を**乾球**と呼びます。２本の温度計が示す温度の差から、あらかじめ作られた表を使って、空気中の**湿度**を求めます。

湿球では水が蒸発し、**アルコールだめ**から熱を奪います。そのため湿球の温度が下がり、差ができます。その度合いは、空気中に含まれる水蒸気の量によります。乾燥している時ほど蒸発量が多くなり、温度差が大きくなります。

表Ａ２．空気の飽和水蒸気圧と空気の密度

温度		飽和水蒸気圧/hPa	空気の密度/kgm^{-3}		
℃	K		乾燥空気	湿度50%	湿度100%
0	273	6	1.293	1.291	1.290
10	283	12	1.247	1.244	1.241
20	293	23	1.205	1.199	1.194
30	303	42	1.165	1.155	1.146
40	313	74	1.127	1.112	1.096
50	323	123	1.093	1.067	1.041
60	333	199	1.060	1.019	0.979
70	343	312	1.029	0.967	0.906
80	353	474	1.000	0.909	0.819
90	363	701	0.972	0.842	0.712
100	373	1013	0.946	0.763	0.580

Ａ９．気象現象

大気は太陽の光や熱で暖められます。そして、その圧力、温度、体積が、その時の状況に応じて変わります。その変化はＡ５、Ａ６、Ａ７に述べた**状態方程式** (A1)、**断熱変化の式** (A4)または(A4′)、**エネルギーの保存の法則** (A5) 、さらに、Ａ８で述べた**水蒸気圧**に従います。これらが対流圏に気象現象をもたらします。

例えば、地表で空気が暖まり、多くの水蒸気を含んで軽くなり上昇します。**上昇気流**です。空気が上昇すると気圧が下がり**断熱膨張**で温度が下ります。それに伴う**飽和水蒸気量**の低下により、前に述べたように、水蒸気が水や氷になります。雲、雨、雪などの原因となります。

この時もう一つ重要な要素があります。それは水蒸気が上空で水滴や氷粒になる時、熱エネルギーを放出することです。その熱エネルギーが非常に大きいので、これが気象現象のエネルギー源となるのです。

上空で水蒸気や水が放出する熱エネルギーは、**凝縮熱**、**凝固熱**と呼ばれる**潜熱**です。そのことは、**第Ⅳ章 Ｂ 水** で学びますが、少し先取りすることにしましょう。次のことだけ頭に入れておいて下さい。

水蒸気が水滴に戻る時に熱エネルギーを放出します。その大きさは他の物質と較べると非常に大きく、水蒸気 1 kg 当たり 540 kcal (540×4.19 = 2263 kJ）以上です。この熱のことを**凝縮熱**と呼びます。この熱エネルギーが気象現象のエネルギーの源となります。

この**凝縮熱**は**気化熱**あるいは**蒸発熱**と呼ばれる**潜熱**と同じ値です。ただ、**凝縮熱**は放出ですが、**気化熱**は周りからエネルギーを奪い取ります。つまり吸収します。

水は地表で蒸発します。その時周りから熱を奪います。水蒸気は熱を持ったまま上空に登り、温度が下がり熱エネルギーを放出します。

すぐ上で、放出は 540 kcal(2263 kJ）以上と曖昧に言いました。その理由は水蒸気から水滴に変わった後に、水滴の温度が下がるときに放出する熱エネルギーも含まれるからです。

その大きさは、温度が 100℃から 0℃まで低下することにほぼ対応し、水 1 kg 当たり 100 kcal（100×4.19 = 419 kJ）の熱エネルギーを放出します。水の**熱容量**に一致します。これも大きな値です。

空の上では水滴になるだけでなく、氷になってしまうことがたびたびあります。雪や雹（ひょう）霰（あられ）になります。この場合、水滴が凍って雪になる時、もう一度熱エネルギーを放出します。その大きさは、水 1 kg 当たり 80 kcal (80×4.19 = 335 kJ）です。この熱エネルギーは**凝固熱**と呼ばれる**潜熱**です。もちろんこれも気象現象のエネルギー源になります。

この**凝固熱**は**融解熱**と同じ値です。ただ、**凝固熱**は放出ですが、**融解熱**は周りからエネルギーを奪い取ります。

上空で、水蒸気が水滴になり、さらに氷になった時には、凝縮熱、熱容量、凝固熱の熱エネルギーを放出し、その値は水 1 kg 当たり合計は、540 + 100 + 80 = 720 kcal (3017 kJ）となります。このエネルギーは、もともと太陽からの熱エネルギーを大気が吸収したものです。

Ａ１０．上昇気流による温度の低下とフェーン現象

山を登ると温度が下がることは誰でもよく知っています。どれぐらい温度が下がるのでしょうか。Ａ３を見てください。ここに挙げたように、対流圏では、海抜が 1 km 増加するごとに、温度が 6.5℃低下します。気温は地球全体で平均した値です。

もっと温度の高い地域も低い地域もありますが、どこでも 1000 m 登ると、温度が 6.5℃下がります。この温度降下は、Ａ６で述べた断熱膨張によるものです。

図Ａ３を見てください。断熱変化の曲線は、**青線**、**赤線**、緑線の３本が描かれています。点 A、点 B、点 C は海抜 0 m の気圧 1013 hPa の状態です。それぞれ温度が 10℃、20℃、30℃の場所に当たります。

この点 A、点 B、点 C の状態を、断熱膨張の起点として気圧が下がる場合を考えましょう。それぞれ**青線**、**赤線**、緑線に沿って変化します。海抜 1000 m で約 900 hPa まで気圧が下がるとします。

断熱変化の終点は、点 D、点 E、点 F となります。これらの点はそれぞれ、10℃だけ温度が低下した黒線に交わります。起点の温度が異なると、使う曲線が異なりますが、**青線**、**赤線**、緑線のどの曲線に沿って変化しても、温度は約 10℃下がることになることが分かります。

しかし実測では、1000 m 登る毎に、6.5℃しか下がりません。

これは空気中に水蒸気が含まれていることに起因します。上昇気流で温度が下がると、飽和水蒸気圧が下がり、水蒸気が水滴になります。その時、Ａ９で述べた**凝縮熱**を放出することがその理由です。気温の下がり方が少なくなります。

気温がもっと低い時や、高度がさらに高くまで上昇する場合には、気温が 0℃以下になります。その時、水蒸気や水滴は氷滴になってしまい、**凝固熱**も同時に放出します。

海抜が 1000 m 増すごとに、温度が 10℃ずつ降下する気体は、乾燥空気に対する計算値です。水蒸気を含んだ気体では、ほぼ 6.5℃低下するのです。

風が山を登って、山に雨や雪を降らせます。その後、山を下だる時のことを考えましょう。

山頂を出発点として、風が坂を下りるとしましょう。高度が下がると共に気圧が上昇し、断熱圧縮が始まります。高度 1000 m、気圧 900 hPa で、気温が 273 K(0℃)、283 K(10℃)、293 K(20℃)としましょう。

ちょうど**図Ａ３**の**青線**上の点 D、赤線上の点 E、緑線上の点 F に対応します。これらを**断熱変化**の起点とします。

坂を下ると、これらは**青線**に沿って点 D から点Ａへ、**赤線**に沿って点 E から点 B へ、緑線に沿って点 F から点 C に、向かいます。

点 A、点 B、点 C を断熱変化の終着点とすると 10℃温度の高い黒線に交わります。

登りには、はじめに含まれていた水蒸気のおかげで、6.5°C しか温度は下がりませんが、下り坂では水蒸気はなくなり、**凝縮熱**、**凝固熱**には関係ありません。ですから、**図Ａ３**の**青線**、**赤線**、緑線の通りになり、どの場合にも温度が約 10°C 上昇します。

登り始めと比較すると 3.5°C 気温が上昇しています。この現象を、**フェーン現象**と呼んでいます。

山陰地方、北陸地方では、夏に南から吹く風は、日本列島に横たわる山を越えてきます。そのため**フェーン現象**が起こり、暑い夏をさらに暑くします。

冬の北風は日本海で水蒸気を含み、日本列島にぶつかり山に雪を降らせます。山陽地方では、この時に**フェーン現象**が起って温度が上がるはずです。温度の上がった乾燥空気が山陽地方の寒さを和らげますが、**異常乾燥**状態になります。

冬の北風はもともとの空気の温度が低く、水蒸気が夏ほどは含まれていません。冬のフェーン現象はそれほど話題にはなりません。神戸の六甲おろしや濃尾平野の伊吹おろしなど乾燥した強い風です

盆地では風がどちらから吹いても、この現象が起こり、気温が上がります。寒い時期のフェーン現象はありがたいことですが、異常乾燥状態が起こります。暑い夏に起こるフェーン現象は歓迎されません。

Ａ１１．冬、西高東低で北風が吹く

日本の冬の気圧配置は西高東低と言われます。西方の中国大陸に高気圧ができ、東方のオホーツク海に低気圧が陣取ります。

高気圧から低気圧へ気圧は徐々に下がります。途中、同じ圧力の位置をつなぐ曲線を地図上に描き込み、等圧線と言います。気圧の配置図を作り、天気、風向きなどを書き込んで天気図とします。

図Ａ５右に、気象庁が提供している冬の気圧配置図の一例を示しました。2014 年 12 月 17 日の天気図です。

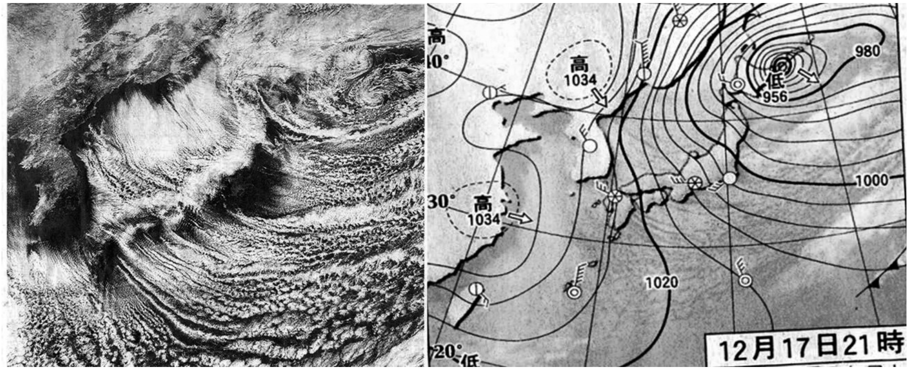
図Ａ５右の気圧配置図では、左上方の中国大陸に強い高気圧があり、オホーツク海の北方海上には、強い低気圧があります。西に高気圧、東に低気圧があって、**西高東低**、日本近辺の典型的な冬の気圧配置です。

大気は中国大陸の高気圧から押し出され、低気圧に向かいます。移動し始めた空気は、地球の自転によって向きを右に変えます。この時働く力を、**コリオリの力**と呼びます。**第 II 章１７**を参照してください。

コリオリの力で向きを変えた空気は、やはり高気圧から低気圧の方へ押されます。コリオリの力とこの力が合わさった結果、空気は常に等圧線に沿って移動します。

風のようすを**図Ａ５左**に示しました。この**図Ａ５左**は、気象衛星から送られてきた雲の流れの写真です。**図Ａ５右**の気圧配置とほぼ同時刻の雲の流れです。**図Ａ５左**の写真の、特に大陸から日本海に吹き出している風が、等圧線に沿っていることがよく分かります。

日本の冬の気圧配置は西高東低で、西風が吹くのではなくて、北風が吹きます。コリオリの力によります。



図Ａ5．冬の日本の気圧配置(右)と雲の流れ(左)

Ａ１２．台風

台風の左巻きの原因もＡ１１と同じコリオリの力です。強い低気圧に周りの大気が吸い込まれます。低気圧の中心方向に流れ始めた空気は、コリオリの力のために右にそれます。それた空気もやはり、台風の中心の低気圧に引きつけられます。その結果、台風の中心の周りでは風が、左巻にぐるぐる回ります。

ここでも、台風の周りにある、**等圧線**に沿って風が強く吹きます。

日本近海には毎年 20 個近い台風が近づきます。赤道近くの太平洋上で発生した台風は、太平洋上の夏の高気圧の周囲を北上します。高気圧の周囲は緩やかに右回転の風が吹いています。これもコリオリの力の仕業です。

台風の画像の一例を**図 Ａ6**に示します。1990 年 9 月 17 日 12 時の気象衛星による赤外線画像です。これは台風 19 号、中心気圧 890 hPa、最大風速 60 m/s の超大型の台風です。

台風の中心がくっきり見えています。台風の目と呼ばれています。目を中心にして、左周りに風が回っていることが分かります。

台風のコースは季節によって特徴があります。それは太平洋上の高気圧の強さによります。

太平洋上の高気圧が強い時はなかなか台風は動けません。一カ所に停滞することがよくあります。日本列島の南方、沖縄県近くでは、台風が大きく強い上に、その動きが遅く、莫大な被害を与えます。

台風は高気圧の周りの風に乗って北方に進みます。日本列島に近づくと、偏西風のために徐々にスピードが早くなりながら東向きに進路を変えます。

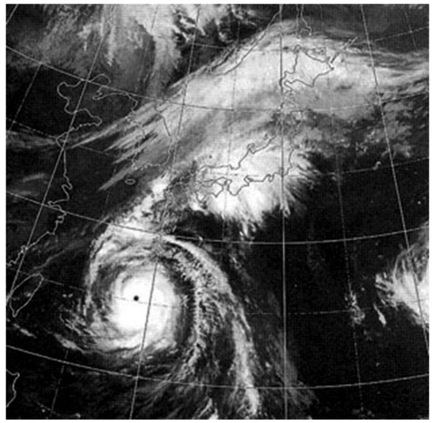
太平洋高気圧が強い間、つまり夏の間は、北上した台風は九州を縦断し、日本海へ進みます。そのまま北上し、日本海に抜けます。そこで進路を東に変え、北海道に到達する場合があります。

太平洋高気圧が少し弱まると、台風のコースがちょうど日本列島全体を縦断するようになります。季節は夏から秋に変わる、9 月の初旬の頃です。

暦では、**二百十日（にひゃくとうか）**とか、**二百二十日（にひゃくはつか）**とか呼ばれています。その頃、日本全体が大きな被害を受けます。

その後、太平洋高気圧が弱まり、台風は日本列島をかすめるように東に進み、太平洋に出てしまいます。その時、台風の左巻の風によって、日本列島全体に北からの風が吹き、涼しくなります。

2016 年の台風は例年とすっかり異なったものでした。北の高気圧が強かったのでしょうか、南の高気圧がよわかったのでしょうか、日本の東側を通り、北海道に直接上陸しました。また、台風が日本列島の近くで西南向きに進んで発達し、後に東に進路を取り、東北地方を横断してさらに中国大陸を西向きに進みました。異常気候です。



図Ａ6．台風の映像

台風が西側あるいは北側を通ると被害が大きいと言われます。逆に台風が東側、あるいは南側を通る時はさほど大きな被害はありません。台風自身のスピードが少し早くなってからのことです。

理由は、台風自身のスピードと、台風の周りをぐるぐる回る風とが、一方では、加算になりますが、他方では、引き算になるからです。台風の速度が時速 36 km/h とすると、秒速 10 m/s の風に相当します。本来の台風の周りに吹く風に、この値を加える部分と引き算の部分ができるからです。

台風の中心で、あなたが台風と共に走っているとしましょう。左手の部分では風が引き算になりますが、右手の部分では風が足し算になります。

夏の台風が日本海の沿岸近くを通過する時は、かなりの大きな被害が出ます。

最近 30 年を振り返ると、台風のようすが変わってきました。台風の大きさが大きくなったこと、夏型のコースがいつまでも続くこと、などです。

台風の大型化の最大の理由は、台風の発生する南太平洋の気温の上昇ではないでしょうか。気温上昇の結果、飽和水蒸気圧が上がり、多量の水蒸気を含むことが考えられます。水蒸気が放出する凝縮熱、凝固熱が台風のエネルギー源だからです。

台風は悪いことばかりではありません。台風は雨を運んできてくれます。暑い真夏の気温を下げる効果だけでなく、農作物の豊穣が約束されます。1 年を通してみると、なくてはならないものなのです。

Ｂ．水

Ｂ１．水はわれわれの目の前で姿を変える（物質の三態）

現在地球上の水の 97.2%が海洋にあり、2.1% が万年雪や氷山、地下水 0.6%、残りが湖、河川と大気中の水蒸気などといわれます。ただし、海水のレベルが現在の状態になったのは、1 万数千年前のことで、およそ 10 万年前の氷河期には、海水レベルは現在より 100 m 近く低くなっていました。その時は、ヨーロッパ大陸や北アメリカ大陸は氷河にお覆われており、ユーラシア大陸とアメリカ大陸はつながっていたことが分かっています。

海水レベルの上昇は、1 万 5 千年前に始まった晩氷期に入って気温が上昇し、温和な気候が続くようになってからのことです。現在まで続くこの時期に、人類は初めて活動を開始することができ、現在につながる文化を築くことができました。

我々は水に取り囲まれて生活をしています。**第 IV 章Ｂ水**では我々の生活が、いかに水と切っても切れない関係にあるかを知ることが目的です。

すべての物質は**固体・液体・気体**の三つの**相**があります。物質の三態と言います。物質は温度と圧力が決まると三つのうちのどの**相**になるかが決まります。どの温度、どの圧力で、どの相になるかを図にしたものを、***P*−*T* 状態図**と呼びます。圧力 *P* を縦軸に、温度 *T* を横軸にして図を描きます。

水を例にとって***P*−*T* 状態図**を**図Ｂ１**に示します。３本の青色実線で模式的に描きました。実際は直線ではなく緩やかな曲線です。**固体**(**Ice 氷**)の領域、**液体**(**Water 水**)の領域、**気体**(**Vapour 水蒸気**)の領域が示されています。３本の青色実線は３つの相の境界です。

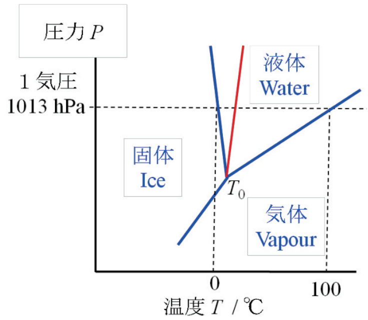
境界曲線は、少し歪んだ Y の字型になるのが普通です。この曲線上の圧力と温度では、両側の相が**共存**します。

分かりやすくするために、図中に、圧力が 1 気圧・1013 hPa と、温度が 0 ℃と 100 ℃を、細い破線で示しました。

縦軸の値が 1013 hPa (1 気圧) の時を考えましょう。横軸に平行に引いた破線に沿って見て下さい。温度を上げてゆくと、まず、**固体** Ice と**液体** Water の境界線に交わります。よく知っている水の**融点**、0℃（273 K、正確には 273.15 K）です。さらに温度を上げると、**液体** Water と**気体** Vapor の境界線に交わります。水の**沸点** 100℃（373 K）です。

このようにわれわれは、水の三相を日常的に目にすることができます。

他の物体の ***P*−*T*** 状態図は、ほとんど同じような形をしています。しかし、温度や圧力の数値は全く異なります。それぞれ物質固有の圧力と温度になります。



図Ｂ１．青線：H_2O の *P*－*T* 状態図の模式図

一般に、圧力が低いと物質は気体になり、温度が低いと固体になります。また、固体と液体の境界線は、水以外の物質では、赤実線のような右上りになります。水は逆に右下がりです。これは水の特徴です。

どの物質にも当てはまることですが、温度が上昇すると物質は境界線で固体から液体に変わります。この現象を**融解**と呼び、その温度を**融解点**あるいは単に**融点**と言います。もちろん圧力が変わると、融点も変わります。この境界線上では固体と液体が共存します。

さらに温度が上がると次の境界線で、液体が気体に変わります。**気化**あるいは**蒸発**と呼び、その温度を**沸点**と言います。この境界線上では液体と気体が**共存**します。

逆に、気体の温度が下がると境界線上で液体に変わります。この現象を**凝縮**または**凝結**と呼び、その温度を**凝縮温度**または**凝結温度**といいます。この**温度**は**沸点**と同じ値です。

さらに液体の温度が下がると境界線上で固体に変ります。この現象を**凝固**と呼び、その温度を**凝固温度**と呼びます。この**温度**は**融点**と同じ値です。

固体から直接気体に変わることもあります。**図 Ｂ１**の下方の青色太実線がその境界線です。固体から気体に変化することを**昇華**と呼びます。逆に、気体から固体になる時も、**昇華**と言うのが習わしです。もちろん、この線上では固体と気体が**共存**します。

ドライアイスは固体ですが、いつの間にか**昇華**して、気体、二酸化炭素になってしまいます。

金属例えば銅の場合、１気圧(1013 hPa)で、**融点**すなわち**凝固温度**は、1084℃（1084 + 273 = 1357 K)で、**沸点**すなわち**凝縮温度**は 2571℃（2844 K)です。

鉄の場合には１気圧で**融点・凝固温度**は、1536℃(1809 K)で、**沸点・凝縮温度**は 2863℃(3136 K)です。

水の ***P*−*T*** **状態図**（**図Ｂ１**）に戻りましょう。水の**融点**は１気圧で、0℃ (273 K) です。**凝固温度**と同じ値です。水の**沸点**は１気圧で、100℃(373 K)です。**凝縮温度**と同じ値です。

この図で、固体と液体の**境界線**は、右下がりになっています。この図では傾きが分かるように強調して描きました。

このことから、圧力が上がれば融点が低下することが分かります。氷に圧力が加われば Water に変わることを意味しています。これは**水だけが持つ特徴**です。

池や海の底は、水圧が掛かって圧力が上がります。圧力が上がると、Ice になる温度が下ります。後に述べるように、Water や Ice の密度のこともあり、池や海の底の Water は厳冬でも凍って塊になることがありません。

氷の上では滑りやすいことは良く知っています。なぜでしょう。Ice の上で滑りやすいのは、足が Ice に圧力をかけて、融点を下げて、足の下だけ液体すなわち Water に変えているからです。

スケート靴の裏は、尖った 1 本足ですから、圧力が一段と大きくなります。それだけ液体の量が増加し、一層滑りやすくなります。

Ice と Water の境界線が、右下がりになる、その理由は後に述べますが、氷の**結晶構造**に由来します。この性質は H_2O 特有のもので、他の物質ではあまり見られません。**図 Ｂ１**で説明したように、他の物質では赤の実線のように、固体と液体の境界線は左下がり(右上がり)です。

次に、H_2O の ***P*−*T*** 状態図の液体 Water と気体 Vapor の境界線を見てください。ゆるやかな右上がりの実線です。圧力が上がると沸点が上がります。圧力が下がると沸

点が下がります。

富士山の頂上では圧力(気圧)が低く、約 635 hPa です。そのため 87℃で Water は沸騰して蒸発します。いくら熱しても、それ以上の温度にはなりません。富士山頂で米がうまく炊けません。最近は密閉された圧力鍋があって便利です。

図Ｂ１のP—T **状態図**には３本の青色太実線が１点に集まる点が必ずあります。**図Ｂ１中**の点 T_0 です。この点は**三重点**と呼ばれています。固体、液体、気体の**三相の共存**が実現します。

全ての物質は**三重点**を持っています。図から明らかなように、三相が共存する**三重点**では圧力と温度は決ってしまいます。そのため、**三重点**は温度の**基準点**として使われます。

H_2O の**三重点** T_0 は､圧力が 6.1048 hPa、温度が絶対温度で 273.16 K です。この圧力と温度で Ice と Water と Vapor が**共存**します。

この H_2O の**三重点**は、だれでも、何処でも、いつでも作り出すことができる便利さがあります。そのため、国際的な**温度の基準点**として使われています。

図Ｂ１の温度や圧力の目盛りは、不均一であり等間隔ではありません。注意してください。

Ｂ２．水の密度　氷の密度

水の密度は 1 であることはよく知られています。ここで言う水とは、液体の水のことです。

紛らわしさをさけるため、今後、液体の水を**Ｂ１**で使ったように Water とします。同様に固体の水を Ice、気体の水を Vapor とします。水全般にかかわる場合には、H_2O を用いることにします。

Water の密度は、1 気圧でほぼ 1 です。単位は $\mathrm{gcm^{-3}}$ です。Water 1 $\mathrm{cm^3}$ の質量を g で表したものです。SI 国際単位系で密度の単位は $\mathrm{kgm^{-3}}$ を使います。この SI 国際単位系では 1 $\mathrm{m^3}$ の Water の質量を kg で表します。体積 1 $\mathrm{m^3}$ は体積 1 $\mathrm{cm^3}$ の 1,000,000 倍ですから、質量は 1,000,000 g で 1,000 kg です。**水の密度**は 10^3 $\mathrm{kgm^{-3}}$ となります。

密度は、単位 $\mathrm{kgm^{-3}}$ を使うと、単位 $\mathrm{gcm^{-3}}$ を使う時の 1000 倍大きな数値になります。密度の単位は、 $\mathrm{gcm^{-3}}$ の値を 10^3 倍すると単位を $\mathrm{kgm^{-3}}$ に変えることができます。

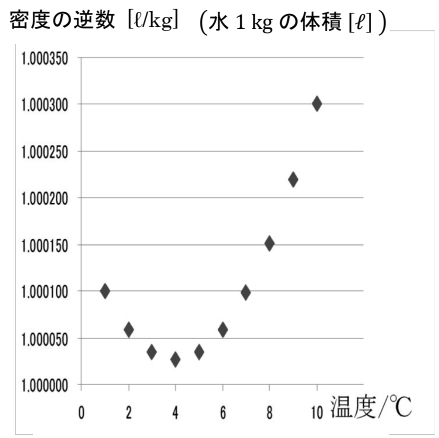
体積を表す単位に、リットル ℓ があります。1 ℓ は 1 $\mathrm{cm^3}$ の 1000 倍ですから、密度の単位 $\mathrm{kg\ell^{-1}}$ では単位 $\mathrm{gcm^{-3}}$ の場合と同じ値になります。

体積の単位 ℓ は、SI 国際単位系にはありませんが、実用的な便利さと分かり易さのため、必要に応じて使うことにします。

図 Ｂ２は、Water の密度の逆数の温度変化をグラフにしたものです。特に、10℃以下を拡大しました。

縦軸は、密度の逆数ですから、Water 1kg の体積を ℓ で表しています。縦軸は Water の密度 [$\mathrm{kg\ell^{-1}}$] の逆数ですから、単位は [$\mathrm{\ell kg^{-1}}$] となります。

図Ｂ２によると､温度が 4℃で体積が最小になります。密度が最大になります。温度がさらに下がって 0℃に近くなると Water の密度は小さくなり、体積が増加します。軽くなります。水 Water 1 kg の体積は、1.0000 ℓ から 1.0001 ℓ まで、わずかですが大きくなります。



図Ｂ２．Water の密度の逆数と温度の関係

さらに温度が下がって、0℃以下では Ice 氷になります。その時、密度はさらに小さくなり Ice 1 kg の体積は大きくなり 1.09 ℓ です。 軽くなって水面に浮ぶことはよく知っています。

Water は表面から Ice になるので、池や海の底の水 H_2O が 0℃以下になって凍るのは最後です。寒い所でも、Water の底に生息する魚にとって、常に温度が 0℃以上の Water であることが保障されていると言えるでしょう。

これは、水 H_2O の持つ特異な性質です。他の物質ではこのようなことは起こりません。もし、H_2O が他の物質のように、温度が下がり、固体になって密度が増加するならば、一度底に沈んだ Ice は、沈没船のように、 二度と我々の前に姿を見せることはないでしょう。海の底で Ice は温度が下がる一方です。きっと、地球は凍てついてしまったことでしょう。

Water と Ice のこの奇跡的な性質は、単純なことに由来します。後に述べる､水 H_2O の分子の形です。**水の惑星** 地球が、**奇跡の星**と呼ばれる最大の理由です。

Ｂ３．Water はものをよく溶かす

まず、言葉の意味をはっきりさせます。**融ける・融かす**と**溶ける・溶かす**は、同じように**とける・とかす**と読みます。しかし、意味が全く異なります。間違って使われることもよくあります。

前者は、Ice が Water になる現象、固体状態が液体状態に変わる時の言葉です。鉄が高温で**融ける**時、原子炉の中で核燃料が自ら熱を出して**融ける**時に使います。漢語では、**融解(ゆうかい)**です。

融点とは、**融ける**温度のことです。**溶融**は紛らわしいことばですが、**融けて**液体状態になる時に使われます。

一方、後者の**溶ける・溶かす**は、塩や砂糖が Water に**溶ける**時に使います。漢語では**溶解(ようかい)**です。**溶解度**とは、塩(しお)や砂糖が Water にどれだけ溶け込むかを示す数値のことです。

さて、**溶ける**とはどのようなことを意味しているのでしょうか。塩(しお)や砂糖は

Water に溶けて、無色透明になってしまいます。この時、塩や砂糖はどうなったのでしょう。

溶かす前は確かに白い砂のようなざらざらの粒で、目に見えていましたが、何処かへ行ってしまったのでしょうか。なめると塩辛いし、甘いので、塩、砂糖はそこにあることは間違いありません。

全てばらばらのイオンになって見えなくなってしまいました。**溶けた**と言います。

溶けるものが全てイオンになるとは限りませんが、ここでは、Water との関連を主題としますから、**溶けてイオンになるもの**を問題にします。

塩(しお)は、ナトリウム Na 原子と塩素 Cl 原子が電子をやりとりして、それぞれ、Na^+**イオン**、Cl^-**イオン**になったものでできています。

ざらざらした塩(しお)は、その Na^+**イオン**と Cl^-**イオン**が固く結びついた固体で、規則正しく並んだ結晶になっています。

Na^+**イオン**は、前後左右上下を Cl^-**イオン**に囲まれています。逆に Cl^-**イオン**も同じように前後左右上下を Na^+**イオン**に囲まれています。これらのイオンは電気的に強く引き合って結ばれています。

結晶では互いに身動きできない状態になっています。

ところが、この塩の結晶が Water の中では Na^+**イオン**と Cl^-**イオン**に分けられて、ばらばらになります。無色透明です。

砂糖にも同様なことが起こっています。ざらざらした粉状の砂糖の結晶が、Water の中では、プラスとマイナスのイオンに分けられて、ばらばらにされてしまいます。これらは色が着かず、無色透明です。

さて、水に**溶ける**とはどのようなことか、もう少し考えましょう。.

一般に物質は、異なった原子や異なった原子グループが、互いに結合していますが、結合に際し引力が働きます。その引力は主に、**電気的な引力**か、**電子を共有する時の引力**のどちらかです。

前者を**イオン結合**と言い、後者を**共有結合**と言います。

イオン結合 100 %の化合物、**共有結合** 100 %の化合物は少なく、多くの化合物は、この２種類の引力が、ない交ぜになっています。

Water は、H_2O 自身の持つ電気的性質によって、いろいろな化合物の電気的な引力に割り込んで、その物質の本来持つ電気的引力を無力なものにしてしまいます。

従って化合物が、少しでも電気的な引力で化合した物質であれば、Water によって単独なイオンに分けられてしまい、しかも水によって取りかこまれてしまいます。

このような水と物質の電気的な結びつきのことを**水和**と呼びます。

水和の度合いは物質によって異なります。それは物質のイオン結合の度合いによると言えます。

水和の度合いは物質によって異なりますが、Water は大抵のものをイオンに変えてしまいます。つまり物をよく**溶かす性質**を持っています。Water の特徴です。

Water に**溶けない物質**の代表は油です。**水と油**という諺にもなっています。油はイオンになりません。油が諺になるほど有名なのは、水に溶けない物はほとんどないことの裏返しです。

もちろん、厳密な意味では、溶解しないものはありません。学問的には万分の１でも溶けるかどうかを問題にするのでしょうが、ここでは無視しましょう。

イオンは水中で、塩や砂糖のように無色透明ばかりではありません。金属イオン、非金属イオン、その他錯イオンとか、多種類にわたります。色もいろいろです。同じ金属イオンでも価数が変われば色も変わります。必要になれば無機化学の教科書を紐解いてください。

溶液の色ではありませんが、イオンが炎の中で発する色を参考にしてもよいかもしれません。知っていると役に立つでしょう。**炎色反応**と呼ばれています。溶液を棒の先につけて炎に入れると炎に色がつきます。

ガスコンロで吹きこぼれた味噌汁が、黄色い炎を出します。これは味噌中の塩(しお)の Na^+**イオン**の色です。

「リアカーなき雁村、動力借るとするもくれない、馬力」は、イオンの炎色反応の色で、「Li 赤、Na 黄、K 紫、Cu 青緑、Ca 橙、Sr 紅、Ba 黄緑」の丸覚えです。

炎色反応では**銅青緑**ですが、溶液中の銅イオンは青色です。このように両者が近い色のものもあります。

多くの物質との水和性の良さは、Water の特徴的な性質で、やはり H_2O 分子の形に由来した電気的性質によります。

床の掃除には、**ぞうきんがけ**が有効です。その理由は、床に染みついたりこびりついたりしたあらゆる**ごみ**を Water が溶かしてしまうからです。溶かすには、Water が必要ですから、固く絞り過ぎたぞうきんでは効果はありません。

また、染みついたごみが、水 Water に溶けるのに時間が多少必要ですから、二度拭きすると効果満点です。溶けたごみのイオンを二度目に拭き取るのです。ただし、高級な床材例えば檜などの場合には、特別な配慮が必要です。

ついでに、石鹸について注意しておきましょう。石鹸は水がなければその効果はありません。石鹸分子の働きは、第１に、油を包み込んで水に溶けるイオンにすることです。第２の働きは、Water の表面張力を小さくして狭い隙間に Water を沁み込ませる働きです。表面活性剤としての働きです。

石鹸は繊維の隙間に Water を充分供給して、汚れを溶かしてしまいます。いずれの場合にも、十分な量の水が必要です。

しかし、食器を洗う時には、石鹸や表面活性剤はそれほど必要ありません。なぜなら、食用の脂肪(油)は、ぬるま湯に充分溶けるからです。食後すぐに洗うことが必要かもしれません。

Ｂ４．H_2O の沸点・融点 の異常

すでに**第Ⅳ章Ｂ１**で述べたように１気圧で、H_2O の融点は 0℃、沸点は 100℃です。この値を水の同族分子の値と比較してみましょう。

水 H_2O の同族分子とは、酸素の代わりに酸素と同属の元素、つまり、元素周期表で、酸素の下に縦に並ぶ元素との、同じ組成の

分子のことです。つまり、H_2S、H_2Se、H_2Te です。**図 B３**に、これらの沸点と融点の値をグラフにして示しました。

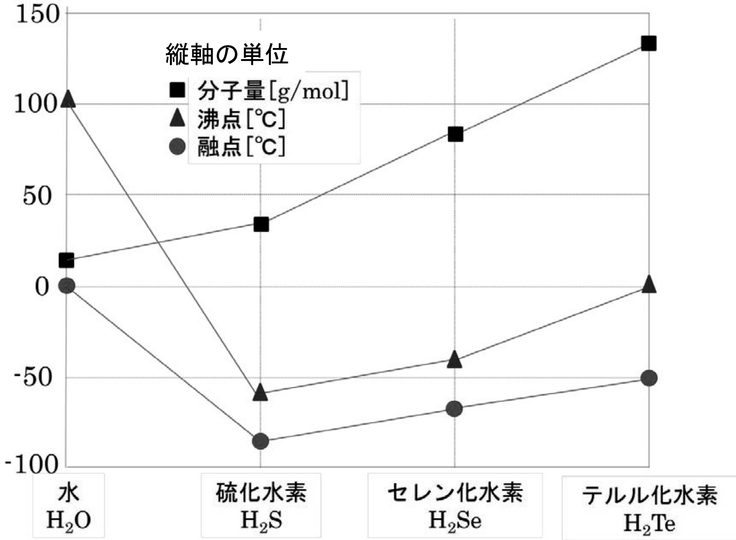
図Ｂ３中の印は、■：分子量 [g･mol^{-1}]、▲：沸点[℃]、●：[℃]融点　です。これらの数値は以下の通りです。

	H_2O	H_2S	H_2Se	H_2Te	単位
分子量 ■	18	34	81	129.5	g･mol^{-1}
沸点 ▲	100	−60.7	−41	−2	℃
融点 ●	0	−85.5	−66	−49	℃

沸点や融点は分子の質量に関係します。その温度は一般に、質量が大きいほど高くなります。H_2O 以外の３つの同族分子は、分子量が大きくなるほど沸点や融点が高くなることが図から分かります。

しかし、分子量の一番小さい H_2O だけが異常に高い沸点や融点を示しています。

これは H_2O 分子同志が、お互いに電気的に引き合うことが原因です。水分子の形状に由来する、個々の水 H_2O 分子の持つ特異な性質です。



図Ｂ３．水 H_2O の同族分子の沸点・融点の比較

Ｂ５．熱容量

第Ⅳ章Ｂ５、Ｂ６、Ｂ７の主題は、H_2O の熱にかかわる特異な性質です。特に**熱容量**と**潜熱**について説明します。**熱容量**とは温度を 1℃上げるために必要な熱エネルギーのことです。ここで、1℃は**絶対温度**で１K と同じです。

熱容量は物体の量に関係します。物体の量が多ければ多いほど、それだけ熱エネルギーが多く必要になることは明らかです。

物質１g (1 kg)を 1℃だけ温度を上げるのに必要な熱エネルギーを（**キロ)グラム熱容量**と言います。昔、**(キロ)グラム比熱**と言いました。これは物質の熱容量が、**水の熱容量**の何倍か、としていたことがあったからです。今では**比**の意味は全くありません。誤解を避けるために、ここでは比熱を使わずに**熱容量**を使います。

一方、物質 1 mol を 1℃だけ温度を上げるのに必要な熱エネルギーを、**モル熱容量**と呼びます。物質の 1 mol とは、その物質の原子あるいは分子の個数が $6×10^{23}$ 個のことです。この数を**アボガドロ数**と呼びます。

今後は（**キロ)グラム熱容量**と**モル熱容量**を使って話を進めます。

表Ｂ１に、いろいろな物質の**モル熱容量**と**グラム熱容量**を示しました。**第１列**は物質名、**第２列**はその化学記号、**第３、４列**は**モル熱容量**で、エネルギーの単位を cal カロリー と J ジュール の両方で示しました。

第５列は１モルの質量です。これはその物質の原子量または分子量です。**第６、７列**の**グラム熱容量**は、**第３、４列**の数値を**第５列**の数値で割り算した商です。

表Ｂ１．色々な物質のモル熱容量・グラム熱容量
Water と他の物質との比較

物質名	化学記号	モル熱容量		1 mol の質量	グラム 熱容量	
鉛	Pb	6.39	26.8	207	0.031	0.13
金	Au	6.05	25.3	197	0.031	0.13
白金	Pt	6.15	25.8	195	0.032	0.13
錫	Sn	6.29	26.4	119	0.053	0.22
銀	Ag	6.08	25.5	108	0.056	0.24
亜鉛	Zn	6.03	25.3	65	0.092	0.39
銅	Cu	5.77	24.2	64	0.24	0.38
鉄	Fe	5.84	24.5	56	0.104	0.44
硫黄	S	5.22	21.9	32	0.163	0.68
黄リン	P	6.27	26.3	31	0.202	0.85
赤リン	P	5.26	22.0	31	0.170	0.71
Water	H_2O	18.0	75.4	18	1.000	4.19
単 位		cal mol^{-1} K^{-1}	J mol^{-1} K^{-1}	g mol^{-1}	cal g^{-1} K^{-1}	J g^{-1} K^{-1}

Water の**グラム熱容量**、1 cal $g^{-1}K^{-1}$ または 4.19 J $g^{-1}K^{-1}$ はよく知られた値です。Water の量が kg なら、エネルギーの単位を kcal、kJ にして 1 kcal $g^{-1}K^{-1}$ および 4.19 kJ $g^{-1}K^{-1}$にすればよいのです。

この表の下段 Water の行の**第３、４列目**の数値に注目してください。Water **のモル熱容量の値が飛び抜けて大きい**ことが分かります。もちろん、**第６、７列目**の**グラム熱容量**の下段の値も同様です。

水の熱容量が大きいことは、1℃温度を上げるために必要なエネルギーが大きいことを意味します。温度を 1℃上げた時の熱の貯えが多いことを意味します。

このことは、温度が簡単には上がらないことであり、逆に、エネルギーが奪われて行く時には、そう簡単に温度が下がらないことを意味します。熱容量が大きいことは、1℃当たりのエネルギーの貯えが多いと言うことです。

例えば、海、湖、大きな河川の近くでは、熱容量の大きな Water が近くに大量存在します。そのため気温の変化が、穏やかになります。日本は島国で、周囲を海に囲まれています。国全体が温度の変化が緩やかです。これを海洋性気候と呼んでいます。日本の気候の特徴です。

ここでもう一つ注目したいことがあります。**モル** mol **熱容量**の値を見て下さい。物質に因らずどの物質も水以外は、6 cal/(mol･K) または 25 J/(mol･K)であることです。一方、**グラム熱容量**はばらばらな値です。

モル熱容量が物質によらず、ほぼ同じ大きさを持つことは、

熱容量は物質を構成する原子や分子の数でほとんど決まります。種類による違いは大きくない。

ことを意味しています。Water は例外です。

グラム熱容量の大きさはばらばらです。物質 1 g の原子数がばらばらだからです。

Ｂ６．潜熱

物質の三態を思い出してください。全ての物質は三つの**相**を持っています。温度や圧力が変わると**相**を往き来します。

相を変える時、物質にエネルギーが吸収されるか、物質からエネルギーが放出されるかどちらかが起こります。このエネルギーを総称して**潜熱**と呼びます。

固体から液体になる時はエネルギーを吸収します。周囲からエネルギーを奪います。この変化を**融解**と呼び、吸収する**潜熱**のことを**融解熱**と言います。固体と液体が共存している間は、温度は変化しません。しかし、液体の方が**融解熱**の分だけエネルギーを多く貯えているのです。

また、その逆の変化、液体が固体に変化する時には、エネルギーを放出します。このエネルギーを**凝固熱**と呼び、大きさは、**融解熱**と同じ値です。この変化の時にも温度は変わりません。

液体から気体になる時にも、エネルギーを吸収します。周囲からエネルギーを奪います。この変化を**蒸発**または**気化**と言い、吸収する熱のことを**蒸発熱**あるいは**気化熱**と言います。変化している間は温度が変わりません。しかし、気体の方が**蒸発熱**の分だけエネルギーを多く貯えているのです。

また、その逆の変化、気体が液体に変化する時には、エネルギーを放出します。この変化を**凝縮**とよび、放出するエネルギーを**凝縮熱**と言います。大きさは**蒸発熱**と同じ値です。この変化の時にも、液体と気体が共存する間は温度が変わりません。

固体から気体に直接変化することも可能です。この変化のことを**昇華**とよび、その時吸収する潜熱を**昇華熱**と言います。逆に、気体から固体に変わる場合もあり、この変化も**昇華**と言います。同じ名前で呼ばれますが、熱の出入りの方向は逆になります。

物質は**相**を変えることによって、 エネルギーを貯えたり放出したりします。 この時のエネルギーを総称したものが**潜熱**です。

Ｂ７．H_2O の 熱容量と潜熱

H_2O の熱の貯え方を図Ｂ４に示しました。

横軸は温度を℃で目盛りました。縦軸は H_2O が貯えたエネルギーの量です。図中の数値の単位は、kcal kg^{-1} です。H_2O 1 kg 当たりの貯えるエネルギーを示しています。

熱を加えると、H_2O は 0℃で Ice から Water になります。図中の点 A から点 B に、温度は上がらないままエネルギーを貯えます。**融解**です。この時、H_2O は 80 kcal kg^{-1}(335 kJ kg^{-1}) の**融解熱**を周りから奪います。同じ 0℃でも Ice より Water の方が貯えの大きいのです。

病気の時に Ice で頭を冷やしたことがあるでしょう。頭から熱エネルギーを奪って体温の上がり過ぎを防ぎます。

Ice は融けて Water になります。氷がある間は Ice と Water が共存し、温度は 0℃のままに保たれます。頭から熱を奪い続け、Ice が Water に変わります。

その反対に 0℃で Water が Ice になる時には、80 kcal kg^{-1}(335 kJ kg^{-1}) の**凝固熱**を放出し点 B から点 A に戻ります。

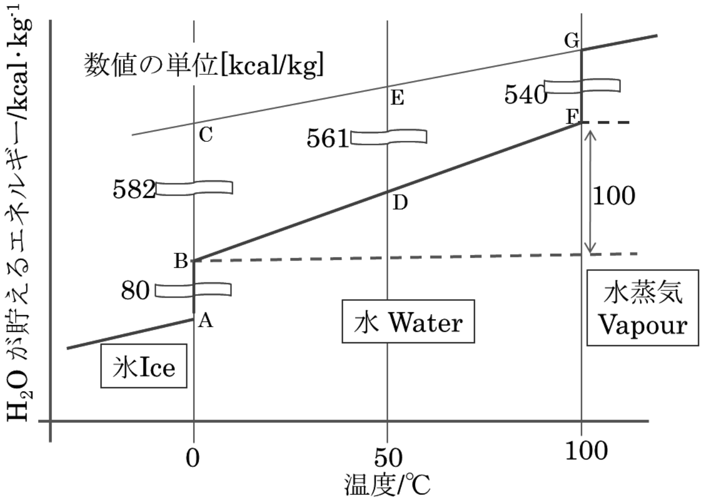
雪の降る日は暖かい、池に氷が張ると暖かいと言われます。**暖かい**は言い過ぎでしょうが、思ったほど寒さが厳しくないとのことでしょう。初冬によく経験します。

上空の水滴や池の Water が Ice に変化する時に、エネルギーが**凝固熱**として周囲に放出されるからです。

熱を加え続けると、Ice がなくなった時から Water の温度が上がり始めます。**図Ｂ４**の点 B から点 D さらに点 F に向かいます。点 B から点 F まで温度が 100℃上がりますから、Water 1 kg 当たり、100 kcal (419 kJ) の熱エネルギーを貯えます。

逆に、100℃の Water は、熱を放出しながら温度が下がります。グラフの、点 B、点 D、点 F を結ぶ直線の傾きが熱容量です。

Water が 100℃で Vapor になる時、**図Ｂ４**の点 F から点 G へ変化します。その時、Water は 540kcal kg^{-1} (2260 kJ　kg^{-1})の**気化熱**を周りから奪います。逆に、点 G の Vapor から点 F の Water に変化する時は、同じ大きさの**凝縮熱**を放出します。



図Ｂ４．H_2O の熱容量と潜熱

点 G の Vapor に、さらに熱を加えると温度が 100℃以上に上がります。その時 Vapor の熱容量は Water の熱容量と較べると、ほぼ半分の大きさです。従って点 G の右側の直線の傾きは、Water の傾きの半分になります。

日常よく知っているように、Water は 100 ℃以下でも蒸発します。洗濯物が乾きます。その時の**気化熱**はいくらでしょうか。

Water は、100 ℃以下でも**気化熱**を周りから奪いつつ蒸発します。その時の気化熱を見積もってみましょう。例えば 50℃の時の気化熱は、**図Ｂ４**の線分 DE に相当します。点 E は点 G を通る高温側の直線を、低温側へ延長した直線上の 50℃の値です。

100℃以下の水蒸気の熱容量を、100℃以上のそれと変わらないとしても大きな間違いはないでしょう。比例関係を考慮して、50℃の**気化熱**は、(540＋25) kcal kg^{-1} となります。

暑いときに汗をかくのは、体温が高くなり過ぎるのを抑えるためです。汗が蒸発して**気化熱（蒸発熱）**を体から奪い取ります。暑い日の夕方の**打ち水**も Water の**気化熱**で、周囲のエネルギーを奪い、気温の上昇を抑えます。

植物は根から水分を吸い上げ、葉を広げて葉から水が蒸発します。その時も同じだけ熱を周囲から奪います。**緑があって気持ちがよい、植物がないと砂漠状態になる、**植物が気温や湿度の調節を行っています。

逆に 100℃で Vapor が Water になる時は、540 kcal kg^{-1}(2260 kJ kg^{-1})の**凝縮熱**を放出します。

水蒸気による火傷はひどいと言われます。その通りです。同じ 100℃でも Water より Vapor の方がエネルギーをたくさん持っているからです。水蒸気による火傷は重傷になります。ただし、体に接する Vapor の量は、Water の場合に較べると、ずっと少な

いので、多少助かります。

冬の朝、アルミサッシの窓が結露しています。これは室内にあった空気中の Vapor が窓に触れて温度が下がり、Water になったものです。結露に際して、室内に**凝縮熱**を放出して室内の温度の低下を防ぎます。もちろん、結露を防ぐと室内をもっと暖かく保つことができます。

Ｂ８．H_2O 分子の形

ここからは、これまで述べた水のいろいろな性質の原因を探ることにします。

H_2O は水素原子２個と酸素原子１個からできています。水素原子と酸素原子が化学結合しています。電子を共有して結合しているのです。

水素原子は中心の原子核に陽子が１個あります。陽子はプラスの電気を持っています。その周りを、マイナスの電気を持つ電子１個が、取り囲んでいます。水素原子の持つ**電子**は、K 殻と呼ばれる指定座席を占めています。K 殻は電子が２個で満杯になり安定な状態になりますが、水素原子１個では電子が１個ですから安定ではありません。水素原子は、他の原子と化合しやすくなっています。

酸素原子は中心の原子核に、プラスの電気を持つ陽子が８個あります。その周りにはマイナスの電気を持つ電子が、やはり８個あります。これらの電子は指定席 K 殻に２個、第２の指定席 L 殻に６個が占有し、合計８個が周りを囲んでいます。K 殻の２個の電子は安定状態で他の原子との化学結合には寄与しません。

第２の指定席 L 殻は、８個の電子が占めると安定な状態になります。酸素原子の場合には L 殻には電子が６個しかありません。酸素原子も原子 １ 個では安定ではなく、他の原子と化合しやすくなっています。

水素原子２個と酸素原子１個は、うまく結合し安定な分子をつくります。水素原子２個が持つ合せて２個の K 殻の電子と酸素原子１個の持つ L 殻の６個の電子、合計８個の電子を、３個の原子で共有して安定状態をつくります。

このような結合方式を、前述した**共有結合**と呼んでいます。

この時、２個の水素原子は、結合用に改築した新たな K 殻に２個の電子を保有し、安定になります。また、酸素原子も、やはり結合用に改築した新たな L 殻に８個の電子を保有して、安定状態をつくり上げています。

この時、3 個の原子からなる H_2O 分子は幾何学的に特別な形をしています。分子が**くの字**に折れ曲がっているのです。理由は不明です。そうなっているのです。

H_2O 分子の**くの字**型の模式図を、次頁の**図Ｂ５左**に示します。酸素を中心にして、両側に水素が、角(つの)のように突き出ています。

曲がりの角度は約 105 度、水素原子核と酸素原子核の間の距離は約 0.1 nm(1Å)です。ただし、1 nm(ナノメートル) ＝ 10^{-9}m、1 Å (オングストローム) ＝ 10^{-10}m です。

図Ｂ５左の塗りつぶした円は、原子核の位置を示しています。水素原子核には陽子が１個あり、灰色小円で示しました。酸素

原子核には陽子が８個あり、大円で示しました。プラス電気を持つ陽子は原子核の中に固く捕らえられています。

一方、マイナス電気を持つ電子はどのように分布するでしょう。電子は原子核に拘束されてはいるものの、原子核の周りに自由に分布することができます。

２個の水素原子核に捕らえられている２個の電子は、８個もある酸素の陽子のプラス電気に引きつけられてしまい、酸素の近くに長時間滞在するようになります。従って、酸素原子核の周辺は、マイナスの電気を帯びてしまいます。

一方、水素の周りには電子が希薄になりますから、水素原子核はプラス電気を帯びてしまいます。このような状況を、**図Ｂ５左**の原子核の横にそれぞれ＋と－の記号を付けました。

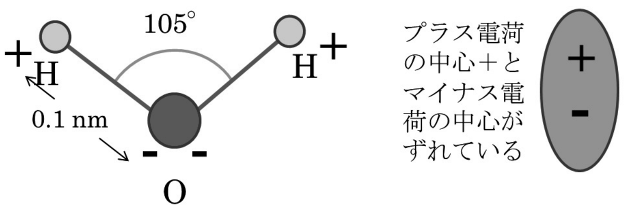
プラスの電気を持つ原子核同士はこれ以上近づくことはできませんが、マイナス電気を持つ電子は、酸素のプラス電気に影響されて酸素の近くに分布します。

このため、１個の H_2O の分子の中で、**プラス電気の中心**と、**マイナス電気の中心**が一致せず、ずれてしまいます。このような状態を**電気双極子**と呼びます。**図Ｂ５右**に**電気双極子**の模式図を示しました。

もし、H_2O 分子の形状が**くの字**型でなく、直線状であれば、このような電気的なずれは起りません。

H_2O 分子が**くの字**型になっていることによって、**電気双極子**が H_2O 分子１個の中にできてしまうのです。H_2O 分子の形状が持つ特徴です。

第Ⅳ章Ｂ７までに述べてきた水 H_2O の特異な性質は、H_2O 分子が**くの字型**分子であることに起因しています。



図Ｂ５．水 H_2O 分子の形状(左)と電気双極子(右)

Ｂ９．水素結合

Ｂ８で述べたように、H_2O 分子は、１個の分子の中で、水素原子が＋電気を帯び、酸素原子が－電気を帯びています。

このことが原因で、いろいろなことが起こります。

まず、あらゆるもののイオン化を助ける働きがあります。少しでもイオン結合の要素を持つ物質は、水の中に入ると、その結合が水分子に邪魔されてしまい、ばらばらにされてしまいます。その結果その物質は全部イオンになってしまいます。

水は、多くの物質をイオン化してしまいます。そのことを溶かすと言います。

隣り合う二つの H_2O 分子を考えてみましょう。H_2O 分子同志が、電気的に引き合います。プラス電気を帯びた水素が、マイナス電気を帯びた隣の分子の酸素に近づくのです。隣り合う二つの H_2O 分子同志が離れ難い関係をつくります。

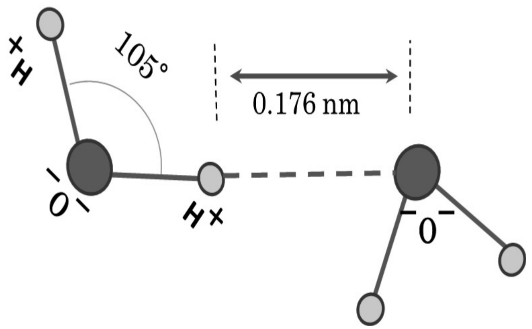
そのようすを**図Ｂ６**に示しました。水素原子と隣の H_2O 分子の酸素原子との距離は、最も近づいた時で 0.176 nm (1.76 Å) です。この隣り合う分子の水素と酸素の結合のことを**水素結合**(Hydrogen Bond)と呼びます。

この結合は、自由に動くことができる Water の中でも、お互いが引き合います。しかも、２個の水分子の間だけでなく、３個、４個、５個、またそれ以上の水分子が次々に塊をつくっていることが分かっています。

この水素結合による引力のために、Water の熱容量が大きな値になるだけでなく、Water の融点や沸点が、同族分子と較べて高くなります。

蒸発で Water から Vapor になる時には、H_2O 分子１個１個が分かれて Water から飛び出して行きます。この時、Water 中で他の H_2O 分子との**水素結合**を振り切る必要があります。そのため個々の分子が充分なエネルギーを持つまで、温度を高める必要があります。これが沸点が高くなる理由です。

Water が蒸発すると、体積が約 1700 倍になります。12×12×12=1728 で、約 1700 ですから、Vapor になれば H_2O 分子の間の距離は、Water の状態と比較すると、約 12 倍遠く離れています。Vapor では H_2O 分子が水素結合することなく、お互いに自由な



図Ｂ６．二つの H_2O 分子間の水素結合

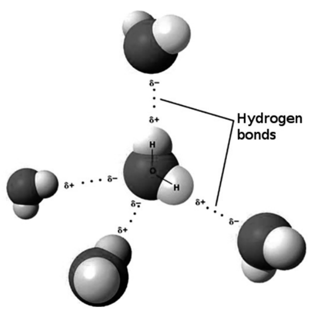
分子になったと言ってよいでしょう。

Water の中では、分子が自由に動きまわっているとは言え、H_2O 分子同志が**水素結合**で、互いに引き合っているのです。

温度が高いと言うことは、後に学ぶように原子や分子の**運動エネルギー**が大きいことです。温度が下がってくると、H_2O 分子の運動が緩やかになって、**水素結合**の効き目が大きくなってきます。効き目が大きくなると、**くの字型**の分子の方向性が強調されるようになってきます。

図Ｂ７を見てください。５個の H_2O 分子が集まった図を示します。１つの H_2O 分子を中心として、周りにどのように集まるかを示しました。**水素結合**によって水素(灰色)は、隣の分子の酸素(赤色)を引き付けます。

２個の水素は 105 度開いていますから、引き付ける酸素(赤色)はこの方向になります。１つの H_2O 分子(中央)が、２つの H_2O 分子(上と右)を、105 度開いた方向に引き寄せます。



図Ｂ７．複数個の H_2O 分子の集まり

一方、中央の水分子の酸素原子(赤)には、左からと手前からの２個の水素(白)が近づきます。この水素も別々の H_2O 分子のものです。その結果、１個の H_2O 分子のまわりに合計で４つの H_2O 分子が方角を決めて近づきます。

温度が下がるとこのように、H_2O 分子の方向性が強調されてきます。すべてが**くの字型** H_2O 分子の持つ電気双極子が原因です。

くの字に曲がった分子同士が方向性を持って力を及ぼし合うことは、効率よく詰め込むこととは相容れません。結局水分子の場合には、隙間を多く作ってしまいます。

例えば、**くの字型**が自由に近づいて詰まるとすると、**くくくくやくへくへ**と並んだり、ずらせたり逆さにしたりして、隙間を減らして詰め込むことが可能です。よく詰まると密度が上がります。

ところが実際の Water では、その反対に、**くの字型**が、水素結合のために、**図Ｂ７**のように集まりたがるのです。これでは上手く詰め込まれるはずはありません。

このことが、4℃以下で Water の体積が増加し、密度が小さくなる原因です。密度と温度の関係が、**図Ｂ２**に Water 1 kg **の体積の変化** として示されています。

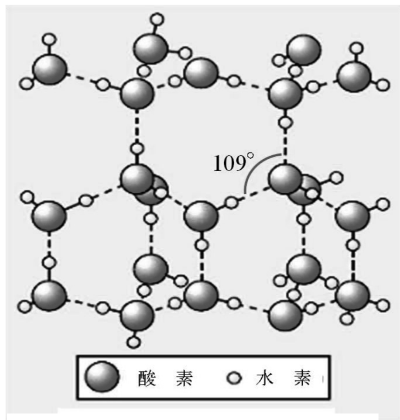
Ｂ１０．Ice の結晶構造

さらに温度が下がって、Water が Ice になるとどのようになるでしょう。固体ではすべての物質は、分子や原子が規則正しく周期的にしかも立体的に整列しています。これを結晶と呼んでいます。

氷の結晶では**水素結合**に起因する**立体構造**がもっとはっきりしてきます。H_2O 分子１個の中の酸素原子は､水素を介して４個の酸素に取り囲まれます。

さて、自分を中心にして**周りの立体空間を４つに分ける**にはどのようにすればよいかを考えて下さい。平面内で考えると、**東西南北**に手を出すとよいことはすぐに分かります。

ここで考えるのは、上下も含めて、周りの全ての空間を４つに分けるのです。それは、両手を斜め上に広げ、足を前後に開く合わせて４つの方向です。これが、全空間を均等に４つに分ける方向です。



図Ｂ８．Ice の結晶構造

１個の酸素原子を中心にして、この４つの方向に酸素がくるように水分子が配列するのが、Ice の結晶中の原子の並びです。もちろん酸素と酸素の間には水素があります。

Ice の結晶構造を**図Ｂ８**に示します｡赤い大きな球は酸素、小さい黄色の球は水素を示しています。これらが図のように立体的に並んでいます。これは立体図です。

１個の酸素を中心にして、周りの４個の酸素で作る形は、海岸で波を砕くために作られたテトラポットの形です。図から分かるように、角度が、105 度ではなくて、約 109 度になりました。H_2O 分子が僅かに角度を変えるだけで、うまく立体を作っています。

立体を作る酸素原子間の距離は、0.274 nm、酸素原子間には水素原子があります。水素の位置は真中ではありません。その距離は、0.1 nm と 0.174nm です。前者は、H_2O 分子１個の中の酸素と水素の間の距離です。後者は水素結合の場合の酸素と水素の距離です。

この構造は隙間の多い構造で Ice の体積が増加し、Water に浮く理由はここにあります。

水の結晶に圧力がかかると、自分自身の体積を減らす方向に変化します。つまり、Ice 状態より Water 状態になった方が､H_2O 自身に取って楽なのです。これが、**図Ｂ１**の固体と液体の境界線が右下がりになる原因です。

C．熱と温度

C１．熱とは何か

昔のことです。熱がまだ何ものか分からなかった時代のことです。当時最高の化学者ラボアジェが作った元素表には、元素の一つとして**熱素**が挙げられていました。英語で**カロリック**です。ラボアジェは**熱素**を**質量なし**と記載しています。

会計担当の官吏が本職のラボアジェは、フランス革命の犠牲者となりました。1789 年ギロチンで首をはねられてしまいました。

この頭を切ることは簡単なことで
あるが、この頭を作るには何世紀
もかかるだろう

と、イタリアの物理学者ラグランジュは嘆きました。ラボアジェの現代科学への功績を鑑みるに、今も心の痛みを覚えます。

現在も使われているエネルギーの単位**カロリー** cal は、熱がまだエネルギーとは分からなかった時代の単位であり、水 1 kg を 1℃上げるのに**カロリック**が、1 キロカロリックだけ必要であるとしていました。

エネルギーの単位 cal については第 I 章で詳しく述べました。参照してください。

イギリスの物理学者**ジュール**（1818 - 1889）が、1843 年頃、熱が力学的な仕事と等価であることを実験的に証明し、1 kcal が 4.15 kJ であることを突き止めました。当時、この値を**熱の仕事等量**と呼びました。この値はジュールの実験値です。今では約 4.186 kJ ですが、正確な数値として定まりません。

数値が決まらない理由は、水の熱容量が、0℃から 100℃の間で一定値ではなく、いろいろな値を取るからです。

ジュールはほぼ同時に、電気的なエネルギーも電流と電圧の積であることを実験で示しました。

全ての物質は原子分子からできており、その原子分子はその物質の温度に見合った動きをしています。温度が下がると、運動エネルギーが減少します。温度が上がると、原子分子の運動エネルギーが増加します。

原子分子の運動エネルギーが熱そのものなのです。

C２．エネルギーの単位

SI **国際単位系**におけるエネルギーの単位は ジュール J です。イギリスの物理学者ジュールの功績を称えてエネルギーの単位にその名前を使わせてもらっています。

エネルギーは、力と長さの積で求める**仕事**を基にしています。ここに言う**仕事**は、物理学における特別用語であります。

単位 ジュール J の組み立て単位は、ニュートンメータ Nm です。ここで、N は力の単位です。

前節で述べた cal は医療現場および関連分野でまだよく使われているエネルギーの

単位です。昔はあらゆる分野で使われていました。しかし、徐々にジュール J に切り替わりつつあります。

単位時間つまり 1 秒当たりのエネルギーのことを**仕事率**と呼びます。単位はワットで、記号 W と書き、組み立て単位は $W = J\,s^{-1}$ となります。

一方、**電力**は**電流**（**単位アンペア** A）と**電圧**（**単位ボルト** V）の積で、1 秒間に電流のする仕事つまり電気的エネルギーであり、仕事率と同じものです。[W] = [AV] 電磁気学と力学の接点です。

C３．キログラム熱容量・モル熱容量

熱容量とは物質の温度を 1 K 上げるために必要なエネルギーのことです。特に、物質 1 kg の熱容量のことを kg **熱容量**と言い、物質 1 mol の熱容量を mol **熱容量**と言います。

比熱とは**熱容量**と同じ意味です。したがって、kg **比熱**、mol **比熱**が使われることもあります。現在では**比**の意味は全くありません。紛らわしさを避けるために、ここでは**比熱**は使わないことにします。

しかし昔は、**比熱**をよく使っていたので、今も使う人はたくさんいます。

熱容量については、**第 IV 章 B５ 熱容量**に詳しい説明があります。

そこには**表 B１**でいろいろな物質の mol 熱容量と kg 熱容量を比較しました。熱容量は原子や分子の数に比例します。従って、mol 熱容量は物質によらず、ほぼ同じ値になります。

C４．温度

温度とはその物質の持つエネルギーの尺度と思ってください。温度の高いものはそれだけ多くのエネルギーをもっています。

例外もあります。例えば**第 IV 章 B６**で学んだ**潜熱**の場合には温度が同じでも潜熱の分だけたくさんのエネルギーを持っている場合もあります。

温度の単位は、世界中ほとんどの国で、摂氏 °C の温度目盛が使われています。

スウェーデンのセルシウスが 1742 年に考案したアイディアを基礎にしています。1 気圧で、氷が水になる温度・融点を 0℃、沸騰する温度・沸点を 100℃とした温度目盛です。

摂氏はセルシウスの中国語表現に使われた漢字です。

絶対温度と呼ばれる温度の尺度があります。これは物理学上重要な温度目盛です。温度には低い方に限界があります。これ以上、下がることがない温度があることが明らかになりました。その温度は、–273℃なのです。ケルビン卿の理論です。

その状態では物質を構成している原子や分子が、全てのエネルギーを失ってしまった状態になります。これ以上失うエネルギーがない限界の状態です。その状態を**絶対0度**と言います。

この論理的に導かれた最低温度を0度として温度を表すことは合理性のあることでした。温度間隔には℃の間隔を借用して、**絶対温度**を定義しました。この**絶対温度**は物理学ではもっぱら使用します。

絶対温度の単位は**ケー**で記号はKを使います。ケルビン卿の頭文字です。この単位は**SI国際単位系**における7つの**基本単位**の一つです。

日常の温度の単位として、主にアメリカで使われている華氏°F　がありますが、知らなくてよいと思います。アメリカへ行った時に驚かないことです。気温が100度なんて数値が出てきますから。

C５．物質の移動による熱エネルギーの移動・対流

ここからは、熱エネルギーの移動・伝播についての話をします。熱エネルギーの移動には三通りが考えられます。

１．温度の高い物質が温度の低い物質と入れ代わることによる熱エネルギーの移動。これは、地球上で重力が原因で起こる場合に**対流**と呼んでいます。

２．熱自身が移動する。熱は、原子や分子の運動ですから、その動きだけが隣の物体へ移動して行く現象です。**熱の伝導**と呼びます。

３．**電磁波**として伝播することによる熱の移動。熱だけでなく、熱を含む光の全エネルギーが伝播します。平易な言葉で、**光の放射**と呼びます。**光の輻射**とも言いますが、輻射の輻の字が使われなくなったのが原因でしょうか、最近は**放射**がもっぱら使われます。

対流：自然に起こる対流は、地球の重力によります。身近に起こる対流は、大気の対流です。地表近くで暖められた空気が軽くなり、上昇し、冷えた空気と入れ代わります。

部屋の中でも小規模ですが、空気の対流は起こります。冷えた空気は下方へ、暖かい空気は上方に集まります。

冬、エアコンでは暖かい空気が室内に供給されます。エアコンから出た暖たかい空気はすぐ天井近くに集まり、代わりに冷たい空気が足元に降りてきます。**頭寒足熱**の逆となります。

暑い夏には冷たい空気がエアコンから供給されます。よく冷えていますから冷たい空気は床を這い、最も低い場所を見つけて集まります。土間があれば、土間だけが冷えます。

暑い夏、部屋の冷房に、冷やし過ぎた空気を供給すると床を這うだけです。部屋の高い所から空気を供給することも重要です。冷えた空気を単に吹き出すだけでなく、よくかき混ぜることが必要です。

なぜなら、空気は最も熱の伝導の悪い物質だからです。

そのためむしろ適当な高さにある冷蔵庫やテレビに吹き付けてそれら自身を冷やすのがよいと思えます。特に熱を放出しているものを直接冷やすのも重要なことでしょう。

一方暖房は、余り暖め過ぎない空気を、部屋の下方から供給することが必要です。ここでも、よく混ぜることと、家具を暖めるのが効率的と思えます。

対流といえばお風呂の湯を思い出すのは昔の話です。昔の風呂は下から暖め、重力により自然に暖かい水が上に登り、冷たい水と交代します。

最近の風呂は自然の対流を利用せず、強制的に水を巡回させて沸かします。湯沸かし器の構造はすぐには見えません。重力を利用しているにしても、自然の営みを目にし難い時代になっています。

C６．熱の伝導による熱エネルギーの移動・熱伝導

熱の伝導とはなにでしょうか。熱は原子や分子の動きです。温度が高いほどその動き方が激しくなります。

固体中では、原子分子はそれぞれ居場所が決まっています。従って、その動きとは、それぞれの位置の周りの振動のことです。激しく振動しています。熱振動と呼んでいます。その激しさは温度で決まります。

液体中では原子や分子は少し自由に動きまわることができます。隣の原子分子との距離は固体の場合と同程度ですから、固体と同じような振動もしながら、隣と衝突し、動きまわっています。

気体では、隣の原子分子までの距離が、固体や液体と較べて10倍以上あります。ある程度自由に動きまわることが可能です。

それでもそんなに長くはまっすぐに走ることは出来ません。すぐに原子分子と衝突してしまいます。

全ての物質は原子や分子からできています。そして、その温度に見合った原子の動きをしています。熱の伝導とはこの原子や分子の運動の激しさが伝わってゆくことです。

熱の伝導は温度の高い物質から温度の低い物質に伝わります。温度が等しくなるまで熱が移動します。

熱の伝え方は物質によって異なります。一般に、電気をよく伝える金属は熱もよく伝えます。電気を伝えにくいもの、これは**絶縁体**と呼ばれますが、絶縁体はやはり熱を伝えにくいものです。

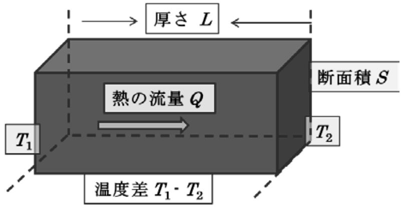
金属の**電気伝導**には**自由電子**と呼ばれる電子が大きな役目をしています。同様に熱

の伝導にも、この自由電子が寄与しています。従って金属は熱もよく伝えます。

熱の伝え方は手で触ると分かります。金属に触れると冷たく感じます。これは金属の温度が低いのではありません。手から熱をよく奪うからです。奪った熱は金属の中をどんどん広がってしまいます。手はいつまでも熱を奪われ続けるので、冷たく感じるのです。

絶縁体の場合、手が触れた部分から熱が逃げてゆきません。手から熱が奪われることはありませんから冷たく感じることもありません。

熱の伝導の経験式を書いてみましょう。**図Ｃ１**は、物体中を流れる熱エネルギーを模式的に描いた図です。



図Ｃ１．熱の流れのモデル

式であらわすと次の通りです。

長さ(厚さ) L[m]、断面積 S[m^2]、温度差 $(T_1 - T_2)$[K]の時の熱の１秒当たり流量 Q [W]は、次式で表されます。

$$\frac{Q}{S} = K(T_1 - T_2)\frac{1}{L} \qquad \text{(C1)}$$

ここで、Q [W] は１秒間に流れる熱エネルギーで、単位は [W = J s^{-1}] です。

ここで、K は**熱伝導率**であり、**熱伝導度**とも言い、物質によって異なる値です。単位は [W m^{-1}K^{-1}] です。単位面積当たり、１秒当たりの熱の流量は、熱伝導率と温度差に比例し、長さ(厚さ)に反比例します。

いろいろな物質の熱伝導率 K を、**表Ｃ２**に、値の大きい順に一覧しておきます。

熱伝導率の大きいもの５つを挙げると、金、銅、銀、アルミニウム、グラファイト。**熱伝導率**は 200 Wm^{-1}K^{-1} 以上

熱伝導率の小さいもの５つを挙げると、空気、綿や布類、紙、土、木材です。**熱伝導率**は 0.2 Wm^{-1}K^{-1} 以下。1000 倍以上の違いがあります。

空気が最も熱伝導の悪い物質です。**第 IV 章Ａ１大気** で学んだ断熱膨張、断熱圧縮が起こる原因は空気の熱伝導率の悪さにあります。

日本ではアルミサッシが窓枠に使われています。ガラスをアルミサッシの枠で保持しています。

アルミニウムで作った窓枠から、どれだけの熱エネルギーが流入、流出しているか計算してみましょう。皆さんも自分の部屋の窓全部について熱の流入量を計算してください。

全流入熱エネルギーは、枠(アルミサッシ or 木材)からの流入量 とガラス または 紙の障子 部からの流入量の和としましょう。

流入量は式(C1)の両辺に断面積を乗じて

流入量 ＝ 熱伝導率×温度差
×断面積÷長さ(厚さ)　　(C2)

を使って計算します。

表Ｃ２．熱伝導率（熱伝導度）[Wm^{-1}K^{-1}]

金属	
銀	428
銅	403
金	319
アルミニウム	236
サッシ用アルミ合金	209
グラファイト	80 – 230
シリコン	168
黄銅しんちゅう	106
鉄	84
ゲルマニウム	67
砲金青銅	53
鋼はがね	50
ステンレス	15
絶縁体	
氷	2.2
炭	1.5
磁器	1.5
石英ガラス	1.4
耐火れんが	1.1
コンクリート	1.0
ガラス	0.6
れんが	0.5
砂	0.3
石綿板	0.3
ナイロン	0.27
ゴム	0.2
木材	0.15
乾燥土壌	0.14
石膏	0.13
ポリスチレン	0.1
珪藻土	0.1
綿布	0.08
紙	0.06
絹布	0.05
毛布	0.04
フェルト	0.04
ガラスウール	0.04
綿	0.03
空気	0.024

私の部屋について計算してみました。次の通りです。

窓の形状：
枠面積 0.6 m^2　　枠厚さ 0.03 m
ガラス面積 4.8 m^2　ガラス厚さ 0.015 m
内障子の面積 4.8 m^2　障子紙厚さ 0.001 m

素材：
アルミサッシ製：アルミサッシの熱伝導率 $K_{\rm A} = 209\ {\rm Wm^{-1}K^{-1}}$
木製：木の熱伝導率　$K_{\rm W} = 0.15\ {\rm Wm^{-1}K^{-1}}$
ガラス製：ガラスの熱伝導率 $K_{\rm G} = 0.6\ {\rm Wm^{-1}K^{-1}}$
紙製：紙の熱伝導率　$K_{\rm P} = 0.06\ {\rm Wm^{-1}K^{-1}}$

熱の流入量：式(C2)に各数値を代入すると、

枠からの流入量
アルミサッシ枠の場合：$Q_{\rm FA}$ とし、
木製枠の場合：$Q_{\rm FW}$ とし、

ガラス部分からの流入量
ガラス窓の場合：$Q_{\rm G}$とし、

内障子部分からの流入量
障子紙の場合：$Q_{\rm P}$ とする。

ただし、下添え字は、
F：Flame、A：Aluminum、W：Wood、G：Glass、P：Paper　を意味します。

$$\begin{aligned} Q_{\rm FA} &= 209\,(T_1 - T_2)\,0.6/0.03 \\ &= 4200\,(T_1 - T_2)[{\rm W}] \qquad \text{(C3)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{\rm FW} &= 0.15\,(T_1 - T_2)\,0.6/0.03 \\ &= 3.0\,(T_1 - T_2)\,[{\rm W}] \qquad \text{(C4)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{\rm G} &= 0.6\,(T_1 - T_2)\,4.8/0.015 \\ &= 190\,(T_1 - T_2)\,[{\rm W}] \qquad \text{(C5)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{\rm P} &= 0.06\,(T_1 - T_2)\,4.8/0.001 \\ &= 290\,(T_1 - T_2)\,[{\rm W}] \qquad \text{(C6)} \end{aligned}$$

アルミサッシ製の枠による熱の流入および流出が桁外れに大きいことが式 (C3) の計算の結果から分かります。式 (C4) の木製の枠と桁違いであることが分かります。

ガラスの厚さが 15 mm は二重ガラスの構造によります。反射像が２組４個見えます。そのサイズを測りました。二重ガラスの隙間には空気があるでしょうが、この間がガラスで埋まっていると仮定しました。

厚さ５mm のガラス１枚の場合、熱の流れは、式（C5）の３倍の値になります。

障子紙の厚さ 1 mm は、普通の障子紙より厚いですが、ひとまずこの値で計算しました。厚さが半分 0.5 mm になれば、流入する熱量は２倍になります。0.2 mm の場合は熱の流れが５倍になります。

内障子はガラス窓の内側にありますから、障子紙の両面の温度差を表す、式(C6)の（$T_1 - T_2$）は、外気温と室温の温度差より小さな値になるでしょう。

仮にこの温度差が３分の１になるとすると紙の厚さが３分の１に薄くなっても同じ熱の流入流出量です。

もし窓枠がアルミ製ではなく、木材なら全く問題はありません。アルミサッシによる熱の流入は現代の日本家屋建設において、大きな問題だと思いますが、最近は色々な工夫がされ始めました。

熱の流れは、夏流入、冬流出です。アルミサッシは外部との温度差１ ℃当たり、4 kW 以上の熱エネルギーの流入流出です。10 kW のエアコンでは、特に夏の暑さには耐えきれません。

それを避けるために、私の家の窓には全部内障子を入れました。障子紙による熱の流入流出量は、式(C6)から分かるように、温度差 1℃当たり、せいぜい 300 W 程度です。冷暖房は 10 kW のエアコンでなんとか凌いでいます。

Ｃ７．光によるエネルギーの移動・放射

光は放射によってエネルギーを伝播します。光がエネルギーを伝播することはいろいろな場面で実感します。

冬の寒い日、日だまりで直接太陽の光を受けるのは心地が良いものです。

逆に、真夏の太陽は、麦わら帽子をかぶって避けないと暑くて困ります。

電気ストーブは直接赤く見える所と見えない所で、暖かさが違います。

頬（ほほ）が赤くなっている時、そっと手のひらを頬に近づけてみて下さい。触れないように近づけて下さい。手のひらが暖かさを感じるでしょう。頬から手に光が伝播しました。

逆に冬の寒い日、鼻先が冷たくなることがあります。そんな時、手のひらを、鼻に触れないように近づけて下さい。手のひらの真ん中が冷えるのを感じます。

実は、どんな物体でも光を出しています。エネルギーを放出しているのです。温度の高い物体からだけでなく、温度の低い物体からも、それに見合う光のエネルギーを放出しているのです。

結局、差し引きすると、温度の高い物体から放出される光の方が多いので、低いものの方がもらうエネルギーが多くなって、暖められてしまうのです。

頬に近づけた手のひらは頬からエネルギーをもらいます。鼻先に近づけた手のひらは、鼻先にエネルギーを取られます。

これが光の放射によるエネルギーの伝播です。どんな物体も光を放射しています。

このことについては、第 IV 章 F で詳しく述べます。そして、太陽と地球の関係について学びましょう。

D．波・音・光

D１．波とはなにか

お風呂の中でチャプチャプしてみましょう。水の表面にできる凹凸(おうとつ)は、波の代表です。何が起こっているかをよく観察してください。なにがどのように動くかを調べましょう。

水自身は上下に動いているだけですが、凹凸状態は、湯船の向こうの端まで行ってしまいます。そして、反射してまた戻ってきます。

なわ跳びの**なわ**をピンと張って、一端を手で握り、上下に動かすと、ピンと張った**なわ**に**コブ**ができて、そのコブだけが向こうの端まで伝わります。

うどん屋や蕎麦屋には暖簾（のれん）が掛かっています。もしその暖簾が、相撲取りが礼装として腰に巻く**さがり**のような暖簾だったら、くぐる前にちょと遊んでみてください。

垂れ下がった暖簾の下端を手で揺らせてみて下さい。右端から左端へ手を動かして、全部の**さがり**を揺らして下さい。

暖簾の**さがり**１本１本は振り子のように振動し始めます。この時、暖簾全体を見ると、**さがり**の下端に密部と疎部ができて、しかもそれらがちょうど手で揺らした時と同じように、右から左へ動いているのが分かります。

繰り返し繰り返し密部と粗部が、右から左へ移動します。暖簾の１本１本の**さがり**は、先端が単に往復しているだけです。にもかかわらず、密部と粗部が移動しています。この現象を**波**と呼んでいるのです。

波を作っているものを、波の**媒体**（**媒質**）と呼びます。

最初の水面波の例では**媒体**が水です。**なわのコブ**の波では**なわ**が媒体です。暖簾の波では**媒体**は暖簾の**さがり**の先端です。

媒体はその場で揺れているだけにもかかわらず、凹凸状態や粗密状態だけがどんどん移動します。これが**波**です。

媒体の振動方向と波の伝播方向が平行な波を**縦波**と呼びます。縦波の代表は音です。

波には横波もあります。媒質の振動方向と波の伝播方向が垂直な波のことです。そのような波を**横波**と呼びます。空間を伝わる光の波が横波の代表です。光の媒体は空間に生じる電場と磁場です。

空気中を伝わる音の媒体は空気そのものです。前に述べたように縦波です。空気の移動の方向と音の伝播方向が平行です。

なわのコブの波は横波です。**なわ**は上下に動いていますが、コブの進行方向は、**なわ**の動きに垂直です。

暖簾の**さがり**の波は**縦波**です。**さがり**の振動方向と波の伝播方向とが平行だからです。ここで、同じ暖簾を使って**横波**を作ってみましょう。

暖簾の幅より長い棒を用意して下さい。暖簾の**さがり**を全部一斉に20度ほど傾けて支えます。その後、棒を左側へ引き抜いてください。

右側の**さがり**から順次支えがなくなり振動を始めます。先ほどとは90度違う方向に**さがり**は振動を始めます。その結果、**さがり**の下端は、前後に曲がったカーブ曲線を

描きます。そのカーブ全体が右から左へ移動します。

さがり１本１本は、前後に揺れています。こうして、**さがり**の揺れの方向と、波の伝播方向が垂直な波ができました。これは**横波**です。

波を正確に理解するために、波を表現するための言葉とその意味を覚えてください。

周期：T [s]
振動数：$\nu = \frac{1}{T}$ [Hz(= s^{-1}), ヘルツ]
波長：λ [m]
伝播速度：c [ms^{-1}]

これらの言葉の定義をはっきりさせるために、風呂の水面の波に戻りましょう。そして、次の２つのことを頭の中で考えてみて下さい。

第１に考えること：水表面の１点で、水の動きを調べることです。湯船につかって水中から指を突きだして下さい。そして、指の周りの水面の動きを調べてください。

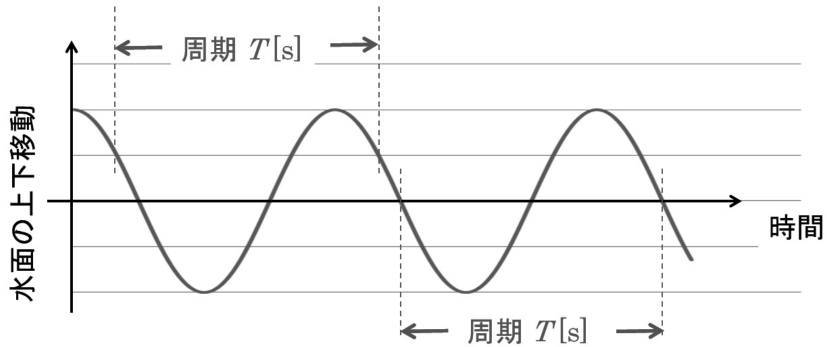
指の周りの水面は上下に揺れていることが分かります。時間とともに、水面の高さが変わります。その動きをグラフにしてみましょう。

横軸に**時間**を取って、時間の経過とともに水面がどのように変わるかをグラフにしました。**図D１**です。**縦軸**は**水面の高さ**です。よく調べると水面は僅かに横方向にも揺れていますが、今は無視しましょう。

高さの変化は周期的です。上がって下がって、また上がります。水面が同じ高さに来るまでの時間を**周期**と言います。**周期**をTで表わすとしてTの単位は［秒 s］です。周期が T［秒］ですから、1秒間に振れる回数は$1/T$です。

この$1/T$を**周波数**または**振動数**と言い、ギリシャ文字のν（**ニュー**）で表します。単位は[s^{-1}]です。この単位は特に[Hz]と書いて**ヘルツ**と呼びます。ラジオやテレビの放送で、電波の周波数をキロヘルツとかメガヘルツをよく耳にします。

もし周期Tが0.2 s秒なら、1秒間に振れる回数$1/T$は5となり､周波数νは 5 Hzです。



図D１．波：定点での水面の動きをグラフにしたもの

子供の遊ぶブランコの振動周期 T はおよそ２秒です。往復に約２秒掛かります。ブランコの振動数 $\nu = 1/T = 1/2 = 0.5\ \mathrm{Hz}$ となります。

１秒間に 60 回振れる西日本の交流電源は $\nu = 60\ \mathrm{Hz}$ で、その周期 T は、$1/T = \nu = 60$ より $T = 1/60 = 0.0167\ \mathrm{s}$ となります。

第２に考えること：波を一瞬止めることです。例えばお風呂の波の写真を撮ることです。凹凸が湯船一面に広がって写ります。これを図にして、**図Ｄ２**に模式的に示しました。

図Ｄ２の**横軸は位置**を示していることに注意してください。**図Ｄ１**では**横軸が時間**でした。

波は凹凸を繰り返しています。一つの凸に注目します。隣の凸までの距離を**波長**と言います。波長をギリシャ文字の λ（ラムダ)で表わします。λ は長さで、その単位は [m メートル]を使います。

波の凹凸はそれ自身、右または左に移動します。ちょうど**暖簾波**の密部が移動するのと同じように移動します。

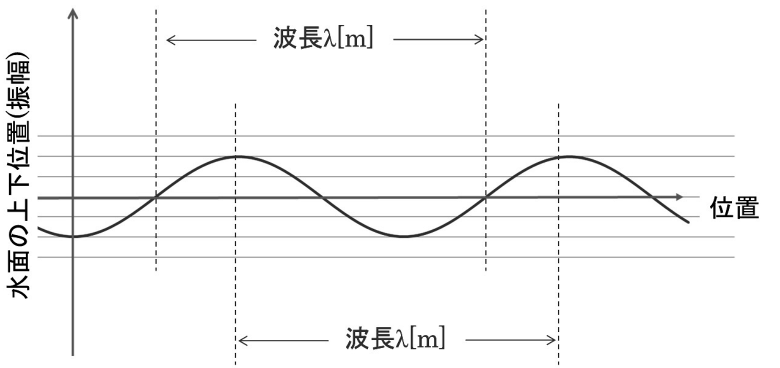
この凸部分が移動する速さのことを、**波の速度**と言います。凸部分が１秒間に移動する距離が波の速度です。

波の速度を c で表し、単位は、$[\mathrm{ms^{-1}}]$とします。上に述べた**周波数(振動数)** ν と**波長** λ と**波の速度** c の間に、次の関係が成り立ちます。

振動数×波長＝波の速度

$$\nu\lambda = c \qquad \text{(D1)}$$

速度 c が分かっているときは、式（D1）を使うと、振動数から波長が計算でき、逆に、波長から振動数が計算できます。



図Ｄ２．波：時間を止めて一瞬を見たときの波のようす

Ｄ２．音波　粗密波　縦波　波長　振動数　音速

音は空気の振動です。私の**のど**から出た声は、空気を振動させて伝わり、あなたの耳の中の空気を震わせます。そしてあなたの鼓膜を震わせます。

空気の振動をよく調べると、空気の圧縮部と膨張部が交互に生じ、**密部**と**粗部**が繰り返されています。したがって、音の波のことを**粗密波**とも呼びます。

空気の粗部と密部では**断熱変化**が起っています。**断熱変化**は、**Ａ大気**で学びました。

音の波と空気密度の関係を図に描いたものが**図Ｄ３**です。空気の密な部分は線の間隔を狭く描きました。疎な部分は線間隔を広くしました。交互に現れます。疎から疎、密から密までの距離が波長です。

音が伝わるとは、この粗と密の状態が全体で、左から右へ移動して行くことです。この移動を図の下部に長い矢印で示しました。

この時、空気自身はその場で左右に振動するだけです。図の上部の短い矢印で示しました。波を伝える媒体、この場合空気、と波の伝播方向が平行です。空気中を伝播する**音波は縦波**です。

空気中の音速は 15℃の時 340 $\mathrm{ms^{-1}}$ で、音速は振動数によって変わりません。

音速は温度によって変わり、温度が高いほど音速は大きくなります。

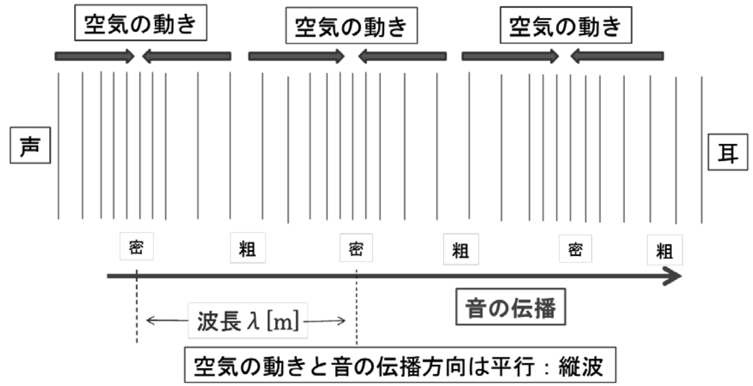
寒い冬の夜には遠くの音がよく聞こえると言います。犬の遠吠えがその例です。それは地表では温度が下がり、音速が遅くなりますが、上空では空気の温度が下がらず、音が早く伝わります。その結果、音が山型に曲がって進むからです。

我々の耳に聞こえる音の振動数は、低音部 20 Hz から高音部 20000 Hz と言われていますが、個人差はあるでしょう。

式(D1)を使うと波長を計算することができます。波長は低温部 17 m、高温部 0.017 m（1.7 cm）となります。

我々の出す声の振動数は、男性でおよそ 200 Hz で、女性でおよそ 300 Hz ぐらいです。この音波の波長はそれぞれ 1.7 m、1.2 m 程度です。体の大きさに応じて使う音波の波長が変わるようです。

猫やネズミなど小さい動物ほど、波長の短い音つまり高い音を出すと言われています。



図Ｄ３．音の伝播と空気の動き　粗密波

Ｄ３．音の三要素　高さ・大きさ・音色

我々が耳にする音について調べましょう。**高い音・低い音、大きい音・小さい音、気持ちの良い音・気持ちの悪い音**、これらは何が違うのでしょう。

音の**高い低い**は空気の**振動数**の違いです。高い音は振動数が大きく低い音は振動数が小さい音です。空気中の音の速さは一定ですから、振動数が分かると、式(D1)を使って波長を求めることができます。

振動数×波長＝波の速度　　(D1)

この式から分かるように、高い音の波長は短く、低い音の波長は長くなります。

NHK **の時報**は 440 Hz のラ音と１オクターブ上のラ音 880 Hz を使っています。

音の大きさは、図Ｄ１、図Ｄ２の**ふれ**の大きさのことです。空気分子の移動の大きさに対応します。振れの大きさを**振幅**と呼びます。振幅が大きい方がエネルギーの大きい音です。

音の気持ちの良さ、悪さは、主観的なものとはいえ、明らかに何かが違っています。我々は一声聴いただけで誰の声か判断できます。同じ高さの音を出して歌を歌っていても、誰の声か区別がつきます。このことを **音色（ねいろ）が違う** と言います。

では、何が違うと**音色**が違って聞こえるのでしょうか。**音叉（おんさ）**の音を聞いてみてください。味気のない無味乾燥な音です。異なった２本の音叉の音を聞き分けることはできません。

この音叉の音をグラフにすると、**図Ｄ１**や**図Ｄ２**のようなきれいな**三角関数**のグラフになります。

それと較べて、人の出す音(声)の波形をみると、凹凸が多く、みにくい形をしています。波形の凹凸は、他の高さの音が同時に出ているからです。オクターブ高い音を始め、いわゆる**倍音**が混じるからです。

倍音とはなんでしょうか。両端を固定して適当に張られた１本の弦の出す音は、その主要な音だけでなく、異なった音が混じっています。混じる音は、主要な音と較べると、波長が半分の音、1/3 の音などと決まっています。その弦が出しうる全ての音のことを**倍音**と言います。

それら倍音の含まれ方は、発音体それぞれによって異なります。形状や堅さが違うからです。太鼓の膜は複雑です。

倍音が混じることによって、波形が崩れてしまいます。**波形**の崩れ方が**音色**を決めます。人それぞれ異なっており、弦楽器、管楽器、打楽器それぞれに特徴のある音を出します。

波形のことなど知らない昔の日本人が、**音色**という情緒ある言葉を作ってくれたことに感謝しましょう。

Ｄ４．液体中の音波　固体中の音波　超音波診断

液体中の音波は、空気の時と同様に液体が振動して伝わります。この場合も、音の伝播方向と液体の振動方向が平行であり、縦波です。水中での音速はおよそ 1500 m/s

で、空気中より５倍近くの速さで伝わります。分子間の距離が短く、隣同志の分子の影響が強いからです。

気体や液体では縦波だけが重要になります。原子や分子が押されると、押された方向に移動しますが、移動方向に垂直方向には何も影響がありません。これが、気体や液体中に横波がない理由です。

固体中の音波はやはり固体を作る物質の原子や分子の振動として音を伝えます。

固体や液体を作る原子や分子は常に振動しています。温度が高いと激しくなり、低いと静かに振動しています。そのような意味で、固体や液体は音で充満していると言ってよいのです。しかし、それは我々の耳に聞こえる振動数より桁外れに高い振動数です。

固体中には縦波の他に横波が存在します。音が固体に入り、原子や分子を押したとします。その時、原子や分子は押された方向に移動し、その方向に振動して音が伝わります。これは空気中の音波と同じように伝播します。同時に固体中では、移動方向に垂直方向にも影響が出ます。これは固体では原子や分子が四方八方から押さえつけられているからです。このため垂直方向にも音の振動が伝わります。固体中の横波です。

水の固体である氷の中を進む縦波の速さはおよそ $3000\ \mathrm{ms^{-1}}$ で、水中の約２倍です。

超音波診断は、体の中に振動数の高い音波、超音波を入れて、反射して戻って来る波を調べます。いずれも縦波で、反射や吸収の度合いを考慮して異常を見つけます。

振動数が $3\ \mathrm{M}(=3\times10^6)\mathrm{Hz}$ の超音波を使うとします。体の中を伝わる音の速さは水中よりは速いが、氷中ほどではないと予想されます。ひとまず、人体を氷と考えて氷中の音速で伝播するとします。

波長λは式(D1)に数値を代入すると求まります。

$$3\times10^6\ \mathrm{Hz}\times\lambda\,[\mathrm{m}] = 3000\ \mathrm{ms^{-1}}\quad \text{より}$$
$$\lambda = 10^{-3}\ \mathrm{m} = 1\ \mathrm{mm}$$

となります。波長は 1 mm となり、体内では、この値より少し短い波長であると予想されます。

超音波診断では、波長に較べて大きい組織の異常を見分けることができます。組織の反射や吸収の異常を、画像にするための処理も、高度な技術が駆使されています。

Ｄ５．十二平均律音階 と 自然(純正)律音階

音の高さと振動数は**音楽**に関係します。

具体的には 1939 年国際会議で次のようになりました。(**2003 年版理科年表丸善**)

「振動数が 440 Hz の音を**ト音記号五線紙上の第２間のラ音**とすること」と「1 オクターブ低い 220 Hz のラ音までの間を、(**半音で**)**12 段階**に分け、隣の音との**振動数の比**を、無理数 1.0594‥とすること」です。

これは、「1 オクターブ高い 880 Hz のラ音までの間を、(**半音で**)**12 段階**に分け、隣の音との振動数の比を同じ無理数 1.0594‥とすること」と、同じことです。

音叉（おんさ）は、ラの音のものしかありません。この音の振動数が唯一有理数 440 Hz の音だからです。誰がどこで作っても同じ音になるからです。他の音の周波数は無理数で、四捨五入をどこでするかによって高さがまちまちになってしまいます。

無理数 1.0594‥は、2 の 12 乗根です。つまり、1.0594‥を 12 回掛けると 2 になります。このように決めた音階を、**十二平均律音階**と言います。**バッハ**の頃、今から約 300 年前に考えられました。

バッハ作曲**平均律ピアノソナタ**は、この十二平均律音階を普及させるために作られた曲だそうです。

2000 年以上昔、ギリシャ時代の数学者**ピタゴラス**は、弦をはじいた時に出る音について研究しました。そして、弦の長さを簡単な整数比に分割した時、はじいた音は、元の音とよく調和することを発見しました。

確かに、弦の長さを 2 分の 1 にすると、１オクターブ高い音になります。波長が半分になり、振動数が 2 倍になります。よく調和します。

長さが 3 分の 2 の弦では、ドとソの関係になります。長さが 4 分の 3 の弦では、ドとファの関係であり、同時にソと上のドの関係でもあります。長さが 5 分の 4 の弦の出す音はドとミの関係になります。

全て調和のよい音です。この流儀で作った音階を**自然律（純正律）音階**といいます。

さて、**十二平均律音階**と**自然律（純正律）音階**とが矛盾することは一目瞭然です。前者では振動数が無理数の関係にあり、後者は有理数の関係にあるからです。

振動数を詳しく調べてみると違いはほんの僅かです。

それでもこの僅かな違いを感覚的にとらえ、魅せられて、後者の楽器を作り続けた人もいましたし、奏で続けた演奏家もいます。もちろん聴き続けた人もいました。

それほど魅力的な自然律音階を、十二平均律音階と数値で比較してみましょう。それぞれの音階の振動数とその差を**表Ｄ１**に示しました。

表Ｄ１の第１、２、３列は、それぞれ、国際的な取り決めで定められた十二平均律音階における周波数、気温を 15 ℃とした時の波長、中央のドの音を 2 とした時の波長の比をそれぞれ示しました。ここで、音速は 340 m s^{-1} としました。

第４列は音階名です。**第５列**は**自然律音階**の調和のよい音の波長の比です。**第６列**は、**第５列**の比の値から算出した周波数を示します。

ここでは、ドの音の振動数を十二平均律音階に 6 桁まで合わせました。このように基準として意図的に合わせた数値に、黄色印をつけました。

第７列に十二平均律音階と自然律音階の**周波数の差**を示しました。ソとファでは 1 Hz 以下の違いですが、ミの音は 5 Hz も異なることが分かります。

合奏で、**うなり**が生じるのではないかと心配します。

表Ｄ１．十二平均律音階と自然率音階の比較

十二平均律音階			音 階	自然律音階		周波数の差
周波数 [Hz]	波長 [m]	波長の比		波長の比	周波数 [Hz}	
220	1.5455	2.3784	ラ			
233.082	1.4587	2.2449				
246.942	1.3768	2.1189	シ			
261.626	1.2996	2	ド	2	261.626	0.00
277.183	1.2266	1.8877				
293.665	1.1578	1.7818	レ			
311.127	1.0928	1.6818				
329.628	1.0315	1.5874	ミ	1.600	327.032	2.60
349.228	0.9736	1.4983	ファ	1.500	348.834	0.39
369.994	0.9189	1.4142				
391.995	0.8674	1.3348	ソ	1.333	392.438	0.44
415.305	0.8187	1.2599				
440	0.7727	1.1892	ラ			
466.164	0.7294	1.1225				
493.883	0.6884	1.0595	シ			
523.251	0.6498	1	ド	1	523.251	0.00
554.365	0.6133	0.9439				
587.330	0.5789	0.8909	レ			
622.254	0.5464	0.8409				
659.255	0.5157	0.7937	ミ	0.800	654.064	5.19
698.456	0.4868	0.7492	ファ	0.750	697.668	0.79
739.989	0.4595	0.7071				
783.991	0.4337	0.6674	ソ	0.667	784.877	0.89
830.609	0.4093	0.6300				
880	0.3864	0.5946	ラ			
932.328	0.3647	0.5612				
987.767	0.3442	0.5297	シ			
1046.502	0.3249	0.5	ド	0.5	1046.502	0.00

Ｄ６．光の波　波長・周波数・光速

光は波の性質を持っています。我々の目に見える光に限定すると、その波長は、0.38 ~ 0.77 μm (10^{-6} m) です。

光の速度 c_0 は、 $c_0 = 3 \times 10^8 \mathrm{ms}^{-1}$ で、この速さは 1 秒間に地球を 7 周半する速さです。式(D1)を使って、周波数(振動数) ν を計算すると、

$$\nu = 3 \times 10^8/\{(0.38\sim0.77) \times 10^{-6}\}$$
$$= (7.9 \sim 3.9) \times 10^{14}\mathrm{Hz}$$
$$= (7.9 \sim 3.9) \times 10^{2}\ \mathrm{THz}$$

T : テラ 10^{12}

k : キロ 10^3、M : メガ 10^6、G : ギガ 10^9

Ｄ７．光の透過・反射・屈折・全反射

よく知られているように光は鏡で**反射**します。鏡面の垂直線と入射光線のなす角を入射角と言い、反射光線のなす角を反射角と言います。これらの角度が等しくなるように反射します。

空気中を進む光線が、ガラスや水の中に入る時、進む方向を変えます。この現象を屈折と言います。空気中の光の速さと較べて、ガラスや水の中では光速が遅くなることが原因です。

水による光の屈折の図を**図Ｄ４**に示します。水面に垂直に入射した光 AO は、速さは変わりますが、まっすぐ OA′に進みます。水面に斜めに入射した光 BO は屈折して OB′に進みます。水面すれすれに入射した光 CO はやはり曲がって OC′に進みます。

点 O を通って水面に立てた垂直線 AA′と斜めに入射した光 BO のなす角を入射角と呼び、角 i とします。垂直線 AA′と屈折して進む光 OB′のなす角を屈折角と呼び、角 r とします。

角 i と角 r の間に次式が成り立ちます。ここで、n を屈折率とします。

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n \qquad \text{(D2)}$$

これは、光速で表すと次式になります。

$$\frac{\text{空気中の光速}}{\text{水中の光速}} = n$$

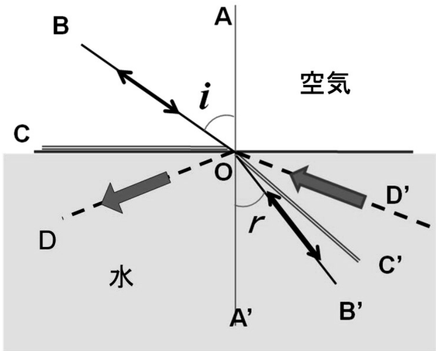
ここで n は、空気に対する水の屈折率であり、光速の比になります。物質中の光速は大抵空気中のそれより遅いので、この比は１より大きくなります。

また、角 $i >$ 角 r となります。

光が進む経路を**光路**と呼びます。光が逆に進む場合、同じ**光路**を逆にたどります。

逆の光路を見てみましょう。水中で光 C′O より浅い角度でＯに向かう光 D′O はどこへ行くでしょう。鏡のように反射し、OD に進みます。この現象を**全反射**と言います。

コップに水を入れて下からのぞいてみてください。斜め下から覗くと、入射角が角 A′OC′より大きい場合、水面は鏡になっています。



図Ｄ４．光の屈折と全反射

実験　光の屈折の実験　全反射の実験

問題：水中を泳ぐ魚は、どのような景色を見るか。絵を描いてみてください。

お風呂で誰もが経験するように、水中の物体は、実際のサイズとずいぶん違って見えます。実際に**光路**をたどって、その理由を考えましょう。

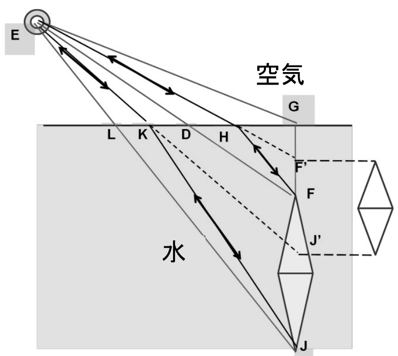
図Ｄ５を見て下さい。水中に、釣り道具**ウキＦＪ**があります。左上のＥはあなたの目です。**疑問さん**の質問に、**自然の神さん**が答えてくれます。

疑問さん「**Ｆから出た光は、水面のどこを通って目Ｅに届くのですか？**」
自然の神さん「**Ｈです。Ｈを通過するのが一番早いからです**」
疑問さん「**光路 FDE が一番早いのでは？**」
自然の神さん「**ゆっくりしか走れない水中が長すぎます**」
疑問さん「**では、FGE にすれば？**」
自然の神さん「**GE が長すぎます。私はちょうどよい所を選んでいるのです**」
疑問さん「**では、Ｊから出た光は、界面のどこを通って目Ｅに届くのですか？**」
自然の神さん「**Ｋです。Ｋを通過するのが一番早いからです**」

点Ｈ、点Ｋ、どちらも、入射角と屈折角の関係は式 (D2) を満たしています。

疑問さん「**点Ｆは、どこに見えますか？**」
自然の神さん「**点Ｆは、EH の延長上の F′に見えます。点Ｆは F′ から出たように見えます**」
疑問さん「**点Ｊは、どこに見えますか？**」
自然の神さん「**点Ｊは、EK の延長上の J′に見えます。点Ｊは J′ から出たように見えます**」

疑問さん「**なぜ、ウキは、ずんぐりむっくりに見えるのですか？**」
自然の神さん「**横のウキの絵を見てごらん**」



図Ｄ５．光の進み方

いろいろな物質の**屈折率**のおよその値は、以下の通りです。

氷	1.309
水	1.3334
ガラス	1.4〜2.1
水晶	1.544
ダイヤモンド	2.417

この屈折率の値は目に見える光に対する平均値で、屈折率は色によってわずかに違っています。つまり、屈折角が違い、曲がり方は赤色より紫いろの方がわずかに大きくなります。

屈折によって太陽光線は色に分けられます。光の分散と呼びます。虹の見える理由はここにあります。

ダイヤモンドの美しさはその大きな屈折率によります。**屈折率**が大きければ大きいほど、**曲がりの角度**が大きくなり、色による**分散**が大きくなります。

ダイヤモンドが美しいのは、入射時の分散角の大きさだけではありません。一度中に入った光はダイヤモンドの中で**全反射**します。屈折率が大きいものほど全反射の角度領域が大きくなり、外に出る光が限られてきます。従って、何度も全反射を繰り返すことになります。

入射した時に分散した光の広がりは、全反射を繰り返す毎に、ますます広がりが大きくなります。つまり、**色の違い**による**光路の違い**がはっきりしてきます。

その結果、外に出る時には**選ばれた色**の光しか出てこなくなります。くっきり色がついて美しく見えます。

あたり前のように**全反射が起こる**と簡単に言いましたが、全反射が起こるのは表面が水面のように、**平坦**でなければなりません。**美しく磨き上げた面**でないと内側で

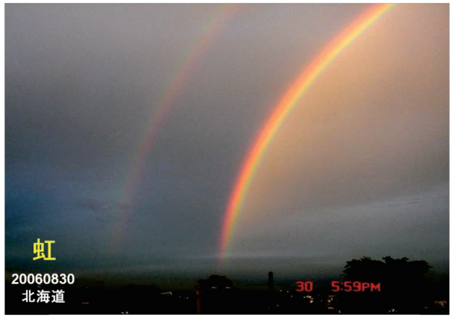
全反射が起こりません。このような面を**鏡面**といいます。

この処理を**カット**と呼んでいます。ダイヤモンドが高価な理由は、生産量が少ないことに加えて、この**鏡面**に磨く**カット技術**にあると想像できます。

屈折率の大きなガラスが製造されています。ダイヤモンドに近づきたいのでしょう。

Ｄ８．虹

人は虹を見てはじめて色が目に見えることを認識したのではないでしょうか。周囲のものは、余りにもあたり前のように色がついています。**図Ｄ６**に**二重虹**を示します。



図Ｄ６．.二重の虹

虹について考えましょう。まず、虹の色を思い出してください。

赤橙黄緑青藍紫　**七色**です。

虹が人の目に見える理由を考えます。次の頁の**図Ｄ７**に､その理由を凝縮しました。キーポイントは以下の通りです。順番に読んでください。

１．太陽光は七色である
２．七色が混ざると人の目には無色透明に見える
３．虹は太陽を背にして円弧状に見える
４．円の中心は太陽と自分の目を結ぶ直線上にある
５．この太陽光の方向を**入射方向**と呼ぶ
６．空中に無数に浮かぶ**水滴**が太陽光を受ける
７．太陽光は水滴の中に進入する
８．水滴に入射する時、光は屈折する
９．水滴のどこから光が入射するかによって進む方向が異なる。それは、光の入る位置によって入射角 i が変わり、同時に屈折角 r も変わるからである
１０．水滴に入射する光の位置を**入射位置**と呼ぶ

１１．**図Ｄ７**中央に示す円を半径 a の水滴とし、**入射位置**を、図中の距離 p で表すとする
１２．屈折した光は、色によって進む方向が異なる（分散）
１３．光が水滴の内面で反射する（これは全反射ではない）
１４．反射した光は屈折して水滴の外に出る
１５．出て行く方向を**出射方向**と呼ぶ

１６．**図Ｄ７**中央に、進入した光の光路を描く、光路は色によって異なる
１７．この光路の幾何学は半径 a が違っても、同じであり、光の進む方向は変らない
１８．光の**入射方向**と**出射方向**のなす角 θ を**視角半径**と呼ぶ
１９．水滴に入射する光の**入射位置** p と**視角半径** θ の関係は、

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n \qquad \text{(D2)}$$
$$\theta = 4r - 2i \qquad \text{(D3)}$$

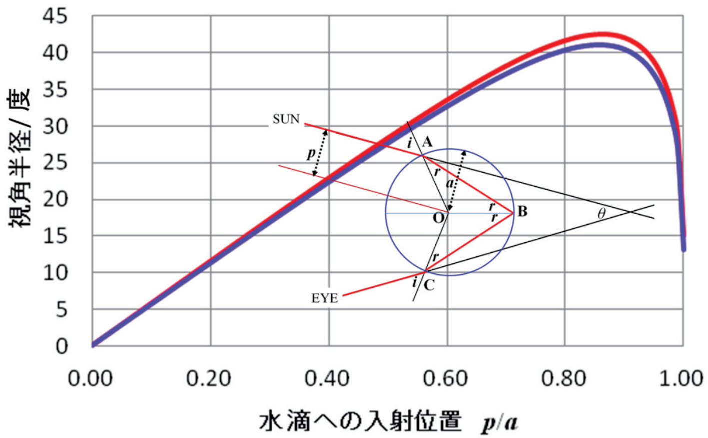
$$\sin i = \frac{p}{a} \qquad \text{(D4)}$$

この三個の式から、角 i と角 r を消去するとよい。ただし､n は屈折率であり、色毎に異なる

２０．計算結果を**図Ｄ７**のグラフに示す、グラフは色毎に異なる
２１．**図Ｄ７**の**横軸**は**入射位置** p であり、**縦軸**は**視角半径** θ である
２２．横軸の値 0.00 は、入射がちょうど水適の中心を通る場合である
２３．横軸の値 1.00 は、太陽光が水適に接するように入射した場合である
２４．**図Ｄ７**の赤色曲線は赤色光の入射位置と視角半径のグラフである
２５．藍色曲線は藍色光の入射位置と視角半径のグラフである

２６．赤色と藍色の間には橙黄緑青色が、藍色の外側には紫色があるが、**図Ｄ７**には省略した
２７．例えば、視角半径が 35 度を考えてみよう。縦軸の 35 度を横にたどると、七色のすべての曲線と交差する
２８．したがって、この角度では、赤から紫まで、すべての色の光が目に届いている
２９．よって、色が全部混ざって、人の目に入り、無色透明に見える
３０．確かに視角 35 度では何も見えない

３１．赤色曲線の頂上では赤色光だけがあって他の色がない。したがって赤色が見える。極値になっていることによる
３２．赤色の極値が視角半径 42.4 度である
３３．他の色、橙黄緑青藍紫の光も、同じように視角半径に極値がある
３４．視角半径の極値は色の順に小さくなり、藍色光の視角半径の極値は 40.7 度である。
３５．このようにして順次下方に色が積み重なって見える　虹である



図Ｄ７．視角半径と水滴への入射位置の関係

実験　三角プリズムによる分光実験

Ｄ９．CD 分光器によるスペクトル観察

光の波長と強度の関係を**スペクトル**と言います。どんな波長の光がどれだけあるかを示すのがスペクトルです。

我々人間は目で光の波長を知ることができます。**色で波長を認識**するのです。人の目は素晴らしい波長検出器です。ただし、全ての波長の光が混ざってしまうと、無色透明になって分からなくなります。

最近は音楽を聴くのはもっぱら CD になってしまいました。この CD を**光の分光器**として使うことができます。CD で**光のスペクトル**を調べることができるのです。

CD の板は、きらきら光っています。畑の**カラスおどし**や田圃たんぼの**かかし**の役目をしている CD をよく見かけます。ただ、きらきら光るだけでなく、色がついて光ります。なぜ色がつくかは後に究明するとして、色がつくことを利用して、CD を波長の分光器としましょう。

DVD は適していません。盤面のきざみが細かく、詳しく分光し過ぎるのです。赤色から紫色まで同時に観察できません。詳しく分光したいときには好都合です。

まず、蛍光灯を例にとって、CD 分光器の使い方を説明しましょう。

1．CD 一枚、光る面を使う
2．CD を鏡にして細長い蛍光灯を、**片目**で見る
3．両眼では複雑になって分からなくなってしまう
4．CD 面を調節して、細長い蛍光灯を中央の穴の位置に写す
5．蛍光灯の縦長の像が、真横に移動するように CD を傾ける

6．そのまま傾けて行くと、色のついた模様が反対方向から現れる
7．着色された細長い蛍光灯の形状である色つき蛍光灯像が何本かみえる。これが蛍光灯の**スペクトル**である

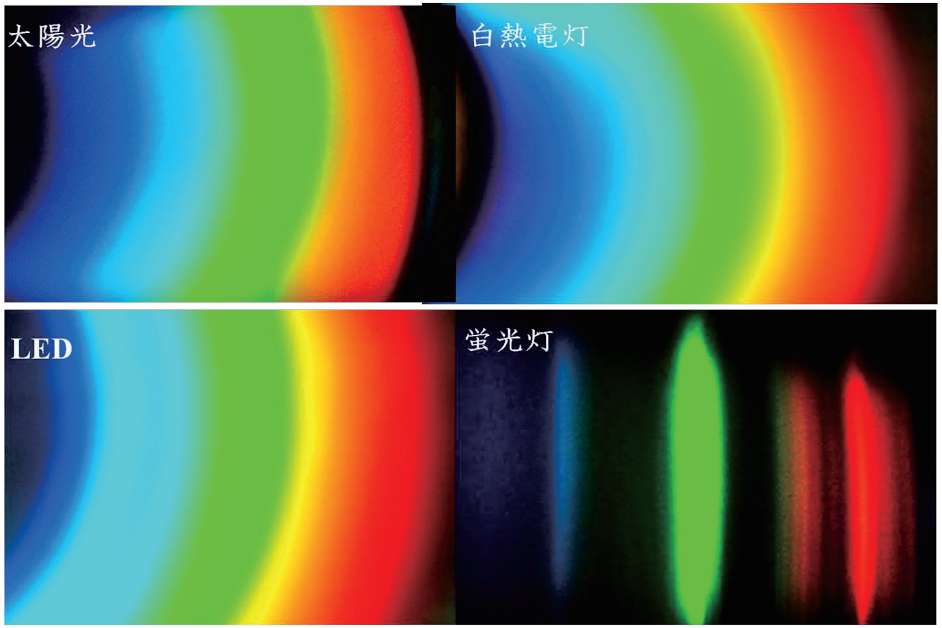
8．蛍光灯から色の違う光が出ていることが分かる
9．それぞれの色の光の強度も分かる

この方法で、調べた我が家の蛍光灯の分光結果が、**図Ｄ８**の右下のスペクトルです。ディジカメで撮影したものです。幸いカメラは一つ目ですから、片目で見たものと同じものが撮影できます。

同様な方法で調べた他の光源のスペクトルを**図Ｄ８**に示します。

左上は、**太陽の自然光のスペクトル**
右上は、**白熱電灯から出る光のスペクトル**
左下は、**最近、開発されて使用されている LED 電灯のスペクトル**

蛍光灯の光は波長が**離散型**のスペクトルです。他の光源の光は波長が連続的に分布していることが分かります。



図Ｄ８．CD 分光器によるスペクトルの観察
太陽光　白熱電灯　LED　蛍光灯

==

Ｄ１０．ドプラー効果

車の鳴らす警笛や救急車のサイレンは、車が横を通り過ぎる時、音の高さが変わります。近づく時は高く、遠ざかる時は低くなります。これは日常的に経験することで、音の**ドプラー効果**としてよく知られています。

止まっている音源から出る音の波紋を、**図Ｄ９**に描きました。音源は**振動数** $\nu_0\,[\mathrm{s^{-1}}]$ の音を出しているとします。中心 O からあらゆる方向に波が広がって行きます。

音波は粗密波です。空気の密度が高い**密部**と密度が低い**粗部**とが交互に生じ、密と粗の状態が輪になって広がります。広がる速さを音速 $c_\mathrm{p}[\mathrm{ms^{-1}}]$ とします。音速 c_p は、大気中でおよそ 340 $\mathrm{ms^{-1}}$ です。

図Ｄ９は、音源を中心とした同心円を使って波紋を示しています。実線が密度の高い**密部**を表わすとし、２本の実線の間を**粗部**とします。**密部**の間隔がこの音の**波長**で λ_0 [m]とします。**振動数** ν_0 は１秒間の振動回数で、ある一点を通過する波紋の数に一致します。一般に、**振動数**と**波長**の積は**音速**であり、式 (D1) を当てはめると、

$$\nu_0\lambda_0 = c_\mathrm{p} \qquad \text{(D5)}$$

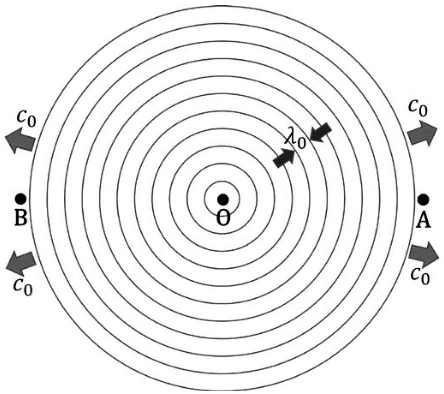
空気中では音速 c_p は一定値で、高い音は波長が短く振動数が大きく、逆に、低い音は波長が長く振動数が小さくなります。

使いやすくするために、式 (D5) を変形して式に番号を付けておきます。

$$\lambda_0 = \frac{c_\mathrm{p}}{\nu_0} \qquad \text{(D5}'\text{)}$$

$$\nu_0 = \frac{c_\mathrm{p}}{\lambda_0} \qquad \text{(D5}''\text{)}$$

無風状態で考えましょう。**図Ｄ９**に示すように、音波の進む方向は、観測者 A では右向き、観測者 B では左向きです。その速さは、 $c_\mathrm{p}\,[\mathrm{ms^{-1}}]$ です。



図Ｄ９．音源 O の波紋

さて、音源 O が速度 V_0 で観測者 A の方向に移動しているとします。ここで、速度 V_0 は音速 c_p (秒速 $340\ \mathrm{ms^{-1}}$) に較べるとずっと小さいとします。観測者 A には音源が近づきつつあり、観測者 B には音源が遠ざかりつつあります。この時それぞれの聴く音の波長や振動数を求めましょう。

音源が観測者 A に向かって移動している場合の波紋を、**図Ｄ１０**に描きました。観測者 A には波長の短い波が、観測者 B には波長の長い波が到達することが図から見て取れます。音源が近づく観測者 A には音源の出す音より高い音が聴こえ、音源が遠ざかる観測者 B には低い音が聴こえることが予想されます。

観測者 A が聴く音の波長を λ_A 、振動数を ν_A とします。この時も振動数と波長の積は音速です。次式が成り立ちます。

$$\nu_\mathrm{A}\lambda_\mathrm{A} = c_\mathrm{p} \qquad \text{(D6)}$$

音源Oは速度 V_0 で観測者Aの方向に移動しています。音波は 1 秒間に ν_0 回の振動をしながら c_p だけ進みます。その時音源 O は同じ方向に V_0 だけ進みます。c_p は V_0 より大きいので、その差 $c_\mathrm{p} - V_0$ の中に ν_0 回の振動が詰め込まれることになります。

したがって波長 λ_A は、式 (D5′) の分子 c_p の代りに $c_\mathrm{p} - V_0$ とすればよいことが分かり、次式になります。

$$\lambda_\mathrm{A} = \frac{c_\mathrm{p} - V_0}{\nu_0}$$

ここで、式 (D5″) を使って ν_0 を消去すると次式になります。

$$\lambda_\mathrm{A} = \frac{c_\mathrm{p} - V_0}{c_\mathrm{p}}\lambda_0 \qquad \text{(D7)}$$

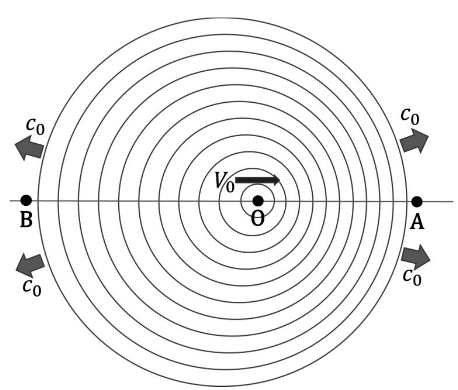
観測者 A の聴く音の波長が、音源の速度 V_0 の分だけ短くなることが分かります。

振動数 ν_A を求めるには、式 (D7) の逆数を取るとよく、左辺に式 (D6)を、右辺に式 (D5′) を使うと次の式になり、振動数が大きくなることが分かります。

$$\nu_\mathrm{A} = \frac{c_\mathrm{p}}{c_\mathrm{p} - V_0}\nu_0 \qquad \text{(D7}'\text{)}$$

一方、観測者 B が聴く音の波長を λ_B 、振動数を ν_B とすると、次式が成り立ちます。

$$\nu_\mathrm{B}\lambda_\mathrm{B} = c_\mathrm{p} \qquad \text{(D8)}$$



図Ｄ１０．音源 O が速度 V_0 で観測者 A に向かって移動する場合の波紋

音源 O は速度 V_0 で観測者 B から遠ざかります。音波は 1 秒間に ν_0 回の振動をしながら c_p だけ進みます。一方、音源 O は逆方向に V_0 だけ進むので、その和 $c_\mathrm{p} + V_0$ の中に ν_0 回の振動が入ることになります。

したがって、波長 λ_B を求めるために、式 (D5′) の分子 c_p の代りに $c_\mathrm{p} + V_0$ とすればよいことが分かり、次式になります。

$$\lambda_\mathrm{B} = \frac{c_\mathrm{p} + V_0}{\nu_0}$$

ここで、式 (D5″) を使って ν_0 を消去すると次式になります。

$$\lambda_\mathrm{B} = \frac{c_\mathrm{p} + V_0}{c_\mathrm{p}}\lambda_0 \qquad \text{(D9)}$$

振動数 ν_B 求めるために、逆数を取って左辺に式 (D5)を、右辺に式 (D5′) を使うと、次式になります。

$$\nu_\mathrm{B} = \frac{c_\mathrm{p}}{c_\mathrm{p} + V_0}\nu_0 \qquad \text{(D9}'\text{)}$$

観測者 B の聴く音の波長が、音源の速度 V_0 の分だけ長くなり、振動数は小さくなることが分かります。

救急車が通り過ぎる時、観測者は A の立場から B の立場に変わります。

次に、観測者が移動する時を考えましょう。もう一度、**図Ｄ９**に戻ります。音源 O は静止しており、観測者 A および観測者 B は、それぞれ速度 S_A および S_B で、右方向に移動しているとします。

観測者 A は音源 O から遠ざかるように、観測者 B は音源 O に近づくように移動しています。観測者の移動速度は、いずれも音速 c_p と較べると小さい値とします。

静止した音源 O から出た音を、観測者 A が聴く音の波長を λ_AS 、振動数を ν_AS とします。ここでも波長と振動数の積は音速になり、次式が成り立ちます。

$$\nu_\mathrm{AS}\lambda_\mathrm{AS} = c_\mathrm{p} \qquad \text{(D10)}$$

音源 O から出た音波は、1 秒間に ν_0 回振動しながら音速 c_p だけ進みます。観測者 A は音波と同じ方向に速度 S_A だけ移動しますから、音波は一秒間に $c_\mathrm{p} - S_\mathrm{A}$ だけ観測者 A を追い越して通り過ぎて行きます。

その時通り過ぎる波紋の数は、観測者 A が聴く音の振動数 ν_AS です。よって、次式になります。

$$\nu_\mathrm{AS} = \frac{c_\mathrm{p} - S_\mathrm{A}}{\lambda_0}$$

式 (D5′) を使って λ_0 を消去すると、次式になります。

$$\nu_\mathrm{AS} = \frac{c_\mathrm{p} - S_\mathrm{A}}{c_\mathrm{p}}\nu_0 \qquad \text{(D11)}$$

この式の逆数を取って、左辺に式 (D10) を、右辺に式 (D5″)を使うと、次式になります。

$$\lambda_{\mathrm{AS}} = \frac{c_{\mathrm{p}}}{c_{\mathrm{p}} - S_{\mathrm{A}}}\lambda_0 \quad \text{(D11′)}$$

観測者 A には音源の出す音より低い音が聴こえます。

静止している音源 O に近づく、観測者 B について調べてみましょう。

この場合の観測者 B が聴く音の波長を λ_{BS}、振動数を ν_{BS} とします。波長と振動数の積は音速になり、次式が成り立ちます。

$$\nu_{\mathrm{BS}}\lambda_{\mathrm{BS}} = c_{\mathrm{p}} \qquad \text{(D12)}$$

音源 O から出た音波は、１秒間に ν_0 回振動しながら音速 c_{p} だけ左方向に進みます。観測者 B は逆に、音波に向って速度 S_{B} だけ進みます。

したがって、音波は観測者 B を $c_{\mathrm{p}} + S_A$ だけ通り過ぎることになります。その時通り過ぎる波紋の数は、観測者 B の聴く振動数 ν_{BS} です。よって、次式になります。

$$\nu_{\mathrm{BS}} = \frac{c_{\mathrm{p}} + S_{\mathrm{B}}}{\lambda_0}$$

式 (D5′) を使って λ_0 を消去すると、

$$\nu_{\mathrm{BS}} = \frac{c_{\mathrm{p}} + S_{\mathrm{B}}}{c_{\mathrm{p}}}\nu_0 \quad \text{(D13)}$$

ここで、この式の逆数を取って、左辺に式 (D12) を、右辺に式 (D5″) を使うと、次式が成り立ちます。

$$\lambda_{\mathrm{BS}} = \frac{c_{\mathrm{p}}}{c_{\mathrm{p}} + S_{\mathrm{B}}}\lambda_0 \quad \text{(D13′)}$$

観測者 B は音源より高い音を聴きます。

市役所のサイレンを車で通過する時や電車に乗って踏切の**カンカンカン**を聴く時には、近づく時は観測者 B の立場で、通り過ぎると観測者 A の立場に変わります。

次に、音源 O が速度 V_0 で、観測者 A が速度 S_{A}で、観測者 B が速度 S_{B} で、いずれも右方向に移動している場合について検討しましょう。これらの速度は音速に較べて小さいとします。

観測者 A の聴く音の振動数を ν_{OAS}、波長を λ_{OAS} とします。もちろんこれらの間には次の式が成り立ちます。

$$\nu_{\mathrm{OAS}}\lambda_{\mathrm{OAS}} = c_{\mathrm{p}} \quad \text{(D14)}$$

音源が、観測者 A に近づく時の振動数、式 (D7′) と観測者 A が音源から遠ざかる時の振動数の式 (D11) を合わせると、観測者 A が聴く振動数 ν_{OAS} を求めることができ、次の式が成り立ちます。

$$\nu_{\mathrm{OAS}} = \frac{c_{\mathrm{p}} - S_{\mathrm{A}}}{c_{\mathrm{p}} - V_0}\nu_0 \qquad \text{(D15)}$$

両辺の逆数を取って、左辺に(D14) を、右辺に式 (D5) を使うと、観測者 A の聴く音の波長λ_{OAS} は次式になります。

$$\lambda_{\mathrm{OAS}} = \frac{c_{\mathrm{p}} - V_0}{c_{\mathrm{p}} - S_{\mathrm{A}}}\lambda_0 \qquad \text{(D15′)}$$

観測者 B の聴く音の振動数を ν_{OBS}、波長を λ_{OBS} とします。もちろんこれらの間には次の式が成り立ちます。

$$\nu_{\mathrm{OBS}}\lambda_{\mathrm{OBS}} = c_{\mathrm{p}} \quad \text{(D16)}$$

音源が、観測者 B から遠ざかる時の振動数、式 (D9′)と観測者 B が音源に近づく時の振動数の式 (D13) を合わせると、観測者 B が聴く振動数 ν_{OBS} を求めることができ、次の式が成り立ちます。

$$\nu_{\mathrm{OBS}} = \frac{c_{\mathrm{p}} + S_{\mathrm{B}}}{c_{\mathrm{p}} + V_0}\nu_0 \qquad \text{(D17)}$$

両辺の逆数を取って、左辺に式 (D16) を、右辺に式 (D5)を使うと、観測者 B の聴く音の波長 λ_{OBS} は次式になります。

$$\lambda_{\mathrm{OBS}} = \frac{c_{\mathrm{p}} + V_0}{c_{\mathrm{p}} + S_{\mathrm{B}}}\lambda_0 \qquad \text{(D17′)}$$

ここで音源 O の移動方向が逆になって、左向きに移動している時を考えましょう。

この場合、式(D15)、(D15′)、(D17)、(D17′) の中の音源の速度 V_0 の符号を、＋をーに、ーを＋に変えるとそれぞれの波長や振動数が求まります。

観測者 A では次式となります。

$$\nu_{\mathrm{OAS}} = \frac{c_{\mathrm{p}} - S_{\mathrm{A}}}{c_{\mathrm{p}} + V_0}\nu_0$$

$$\lambda_{\mathrm{OAS}} = \frac{c_{\mathrm{p}} + V_0}{c_{\mathrm{p}} - S_{\mathrm{A}}}\lambda_0$$

観測者 B では次式となります。

$$\nu_{\mathrm{OBS}} = \frac{c_{\mathrm{p}} + S_{\mathrm{B}}}{c_{\mathrm{p}} - V_0}\nu_0$$

$$\lambda_{\mathrm{OBS}} = \frac{c_{\mathrm{p}} - V_0}{c_{\mathrm{p}} + S_{\mathrm{B}}}\lambda_0$$

たくさん式が出てしまいましたが、原理を理解してください。

光も波として伝わりますから同じように**ドプラー効果**が観測されます。光は真空中を伝わります。その速さは光速 c_0 でその大きさは次の通りです。

$$c_0 = 30\ 万\ \mathrm{kms^{-1}} = 3 \times 10^8\ \mathrm{ms^{-1}}$$

光は相対性理論で明らかになったように、特殊な性質を持っています。光源の速度や観測者の速度に関係なく、光速 c_0 はどんな場合にもこの値になります。これを**光速一定の法則**と呼ばれ、実験で正確に確かめられています。

光のドプラー効果は、次の二つの点で音のドプラー効果と異なります。

一つは、光源の速度と観測者の速度を区別する必要がなく、相対的な速度にだけ関係することです。光の進む方向と光源の移動方向および観測者の移動方向が一直線上にある時、**縦ドプラー効果**と呼ばれます。この場合振動数の変化は、音の場合とよく似た式になります。

もう一つは、光源が観測者に対して直角方向に移動する場合です。観測する光の進む方向にたいして光源が垂直に移動している場合に起こるドプラー効果です。**横ドプラー効果**と呼ばれます。

横ドプラー効果は音の場合には考えられない効果で、アインシュタインの特殊相対性理論によって初めて予言された現象で、実験によって正確に検証されています。

光源が振動数 ν_0 の光を出すとします。また、光源と観測者が相対速度 V で移動しているとします。その状況を図Ｄ１１に示しました。

図Ｄ１１で観測者を(a)とします。**縦ドプラー効果**は図中の光源 (b)および光源 (c) で、(b) は相対的に近づく場合であり、(c) は相対的に遠ざかる場合を示します。また、**横ドプラー効果**は図中の光源 (d) で、光は光源から観測者に向かいますが、光源は垂直に移動しています。

図Ｄ１１の光源 (b) から出る光を、観測者が見る光の振動数 ν_{b} は、相対性理論によると、次式になります。

$$\nu_{\mathrm{b}} = \frac{c_0 \sqrt{\left(1 - \frac{V^2}{{c_0}^2}\right)}}{c_0 - V} \nu_0$$

相対的に近づきつつある光源の光の振動数は、光源の振動数 ν_0 より大きな値になり、波長で言うと短い方に変化します。平方根の部分を除くと、音源が観測者に近づく場合の式（D7′）によく似た式になります。

可視光線の場合に当てはめると、赤色光が青色光へ変化します。したがってこの現象を**青色偏移**と名付けられています。

一方、図Ｄ１１の光源（c）から出る光を、観測者が見る場合を考えます。観測する光の振動数 ν_{c} は、特殊相対性理論により次式になります。

$$\nu_{\mathrm{c}} = \frac{c_0 \sqrt{\left(1 - \frac{V^2}{{c_0}^2}\right)}}{c_0 + V} \nu_0$$

相対的に遠ざかりつつある光源からの光は、光源の振動数 ν_0 より小さな値になり、波長で言うと長い方に変化します。平方根の部分を除くと、音源が観測者から遠ざかる場合の式（D9′）によく似た式になります。

可視光線の場合に当てはめると、青色光が赤色光へ変化します。したがってこの現象を**赤色偏移**と呼ばれています。

宇宙の星から届く光のスペクトルを解析すると、その星が近づきつつあるか、遠ざかりつつあるかが分かります。

光源が図Ｄ１１の（d）の場合、観測される光の振動数は、次式になります。

$$\nu_{\mathrm{d}} = \sqrt{\left(1 - \frac{V^2}{{c_0}^2}\right)}\, \nu_0$$

ほんの僅かですが振動数が小さくなり、波長が長くなります。この場合も、**赤方偏移**です。光源の移動が右方向でも左方向でも同じ値になって区別はつきません。この効果も実際に実験で確かめられています。

光のドップラー効果は宇宙の構造などの研究に使われて威力を発揮しています。

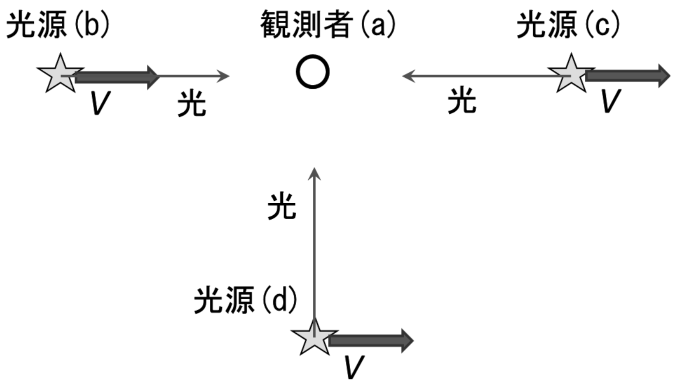


図 D11. 光のドップラー効果における
光源と観測者の位置関係 および 相対速度 V

Ｅ．電気・磁気そして電磁波

Ｅ１．電気の素

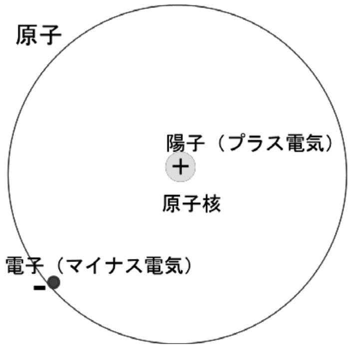
電気の素は電子と陽子です。ともに原子を構成する重要な要素です。原子構造の模式図を**図Ｅ１**に示します。

電子はマイナス（－）電気を、陽子はプラス（＋）電気を担っています。電子１個の持つ電気の量と陽子１個の持つ電気の量は同じですが、符号が異なります。

（＋）や（－）の電気のことを**電荷**と呼びます。

陽子を原子から取り出すことは困難ですが、電子は容易に取り出すことができます。電子は（－）電荷を持っているので、電子を取られた残りの原子は（＋）に**帯電**します。取り出した電子を余分にもらった原子は、（－）に**帯電**します。

それらはそれぞれ**プラスイオン、マイナスイオン**と呼ばれます。



図Ｅ１．原子の構造

エボナイト棒を毛皮で摩擦するとエボナイト棒が（－）に**帯電**します。ガラス棒を絹布で摩擦するとガラス棒が（＋）に**帯電**します。

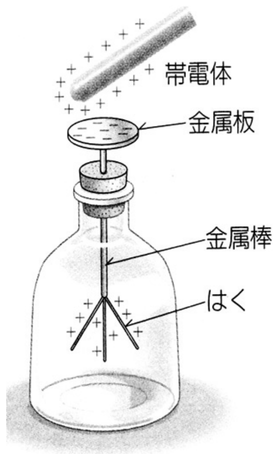
電荷は互いに力を及ぼし合います。

（＋）電荷と（＋）電荷は反発力
（－）電荷と（－）電荷は反発力
（＋）電荷と（－）電荷は引力

その力の大きさは、電荷の量に比例し、電荷間の距離の自乗に反比例します。

これは**電荷に関するクーロンの法則**です。この式は、**ニュートンの万有引力の法則**の式と同じ型をしています。

箔検電器の実験　ガラス棒、エボナイト棒で、電気を起こし、電気の性質を確かめましょう。



図Ｅ２．箔検電器

箔検電器を**図Ｅ２**に示しました。上部の金属板と最下部の金属箔は、金属棒でつながっています。金属箔は薄いアルミニウム箔３枚でできています。

初めに上部の金属板を手で触り、（＋）や（－）に帯電したすべてのイオンを除去します。人の体は電気を通します。体を通ってイオンがなくなります。

次に、ガラス棒を絹布で擦り、（＋）電気を帯電させます。（＋）に帯電したガラス棒を金属板に近づけます。この時、金属板に触れないように注意します。

ガラス棒の（＋）電荷によって、金属板に（－）電荷が引きつけられます。逆に（＋）電荷は、下部の箔の方に押しやられます。箔に（＋）電荷が集まりますが、箔内の（＋）電荷は反発し合い、３枚の箔が開きます。**図Ｅ２**はその状態を示しています。

ガラス棒を近づけたまま、そっと手で金属板に触れてみましょう。下部の箔に集まっていた（＋）電荷が、手から体を伝って逃げ出します。そのため開いていた箔は閉じてしまいます。

次に、金属板から手をはなすと同時に、ガラス棒を遠う避けると、下部の箔が少し広がります。これは、金属板に集まっていた（－）電荷が金属板、金属棒、箔の全体に広がったからです。箔内の（－）電荷同士が反発して３枚の箔が広がります。しかし、広がり方は先ほどより小さくなります。

一方、毛皮で摩擦したエボナイト棒で、同じ実験を繰り返しましょう。すべて全く同じ現象が起こります。ただし、**図Ｅ２**や上記の説明の、（＋）を（－）に、（－）を（＋）に変更しなければなりません。

前にも述べましたが、すべての物質は原子からできており、原子は（＋）電荷を担う陽子と（－）電荷を担う電子からできています。普通はそれらの数が等しく（＋）にも（－）にも偏っていません。偏ってもすぐに解消されるのが普通です。

移動しやすい電子が移動して色々な現象を見せてくれます。

Ｅ２．電流・電圧・電力・電気抵抗・ジュール熱

電流とは、**Ｅ１**で述べた電子の移動です。原子中の（－）電荷を担う電子は、個々の原子から離れて物質中を移動することができます。電子の移動が電流そのものです。

移動する電子は（－）電荷を担うので（－）から（＋）へ向かいます。しかし、電流は（＋）から（－）へ流れるとします。昔移動するものが**なにか**分らなかった時代に、電流の方向を決めてしまったので、逆になってしまいました。ちょっとした歴史のいたずらです。深く考えなくてもさし障りはありません。

電気の流れは水の流れに例えられます。水は高いところから低いところへ流れます。

同じように、電荷は電圧の高いところから低いところへ向かって流れます。（＋）電荷がたくさん集まると、電圧が高くなります。それは、すぐ前に述べたように（＋）電荷同志は反発し合うからです。

（＋）電荷の集まりの中に、さらに（＋）電荷を押し込むためには、エネルギーが必要です。この時、電荷１個（単位電荷）当たり必要なエネルギーを電圧と呼び、単位を [V] とします。

逆に（－）電荷が集まると電圧は下がります。（＋）電荷の集まりと（－）電荷の集まりによってできる電圧の差が、電荷の流れを作り、エネルギーを放出します。

電圧の高いところから金属電線に沿って電気が流れます。1 秒当たりの電荷の流れを電流と呼び、単位を [A] とします。この電気の流れを使って、熱を出したり、光を出したり、機械を動かしたりします。電流がエネルギーの源です。

電流 I [A] と電圧 E [V] の積を電力 P [W] と呼びます。この積は 1 秒当たりの電気エネルギーを意味し、単位は、よく知られた $\left[\mathrm{W}\ ワット = \mathrm{Js^{-1}}\right]$ です。

$$P\ [\mathrm{W}] = I\ [\mathrm{A}] \cdot E\ [\mathrm{V}] \qquad \text{(E1)}$$

電気の流れ方は二種類あります。

流れる方向が一方方向に決まっている場合と流れる方向が絶えず交代している場合の二種類です。前者を**直流**と呼び、そのような電気の源を**直流電源**と呼びます。電池や蓄電池がその例です。

一方、電流の方向が交互に変化する場合を、**交流**と呼び、そのような電気の源を**交流電源**と言います。発電所で、電圧を上げたり下げたりしています。

一見複雑に見えますが、発電の原理から考えると、**交流**は比較的簡単に作り出すことができます。そのため家庭や工場で広く交流が使用されています。

最近では直流が見直され、家庭でもその使用が普及してきました。パソコンや携帯の電源は直流電源であり、**畜電池**を交流電源で充電して使います。充電可能な直流電源が開発されました。

電流の流れやすさは、物質によって異なります。

移動しやすい電子を多く持つ物質は、電流をよく流します。金属がその典型です。電気の**良導体**と呼びます。一方、電子が全く移動できない物質もあります。この場合電気は流れません。紙や布や木材がその例です。**絶縁体**と呼びます。

良導体と絶縁体の間に**半導体・半金属**と呼ばれる物質があります。電気の流れ方は良導体と絶縁体の中間に位置します。

物質によって電気の流れ方が異なります。一般に物質中を流れる電流 I は、電圧 E に比例します。式で表すと次式です。

$$E = R \cdot I \quad または \quad I = \sigma \cdot E \quad \text{(E2)}$$

この２つの式の意味は同じですが、比例定数の呼び名が異なります。

比例定数 R ：電気抵抗
比例定数 σ ：電気伝導度

これらは逆数の関係にあります。

$$\sigma = \frac{1}{R} \qquad \text{(E3)}$$

式(E2) の第 1 式は、オームの法則として、小学校で習う初めての式でしょう。

電気抵抗や電気伝導度は物質によって値が異なります。

電気抵抗の大きさは伝導体の形や大きさによって変わります。同じ物質でも、太いほど電気抵抗は小さく、長いほど電気抵抗は大きくなります。

物質固有の値を定数 ρ ロー として、この値に、長さ L[m] を掛け、断面積 S[m²] で割った値が、電気抵抗 R[Ω]となります。式にすると、次式になります。

$$R\ [\Omega] = \rho\ [\Omega m] \frac{L\ [m]}{S\ [m^2]} \qquad \text{(E4)}$$

ここに定義された定数 ρ を、**体積抵抗率**と呼びます。

この**体積抵抗率**の値が物質毎に比較し得るものです。この値が大きいほど電気抵抗が大きくなり、小さいほど電気抵抗が小さくなります。

体積抵抗率 $\rho[\Omega m]$ の値を下表に示します。一般にこの値は温度とともに大きくなります。表中の値は常温近辺のおよその値です。

	物質名	体積抵抗率 $\rho[\Omega m]$
金属		
	銅	1.6×10^{-8}
	金	2.1×10^{-8}
	アルミニウム	2.5×10^{-8}
	真鍮	6.3×10^{-8}
	鉄（はがね）	～15×10^{-8}
	鉄（鋳物）	～80×10^{-8}
	ニクロム	107×10^{-8}
絶縁体		
	大理石	10^{8}
	ガラス	10^{10}
	ナイロン	10^{11}
	磁器	10^{11}
	天然ゴム	10^{14}
	硫黄	10^{14}
	石英	10^{16}
	テフロン	10^{17}

金属などの良導体と絶縁体で、体積抵抗率が 20 桁以上違います。この表には、絶縁体の**体積抵抗率**は桁数だけを示しました。

電気抵抗による発熱で、電気エネルギーを熱エネルギーに変換します。ジュール熱と呼ばれます。家庭で多くの電気製品として使われています。電気湯沸しポット、電気トースター、電気ストーブがその例です。

よく使われる電気抵抗発熱体は、ニクロム線です。ニッケルとクロミウムの合金です。純金属と較べると、合金では**体積抵抗率**が大きくなり、使いよい値の発熱体をつくることができます。

電気抵抗発熱体の放出するエネルギー H [J] はジュール熱と呼ばれます。その大きさは、発熱体の電気抵抗値 R [Ω]、その抵抗体を流れる電流値 I [A] と電流の流れている時間 t [s] によって決まります。

$$H = RI^2t \qquad \text{(E5)}$$

式(E5)の右辺の R と I の積は、式 (E2) によって、この抵抗発熱体の両端にかかる電圧 E [V] に等しいので、式(E5)は次式となります。

$$H = VIt \qquad \text{(E6)}$$

これまでに使用した電気関連物理量の、SI 国際単位を以下にまとめます。

電流 I : A, アンペア (SI 基本単位)
電圧 E : V, ボルト $= \mathrm{WA^{-1}} = \mathrm{Js^{-1}A^{-1}}$
電力 P : AV = W, ワット $= \mathrm{Js^{-1}}$
エネルギー H : Ws(= Nm) = J, ジュール
電気抵抗 R : Ω, オーム $= \mathrm{VA^{-1}}$
電気伝導度 σ : Ω^{-1}, モー $= \mathrm{V^{-1}A}$
体積抵抗率 ρ : Ωm, オームメートル

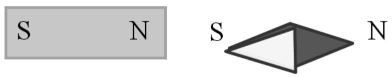
電流の単位 A は、SI 国際単位系の 7 つの基本単位の一つであり、V、W、J、だけでなく、Ω、Ω^{-1}、Ωm などは、7 つの基本単位から導出可能な組立単位です。

Ｅ３．磁気の素

磁気の素は、よく知られた**磁石**です。磁石には**永久磁石**と**電磁石**があります。いずれも、楽しい遊び道具です。

磁石は、Ｎ**極**とＳ**極**からできています。Ｎ**極**、Ｓ**極**を**磁荷**と呼びます。磁荷を持つことを、磁気を帯びる　とか、**磁化する**　と言います。

図Ｅ３に**棒磁石**と**方位磁石**を示しました。**磁石**の特徴は、Ｎ**極**とＳ**極**が常に対になって存在することです。



棒磁石　　**方位磁石**

図Ｅ３．磁石

棒磁石のＮ**極**とＳ**極**の真中をのこぎりで切断しても、必ず、切断面に新たなＮ極とＳ極が現れます。二本の棒磁石が新たにできてしまいます。

いつどんな時でも必ず、Ｎ**極**とＳ**極**とが対として現れるこの磁荷の性質は、電荷の場合と最も異なるところです。

地球表面で**方位磁石**は常に、Ｎ極が北の方向を向き、Ｓ極が南の方向を向きます。

方位磁石に限らず、棒磁石でも、うまく宙に浮かせると、同じようにＮ極が北の方向を向き、Ｓ極が南を向きます。

これは、地球全体が磁石になっているからです。北極の近くにＳ極があり、南極の近くにＮ極があるからです。

電荷の場合と同様に、磁荷（Ｎ極、Ｓ極）は、つぎのように力をおよぼし合います。

Ｎ極とＮ極は反発力
Ｓ極とＳ極は反発力
Ｎ極とＳ極は引力

その力の大きさは、磁極の磁荷の量に比例し、二極間の距離の自乗に反比例します。

これを**磁荷に関するクーロンの法則**と言います。

Ｅ４．電場（電界）・磁場（磁界）

これまでに述べたように、電荷同志や磁荷同志が力をおよぼし合います。

しかし、電気・磁気の性質は、力をおよぼし合うと考えるより、以下に述べる**場の考え方**が、都合がよいことが分かっています。この発想の転換は、発電の原理を発見したファラデーの発想（1837）です。

場の考え方の出発点は以下の通りです。
電気の性質について、

電荷の存在は周囲の雰囲気を変えます。その雰囲気の変化が順次その周りに伝播して広がります。その広がりが、もう一つの電荷までやってくると、力が働きます

磁荷についても同様に考えます。

電荷や磁荷の影響は、瞬時に遠方まで伝わるのではなく、次々と、周りに伝播するのです。このような考え方を、**近接作用**と呼びます。

たとえ話をしましょう。

先生が教壇に立つと、教室の雰囲気が変わります。そしてその雰囲気が、前の人から徐々に後ろの人に伝わってゆきます

クーロンの法則では、**電荷同志**や**磁荷同志**の間に**直接力が働く**と考えていますが、ファラデーの考え、つまり、**場の考え方**では、次のように、二段階に考えます。

電荷間に働く力について、

第１段階　**電荷が周りの雰囲気を変える**
第２段階　**変化した雰囲気の中で、別の電荷が力を受ける**

第１段階で作られる雰囲気のことを、**電場**（または**電界**）と呼びます。この言葉はすでに学んだことがあるでしょう。

磁荷間に働く力について、

第１段階　**磁荷が周りの雰囲気を変える**
第２段階　**変化した雰囲気の中で、別の磁荷が力を受ける**

第１段階で作られる雰囲気のことを、**磁場**（または**磁界**）と呼びます。この言葉も、これまでに学んだことがあるでしょう。

電場（電界）や磁場（磁界）は、「場」と「界」のどちらかを使います。英語ではどちらも Field です。

Field を日本語に訳した時に、**場**と訳した人とそのグループと、**界**と訳した人とそのグループが、100 年以上経た現在でも相譲らず、教育現場を混乱させています。

ここでは**電場、磁場**を使います。

一つの（＋）**電荷**（**第一の**（＋）**電荷**）があるとし、その周りの**電場**をどのように表すのがよいかを考えましょう。

第一の電荷が作る**電場**の中に、**第二の電荷**を置いた時、受ける力が、クーロンの式で表されるように、**電場**を決めるとよいのです。そうすると、

電場の強さは、
１．第一の（＋）電荷に比例し
２．第一の（＋）電荷からの距離の自乗に反比例する
そして、**第二の電荷**が受ける**力**は、
３．この電場と第二の電荷との積
とすればよいわけです。

これでは**クーロンの法則**と同じじゃないかと思うでしょう。その通り同じです。同じでなければいけません。**考え方の転換**だけですから。

このような場の考えを使うと、他の現象の説明が無理なくできるのです。

磁場については、次節で述べることにします。

Ｅ５．電磁気学の４つの基本法則

電気と磁気に関する基本法則は、最初に紹介したクーロン(1789)に始まり、エルステッド(1820)、アンペール(1820)、ファラデー(1831)らの発見によって、場の考え方とともに、明らかになってゆきました。

その後、マックスウェル(1861)がこれらを完全な型に整えました。**電気** と **磁気** を別々に扱うことができず、**電磁気** と、ひとくくりにしなければならないことが明らかになりました。

マックスウェルが確立した**電磁気**の**基本法則**は、４つの式からできています。**基本式１**から**基本式４**まで、それぞれの式の持つ意味を説明します。**基本式２**や**基本式３**の中には複数の重要な法則が含まれます。

基本式１．電荷の存在
電荷に関するクーロンの法則
電荷の周りの電場
電場の中で電荷が受ける力

基本式２－１．磁荷の存在
磁荷に関するクーロンの法則
磁荷の周りの磁場
磁場の中で磁荷が受ける力
基本式２－２．Ｎ極とＳ極は常に対となる

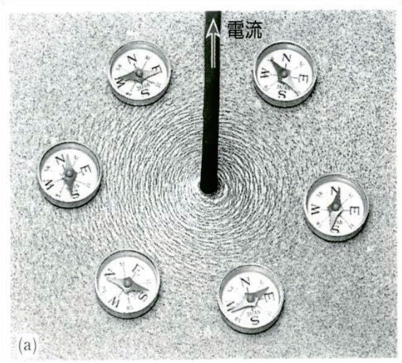
基本式３－１．電流の周りに磁場が生じる
３－２．電場が変化すると磁場が生じる

基本式３－２は、マックスウェルの鋭い洞察によって導かれたものです。**基本式３－１**の式に、項が１つ追加されました。

その結果、**基本式３．**は、**アンペール・マックスウェルの法則**とも言われます。

基本式３－１．は電流と磁場の関係を教える法則です。簡単な場合を図に描くと**図Ｅ４**です。中央の電線には、下から上向きにまっすぐ電流が流れています。

その時、取り囲むように置かれた**方位磁石**の向きが**磁場**の方向を示しています。磁場が円周に沿ってできます。



図Ｅ４．電流の周りの磁場

この時の電流と磁場の関係は、**右ネジ**を思い浮かべて覚えて下さい。**右ネジ**とは、**右まわり**つまり**時計回り**にまわすとネジが進んで、締まってゆくネジのことです。

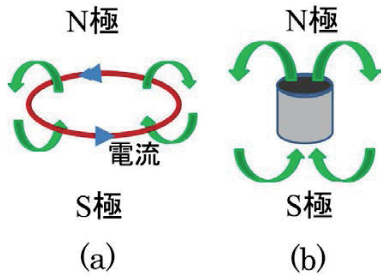
右ネジを締める時、ネジの進む方向を電流の方向とすると、ネジをまわす円周に沿う方向に磁場ができます。

図Ｅ４の場合、下からねじを締めて、上方向に右ねじを進ませて、締めることを想像してください。そうすると、ねじの進む方向が電流方向で、ドライバを回す向きが、周りの磁場の方向です。

つぎに、電線の形を直線ではなく、円にしてみましょう。一周する電流を考えます。**円電流**と呼びます。**図Ｅ４**を応用して、円電流の周りにどのように磁場ができるかを考えましょう。

電流と磁場のようすを、**図Ｅ５(a)**に描きました。赤いリングが電線で、電線上の青色矢印は電流の流れる方向とします。

その周囲を取り巻く磁場を緑矢印で示しました。



図Ｅ５．円電流(a)と棒磁石(b)
周りの磁場の比較

円電流が何本も集まると**コイル**と考えてさしつかえありません。その場合、棒磁石と全く同じものであることが容易に分かります。

図Ｅ５(b)には、棒磁石の周りの磁場のようすをやはり緑色の矢印で描きました。

この図から次のことが分かります。円電流の周りにできる磁場と棒磁石の周りにできる磁場は、同じであり、区別ができません。

Ｅ３で、**磁気の素**は**磁石**であると言いましたが、実はしっかり観察してみると、**磁気の素**は**円電流**であるとしてよいのです。円電流が重要であることが分かります。

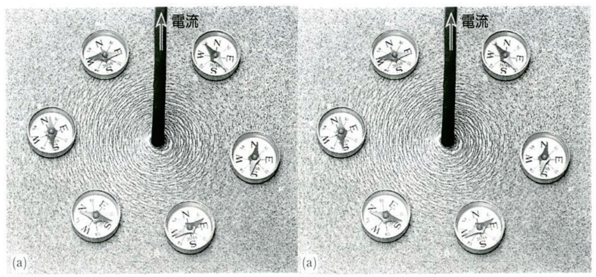
円電流と磁場の方向を覚える便利な方法があります。**右手**で、円電流を握ってください。人さし指や中指の先端が、電流の方向を向くように、握ってください。そのようにして、親指を立ててください。親指の方向に磁場が出て行きます。磁荷で言うと、親指の方向がＮ極です。

図Ｅ４で示される**基本式３－１．**の内容は、エルステッドの発見です。デンマークの誇る物理学者の一人です。

このことをすでに知っていたフランスのアンペールは、先を越されて発表されてしまいました。そこで、一歩進める努力をしました。

その結果、**平行な二本の電線を流れる電流は、力をおよぼし合う**ことを発見し、発表しました。**アンペールの力**と呼びます。

平行な二本の電流が同じ方向の場合、その周りの磁場のようすを、**図Ｅ６**に描きました。この場合、図から分かるように、二本の電線の間では磁場は互いに打ち消し合い、弱め合うことが分かります。そのためこの二本の電線は引力を受けます。



図Ｅ６．二本の平行な電流の周りの磁場

逆に、二本の電流の方向が反対の場合には、電線の間では磁場は同じ方向になり、重なりあって、磁場が強くなります。そのため、この二本の電線は斥力を受けます。

この**アンペールの力**は、力学と電磁気学の橋渡しの役目をしています。具体的には電流の**単位Ａアンペア**を次のように定義します。

1メートル隔れて平行に並んだ二本の長い直線状の電線中を、同じ大きさの電流が流れ、電線が、長さ 1 メートルにつき、2×10^{-7} N のアンペール力を及ぼし合う時、その電流を1Ａアンペアとする

電流の間に働く力を、**近接作用**と考えて、**クーロンの法則**と同じように、２段階に分けて考えます。

磁場の正確な定義はここで行われます。

第一段階　**電流がその周りの雰囲気を作ります。つまり、電流が周りに磁場を作ります**

第二段階　**その磁場が周囲に伝わり、もう一つの電流まで到達し、電流に力を与えます**

電流は、(−)電荷を持つ電子の流れであり、電流の方向は電子の流れと逆になっています。これは歴史のいたずらです。

電流の方向に、(+)電気が流れていると思い込んでいても、ほとんどさしつかえありません。

電流は電荷の流れです。I[アンペア A]の電流が t[秒 s]間流れた時、流れた電荷の合計は It[アンペア秒 As]です。この単位が電気量の単位クーロン[C]です。電荷の方から同じことを言うと、電流とは１秒間に電線の断面を通過する電荷の量であり、その通過量が１秒[s]につき１クーロン[C] の時が１アンペア[A] です。

したがって電荷あるいは電気量の単位[C]の組み立て単位は[As]です。

つぎに、第４番目の基本式について説明します。

基本式４．磁場が変化すると電場が生じます。もし、そこに電線があれば、電流が流れる。発電の原理です。

ファラデーによる**電磁誘導**の発見です。

図Ｅ７は、棒磁石とコイルによる**電磁誘導**の説明図です。

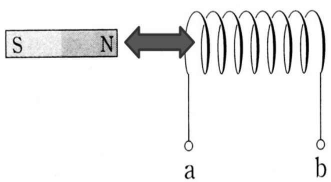
棒磁石とコイルを、**図Ｅ７**の矢印のように、近づけたり遠ざけたりします。そうすると、コイルの中に電流が生じます。

誘導電流と呼びます。

その結果、コイルの両端に電圧が生じます。この電圧を**誘導起電力**と呼びます。

誘導電流や**誘導起電力**は、棒磁石のＮ極が、コイルに近づくと、**図Ｅ７**のコイルの左側がＮ極になります。つまり、棒磁石の動きを妨げるように、**誘導電流**や**誘導起電力**が生じます。

したがって、端子ａが正極に、端子ｂが



図Ｅ７．電磁誘導

負極になって、電気を取り出すことができます。

この現象が起こるのは、棒磁石が近づきつつある時だけで、止まると誘導起電力は発生しません。したがって、すぐに棒磁石を引き抜きます。

引き抜く時もやはり、その変化を妨げるようにコイルが働きます。つまり、**図Ｅ７**のコイルの左側が、こんどはＳ極になるように起電力が生じます。この場合には、端子ａが負極に、端子ｂが正極になります。

このようにして誘導される電気は、前も述べた**交流電気**です。正極と負極がたえず入れ替わります。我々の家庭電気だけでなく、工場機械や鉄道、その他たいていの電源は交流電気です。

交流電源の周波数は、西日本で 60 Hz、東日本では 50 Hz が使われています。

つまり、正極と負極の入れ替わりが、西日本では１秒間に 60 回です。東日本では１秒間に 50 回入れ替わります。狭い日本も変化に富んでいます。

昔、東海道線（在来線）に乗車すると、静岡近辺で走りながら１・２分間停電しました。60 Hz と 50 Hz の電源の切り替えが行われていました。今はどのようになっているか確認していません。

交流発電の場合、発電量を大きくするためには、コイルの巻き数を増やすこと、磁石の動きを早くすること、強い磁石を使うこと　等が考えられます。

この発見によって、我々現代に生きる人間は、電気を自由に作ることができ、使うことができるようになりました。電気は現代文化生活の象徴と言えます。

交流電気に対して、正極の端子が常に決まっている電気は、**直流電気**と呼ぶことは前に述べました。

電気と磁気とが絡みあって、いろいろな現象が起こります。電磁気学に関して、これまで述べたもの以外に、物理学者や数学者の名前の付く法則がいくつもあります。

これらはすべて、マックスウェルの４つの式の中に含まれています。これらを列挙しておきます。

■ 電荷と電場に関するガウスの法則（1830）
電荷の分布と電場の関係を示す最も一般的な法則である

■ 磁荷と磁場に関するガウスの法則（1840）
磁荷の分布と磁場の関係を示す最も一般的な法則である

■ ビオ・サバールの法則（1820）
電流の分布から磁場を計算するための最も一般的な式である

■ レンツの法則（1834）
誘導起電力によってコイル内に発生する電流の方向は、外部からコイルに加わる磁場の変化を妨げる方向である

空間における場の変化が、小さくなるようにコイル自身に変化が起こる

場は保守的である。これまでの状態を維持したがるのである。変化に対して抵抗する。そしてまた、あまのじゃくである

■ フレミングの右手の法則（1885）
磁場の中で導線を移動させると導線に電流が発生する。磁場の方向、導線の移動方向、電流の方向に関する法則である

これら３つの方向が互いに直交する時にのみ有用な法則である

■ **フレミングの左手の法則**
磁場の中で電流が受ける力についての法則である

直前の**フレミングの右手の法則**と同様、磁場の方向、電流の方向、電線が力を受けて移動方向、に関する法則である。上記３つの方向が互いに直交する時にのみ有用な法則である

この法則は科学年表に記載されていません。日本の高等学校の教科書には記されています。理由は分かりません

■ **ローレンツの力**
移動する荷電粒子が、電磁場から受ける力で、電場から受ける力と磁場から受ける力の和で記述できます。アンペールの発見した電流間の力を最も一般的な形で表現したものである

Ｅ６．光の本質の発見

ヘルツは、マックスウェルの４つの式を、分かりやすく表現し、物理的な意味を考えました。

そして、ついに**電磁波の存在**を予言しました。ヘルツは予言だけではなく、自ら実験でその**存在を実証**（1888）しました。

約 120 年後の現在、「電磁波文明」が豪華に花咲き、ラジオ、テレビ、インターネット、携帯、スマートホン等々と、我々はその恩恵を欲いままに享受しています。

ヘルツは、マックスウェルの４つの式を整理しました。電磁気学は、ヘルツによって、理解しやすい式に書き直されたと言って差し支えありません。

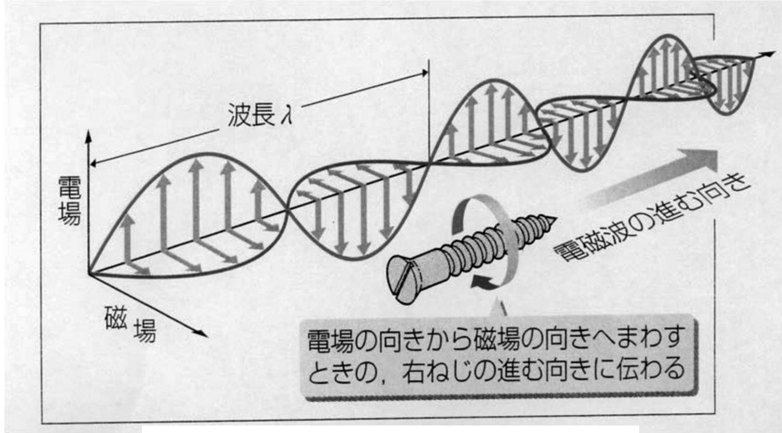
中でも、電荷や磁荷や電流がない状態の記述が重要でした。電場と磁場が絡みあった電磁場の式を、電場だけの式と、磁場だけの式に分けることができました。

するとなんとしたことでしょう。電場も磁場も、波の一般式と同じ型になったのです。電磁場の中には、両方の波が同時に存在することがわかりました。

その波を**電磁波**と呼ぶことにしました。その頃、波のことはよく分かっていましたので、その式からいろいろなことが分かってきました。媒体は電場と磁場そのもので、空間がありさえすれば他に何も必要ではありません。

最も重要なことは、その波の速度についてです。ここで予言された電磁波の速度が、当時実測されていた光の速度 $3\cdot10^{8}\ \mathrm{ms^{-1}}$ と一致したのです。

このことは、我々が目で見ることのできる光は、ヘルツが**電磁波**と命名した波であることです。ヘルツが予言し、実証した波のようすを図示したのが、**図Ｅ８**です。



図Ｅ８．電磁波の伝播のようす

縦方向に電場が振動し、横方向に磁場が振動します。この図で、波の進行方向は右奥の方向です。電磁波は、電場の振動方向と磁場の振動方向の両方に垂直な方向に進んで行きます。これはエネルギーの進む方向としてよいでしょう。

電磁波は**横波**です。

この波の起源を考えるために、もう一度マックスウェルの式を復習しましょう。

基本式３－２でマックスウェルが補足した項が意味を持ってきました。それは、

電場の変化が磁場を誘起する

ことを意味します。他方、**基本式４**は、

磁場の変化が電場を誘起する

ことを意味しています。

この二つの法則が交互に働いて電磁波が存在し続けます。

何かの原因で電流が一時的に流れたとしましょう。例えば、雷が発生した時とか、パチンと電気火花を飛ばした時です。

基本式３－１に従って、周りの空間に磁場が生じます。すぐに消えてしまいますが、その瞬間、磁場の変化が発生しました。その磁場の変化が、**基本式４**の法則に従って電場を誘起します。

ここに誘起された電場はやはり一時的に発生する電場ですが、電場自身の大きさが変化します。その電場の変化が、**基本式３－２**の法則にしたがって磁場を誘起します。ここに誘起された磁場は、**基本式４**の法則に従って再び電場を誘起します。

このように、電場と磁場が、**いたちごっこ**のようにお互いが他を誘起します。そして、いつまでも、何処までも、この繰り返しによってエネルギーが伝播されます。

もう一度、**図Ｅ８**を見てください。

電場が縦方向に振動しています。電場は縦面内で波打ち、その大きさが変化します。

一方、磁場は電場に直交した横方向に振動します。磁場は横面内で、その大きさが変化します。これらの振動面を**偏光面**と呼びます。

図Ｅ８は、電場の偏光面と磁場の偏光面の相対的な関係を図示しただけのものです。ですから、電場がいつも上下方向で、磁場がいつも左右方向であるとは限りません。

電場の偏光面が斜めの場合もあり、あらゆる方向を向いており、一般にはそれらが均等に含まれます。電場の偏光面がどちらを向いていても、その時の磁場の偏光面は電場の偏光面に対して直交しています。そのことを**図Ｅ８**に示したのです。

先に述べたように、電場や磁場の振動面を、**偏光面**と言いますが、**偏光盤**を使って偏光の現象を見ることができます。実験してみましょう。(**実験２０**)

我々の目に見える**光**が、**電磁波**であることが分かりました。光はヘルツによって予言され、実証された電磁波です。

式から予言された速度が、光速の実測値と同じ値であったことが決定的証拠となりました。

ヘルツのこの功績をたたえて、周波数の単位に Hz ヘルツとして、その名を使わせてもらっています。周波数単位 Hz の組み立て単位は $[s^{-1}]$ です。

―――――――――――――――――――――――――――――――――――――

Ｅ７．電磁波

目に見える光の波長は 0.77～0.38 μm (770～380 nm)であること、波長は色で区別できること、長波長が赤色で、短波長が紫であること、その間を７色に分けて、**赤橙黄緑青藍紫**となること、これらは、ニュートンの時代からよく調べられてきました。

Ｅ６の説明で、この目に見える光が、**電磁波**であることが分かりました。

電磁波の速度 c_0 は 3×10^{8} ms^{-1} です。波長 λ と周波数（振動数）ν の積は速度 c_0 ですから、これらの目に見える光の振動数は、

$(3.9\sim7.9)\times10^{14}$ Hz

の範囲となります。

この目に見える波長だけが電磁波なのでしょうか。そんなことはありません。

長いものは、波長が km の長さを持つものから、短いものは pm の長さを持つものまで、すべて、電磁波であることが分かってきました。波長は、km 以上から pm 以下まで、15 桁以上も異なりますが、すべて電磁波です。

波長の違いによって電磁波は名称が異なっています。名称とともに性質が異なっています。以下その名称と性質を簡単にまとめておきます。

波長と**周波数**の単位はそれぞれ、
m と Hz です。

最も波長の長い電磁波は**電波**と呼ばれます。通信に使われています。

超長波 ALF： 10^{4} m、10^{4} Hz
長波 LF（通信）： 10^{3} m、10^{5} Hz
中波 MF（ラジオの電波）：10^{2} m、10^{6} Hz
短波 HF（短波放送）： 10 m、10^{7} Hz
超短波 VHF（テレビ放送）：1 m、10^{8} Hz
極超短波 UHF（テレビ放送):10^{-1} m、10^{9} Hz

テレビアンテナは１m 程度のサイズです。

マイクロ波と呼ばれる領域の電磁波が続きます。波長の長さがその名称です。

センチ波 SHF： 10^{-2} m、10^{10} Hz
ミリ波 EHF： 10^{-3} m、10^{11} Hz
サブミリ波： 10^{-4} m、10^{12} Hz

次の領域は、赤外とか紫外とか、我々に馴染みの名称が使われている領域です。

遠赤外線： 10^{-4} m、10^{12} Hz
赤外線： 10^{-6} m、10^{14} Hz
（原子や分子の振動の周波数を持つ、人は暖かく感じる）

近赤外線： 10^{-7} m、10^{14} Hz

可視光線（赤色）: $7.7\cdot10^{-7}$ m、 $3.9\cdot10^{14}$ Hz
赤色から紫色の範囲が人間の目に見える
可視光線（紫色）: $3.8\cdot10^{-7}$ m、 $7.9\cdot10^{14}$ Hz

紫外線： 10^{-7} m、10^{15} Hz
（分子の結合エネルギーを持つ、日焼け化学反応促進、DNA 切断）
真空紫外線： 10^{-10} m、10^{17} Hz

最近話題に上る X 線と γ 線が続きます。
X 線： 10^{-12} m、10^{20} Hz
（原子中の電子の状態変化(遷移)で発生）

γ 線： 10^{-15} m、10^{23} Hz
（原子核の結合エネルギーの変化で発生）

これらの中で、最も身近な電磁波は電波です。テレビやラジオの放送に使われています。その他、家庭で使用している交流電源も周波数の低い電磁波と言えます。

周波数は西日本で 60 Hz、東日本では 50 Hz です。空間を伝えるより電線を使う方がより効率的なのです。

ここで見てきたように、我々は電磁波に取り囲まれて生活しています。

Ｆ．太陽の温度・地球の温度

Ｆ１．プランクの光の放射の法則

全ての物体から光が出ています。

この章で扱う光は、最も広い意味での光です。その光は全ての電磁波を意味します。**第 IV 章 E 電気・磁気そして電磁波**で、電磁波の本質を学びました。目に見える七色の光は、電磁波のほんの一部分にすぎません。この部分を特に**可視光線**と呼びます。

ここでは**電磁波**について、さらに詳しく学びます。復習をしておきましょう。

スペクトルとは、光の**波長**毎に、どれだけの量の**エネルギー**が含まれているかを示すものです。 **第 IV 章 D 波・音・光** で、我々の持つ各種の光源が、どのようなスペクトルを持つのかを CD 分光器による実験で示しました。太陽の光、白熱電灯、LED、蛍光灯などのスペクトルです。

我々は、色を感じて波長を区別することができます。どの色がどれだけあるのかをカラー写真で見ることができました。

可視光線の中で、どの波長が、あるのかないのか、あっても、強いか弱いか、を見ることができました。色とその強弱でスペクトルを観察しました。ただし、我々の目に見える領域は限られています。

第 IV 章 C 熱と温度 で、エネルギーが**光**の**放射**で**伝播**することを学びました。

広い意味での光は、今から学ぶ **第 IV 章 F 太陽の温度・地球の温度** の主役です。

驚いたことに全ての物体が光を出しています。その光のスペクトルはその物体の温度で決まります。これは**自然の法則**です。そのようになっていると認めるしかありません。

温度が変わるとその物体が放出する光のスペクトルが変ります。

どの温度で、どのようなスペクトルの光を出しているかを、まず**図Ｆ１**で見ていただきます。ここでは、温度を絶対温度 T で挿入しました。単位は K です。

図中に示すいろいろな温度とそのスペクトルを見てください。なだらかなピークを持つ曲線です。温度とスペクトルに関係がありそうです。この図には目に見える領域を、七色に色付けしました。

図Ｆ１(a) は、太陽の表面温度より 1000 K 以上高い 7000 K の物体の放射する光のスペクトルです。ピークは目に見える七色の領域よりも短波長側にずれています。

図Ｆ１(b) は、後に述べる**太陽定数**の測定値から求めた、太陽表面の**有効温度** 5787 K での放射スペクトルです。目に見える領域がピークのほぼ中央にあります。

図Ｆ１(c) は、太陽表面の温度より 1000 K 以上低い 4000 K の物体が放射する光のスペクトルです。ピークは目に見える領域よりも長波長側にずれています。

図Ｆ１(d) には、 1500K(1227℃) を示しました。

図Ｆ１(e) には、1000K (727℃)を示しました。

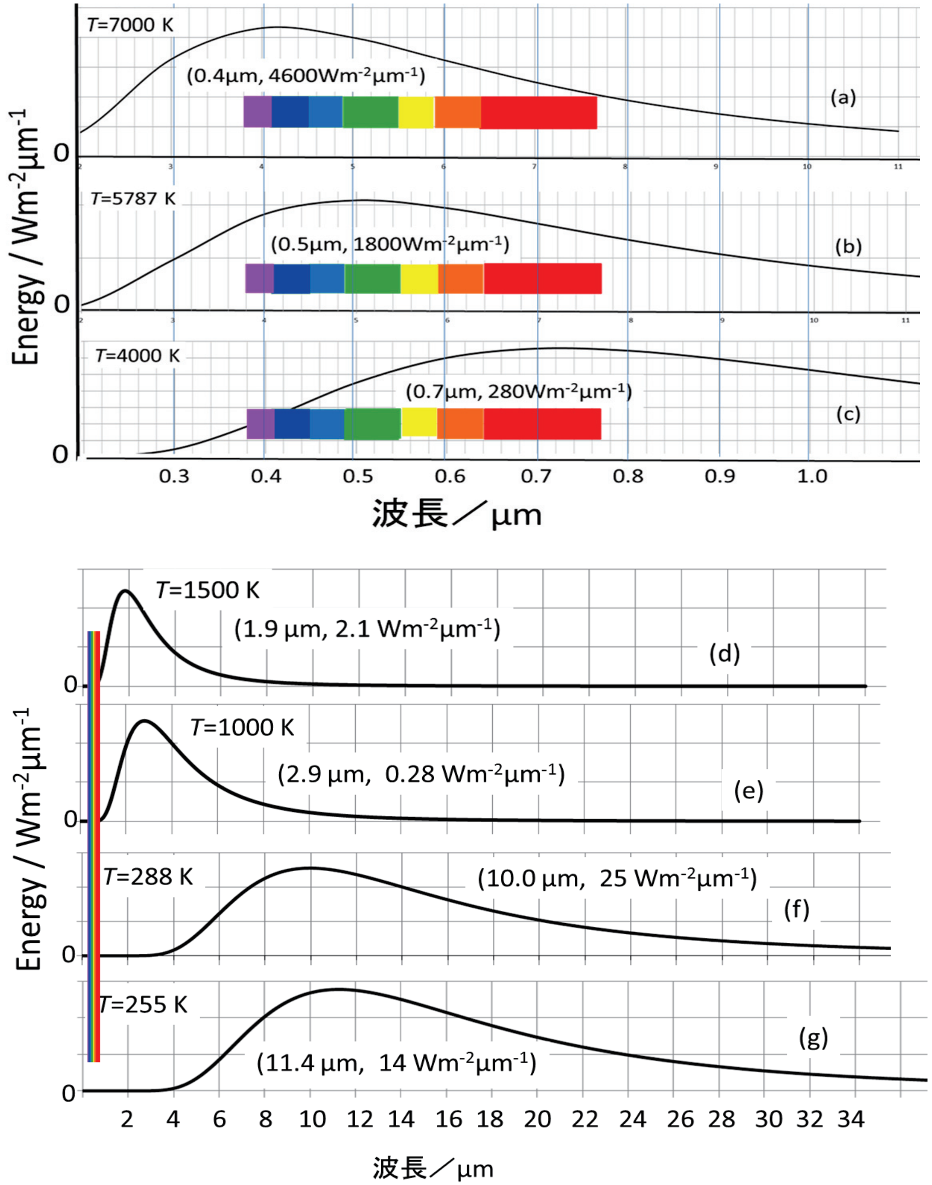


図 F1. 色々な温度の放射スペクトル。色は人の目に見える領域

図Ｆ１(f) は、現在の**地球表面の平均気温** 288 K (15℃) の物体が放射する光のスペクトルです。

図Ｆ１(g) は、地球に大気がないとして計算される**裸の地球の温度**、255 K (−18℃) の物体が放射する光のスペクトルです。これは地球が宇宙に放出している光のスペクトルと考えてさしつかえありません。

図Ｆ１の横軸は、全て光の波長で、図Ｆ１(a), (b), (c) については、0.2~1.0 μm の範囲で描きました。人の眼に見える波長領域 0.38 ~ 0.77 μm が、強く放射されていることが分かります。

図Ｆ１(d), (e), (f), (g) については、横軸を 30 倍以上縮めてあり、波長が1~30 μm の範囲で描きました。人の眼に見える波長領域の放射は、左端の色づけした部分です。この部分の強度が弱いので、人の眼には色づいては見えません。

縦軸は、1 秒間の放射エネルギーを示しています。縦軸のエネルギーの値は、後に示す式 (F1) で計算したものを基にしました。ここで、波長の幅 $d\lambda$ を 1 μm としました。したがって、波長 λ に対する縦軸の値は、波長が λ からλ＋1 μm の間に含まれる光のエネルギーを示しています。

どのスペクトルも山形の曲線で、極大値を１つ持つ曲線です。温度の低下と共に、その曲線の極大値を示す波長が長波長側に移動することが分かります。

それぞれの図中に示した数値は温度 [K] の他に、スペクトルが極大値を示す波長とその時の極大値を（　）内に並べて示しました。極大値は縦軸の目盛を兼ねています。

それらの極大値は、図Ｆ１(a)～(e) では、太陽がその温度であると仮定した場合のスペクトルの極大値で、地球の大気圏の外側で、面積 1 m² が 1 秒間に受けるであろう太陽からのエネルギーの計算値を示しています。

図Ｆ１(b)の値が最も現実に近い値です。図Ｆ１(a)では、太陽の表面温度が実際より高く、図Ｆ１(c), (d), (e)では、実際より低い値です。

図Ｆ１(f)のスペクトルは、地球の温度が 15℃(288 K) としたときの地球表面の放射スペクトルを示しています。波長 10 μm 近傍になだらかな幅の広いピークを持っています。

この場合、図中に示した縦軸の値は、このスペクトル曲線の極大値で、地球大気の海抜 5000 m で、面積 1 m² が 1 秒間に受けるであろう地球表面からの放射エネルギーの計算値です。

図Ｆ１(g)は後に計算するように、地球に大気がない場合に、太陽によって暖められる結果、地球がなるであろう温度、−18℃ (255 K) の物体のスペクトルです。図Ｆ１(g)中の数値は、この温度のスペクトルの極大値を示す波長 11.4μm と、地球大気の海抜 5000 m で、面積 1 m² が 1 秒間に受けるであろうエネルギーの計算値です。

地球表面全体はこの温度ではありませんが、地球が放出するエネルギーの総和は、この温度で放射するエネルギーの総和に等しくなります。

それは後にのべるように、ちょうど太陽から地球が受ける放射のエネルギーに等しいからです。

上に述べた、スペクトルと温度との関係を解き明かしたのはドイツの物理学者**プランク**でした。1900 年のことです。

プランクが成功したこの問題の解明には次のようなエピソードがあります。

プランクは、いろいろと試行錯誤する中で、実測値によくあう式を、理由もなくみつけてしまったのです。

その式は、どの温度の実測値にもぴったりあうのです。次のような式です。

スペクトルを**波長** λ で表現した式は、

$$B(\lambda)d\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5}\frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}}-1}d\lambda \qquad \text{(F1)}$$

であり、波長が λ と $\lambda + d\lambda$ の間にある光のエネルギーを示しています。
ここで、λ：光の波長[m]
h：プランク定数[Js]
c：光速[ms^{-1}]
k：ボルツマン定数[JK^{-1}]
T：絶対温度[K]
e：2.71828182・・・・

一方、式 (F1) を、周波数 ν を使って記述するためには、$\lambda\nu = c$ の関係を使い、λ と $d\lambda$ を消去して、ν と $d\nu$ を使って表せばよいのです。次のような式になります。

スペクトルを**周波数** ν で表した式は、

$$E(\nu)d\nu = \frac{2\pi h}{c^2}\frac{\nu^3}{e^{\frac{h\nu}{kT}}-1}d\nu \qquad \text{(F2)}$$

であり、周波数が ν と $\nu + d\nu$ の間にある光のエネルギーを示しています。
ここで、ν：光の周波数[Hz]
h：プランク定数[Js]
c：光速[ms^{-1}]
k：ボルツマン定数[JK^{-1}]
T：絶対温度[K]
e：2.71828182・・・・

当時、鉄を作る近代技術、いわゆる溶鉱炉の発達と共に、その温度を正確に知る必要がありました。そのため、高温物体が放射する光のスペクトルの研究が進んでいました。

スペクトルが実測され、物質からの光の放射現象は実験的には正確に把握されていました。しかし、その実測されたスペクトルの説明がなかなかつきませんでした。物理学の基本的な問題になっていました。

実測値によくあう式を作ってしまったプランクは、大発見を確信したのですが、その式の導出が簡単ではありませんでした。

できなければ自分自身が最もがっかりすることでしょう。それ以来プランクは、不眠不休の勉強の日々が続きました。２週間とも１ヶ月ともいわれています。ありきたりの考えではこの式を導き出すことはできませんでした。

その式に到達するには、考え方に大きな飛躍が必要だったのです。その飛躍とは、

光が波の性質を持つだけでなく、
粒子の性質も同時に持つこと

だったのです。プランクは、粒子の性質として、

光のエネルギーが $h\nu$ の整数倍
しか取り得ない

としました。

光の一粒のエネルギーが $h\nu$ であり、１個、２個・・・としか起こりえず、中途半端な、1.5 個の光や 2.4 個の光はあり得ないとしたのです。

そうすると、周波数 ν の大きな光、つまり波長 λ の短い光は、１個の光を増やすのに、大きなエネルギーが必要で、自由に増やすことができない場合があるわけです。

そのようにして、プランクは放出される光のスペクトルが式 (F1) または式 (F2) の

形になることを導き出したのです。

これは大発見でした。後の**量子力学**発見の出発点になりました。**量子力学**は**原子や分子**の振る舞いを明らかにする力学です。

ここで h は後に**プランク定数**と呼ばれる定数で、値は 6.626×10^{-34} Js です。

Ｆ２．シュテファン・ボルツマンの法則 と ウィーンの変移則

プランク放射式の発見は 1900 年です。この式に関連して、それ以前から分かっていた重要な法則が二つありました。

一つは**シュテファン・ボルツマンの法則**であり、もう一つは、**ウィーンの変移則**です。どちらも、プランクの放射式の核心を表現したものだったのです。ここでその内容を学んでおきましょう。

あらゆる物体から光が放出されているわけですが、スイスの物理学者シュテファンは、1879 年、その放出する総エネルギーが、**絶対温度 T の４乗に比例する**ことを発見しました。

温度 T の物体が、表面積 1 $\mathrm{m^2}$ 当たり、1 秒間に放射する総エネルギー Z は、

$$Z(T)=\sigma T^4 \qquad \text{(F3)}$$

で表されます。この式は、後に1884年、ボルツマンによって計算過程に修正が加えられ、**シュテファン・ボルツマンの法則**と呼ばれるようになりました。比例定数 σ は、

$$\sigma = 5.67\times10^{-8}\ \mathrm{Wm^{-2}K^{-4}} \qquad \text{(F4)}$$

であり、**シュテファン・ボルツマン定数**と呼ばれます。

この法則は、プランク放射式を全領域に亘って積分することによって導出できます。これは、**図Ｆ１**の曲線の下方の面積を求めることです。

図中に、そのピークの高さを記入しておきました。**図Ｆ１(a)～(e)**の値を見てください。温度の低下とともに、エネルギーが低下してゆくようすが分かります。

この式を使えば、太陽表面の温度が分かりさえすれば、その値から、太陽の大きさを使って、太陽が放出する総エネルギーを計算することができます。

もう一つの法則は 1893 年の**ウィーンの変移則**です。

これまでみてきたように、全ての物体から光が出ており、その光のスペクトルは温度によって異なります。**図Ｆ１**のすべての曲線から容易に分かるように、スペクトルは極大値を一つ持ちます。

その極大値を示す光の波長 λ_{M} と放射する物体の絶対温度 T の間に関係があります。ウィーンによって発見された法則です。

T と λ_{M} の積が一定である。式にすると、

$$T\lambda_{\mathrm{M}} = 2.898\times10^{-3} \qquad \text{(F5)}$$

この式も、プランク放射式 (F1) を λ で微分して、０と置いて導き出せます。

温度が上がれば、そのスペクトルの極大値を示す波長が短くなり、温度が下がれば、極大値の波長が長くなります。

ウィーンの変移則は、われわれも感じることが出来ます。溶接に使われるバーナー

の炎は温度が高く、その炎は青白く見えます。一方、マッチ棒の炎は橙色です。

温度の高い星は青白く、温度の低い星は赤く見えると言われます。温度の高い星やバーナーの炎は、**図Ｆ１(a)**のスペクトル曲線のように、極大値が青色・紫色の方へシフトしたものと考えられます。温度の低い星やマッチ棒の炎は、**図Ｆ１(c)**のスペクトル曲線のように、極大値が赤色の方へシフトしたものと考えられます。

太陽は黄色です。幼児が太陽を描くと、たいてい赤色を塗ります。なぜでしょう。ちらっと見るだけで、しっかりと観察できないからかもしれません。

Ｆ３．太陽光スペクトルの大気圏外での観測

これまでに分かったことは、

> **太陽光のスペクトルを精密に観測すれば、太陽の表面の温度を知ることができる**

ことです。

ウィーンの変移則によると、観測された太陽光のスペクトル極大値の波長から、太陽表面の温度が分かるはずです。

極大値だけでなく、スペクトル全体が観測できれば、**プランクの放射式**全体と比較して太陽表面の温度が分かるはずです。

また、太陽からやってくる放射エネルギーの総量の測定ができれば、**シュテファン・ボルツマンの法則**によって、太陽表面の温度が分かるはずです。

太陽光のスペクトル観測が、1980 年に打ち上げられた人工衛星によって行われました。大気圏の外まで行くことが重要なことでした。太陽光は大気で吸収されてしまうからです。

その測定結果を**図Ｆ２**に示します。スペクトルの観測データは、**大気の外側での放射スペクトル(測定値)**で示した**実線の曲線**です。短波長側で凹凸のある変動の激しいデータになっています。

この変動は太陽の表面における、場所による温度の違いや時間による温度の変動に原因があるようです。太陽は絶え間なく活動している証拠でもあります。

太陽光のスペクトルの極大値から、**ウィーンの変移則**を使って、太陽表面の温度を推測してみましょう。データによると、スペクトルの極大値は 0.44 ～ 0.52 μm に分布します。式 (F5) を使って得られる太陽の表面温度は、6600 ～ 5600 K となります。これでは確定したとは言えません。

太陽表面の温度を見積もるために、**プランク放射式**をいろいろな温度で計算し、全体として、この**実線の観測曲線**に最もよくフィットするものを選べばよいでしょう。

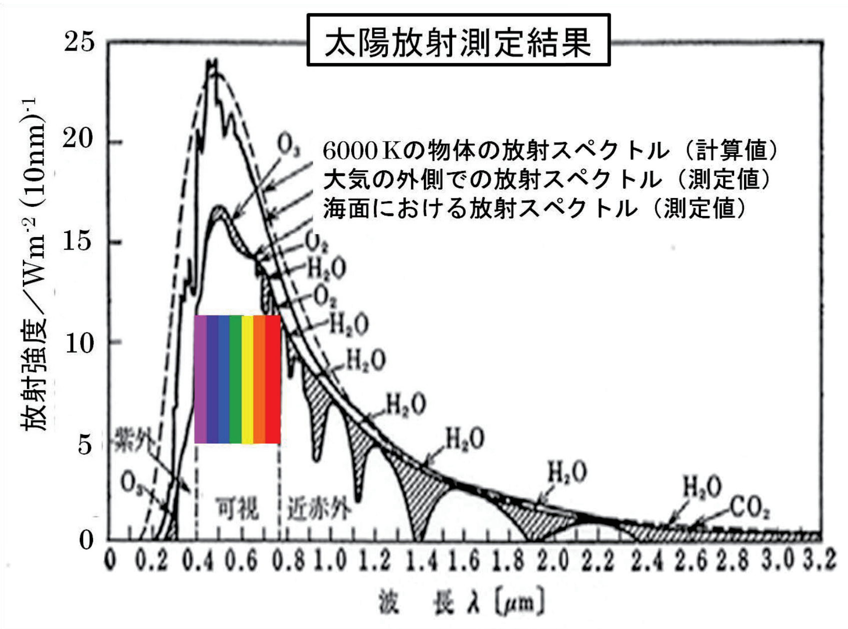
図Ｆ２に、**6000 K の物体の放射スペクトルの計算値**を**破線の曲線**で示しました。この計算値は、実際に観測されたスペクトル曲線とその特徴がほぼ一致しています。しかし、全体として、スペクトルが一致しているとは言い難いところがあります。

この 6000 K を使って、ウィーンの変移則をあてはめると、スペクトルの極大値の波長は 0.483 μm になります。

1980 年の人工衛星による測定では、実際に太陽からやってくる**放射エネルギーの総量**の測定を行いました。その測定値がプランク放射式の積分値に一致すると仮定しました。言い換えると、**シュテファン・ボルツマンの法則**すなわち、式 (F3) が当てはまるとしました。総エネルギーの測定値から、**太陽の表面温度**を 5787 K と決定しました。

このようにして決めた温度を**太陽表面の有効温度**として各方面で使われています。

地球上に生息する生物にとって太陽のエネルギーは、その活動の源です。実際に太陽からやってくる総エネルギーの測定値から太陽表面温度を決定し、**有効温度**とすることは、直前に述べたようなスペクトルの形から表面温度を決定するより、当を得たことと思われます。



図Ｆ２．太陽放射のスペクトル観測結果

Ｆ４．太陽表面温度と地球に届く太陽放射エネルギー

太陽表面の温度を T_S とし、地球大気の外側で、面積 1 m² を 1 秒間に直射する**太陽放射の全波長領域にわたるエネルギーの総量**を S とすると、これらの間には関係があります。ここで T_S と S との間の関係を求め、実測値を使って具体的な数値を求めてみましょう。

太陽の表面温度を T_S とし、シュテファン・ボルツマンの法則 式 (F3) を**太陽表面**にあてはめます。すると、太陽表面の 1 m² から 1 秒間に放出するエネルギー $Z\,(T_S)$ は、次式となります。

$$Z(T_S) = \sigma T_S{}^4 \qquad \text{(F3}'\text{)}$$

ただし、$\sigma = 5.67 \times 10^{-8}\ \mathrm{Wm^{-2}K^{-4}}$ (F4)

太陽の半径を $R_S\ (= 6.96 \cdot 10^8\ \mathrm{m})$ とすると、太陽の総表面積は $4\pi R_S{}^2$ です。このことを使うと太陽の全放出エネルギー L_{TS} は

$$L_{TS} = 4\pi R_S{}^2 \cdot Z(T_S) = 4\pi R_S{}^2 \cdot \sigma T_S{}^4 \quad \text{(F6)}$$

となります。

ここで、T_S を仮に 6000 K として、式 (F6)を使って、数値を求めると、

$$\begin{aligned} L_{TS} = L_{6000} &= 4 \cdot 3.14 \cdot (6.96 \cdot 10^8)^2 \\ &\quad \cdot 5.67 \cdot 10^{-8} \cdot (6 \cdot 10^3)^4 \\ &= 4.47 \cdot 10^{26}\ \mathrm{W} \qquad \text{(F6}'\text{)} \end{aligned}$$

となります。太陽の表面から放出する総エネルギーは、4.47･10¹¹ 兆 kW となり、1 秒間に、4.47･10¹¹ 兆 kJ のエネルギーを放出します。

ここで、**第 III 章 原子と原子核 ２３**で学んだことと関係が出てきます。この節の式によると、水素原子核 4 個が核融合でヘリウム原子核 1 個をつくる時に放出するエネルギー E_{d0He} は、0.428×10^{-11} J です。

式 (F6′) の値をこの値で割ると、$1.04 \cdot 10^{38}$ 個、質量にして 6.9･10¹¹ kg となります（He 原子 1 個の質量 6.64×10^{-27}kg **第 III 章図表 III-9 参照**)。1 秒間にこれだけの質量のヘリウムが、太陽の中で、核融合によって作られていることになります。

太陽の年齢 45 億年(1.4･10¹⁷ 秒)から計算すると、これまでに作られたヘリウムの質量はこれらの積で、およそ 10³⁰ kg となります。太陽は今後 45 億年続くと言われています。従って、太陽の質量は約この 2 倍と考えてよいでしょう。 理科年表によると、太陽の質量は、1.989･10³⁰ kg となっています。ここで行った概算は正しいようです。

さて、太陽が放射するエネルギーのうち地球に届くエネルギーはどれぐらいでしょうか。太陽と地球の距離を a とします。この距離を 1 **天文単位**と言い、その値は、

$$a = 1.50 \cdot 10^{11}\ \mathrm{m} \qquad \text{(F7)}$$

です。この距離だけ離れて、1 m² を直射する放射エネルギーの 1 秒当たりの値 S は、全放射エネルギー L_{TS} と a を使って、次の式で表されます。

$$S = \frac{L_{TS}}{4\pi a^2} \qquad \text{(F8)}$$

この式に、式 (F6) の L_{TS} を代入すると、

$$S = \frac{4\pi R_S{}^2 \cdot \sigma T_S{}^4}{4\pi a^2} \qquad \text{よって、}$$

$$S = \left(\frac{R_S}{a}\right)^2 \cdot \sigma T_S{}^4 \qquad \text{(F9)}$$

となります。地球大気の外側の 1 m² を直射する太陽エネルギー S と、太陽表面温度 T_S との関係が求まりました。式 (F9) です。

1980 年の人工衛星の観測値は、S の値が 1367 W でした。式 (F9) の左辺の S に、

$$S = 1367\ \mathrm{W}$$

を代入して、

$$1367 = \left(\frac{R_S}{a}\right)^2 \cdot \sigma T_S{}^4 \qquad \text{この式を}$$

太陽の表面温度 T_S について解くと、

$$T_S = 5787\ \mathrm{K}$$

となります。この値は、人工衛星による S

の測定値 1367W に対応する太陽表面温度です。ここでこれらの値を改めて、

$$S_0 = 1367\ \mathrm{W} \qquad \text{(F10)}$$
$$T_{S0} = 5787\ \mathrm{K} \qquad \text{(F11)}$$

とおいて、地球に関連する太陽の重要な定数とします。前者を**太陽定数**と呼び、後者を**太陽表面の有効温度**とします。

この温度でのスペクトルの極大値の波長は、ウィーンの変移則 式 (F5) によって、

$$\lambda_M = \frac{2.898 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{mK}}{5787\ \mathrm{K}} = 0.5\ \mu\mathrm{m} \qquad \text{(F12)}$$

となります。以上をまとめると、

１．人工衛星で、大気圏の外側で、太陽が直射する 1 m^2 の面積が受ける放射エネルギーを測定した

２．その値が、1.367 kW であり、この値を**太陽定数** S_0 と呼ぶ

３．この値から、太陽と地球の距離、太陽の半径を考慮し、太陽表面温度を計算した

４．この計算結果は、5787 K となる。この値を**太陽表面有効温度** T_{S0} とする

５．この値を使って、ウィーンの変移則を用いて、スペクトルの極大値を求めると、$\lambda_M = 0.5\mu$m となる

ここで、**図Ｆ２**をもう一度見てください。太陽から地球に届く光のスペクトルです。図中に我々の見る色を挿入しました。我々が目にする可視光線の波長と色に着目してください。

可視光線の波長領域は、0.38 ～ 0.77 μm です。われわれの目が色として感じる領域は、太陽からやってくる放射エネルギーの最も強い部分を、広くキャッチしていることが分かります。しかも、色まで付けて！

電磁波全体からみると、波長領域は、ほんの僅かな領域です。しかし、エネルギーで言えば、太陽の放射エネルギーのほとんど半分の量を占めています。可視光線として、我々の目はキャッチしているのです。

人間の眼は、光の検出器として、よくできた検出器です。これが４５億年の進化の証(あかし)です。このような検出器を持つ人類は幸福としか言いようがありません。ここまで進化した人類を祝福しようではありませんか。

よく、人は七色の光を識別するが、他の動物、犬猫猿などには、色が見えない、と言います。本当でしょうか。

進化の神様が人類だけに、このすばらしい検出器を与えたのでしょうか。程度の差はあるかもしれませんが、他の動物達にも、同じように与えたに違いありません。動物の視覚についての研究は楽しい研究テーマかも知れません。

地震の時にいろいろな動物が異常な行動をすることが知られています。代表者は**なまず**でしょう。

地震で地殻変動が生じる際、電磁波が飛び交うことは容易に想像されます。地殻の中に圧電性物質である水晶が少なからず含まれているからです。水晶が変形したり、破壊したりする時、電磁波を放出します。

電磁波は光のスピードで伝播します。地震波よりずっと早く広がります。種々の動物の異常行動は、その電磁波をキャッチしているに違いありません。

これが本当なら、他の動物たちは人間より敏感で、しかも、可視光線以外の波長領域にも反応できるのではないかと想像されます。

Ｆ５．地球がもらう放射エネルギー と 裸の地球の温度

太陽の光が地球の育む生命のエネルギー源です。ここではまず、地球が太陽からもらう総エネルギーを計算しましょう。

地球は 1 m^2 当たり**太陽定数** 式 (F10) $S_0 = 1367$ W だけの放射エネルギーを受けています。もし地球に大気がなく、地球が裸なら、このエネルギーを全部受けています。この**裸の地球**が受けるエネルギーの総量 D_0 は、地球の半径を$R_E(= 6.367 \cdot 10^6\ \mathrm{m})$ とすると、地球の太陽に対する垂直面積が、$\pi {R_E}^2$ だから、地球全体で、

$$D_0 = \pi {R_E}^2 \times S_0$$

だけのエネルギーを受けているはずです。

しかし、実際に地球が受ける光のエネルギーは、反射して宇宙に戻って行く光のエネルギーを差し引かなければなりません。

反射の原因は、地球表面に存在する空気、水、雲、氷雪などによるものです。これらを考慮しなければなりません。

反射して宇宙にそのまま戻る量は、比率にして、アルベド数 A と呼ばれています。地球では $A_E = 0.3$ と言われています。他の惑星では、金星 $A_V = 0.78$、火星$A_M = 0.16$ と推定されています。

このことを考慮すると、地球が太陽から受ける実際のエネルギーの総量 D は、D_0 を使って、

$$\begin{aligned} D &= (1 - A) \cdot D_0 \\ &= (1 - A) \cdot \pi {R_E}^2 \cdot S_0 \qquad \text{(F13)} \end{aligned}$$

としなければなりません。これが地球のもらうエネルギーの総量であり、全てです。

この大きさを具体的に計算してみると、

$$\begin{aligned} D &= (1 - 0.3) \cdot 3.14(6.367 \cdot 10^6)^2 \cdot 1367 \\ &= 1.22 \cdot 10^{17}\ \mathrm{W} = 122\ \text{兆}\ \mathrm{kW} \qquad \text{(F14)} \end{aligned}$$

地球表面の温度を決めるものに、太陽からもらうエネルギー以外に大きなものとして、地熱が考えられます。地熱の総量 G は

$$G = 3.5 \cdot 10^{13}\ \mathrm{W}\ (= 0.035\ \text{兆}\ \mathrm{kW})$$

と推定されています。

この大きさを式 (F14) の値、122 兆 kW と較べると、1000 分の 1 以下であり、地熱が地球表面の温度に与える影響はほとんどないと言ってさしつかえありません。

しかし、この地熱エネルギーの推測値は、世界中の全原発による発電総量 $5.7 \cdot 10^{11}$ W のほぼ 100 倍のエネルギーであり、地熱の利用研究は将来重要になるでしょう。全原発の発電量は、2011 年の地震後の日本中の休止原発や、2015 年 2 月時点での世界の計画中や点検中の原発を全部含んでいます。

式 (F14) の、太陽からもらうエネルギーによって、**地球が温まり温度**が上がります。そのことによって、**地球の温度**が T_E になるとすると、今度は、その温度で地球が放出する総エネルギーを計算することができます。地球が放出する総エネルギーを L_{TE} とすると、次の式になります。

$$L_{TE} = \left(4\pi {R_E}^2\right) \sigma {T_E}^4 \qquad \text{(F15)}$$

ここでは、地球を温度 T_E の物体と考えて、シュテファン・ボルツマンの法則をあてはめるとよいのです。地球の表面 1 m^2 当たり毎秒 $\sigma {T_E}^4$ のエネルギーを放射し、地球の総表面積が $4\pi {R_E}^2$ ですから、式 (F15) が成り立ちます。

ここで、式 (F14) の**地球がもらうエネルギー**と、式 (F15) の**地球が放出するエネルギー**を等しいとおくと、

$$4\pi {R_E}^2 \cdot \sigma \cdot {T_E}^4 = (1 - A_E)\pi {R_E}^2 \cdot S_0$$

であり、整理して、

$$4\sigma \cdot {T_E}^4 = (1 - A_\mathrm{E}) S_0 \qquad \text{(F16)}$$

S_0に式 (F10) 、σ に式 (F4) を代入し、$A_\mathrm{E} = 0.3$ を使って T_E について解くと、

$$T_\mathrm{E} = 255\ \mathrm{K} = (273 - 18) \qquad \text{(F17)}$$

となります。これは地球による反射だけを考慮した地球の温度で、**裸の地球のあるべき温度と呼ぶことにします。**この裸の地球の温度は、−18℃(255 K)です。地球上の平均気温としては低すぎます。地球上の生物の生息には適当ではありません。

また、実際の地球表面の平均気温は、15℃(288 K) で、一致しません。

地球の平均気温は、裸の地球の気温の計算値よりも、33℃(33 K)も高くなっています。多少の上がり下がりがあったようですが、この何十万年の間、この温度で存在し続けてきた事は明らかになっています。

地球表面の温度が、33℃も高くなっている原因は地球を取り巻いている大気です。地球は、この何十万年の間に、すでに 33℃も温暖化しているのです。

Ｆ６．地球表面はすでに水蒸気によって温暖化している

地球表面の温暖化の原因は大気中の水蒸気です。水蒸気による温暖化は、水分子の持つ電気双極子モーメントに由来します。この電気双極子モーメントについては、**第 IV 章 Ｂ 水** で詳しく話しました。

また、太陽からやってくる光が電磁波であることも、**第 IV 章 Ｅ 電気・磁気そして電磁波** で詳しく話しました。

電磁波は電場と磁場が交互に変動しながら空間を伝播します。地球表面に届いた太陽の光は、地球表面にある大気中の水分子に作用します。水分子が電気双極子を持つからです。電気双極子が、電磁波の電場の変動に影響されて、揺すられてしまいます。

ところが、分子が揺り動かされることは、直接温度に関係します。**第 IV 章 Ｃ 熱と温度** で述べた通り、熱とは原子分子の、運動のエネルギーそのものだったことを思い出してください。分子が揺り動かされて、温度を直接上げています。

そのようすが、**図Ｆ２**に示されています。図中の、**海面における放射スペクトル（測定値）**で示された曲線です。**大気の外側での放射スペクトル（測定値）**の曲線で示された太陽の光が、地球上の海水面、海抜 0 m に到達するまでにずいぶん吸収されてしまいます。吸収量が斜めハッチングで示されています。

その原因は主に**水蒸気** H_2O であることが分かります。3原子分子であるオゾン O_3 や二酸化炭素 CO_2 も吸収の原因になっていることが分かります。

我々は**電子レンジ**で料理をします。温度を上げているのです。電子レンジで上手く料理ができるのは、温度が上がるからです。

温度が上がる理由は、食べ物には必ず水が含まれているからです。**マイクロ波**に揺すられて水の温度が上がるから料理ができるのです。マイクロ波と呼ばれる電磁波については、やはり**第 IV 章 Ｅ 電気・磁気そして電磁波** で学びました。

電子レンジの中はマイクロ波が充満しているのです。

大気中の水蒸気と較べると、料理の材料は何桁も高い濃度で水分子を含みます。そのため料理は数分で煮えてしまいます。煮るために使う電磁波の強度や波長も有効に選ばれています。

水蒸気による大気の温暖化と電子レンジによる料理は同じ原理に基づいています。

地球の大気はすでに、33℃も温暖化しているのです。この主な原因は水蒸気です。水分子の電気双極子が原因で、電磁波によって強制的に揺られて動かされます。

水分子の電気双極子は、３原子分子であることが原因です。水分子は、**第 IV 章 Ｂ 水** で述べたように、**くの字型**の折れ曲り構造をしています。**くの字型**は、水分子を大きな**電気双極子**にしています。

電気双極子は１原子分子にはありません。同じ原子２個できる酸素や窒素の分子も、電気双極子を持ちません。

３原子以上の多原子分子の気体は、電気双極子の性質を持つものが多く、電磁波に対して、水蒸気と同様な働きをします。

温暖化気体(Gases of Greenhouse Effect)と呼ばれています。温暖化気体は、水蒸気や二酸化炭素、オゾンの他に、メタンガス、アンモニアガスなどです。

最近の地球表面の温暖化(Global Warming of the Earth Surface)で問題になるのは、この数世紀の間に増加した多原子分子の気体です。

Ｆ７．成層圏の温度降下

地球の表面はすでに33℃も温暖化していることが分かりました。

33℃も温暖化しているとしても、地球が宇宙に向かって放出しているエネルギーが、多くなるのではありません。式 (F17) の地球の**あるべき温度** −18℃(255 K) より高い温度でエネルギーを放出しているのではありません。

地球から放出されるエネルギーは、地球が太陽から受け取るエネルギーより多くなるはずはないからです。

もし、地球が放出するエネルギーの方が大きいとすると、地球の温度はどんどん下がるばかりです。それは事実に反します。

ではどうなっているのでしょうか。それは地球のどこかで温度が低下し、うまく帳尻を合わせているのです。

何処で帳尻は合わせているのでしょう。

それは、地球上空の成層圏・中間圏の温度低下です。大気の温度の垂直構造は、**第 IV 章 Ａ 大気**で学びました。地球大気は上空に行くほど、温度が低下します。

高度約 11 km までの**対流圏**では、気体の**断熱膨張**で気温が低下します。それより上空、成層圏・中間圏でも、温度は低下したままです。さらなる温度低下も起こっています。

地球が宇宙へ放出するエネルギーは、全表面の、全ての高度における温度からの放射であり、全ての温度分布を考慮した、ある意味での平均化がなされた放射を意味します。

その結果、地球からの放出エネルギーの総量は、ちょうど太陽から受け取るエネルギーの総量と等しくなっているのです。

地球表面の温度の上昇いわゆる温暖化は、成層圏より上空での温度低下によって、帳尻を合わせていると言って差し支えありません。

上空での温度低下の理由は、地表からの放射されたエネルギーが、大気で吸収されて、上空に到達しないからと考えられます。

地球表面からの放射は、**図Ｆ１(f)** に示しました。この領域の電磁波に対する水蒸気や二酸化炭素による吸収が原因で、上空へエネルギーが放出されにくくなって、上空の温度が上昇しないと考えられます。

地球表面の温暖化による温度上昇の大きさは、結局、水蒸気や二酸化炭素の濃度によると考えられます。

これまでの地球表面の温暖化による温度上昇が、33℃で止まっている理由は、その原因が水蒸気によるものだったからです。

水蒸気は、気温が下がれば、水や氷に戻り、水蒸気量が減少します。H_2O の状態循環のため、全体的な水蒸気の濃度が変化しなかったと思われます。

気温の上昇による飽和水蒸気量の増加は起こり得ます。**第 IV 章Ａ８空気中の水蒸気**で述べた通りです。それは局所的であり、異常気象に繋がります。異常気象が各地で観測されています。しかし、地球全体で大気中の水蒸気の量が増加しているとのデータはないと言われています。

これまでに述べた、地球表面の温度上昇と上空の温度降下の理由は、定性的な概念を述べただけで、厳密な理論と具体的な計算の裏打ちが必要です。そしてその実測が求められます。

Ｆ８．現在の地球表面の温暖化の証拠は何処に現れるか

現在、**二酸化炭素**による地球表面の温暖化が問題になっています。

18 世紀以降、二酸化炭素の濃度が増加しています。**第 IV 章Ａ大気** で述べた通り、紛れもない事実です。また、**二酸化炭素**は３原子分子の**温暖化気体**です。

二酸化炭素はそのままでは電気双極子を持ちませんが、熱による振動が電気双極子を誘発し、電磁波の作用を受けます。光のエネルギーを吸収し、分子の振動が増えてしまいます。つまり温度が上がってしまいます。

現在、二酸化炭素や、その他の気体による温暖化効果で、地球表面温度が上昇していると言われています。

地球温暖化の証拠は何処かに現れているのではないでしょうか。

18 世紀以降の化石燃料の生産量の増加、大気中の二酸化炭素の増加、大気気温の上昇、これらの変化を見ると、50 年以上の時間の遅れはあるものの同じ形で変化しています。状況証拠としては充分でしょう。

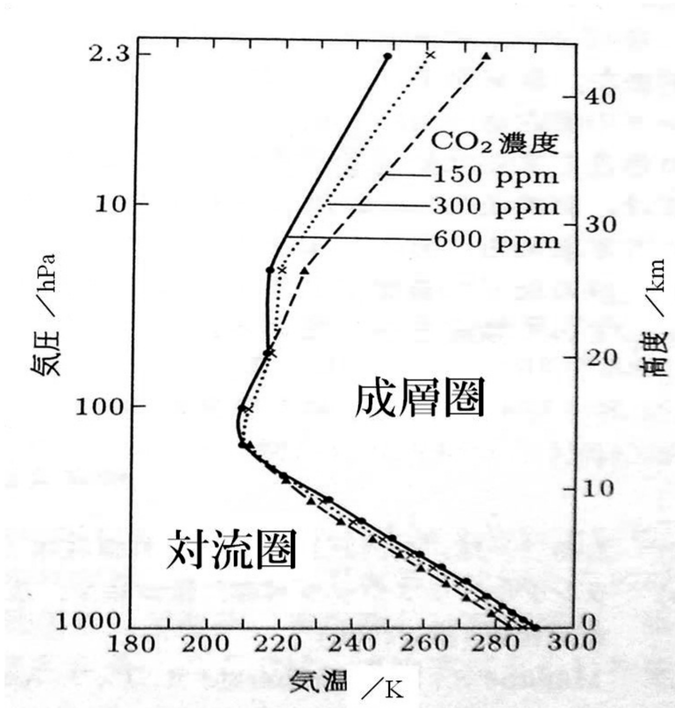
しかし、その決定的な証拠が何処にあるのかが問われています。その証拠は、上空の大気の温度低下ではないかと考えます。

地球はこれまで何十万年の間に、**水蒸気**によって 33℃ 気温が上昇しました。その結果、成層圏以上の上空で、50 K 以上も気温が低下したのではないかと考えられます。

このことから推測すると、**二酸化炭素**による温暖化の結果、やはり、成層圏で温度のさらなる降下が観測されるはずです。地球表面での温度上昇の償いとして、すでに何らかの温度下降が上空で生じていてもよいはずです。

50 年前と比べると、現在、夏には地球表面で、確実に 5 K の温度上昇が観測されています。年間を通じての温度上昇は、現在、数 K 程度でしょう。

成層圏での温度変化は、精度の高い、長い年月を掛けたデータ蓄積が必要になります。そのデータを紹介します。



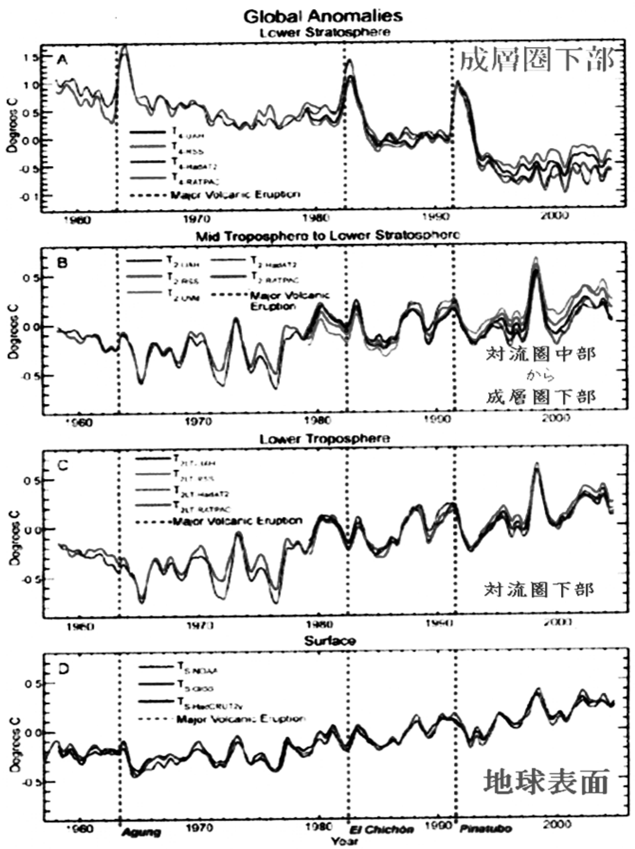
図Ｆ３．二酸化炭素濃度と対流圏・成層圏の鉛直気温分布の予想計算の結果
真鍋淑郎著 地球環境の危機
内嶋善兵衛編（1990）岩波書店

二酸化炭素の増加による上空の気温の変化の予測計算を**図Ｆ３**に、上空の温度低下を観測した実測データの例を**図Ｆ４**に示します。

図Ｆ３の横軸は温度[K]で､縦軸は高度と、それに対応する大気の圧力が目盛ってあります。

二酸化炭素の濃度を、150, 300, 600 ppm と変化させて、地表から成層圏までの予想される気温の分布が計算されています。

図Ｆ３の破線は､二酸化炭素の濃度が 150 ppm の時の予想気温の高度による変化を示しています。点線は濃度が 300 ppm の時で、実線は濃度が 600 ppm の時です。



図Ｆ４． 地球の対流圏成層圏の温度測定結果
Temperature trends in the lower atmosphere
The U.S. Climate Change Science Progrm より

計算結果から以下のことが分かります。

１．地球表面近傍における大気の温度は、**図Ｆ３**の下方で示されており、二酸化炭素の増加と共に、気温が上昇しています。実線が点線に較べて、点線が破線に較べて、より高温側に移動しています。

２．成層圏以上の上空、特に高度 20 km 以上で、二酸化炭素の増加と共に、気温が低下しています。実線は点線に較べて、点線は破線に較べて低温側に位置しています。

図Ｆ４は、1958 年以降の大気各層の温度変化を示しています。縦軸は**温度**、横軸は**西暦年号**で、1958 年から 2005 年までのデータです。

大気圏下部を垂直に４層に分けて気温の変化を示しています。**図Ｆ４**の上から順に大気の上層から下層へ分けて示されています。

成層圏下部
成層圏下部から対流圏中部
対流圏下部
地球表面

の順に示しています。

地球表面および**対流圏下部**では明らかに気温が上昇しています。また、**対流圏中部から成層圏下部**までの平均値は少し上昇傾向があるものの、横這いになっています。

一方、**成層圏下部**では明らかに下降傾向が示されています。

グラフに見られる、突出する温度の上昇は、大規模な**火山の噴火**による影響です。

第Ｖ章　物理学実験のテーマと解説

第Ｖ章のまえがき

講義はほとんどの場合、実験で始まります。一コマの講義で、複数の実験を行うことが多く、実験に関連させて、かみ砕いて講義を進めます。ですから、**第Ｖ章**を読むと、この講義のおおよその方針が分かります。

例外は、
第Ｉ章Ｉ―1 黄道１２星座
第 III 章原子と原子核
第 IV 章Ｆ太陽の温度・地球の温度
です。

これらの章の実験はできません。内容的にも、本文をどんどん読むだけでよいでしょう。

第Ｉ章Ｉ―１黄道１２星座では、こんなこともあるのかと驚いてください。

ここでの実験は、コマ回しが関連します。**実験７**でコマを回し歳差運動について学びましょう。

第 III 章 原子と原子核では、放射能測定実験はできるのですが、厳重な注意が必要で、準備が滞っています。

ここでは、**聴き慣れない単語**が次々と現れます。難しい論理は省いてあり、結論だけを記述しました。本文を読んで、そうか、そのようなものか、と通読してください。それだけで十分です。

第 IV 章Ｆ太陽の温度・地球の温度では、やはり慣れない言葉が出てきますが、分かり易い言葉で説明したつもりです。本文を注意深く読んでください。

遠くにある太陽が地球上で進化した人間に、強く影響を与えている現実を知ってください。物理学がこんなことまで明らかにしたことに驚いてください。

実験１．サイフォンでコーヒを
―物理学の目的は何か―

装置　サイフォンコーヒメーカー
アルコールランプ、工業用アルコール
コーヒ、マッチ

目的　コーヒを作りながら物理学の目的を学ぶ

話しておきたいこと

物理学は、**「なぜ？」**という質問から始まります。

その**「なぜ？」**にどのように答えるかを考えてみましょう。簡単に答が見つかることもあるでしょう。それが難しい場合もあります。

物理学は自然現象を対象にしています。

「なぜ？」の答は、その現象をよく観察することから始まります。そしてそれが、**「どうなっているか」**を調べ、**「こうなっています」**と答えると、それは立派な答です。これは自然科学すべてに当てはまります。

サイフォンコーヒメーカーでコーヒを作りながら、**「なぜ？」**と質問し、**「どうなっているか」**を考えてみましょう。

サイフォンコーヒメーカーは、下側のガラスフラスコ(球)に、ゴム栓のついたガラス管が差し込まれています。ガラス管の上はコップになっています。コップの底に固定されたフィルターがあり、その上にコーヒ粉が置かれています。

ガラス球に水を入れ、下から熱すると、水が沸騰を始めます。沸騰するとお湯がガラス管を通ってガラスコップに登って行きます。そして粉と混ざりコーヒができます。

火を消すと、コーヒが下のガラスフラスコに戻ってきます。最後にブクブクと泡が出ます。空気も戻るのです。空気が十分戻るまで、ゴム栓ははずれません。

「なぜ？」お湯が上に登るのでしょう。ガラスフラスコはゴム栓で締められており、空気は漏れません。ですから下の**ガラスフラスコ内の圧力が上がる**からです。圧力が上がって水を押し上げるのです。

では**「なぜ？」**圧力が上がるのでしょう。それは、**水が沸騰して水蒸気になった**からです。そうすると**「なぜ？」**水蒸気になると圧力が高くなるのですか、と次の「なぜ？」が生まれます。そしてそれは、**水が水蒸気になると、体積が 1700 倍になる**からです。

このように、**「なぜ？」** と質問して、**「こうなるのです」**と答えるのが物理学です。

その答に、さらに**「なぜ？」**1700倍になるのですか、と、質問が湧いてきます。そしてそれは、**水は分子でできていて、温度が上がるとともに・・・**　と、どうなっているか答えることができます。今でははっきりそれは分かっています。

思考錯誤の結果、長い時間かかって、着々と積み上げられてきました。事実に基づいた考察が絶えず行われました。不確かなことは実験によって確かめられました。

「どのようになっているか」を知るのが物理学の目的です。

その答が文学的であったり情緒的であったりしてはいけません。例外も許されません。矛盾のない論理に導かれる必要があります。その結果、**「このようになっています」**と、数式で表すことができれば最高です。こんな数式で表すことが出きるように自然はなっているのです、と答えれば満点なのです。

日常あたりまえと思っていることを、**「なぜ？」**ときかれると戸惑うことがあります。例えば、空中で手を離すと、物は下に落ちます。**「なぜ？」**この質問に、それは　**地球が引張っているからです**　と答えたのはニュートンです。しかもその力の大きさを式で示しました。見事にどうなっているかを答えたのです。

現在このことに対して、**「なぜ？」**の質問をしません。そのかわり実際そうなっていることをきちっと確かめて実証しています。物理学は自然を対象とするのです。

「なぜ？」を突き詰めると、自然科学から逸脱してしまうことがあります。これは恐ろしいことになります。

歴史的にも、そういうことがありました。現在でも、ともすれば、逸脱する危険はあります。実証することが最も重要なことであることを忘れてはいけません。

周りの現象に対して、自問して自答してみてください。それぞれの段階で、それがどうなっているかを答えることは可能なことです。

実験２．水圧を目で見る
ー水の深さと水圧の関係ー

装置　深い目のメスシリンダー
底までとどくガラス管　ゴム栓
（内径10 mm程度）
または、透明なビニールチューブ
ピンチコック

目的　水圧を目で見る
水深と水圧の関係を知る

方法　水の入ったメスシリンダーに、ガラス管を差し込んで、ガラス管内部の水面を調べる。次のようにガラス管の条件を変えて観察する

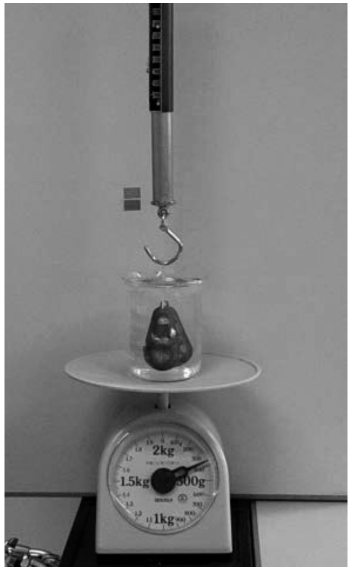
①ガラス管の両端解放
②ガラス管下端部閉鎖、上端部開放
③ガラス管上端部閉鎖、下端部開放

関連して話すこと

③の状態で、ガラス管をメスシリンダーに徐々に差し込みながら、ガラス管の最下端に注目する。水深が変わると、水の侵入量が変化する。下端の深さと下端での水面の侵入量の関係を詳しく観察する

実験３．水の中で体が軽い
ー浮力とアルキメデス原理ー
（第Ｉ章２から４を参照）

装置　上皿秤　ばね秤　ビーカ
錘(おもり)



目的　浮力とは何か、水の重さ(重力)が浮力の原因であることを知る

方法　ビーカに水を入れて上皿秤に乗せ、その重さを量り、目盛を A とする。
次に、バネ秤に錘をつるし、その重さの目盛を B とする

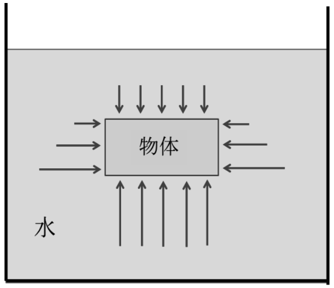
上皿秤の上のビーカの水の中に、バネ秤の錘を入れ、吊るしたままにする。その時の両方の秤の目盛をそれぞれ C、D とする。これらの値の関係を調べる

関連して話すこと

水の入ったビニール袋を、錘のかわりに使うとどうなるか。実験する前に考えてみよう

アルキメデスの浮力の原理
水中の物体は、物体が押しのけた**水の重さ**だけ軽くなる

アルキメデスと黄金の王冠の逸話



水中の物体に働く
水圧の大きさ

実験４．空気に重さがある
ートリチェリーの真空ー
（第Ｉ章２から５、７から１１
および第 IV 章Ａ１など参照）

装置　トリチェリー真空装置

目的　次のことを知ること
- 魚が水中に住むように、我々人間は大気の中で生活している
- 空気に重さ(重力)がある
- 重さとは何か、力である
- 単位について理解する
- 水銀柱を使って空気の重さを量る
- 圧力の定義
- 圧力の単位について
- 物質の密度とは何か

方法　トリチェリーの真空装置で、空気の重さと釣り合う水銀柱の高さを測定する

測定結果：
１気圧の下で水銀柱の高さは 760 mm

関連して話すこと

単位の話　長さ 時間 質量
質量と重さ(重力)について
重力の原因
万有引力の法則
二つの物体はお互いに引き合う
それぞれ物体１、物体２　と呼ぼう

地球上で、地球が物体を引く下向きの力は**万有引力**が原因で、**重さ(重力)**と呼ぶ、
質量 m [kg] の物体に働く**重力**の大きさを F [N] とすると、

$$F = 9.8\,m \qquad (\mathrm{V}-1)$$ である

ここで、**力の単位**は N（**ニュートン**）
係数 9.8 は**重力加速度**と呼ばれます。簡単にするため、文字 g で表されることが多い。単位は[ms^{-2}]である。

これは、物体の**重力を決める**ための、地球上での**比例定数**である。月へ行くと同じ質量の物体でも重力が違う。比例定数が違うからである

ニュートンの万有引力の法則を使って、式（V – 1）の比例定数 9.8 を求めよう

ニュートンの万有引力の式に従い、その引力の大きさを F とすると、

$$F = G\frac{\text{物体１の質量・物体２の質量}}{\text{物体間の距離}^2} \qquad (\mathrm{V}-2)$$

ここで計算に必要な定数 G は、

万有引力定数 G：6.673×10^{-11}

物体１を**地球**とし
地球の質量 $= 5.974 \times 10^{24}$ kg

物体間の距離を**地球の半径**とし
地球の大きさ：
１周4 万 km $= 4 \times 10^7$ m
半径 $= 6.367 \times 10^6$ m

物体２の質量を m とすると式(V − 2) は

$$F = \frac{6.673 \times 10^{-11} \cdot 5.974 \times 10^{24}}{(6.367 \times 10^6)^2} m$$

数値を計算すると、式(V − 1)が求まる。

$$F = \frac{6.673 \cdot 5.974 \cdot 10^{13}}{6.367 \cdot 6.367 \cdot 10^{12}} \cdot m = 9.8m \qquad (V-1)$$

ここで、m は長さの単位メートルで、
m は物体２の質量です
小文字のｍを、全く違った意味に使いました。まぎらわしいのですが、混乱しないようにしてください。

圧力の定義と単位
圧力[Pa]＝**力**[N]／**面積**[m²]　　(V − 3)
単位は [Pa **パスカル**]＝$\left[\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m}^2}\right]$　　(V − 4)

具体的な数値計算
水銀の密度：13.6×10^3 kgm^{-3} = 13.6 gcm^{-3}
水銀柱の高さ　760 mm
水銀柱の断面積　A [m²]

断面積 A の上に乗る水銀の質量
水銀の**質量**=水銀の**体積**×水銀の**密度**
$= 0.76[\mathrm{m}] \cdot A[\mathrm{m}^2] \cdot 13.6 \cdot 10^3$ [kgm^{-3}]
$= 0.76 \cdot 13.6 \cdot 10^3 \cdot A$ [kg]

断面積 A [m²]の上に乗る**水銀の重力**
＝ **水銀の質量** $\times g$
$= 0.76 \cdot 13.6 \cdot 10^3 \cdot 9.8 \cdot A$[kgms^{-2}]
$= 101300 \cdot A$ [kgms^{-2} = N]

この値を、**圧力の定義**　式(V − 3)の分子に使って圧力を求めると、

圧力＝面積 A に加わる力[N]／**面積** A[m²]
$= 101300A[\mathrm{N}]/A[\mathrm{m}^2] = 101300$ [N/m²]
＝101300 [Pa]＝1013 [hPa]

圧力の単位のいろいろ
① [**気圧**]：我々の生活している地球表面の大気の圧力を１とした圧力の単位
[気圧, atom]

② [**mmHg** (**Torr トル**)]：大気の重さに釣り合う水銀柱の高さで測る圧力
イタリアの物理学者トリチェリー
(Torricelli,1608-1647)の名前に由来
１気圧 ＝ 760mmHg（Torr）

③ [Pa]は **SI 国際単位系**における圧力の単位、フランスの物理学者パスカル
(Pascal,1623-1662)の名前に由来
面積当たりの力で表す、ただし
力の単位[N]、面積の単位 [m²]

圧力の単位の間の換算
①気圧　②mmHg(Torr)　③Pa
1 atom = 760 Torr = 1013 hPa
= 101.3 kPa　　(V − 5)

第 IV 章 A の**大気の垂直構造**を参考にしてください。

実験５．血圧測定
ー圧力の測定ー
（第Ｉ章５、９など参照）

装置　水銀血圧計 **注意：水銀は猛毒である**
自動血圧測定器

目的　自分の血圧を測定する
測る位置で血圧の測定値が異なることを知る

注意　血圧の測定値は、大気の圧力 760 Torr を基準にして、その値よりどれだけ高いかを示している

方法　上腕部に測定帯を巻きつける
上腕の高さを変えて血圧を測る
高さと血圧値の関係を知る

①上腕を心臓の高さにして測定する
②上腕を頭の位置まで上げて測定する
③上腕を腰まで下げて測定する

関連して話すこと

実験４の、**水銀**の代わりに、**水**にした時の**柱**の高さ H_W [m] の計算
ここで、水の密度は $1 \cdot 10^3$ kgm^{-3} である

水柱の場合の計算　1 気圧が 101300 Pa であることから、式 (V − 3) を使って

$101300 = H_\mathrm{W} \cdot A \cdot 1 \cdot 10^3 \cdot 9.8/A$　となる

H_W について解くと
$$H_\mathrm{W}[\mathrm{m}] = \frac{101300}{10^3 \cdot 9.8} = 10.33 \text{ m}$$
1 気圧は水柱 10.33 m である

深海 100 m では（海水の密度は真水より大きいがこれを無視すると）
(100 / 10.33) = 9.7 気圧　である。

水銀柱の代わりに、**血液柱**にした時の柱の高さ H_B [m] を計算する、ここで
血液の比重を 1.04　　とする

比重とは水と比較した重さの比である
最近はこの言葉を使わない、理由は、基準とする水の密度が、温度とともに変化し、一定でないからである

比重ではなくて**密度**を使うのが正しい

血液の密度＝1.04・10³ [kgm^{-3}] とする
血液柱の場合、式 (V − 3) を使って、

$101300 = H_\mathrm{B} \cdot A \cdot 1.04 \cdot 10^3 \cdot 9.8/A$

H_B について解くと
$$H_B[\mathrm{m}] = \frac{10.33}{1.04} = 10 \text{ m}$$

１気圧に対応する**血液柱**の高さは 10m である。ここで、普通の大人の最高血圧を、

120 Torr とすると、この値は血液柱の高さで言うと、

10 m×120 / 760＝1.58 m　であり

大人の背丈程度であることは興味深い

以上、まとめると

1 気圧 ＝760 Torr（水銀柱 760 mmHg）
＝ 水柱 10.33m ＝ 血液柱 10 m

点滴では、血液面(針の位置)と薬の液面の差を利用して薬を流し込む。薬の液面が 1 m 高い時、血液の粘性抵抗を無視すると 76 Torr の差である
高さが逆になると大変である

密閉された液体に関する
パスカルの圧力伝達法則
連通管　サイフォン

自動血圧測定器について
最近では水銀血圧計を使わない
水銀由来の圧力の単位 Torr は
歴史的遺物となりつつある
自動血圧測定器の原理を知ること

実験６　てこの原理
ー便利な道具の物理学ー
（第Ⅰ章６、第Ⅱ章１、２など参照）

装置　天秤　竿秤　はさみ　金槌　くぎ抜　包丁　ナイフ　くさび　滑車　斜面　輪軸　コロ　ジャッキ　きり　各種レンチ　＋ードライバー　ニッパー　各種ペンチ

目的　物理学における**仕事**と言う言葉の意味を知る
仕事の定義：力と**移動距離**の**積**
エネルギーと**仕事**は同等である

仮想仕事の原理を使う練習をしよう

力と移動距離の積を一定にして、小さい力で移動距離を長くして大きな仕事をすることができる。これらのことを理解して道具を使うことを学ぶ

方法　道具を使って遊ぶこと

関連して話すこと

仮想仕事の原理
エネルギー保存則

実験７　おもちゃの物理学
ー伝統的な子供の遊びー
（第Ⅰ章１、第Ⅱ章１８など参照）

装置　だるま落とし、剣玉、ヨーヨー、コマ　地球ゴマ　逆さゴマ

目的　遊びを通して**自然の法則**を知る

方法　自分の手に取って遊ぶこと

話したいこと

ガリレオの慣性の法則

静止している物体の**慣性の法則**
だるま落とし

動いている物体の**慣性の法則**
等速直線運動
回転する物体の**慣性の法則**
コマ回し

回転するコマの歳差運動
コマを回して**歳差運動**をみせる
床の上で回るコマには２つの力が作用する
コマの重心に働く下向きの重力　と
床がコマ軸の下端を持ち上げる力

コマには、この２つの力による**力のモーメント（トルク）**が加わる
トルクによってコマの回転運動が変化
その変化とは、回転軸の方向の移動である
この回転軸移動を**歳差運動**と呼ぶ

コマを空中でまわせばどうなるか
中空にいる間だけ歳差運動はしない
掌（てのひら）の上で回転するコマを
中空に放り上げる、中空にいる間だけ、
歳差運動をしない、
回転軸の方向は変化しない

これは回転運動の**慣性の法則**である

回転するコマが空中にいる間は、
重力だけが加わる
コマは放物線を描くだけである
回転モーメント(トルク)は加わらない

回転体は、外部からトルクが働かない限り、これまでの回転をそのままつづける
回転速度不変、回転軸の方向不変である。

いわゆる、**ガリレオの慣性の法則**を回転体に当てはまる法則である

実験８　車いすの押し方
―交通安全を目指して―
（第Ⅱ章３から７、１０，１１など参照）

装置　押し手と乗り手２人一組
　　　車いす各組一台

目的　**押し手**
　車椅子を押す力の大きさ・方向と
　車椅子の動き方の関係を知る
　　　乗り手
　速さの変化と動く方向の変化に応じて
　受ける慣性力の大きさ・方向を体感する

方法　**押し手**
　出す力の大きさ・方向を体得する
　直線上を進む場合
　　緩やかな出発と急発進
　　緩やかな停車と急停車
　　右曲がりに押す　左曲がりに押す
　　　曲率半径３ｍの円周に沿う場合
　　　　大きい速度で回る
　　　　小さい速度で回る
　　　曲率半径７ｍの円周に沿う場合
　　　　大きい速度で回る
　　　　小さい速度で回る

　　乗り手
　どんな時に慣性力を受けるか
　慣性力の大きさ・方向を体感する
　　直線上を進む場合
　　　緩やかな出発と急発進
　　　緩やかな停車と急停車
　　右まがりの場合　左まがりの場合
　　　曲率半径３ｍの円周に沿う場合
　　　　大きい速度で回る
　　　　小さい速度で回る
　　　曲率半径７ｍの円周に沿う場合
　　　　大きい速度で回る
　　　　小さい速度で回る

役割を交代して体験すること

関連して話すこと

　速度の定義　加速度の定義
　曲がる時の加速度
　　＝速さ[$\mathrm{ms^{-1}}$]の二乗／曲率半径[m]
　加速度と力の関係

　力の大きさ較べ
　加速度運動する乗り物の中で受ける
　　慣性力の大きさ　と
　　重力の大きさ　を
　　　比較して乗り心地を考えよう

実験９　雲を作る
―断熱膨張―
（第Ⅳ章Ａ１、Ａ３、Ａ５からＡ９
Ｂ６など参照）

装置　透明なガラス容器　減圧装置
　　　線香

目的　断熱膨張による雲の発生を見る

方法　ガラス容器内を減圧　断熱膨張
　　　温度を下げて雲をつくる
　　　湿気の多い日が良い。

関連して話すこと

　気体の一般的な性質
　気象現象
　水の熱的な性質
　断熱圧縮
　大気中の蒸気圧
　飽和水蒸気圧

実験１０　湿度の測り方
―毎日定時測定―
（第Ⅳ章Ａ１、Ａ３、Ａ８
Ａ９など参照）

装置　乾湿温度計

設置場所　室外ベランダ　目の高さ
　　　　　風通しの良い日陰

目的　気温と湿度を知る

方法　乾球と湿球の温度をそれぞれ測定
　　　その差を計算し
　　　表を使って
　　　湿度を読み取る
　　　気温と湿度を毎日定刻に測定
　　　記録し、
　　　測定した人の署名

関連して話すこと

　乾燥している、湿度が高い　とはなにか
　飽和水蒸気圧
　乾燥空気の密度
　水蒸気を含む空気の密度
　上昇気流　気象現象　フェーン現象
　台風
　**（第Ⅱ章１７、第Ⅳ章Ａ１０、Ａ１１
　Ａ１２など参照）**

実験１１　おんさ　共鳴箱
－うなり－
（第 IV 章Ｄ１、Ｄ２、Ｄ５など参照）

装置　おんさ、ラの音　振動数 440Hz
　共鳴箱　うなり治具

目的　音とは何かを学ぶ

関連して話すこと

音とは、空気の振動　粗密波、縦波
振動数×波長＝音速
音速 340 ms^{-1} として波長を計算
共鳴箱の大きさの検討
音色について
音の調和　平均律音階と自然律音階
うなり
ドプラー効果　発音体が移動する時
　聴き手が移動する時
超音波診断

実験１２　物質の物理学入門
－新素材実験セット－

装置　発光ダイオード
形状記憶合金
光ファイバー
カーボンファイバー
強力ニオジム磁石
弾まないゴムまり

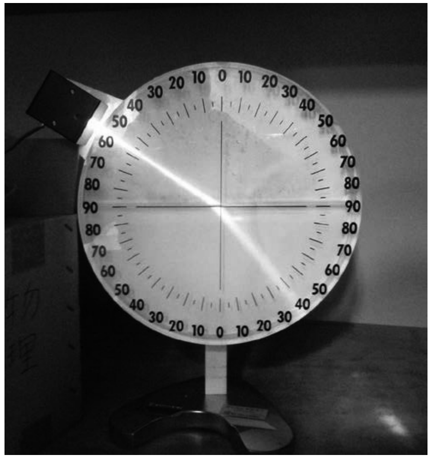
関連して話しておきたいこと

最近の物質物理学の研究の成果
新しい機能を持つ物質の開発
便利で機能を持つ物質の創造
薄膜製造技術の発達
エネルギーの節約
　現在も絶え間なく発達している

あらゆる色の光源の開発
元の形に戻る金属材料の利用
光を自由に曲げて伝えるガラス繊維
軽くて強いしかもしなやかな繊維
鉄より何倍も強い磁石
音を全部吸収してしまう物質

実験１３　水による光の屈折
－水中の光速は遅くなる－
（第 IV 章Ｄ１、Ｄ６、Ｄ７など参照）

装置　光の屈折を目で見る装置
垂直に立てた薄い円筒の容器に水を半分まで満たす
円筒の周囲に角度を刻む
円筒の円周に沿って動く光源
レーザー光源　赤色　緑色



目的　光が空気中から水中に進む時
　どのような光路を取るか
入射角と**屈折角**の定義と関係
スネルの法則
光路の**逆行**
全反射と**反射の法則**
入射角と**反射角**の定義と関係

方法　光源から出る光は常に筒の中心へ向かうようにする
入射角を変えてと屈折角の変化を見る
入射角、屈折角を測定する
水中からの光の通る道筋(光路)を観察
水中から光が出ない場合を観察
全反射を観察する
反射の法則を知る

関連して話すこと

屈折率

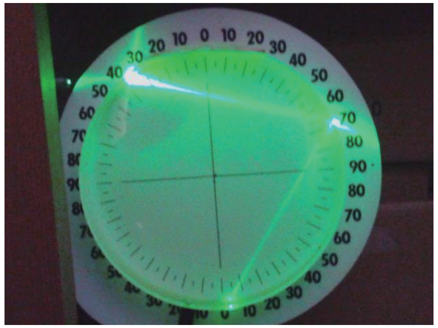
水	約 4/3
ガラス	約 3/2
ダイヤモンド	約 2.4

ダイヤモンドが美しいのはなぜ？

実験１４　虹の見え方
ー虹は七色ー
（第 IV 章 D８参照）

装置　レーザー光源　赤色　緑色
光屈折装置の改造

改造点：
鉛直に立てた薄い円筒内を水で満たす
この円筒は虹をつくる空中の水滴とする
光源からの光を水平方向に固定する
方向を固定した光源を鉛直方向に移動
この時、光は水平方向を保つこと
水滴への入射光の**入射位置**を可変にする



目的　水滴中の光路を目で確認する
水滴への**入射位置**を変えて光路を観察
同時に光の**出射方向**を観察
入射方向と**出射方向**の差 **視角半径**
水滴への**入射位置**と**視角半径**の関係
視角半径に**極値**があることを観察する
極値は色によってが異なる

方法　緑色光源を使い水滴への入射位置を変えて、光路・視角半径の変化を調べる
視角半径に極値があることを確認する
赤色光源を使い光路の違いを調べる
緑色光源の場合と同様なことを調べる

関連して話すこと

虹は、太陽と自分を結ぶ線上に虹円の中心がある
虹の色は虹円の外側から

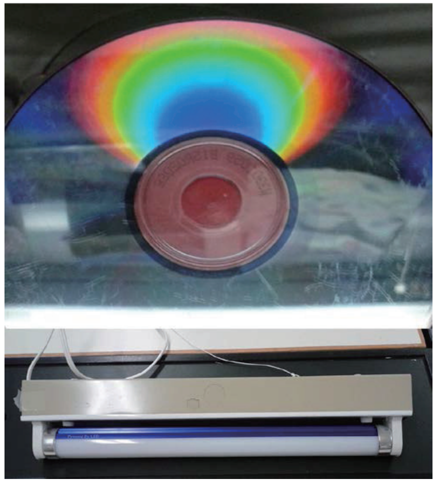
赤橙黄緑青藍紫　の順である

視角半径はどの色も約 42 度である
しかし色によって少しずつ異なる

七色の光が混ざると無色透明になる
色が見える時はその色の光だけがあり
他の色がない場合に限る
従って極値であることが重要である

実験１５　CD 分光器
ー色がキラキラー
（第 IV 章 D９を参照）

装置　CD ディスク（図上）一人一枚
光源　蛍光灯
白熱電球
太陽光
LED 電灯（図下）



目的　目に見える光には色がある
目に見える範囲の光のスペクトルを観察
スペクトルとは何かを知る

方法　CD のきらきら輝く面を用いる、
片目で観察する

棒状の蛍光灯を CD の中央に映るように CD の方角を選ぶ、CD の面を傾けて、蛍光灯の鏡像を真横に移動させる、鏡像が視野から外れて見えなくなるが、そのまま傾け続ける、しばらくすると逆の方から、色のついた棒状の像が何本か見え始める

その他の光源のスペクトルを得るには、光源を黒い紙や黒い布で覆い、スリット状の細長い光源を作る。蛍光灯の場合と同じように、CD を傾けると色がついた模様が見える　色の順番は、波長の短い方、**紫藍青緑黄橙赤、**の順になる

関連して話すこと

蛍光灯は離散型スペクトルを持つ光源である
白熱電球、太陽光、LED 電灯は連続スペクトルを持つ光源である
目に見える光の中では、紫色が最も波長が短い

実験１６　電気の素
－箔検電器－
（第Ⅳ章Ｅ１参照）

装置　箔検電器（写真　図）
ガラス棒　絹布、
エボナイト棒　毛皮

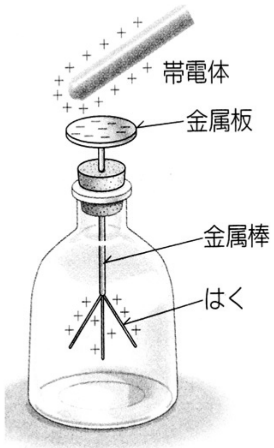
目的　電気の源を知ること
電気の持つ性質を学ぶこと

方法　箔検電器を**図**に示した。
初めに上部の金属板を手で触り
（＋）や（－）に帯電したイオンを除去する
人体は電気を通す

ガラス棒を絹布で擦り（＋）に帯電させる
そのガラス棒を金属板に近づける
金属板に触れないように注意する

ガラス棒の（＋）電気によって、上部の金属板に（－）電気が引きつけられる
逆に（＋）電気は、下部の箔の方に追われる
箔内の（＋）電気は反発し合う
２（３）枚の箔が開く、**図**はその状態を示す

ガラス棒を近づけたまま、手で金属板に触れて、下部の箔に集まっていた（＋）電荷を、追い出す、手から体を伝って出て行く



開いていた箔は閉じてしまう
下部の箔内に電荷がなくなるからである

金属板から手を放すとともに
ガラス棒を遠おざける
下部の箔が少し広がる
これは金属板に集まっていた（－）電荷が
金属板、棒、箔の全体に広がり
箔内の（－）電荷同士が反発して
２（３）枚の箔が広がる
広がり方は先ほどより小さくなる

毛皮で摩擦したエボナイト棒で
同じ実験を繰り返す

実験１７　磁石と磁場
ー方位磁石による磁場分布測定ー

装置　方位磁石　棒磁石

目的　方位磁石を使って棒磁石の周りの磁場を測定し、磁場の分布を図に描く

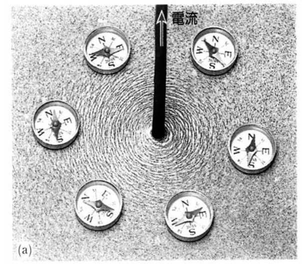
方法　大きな白紙の上に棒磁石を固定
方位磁石の位置を移動させて磁場の方向を調べる
棒磁石の周りの磁場分布を図に描く

話しておきたいこと

磁場は、棒磁石のＮ極から出て
棒磁石のＳ極に戻るように
分布する
その磁場を一本の線で繋ぐ
この線を磁力線と呼ぶ
砂鉄をばらまくと磁力線がよく分かる
磁力線の密度は、磁場の強さとしてよい

実験１８　電流の周りの磁場
ー電流は磁場を作るー
（第Ⅳ章Ｅ４、Ｅ５など参照）

装置　電線　電池　方位磁石



目的　電流の周りに磁場ができること
およびその分布を知る

方法　厚紙を垂直に貫く電線を一本立てる
電線に乾電池で直流電流を流す
方位磁石を使って周囲の磁場を調べる
電線の周りで方位磁石の位置を移動
磁場の方向を厚紙上に磁力線を描く

電線に流れる電流の方向を逆にする

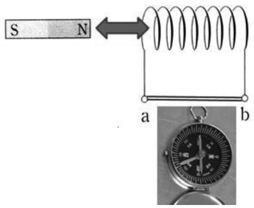
話しておきたいこと

この結果から円電流の周りの磁場
円電流の周りの磁場の分布は
ボタン状の磁石の周りの磁場の分布
と同じであり、区別することはできない
磁石の素は円電流であるとする
（図Ｅ５を参照）

コイルに直流電流が流れた場合、
その周りにできる磁場は
棒磁石の作る磁場と同じである

実験１９　発電
ー現代文明の根幹ー
（第 IV 章 E７参照）

装置　コイル　電線　豆電球
棒磁石　方位磁石



目的　コイルの周りの磁場の変化が
コイルに電流を誘起する

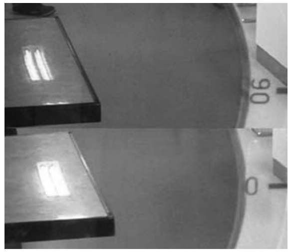
方法　コイルに棒磁石を出し入れすると、
コイルの両端に繋いだ豆電球が点灯
コイルの両端を繋いだ電線に電流が
流れる、このことを確認するためには、
方位磁石を電線の周りに配置する

関連して話すことこと

発電量を多くするには、電線位置での
磁場変化を大きくとよい
１．強い磁石を使う
２．磁石の移動速度を早くする
３．コイルの巻数を増やす

実験２０　光の偏光
ー立体メガネー
（第 IV 章 E６、E７など参照）

装置　偏光盤　２枚



目的　光の持つ**偏光**という性質を知る
光は反射すると偏光することを
確かめる

方法　第１の偏光盤を通過した光を
第２の偏光盤で観察する
第２の偏光盤を盤面内で回転させる
回転位置によって明暗が生じる

偏光盤による反射光の観察、窓から差し込む光が、机の面上で反射すると、その反射光は偏光している、このことを偏光盤を使って観察する、反射の角度に依って偏光の量が変わる

関連して話すことこと

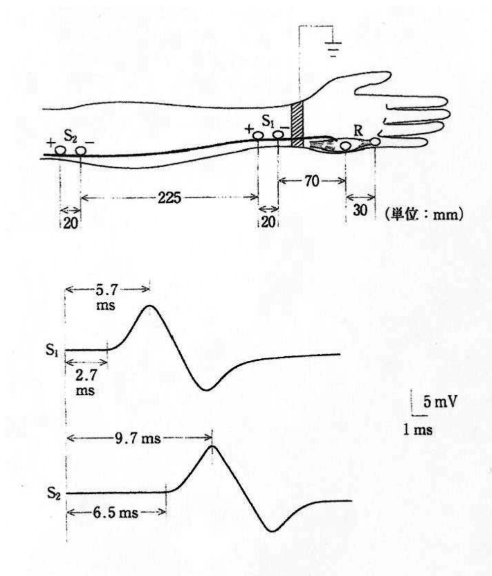
光の本質と電磁波
電磁波の成り立ち
電磁波の種類

第 VI 章　理学療法士・作業療法士 国家試験
物理学関連問題の解説とコメント

１．2012ＰＴ午後４

問題　図のように測定した尺骨神経の運動神経伝導速度で正しいのはどれか。

ただし、図中の S1 と S2 は電気刺激電極を、R は記録電極を示すものとし、伝導速度は少数以下第 2 位を四捨五入するものとする。



1. 59.2 m/s
2. 64.5 m/s
3. 69.7 m/s
4. 88.2 m/s
5. 98.1 m/s

解説とコメント

１．運動神経伝導速度は、伝導距離の差を伝導時間の差で割り算すればよい

２．答は小数第 2 位で四捨五入することが求められているが、単位が異なると数値が異なるので注意すること

３．この問題では解答欄から推察して、単位は、距離メートル m、時間秒 s　で計算するのがよい

４．伝導距離の差 $= S_2R - S_1R = S_2S_1$
$= 225 + 20 = 245$ mm(ミリメートル)
$= 0.245$ m

５．伝導時間の差は、信号の立ち上がりの時刻の差をとることとする

６．伝導時間の差 $= 6.5 - 2.7$
$= 3.8$ ms(ミリ秒) $= 3.8 \times 10^{-3}$ s

７．運動神経伝導速度 $= 0.245/(3.8 \times 10^{-3})$
$= 245/3.8 = 64.47 = 64.5$ m/s　（答）

８．問題文中「少数」は、「小数」の誤りである

２．2012 専基午前６９

問題

力学について正しいのはどれか。２つ選べ

１．力は加速度に反比例する
２．運動量は速度に比例する
３．トルクは力の２乗に比例する
４．運動エネルギーは速度の２乗に比例する
５．摩擦力は接触面に作用する力の水平分力に比例する

解説とコメント

１．**誤**：力は質量と加速度の積である
これはニュートンの運動の法則である

２．**正**：運動量は、質量と速度の積である

３．**誤**：トルクは力のモーメントのこと
力のモーメントは、回転中心から力の作用線に下した垂線の長さと、力との積である

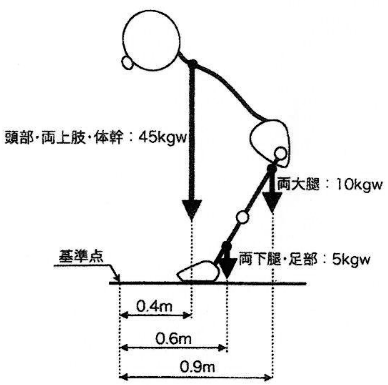
４．**正**：運動のエネルギーは、質量と速度の自乗の積の２分の１である

５．**誤**：水平面上にある物体の水平面との摩擦力は、物体がその面に加える力の鉛直分力に比例する

６．ただし、摩擦力は、接触面に平行分力と垂直分力に分けて考えるのが正しい。
水平分力と鉛直分力に分けて考えるのでない
７．例えば、垂直な粗面に斜めに立てかけられた梯子の場合、梯子上部の摩擦力は、その粗面に加わる力の水平分力に比例します。このように５．の記述が正しい場合もあります。
斜めの面ではどうなるでしょう

３．2012 専基午後７３

問題　体幹を前傾して静止した人体の模式図を示す。図中の数値は、人体の各部位の重量と各部位の重心を鉛直に投影した点と基準点との距離である。



人体全体の重心を投影した点と基準点との距離はどれだけか。

1.　0.4 m
2.　0.5 m
3.　0.6 m
4.　0.7 m
5.　0.8 m

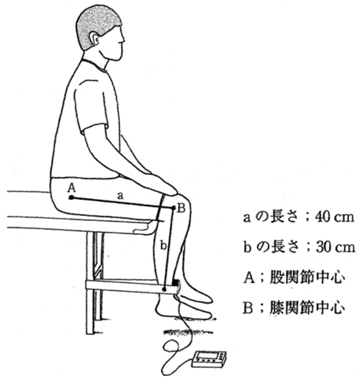
解説とコメント

１．基準点の周りの力のモーメントを考えるとよい。
２．重心が基準点の周りに持つ力のモーメントは、各部位の重心の、基準点の周りの力のモーメントの総和にひとしい
３．重心を投影した点と基準点との距離を x [m] とする
４．重心に加わる重量は、各部位の重量の総和であるので、
重心に加わる重量 = 45 + 10 + 5 = 60 kgw
５．重心が基準点の周りに持つ
力のモーメント= $60x$ [kgwm]
６．頭部・両上肢・体幹の重心が、基準点周りに持つ力のモーメント
$= 45 \times 0.4 = 18$ kgwm
７．両大腿の重心が、基準点周りに持つ力のモーメント
$= 10 \times 0.9 = 9$ kgwm
８．両下腿・足部の重心が、基準点周りに持つ力のモーメント
$= 5 \times 0.6 = 3$ kgwm
９．上式、５．が　６．７．８．の和に等しいと置くと、　$60x = 18 + 9 + 3$
１０．xについて解くと、$x = 0.5$ m　答
１１．重量の単位 kgw を最近は使用しない高等学校でも教えない。
力の単位Ｎ（ニュートン）を使うと次のようになるが、記述９．と同じ式になる
１２．重量 1 kgw = $1 \times g$[N] = 9.8[N]
ただし、$g = 9.8$ である
１３．重量 60 kgw = $60g$ = 588[N]
１４．重量 45 kgw = $45g$ = 441[N]
１５．重量 10 kgw = $10g$ = 98[N]
１６．重量 5 kgw = $5g$ = 49[N]
１７．すべてに、$g = 9.8$ を掛け算するだけであるから計算しなくても、g と書いておくだけでよい。すべての項にかかるg で割ると、９．と同じ式になる

第４８回 2013 年度

１．2013ＰＴ午前４

問題　筋力測定器で、膝伸展等尺性筋力を測定しているところを図に示す。測定値は 150 N であった。対象者の体重は 60 kg である。



体重比モーメントで正しいものはどれか。

１．0.50 Nm/kg
２．0.75 Nm/kg
３．1.00 Nm/kg
４．1.25 Nm/kg
５．1.50 Nm/kg

解説とコメント

１．**体重比モーメント**[Nm/kg=J/kg]**の定義**
自分が出した**力のモーメント**を自分の**質量**で割った値、これは、質量 1 kg当たりの自分の使ったエネルギーと同じ
２．**体重比モーメント**の定義を覚えること
３．覚えていない場合は、解答欄にある単位から予想してみよう
４．図を見て、定義通り計算すると
体重比モーメント
$$= b \times \frac{150}{60} = 0.3\ \mathrm{m} \times \frac{150\ \mathrm{N}}{60\ \mathrm{kg}} = 0.75\ \frac{\mathrm{Nm}}{\mathrm{kg}}$$
５．計算に使う数値の単位は、質量 kg・長さ m・時間 s でなければならない
６．理由は、力の単位 N の組み立て単位が $\mathrm{kg \cdot m \cdot s^{-2}}$ であるからである
７．この問題中に与えられた長さは、数値が cm であり、m に換算すること
８．cm から m の換算を受験生に要求するのは物理学の本質ではない
９．一つの問題の中で、単位が統一されていることが望ましい

２．2013ＰＴ午前２０

問題　20 歳の男性。膝関節伸展運動を等速性に行った。角速度 30 度／s で設定したとき、最大トルク値は 150 Nm を示した。この時の最大パワー（W）はどれか。ただし、π は 180 度とする。

１．5π
２．20π
３．25π
４．30π
５．35π

解説およびコメント

１．**トルク**：**力のモーメント**のこと
単位は Nm
２．**角速度**：1 秒間の回転角のこと、ただし
回転角の単位を rad とすること
角速度の単位は、$\mathrm{rad \cdot s^{-1}}$ であり
$度 \cdot \mathrm{s^{-1}}$ は使わない
３．一般に平面角は、以下の式で定義される

$$平面角 = \frac{平面角に対応する円周の長さ}{半径の長さ}$$

この単位がラジアン radian であり
記号で[rad]と記述する
この定義から、平面角は、長さを長さで割ったものである
４．したがって、**単位[rad]は無名数**である
５．平面角の単位[rad]と[度]の間の換算は

π rad = 180 度

ここで、π = 3.14159‥ 円周率である

設問の記述「ただし、πは 180 度とする」は誤りである

６．**パワー**：物理学用語ではない

７．指定の単位が W だから**仕事率**を意味するとしてよい

８．**仕事率**は１秒間にする仕事のこと

１秒間に出すエネルギーである

単位は $J \cdot s^{-1}=W$

９．以上を考慮すると、問題の意図は以下の通りである

10. 「１秒間に 30 度の一定回転速度で、膝関節伸展運動を行った。その運動の間に、加え続けているトルク T の最大値が 150 Nm であった。この時の仕事率 P[W]を求めよ」

11. １秒当たりの回転角（角速度）を $\omega[rad \cdot s^{-1}]$とおくと、この問題でその値は

$$\omega = 30\pi/180\ rad \cdot s^{-1} = \pi/6\ rad \cdot s^{-1} \quad (1)$$

12. トルク T[Nm] について

$$T = \text{回転半径 } R[m] \times \text{ 力 } F[N] = R[m] \times F[N] \quad (2)$$

13. 足の移動速度 $v[m \cdot s^{-1}]$について

$$v = \text{回転半径 } R[m] \times \text{ 角速度 } \omega[rad \cdot s^{-1}] = R[m] \times \omega[rad \cdot s^{-1}] \quad (3)$$

14. 仕事率 P[W]について

$$P = \text{足の移動速度 } v[m \cdot s^{-1}] \times \text{ 力 } F[N] = v[m \cdot s^{-1}] \times F[N] \quad (4)$$

15. この問題では、式(4)の仕事率 P[W]を求めることである。式(4)の右辺の $v[m \cdot s^{-1}]$に式(3) を代入すると

$$P = R[m] \times \omega[rad \cdot s^{-1}] \times F[N] \quad (5)$$

16. 式(5)の右辺のかけ算の順序を変えて式(2)のトルク T[Nm]の式を使うと

$$P = \text{トルク } T[Nm] \times \text{ 角速度 } \omega[rad \cdot s^{-1}] = T[Nm] \times \omega[rad \cdot s^{-1}] \quad (6)$$

ここで得られた結論を覚えておこう

「トルクと角速度の積が仕事率である」

ただし、トルクは力のモーメントのこと

角速度の単位は、$rad \cdot s^{-1}$ であること

17. 問題文より、式(6)の Tに 150 Nm を ω に式(1)の数値 $\pi/6\ rad \cdot s^{-1}$ を代入して

$$P[W] = 150\ Nm \times \pi/6\ rad \cdot s^{-1} = 25\pi\ J \cdot s^{-1} = 25\pi\ W \quad (7)$$

18. 選択肢として提示された解答に、単位 W がありません。数値には単位を付けるべきです。単位が異なると数値が違ってきます

３．2013ＰＴ午前４３

問題　物理療法で、4000～5000 Hz の周波数帯の波形を使用するのはどれか。

コメント

１．物理学関連用語　**極超短波療法、超短波療法、超音波療法、干渉波療法、低周波療法**　などがあるので特徴を調べよ

２．周波数を指定するだけで、波の種類、例えば光とか電磁波とか音とかを指定しなくてよいのでしょうか

４．2013ＰＴ午前４６および４７

問題文中に、**圧力の単位**として、トル Torr とパスカル Pa が使用されました

解説とコメント

１．**圧力の単位とその間の換算**：

１気圧 atom = 760 トル Torr or mmHg

= 101300 パスカル Pa

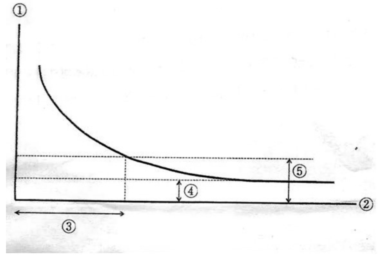
= 1013 ヘクトパスカル hPa

= 101.3 キロパスカル kPa

２．問題文中に、単位間の換算は 20 kPa = 150 mmHg と指示されています。将来を見据えた良い判断です。

５．2013ＰＴ午後７

問題　測定筋の電気刺激特性を図に示す。図中の番号の説明で、正しいものはどれか



１．①刺激の頻度

２．②刺激の持続時間

３．③基電流

４．④時値

５．⑤時定数

解説とコメント

１．筋の電気刺激特性の横軸は時間であることを覚えておくこと

２．.**基電流　時値**　は物理学の用語にはないが、専門分野では使用されているのであろう、覚えるしかない

６．2013ＰＴ午後２０

問題　患者が床面から 20 cm 鉛直挙上した位置で下肢を保持している状態を図に示す。A の滑車は上下に移動するが、B の滑車はフレームに固定され、滑車の位置は動かない。なお、保持する下肢の質量は８kg で、滑車と紐の重量および摩擦力は考えなくてよい。

床面から下肢を挙上するために、上肢で引き下げた紐の長さと保持に必要な力の組み合わせで正しいのはどれか。

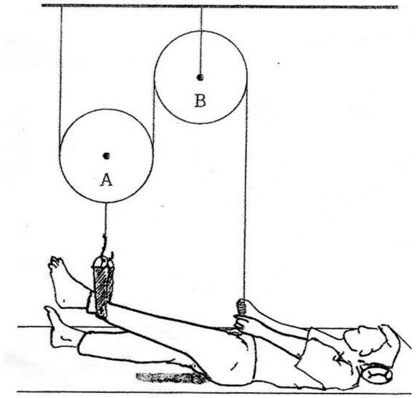
１．10 cm－8 kg 重

２．20 cm－4 kg 重

３．20 cm－8 kg 重

４．40 cm－4 kg 重

５．40 cm－8 kg 重



解説とコメント

１．**仮想仕事の原理**　を使う

２．**仮想仕事の原理**：つり合いの状態で、上肢が行う仮の仕事と、その時下肢がされる仮の仕事は等しい

３．上肢の行う仮の仕事を W_B とすると W_B は、上肢の出す力 F_B と移動長さ L_B の積である

４．この時、下肢がなされる仮の仕事を W_A とすると W_A は、下肢が引かれる力 F_A と下肢の移動する長さ L_A の積である

５.仮想仕事の原理より、$W_A = W_B$ であり、**長さと力の積が一定である**

６．**仮想**の意味は以下の通りである

つり合い状態での解析だから、本来は動かない。あえてつり合いの時の力で動くと考えてみるのである。このことを仮想という言葉で表している

７.下肢の重量は動滑車を通して２本の紐で引かれているので、上肢の引く力は、下肢の重量の半分である

８．したがって、$F_A : F_B = 2 : 1$ でありその値は、それぞれ

F_A=8 kg 重＝8・9.8 N

F_B=4 kg 重＝4・9.8 N　　である

９．幾何学の関係により

$L_A : L_B = 1 : 2$ である

10. よって、L_A = 20 cm = 0.2 m　の時

L_B = 40 cm = 0.4 m　である

11．それぞれの仮想の仕事を計算すると

$W_A = 8 \cdot 9.8 \cdot 0.2 = 1.6 \cdot 9.8$ N

$W_B = 4 \cdot 9.8 \cdot 0.4 = 1.6 \cdot 9.8$ N

となり、確かに積は等しく、一定値である

12．つまり、**した仕事**と**された仕事**が等しい

13．**解答**　4．40 cm － 4 kg 重

14．力の単位 kg 重は古い
力の単位はＮにしたい
長さの単位は m にしたい

７．2013ＰＴ午後４８

問題　１日の消費エネルギーは 2000 kcal。１週間で 1 kg の減量(7000 kcal) をするため、１日に 200 kcal の運動を行う場合の、１日当たりの摂取カロリーはどれだけか。

解説とコメント

１．１週間について考える。1 日の消費量が 2000 kcal だから 1 週間の消費量は 2000×7＝14000 kcal である、毎日 200 kcal の運動をすると、1 週間で消費エネルギーが 200×7＝1400 kcal だけ増加する

２．よって、1 週間の消費エネルギーの総計は 15400 kcal である。もしこれと同じだけのエネルギーを食物から摂取すると、体重の減量にはならない。1 週間で 1 kgの減量するためには、それに相当するエネルギー7000 kcal を摂取**しない**ことが必要である

３．したがって、1 週間の摂取量を 15400－7000＝8400 kcal にすると、1 kg の減量が可能となる

４．この値を 7 で割って 1 日分にすると 1200 kcal となる。1 日の摂取エネルギーが 1200 kcal であればよいことになる

別の考え方

５．この問題文は、1 日の消費量が 2000 kcal で、その中の 200 kcal が運動によるものであるとも読める。その場合、１日 1000 kcal 摂取を減らせば 1 週間に 1 kgの減量が可能である。よって、1 日の摂取量は 1000 kcal となる

６．問題としての面白みが、ないのだがこのように読む受験生もいるだろう

８．2013 専門基礎６８

問題　基礎代謝率について正しいのはどれか。

一般の人の「**基礎代謝率(量)**」についての知識を持とう。

９．2013 専基午前６９

問題　同一平面内に働く力ベクトル F_1 と F_2 が、同じ平面上の点 O の回りに作るモーメント M を表す式はどれか。

ただし、O からベクトル F_1 と F_2 の作用線に下した垂線の長さをそれぞれ a、b とする。

１．$M = F_1 + F_2$

２．$M = aF_1 + bF_2$

３．$M = \frac{aF_1 + bF_2}{2}$

４．$M = \frac{F_1 + F_2}{a+b}$

５．$\mathrm{M} = (F_1 + F_2)(a + b)$

解説およびコメント

１．**力ベクトルの作用線**：ベクトルを矢印で描き、その矢印の延長線を**作用線**と呼ぶ

２．**力のモーメント**：トルクともいう
回転中心から力ベクトルの作用線に下した垂線の長さと力の大きさの積である

３．**力のモーメント**の大きさは、回転中心の位置に依存する

４．**力のモーメント**は、大きさだけでなく回転の方向が右回転か左回転かを区別しなければならない

５．この問題で、力のモーメントの大きさは
力 F_1 にたいしては $a \cdot F_1$ であり
力 F_2 にたいしては $b \cdot F_2$ である

６．力のモーメントの合計は、それぞれのモーメントの回転方向が同じ場合には和となるが、逆の場合には差となる

７．解答欄の選択肢の中に、和の式はあるが差の場合の式がない

８．従って、正解は選択肢に中にない

９．力のモーメントの回転方向が考慮されていない。力のモーメントはベクトルである

10．ベクトルを、単純な数値の計算式１つで表すことはできません

１０．2013 専基午後６９

問題　体重 60 kg の人が速度 70 m/分 で平地を歩行した場合、80 kcal を消費するのに必要な歩行時間はどれか。ただし、酸素消費量（ml/min/kg）= 歩行速度（m/min）× 0.1 ＋3.5 とする。

１．　5 分
２．　30 分
３．　60 分
４．　90 分
５．130 分

解説とコメント

１．問題に使用されている用語の意味を覚えよう

２．覚えていない場合、問題に記述された単位から意味を推測することができる

３．問題中に頻繁に出現する ml は、ミリリットルで、この表記の[l ,リットル]は、数値の１と混同され紛らわしい表示である

４．混乱を避けるため、ここでは、
単位リットルには、[l]ではなく[ℓ]を使うことにする

５．**酸素消費量**を A [mℓ·min^{-1}·kg^{-1}]とする：
A は、その人の質量 1 kg 当たり、１分間の酸素消費量であり、酸素量を mℓ（ミリリットル)で表示する

６．問題に記述された**酸素消費量の単位** [mℓ/min/kg]は、誤記である

７．正しい表記は、[mℓ/(min·kg)]
または、[mℓ·min^{-1}·kg^{-1}] である
以下、ここでは後者の表記を用いる

８．**歩行速度**を B [m·min^{-1}]とする
１分間当たりの歩行距離単位は[m]とする

９．問題中の A と B の関係は、次式である

$A = B×0.1+3.5$　　(1)

10．右辺と左辺の単位が同じであるから定数 3.5 の単位は A の単位と同じ
[mℓ·min^{-1}·kg^{-1}]である

11．定数 3.5 の意味は、式(1)の第 1 項が 0 の時つまり、歩かなくても使う酸素消費量である

12．これは、基礎代謝に必要な酸素消費量と考えてよい

13．ただし、その人の質量（体重）1 kg 当たりに換算した、時間 1 分当たりの基礎代謝に対する酸素消費量である

14．人の消費エネルギーと酸素消費量の関係は問題中に示されていない、知識として記憶しておく必要がある

15．**酸素 1 ℓ の消費は、体内で、4.825 kcal のエネルギーの消費に対応する**
重要な対応の式である　　(2)

16．この 4.825 kcal·ℓ$^{-1}$ と式(1)の定数 3.5 から、人の基礎代謝量を計算しよう

17．体重 60 kg の人が運動をせずに安静にして（式(1)の第 1 項を 0 として）1 日過ごした場合、１日の酸素消費量は、
3,5 mℓ·kg^{-1}·min^{-1}×60 kg
×(60×24) min·day^{-1}
であり、計算結果は ＝300 ℓ·day^{-1}

18．酸素消費量とエネルギー消費量の関係式(2)を使うと、1 日のエネルギー消費量は
4.825 kcal·ℓ$^{-1}$×300ℓ·day^{-1}
＝1460 kcal·day^{-1}　となる

19．体重 60 kg の人の基礎代謝量は、1 日当たりおよそ 1500 kcal である

20．次に、式(1)の定数 0.1 について考る
定数 0.1 の単位は A/B の単位と同じである

A/B の単位＝[mℓ・min^{-1}・kg^{-1}]/[m・min^{-1}]
＝ [mℓ・kg^{-1}・m^{-1}]

21. 従って、定数 0.1 の意味は、単位から推測すると、この人が 1 メートル歩行するのに必要な酸素量であり、その値は 0.1 mℓ である。ただし、質量 1 kg 当たりに換算したものである。
22. この値の意味はよく分からないが、B との積は、歩行することによる酸素消費量である
23. 問題に与えられた分速 70m・min^{-1} で歩行する場合、酸素消費量Aは、式(1)に B = 70 を代入して、次式で求まる。
A = 70・0.1＋3.5 = 7.0 + 3.5
= 10.5 mℓ・min^{-1}・kg^{-1} (3)
基礎代謝量の約 3 倍である
24. 質量が 60 ㎏の人の場合、酸素消費量は 1 分当たり、
10.5 mℓ・min^{-1}・kg^{-1}×60 ㎏
＝630 mℓ・min^{-1} = 0.63 ℓ・min^{-1}
25. 式(2)から、この時の消費エネルギーは、
0.63ℓ・min^{-1}×4.825 kcal・ℓ$^{-1}$
= 3.04 kcal・min^{-1} (4)

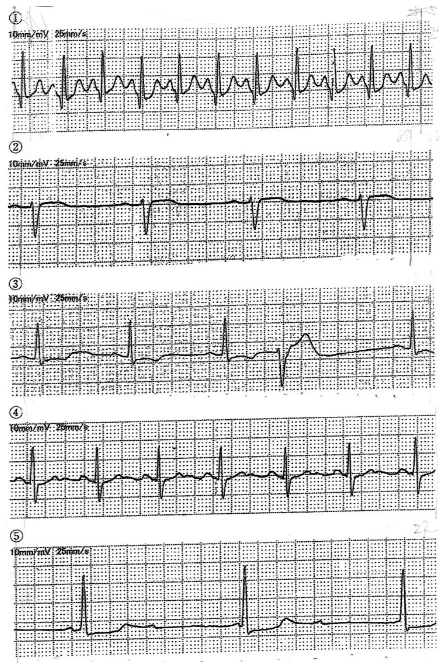
26. 歩行を持続して 80 kcal を消費するには
80 kcal／3.04 kcal・min^{-1}
＝26.3 min
の歩行が必要となる。
27. 解答は、この値に近い値を選べばよい。30 分である。この程度の荒っぽさの数値である
28. この歩行について、さらなる考察を以下に行う
29. 歩行の条件：
70m・min^{-1} で、1 秒間 2 歩とする
1 分間で 120 歩だから 1 歩の歩幅は、
70/120＝0.58.3 m となる
30. これは大人の歩行特徴に合致している

31. この歩行状態で、1 **万歩**の歩行すると 10000／120＝83.3 min の歩行である
32. この運動による全エネルギー消費量は式(4)を使って
83.3 min×3.04 kcal・min^{-1} = 253 kcal
33. この中には基礎代謝量も含まれている式(3)によると、その 2/3、約 170 kcal が、1 **万歩**の歩行による消費エネルギーである
34. 1 **万歩**歩行は、約 90 分の歩行で、消費エネルギーは 170 kcal である

第４９回 2014 年度

1．2014ＰＴ午前１９

問題 運動中のモニター心電図を下に示す。心拍数が７５/分以上であるものはどれか。



解説とコメント
1．心電図を見ると、縦軸と横軸のスケールがチャート紙の左上方に記入されている
縦軸が、10 mm/mV
横軸が、25 mm/s
2．横軸はチャート紙の走査速度であり 1 秒間に 25 mm だけ走査するので、チャート紙の長さから時間が読み取れる。この問題では横軸が重要である
3．心電図チャート紙の横軸は、点線間隔が 1 mm であることを知っておくこと
4．心拍数を二通りの方法で計算した

第１の場合

5．横軸は、5 mm 毎の太線 20 間隔が、100 mm である
6．よって、太線 20 間隔の走査時間は
$\frac{100}{25} = 4\,\mathrm{s}$ である
7．太線 20 間隔の中のパルスの数を、4 で割って 60 をかけると 1 分間の脈拍である

8．パルス数 脈拍
①10 パルス $\frac{10\times 60}{4} = 10\times 15 = 150$
② 4 パルス $\frac{4\times 60}{4} = 60$
③ 4 パルス $\frac{4\times 60}{4} = 60$
④ 6 パルス $\frac{6\times 60}{4} = 6\times 15 = 90$
⑤ 3 パルス $\frac{3\times 60}{4} = 3\times 15 = 45$

第２の場合

9．横軸は、5 mm 毎の太線 22 間隔が 110 mm である
10. 太線 22 間隔の走査時間は $\frac{110}{25} = 4.4\,\mathrm{s}$ である
11. 太線 22 間隔中のパルスの数を 4.4 s で割って 60 をかけると 1 分間の脈拍である

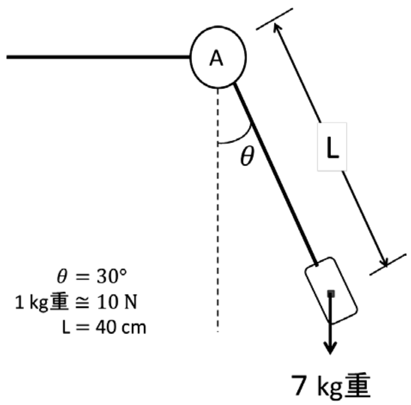
12. パルス数 脈拍
①11 パルス $\frac{11\times 60}{4.4} = 10\times 15 = 150$
② 4 パルス $\frac{4\times 60}{4.4} = \frac{60}{1.1} = 55$
③ 5 パルス $\frac{5\times 60}{4.4} = \frac{5\times 30}{2.2} = 68$
④ 7 パルス $\frac{7\times 60}{4.4} = 7\times\frac{30}{2.2} = 95$
⑤ 3 パルス $\frac{3\times 60}{4.4} = 3\times\frac{30}{2.2} = 41$

13. いずれの計算でも、心拍数が 75/分以上になるのは、①と④である。
14. 試験問題では、心電図のチャート紙が縮小または拡大されているので、試験用紙の図から直接定規で長さを測って計算したのでは、正しい答は得られない

15. したがって、心電図チャート紙の点線１メモリが 1 mm であることを記憶しておく必要がある
16. なお蛇足ではあるが、縦軸のスケールは 10 mm/mV ではなくて、10 mV/mm であろう、答には直接関係はしないけれども

２．2014ＰＴ午前２０

問題　図のように、棒の先に 7 kg重の錘をつけた。この時の A にかかるトルクはどれだけか。ただし、棒の重量は無視できるものとする。



解説とコメント

１．トルク：力のモーメントの英語 torque である。支点から力の作用線に下した垂線の長さと力の大きさの積、この時、回転が時計回りか、反時計回りかを区別せよ
２．kg 重：昔、使われていた力の単位で、1 kg 重 は 9.8 N である、1 kg 重をおよそ 10 N として使われることがある

３．図で角度 $\theta = 30°$ だから、支点から力の作用線に下した垂線の長さ H は、$H = L/2$ である
４．棒の先端に加わる力を下向きに Wとすると、トルク T は、$T = L/2 \times W$である

５．この式に $L = 40\ \mathrm{cm} = 0.4\ \mathrm{m}$と

$W = 7$ kg 重 $\cong 70\ \mathrm{N}$ を代入すると、

$T = L/2 \cdot W = (0.4/2) \cdot 70 = 14\ \mathrm{Nm}$

６．この問題に力の単位が二種類出てくる、

kg 重 と N である、両者の間の換算が問題中に示されている
７. 問題を、**棒の先に 70 N の錘をつけた** としたら換算を示す必要はない。

８．力の単位 N の由来は、kg･m･s^{-2} だから N を使うときの長さは、単位を m にして計算しなければならない。問題には長さをわざわざ cm で与えました
９．無意味な混乱をさける必要があります

３．2014 専基午前６９

問題　質量 m の物体を傾斜角 θ の斜面に沿って距離 L だけ引き上げ、高さ H まで持ち上げた。この時の仕事量 W で正しいものはどれか。ただし、摩擦はないものとし、重力加速度を g とする。

１．mL
２．mgH
３．mgL
４．mg sinθH
５．mg･cosθ･L･sinθ

解説とコメント
１．答は mgH である。その理由は以下の通りである。仕事量 Wは、加えた力 Fと動

かしたその方向の距離 L の積である

２．この問題の場合、$F = mg \cdot \sin\theta$である

３．距離 L と高さ Hには、$H = L \cdot \sin\theta$の関係があることから、$L = \frac{H}{\sin\theta}$ となる

４．従って力 Fと長さ Lの積は、mgH

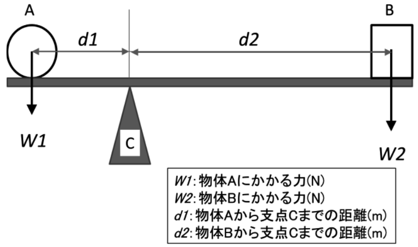
５．これは**位置エネルギー**の増加と呼ばれ、**高さの差**と重力 mg の積になる。このことを知っていると、計算をしなくても答えが mgHになることが分かる

６. ただし、**初めの高さが０m** であること、または、**Hが高さの差**、であることを問題中に明記されるべきである

第５０回 2015 年度

１．2015 専基午前６９

問題　図のように**てこ**が釣り合っている場合、支点Ｃに作用する力の大きさはどれか。ただし、**てこ**の重さはないものとする。



解説とコメント

１．**てこ**のつり合いの条件は、
　条件１．合力が０であること
　条件２．回転しないこと、つまり、
　　時計まわり（右回り）の力のモーメントと、反時計まわり（左周り）の力のモーメントが等しいこと
　この二条件が同時に成り立つことである

２．この問題は、**条件１**．の合力についての問題である。したがって、支点Ｃで、**てこ**に加わる力が上向き *W1*＋*W2* であれば合力は０となる

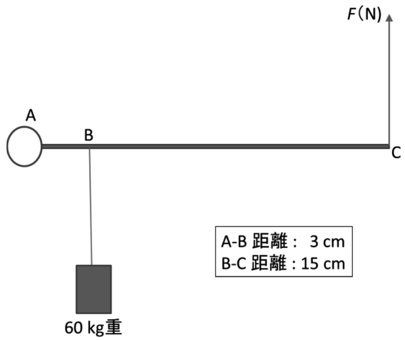
３．**てこ**が釣り合う条件は、**てこ**に加わる力のすべてを考慮することである。設問の「物体Ａにかかる力 *W1*[N]」という文章は適切ではなく、「物体Ａがてこを押す力 *W1*[N]」とするべきである
４．物体Ｂについても同様に「物体Ｂがてこを押す力 *W2*[N]」とするべきである
５．従って、支点Ｃがてこを押す力は上向き *W1*＋*W2* であれば合力は０ N となる

６．問われているのは、支点Ｃに作用する力であるから、作用反作用の法則より同じ大きさで、下向きである

７．この問題では力の方向は問われていない

２．2015ＰＴ午後１９

問題　**てこ**を図に示す。Ａを支点とした棒のＢ点から 60 kg 重の錘を糸で垂らした。棒を水平に支えるためにＣ点にかかる力 F (N) はどれか。ただし、1 N を 100 g 重とし、棒と糸の質量は無視できるものとする。



解説とコメント

１．**前問**と同じつり合いの条件の問題であり前問の**解説**で述べた、**条件２**．の問題である
２．力のモーメントは、支点から力の作用線に下した垂線の長さと力の大きさの積である

３．Ａ点の周りの時計まわり（右回り）の力のモーメントは、3 cm×60 kg 重
４．Ａ点の周りの反時計まわり（左回り）の力のモーメントは、18 cm × F[N]

５．これらを等しいと置くと
　　3 cm × 60 ㎏重＝18 cm × F[N]
　この式を F[N] について解くとよい

６．両辺にある単位 cm は消えてしまい、さらに両辺を 18 で割ると
　　3×(60/18)= F[N]　となる。
　残る単位は残して、解くと、
　　F[N]＝10 ㎏重＝10000 g 重

７．ここで、与えられた換算 100 g 重＝１N を使って、F[N]＝100 N となる

８．問題中に力の単位が二種類、kg 重と N が使われている。そして、100 g 重＝１ N の換算が与えられている

９．問題中の 60 ㎏重の代わりに 600 N としてはいけないでしょうか

10．力の単位 N の組み立て単位は、kg･m･s^{-2} である、従って、数値計算には質量は kg で、長さは m で、時間は秒 s で表した数値を使う必要がある

11．しかし、設問中の長さは cm で与えられており、換算を必要とする

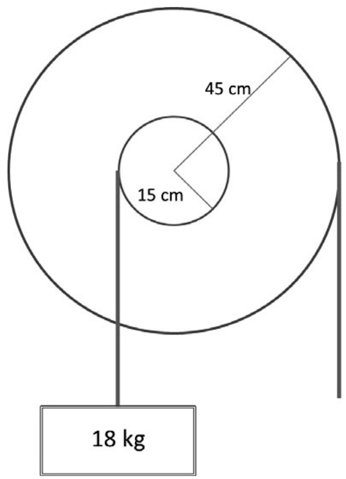
12．出題に際して、単位が統一されていると、受験生に混乱がなくなります

第５１回 2016 年度

１．2016 専基午前６９

問題　図のような輪軸を利用して、力 F で 18 kg の物体を引き上げた（ひもの摩擦と重さは無視できるものとする）。紐を引く最小限の力 F はどれか。

　ただし、100 g の物体を引き上げるのに必要な力を 1 N とする。



１．20 N
２．60 N
３．180 N
４．540 N
５．1620 N

解説とコメント

１．輪軸に加わるすべての力とその力のモーメントついて考える
２．小輪に加わる力は、重力加速度をg とすると

$$18\ \mathrm{kg} \times g\ [\mathrm{ms^{-2}}] = 18\ g\ [\mathrm{N}] \quad (1)$$

３．力のモーメントは、反時計周りに

$$0.15\ \mathrm{m} \times 18\ g\ [\mathrm{N}] \quad (2)$$

４．大輪に加える力を、F[N]とする
５．大輪に加わる力のモーメントは

$$0.45\ \mathrm{m} \times F\ [\mathrm{N}] \quad (3)$$

６．釣り合うためには、式(2)と式(3)が等しくなければならないので

$$0.15\ \mathrm{m} \times 18\ g\ [\mathrm{N}] = 0.45\ \mathrm{m} \times F\ [\mathrm{N}]$$

Fについて解くと

$$F\ [\mathrm{N}] = \frac{0.15 \times 18\ g\ [\mathrm{N}]}{0.45} = 6g\ [\mathrm{N}] \quad (4)$$

７．ここで、$100\ \mathrm{g} = 0.1\ \mathrm{kg}$ の物体を引き上げるのに必要な力は

$$0.1\ \mathrm{kg} \times g[\mathrm{ms^{-2}}] = 0.98\ \mathrm{N} \approx 1\ \mathrm{N}$$

と近似するので、この式の両辺を 10 倍して

$$1\ \mathrm{kg} \times g[\mathrm{ms^{-2}}] \approx 10\ \mathrm{N} \quad \text{となり}$$

式(4)より

$$F = 6\ g = 60\ \mathrm{N} \qquad \text{である}$$

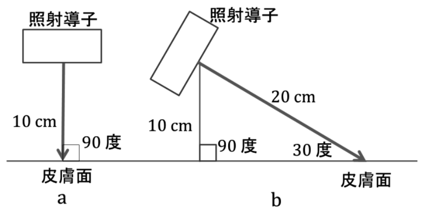
８．重力加速度 $g = 9.8$ を 10 とする近似は、重力に関する理解を妨げる場合があるので注意が必要である

９．力の単位 N の**組立単位**は、$\mathrm{N} = \mathrm{kgms^{-2}}$ であり、計算に使用する長さや質量の単位は、それぞれ m メートル、kg キログラムである。出題にもこれらの単位を使ってもらいたい

10．解答者に混乱を与えないために、問題作製を単純にしたい

２．2016PT 午前４０

問題　極超短波治療の図を示す。
　　　a に対する b の強度はどれか



１．1/2
２．1/4
３．1/6
４．1/8
５．1/16

解説とコメント

１．光を始めとする放射線の強さは、光源からの距離の二乗に反比例して弱くなります
２．b の距離は a の距離の 2 倍であるから

$$\text{強度は } 1/4 \text{ になる} \qquad (1)$$

３．次に、受光面の方向が斜めになればなるほど、弱くなります。それは、受光面積が広くなるからです
４．受光面の法線の方向と光の進行方向のなす角を θ とすると、光（放射線）の強度は、その角の方向余弦 $(\cos\theta)$ で表すことができます
５．この問題では、皮膚面の法線方向と光のなす角は $\theta = 60°$ であり次式となる

$$\cos 60° = 1/2 \qquad (2)$$

６．従って、(1)と(2)を合わせて $1/8$ となる

３．2016PT 午後１５

問題　60 歳の女性、体重 50 kg、急性心筋梗塞発症後、回復期に心肺運動負荷試験を施行した。最高酸素摂取量は毎分 890 mL であった。
　この患者の代謝当量はどれだけか。

１．約 3 METs
２．約 4 METs
３．約 5 METs
４．約 6 METs
５．約 7 METs

解説とコメント

１．代謝当量とは、運動時のエネルギー代謝量の安静座位時のエネルギー代謝量に対する比である
２．式にすると、次式となる

$$\text{代謝当量} = \frac{\text{運動時のエネルギー代謝量}}{\text{安静座位時のエネルギー代謝量}} \quad (1)$$

単位は、分母・分子ともにエネルギーであるので、代謝当量の単位は無名数である。この比の値を METs で示す

３．エネルギー代謝量は、酸素摂取量（$\dot{V}O_2$）に直接関係しており、運動時の酸素摂取量の安静座位時の酸素摂取量に対する比をとると、式(1)の代謝当量を知ることができる
４．普通の人の安静座位時における酸素摂取量（$\dot{V}O_2$）は、体重（質量）1 kg 当たり、1 分間あたりで表すことになっており、その値は（統計的に調べた結果）、

$$3.5\mathrm{mL \cdot kg^{-1} min^{-1}} \quad (2)$$

である。この値を覚えておくと便利である

５．この問題の患者は、心肺運動負荷試験での最高酸素摂取量が毎分 $890\ \mathrm{mL \cdot min^{-1}}$ であるので、体重（質量）1 kg 当たりに換算すると

$$\frac{890\mathrm{mL}\cdot\mathrm{min}^{-1}}{50\ \mathrm{kg}} = 17.8\ \mathrm{mL}\cdot\mathrm{min}^{-1}\mathrm{kg}^{-1} \quad (3)$$

６．従って、代謝当量は、式(3)の式(2)に対する比であるので、次式となる

$$代謝当量 = \frac{17.8}{3.5} = 5.09\ \mathrm{METs}$$

７．安静座位時に体重 1 kg 当たり、１分間当たり 3.5mL の酸素を消費することは、いわゆる基礎代謝エネルギーのことである

８．実際の代謝エネルギーの計算は、
2013 年、問題１０．2013 **専基午後６９**
解説とコメント 15．で注意したように

「**酸素１ℓ の消費は、体内で、**4.825 kcal
のエネルギーの消費に対応する」

ことを使うと、単位 kcal で計算できる

質量 60 kg の成人の一日の基礎代謝量の計算は以下の通りである

$$基礎代謝量 = 60 \times \frac{3.5}{1000} \times 4.825 \times 60 \times 24$$

それぞれの数値の単位を記述すると

$$\frac{\mathrm{kcal}}{\mathrm{day}} = \mathrm{kg}\cdot\frac{\mathrm{m}l\cdot\mathrm{kg}^{-1}\mathrm{min}^{-1}}{\frac{\mathrm{m}l}{l}}\cdot\frac{\mathrm{kcal}}{l}\cdot\frac{\mathrm{min}}{\mathrm{h}}\cdot\frac{\mathrm{h}}{\mathrm{day}}$$

数値を計算すると、次の通りです

$$基礎代謝量 = 1460\ \mathrm{kcal/day}$$

質量 60 kg の人の基礎代謝量は
約 1500 kcal/day である

第５２回 2017 年度

１．2017 **専基午前６９**

問題　立位姿勢が安定しているのはどれか。

１．支持基底面が狭い。
２．重心の位置が高い。
３．床と足底の接触面の摩擦抵抗が小さい。
４．上半身と下半身の重心線が一致している。
５．重心線の位置が支持基底面の中心から離れている。

解説とコメント

１．正解は、４　が期待されています。
２．問題文「立位姿勢が安定している」のは、
「下半身の重心を通る鉛直線と上半身の重心を通る鉛直線が一致し．しかも、それが支持基底面の中心を通る場合」であります。
３．解答欄文中の「重心線」とは、
重心を通る鉛直線のことでしょうか。
「重心線」と言う言葉は、意味不明です。。
４．幾何学の公理では、「重心」は１点であり、
１点を通る直線は無限にあるからです。
５．「重心線」という一言で、「重心点を通る鉛直線」を表すことはできません。
６．さらに、解答４の中に、支持基底面との関係が記述されていません。
７．これは問題の不備です。

あとがき

2014 年版へのあとがき

教科書 **優しい物理学** の原稿を作るために、桧山和美氏、遠山昭雄氏が大きな力をかしてくれました。両氏は広島大学時代の学生さんです。理学部に新設された物性学科に、私が初めて職を得て赴任した時の、初めての学生さんです。研究室を創るための苦労を共にしてくれた方々です。

両氏が私の原稿を通読してくれました。誤字脱字はもちろん、数値の誤りや矛盾する記述をすっかり指摘してくれました。読みやすくするための体裁についても、貴重な示唆を頂きました。

おかげでずいぶん読みやすくなりました。

2014 年 7 月の講義に間に合わせるため、叱咤激励も頂きました。感謝の言葉をどのように述べてよいか、分からないほど、助けていただきました。

深く感謝しています。

2014 年 7 月 14 日

2016 年版へのあとがき

この講義ノートは、長年行なってきた、物理学を専門としない学生のための講義ノートが基になっています。それは、広島大学理学部と島根大学総合理工学部での、教職課程理科のための物理学概論の講義です。

広島工業大学での基礎物理学の講義もよい経験でした。主として力学の講義でしたが、講義を通して、私の独善を修正しました。また、式を使わないで、言葉で説明することに心がけました。よく、分かり易くするためという口実で真実から外れる場合がありますが、私はそうしないことを心に決めました。

私はこの講義ノートで、分かり易く記述するけれども、真実から外れないと、自負しています。そのため受講生からの質問は謙虚に受けとめました。さらに良い記述方法を模索するために役立ちました。

第 III 章には多くの数表が含まれています。エクセルの表に、数値を打ち込んでくれたのは、広島工業大学建築学科に在学していた那須恭奈さんです。ありがとうございました。多くの若い方々の協力で、出来上がりました。

2015 年 10 月 15 日

あとがき

大学時代から師と仰いでいる佐々木祥介氏に深く感謝します。大学時代の同級生です。この教科書を通読し、間違いを正し、筆者の理解不足を補い、注意・コメントを通して惜しみなく教えてくれました。

また、佐々木祥介氏が、図の解像度を上げるように忠告してくれました。具体的には 400 倍に拡大しても読み取れるようにすることを目指すように、その方法を教示してくれました。おかげで図が美しく読みとりが容易になりました。

さらに、佐々木祥介氏と堀秀信氏の示唆により、まえがきを全面的に書き換えました。堅苦しさがすっかりなくなり、読みやすくなりました。

ありがとうだけでは言い尽くせません。

再び遠山昭雄氏が本文全体を通して読み直してくれました。そして多くの訂正箇所を指摘してくれました。心から感謝します。

素人ながら最も厳しい批判者は、北野芳子です。ここは何が書いてあるか分かりませんと、私の独断を強く戒めてくれました。あちらこちら目を通し、分かりやすくするために、用語の間違いや誤解されやすい表現などを見つけ、にくいほど教えてくれました。ありがとう。

2017 年 4 月 17 日